台灣農業研究
JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH
Vol.70 No.4 2021

Research Articles

231 Preliminary Study of Differentiating Imported Tea from Taiwan Tea by Elemental Characteristics
Cheng-Hsiang Tsai, Tsung-Ren Peng, Tsang-Sen Liu, Yu-Wen Lin, and Wen-Jun Zhan

243 New Hybrid of Chinese Kale 'Fengshan No. 1' for Edible Leaves
Hui-Ling Lo, Chen-Yu Lin, San-Tai Wang, and Chien-Ya Hong

253 Evaluation of the Relationship between Growth Variations of Crisphead Lettuce and Climate Conditions through Growth Analysis and Modeling
Chu-Chung Chen, Dar-Yuan Lee, and Kai-Wei Juang

271 Verifying the Circularity of Agricultural Water Using Natural Tracer-Based End Member Mixing Analysis: A Case Study of the Proximal-Fan Region of Changhua
Tsang-Sen Liu, Yu-Wen Lin, Wen-Jun Zhan, and Tsung-Ren Peng

285 Laboratory Evaluation of the Effect of Insecticides for Controlling Brown Planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] and Whitebacked Planthopper [*Sogatella furcifera* (Horváth)] in Chiayi Region
Po-Yu Lai and Shou-Horng Huang

299 Effects of Nitrogen Fertilizer Amounts and Lighting Treatment before Harvest on Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa*) under Protected Structures
Chiao-Ling Hsiao, Chia-Hsun Ho, and Chwen-Ming Yang

ISSN 2790-086X
Published by Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture

台灣農業研究 JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH Vol.70 No.4 2021

ISSN 2790-086X
DOI:10.6156/JTAR

台灣農業研究
JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH
Vol.70 No.4 2021

研究報告

231 以元素特徵區別台灣茶葉與國外茶葉之初步研究
蔡承祥、彭宗仁、劉滄棪、林毓雯、詹婉君

243 葉用芥藍新品種「鳳山1號」之育成
羅惠齡、林楨祐、王三太、洪千雅

253 以生長分析和模式化評估結球萵苣的生長變異與氣候條件之關聯
陳柱中、李達源、莊愷瑋

271 以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性—以彰化扇頂區為例
劉滄棪、林毓雯、詹婉君、彭宗仁

285 殺蟲劑對嘉義地區水稻褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 與白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 之室內藥效評估
賴柏羽、黃守宏

299 氮肥施用量與採收前光照處理對設施栽培圓葉萵苣生長與硝酸鹽含量之影響
蕭巧玲、何佳勳、楊純明

行政院農業委員會農業試驗所出版

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH Vol.70 No.4 2021

《台灣農業研究》編審會

總編輯

謝廷芳／農業試驗所植物病理組

領域主編 (按筆劃序)

王強生／國立中興大學農藝學系
王淑珍／國立台灣大學農藝學系
古新梅／國立中興大學農藝學系
安寶貞／農業試驗所植物病理組
吳文哲／國立台灣大學昆蟲學系
呂秀英／苗栗區農業改良場
杜宜殷／國立台灣大學園藝暨景觀學系
沈偉強／國立台灣大學植物病理與微生物學系
林彥蓉／國立台灣大學農藝學系
林慧玲／國立中興大學園藝學系
侯豐男／國立中興大學昆蟲學系
高景輝／國立台灣大學農藝學系
張永和／靜宜大學食品營養系
張瑞璋／農業藥物毒物試驗所
莊愷瑋／國立嘉義大學農藝學系
郭寶錚／國立中興大學農藝學系
陳右人／國立台灣大學園藝暨景觀學系
陳世銘／國立台灣大學生物產業機電工程學系
陳宗禮／國立中興大學農藝學系
陳郁蕙／國立台灣大學農業經濟學系
陳健忠／農業試驗所應用動物組
陳琦玲／農業試驗所農業化學組
曾夢蛟／國立中興大學園藝學系
黃振文／國立中興大學植物病理學系
黃裕銘／國立中興大學土壤環境科學系
黃肇家／農業試驗所作物組
黃鵬林／國立台灣大學園藝暨景觀學系
楊正澤／國立中興大學昆蟲學系
路光暉／國立中興大學昆蟲學系
鄒裕民／國立中興大學土壤環境科學系
劉力瑜／國立台灣大學農藝學系
蔡致榮／農業試驗所
鍾文鑫／國立中興大學植物病理學系
簡立賢／國立中興大學應用經濟學系
顏國欽／國立中興大學食品暨應用生物科技學系

邀請領域主編

石憲宗／農業試驗所應用動物組
宋妤／國立中興大學園藝學系
童慶斌／國立台灣大學生物環境系統工程學系

編輯助理

王立蓉／農業試驗所《台灣農業研究》期刊編輯室
王紫瑜／農業試驗所《台灣農業研究》期刊編輯室

編輯顧問

吳宜晏／農業試驗所技術服務組
陳烈夫／農業試驗所技術服務組

台灣農業研究

第七十卷　第四期　　中華民國一一〇年十二月三十一日

出版者　行政院農業委員會農業試驗所
發行人　林學詩
總編輯　謝廷芳
地址　413008 台中市霧峰區萬豐里中正路 189 號
網址　http://www.tari.gov.tw/jtar
電話　(04)2331-7236
E-mail　jtar@tari.gov.tw
線上投審稿系統　https://www.ipress.tw/J0042

編印　Ainosco Press
地址　234634 新北市永和區成功路一段 80 號 18 樓
電話　(02)2926-6006
E-mail　press@airiti.com

定價　新台幣一七五元
展售門市　1. 國家書店 / 104472 台北市松江路 209 號 1 樓 / 電話 : (02)2518-0207
國家網路書店 http://www.govbooks.com.tw
2. 五南文化廣場 / 400002 台中市中山路 6 號 / 電話 : (04)2226-0330

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):231–242 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0001

研究報告

以元素特徵區別台灣茶葉與國外茶葉之初步研究

蔡承祥[1]　彭宗仁[2]　劉滄棪[3,*]　林毓雯[4]　詹婉君[5]

摘要

蔡承祥、彭宗仁、劉滄棪、林毓雯、詹婉君。2021。以元素特徵區別台灣茶葉與國外茶葉之初步研究。台灣農業研究 70(4):231–242。

本試驗分析茶葉之元素含量，並透過主成分分析 (principal component analysis; PCA) 數據以區分國外茶葉及台灣茶葉。國外茶葉包括中國、越南、馬來西亞、印度及斯里蘭卡；分析之元素有 3 類，包括微量元素 (銀、砷、硼、銦、鎘、鈰、鈷、鉻、銫、銅、鎵、鍺、鉬、鎳、鉛、銣、硒、鋨、鈦、釩、鎢、鋅、鋯)，風化特徵元素 (鋁、鐵、錳)，以及肥料特徵元素 (鈣、鉀、鎂、磷、硫)。結果顯示，以單一元素之濃度比較無法達到區分國外茶葉及台灣茶葉的效果；然而，相關元素經由 PCA 處理則能達到區分目的。本試驗以微量元素 (T)、微量元素和風化特徵元素 (TW)、微量元素和肥料特徵元素 (TF)、所有元素 (A) 四類數據組分別進行 PCA 處理。結果顯示，除 TF 數據組外，其餘 3 類數據組經 PCA 處理後均能區分出台灣茶葉及國外茶葉。本研究之數據處理經驗與結果可提供未來其他農產品進行產源鑑別時之重要參考依據。

關鍵詞：元素含量、鑑別非台灣茶、主成分分析。

前言

過去 10 年有關追溯農作物來源之研究，多以植體之元素種類及含量特徵做為判定依據 (Marcos *et al*. 1998; Fernández-Cáceres *et al*. 2001; Moreda-Piñeiro *et al*. 2001; Moreda-Piñeiro *et al*. 2003; Karak & Bhagat 2010)。這是因為植物體的元素多來自於土壤，而土壤的元素特徵主要與母質、施肥歷程有關。因此，經由植體吸收，一地區之土壤母質及環境條件特徵便反映在植體之特定元素含量上。因此，植物體中的元素含量特徵便可做為追溯農作物來源之依據。

植體中的元素大致可分為大量元素 (macronutrient elements) 及微量元素 (trace elements) (Briskin 2010)。大量元素占植物體的 90% 以上 (Atkinson 1986)，如碳 (C)、鈣 (Ca)、氫 (H)、鉀 (K)、鎂 (Mg)、氮 (N)、氧 (O)、磷 (P)、硫 (S) 等。大量元素並非全部來自於土壤，例如 H、O 原子主要來自於植物吸收的水分子；C 原子來自於空氣中的二氧化碳因光合作用而固定在植體內；Ca、K、Mg、N、P、S 原子則來自於土壤與肥料，經根吸收後進入植物體內。相較而言，微量元素占植物體的 0.01% 以下；雖然微量元素在植物體中含量低，但多為植物成長所需的必要元素 (Mortvedt 2000)。因植體之微量元素大部分來自於土壤母質，所以分析植物體質的微量元素含量能反映植物所生長的環境與土壤背景。例如，台灣東部由於土壤母質富集鉻 (Cr)、鎳 (Ni)，因此造成該區植體之 Cr、Ni 含量較台灣其他地區高 (Liu *et al*. 2007)。Junba *et al*. (1995) 發現非洲肯亞西部山區的牧草中銅 (Cu) 與 硒 (Se) 的含量與土壤

投稿日期：2021 年 3 月 19 日；接受日期：2021 年 6 月 15 日。
* 通訊作者：tsliu@tari.gov.tw
[1] 國立中興大學土壤環境科學系學士。台灣 台中市。
[2] 國立中興大學土壤環境科學系教授。台灣 台中市。
[3] 農委會農業試驗所農業化學組研究員。台灣 台中市。
[4] 農委會農業試驗所農業化學組副研究員。台灣 台中市。
[5] 國立中興大學土壤環境科學系研究助理。台灣 台中市。

中的濃度有高度關聯，因此分析牧草中 Cu、Se 含量可分辨各類牧草來源。

自古以來，茶便是世界重要的飲品。不同產區的茶葉會有不同的風味，因此鑑別茶葉的來源地在農產品是一重要的議題。過去對於茶葉產地鑑別的研究也都應用上述元素含量特徵的觀念，也就是分析茶葉中元素含量的特徵，進而透過化學計量分析 (chemometrics) 予以區別 (Marcos *et al*. 1998; Fernández-Cáceres *et al*. 2001; Moreda-Piñeiro *et al*. 2001; Moreda-Piñeiro *et al*. 2003; Karak & Bhagat 2010)。例如，Marcos *et al*. (1998) 分析產自孟加拉、斯里蘭卡、中國、印度、日本、非洲，以及 2 個未知茶葉之元素包括鋁 (Al)、鋇 (Ba)、鈣 (Ca)、鎘 (Cd)、鈷 (Co)、鉻 (Cr)、銫 (Cs)、銅 (Cu)、鐵 (Fe)、汞 (Hg)、鑭 (La)、鋰 (Li)、鎂 (Mg)、錳 (Mn)、釹 (Nd)、鎳 (Ni)、鉛 (Pb)、鐠 (Po)、銣 (Rb) 、硒 (Se) 、錫 (Sn)、鍶 (Sr)、鈦 (Ti)、釩 (V)、鋅 (Zn) 和鋯 (Zr) 的含量，經主成分分析 (principal components analysis; PCA) 後可區分出非洲茶葉、非中國茶葉、中國茶葉、未知茶葉及各別獨立的茶葉 5 個部分；其主要之區分元素為 Al、Ca、Fe、Mg 及 Mn；這些元素與氣候因子有關，因為高溫高濕氣候會造成高度風化的土壤，而此高度風化的土壤其中 Al、Fe、Mn 含量會偏高，而 Ca、Mg 含量會偏低 (Kämpf *et al*. 2000)。再者 Pilgrim *et al*. (2010) 收集中國、印度、斯里蘭卡及台灣 4 個地區的茶葉，分析茶葉中的鋇 (Ba)、鉍 (Bi)、鎘 (Cd)、鈰 (Ce)、鈷 (Co)、鉻 (Cr)、銫 (Cs)、銅 (Cu)、銪 (Eu)、鎵 (Ga)、鑭 (La)、鈮 (Nb)、鎳 (Ni)、鉛 (Pb)、鐠 (Pr)、銣 (Rb)、鍶 (Sr)、鈦 (Ti)、鉈 (Tl)、釔 (Y) 以及碳 (C)、氫 (H) 同位素，並以線性判別分析 (linear discriminant analysis; LDA) 結果可區分中國與台灣、印度及斯里蘭卡 3 群產地。

本研究團隊長期研究目標是擬透過分析農產品中的元素特徵，佐以相關統計分析，期能建立區別台灣農產品與他國農產的方法及經驗，而茶葉是我們第一個是標的試驗作物。茶樹 (*Camellia sinensis*) 為台灣重要的經濟作物，台灣製茶技術更是世界聞名，因此如何鑑別是否為台灣原產之茶葉至為重要。如前述過去文獻的研究中，在利用化學計量分析時對於化學元素 (參數) 之擇取並未被探討過。不適當的化學元素進入統計分析可能造成不正確之判釋。因此，本篇試驗即探討常見之不同元素類別如微量元素、風化特徵元素及肥料特徵元素在 PCA 處理的適用性，期能以此初步試驗之經驗成果，作為後續應用在其他農產品鑑別之重要參考依據。

材料與方法

茶葉標本

在本試驗中主要分 2 個族群去比較：台灣茶及非台灣茶 (外國茶)；台灣茶 12 個標本，非台灣茶 8 個，在統計處理上此 2 族群數目尚可匹配。台灣茶葉 12 標本於 2011–2012 年間直接購自南投縣境內之茶農，計有名間鄉標本 6 個 (茶種計有紅玉 1 個、金萱 2 個、四季春 1 個、烏龍茶 2 個)，鹿谷鄉標本 4 個 (均為烏龍茶)，仁愛鄉 2 個 (金萱及烏龍茶各 1 個)。國外茶葉共計 8 個，包含中國標本 3 個 (烏龍茶 2 個及紅茶 1 個)，越南 1 個 (未標示茶種)，馬來西亞 1 個 (紅茶)，印度 1 個 (未標示茶種)，斯里蘭卡 2 個 (紅茶)。由於國外茶葉由當地直接取得不易，因此這些標本是在台灣購買而在包裝上標示明確國家產地之茶葉。

元素分析

本試驗分析之元素，依其來源特性可分為三類：(1) 微量元素，包括銀 (Ag)、砷 (As)、硼 (B)、鋇 (Ba)、鎘 (Cd)、鈰 (Ce)、鈷 (Co)、鉻 (Cr)、銫 (Cs)、銅 (Cu)、鎵 (Ga)、鍺 (Ge)、鉬 (Mo)、鎳 (Ni)、鉛 (Pb)、銣 (Rb)、硒 (Se)、鍶 (Sr)、鈦 (Ti)、釩 (V)、鎢 (W)、鋅 (Zn)、鋯 (Zr)。一般而言，微量元素在植物中的含量少，且人為添加的機率低，故可真實地反映茶葉產地之土壤母質特徵。(2) 風化特徵元素，包括鋁 (Al)、鐵 (Fe)、錳 (Mn)。在土壤中 Al、Fe、Mn 氧化物為土壤風化程度指標 (Kämpf *et al*. 2000)；風化程度較高之土壤其 Al、Fe、Mn 氧化物含量也高。同一國家內不

同地區土壤雖有相似之母質 (微量元素特徵)，但可能因風化程度相異造成各地植體內 Al、Fe、Mn 含量變異大。因此，Al、Fe、Mn 之風化特徵元素亦如微量元素，可能有區域性之差異。(3) 肥料特徵元素，包括鈣 (Ca)、鉀 (K)、鎂 (Mg)、磷 (P)、硫 (S)。這些元素為肥料中常見之元素，亦為植體中的大量元素。各茶葉產地茶農之施肥習性可能不同，因此，Ca、K、Mg、P、S 等肥料特徵元素的差異可反映在植體中。

茶葉標本採集編錄後以瑪瑙研缽磨碎成細粉，再置於烘箱 (RHD602, RISEN, Taichung, Taiwan) 以 70℃烘乾 12 h。之後秤取 0.25 g 的樣品放置於消化瓶中，加入 5 mL 的濃硝酸及 0.5 mL 的過氧化氫之消化液，放入微波萃取系統 (Microwave Extraction System, MARS 6 Extraction, CEM, Matthews, NC, USA) 中加熱至 200℃，維持 10 min。當定量至 100 mL 再以 Whatman 42 號濾紙過濾，濾液保存待測。本試驗以感應耦合電漿原子發射光譜分析儀 (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy; ICP-OES; Jobin Yvon ULTIMA 2C, HORIBA, Kyoto, Japan) 測定肥料及風化特徵元素，及以感應耦合電漿質譜儀 (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy; ICP-MS; 7500 ICP-MS, Agilent, Santa Clara, CA, USA) 測定微量元素。

茶葉標本分析同時以空白試驗及標準添加，確認樣品中有無基質干擾或所用的檢測方法是否適當。分析結果原則以 mg kg^{-1} 表示，如濃度過大則以 % 表之。至少每 10 個樣品執行一個重複樣品分析。若重複分析差異大於 5%，則重複樣品之分析。

主成分分析 (PCA)

PCA 主要是藉由多數據整合為單一變項的線性組合來解釋其變項的共同變數結構，以達到資料簡化與解釋的目標。簡單來說，將茶葉元素測得的元素含量之數據作為資料點，透過資料點找到一條軸 (線性函數或成分)，當資料點投影至軸時，讓各點的距離在軸上有最大的變異量，達到區分的效果。再利用同方法找到第 2 條新軸，再找第 3、4、5 條軸等，且各軸相互垂直，使資料點在兩軸的變異不會重疊。

各軸資料點 (投影點) 的變異量被稱為特徵值，擁有最大特徵值的軸被命名為主成分一 (PC1)；第 2 大解釋變異量的軸為主成分二 (PC2)，以此類推。資料點在主成分中得到的大小，也就是負荷量 (loading)，亦為資料點與主成分的相關係數，資料點的在主成分的負荷量越大，代表它對此主成分的影響力越高。

本研究使用 SPSS 19.0 版軟體執行 PCA，各成分是以主成分方法萃取，得點 (score) 則是以迴歸方法計算儲存。結果解釋如下：(1) 使用主成分分析可透過樣品於成分上的得點，並相互作圖，作為區分來源。(2) 主成分分析能萃取樣品之間的共同性 (communality)，也就是根據各成分中主特徵之關係，找出隱藏因子，通常會給予隱藏因子名稱。(3) 依據特徵與成分的相關係數大小，也就是負荷量大小，萃取出主要特徵，而負荷量越大，則此特徵於成分的影響力越高；反之，若特徵與成分負荷量越小，則此特徵於成分的影響力越小。(4) 主成分分析中會依據成分的解釋量選擇負荷量最大的幾個特徵作為主特徵，主特徵代表影響此成分最大的幾個特徵。

結果與討論

元素含量特徵

微量元素

由 21 個微量元素含量分析結果顯示，台灣茶葉的鈦及硒含量似有異於國外茶葉的現象。台灣茶葉的鈦含量分布範圍從 0.566–0.723 mg kg^{-1} (圖 1A)，平均值為 0.627 mg kg^{-1}；此值低於國外茶葉平均含量的 1.083 mg kg^{-1}。然而中國茶葉鈦含量範圍為 0.522–1.957 mg kg^{-1}，部分與台灣茶葉重疊。此外，台灣茶葉的硒含量範圍為 0.018–0.043 mg kg^{-1} (圖 1B)，平均為 0.028 mg kg^{-1}。其他國家茶葉除馬來西亞與印度外，硒含量則皆大於 0.05 mg kg^{-1}。馬來西亞茶葉與印度茶葉的硒含量落於台灣茶葉之範圍內，分別為 0.019 mg kg^{-1} 及 0.032 mg kg^{-1}。

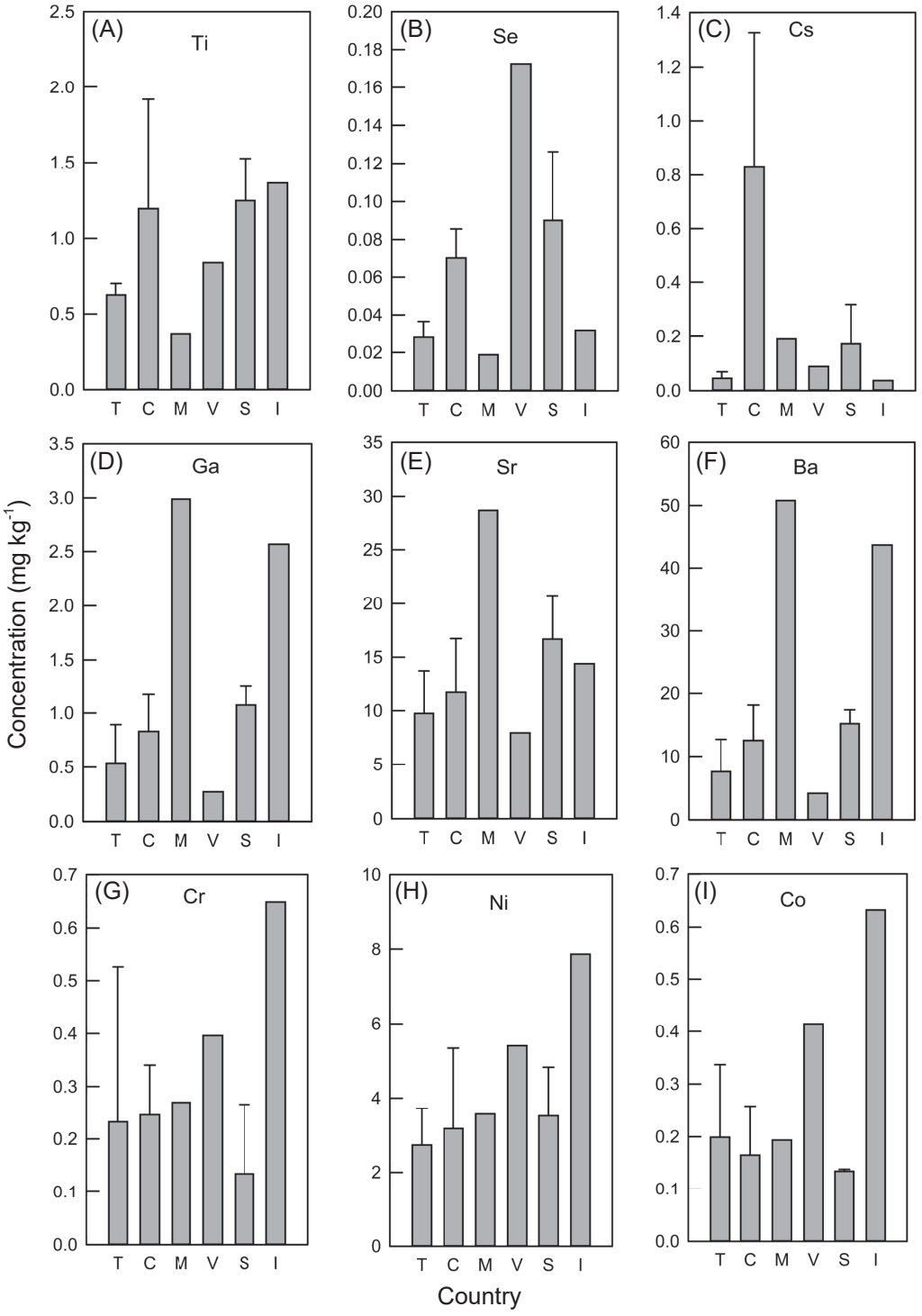


圖 1. 各國茶葉之微量元素含量比較圖。(A) 鈦；(B) 硒；(C) 銫；(D) 鎵；(E) 鍶；(F) 鋇；(G) 鉻；(H) 鎳；(I) 鈷。T：台灣；C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度。

Fig. 1. Diagrams showing trace-element concentrations of tea samples of each country. (A) Ti; (B) Se; (C) Cs; (D) Ga; (E) Sr; (F) Ba; (G) Cr; (H) Ni; and (I) Co. T: Taiwan; C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India.

中國茶葉的元素含量特色是銫含量較其他國家為高 (圖 1C)。中國茶葉的銫含量範圍為 0.265–1.170 mg kg^{-1}，平均含量為 0.832 mg kg^{-1}。其他國家茶葉的銫含量除斯里蘭卡之 SB01 標本外，餘皆低於 0.100 mg kg^{-1}，平均值為 0.071 mg kg^{-1}。斯里蘭卡 SB01 標本之銫含量為 0.276 mg kg^{-1}。

馬來西亞茶葉的鎵、錸、銀含量最高 (圖 1D–1F)。馬來西亞茶葉的鎵含量為 2.990 mg kg^{-1}，除印度茶葉的鎵含量達 2.569 mg kg^{-1} 外，其餘國家茶葉之含量皆小於 2 mg kg^{-1}。馬來西亞茶葉錸含量達 28.727 mg kg^{-1}，其他國家平均含量為 10.951 mg kg^{-1}。在銀方面，馬來西亞茶葉與印度茶葉二者有較高之值，分別為 50.821 mg kg^{-1}、43.687 mg kg^{-1}，其餘國家之平均含量小於 10 mg kg^{-1}。

印度茶葉的鉻、鎳、鈷含量最高 (圖 1G–1I)。印度茶葉的鉻含量為 0.649 mg kg^{-1}，其餘國家之平均含量約 0.235 mg kg^{-1}。印度茶葉的鎳含量為 7.866 mg kg^{-1}，其他國家茶葉的平均含量約 3.069 mg kg^{-1}。印度茶葉的鈷含量為 0.632 mg kg^{-1}，其他國家之含量均低於 0.5 mg kg^{-1}。

越南及斯里蘭卡茶葉在元素含量方面較無明顯特徵。此外，各國茶葉在硼、銅、鋅、鎘、鉛、砷、鍺、銣、鋯、鉬、銀、鈰、錫、磷、硫、鉀、鈣、鐵、錳、鋁含量方面皆無明顯或規律之差異。

風化特徵元素

分析結果顯示各國茶葉之風化特徵元素鐵、鋁、錳含量相互重疊 (圖 2)，無明顯之可區別元素。以鐵而言 (圖 2A)，台灣茶葉鐵含量介於 55.59–111.83 mg kg^{-1}，平均為 78.87 mg kg^{-1}；國外茶葉鐵含量介於 48.17–121.81 mg kg^{-1}，平均為 84.50 mg kg^{-1}，台灣茶葉鐵含量重疊於國外茶葉。鋁、錳二元素亦有同樣的現象 (圖 2B–2C)；台灣茶葉鋁含量介於 313.28–994.91 mg kg^{-1}，平均為 569.01 mg kg^{-1}；國外茶葉的鋁含量介於 359.51–1,302.13 mg kg^{-1}。台灣茶葉的錳含量介於 308.35–1,314.50 mg kg^{-1}，平均為 756.28 mg kg^{-1}；國外茶葉的錳含量介於 329.70–1,626.02 mg kg^{-1}，平均為 912.37 mg kg^{-1}。因此，從上述鐵、鋁、錳之含量特徵比較，無法區別台灣茶葉與國外茶葉。

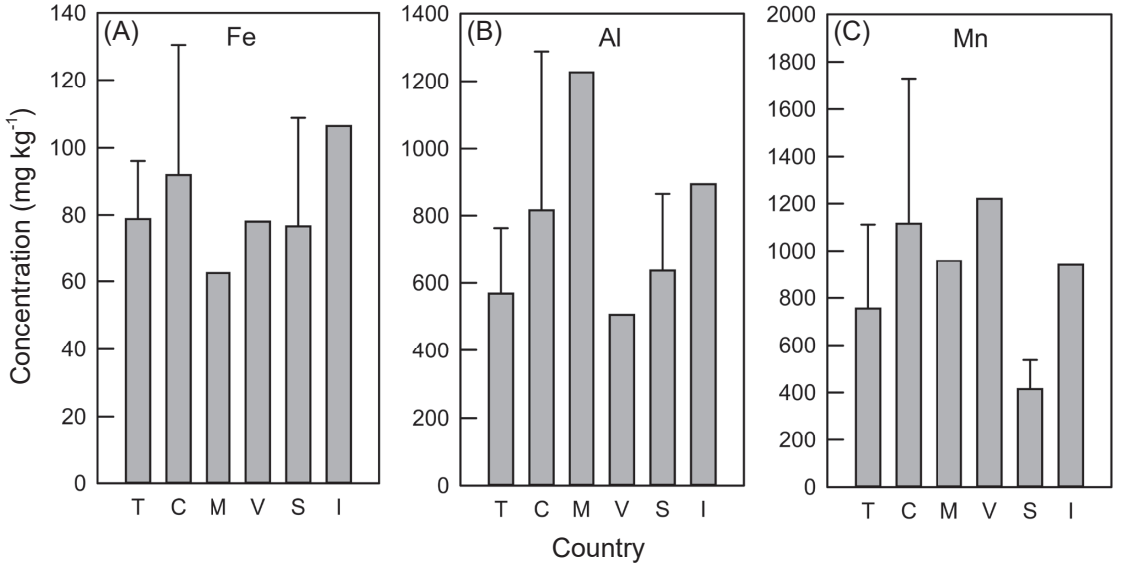


圖 2. 各國茶葉之風化特徵元素含量比較圖。(A) 鐵；(B) 鋁；(C) 錳。T：台灣；C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度。

Fig. 2. Diagrams showing weathering-element concentrations of tea samples of each country. (A) Fe; (B) Al; and (C) Mn. T: Taiwan; C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India.

肥料特徵元素

由肥料特徵元素磷、硫、鉀、鈣及鎂的分析結果顯示 (圖 3)，台灣茶葉所有的肥料特徵元素含量皆與國外茶葉無明顯差異。以磷而言 (圖 3A)，台灣茶葉含量的平均值及分布範圍分別為 0.28% (0.22–0.32%)，國外之值為 0.26% (0.18–0.43%)。以硫而言 (圖 3B)，台灣茶葉含量的平均值及分布範圍分別為 0.21% (0.16–0.27%)，國外之值為 0.23% (0.20–0.26%)。以鉀而言 (圖 3C)，台灣茶葉含量的平均值及分布範圍分別為 1.74% (1.36–2.15%)，國外之值為 1.80% (1.25–2.35%)。以鈣而言 (圖 3D)，台灣茶葉含量的平均值及分布範圍分別為 0.39% (0.31–0.50%)，國外之值為 0.43%

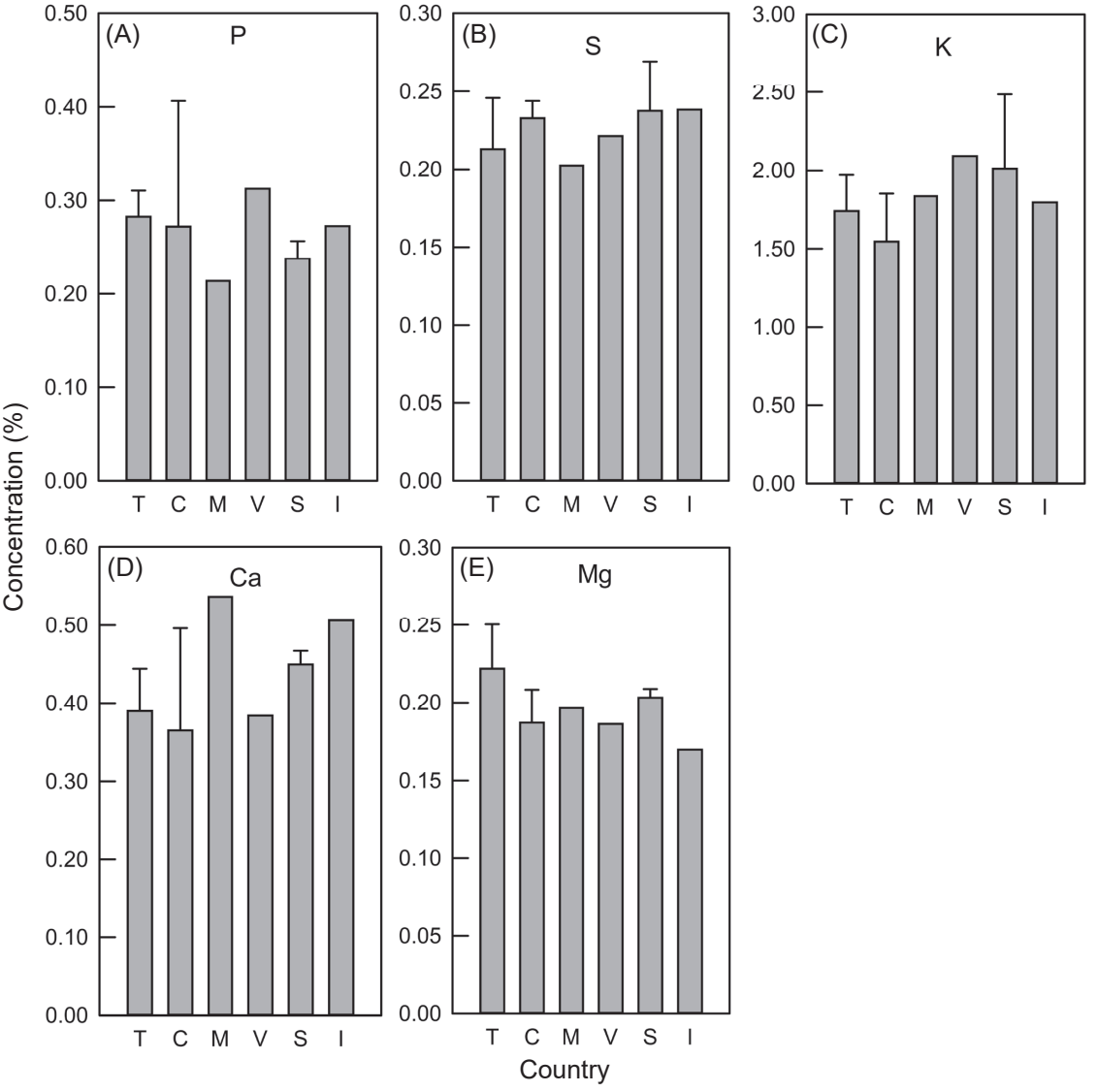


圖 3. 各國茶葉之肥料特徵元素含量比較圖。(A) 磷；(B) 硫；(C) 鉀；(D) 鈣；(E) 鎂。T：台灣；C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度。

Fig. 3. Diagrams showing fertilizer-element concentrations of tea samples of each country. (A) P; (B) S; (C) K; (D) Ca; and (E) Mg. T: Taiwan; C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India.

(0.29–0.54%)。以鎂而言 (圖 3E)，台灣茶葉含量的平均值及分布範圍分別為 0.22% (0.17–0.28%)，國外之值為 0.19% (0.16–0.21%)。由上述肥料特徵元素含量特徵比較，也無法區別台灣茶葉與國外茶葉。

綜上所述，以目前之分析結果而言，目前無一個元素含量特徵可直接清楚辨別出台灣茶葉與國外茶葉。

主成分分析

本試驗分以微量元素 (T)、微量元素和風化特徵元素 (TW)、微量元素和肥料特徵元素 (TF)、所有元素 (A) 等四種數據組進行 PCA 分析。

微量元素數據組 (T)

本數據組共有 23 個元素含量作為特徵，PCA 分析結果顯示 (表 1)，在 T-PC4 以下的成分能解釋變異量已低於 10%，能反映的特徵已過少，故選取 T-PC1 至 T-PC4。T-PC1 的主要特徵為銅、砷、鈦、釩及鎢，解釋變異量為 24.40%；T-PC2 的主要特徵為硼、鎘、鉛及鈰，解釋變異量為 19.07%；T-PC3 的主要特徵為鎵、鍶及鋇，解釋變異量為 13.36%；T-PC4 的主要特徵為鉬及硒，解釋變異量為 10.18%。

表 1. 各成分解說總變異量。

Table 1. Amount of variance of each principal component.

	Eigenvalues		
Component	Total	Amount of variance (%)	Cumulative (%)
T-PC1	5.61	24.40	24.40
T-PC2	4.39	19.07	43.48
T-PC3	3.07	13.36	56.84
T-PC4	2.34	10.18	67.02
T-PC5	2.04	8.86	75.87
TF-PC1	5.90	21.07	21.07
TF-PC2	4.57	16.33	37.40
TF-PC3	4.22	15.06	52.45
TF-PC4	2.91	10.40	62.85
TF-PC5	2.28	8.16	71.01
TW-PC1	6.19	23.80	23.80
TW-PC2	4.68	18.00	41.80
TW-PC3	3.89	14.97	56.77
TW-PC4	2.61	10.05	66.82
TW-PC5	2.06	7.92	74.74
A-PC1	6.38	20.59	20.59
A-PC2	5.39	17.40	37.99
A-PC3	4.62	14.89	52.88
A-PC4	3.14	10.13	63.01
A-PC5	2.36	7.62	70.63

由 T-PC1、T-PC2、T-PC3 及 T-PC4 各成分間彼此作圖比較顯示，T-PC1 對 T-PC4 之作圖能明顯區分台灣茶葉與國外茶葉 (圖 4)，總解釋變異量為 34.58%。台灣茶葉 T-PC1 的得點分布為 -1.234–0.702，國外茶葉為 -0.469–2.941；台灣茶葉 T-PC4 的得點分布為 -0.231–1.628，國外茶葉為 -2.006–0.197 (圖 4)。依 T-PC1 的主要特徵而言，由負荷量大小依序為鈦、釩、銅、砷及鎢 (表 1)。目前並不清楚 T-PC1 的隱藏因子為何，除了砷元素以外，其他皆為過渡金屬。另一方面，T-PC4 的主要特徵負荷量為鉬及硒，目前也不清楚 T-PC4 的隱藏因子為何。

微量元素和風化特徵元素數據組 (TW)

本數據組共有 26 個元素含量作為特徵，PCA 分析結果顯示 (表 1)，TW-PC4 以下的成分解釋變異量已小於 10%，故選取 TW-PC1 至 TW-PC4。TW-PC1 的主特徵為砷、鈦、釩、鍺及鐵，解釋變異量為 23.80%；TW-PC2 的主特徵為硼、鎘、鉛及鈰，解釋變異量為 18.00%；TW-PC3 的主特徵為鋇、鍶及鋁，解釋變異量為 14.97%；TW-PC4 的主特徵為銣及銫，解釋變異量為 10.05%。在上述各主成分之主特徵中，鐵、鋁為風化特徵元素。

由 TW-PC1、TW-PC2、TW-PC3 及 TW-PC4 各成分間彼此作圖比較顯示，TW-PC1 對 TW-PC4 作圖亦可區分台灣茶葉與國外茶葉 (圖 5)。數據組 T 與 TW 之主特徵相較，T-PC1 中的銅及鎢被鍺及鐵取代；T-PC4 之主特徵則與 TW-PC4 不同。TW-PC1 中的鐵為土壤風化因子，代表土壤風化因子對鑑別能力具有影響力。因此，微量元素加入風化特徵元素的組合亦能區分台灣茶葉與國外茶葉。

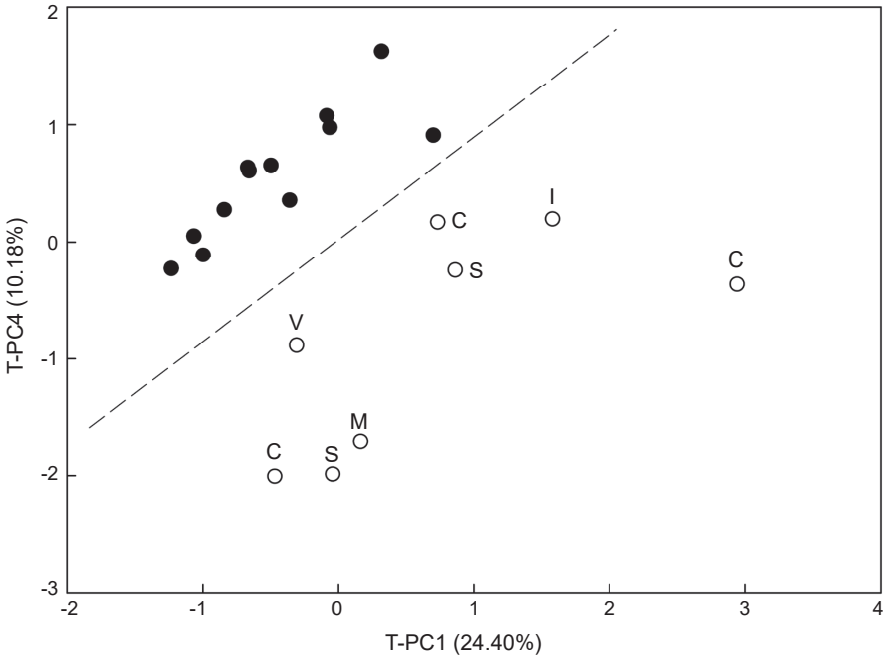


圖 4. T-PC1 與 T-PC4 之作圖。●：台灣茶葉；○：國外茶葉 (C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度)。

Fig. 4. Plot of T-PC1 vs. T-PC4. ● : Taiwan tea; ○ : Foreign tea (C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India).

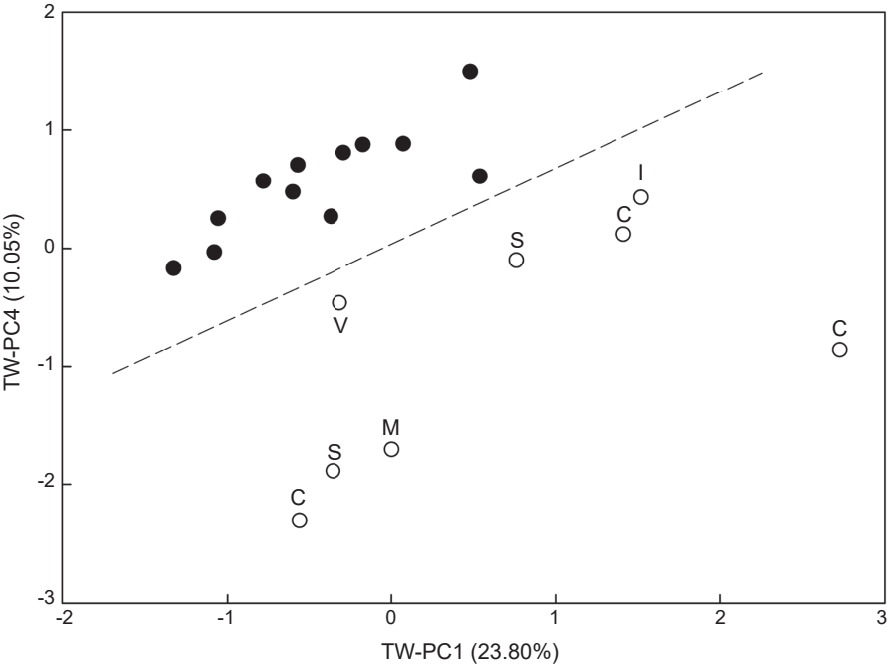


圖 5. TW-PC1 與 TW-PC4 之作圖。●：台灣茶葉；○：國外茶葉 (C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度)。

Fig. 5. Plot of TW-PC1 vs. TW-PC4. ● : Taiwan tea; ○ : Foreign tea (C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India).

微量元素和肥料特徵元素數據組 (TF)

本數據組共有 28 個元素含量作為特徵，PCA 分析結果顯示 TF-PC4 以下的成分解釋變異量已小於 10%，故選取 TF-PC1 至 TF-PC4 (表 1)，TF-PC1 的主特徵為銅、鋅、砷、鈦及釩，解釋變異量為 21.07%；TF-PC2 的主特徵為硼、鎘、鉛及鈰，解釋變異量為 16.33%；TF-PC3 的主特徵為銣、銀、鈰及鈣，解釋變異量為 15.06%；TF-PC4 的主特徵為鉬及硫，解釋變異量為 10.40%。在主特徵中，硫為肥料特徵元素。

然而由 TF-PC1、TF-PC2、TF-PC3 及 TF-PC4 各成分間彼此作圖比較，無論何種組合皆無法明顯區分台灣茶葉與國外茶葉。以圖 6 之 TF-PC1 對 TF-PC4 作圖為例，各有 1 個中國茶葉及馬來西亞茶葉落在台灣群組與國外群組之重疊區帶。至於肥料特徵元素的加入造成 PCA 區分能力降低的原因為台灣茶葉與國外茶葉的肥料特徵元素含量差異特徵不及於國外茶葉彼此間含量差異特徵來的明顯。這顯示台灣各地區施肥習性差異頗大，甚至可能大於各國間之差異，導致模糊 (降低)了 PCA 區分台灣茶葉與國外茶葉的能力。

所有元素 (A)

本數據組共有 31 個元素含量作為特徵，PCA 分析結果顯示 A-PC4 以下的成分解釋變異量已小於 10%，故選取 A-PC1 至 A-PC4 (表 1)。A-PC1 的主特徵為砷、鈦、釩、鍺、鎢及鐵，解釋變異量為 20.59%；A-PC2 的主特徵為鋅、鉛、鈰、鈣及鋁，解釋變異量為 17.40%；A-PC3 的主特徵為硼、鎵、銀及鈣，解釋變異量為 14.89%；A-PC4 的主特徵為鉬、硒及硫，解釋變異量為 10.13%。在主特徵中，鐵、鋁為風化特徵元素，及鈣、硫為肥料特徵元素，其餘為微量元素。同時，由本數據組之 A-PC1 對 A-PC4 作圖顯示可區分台灣茶葉與國外茶葉 (圖 7)。

雖然前揭微量元素加入肥料特徵元素後 (TF 數據組)，會使 PCA 無法區分台灣茶葉與國外茶葉；然而，由圖 7 顯示，TF 數據組再加入風化特徵元素後似會降低來自肥料特徵元素的干擾，再度顯現 PCA 的區分能力。此原

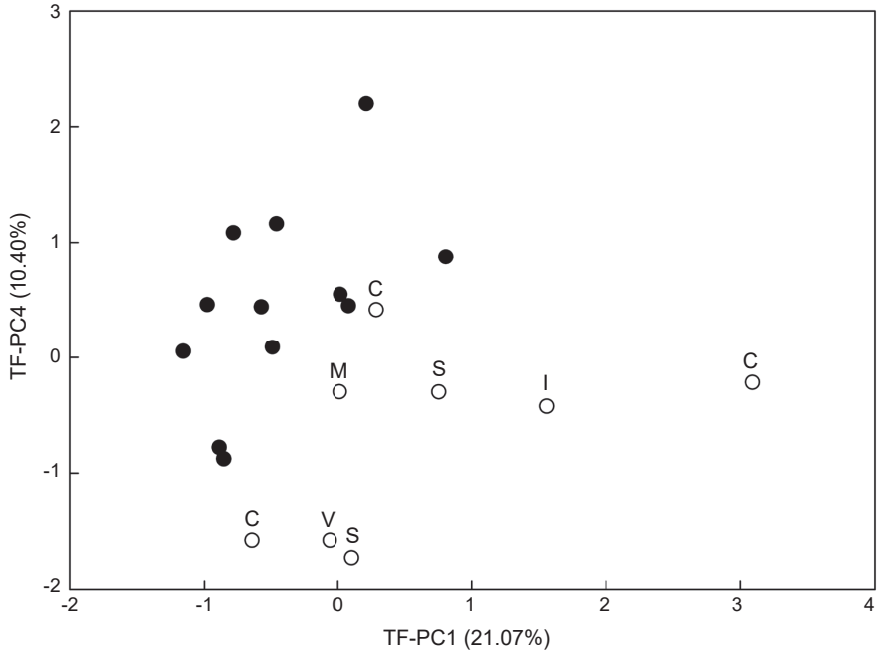


圖 6. TF-PC1 與 TF-PC4 之作圖。●：台灣茶葉；○：國外茶葉 (C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度)。

Fig. 6. Plot of TF-PC1 vs. TF-PC4. ● : Taiwan tea; ○ : Foreign tea (C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India).

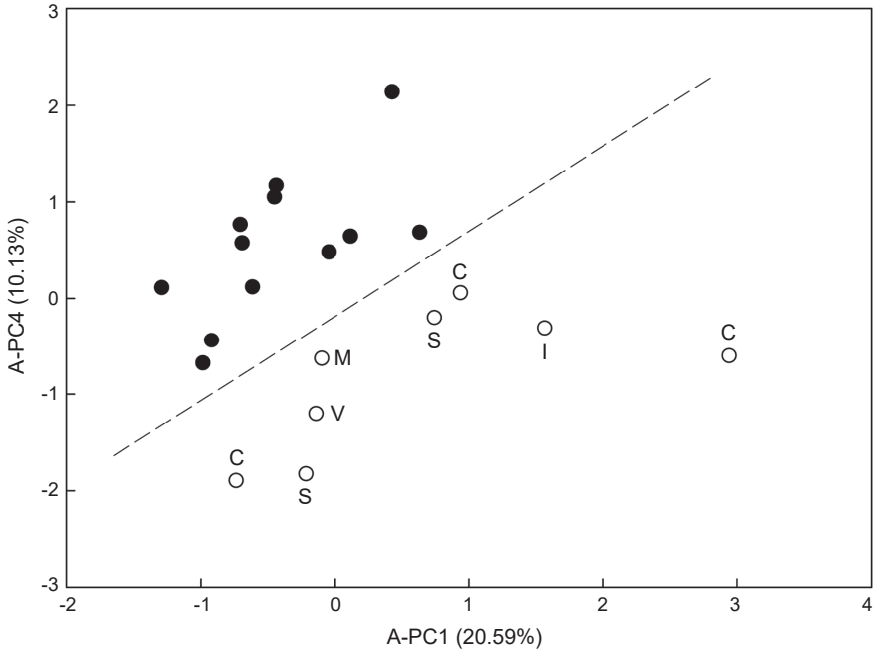


圖 7. A-PC1 與 A-PC4 之作圖。●：台灣茶葉；○：國外茶葉 (C：中國；M：馬來西亞；V：越南；S：斯里蘭卡；I：印度)。

Fig. 7. Plot of A-PC1 vs. A-PC4. ● : Taiwan tea; ○ : Foreign tea (C: China; M: Malaysia; V: Vietnam; S: Sri Lanka; and I: India).

因可能是因為微量元素及風化特徵元素均屬土壤之背景因子，以本試驗而言，台灣茶葉與國外茶葉的之土壤背景元素含量差異特徵明顯大於國外茶葉彼此間含量差異特徵，且此特徵差異在 PCA 處理上掩蓋了由肥料特徵元素所帶來的干擾。

結論與建議

本試驗之元素分為微量元素 (T)、風化特徵元素 (W) 及肥料特徵元素 (F)，而任何單一元素含量高低並不能做為茶葉產地區分之依據。雖然，本試驗之國外樣本受限於取得困難而數量不多，然而，本試驗分別以微量元素 (T)、微量元素和風化特徵元素 (TW)、微量元素和肥料特徵元素 (TF)、所有元素 (A) 四類數據組進行 PCA 分析，結果顯示除 TF 數據組外，其餘三類數據組經 PCA 處理後均能區分出台灣茶葉及國外茶葉。因此，土壤背景元素如微量元素及風化特徵元素是造成能以 PCA 處理達到區分出台灣茶葉及國外茶葉的主要原因，而肥料特徵元素為 PCA 鑑別之干擾因子。此試驗之經驗及結果是為後續在其他農產品從事產源鑑別時之重要依循。

如前所述，本試驗在實際應用意義上，是要鑑定出所測試之茶葉是否真的是台灣茶，而不是要鑑定出所測試之茶葉來自哪一個國家。如要達到所測茶葉之產源國家或地區，則各國之茶葉標本則須達到一定數量才有統計意義，這是我們後續希望能達到的目標。

誌謝

作者非常感謝二位匿名審查委員提供諸多正面之修正建議。本試驗由國立中興大學及農委會農業試驗所提供經費，計畫編號 NCHU-TARI 10301。

引用文獻

Atkinson, D. 1986. The nutrient requirements of fruit

trees: Some current considerations. p.93–128. *in*: Advances in Plant Nutrition. Vol. 2. (Tinker, B. and A. Lauchli, eds.) Praeger. New York, NY. 332 pp.

Briskin, D. 2010. Mineral nutrition. p.107–131. *in*: Plant Physiology. 5th ed. (Taiz, L. and E. Zeiger, eds.) Sinauer Associates Inc. Sunderland, MA. 782 pp.

Fernández-Cáceres, P. L., M. J. Martín, F. Pablos, and A. G. González. 2001. Differentiation of tea (*Camellia sinensis*) varieties and their geographical origin according to their metal content. J. Agric. Food Chem. 49:4775–4779. doi:10.1021/jf0106143

Junba, I. O., N. F. Suttle, E. A. Hunter, and S. O. Wandiga. 1995. Effects of soil origin and mineral composition and herbage species on the mineral composition of forages in the Mount Elgon region of Kenya. 2. Trace elements. Trop. Grasslands 29:47–52.

Kämpf, N., A. C. Scheinost, and D. G. Schulze. 2000. Oxide minerals. p.F125–F157. *in*: Handbook of Soil Science. (Sumner, M. E., A. W. Warrick, P. M. Huang, E. A. Paul, E. J. Kamprath, L. P. Wilding, J. W. Stucki, I. Shaingberg, and M. F. Baumgardner, eds.) CRC Press. New York, NY. 2148 pp.

Karak, T. and R. M. Bhagat. 2010. Trace elements in tea leaves, made tea and tea infusion: A review. Food Res. Intl. 43:2234–2252. doi:10.1016/j.foodres.2010.08.010

Liu, T. S., H. Y. Guo, J. L. Chu, and S. Lian. 2007. Preliminary study on heavy metal characteristics in serpentinite-developed soil regions in eastern Taiwan. J. Taiwan Agric. Res. 56:65–78. (in Chinese with English abstract) doi:10.6156/JTAR/2007.05602.01

Marcos, A., A. Fisher, G. Rea, and S. J. Hill. 1998. Preliminary study using trace element concentrations and a chemometrics approach to determine the geographical origin of tea. J. Anal. At. Spectrom. 13:521–525. doi:10.1039/A708658J

Moreda-Piñeiro, A., A. Marcos, A. Fisher, and S. J. Hill. 2001. Evaluation of the effect of data pre-treatment procedures on classical pattern recognition and principal components analysis: A case study for the geographical classification of tea. J. Environ. Monit. 3:352–360. doi:10.1039/b103658k

Moreda-Piñeiro, A., A. Fisher, and S. J. Hill. 2003. The classification of tea according to region of origin using pattern recognition techniques and trace metal data. J. Food Compos. Anal. 16:195–211. doi:10.1016/S0889-1575(02)00163-1

Mortvedt, J. J. 2000. Bioavailability of micronutrients. p.D71–D86. *in*: Handbook of Soil Science. (Sumner, M. E., A. W. Warrick, P. M. Huang, E. A. Paul, E. J. Kamprath, L. P. Wilding, J. W. Stucki, I. Shaingberg, and M. F. Baumgardner, eds.) CRC Press. New York, NY. 2148 pp.

Pilgrim, T. S., R. J. Watling, and K. Grice. 2010. Application of trace element and stable isotope signatures to determine the provenance of tea (*Camellia sinensis*) samples. Food Chem. 118:921–926. doi:10.1016/j.foodchem.2008.08.077

Preliminary Study of Differentiating Imported Tea from Taiwan Tea by Elemental Characteristics

Cheng-Hsiang Tsai[1], Tsung-Ren Peng[2], Tsang-Sen Liu[3,*], Yu-Wen Lin[4], and Wen-Jun Zhan[5]

Abstract

Tsai, C. H., T. R. Peng, T. S. Liu, Y. W. Lin, and W. J. Zhan. 2021. Preliminary study of differentiating imported tea from Taiwan tea by elemental characteristics. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):231–242.

This study analyzed the amounts of various elements of tea samples and applied principal component analysis (PCA) to process the elemental data to differentiate imported tea from Taiwan tea. The imported samples included tea made from China, Vietnam, Malaysia, India, and Sri Lanka, and the analyzed elements were classified into trace elements (Ag, As, B, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Mo, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Ti, V, W, Zn, and Zr), weathering elements (Al, Fe, and Mn), and fertilizer elements (Ca, K, Mg, P, and S). Our results showed that no single element could be used as an index to distinguish imported tea from Taiwan tea; however, PCA analyses showed differences between domestic and imported tea. Four data sets included trace elements (T), trace elements and weathering elements (TW), trace elements and fertilizer elements (TF), and all analyzed elements (A) were used for PCA. The results revealed that, besides TF, the remaining data sets could differentiate imported tea from Taiwan tea. Data processing experience and the results derived from this study provide an important reference for subsequent identification of the origin of other agricultural products.

Key words: Elemental concentration, Identify non-Taiwan tea, Principal component analysis (PCA).

Received: March 19, 2021; Accepted: June 15, 2021.
* Corresponding author, e-mail: tsliu@tari.gov.tw
[1] Bachelor, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.
[2] Professor, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.
[3] Researcher, Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[4] Associate Researcher, Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[5] Research Assistant, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):243–252 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0002

研究報告

葉用芥藍新品種「鳳山 1 號」之育成

羅惠齡[1] 林楨祐[2,*] 王三太[3] 洪千雅[4]

摘要

羅惠齡、林楨祐、王三太、洪千雅。2021。葉用芥藍新品種「鳳山 1 號」之育成。台灣農業研究 70(4):243–252。

為育成早生耐熱、口感甜嫩之芥藍雜交新品種，行政院農業委員會農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所評估所育成芥藍自交系之株型、展幅、葉形、分枝數、生育日數及耐熱性。先篩選出「包心美芥藍」及「白花特大心」具耐熱及優良性狀的兩個自交系，並透過雜交育種法，育成一代雜交種，進行品系比較試驗及區域試驗，最後選出芥藍雜交新品系 16-1232。16-1232 無論是新鮮植株或加熱後之總糖含量均顯著高於對照品種「翠津」，食用明顯略帶甜味。有機酸中，16-1232 以檸檬酸的含量顯著較「翠津」高，而硝酸鹽含量顯著較「翠津」低，相關含量分析結果對芥藍之食用營養具參考價值。本一代雜交新品系 16-1232 於 2018 年經行政院農業委員會農業試驗所通過自行命名為芥藍「鳳山 1 號」，是一代雜交葉用型芥藍，具有早生、耐熱特性，適合於高溫高濕的環境生長；從撒播到採收僅需約 40 d，定植到採收僅需約 20 d；全株纖維少，口感細緻且略帶甜味，應更容易獲得消費者的青睞。

關鍵詞：葉用、芥藍、鳳山 1 號。

前言

芥藍 (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*) 別名芥藍菜、格蘭菜，為十字花科 (Brassicaceae) 蕓薹屬 (*Brassica*) 一、二年生草本植物，原產於中國南部和東南亞一帶，為國內十字花科重要葉菜類蔬菜之一。根據 2019 年農情報告資源網 (http://agr.afa.gov.tw/afa/afa_frame.jsp) 資料，台灣全年栽培面積約 1,085 ha，年產量約 1 萬 9 千公噸，主要集中在雲林縣 738 ha；其次為新北市 97 ha 及桃園市 60 ha。根據 1995 年《台灣農家要覽》介紹，芥藍有下列幾項分類方法，依葉色可分為白葉種及黑葉種；依葉形可分為尖葉種及圓葉種；依葉片平整性可分為平滑葉種、皺葉種及捲葉種；依花色可分為黃花種及白花種；依花苔外型可分為大心種及大花種；依食用部位可分為花苔用、肉質嫩莖用及葉用 (Hsiao 1995)。根據行政院衛生福利部 (http://www.doh.gov.tw/FoodAnalysis/ingredients.htm) 資料，芥藍有豐富的蛋白質、維生素 B_1、維生素 C、鈣、鎂、磷及鐵，尤其是維生素 C 及鈣含量是甘藍的 3–4 倍以上，為營養價值高的蔬菜。台灣蔬菜生產受夏季高溫、高濕及颱風等環境因素影響，以及全球趨於暖化，發生夏季栽培的高溫障礙及蔬菜供需失調的現象 (Wang 1995)。芥藍夏季栽培亦容易因高溫造成生育期長與產量低的問題，且芥藍略帶苦味及市面上都以固定品種 (open pollination; OP) 流通，顯示夏季市售芥藍之耐熱性、產量、品質與整齊度皆有待改良 (Lin *et al*. 2010)。因此為提高芥藍之產量與耐熱性，本研究進行一代雜交品種選育，利用雜種優

投稿日期：2020 年 10 月 13 日；接受日期：2021 年 6 月 17 日。
* 通訊作者：cylin@tari.gov.tw
[1] 農委會農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所蔬菜系約聘人員。台灣 高雄市。
[2] 農委會農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所蔬菜系助理研究員。台灣 高雄市。
[3] 農委會農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所蔬菜系研究員兼主任。台灣 高雄市。
[4] 農委會農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所經營利用系助理研究員。台灣 高雄市。

勢，改善其耐熱性與產量，並選育耐熱耐濕、汁多味甜之芥藍品種，以滿足夏季蔬菜的多元需求。

芥藍「鳳山 1 號」為農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所自 2008 年『耐熱早生蔬菜品種改良』至 2019 年『因應高溫逆境十字花科蔬菜品種選育』計畫之研發成果。育成經過為 2008 年本分所自國家種原庫引進 60 個芥藍種原，2009–2014 年進行自交系選拔工作，選拔早生、耐熱、耐濕、株型直立、品質佳的葉用芥藍，單株套袋隔離、人工自交留種，確認自交不親合性。經過 6 個世代自交選拔純化，選拔出源自品種「包心美芥藍」及「白花特大心」的 2 個自交系為親本進行雜交，2016–2017 年執行品系比較試驗，2017–2019 年至高雄杉林、屏東里港及花蓮吉安等地區進行區域試驗，最後選育出雜交新品系芥藍 16-1232，該品系具有耐熱、甜嫩、豐產與生育整齊等特性。2018 年 9 月 6 日經行政院農業委員會農業試驗所第 97 次研發成果管理小組會議同意，自行命名為芥藍「鳳山 1 號」。

材料與方法

品系比較試驗

以農業試驗所鳳山園藝試驗分所 (以下簡稱本分所) 育成之 9 個芥藍雜交組合為試驗材料，於 2016 年進行品系比較試驗，分別於 6 月 6 日播種、6 月 26 日定植、7 月 28 日調查，試驗採逢機完全區集設計，3 重複。畦長 10 m，畦寬 1 m，行距 15 cm，株距 15 cm，每重複 30 株。植株大小達可採收時，每小區逢機取樣 10 株，調查單株重、株高、展幅、葉長、葉寬、葉片數、莖徑、葉綠素計讀值 (Soil and Plant Analyzer Development; SPAD) (Chlorophyll Meter, SPAD-502, Konica minolta sensing, Tokyo, Japan) 及存活率 (survival rate) 等項目，並進行耐熱表現評估。存活率 = [(種植的株數–死亡的株數)/種植的株數] × 100%。2018 年將入選之芥藍 16-1232 為試驗材料，以農友種苗公司之「翠津」與高雄梓官種子行所生產的開放授粉品種「黑格藍」為對照品種，進行高級品系比較試驗，在本分所於 4 月 30 日播種、5 月 21 日定植，試驗採逢機完全區集設計，3 重複。畦長 10 m，畦寬 1 m，行距 15 cm，株距 15 cm，每重複 30 株。植株大小達可採收時，每小區逢機取樣 10 株，調查單株重、株高、展幅、葉長、葉寬、葉片數、莖徑、葉綠素計讀值及葉綠素螢光反應測定。PSII 最大光量子效能 Fv/Fm (maximal quantum efficiency of PSII photochemistry) 為葉片經暗馴化後利用葉綠素螢光光合作用分析儀測量與計算，公式為 Fv/Fm = (Fm − Fo)/Fv。

區域試驗

為評估芥藍 16-1232 於不同試驗地區之產量與生育表現，2018 年分別於高雄杉林地區及屏東里港地區等兩處進行區域試驗，2019 年於花蓮吉安地區進行區域試驗。以西螺主要商業品種「翠津」為對照品種，試驗採逢機完全區集設計，3 重複。畦長 10 m，畦寬 1 m，行距 15 cm，株距 15 cm，每重複 30 株。植株大小達可採收時，逢機取樣 10 株，調查單株重、株高、展幅、葉長、葉寬、葉片數、莖徑及 SPAD，採收全區植株以調查小區產量，並換算為每公頃產量。

可溶性固形物及酸鹼值測定

以芥藍 16-1232 為試驗材料，西螺主要商業品種「翠津」為對照品種，各選 30 株，全株各取 1 kg，分別切成小段後放入均質機 (VM0101C, Vita-Mix, Kaohsiung, Taiwan) 打碎，用網袋過濾，取粗萃取汁液，再利用微量高速離心機 (MIKRO 120, HETTICH, Kirchlengern, Germany) 設定轉速 10,000 rpm 離心 3 min，取上清液備用。上清液分為新鮮處理及加熱處理 2 組，每組 3 重複。新鮮處理組利用糖度計 (HAND DEFPACTOMTER, ATAGO, Tokyo, Japan) 測定可溶性固形物、利用酸鹼測定儀 (pH meter, Denver instrument, Arvada, CO, USA) 測定酸鹼值。加熱處理組為放入乾浴鍋 (dry bath incubator, Major science, Saratoga, CA, USA) 中，溫度設定為 75℃，加熱時間為 15 min，取出靜置放涼後，測定可溶性固形物及酸鹼值。

含水百分率測定

以芥藍 16-1232 為試驗材料，西螺主要商業品種「翠津」為對照品種，兩個品種各取 5 株，稱單株鮮重，分別切細放入烘箱中，時間設定為 12–13 h，前 7 h 溫度設定為 50℃，剩餘 5–6 h 為 55℃，烘乾後取出，放入玻璃乾燥器中，冷卻後測定乾重。根據公式計算含水百分率。含水百分率 = [(鮮重 − 乾重)/鮮重] × 100%。

汁含量百分率測定

以芥藍 16-1232 為試驗材料，西螺主要商業品種「翠津」為對照品種，兩個品種各取 5 株稱鮮重，分別切成小段後放入均質機 (VM0101C, Vita-Mix, Kaohsiung, Taiwan) 打碎，用網袋過濾，取粗萃取汁液，稱重後為芥藍汁重。根據公式計算汁含量百分率，汁含量百分率 = (汁重/鮮重) × 100 %。

糖類及酸類含量測定

以芥藍 16-1232 為試驗材料，西螺主要商業品種「翠津」為對照品種，各取 30 株，全株各取 1 kg，分別切成小段後放入均質機 (VM0101C, Vita-Mix, Kaohsiung, Taiwan) 打碎，用網袋過濾取粗萃取汁液，再利用微量高速離心機 (MIKRO 120, HETTICH, Kirchlengern, Germany) 設定轉速 10,000 rpm 離心 3 min，取上清液備用。利用高效液相層析儀 (high performance liquid chromatography; HPLC) (Intelligent HPLC System, JASCO, Tokyo, Japan)，分析芥藍之糖類包括蔗糖 (sucrose)、葡萄糖 (glucose)、果糖 (fructose)，酸類包括硝酸鹽 (nitrate)、檸檬酸 (citric acid)、蘋果酸 (L-malic acid)、莽草酸 (shikimic acid)、延胡索酸 (fumaric acid) 之含量。採用配備管柱 (300 mm × 7.8 mm, Amiex HPX-87H HPLC Organic Acid Analysis Column, Bio-rad, Tokyo, Japan)；流速 0.6 mL min^{-1}，柱溫 40℃，檢測波長 210 nm，進樣量為 10 μL，移動相為 5 mM H_2SO_4 溶液。

統計分析

所有數據以 SAS 統計分析軟體 (SAS Enterprise Guide 7.1) 進行變方分析 (analysis of variance; ANOVA)，以及最小顯著差異性 (least significant difference; LSD) 測驗。

結果

品系比較試驗

2016 年 9 個芥藍雜交組合進行初級品系比較試驗，結果如表 1 所示。9 個芥藍雜交組合園藝性狀調查中以展幅、葉長、葉寬及 SPAD 值雜交組合間具有顯著性差異；而株高、葉片數及莖徑各雜交組合間則無顯著差異。9 個芥藍雜交組合初步篩選出 16-1232，具有株型直立、展幅小、葉色為青綠、分枝生長較強且葉基部葉片生長較稀疏，SPAD 值在 45 以上及田間存活率高等特性，是為表現較耐熱的雜交組合，因此選定 16-1232 品系進行高級品系比較試驗。2018 年將選拔入選之 16-1232 品系與兩個對照商業品種「翠津」、「黑格藍」進行高級品系比較試驗，結果如表 2 所示。3 個品種間在單株重及葉長差異達 1% 顯著水準，葉寬及莖徑 3 個品種間差異達 5% 顯著水準，而株高、展幅、葉片數、SPAD 及 PSII 最大光效能 (Fv/Fm) 3 個品種間無顯著差異。「翠津」株型直立、莖較粗、葉色為濃綠色，與 16-1232 皆為耐熱品種。「黑格藍」育苗時就發現發芽率不佳，植株定植後，大小參差不齊，且大部分葉片出現反捲的不耐熱現象。芥藍 16-1232 具有植株較高、展幅小、葉色為青綠及 Fv/Fm 值較高等特性，將進一步與西螺商業品種「翠津」進行區域試驗。

區域試驗

為評估芥藍 16-1232 於不同地點之產量與生育表現，2018 年分別於高雄杉林地區及屏東里港地區等 2 處進行區域試驗。杉林地區之區域試驗結果如表 3 所示，2 個品種在 SPAD 之差異達 5% 顯著水準，而單株重、株高、展幅、葉長、葉寬、葉片數、莖徑及產量於兩個品種間無顯著差異。里港地區之區域試驗結果如表 4 所示，兩個品種在 SPAD 之差異達 5% 顯著水準，而單株重、株高、展幅、葉長、葉寬、葉片數、莖徑及產量於 2 個品種間無顯著

表 **1.** 2016 年芥藍初級品系比較試驗。

Table 1. Primary lines trial of Chinese kale in 2016.

Line	Plant height (cm)	Canopy (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (No.)	Stem diameter (cm)	SPAD[z]	Survival rate (%)
16-1232	36.4	22.0	14.6	12.3	10.0	15.8	45.9	75.0
16-1235	31.4	21.3	11.5	10.2	7.8	13.9	42.0	25.0
16-1236	40.2	31.3	18.7	17.9	9.0	16.5	54.6	91.7
16-1237	36.4	29.7	13.0	13.0	9.3	14.5	38.5	58.3
16-1238	41.9	37.3	18.6	16.1	9.7	16.5	52.0	83.3
16-1239	36.9	28.3	14.8	13.0	9.7	15.4	57.3	58.3
16-1240	39.2	21.1	15.2	14.0	10.0	15.9	69.2	66.7
16-1241	38.7	30.8	15.4	16.2	9.3	16.9	55.7	50.0
16-1242	35.3	31.4	15.3	13.5	8.5	16.0	55.4	16.7
$LSD_{0.05}$[y]	6.2	6.9	2.6	2.3	1.8	2.8	10.6	
Difference[x]	ns	**	**	**	ns	ns	**	

Sowing date: June 6, 2016; planting date: June 29, 2016; survey date: August 1, 2016.
Planting location: Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan.
[z] SPAD: Soil and Plant Analyzer Development.
[y] LSD: least significant difference.
[x] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表 **2.** 2018 年芥藍高級品系比較試驗。

Table 2. Advanced cultivar/line trial of Chinese kale in 2018.

Cultivar/line	Plant weight (g)	Plant height (cm)	Canopy (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (No.)	Stem diameter (cm)	SPAD[z]	Fv/Fm
16-1232	39.2	24.8	23.5	14.7	14.6	6.2	11.7	59.4	0.449
‘Chui Chun’	42.5	23.7	24.3	15.2	12.5	6.5	14.1	65.7	0.432
‘Hei Ge Lan’	25.1	19.3	24.4	11.8	10.5	5.4	10.8	53.8	0.326
$LSD_{0.05}$[y]	11.6	1.3	4.3	1.5	1.6	0.5	2.3	1.5	0.100
Difference[x]	**	ns	ns	**	*	ns	*	ns	ns

Sowing date: April 30, 2018; planting date: May 21, 2018; survey date: June 8, 2018.
Planting location: Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan.
[z] SPAD: Soil and Plant Analyzer Development.
[y] LSD: least significant difference.
[x] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表 **3.** 2018 年杉林地區芥藍區域試驗。

Table 3. Chinese kale regional trial in Shanlin area in 2018.

Cultivar/line	Plant weight (g)	Plant height (cm)	Canopy (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (No.)	Stem diameter (cm)	SPAD[z]	Yield (Mg ha^{-1})
16-1232	35.0	27.4	27.2	15.5	13.2	5.1	10.2	48.6	7.7
‘Chui Chun’	39.2	29.7	27.9	15.5	11.3	6.0	12.4	54.4	8.6
Difference[y]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

Sowing date: June 19, 2018; planting date: July 9, 2018; survey date: August 2, 2018.
[z] SPAD: Soil and Plant Analyzer Development.
[y] ns, *: the difference was not significant, significant at 0.05 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

差異。2019 年於花蓮吉安地區進行區域試驗，結果如表 5 所示，兩個品種在葉寬之差異達 1% 顯著水準，在單株重、株高、展幅、莖徑及產量於兩個品種間之差異達 5% 顯著水準，而葉長、葉片數及 SPAD 於 2 個品種間無顯著差異。

可溶性固形物及酸鹼值

為評估芥藍 16-1232 全株纖維少、口感細緻、汁多味甜，沒有一般芥藍略帶苦味的特性，故以商業品種「翠津」為對照，測定可溶性固形物及酸鹼值，試驗結果如表 6 所示。16-1232 與「翠津」品種新鮮處理的糖度分別為 5.6°Brix 與 4.0°Brix；加熱處理後的糖度分為 5.0°Brix 與 3.6°Brix，2 個品種新鮮處理的糖度皆較加熱處理為高，16-1232 糖度較「翠津」品種高約 1.4–1.6°Brix。在酸鹼值方面，16-1232 與「翠津」品種新鮮處理的酸鹼值均為 5.8；加熱處理後酸鹼值均為 5.5，無論是新鮮或加熱處理，兩品種之 pH 值間皆無顯著差異。

含水百分率及汁含量

芥藍含水百分率試驗結果如表 6 所示。2 品種含水百分率均為 90% 以上，「翠津」含水百分率為 92.6% 顯著高於 16-1232 的 91.0%，

表 4. 2018 年里港地區芥藍區域試驗。

Table 4. Chinese kale regional trial in Ligang area in 2018.

Cultivar/line	Plant weight (g)	Plant height (cm)	Canopy (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (No.)	Stem diameter (cm)	SPAD[z]	Yield (Mg ha^{-1})
16-1232	31.6	26.7	25.5	15.5	11.8	4.8	10.1	46.8	7.0
‘Chui Chun’	35.2	25.9	20.3	15.3	11.0	5.8	11.6	54.4	7.8
Difference[y]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

Sowing date: July 16, 2018; planting date: August 6, 2018; survey date: September 4, 2018.
[z] SPAD: Soil and Plant Analyzer Development.
[y] ns, *: the difference was not significant, significant at 0.05 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

表 5. 2019 年花蓮地區芥藍區域試驗。

Table 5. Chinese kale regional trial in Hualien area in 2019.

Cultivar/line	Plant weight (g)	Plant height (cm)	Canopy (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Number of leaves (No.)	Stem diameter (cm)	SPAD[z]	Yield (Mg ha^{-1})
16-1232	21.3	27.4	20.6	15.9	10.1	3.5	8.9	37.1	4.7
‘Chui Chun’	35.2	31.8	24.9	15.2	11.8	3.8	11.0	39.7	7.7
Difference[y]	*	*	*	ns	**	ns	*	ns	*

Sowing date: June 10, 2019; planting date: June 13, 2019; survey date: July 15, 2019.
[z] SPAD: Soil and Plant Analyzer Development.
[y] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

表 6. 芥藍兩品種植株之可溶性固形物含量、酸鹼值、含水率及含汁率。

Table 6. °Brix, pH, water and juice contents in fresh and heated plants of two Chinese kale cultivars.

	Fresh		Heated		Water content	Juice content
Cultivar	°Brix	pH	°Brix	pH	(%)	(%)
16-1232	5.6 ± 0.1[z]	5.8 ± 0.1	5.0 ± 0.2	5.5 ± 0.3	91.0 ± 0.4	57.2 ± 0.1
‘Chui Chun’	4.0 ± 0.1	5.8 ± 0.2	3.6 ± 0.1	5.5 ± 0.1	92.6 ± 0.3	62.0 ± 0.1
Difference[y]	**	ns	**	ns	*	**

[z] Mean ± stand error, n = 30.
[y] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

汁含量部分，「翠津」汁含量為 62.0% 也極顯著高於 16-1232 的 57.2%。

糖類及酸類含量

16-1232 與「翠津」品種利用高效液相層析儀進行糖類及酸類含量測定，糖類包括蔗糖、葡萄糖及果糖，總糖含量為蔗糖、葡萄糖、果糖含量的總和，試驗結果如表 7–8 所示。新鮮植株方面，16-1232 的蔗糖含量為 0.130 g 100 mL^{-1}，顯著高於「翠津」0.104 g 100 mL^{-1}；16-1232 的葡萄糖含量為 0.869 g 100 mL^{-1}，極顯著高於「翠津」0.712 g 100 mL^{-1}；但 16-1232 之果糖含量 0.602 g 100 mL^{-1} 則與「翠津」0.625 g 100 mL^{-1} 無顯著差異；16-1232 總糖含量 1.601 g 100 mL^{-1} 顯著高於「翠津」的 1.441 g 100 mL^{-1} (表 7)。而經加熱過的植株方面，16-1232 的蔗糖含量為 0.038 g 100 mL^{-1}，顯著比「翠津」0.058 g 100 mL^{-1} 低；16-1232 葡萄糖含量 0.873 g 100 mL^{-1} 顯著高於「翠津」0.707 g 100 mL^{-1}；16-1232 果糖含量 0.624 g 100 mL^{-1} 則與「翠津」0.614 g 100 mL^{-1} 無顯著差異；16-1232 總糖含量 1.535 g 100 mL^{-1} 極顯著高於「翠津」1.379 g 100 mL^{-1} (表 8)。無論是新鮮植株或經加熱後的植株，蔗糖、葡萄糖及總糖含量於兩品種者之間皆有顯著差異，而果糖含量在 2 品種之間則無顯著差異。

酸類含量測定包括硝酸鹽、檸檬酸、蘋果酸、莽草酸及延胡索酸，試驗結果如表 9–10 所示。新鮮的植株方面，16-1232 硝酸鹽含量為 3,845 ppm，極顯著較「翠津」4,543 ppm 低；16-1232 檸檬酸含量 0.279 g 100 mL^{-1} 顯著較「翠津」品種的 0.242 g 100 mL^{-1} 為高。蘋果

表 7. 芥藍兩品種新鮮植株之糖類含量。

Table 7. Two sugar content in fresh plants of two Chinese kale cultivars.

	Sucrose	Glucose	Fructose	Total sugar
Cultivar		(g 100 mL^{-1})		
16-1232	0.130	0.869	0.602	1.601
‘Chui Chun’	0.104	0.712	0.625	1.441
Difference[z]	*	**	ns	*

[z] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

表 8. 芥藍兩品種經加熱後植株之糖類含量。

Table 8. Two sugar content in heated plants of two Chinese kale cultivars.

	Sucrose	Glucose	Fructose	Total sugar
Cultivar		(g 100 mL^{-1})		
16-1232	0.038	0.873	0.624	1.535
‘Chui Chun’	0.058	0.707	0.614	1.379
Difference[z]	*	**	ns	**

[z] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

表 9. 芥藍兩品種新鮮植株之硝酸鹽及酸類含量。

Table 9. Two nitrate and acid contents in fresh plants of two Chinese kale cultivars.

	Nitrate	Citric	L-malic	Shikimic	Fumaric
Cultivar	(ppm)	(g 100 mL^{-1})			
16-1232	3,845	0.279	0.377	0.011	0.023
‘Chui Chun’	4,543	0.242	0.350	0.012	0.020
Difference[z]	**	*	ns	ns	ns

[z] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

表 10. 芥藍兩品種加熱後的植株之硝酸鹽及酸類含量。

Table 10. Two nitrate and acid contents in heated plants of two Chinese kale cultivars.

Cultivar	Nitrate (ppm)	Citric	L-malic	Shikimic	Fumaric
		(g 100 mL^{-1})			
16-1232	3,848	0.269	0.389	0.015	0.009
'Chui Chun'	4,511	0.238	0.376	0.013	0.006
Difference[z]	**	*	ns	ns	ns

[z] ns, *, **: the difference was not significant, significant at 0.05 and 0.01 level with 30 sample dates using non-pairing *t*-test analysis.

酸、莽草酸及延胡索酸含量於 2 品種之間無顯著差異 (表 9)。經加熱過的植株方面，16-1232 硝酸鹽含量 3,848 ppm 極顯著比「翠津」4,511 ppm 低；16-1232 檸檬酸含量 0.269 g 100 mL^{-1} 顯著較「翠津」0.238 g 100 mL^{-1} 高。蘋果酸、莽草酸及延胡索酸含量於 2 品種之間無顯著差異 (表 10)。試驗結果顯示，16-1232 無論是新鮮或經加熱後植株之硝酸鹽含量均顯著顯著低於「翠津」；檸檬酸含量均顯著高於「翠津」品種。硝酸鹽及檸檬酸含量在 16-1232 與「翠津」之間有顯著差異；而蘋果酸、莽草酸及延胡索酸含量於 2 品種間無顯著差異。

討論

芥藍為短期葉菜類，由於其風土環境適應性廣及生長迅速特性，具有發展成為夏季豪雨、風災後快速復耕的作物，並可適時調節消費市場供需 (Lin *et al*. 2010)。國內外有許多蔬菜耐熱性鑑定研究，採用的指標很多，主要包括外部形態、經濟性狀、微觀結構和生理及生化指標 (Xie *et al*. 2008)。高溫逆境下，植物的外部形態會發生變化，影響植物的正常生長與發育，使其經濟性狀發生變化。以外部形態或經濟性狀變化來評估蔬菜耐熱性，是一種比較直觀的方法，容易為育種人員所接受 (Li *et al*. 2007)。以芥藍為例，株型直立、葉與莖之開展角度小、莖基部著生葉片稀疏及分枝數少的品種，較株型平鋪、葉與莖開展角度大、莖基部著生葉片緊密及分枝數多的品種耐熱；白花品種也較黃花品種耐熱，而芥藍不耐熱的表現為葉片發生向上反捲現象 (Lin *et al*. 2010)。在品系比較試驗中，對照商業品種「黑格藍」為不耐熱的品種，大部分葉片也出現反捲的不耐熱現象。十字花科蔬菜耐熱性研究報告指出，透過測定細胞膜的熱穩定性與電解質滲漏率、丙二醛含量、葉綠素濃度與葉綠素螢光、脯胺酸含量及抗氧化酶活性等，可判別品種間的耐熱性程度 (Li & Zhang 2008)。學者研究指出，高溫脅迫會使植物的葉綠素含量下降，越不耐熱的種類或品種其下降速度越快，因此葉綠素含量的變化可用以鑑定植物的耐熱性 (Ou & Cao 2008)。Wang *et al*. (2013) 以「粉艷紅」和「日本硬星」兩個不同類型的番茄品種葉片為材料，分別採用 SPAD-502 葉綠素計與分光光度法測定兩個品種番茄葉片的 SPAD 值、葉綠素含量，分析其相關性並建立相關回歸方程式。結果表明兩種番茄葉片的 SPAD 值與葉綠素 a、葉綠素 b、總葉綠素含量的相關性均為極顯著；因此 SPAD 讀值可用來推估葉片之葉綠素含量，作為簡便之量測工具。光合作用 (photosynthesis) 是植物物質轉換與能量代謝的關鍵，對熱有敏感且直接之反應，在其他逆境症狀尚未表現之前即被抑制。估算葉綠素螢光釋放量可做為光合作用活性高低的指標。當逆境發生時，影響 PSII 電子的傳導，進而降低 Fv/Fm 的比值，因此生理研究會以葉綠素螢光值做為逆境發生的指標 (Liu 2011)。因此，本研究中品系比較試驗及區域試驗，測定葉綠素計讀值及葉綠素螢光做為芥藍耐熱性篩選生理指標，以期選育出耐熱且品質高、產量豐之葉用芥藍雜交品種。

Zhang *et al*. (2004) 探討芥藍不同品種之營養成分含量，發現芥藍中可溶性糖以葡萄糖為主，果糖次之，蔗糖最少，此試驗結果與本研究的試驗結果一致。在可溶性固形物的糖度測定中，16-1232 糖度較「翠津」品種高約 1.4–1.6°Brix (表 6)。此外，芥藍 16-1232 無論

是新鮮或經加熱後植株之總糖含量均高於「翠津」，可說明官能品評時兩品種在甜度上具差異，16-1232 吃起來明顯略帶甜味。果糖是蔬果中甜味及風味最主要的來源 (Cheng *et al*. 2018)，在本文分析的可溶性糖類中，即使 16-1232 與「翠津」間之果糖含量無顯著差異，但其他糖類含量之差異仍可呈現於食味口感上。蔬菜水果中的有機酸是酸味的來源，也是風味品質之重要影響因子 (Wang *et al*. 2017)。本文酸類含量測定是針對葉菜類中常見的酸類，包括硝酸鹽、檸檬酸、蘋果酸、莽草酸及延胡索酸等 5 種有機酸進行分析探討。Song *et al*. (2012) 在水耕栽培的條件下，探討 27 個芥藍品種的硝酸鹽含量。結果顯示芥藍不同品種間硝酸鹽含量之差異顯著，薹莖與葉片都容易累積硝酸鹽，總體上薹莖硝酸鹽含量高於葉片。芥藍主要食用部位為薹莖和葉片，其生育期短、複種指數高，生產者往往施肥過量，導致植株對氮素的過度吸收，而造成植株體內硝酸鹽過量累積。本試驗結果顯示，芥藍 16-1232 無論是新鮮或加熱後的植株，硝酸鹽含量均低於「翠津」品種，16-1232 在生育過程中不需要過度施氮肥就可以生長良好，施用過多的氮肥會造成肥料成本提高及對土壤環境的汙染。因此，對於生產有機認證蔬菜之有機農場，非常適合其栽培販售。檸檬酸又名枸櫞酸，是一種三羧酸類化合物，為動植物體內通用的代謝中間物，廣泛存在於多種水果和蔬菜，尤其是柑橘屬的水果中都含有較多的檸檬酸 (Zhang 2016)；相關研究表明檸檬酸的酸味很濃郁，具有強烈的味道，使蔬果的口感較重。而蘋果酸則可增強人體口腔對甜度的感受，屬於清爽口味 (Cheng *et al*. 2018)。在蔬菜有機酸含量的研究中，學者採用高效液相色譜 (high performance liquid chromatography; HPLC) 等技術，對 16 個櫻桃番茄商業品種的風味評分及相關指標進行測定和比較分析，解析決定櫻桃番茄風味的主要因素。4 個品種的 7 項風味及營養決定指標參數 (可溶性固形物、總糖、有機酸、果糖、葡萄糖、檸檬酸和維他命 C) 均顯著高於風味評價排名後 4 名的參試番茄品種。進一步的相關性分析結果表明，風味評分與可溶性固形物、總糖、有機酸、果糖、葡萄糖和維他命 C 含量之間為顯著正相關 (Cheng *et al*. 2018)。Song *et al*. (2016) 以紅菜薹為材料，採用高效液相色譜 (HPLC)/液相色譜-質譜 (mass spectrometry; MS) 聯用技術，對紅菜薹中有機酸和花青苷的成分和含量進行了鑑定和分析，試驗結果顯示，供試紅菜薹中檢測出 7 種有機酸和 11 種花青苷，其中蘋果酸與檸檬酸是紅菜薹中最主要的有機酸占 91.5%。Dai *et al*. (1989) 利用氣相色譜儀測定甜橙、酸棗、蘋果、山楂及番茄等 5 種蔬果中的有機酸種類及含量，結果亦顯示蘋果酸與檸檬酸普遍存在於各式蔬果中，是有機酸中含量最高的，而 5 種蔬果中，延胡索酸只少量的存在於酸棗中。至於莽草酸是一種重要的生物活體中間產物，具有抗炎、抗菌、鎮痛、抗血小板聚集、預防血栓等藥理作用 (Chang & Shi 2011)。本研究對於芥藍之有機酸分析結果中，不論是 16-1232 或「翠津」品種，均以蘋果酸與檸檬酸含量最高，而莽草酸及延胡索酸含量明顯偏低，此試驗結果與前人研究一致，相關含量分析結果對芥藍之食用營養具參考價值。本研究分析芥藍之糖類及有機酸，其含量因品種而有差異，目前以糖類及酸類含量的測定值尚無法代表芥藍食味的好吃與否，未來或許可擴大分析的品系數量，建立成分含量與官能品評結果間之相關性，以作為品種選拔之參考。

本研究選育出耐熱、早生優良芥藍雜交新品系 16-1232，於 2018 年夏季完成辦理『耐熱芥藍與花椰菜新品系觀摩會』，此品系經農業試驗所研發成果管理小組會議同意，自行命名為芥藍「鳳山 1 號」。近年來市面上推出的部分商業品種雖然具有耐熱、豐產的特性，但大部分皆葉片厚、纖維較多、口感較不甜。本分所育成新品種芥藍「鳳山 1 號」為葉用型芥藍，具有早生、耐熱特性、株型直立，單株重約 40 g，葉色青綠，葉形為尖葉等特性，屬於皺葉白花類型。植株從定植到採收約 18–22 d，撒播到採收約 40 d，適合全年栽培生產 (Lo *et al*. 2019)，可滿足農戶之需求。該品種除為豐產、生育整齊之優點外，且其全株纖維少、口感細緻、汁多味甜，沒有一般芥藍略帶苦味的特性，尚可增加消費者購買的意願。栽培本品種

應注意的事項有 (1) 種植適期：台灣南部平地全年可栽培；中北部 11 月種植會有小株抽薹的問題。(2) 本品種葉色青綠，葉片較薄，施肥宜注意鉀肥之補充使用，尤其是夏季栽種時，其可提高葉片色澤及厚度。肥料選擇含鉀肥比例較高之台肥 4 號或 43 號複合肥料，不宜僅施用尿素或硫銨等單質肥料。對農民而言，芥藍「鳳山 1 號」具市場潛力，生育期短、耐熱性佳，具有成為豪雨及風災過後快速復耕作物的潛力。對種苗商而言，「鳳山 1 號」是芥藍新品種，對低溫需求不高，採種容易。對消費者而言，「鳳山 1 號」是優質、安全、有甜味的蔬菜，可提供夏季蔬菜多樣化選擇。目前『芥藍鳳山 1 號 F_1 生產技術』已有非專屬授權業者栽培生產，值得進一步推廣利用。

引用文獻

Chang, J. M. and X. F. Shi. 2011. Research progress of natural product Shikimic acid. Chinese J. Info. Tradit. Chin. Med. 18:109–112.

Cheng, Y., H. J. Wan, C. C. Liu, Z. P. Yao, Q. J. Ye, Z. M. Li, R. Q. Wang, G. Z. Zhou, Y. J. Yang, D. L. Chen, and M. Y. Ruan. 2018. Comparative analysis of flavor/nutrient determination parameters in 16 different cherry tomato varieties. Acta Agric. Zhejiangensis 30:1859–1869. (in Chinese with English abstract) doi:10.3969/j.issn.1004-1524.2018.11.08

Dai, X. Y., C. Z. Yi, Y. L. Yan, and Y. H. Han. 1989. Gas chromatographic dtermination of organic acid in fruits and vegetables. J. China Agric. Univ. 15:51–55. (in Chinese)

Hsiao, C. H. 1995. Chinese kale. p.371–376. *in*: Farming Articles (2). 3rd ed. (Chinese Agronomy Press, ed.) Chinese Agronomy Press. Taipei, Taiwan. 926 pp. (in Chinese)

Li, A. G., X. Qu, X. K. Li, and X. N. Yu. 2007. Study on heat tolerance of plants. Crop Res. 21:493–497. (in Chinese) doi:10.16848/j.cnki.issn.1001-5280.2007.s1.002

Li, X. F. and Z. H. Zhang. 2008. Study on heat tolerance of vegetable. Agric. World 301:70–75. (in Chinese)

Lin, C. Y., H. L. Lo, Z. N. Lin, S. T. Wang, and G. Y. Hong. 2010. Breeding for heat tolerance and early of Chinese kale. Harvest 60:26–28. (in Chinese)

Liu, M. L. 2011. Application of mini-pan in screening heat tolerance of crops. Res. Bull. KDARES 21(1):1–15. (in Chinese)

Lo, H. L., C. Y. Lin, and S. T. Wang. 2019. Selection of heat tolerant Chinese kale cultivar. J. Taiwan Agric. Res. 68:293–304. (in Chinese with English abstract) doi:10.6156/JTAR.201912_68(4).0003

Ou, Z. L. and F. L. Cao. 2008. Study on heat tolerance of plants. Forestry Sci. Tech. Dev. 22(1):1–5. (in Chinese)

Song, Y., J. N. Fang, Z. J. Zhu, and J. Yang. 2016. Changes in organic acids and anthocyanins contents during shelf storage of fresh-cut Purple Caitai (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* L. var. *purpurea* Bailey). Sci. Tech. Food Ind. 37(20):300–305. (in Chinese with English abstract) doi:10.13386/j.issn1002-0306.2016.20.051

Song, S., G. Liao, H. Liu, G. Sun, and R. Chen. 2012. Discrepancy and cluster analysis of nitrate content in different cultivars of Chinese kale. Chinese J. Trop. Crops 33:1440–1443. (in Chinese with English abstract) doi:10.3969/j.issn.1000-2561.2012.08.021

Wang, J. S. 1995. Seedling technique of Brassicaceae vegetables. Taiwan Seeds 20:17–21. (in Chinese)

Wang, R., Y. Tian, L. Yang, and X. C. Zhang. 2017. Analysis of organic acid components in tomato fruit during different development stages. China Veg. 10:58–62. (in Chinese with English abstract)

Wang, W., T. Y. Song, Y. Wang, X. T. Dong, J. Chai, and Y. Xue. 2013. Correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. Northern Hortic. 23:12–15. (in Chinese with English abstract)

Xie, M. X., Y. C. Liu, H. J. Hu, D. L. Lin, and S. X. Wang. 2008. Breeding of heat tolerance and harvest seed in Brassicaceae vegetables. p.67–78. *in*: Proceedings of Application of the Workshop on Agricultural Biotechnology Industry. December 11, 2008. Tainan, Taiwan. Tainan Dist. Agric. Res. Ext. Stn. Tainan, Taiwan. (in Chinese)

Zhang, Q. 2016. Technology for efficient creation of citric acid. J. Food Sci. Biotechnol. 35:672. (in Chinese with English abstract)

Zhang, S. h., X. D. Wang, X. S. Xuan, Y. F. Shang, and H. J. He. 2004. The nutritive value of different strains of cabbage mustard. J. Hebei Norm. Univ. Sci. Tech. 18(2):58–61. (in Chinese with English abstract)

New Hybrid of Chinese Kale 'Fengshan No. 1' for Edible Leaves

Hui-Ling Lo[1], Chen-Yu Lin[2,*], San-Tai Wang[3], and Chien-Ya Hong[4]

Abstract

Lo, H. L., C. Y. Lin, S. T. Wang, and C. Y. Hong. 2021. New hybrid of Chinese kale 'Fengshan No. 1' for edible leaves. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):243–252.

To breed a new Chinese kale hybrid with early mature and heat-tolerance, plant type, canopy, leaf shape, number of branching, growth period, and heat tolerance were evaluated in the Fengshan Tropical Horticulture Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute. Two heat-tolerant inbred lines, 'Bao Xin Mei Kale' and 'Bai Hua Te Da Xin', were selected as female and male parents, respectively. A new hybrid 16-1232 was selected after extensive comparison and field trials. The content of total sugar in 16-1232 was significantly higher than that of control cultivar 'Chui Chun' in either fresh or heated plants. Due to higher sugar content, 16-1232 tastes slightly sweeter. Acid analysis revealed that 16-1232 had higher l-malic acid and citric acid, and lower nitrate compared to the controls. The nutrition contents of edible Chinese kale provide an invaluable reference for breeders and consumers. The newly developed 16-1232 has been named Chinese kale 'Fengshan No. 1' after being approved by the council of Taiwan Agricultural Research Institute. F1 hybrid produces edible leaves with early maturity and shows heat-tolerance, which will be suitable for growing in high temperature and humid environments. 'Fengshan No. 1' can be harvested 40 d after sowing or 20 d after transplanting. Due to the characters of less fiber, delicate taste and slightly sweet flavor, 'Fengshan No. 1' would be widely accepted by consumers.

Key words: Edible leaves used, Chinese kale, 'Fengshan No. 1'.

Received: October 13, 2020; Accepted: June 17, 2021.

* Corresponding author, e-mail: cylin@fthes-tari.gov.tw.

[1] Contract Employee, Department of Vegetables, Fengshan Tropical Horticulture Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan, ROC.

[2] Assistant Research Fellow, Department of Vegetables, Fengshan Tropical Horticulture Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan, ROC.

[3] Research Fellow and Head, Department of Vegetables, Fengshan Tropical Horticulture Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan, ROC.

[4] Assistant Research Fellow, Department of Management and Utilization, Fengshan Tropical Horticulture Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Kaohsiung, Taiwan, ROC.

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):253–269 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0003

研究報告

以生長分析和模式化評估結球萵苣的生長變異與氣候條件之關聯

陳柱中 [1,2]　李達源 [3]　莊愷瑋 [4,*]

摘要

陳柱中、李達源、莊愷瑋。2021。以生長分析和模式化評估結球萵苣的生長變異與氣候條件之關聯。台灣農業研究 70(4):253–269。

結球型萵苣 (*Lactuca sativa* L.) 是目前台灣秋冬至隔年晚春出口的指標蔬菜，尤其結球 (heading) 的表徵特性易受高溫限制，因此主要產期在當年 10 月至隔年 4 月間，若可經由分析不同期作氣候條件造成萵苣生長變異的關聯性，並導入模式化參數的管理指標，將可積極發展出萵苣田間生產的智慧管理系統。以結球萵苣的生產標的而言，有市場價值的部位在地上部葉球 (leafy head) (未展開內葉)，而已展開之外葉 (outer leaf) 則於採收與儲運過程具保護功能；但從植株成長過程的生理調節而言，外葉是光合產物的主要供源 (source)，而葉球是光合產物的標的積儲 (sink)，故外葉生長表現可謂主導葉球產量的首要栽培管理指標。本研究以 2017–2018 年於雲林縣二崙鄉兩處結球萵苣試驗田區 (427 號和 382 號) 各 3 期作的植株生育調查與生長紀錄資料，分期作套配指數型的馬爾薩斯生長模式 (Malthusian growth model)，以推估結球萵苣生長的關鍵生理參數：相對生長率 (relative growth rate; RGR) 和相對葉生長率 (relative leaf-growth rate; RLR)，藉此探討不同期作結球萵苣的生長變異與氣候條件間之關聯性。結果顯示，不同期作生長模式的參數推估值確實與季節性氣候差異造成植株生長變異有關，生長期間的平均溫度較高或日照數較長有促進結球萵苣生物量累積和葉面積伸展之趨勢，而且平均溫度漸升或日照數漸增也較有利於植株生長。本研究再分別依總葉片和外葉為假設供源，以 RGR 和 RLR 推估值導入生長模式，計算淨同化率 (net assimilation rate; NAR)，由設定不同供源計算的 NAR 模擬曲線差異可推論得知，外葉為供源的光合產物大部分會轉移至地上部，以促進葉球內葉面積伸展及乾重累積，而葉球內葉並非主要供源。再者，依據不同供源計算的 NAR 曲線於生長初期之交會點，可用於回溯球心發育 (hearting) 的起始日期，並依平均生長積溫日數 (growing degree days; GDD = 735) 可推算最適採收日期。

關鍵詞：指數函數、相對生長率 (RGR)、葉面積比 (LAR)、淨同化率 (NAR)、結球。

前言

結球萵苣 (*Lactuca sativa* L.) 為全球性重要蔬菜，多作為生食或西餐佐菜，在溫帶地區最適生長溫度範圍為 13–16℃ (Borrelli *et al*. 2013)，日均溫 18℃可達最佳的生長發育 (Lafta *et al*. 2021)。台灣秋冬季乾燥少雨，平地氣候冷涼，中南部農民慣行於冬季裡作種植蔬菜，故結球型萵苣也是秋冬季節的重要葉菜類作物之一，同時目前也是台灣秋冬至隔年春季出口蔬菜的指標作物。雖然早期 (Brunini *et al*. 1976) 在對萵苣生長的基礎溫度研究中發現 22℃時，萵苣有最大生長速率，但高溫亦

投稿日期：2021 年 5 月 20 日；接受日期：2021 年 6 月 29 日。
* 通訊作者：kwjuang@mail.ncyu.edu.tw
[1] 國立台灣大學農業化學系博士班研究生。台灣 台北市。
[2] 農委會農業試驗所農業化學組副研究員。台灣 台中市。
[3] 國立台灣大學農業化學系教授。台灣 台北市。
[4] 國立嘉義大學農藝學系教授。台灣 嘉義市。

會限制結球 (heading) 的表徵特性 (Nothmann 1977; Jenni & Yan 2009; Masarirambi *et al*. 2018)，而且高溫會導致提早抽薹 (bolting) 而影響收穫品質 (Silva *et al*. 1999)，台灣結球萵苣產期約在當年 10 月至隔年 4 月間，之後夏季高溫則不利結球型萵苣的栽培生產。

行政院農業委員會自 2002 年開始辦理「外銷結球萵苣生產及採後處理技術示範輔導」計畫，已建立有效的生產及運銷模式，為拓展結球萵苣外銷，農委會進而積極輔導農民團體設置結球萵苣外銷專區，導入契作制度，落實安全用藥管理。目前國內生產結球萵苣主要產區集中在雲林縣麥寮、崙背、二崙、褒忠等鄉，每年 11 月至翌年 3 月為盛產期，可藉冷藏保鮮達 30 d，符合長途貯運需求，並搭配穩定國際貿易商通路進行外銷，主要外銷市場以鄰近日本為主，占外銷市場 80%，對其他國家如：新加坡、韓國、馬來西亞等之出口量亦逐年成長；依據農委會訂定 2020 年農業生產目標，以外銷需求為考量的結球萵苣生產契作面積約 800 ha，產量目標 24,000 Mg (DOP_TWCOA 2020)。為因應當前作物生產技術的智慧化管理趨勢，必須積極建構各類作物之智能生產管理技術模組，尤其台灣結球萵苣的季節性生產潛力已獲肯定且外銷市場前景可期，若經由不同產期結球萵苣的生長分析並輔以模式化參數做為生產管理效能的評估指標，將可積極發展出萵苣田間智能生產系統，以穩定提升台灣結球萵苣的外銷產業發展。

作物植株在連續動態的生長發育過程，最終產量表現乃基於其內在遺傳背景與外在環境條件的共同作用，依據植物生理學的基礎原理進行生長分析 (growth analysis)，將生長過程之紀錄資料經數值解析與變異評估，再依生長過程之定律 (deterministic) 和序律 (stochastic) 變化趨勢，推估其模式化參數 (modeling parameters)，將可供智慧化作物生長管理的依據。有效的生長分析目的在獲得可靠的模式化參數，必須先選定關鍵的生長指標 (growth indexes)，於生育期間連續記錄生長指標之變化來代表植株的生長過程，再將紀錄資料導入植物生理學的理論模式，以取得有效的模式化參數，這些模式化參數即可代表作物在遺傳背景與環境條件共同作用下的生長變化特性；若作物種類或品種相同，不同環境條件下模式化參數的差異即是評估環境條件造成作物生長變異的依據，而且環境條件與模式化參數的聯動關係更是改善作物栽培管理程序最有用的工具。作物生長過程的基礎生理調節就是光合產物的生成、轉運和累積，因此光合產物的供源和積儲器官組織都是生長分析的關鍵指標，包括：葉數、葉面積、株冠面積、植株各部位乾、鮮重等，而主導生長指標變化的主要模式化參數包括：相對生長率 (relative growth rate; RGR)、葉面積比 (leaf area ratio; LAR)、葉面積指數 (leaf area index; LAI)、淨同化率 (net assimilation rate; NAR) 與作物生長率 (crop growth rate; CGR) 等 (Chan *et al*. 1995; Chan *et al*. 1998)。

就結球萵苣的生產標的而言，有經濟價值的部位是植株地上部的葉球 (leafy head)，亦即未展開的內葉，而已展開的外葉則於採收與儲運過程具保護功能，以確保葉球之品質與外觀完整，可於包裝時截切去除。但從植株的生長過程而言，已展開外葉是截取日照行光合作用的主要器官，可視為光合產物的主要供源 (source)，而葉球是光合產物的目標積儲 (sink)，故外葉是植株生長過程主導最終葉球產量表現的重要栽培管理指標 (Liao *et al*. 1993)，經由精準監控外葉生長以達成收穫葉球的目標產量，是提升結球萵苣生產效益的有效策略。因此，欲優化國內結球萵苣在不同產期的生產管理，可先經由生長分析建立結球萵苣生長模式，利用模式化參數監測植株生長過程，藉以管控不同產期環境條件差異造成之生產力與品質變異。目前，國內田間葉菜作物的生長模式研究實例較少 (Chen & Lie 1997; Yang & Lin 2017)，既有之相關研究多針對優化設施栽培的環控條件 (Yang & Lin 2019)，而對結球型葉菜作物的生長分析和模式參數之探討有限 (Liao *et al*. 1993; Chang Chien & Hsu 2003)。國外已有較多萵苣生長模式之相關研究可依循參考 (van Holsteijn 1980; Glenn 1984; Wheeler *et al*. 1993b; van Henten 1994; Gallardo *et al*. 1996; Seginer 2003; Salomez &

Hofman 2007; Fraile-Robayo *et al*. 2017; Carini *et al*. 2020; Zhang *et al*. 2020)，然而國內相關研究實例不多 (Yang & Lin 2017; Chen *et al*. 2019)，符合國內主要產區環境和季節條件之模式化參數尚不夠完整，且無可靠的參考基準供比對。由於既有萵苣生長模式之研究報告皆未考慮結球型萵苣之內、外葉形態差異與光合產物分配之生理調節，故本研究假設展開外葉與包合形成葉球的內葉分別為植株的主要供源和積儲，以建構結球萵苣的生長模式，藉此探討不同期作結球萵苣內、外葉的生長差異及其模式化參數對應氣候條件的關聯性。

材料與方法

田間試驗與生育調查

本研究試驗區位於台灣雲林縣二崙鄉，試驗田區地號分別為油車段 427 號和公館段 382 號；油車段 427 號田區屬粘板岩老沖積土的二林系土壤，耕作面積 0.45 ha；公館段 382 號田區屬粘板岩老沖積土的員林系土壤，耕作面積 0.30 ha。試驗區各期作栽種結球萵苣品種皆為「常利 6 號」，種子來源為合歡農產有限公司。試驗期程包括：2017 年第一期作 1 月底至 3 月底 (I/2017)，第二期作 2017 年 10 月初至 2018 年 1 月下旬 (II/2017)，2018 年第一期作自 2017 年 12 月初至 2018 年 4 月初 (I/2018)。對應各期作之氣象資料取自中央氣象局網站的觀測資料查詢系統 (https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp)，查閱下載雲林縣二崙測站 (經度 120°24'32"E，緯度 23°46'22"N) 的月平均溫度和累積降雨量紀錄，以及嘉義市嘉義測站 (經度 120°25'58"E，緯度 23°29'45"N) 的日照時數紀錄，彙整後如圖 1 所示。油車段 427 號田區第一期作栽培密度約 5.94 plt m^{-2}，第二期作栽培密度約 5.77 plt m^{-2}，第三期作栽培密度約 5.69 plt m^{-2}。公館段 382 號田區第一期作栽培密度約 5.92 plt m^{-2}，第二期作栽培密度約 5.73 plt m^{-2}，第三期作栽培密度約 5.76 plt m^{-2}。以上各期作試驗區萵苣栽培生長過程的田間和植株管理皆由同一農場負責操作，且兩處試驗田區土壤皆屬粘板岩老沖積土，故本試驗過程之栽培管理與生長環境，除不同期作的季節性氣候變化，其他有關土壤背景、肥培管理、植物保護和栽培密度等外部條件，皆極為相近。

本研究對試驗區萵苣植株的生育調查項目包括：葉數、葉面積和植株各部位 (根、莖、葉) 之乾、鮮重，於定植後約每 7–10 d 自田區隨機採集 5–6 plt，量測記錄各調查項目，自可明確分辨葉球之定植天數起分開記錄葉球內葉和展開外葉之面積，大約都在定植後 30 d 以上才可量測到葉球內葉面積，並於收穫時量測葉球之鮮重、徑寬和高，採收日期的決定則依試驗區所屬農場的生產規劃及農民對葉球品質特徵的經驗判斷。本研究對結球萵苣的生長分析和模式化評估所使用之植株生育調查資料，參考自行政院農業委員會農業試驗所執行 2017–2018 年科技計畫 (106 農科-18.1.6-農-C1、107 農科-14.2.6-農-C1) 已公開之研究報告。

作物生長模式

作物生長分析的主要目的是對作物產量

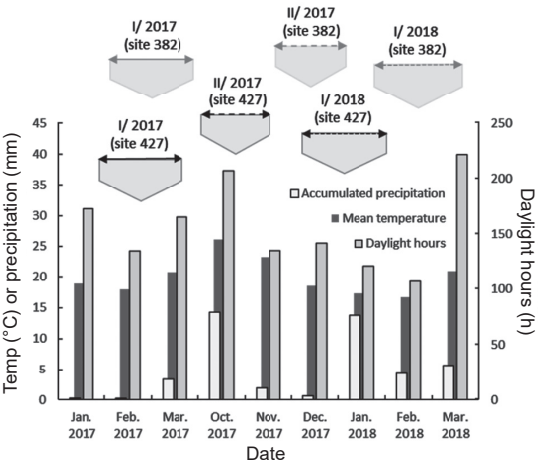


圖 1. 試驗區 (427 號和 382 號) 各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 試驗期間每月之平均溫度、日照時數和累積降雨量。

Fig. 1. Monthly average temperature, daylight hours and accumulated precipitation during the experiment periods for the sites no. 427 and 382 during 3 cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018).

(yield; Y) 進行精確的評估模擬，以期能有效改善栽培管理技術提升其生產力 (productivity; P)，構成產量的基本要件為單株生物量 (biomass; w) 與栽培密度 (density; N_d)：

$$Y\ (\text{kg ha}^{-1}) = N_d\ (\text{plt ha}^{-1}) \times w\ (\text{kg plt}^{-1}) \quad (1)$$

而生產力則是單位時間的產量表現，或解釋為每日的平均產量：

$$P\ (\text{kg ha}^{-1}\ \text{d}^{-1}) = Y\ (\text{kg ha}^{-1})/T\ (\text{d}) \quad (2)$$

其中 T 為收穫植株的生長期，作物品種差異會直接影響收穫日期，但除品種的遺傳因素外，不同季節的氣候環境與栽培管理條件亦顯著影響收穫之日期。因此，氣候環境與栽培管理條件對特定作物品種的產量與生產力的影響，不僅表現在單株生物量，更直接影響收穫日期。

若以植物行光合作用產生碳水化合物所累積的生物量來代表生長表現，則生物量累積的快慢即為生長速率 (growth rate; GR)：

$$GR = dw/dt \quad (3)$$

然而，GR 會受植株大小、承載光照面積或光合產物的分布差異所影響，因此定義相對生長率 (relative growth rate; RGR)，可更精準表示植株累積光合產物的效率：

$$RGR = 1/w \times dw/dt \quad (4)$$

換言之，植株生物量 w 是與時間 t 有關的變量 (variate)，可試以 t 的函數 $y_w(t)$ 表示：

$$w = y_w(t) \quad (5)$$

再者，基於光合產物的生成與分配調節，光合作用的葉面積是供源量的指標，生物量的累積代表積儲的強弱，若考慮植株形態差異對葉片承載光照面積之影響，可能改變生物量累積的過程，則葉面積也會是監測植株生長的關鍵指標，而且葉面積的擴大速率可能是優先於生物量累積速率的指標，導入單株葉面積的相對擴大率或稱為相對葉生長率 (relative leaf-growth rate; RLR)，可藉以說明對應供源和積儲的生長指標在植株生長過程的相互關係，RLR 定義如下：

$$RLR = 1/A \times dA/dt \quad (6)$$

而葉面積 A 也可被表示成 t 的函數 $y_A(t)$：

$$A = y_A(t) \quad (7)$$

上述式 (4) 和 式 (6) 代表植株生長過程的生理參數 RGR 與 RLR，可進一步被導入作物生長模式的推演和計算 (Blackman 1919; Briggs *et al*. 1920; West *et al*. 1920)，式 (4) 經移項後積分可改寫如下：

$$ln(w) = RGR \times t + c_w \quad (8)$$

或

$$w = exp(RGR \times t + c_w) \quad (9)$$

同理，式 (6) 可被推演表示如下：

$$ln(A) = RLR \times t + c_A \quad (10)$$

或

$$A = exp(RLR \times t + c_A) \quad (11)$$

因此，結合式 (5) 和式 (9) 以及式 (7) 和式 (11)，即可推導出結合生理參數 RGR 與 RLR 的生物量和葉面積的生長模式：

$$y_w(t) = w_o \times exp(RGR \times t) \quad (12)$$

和

$$y_A(t) = A_o \times exp(RLR \times t) \quad (13)$$

其中 $w_o = exp(c_w)$、$A_o = exp(c_A)$。式 (12) 和式

(13) 即所謂的馬爾薩斯生長模式 (Malthusian growth model)，在假設支撐族群成長資源不受限制的條件下，族群成長曲線會近似時間的指數函數 (Kögel & Prskawetz 2001; Weil & Wilde 2009; Lemmen 2014)，這是目前各種屬於指數型生長模式的基本型 (或稱退化型)。

若將相關重要生理參數：葉面積比 (LAR) 和淨同化率 (NAR)，依定義導入式 (12) 和式 (13)，即可進行模式化的評估分析。LAR 和 NAR 依定義如下 (West *et al*. 1920; Anten & Ackerly 2001)：

$$LAR = A/w = y_A(t)/y_w(t) \quad (14)$$

和

$$NAR = (1/A) \times dw/dt = RGR/LAR \quad (15)$$

若分別帶入式 (12) 和式 (13)，即可被改寫如下：

$$LAR = A_o/w_o \times exp[(RLR - RGR) \times t] \quad (16)$$

和

$$NAR = RGR \times (w_o/A_o) \times exp[(RGR - RLR) \times t] \quad (17)$$

因此，若限定植株在特定生育期間，且 RGR 與 RLR 近似穩定常數時，LAR 和 NAR 也會是時間 t 的函數。

模式參數推估

本研究以不同期作結球萵苣的生物量 (植株乾重) 和葉面積生長紀錄資料進行分析，並套配生長模式估算出 RGR 與 RLR，藉由對應不同期作的 RGR 與 RLR 推估值和 $y_w(t)$、$y_A(t)$ 模式，進一步評估說明不同期作植株生長變異與氣候條件間之關聯。依據式 (8) 和式 (10) 之直線關係，先將生質量 w 和葉面積 A 的紀錄資料取自然對數值，再對應定植天數 (days after transplanting; DAT)，以 SigmaPlot 12.5 軟體的迴歸分析功能，建立 $ln(w)$ 和 $ln(A)$ 對應 $t = DAT$ 的直線型模式：

$$ln(w) = k_w \times t + c_w \quad (18)$$

和

$$ln(A) = k_A \times t + c_A \quad (19)$$

其中斜率 k_w 和 k_A 即表示 RGR 和 RLR，截距 c_w 和 c_A 則表示植株定植時 ($t = 0$) 的起始生質量和葉面積之自然對數值。本研究分別將單株地上部、根部和外葉乾重之生長曲線套配式 (18)，而總葉片和外葉面積的生長曲線套配式 (19)，可分別獲得地上部、根部和外葉乾重的模式參數推估值 (k_w 和 c_w)，以及總葉片和外葉面積的模式參數推估值 (k_A 和 c_A)。

之後，上述參數推估值 k_w、k_A、c_w 和 c_A 可被代入式 (17)，將 NAR 表示如下：

$$NAR = k_w \times exp[(k_w - k_A) \times t + (c_w - c_A)] \quad (20)$$

其中 $exp[(k_w - k_A) \times t + (c_w - c_A)]$ 即為葉面積比 (LAR) 的倒數，故植株生長過程的 NAR 受 LAR 所影響，且會依不同生育期隨時間改變的指數曲線 (Potter & Jones 1977)。本研究依結球萵苣生育過程之形態發育特徵，分別設定總葉片 (葉球內葉與展開外葉的總和) 和展開外葉為光合產物供源的兩種生長分析策略，以地上部生物量累積的參數推估值 k_w 和 c_w 分別對應總葉片面積和展開外葉面積的 k_A 和 c_A，代入式 (20)，模擬計算出依總葉片面積的 NAR_{all} 和依展開外葉面積的 NAR_{out} 兩種曲線。

再者，為更清楚的說明生物量累積和葉面積擴大影響淨同化率 (NAR) 之關聯性，可引用 RGR/RLR 的比值解釋光合產物在供源與積儲間的分配調節趨勢 (Jackson 1963; Potter & Jones 1977; Poorter & van der Werf 1998)，依據式 (4) 和式 (6) 可將 RGR/RLR 表示如下：

$$RGR/RLR = (A/w) \times (dw/dA) = LAR \times (dw/dA) \quad (21)$$

若 RGR/RLR = 1，則 dA/dw = LAR，新增生物量 dw 供給新生葉面積 dA 的比例不變，LAR 維持定值，也表示 NAR 固定不變 (West *et al*.

1920)。若 RGR/RLR > 1，則 dA/dw < LAR，新增生物量 dw 供給新生葉面積 dA 的比例小於既有 LAR，之後 LAR 會遞減，表示 NAR 將上升；當 RGR/RLR < 1，則 dA/dw > LAR，新增生物量 dw 供給新生葉面積 dA 的比例大於既有 LAR，之後 LAR 會遞增，而 NAR 也將下降。

生長分析步驟與模式化流程

本研究對結球萵苣生長所建構的作物模式與獲得之參數，是假設植株乾、鮮重間的水分含量比例趨近定值 (本研究試驗資料的單株平均水分含量為 95% ± 3%)，以單株生物量 (平均乾重) 進行評估模擬和產期效應之比較說明。依據前述田間試驗、生育調查、生長分析原理和模式參數推估的步驟，將本研究提出之結球萵苣生長分析與模式化參數估算流程，彙整如圖 2，以利田間試驗結果的討論說明和模式化參數的推論應用。

結果

植株生物量的生長曲線模擬和模式參數推估

圖 3 和圖 4 為試驗區 427 號和 382 號各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣單株地上部、展開外葉和根部乾重之生長曲線。地上部和展開外葉乾重的生長紀錄包括 I/2017、II/2017 和 I/2018 共 3 期，但根部生長紀錄於試驗區 427 號僅有 2 期：I/2017 和 II/2017，於試驗區 382 號只有一期 (I/2017)，依式 (18) 的直線型關係套配模式估算出參數 k_w 和 c_w，如表 1 所示。圖 3 和圖 4 中的決定係數 R^2 和顯著水準可供評估以生長曲線資料套配模式之效度和信度，其中試驗區 427 號在 I/2018 外葉乾重套配生長模式的決定係數較低 (R^2 = 0.85)，其餘各組資料套配模式 R^2 > 0.9，而且顯著水準皆達 P < 0.05，可提供表 1 所列模式參數

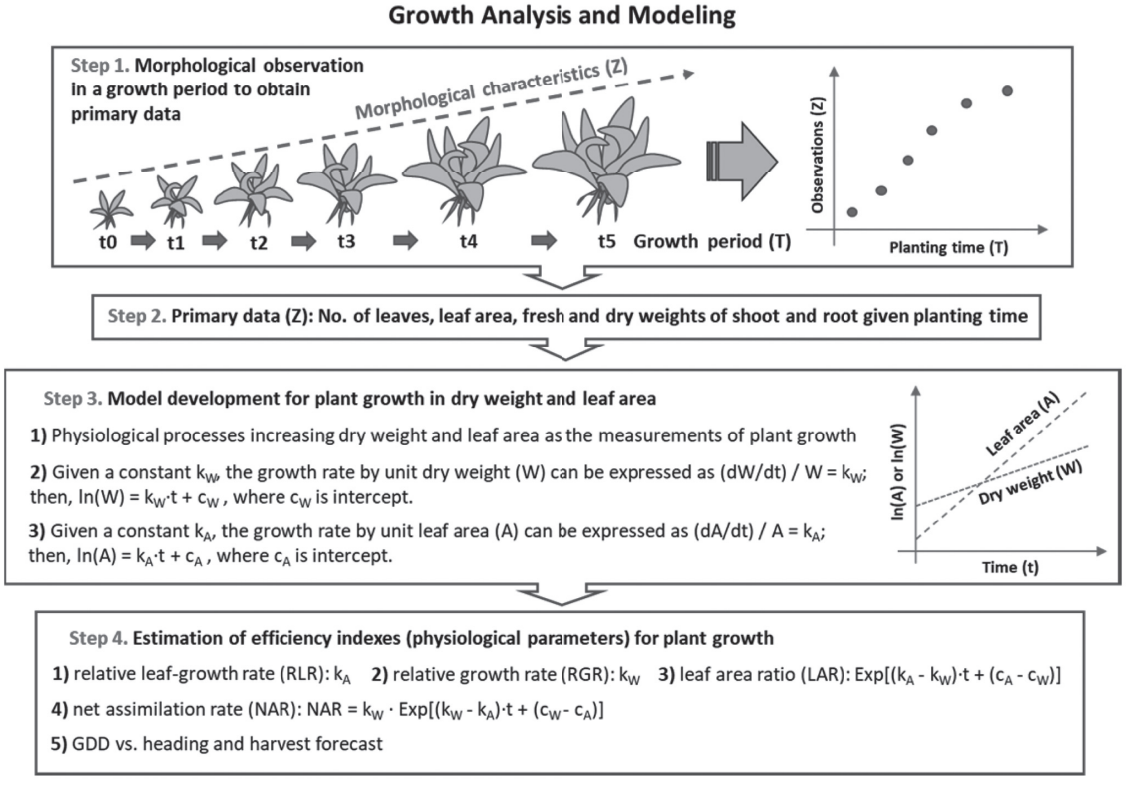


圖 2. 本研究對結球萵苣的生長分析與模式化步驟之流程。

Fig. 2. Flowchart of the procedures of growth analysis and modeling for crisphead lettuce in the study.

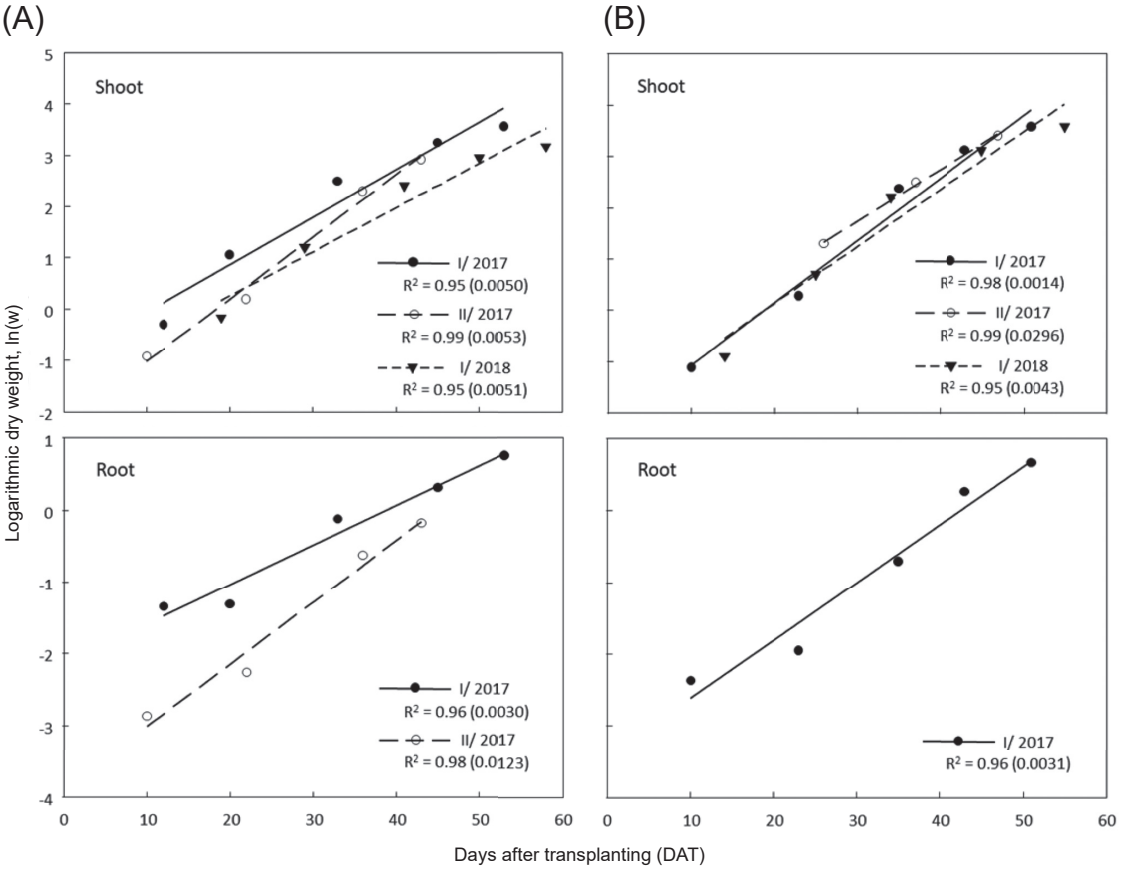


圖 3. 試驗區 (A) 427 號和 (B) 382 號各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣單株地上部與根部乾重 (w) (g plt^{-1}) 之對數化生長曲線。R^2 表示決定係數，括弧內數值表示顯著水準。

Fig. 3. Logarithmic growth curves of dry weight (w) per plant (g plt^{-1}) for shoot and root of the crisphead lettuce plants grown in the sites (A) 427 and (B) 382 during 3 cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018). R^2 denotes coefficient of determination and the significant level is denoted in parentheses.

推估值 k_w 和 c_w 的確效依據。也就是說，在圖 3 和圖 4 中生長曲線所呈現之模式化特徵皆可有效匯集於參數推估值 k_w 和 c_w，不同試驗區各期作間參數推估值之差異，將可供討論結球萵苣植株生物量受氣候條件影響的生長變異。

圖 3A 顯示試驗區 427 號的地上部乾重在 I/2017 和 I/2018 兩期的直線斜率明顯低於 II/2017 的直線斜率，對應表 1 所示 I/2017 和 I/2018 的 k_w 分別為 0.0927 和 0.0861，而 II/2017 的 k_w 為 0.1213。根部乾重在 I/2017 的直線斜率也明顯低於 II/2017，對應表 1 中 I/2017 的 k_w 為 0.0551，而 II/2017 的 k_w 為 0.0865。再者，圖 4A 所示結果也有相同趨勢，試驗區 427 號的外葉乾重於 I/2017 和 I/2018 兩期的直線斜率較低，對應表 1 中 I/2017 和 I/2018 的 k_w 分別為 0.0703 和 0.0559，而 II/2017 的 k_w 為 0.0860。

然而，圖 3B 卻顯示試驗區 382 號地上部乾重於 I/2017 和 I/2018 兩期的直線斜率高於 II/2017 的直線斜率，對應表 1 所示 I/2017 和 I/2018 的 k_w 分別為 0.1215 和 0.1114，而 II/2017 的 k_w 為 0.1006。圖 4B 也顯示試驗區 382 號外葉乾重於 I/2017 和 I/2018 的直線斜率較高，表 1 中 I/2017 和 I/2018 的 k_w 分別為 0.1101 和 0.0813，而 II/2017 的 k_w 為 0.0505。

植株葉面積的生長曲線模擬和模式參數推估

圖 5 所示為試驗區 427 號和 382 號各期作

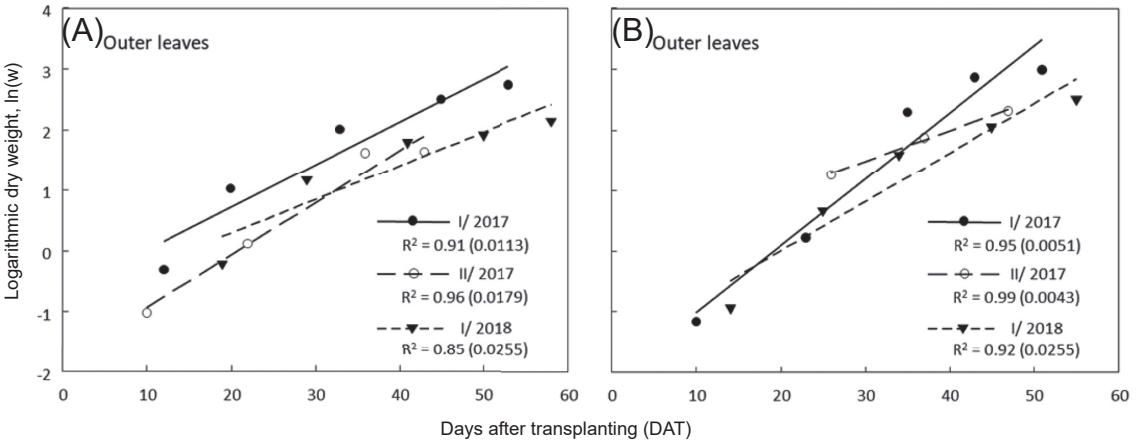


圖 4. 試驗區 (A) 427 號和 (B) 382 號各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣單株外葉乾重 (w) (g plt^{-1}) 之對數化生長曲線。R^2 表示決定係數，括弧內數值表示顯著水準。

Fig. 4. Logarithmic growth curves of dry weight (w) per plant (g plt^{-1}) for outer leaves of the crisphead lettuce plants grown in the sites (A) 427 and (B) 382 during 3 cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018). R^2 denotes coefficient of determination and the significant level is denoted in parentheses.

(I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣單株總葉片和外葉面積的生長曲線，依式 (19) 的直線型關係套配模式求出參數推估值 k_A 和 c_A (表 1)。於圖 5A 的試驗區 427 號在 I/2018 外葉面積套配生長模式的決定係數較低 (R^2 = 0.87)，於圖 5B 的試驗區 382 號在 I/2018 外葉面積的生長套配模式也偏低 (R^2 = 0.78)，然而各組資料模式套配的 R^2 顯著水準皆達 P < 0.05，仍可供表 1 中參數推估值 k_A 和 c_A 的確效依據。因此，參數推估值 k_A 和 c_A 可有效代表葉面積生長曲線所呈現之模式化特徵，且不同試驗區各期作間參數推估值之差異，將可供討論結球萵苣植株葉面積受氣候條件影響的生長變異。

圖 5A 之上圖顯示試驗區 427 號的總葉片面積在 I/2017 和 I/2018 的直線斜率較低，對應表 1 所示 I/2017 和 I/2018 的 k_A 分別為 0.1011 和 0.0983，而 II/2017 的 k_A 為 0.1349；而圖 5A 之下圖顯示外葉面積也有相同趨勢，I/2017 和 I/2018 的直線斜率較低，表 1 中 I/2017 和 I/2018 的 k_A 分別為 0.0806 和 0.0691，II/2017 的 k_A 則為 0.0996。然而，圖 5B 之上圖顯示試驗區 382 號的總葉片面積在 I/2017 的直線斜率較高，對應表 1 所示 I/2017 的 k_A 為 0.1304，而 II/2017 和 I/2018 的 k_A 分別為 0.1085 和 0.1048；圖 5B 之下圖顯示外葉面積於 I/2017 的斜率明顯較高，表 1 中 I/2017 的 k_A 為 0.1185，II/2017 和 I/2018 的 k_A 則分別為 0.0584 和 0.0762。

植株淨同化率的模擬

圖 6 所示為試驗區 427 號和 382 號各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣地上部的淨同化率 (NAR) 模擬曲線，其中分別以總葉片面積和外葉面積的 k_A 和 c_A 代入式 (20) 計算模擬出 NAR_{all} 和 NAR_{out} 隨 DAT 的變化曲線。圖 6A 顯示試驗區 427 號各期作的 NAR_{all} 曲線皆呈遞減趨勢，I/2017 和 I/2018 的遞減較 II/2017 平緩；但各期作的 NAR_{out} 曲線皆呈遞增趨勢，而且 I/2017 和 I/2018 的遞增較 II/2017 平緩。再者，圖 6B 顯示試驗區 382 號在 I/2017 和 II/2017 的 NAR_{all} 曲線亦明顯呈遞減趨勢，惟在 I/2018 維持穩定緩慢上升；相對各期作的 NAR_{out} 曲線皆呈遞增趨勢，而且 II/2017 和 I/2018 顯著加速遞增。

討論

季節性氣候差異影響結球萵苣生長的模式化評估

依據本研究模擬試驗區 427 號和 382 號各期作結球萵苣植株乾重和葉面積的生長曲

表1. 試驗區 (427號和382號) 各期作 (I/2017、II/2017和I/2018) 結球萵苣單株地上部、根部與外葉乾重 (w) (g plt^{-1}) 生長曲線以及葉片與外葉面積 (A) (cm^2 plt^{-1}) 生長曲線，套配馬爾薩斯模式 (指數型函數) $f(t) = exp(k \times t + c)$ 的推估參數。

Table 1. Estimated values of the parameters in Malthus model (i.e., exponential function) $f(t) = exp(k \times t + c)$ fitting to leaf area growth curves of all leaves and outer leaves and dry weight growth curves of shoot, root and outer leaves for the head lettuce plants grown in sites no. 427 and 382 during the cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018).

Site & cropping season	Dry weight (w)						Leaf area (A)			
	Shoot		Root		Outer leaves		All leaves		Outer leaves	
	k_w	c_w	k_w	c_w	k_w	c_w	k_A	c_A	k_A	c_A
427										
I/2017	0.0927 (0.0124)[z]	-1.012 (0.447)	0.0551 (0.0062)	-2.139 (0.223)	0.0703 (0.0126)	-0.697 (0.453)	0.1011 (0.0109)	4.066 (0.392)	0.0806 (0.0108)	4.357 (0.388)
II/2017	0.1213 (0.0088)	-2.247 (0.269)	0.0865 (0.0097)	-3.884 (0.296)	0.0860 (0.0117)	-1.799 (0.357)	0.1349 (0.0108)	2.906 (0.329)	0.0996 (0.0064)	3.440 (0.195)
I/2018	0.0861 (0.0116)	-1.481 (0.487)	NA[y]	NA	0.0559 (0.0135)	-0.8355 (0.564)	0.0983 (0.0143)	3.489 (0.596)	0.0691 (0.0156)	4.146 (0.652)
382										
I/2017	0.1215 (0.0106)	-2.292 (0.377)	0.0804 (0.0091)	-3.427 (0.325)	0.1101 (0.0148)	-2.124 (0.527)	0.1304 (0.0087)	2.765 (0.309)	0.1185 (0.0094)	2.927 (0.334)
II/2017	0.1006 (0.0047)	-1.291 (0.176)	NA	NA	0.0505 (0.0034)	-0.0312 (0.1287)	0.1085 (0.0012)	3.860 (0.046)	0.0584 (0.0003)	5.156 (0.012)
I/2018	0.1114 (0.0142)	-2.112 (0.534)	NA	NA	0.0813 (0.0138)	-1.628 (0.519)	0.1048 (0.0207)	3.779 (0.777)	0.0762 (0.0234)	4.270 (0.877)

[z] Standard error (SE).
[y] NA: none available.

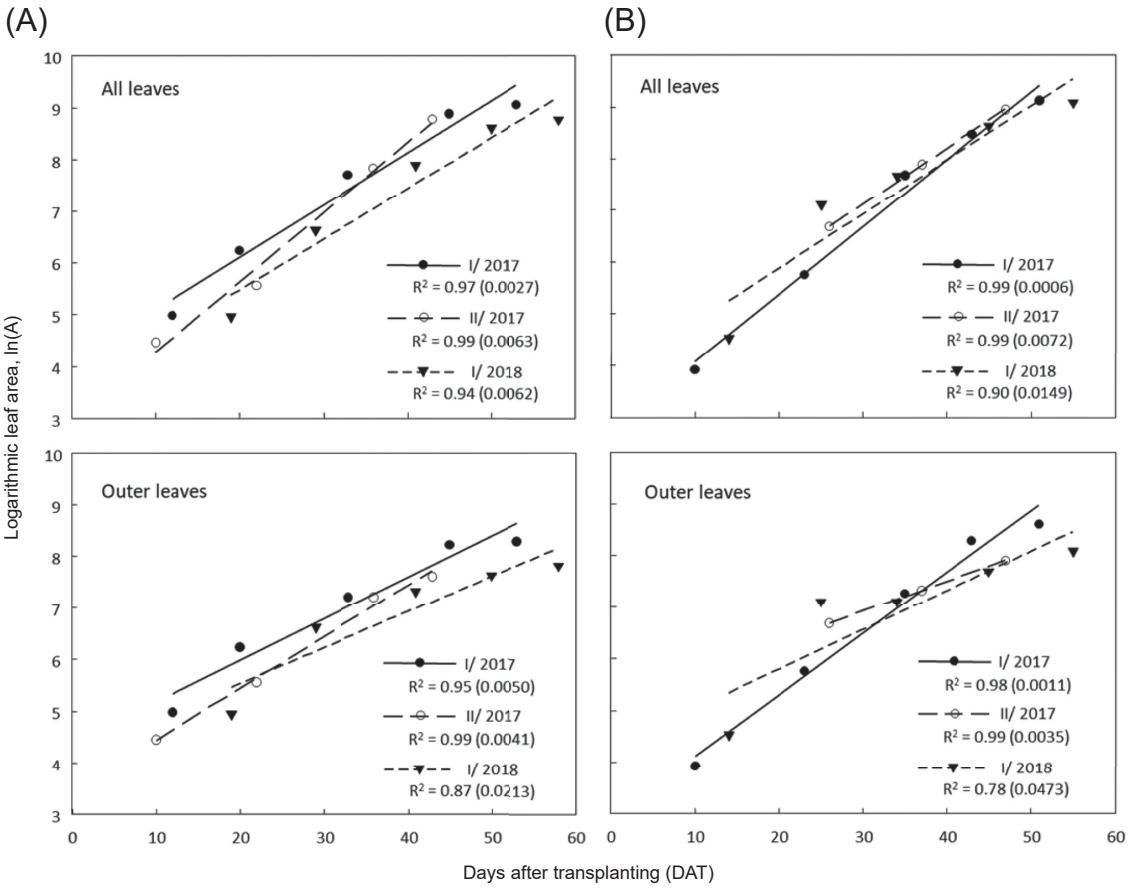


圖 5. 試驗區 (A) 427 號和 (B) 382 號各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣單株總葉片和外葉面積 (A) ($cm^2\ plt^{-1}$) 之對數化生長曲線。R^2 表示決定係數，括弧內數值表示顯著水準。

Fig. 5. Logarithmic growth curves of leaf area (A) per plant ($cm^2\ plt^{-1}$) for all leaves and outer leaves of the crisphead lettuce plants grown in the sites (A) 427 and (B) 382 during 3 cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018). R^2 denotes coefficient of determination and the significant level is denoted in parentheses.

線 (圖 3–5)，再對照表 1 中各期作間植株生物量累積和葉面積相對生長速率 (RGR 和 RLR) 的推估值 (k_w 和 k_A)，亦即直線型生長模式 [式 (18) 和式 (19)] 的斜率，可推論各期作 RGR 和 RLR 的差異即代表季節性氣候變化對植株生長變異的影響。由圖 3A 和圖 4A 的結果顯示，試驗區 427 號的 RGR 在 I/2017 和 I/2018 較小，而在 II/2017 較大，比對圖 1 中試驗區 427 號各期作氣候條件的差異，可發現 I/2017 和 I/2018 之月平均溫度 (18–20℃) 偏低，而且月累積日照時數僅 100–170 h，但 II/2017 的月平均溫度 (> 25℃) 明顯較高，月累積日照時數 (> 200 h) 也較長，如此的季節性氣候變化明顯地與不同期作間 RGR 的差異有關；對應圖 5(a) 顯示的結果，總葉片面積和外葉面積的 RLR 都與上述 RGR 有一致的季節性變化趨勢，故推論月平均溫度較高或月累積日照數較長可提高結球萵苣在生物量和葉面積的相對生長速率。關於溫度與日照輻射影響萵苣生長的研究已有相當長的歷史 (Bierhuizen 1960; Bensink 1971)，Bierhuizen *et al*. (1973) 曾提出總輻射量比累積溫度對溫室葉菜的產量影響更大，近代 Dapoigny *et al*. (2000) 也指出總輻射量是決定萵苣採收期的關鍵指標，而且不斷有研究提

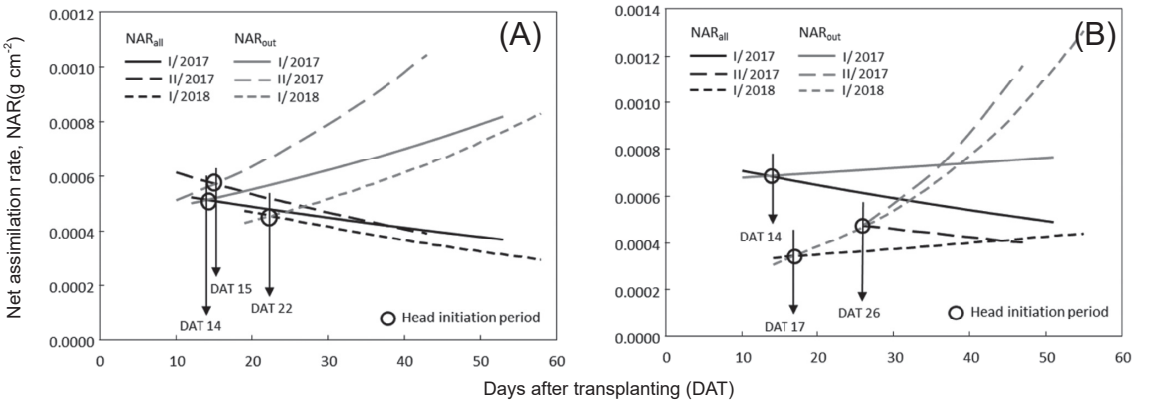


圖6. 試驗區 (A) 427號與 (B) 382號的各期作 (I/2017、II/2017和I/2018) 結球萵苣單株地上部淨同化率 (NAR) 的模擬曲線。黑色線表示以總葉片面積計算淨同化率 (NAR_{all})，灰色線表示以外葉面積計算淨同化率 (NAR_{out})。

Fig. 6. Simulated curves of net assimilation rate (NAR) partitioning into shoot for the crisphead lettuce plants grown in the sites (A) 427 and (B) 382 during 3 cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018). Black lines indicate the NAR given by all leaves (NAR_{all}); gray lines indicate the NAR given by outer leaves (NAR_{out}).

出累積溫度及有效輻射對萵苣生長速率的影響 (Salomez & Hofman 2007; Lee *et al*. 2015)，Gent (2017) 在溫室水耕萵苣生長影響因子的研究中指出，溫度和日照是與 RGR 相關性較高的環控因子，Tei *et al*. (1996) 曾同時考慮溫度和輻射量對萵苣植株生長的影響，提出以有效積溫 (effective day-degree; EDD) 取代 DAT 的萵苣生長模式，相同概念的生長模式目前也被應用於評估不同栽培種萵苣的夏季生長差異 (Carini *et al*. 2020)。然而，多數研究已證實過度高溫不利萵苣生長 (Wheeler *et al*. 1993a; Dapoigny *et al*. 2000; Zarza-Silva *et al*. 2005)，在熱帶及亞熱帶地區，結球萵苣生物量累積的最佳溫度為 20–24℃ (Thompson *et al*. 1998; Qin *et al*. 2002)，近 25℃有最大的生長速率 (Knight & Mitchell 1983)；Fazlil Ilahi *et al*. (2017) 也提出結球萵苣生長的最適根溫約 19℃。

再者，檢視圖 3B、圖 4B 和圖 5B 有關試驗區 382 號各期作 RGR 與 RLR 的差異，卻可發現在 I/2017 和 I/2018 的 RGR 較大，而 II/2017 者較小，同時在 I/2017 的 RLR 也相對較大，由圖 1 得知試驗區 382 號於 I/2017 和 I/2018 的月平均溫度是初期較低 (< 20℃)、後期較高 (> 20℃)，月累積日照時數也是初期較短 (< 150 h)、後期較長 (~ 200 h)，但 II/2017 的氣候變化卻相反，月平均溫度是初期較高 (~ 25℃)、後期較低 (< 20℃)，可推論生長期間平均溫度漸升或日照數漸增的季節性氣候變化有利結球萵苣的生物量累積和葉面積伸展。早期很多對萵苣產期受累積溫度影響的研究 (Noguchi *et al*. 1981; Wurr *et al*. 1987) 已發現，在當年晚冬定植至隔年早春收成的栽培期相較當年初秋定植至晚冬收成或隔年早春定植至入夏收成的栽培期長 (Madariaga & Knott 1951)；Wurr *et al*. (1988) 也曾研究指出，需考慮區域性輻射量之有效積溫，並配合田區土壤差異，才可精準預測最適採收期。由於不同季節的累積溫度和日照時數有所差異 (Madariaga & Knott 1951; Zink & Yamaguchi 1962)， 不同期作植株符合市場價值的最適採收期也不盡相同 (Wurr & Fellows 1984)，若僅以長期紀錄的平均積溫或平均有效積溫將無法精準預測採收符合市場價值葉球的時間 (Kristensen *et al*. 1987)。故本研究於圖 3–5 及表 1 所提出之生長模式與生理參數 RGR 和 RLR 的推估值，確實可反映各期作不同季節性氣候變化造成植株生長變異的關聯性，若要精準預測結球萵苣的最適採收期，必須同時考慮品種、不同產期的氣候條件及生產區現地 (*in situ*) 土壤的管理 (Wurr *et al*. 1988)。

植株淨同化率的分配與葉球發育起始時間的關聯

經由上述討論得知，不同期作的季節性氣候差異顯著影響結球萵苣的 RGR 和 RLR，而且不同氣候條件對 RGR 和 RLR 的影響趨勢一致，若要更清楚地說明不同氣候條件改變 RGR 和 RLR 對 NAR 之影響，本研究依據式 (21) 之關係，以表 1 所示之 RGR 與 RLR 的推估值 k_w 和 k_A 進行計算，且分別以總葉片和外葉面積的 k_A 對應地上部乾重的 k_w，結果以總葉片面積對應的比值 k_w/k_A 幾乎都小於 1，而展開外葉面積對應的 k_w/k_A 都大於 1，亦即如果葉球的內葉也被視為植株地上部生物量累積的供源，則總葉片面積對應的 NAR_{all} 將下降，若生物量累積的供源僅來自外葉，則對應的 NAR_{out} 會持續上升，由圖 6 所示之模擬結果得知，各期作的 NAR_{all} 和 NAR_{out} 模擬曲線皆與 RGR/RLR 的推論趨勢相符。以上結果表示，外葉為供源的光合產物大部分轉移至葉球，促其內葉成長、面積擴大及地上部乾重累積，此與 Liao *et al*. (1993) 對甘藍和結球白菜結球生理機制的說明一致，葉球所屬之內葉面積並非新增生物量之供源。

由於結球萵苣的結球生理反應受溫度與日照所影響，生長初期的高溫會抑制結球 (Jackson *et al*. 1996; Dufault *et al*. 2009)，而結球後期過度高溫和長日照易導致植株提早老化、抽薹、代謝產物增加 (Lee *et al*. 2015; Al-Said *et al*. 2018) 等不利市場價值的生理反應，為延長產期並維持收穫品質，季節性的氣候變化造成結球率或官能品評下降仍是目前亟待改善的技術瓶頸，因此依據不同期作氣候條件之差異，模擬球心發育的起始日期和預估葉球成長達收穫標準之採收日期，是監控結球萵苣栽培過程的關鍵依據，更是因應目前國內結球萵苣契作型計畫生產所需之決策資訊。依圖 5 中單株總葉片及外葉面積的生長觀測紀錄點，第一次和第二次採樣記錄點之總葉片及外葉面積相同，第三次採樣時 (約 DAT 30–40) 才有明確可分辨屬於葉球內葉面積的記錄值，葉球積儲的成長自球心發育開始，會持續受外葉供源在不同氣候條件的光合作用差異所影響 (Liao *et al*. 1993)。本研究以圖 6 所示 NAR_{all} 和 NAR_{out} 之模擬曲線於生長初期的交會點，回溯球心發育的可能起始日期，該交會點約在可明確分辨記錄葉球內葉面積的定植天數前 1–2 wk，也就是植株定植後 2 wk 球心即開始發育；試驗區 427 號各期作回溯球心發育起始日期分別在 DAT 14、DAT 15 和 DAT 22；試驗區 382 號各期作回溯球心發育起始日分別在 DAT 14、DAT 26 和 DAT 17；最明顯的差異在試驗區 427 號的 I/2018 和試驗區 382 號的 II/2017，其回溯球心發育起始日期明顯延後，這兩期作的試驗期間都是定植初期高溫 (月均溫 ~ 25℃) 且日照時數長 (月累積日照時數 ~ 150 h) (圖 1)，爾後溫度逐漸降低 (月均溫 < 20℃) 並日照時數縮短 (< 120 h)，此結果與其他文獻推論趨勢一致，可能是結球萵苣的球心發育易受高溫和長日照干擾而遲緩 (Wurr *et al*. 1981; Maaswinkel & Welles 1987)。於田間的現地栽培過程，若球心發育受抑制可能降低整體結球率和產量，即使僅球心發育延遲仍易造成後續葉球成長期較短，若延後採收更會造成植株老化、開頭 (open head) 或抽薹等無效生產的生理反應。

氣候條件造成植株生長變異對葉球收穫產量和品質特徵的影響

依據本研究對不同試驗區各期作結球萵苣之生長分析，經由套配生長模式估算出生理參數 RGR 和 RLR (表 1)，並以葉球積儲和外葉供源的光合產物分配調節假設下，模擬出植株在各期作不同氣候條件下 NAR_{all} 和 NAR_{out} 的變化曲線 (圖 6)，並可藉此回溯模擬球心發育起始日期。為進一步供評估氣候條件對葉球收穫產量和品質特徵的影響，本研究將模擬球心發育的起始日期和採收日期 (DAT)，以基礎氣溫 4℃ (Kristensen *et al*. 1987) 換算對應生長積溫日數 (growing degree days; GDD)，同時把各期作收穫葉球的平均單株球徑、球長和鮮重計算彙整如表 2，其中試驗區 427 號的 I/2017 葉球鮮重 (~ 660 g plt^{-1}) 明顯高於同區另外兩期作，而在試驗區 382 號的 I/2017 和 I/2018 葉

表 2. 試驗區 (427 號和 382 號) 各期作 (I/2017、II/2017 和 I/2018) 結球萵苣球心發育和收穫積溫日數，以及單株平均收穫葉球之球徑、軸長和鮮重等特徵。

Table 2. Growing degree days of hearting and harvest and the leafy head characteristics including averages of diameter, axis length and fresh weight per plant for head lettuce plants grown in sites no. 427 and 382 during cropping seasons I/2017, II/2017 and I/2018, respectively.

	Growing degree days		Leafy head characteristics		
Site & cropping season	Hearting (℃)	Harvest (℃)	Diameter (cm plt^{-1})	Length (cm plt^{-1})	Fresh weight (g plt^{-1})
427					
I/2017	192.9 (14)[z]	756.7 (53)	15.1 [0.28][y]	14.0 [0.26]	661.0 [18.5]
II/2017	301.1 (15)	757.7 (43)	13.8 [0.30]	12.9 [0.23]	221.3 [18.7]
I/2018	301.0 (22)	764.7 (58)	13.8 [0.36]	14.2 [0.61]	421.8 [25.1]
382					
I/2017	183.5 (14)	739.5 (51)	14.4 [0.24]	12.9 [0.53]	458.1 [30.1]
II/2017	412.1 (26)	710.7 (47)	16.5 [0.62]	13.2 [0.43]	434.0 [45.9]
I/2018	192.1 (17)	741.9 (55)	15.3 [0.30]	14.5 [0.24]	493.3 [33.1]

[z] Days after transplanting (DAT).
[y] Standard error (SE).

球鮮重較高 (> 450 g plt^{-1})，雖然葉球鮮重可能同時與球徑和球長有關，卻無明顯相關趨勢。再者，各期作以專業農民經驗所判定的採收日期 (DAT 43–58) 有明顯差異，對應換算成 GDD 約 710–760，如此以 GDD 判斷採收日期的變異範圍，若以當時日均溫為 25℃回推估計僅 DAT 2–3 的時間差，表示設定 GDD (例如：平均 GDD = 735) 為供判斷採收日期的指標，可合理替代專業農民判斷的最適採收日期，此與很多文獻說明積溫日數可用於判斷萵苣成熟度及採收時間的建議相符 (Brunini *et al*. 1976; da Silva *et al*. 1999; Fraile-Robayo *et al*. 2017)。此外，表 2 中各期作模擬球心發育起始日期的 GDD 較少者，即是上述收穫葉球鮮重較高的期作，此結果不僅符合前一節討論中已說明定植初期溫度較低則球心發育較早，而且球心發育起始日期換算 GDD 值也會較少，可預期葉球會有較高產量的潛能，因為判斷採收日期的 GDD 值固定，則球心發育起始 GDD 較少者，葉球將有較長的 GDD 成長期。

結論

本研究提出結球萵苣的生長分析策略與模式化過程 (圖 2) 對植株生長變異與氣候條件之關聯性進行分析評估，由結果已說明平均溫度較高或日照數較長會促進結球萵苣的生物量和葉面積的相對生長速率，而且生長期間月平均溫度漸升或月累積日照數漸增的季節性氣候條件有利於生物量累積和葉面積生長。以本研究建構之結球萵苣生長模式推估生理參數 RGR 和 RLR，確實可供評估不同季節性氣候條件造成植株生長變異的指標，若能再考慮品種差異及生產區土壤特性以擴充模式之適用性，則這些推估參數將可用於建構國內結球萵苣的精準產銷系統。再者，本研究提出分別設定總葉片和展開外葉為光合產物供源的兩種生長分析策略，依總葉片面積計算地上部生物量的淨同化率 (NAR_{all}) 會隨植株生長而持續下降，但僅以展開外葉面積計算淨同化率 (NAR_{out}) 則隨植株生長持續上升，這表示外葉為供源的光合產

物大部分轉移至地上部，以促進葉球內葉面積伸展及乾重累積，但葉球內葉並非光合產物之主要供源。本研究並以 NAR_{all} 和 NAR_{out} 的模擬曲線於生長初期之交會點，回溯球心發育的可能起始日期，推論出植株約在定植後 2 wk 球心開始發育，若以本研究歸納建議之積溫日數 (GDD = 735) 推算最適採收日期，則氣候條件有利於球心開始發育之積溫日數愈低者，葉球將會有較長積溫日數的生長過程，推論其單株平均葉球產量也會較高。

引用文獻

Al-Said, F., P. Hadley, S. Pearson, M. M. Khan, and Q. Iqbal. 2018. Effect of high temperature and exposure duration on stem elongation of iceberg lettuce. Pak. J. Agri. Sci. 55:95–101. doi:10.21162/PAKJAS/18.6554

Anten, N. P. R. and D. D. Ackerly. 2001. A new method of growth analysis for plants that experience periodic losses of leaf mass. Funct. Ecol. 15:804–811. doi:10.1046/j.0269-8463.2001.00582.x

Bensink, J. 1971. On Morphogenesis of Lettuce Leaves in Relation to Light and Temperature. H. Veenman & Zonen N. V. Wageningen, The Netherlands. 93 pp.

Bierhuizen, J. F. 1960. The relation between temperature, light and yield of various vegetables in a greenhouse. Meded. Dir. Tuinb. 23:822–831. (in Dutch with English abstract)

Bierhuizen, J. F., J. L. Ebbens, and N. C. A. Koomen. 1973. Effects of temperature and radiation on lettuce growing. Neth. J. Agr. Sci. 21:110–116.

Blackman, V. H. 1919. The compound interest law and plant growth. Ann. Bot. 33:353–360. doi:10.1093/oxfordjournals.aob.a089727

Borrelli, K., R. T. Koenig, B. M. Jaeckel, and C. A. Miles. 2013. Yield of leafy greens in high tunnel winter production in the Northwest United States. HortScience. 48:183–188. doi:10.21273/HORTSCI.48.2.183

Briggs, G. E., F. Kidd, and C. West. 1920. A quantitative analysis of plant growth. Part I. Ann: Appl. Biol. 7:103–123. doi:10.1111/j.1744-7348.1920.tb05107.x

Brunini, O., R. S. Lisbão, J. B. Bernar-DI, J. B. Fornasier, and M. J. Pedro Júnior. 1976. Base temperature for lettuce in a heat-unit system. Bragantia 35:213–219.

Carini, F., A. C. Filho, R. V. Pezzini, J. M. de Souza, G. G. Chaves, and A. Procedi. 2020. Nonlinear models for describing lettuce growth in autumn-winter. Ciência Rural. 50:e20190534. doi:10.1590/0103-8478cr20190534

Chan, L. F., H. Y. Lu, C. T. Lu, and C. H. Lai. 1995. Relationship between leaf area and dry biomass production in wetland Taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott]. J. Agric. Res. China. 44:59–71. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.199503.0007

Chan, L. F., C. T. Lu, and H. Y. Lu. 1998. Growth analysis of wetland taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott] under various crops seasons. J. Agric. Res. China 47:220–241. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.199809.0003

Chang Chien, H. J. and Y. P. Hsu. 2003. Effect of planting density on the growth and yield of loose head lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata L.). Res. Bull. Taoyuan Dist. Agric. Res. Ext. Sta. 54:21–42. (in Chinese with English abstract)

Chen, C. and P. K. Lie. 1997. Evaluation of the growth models for Packhoi. J. Agric. Forest. 46:65–83. (in Chinese with English abstract)

Chen, H., M. H. Hsieh, and L. Y. D. Liu. 2019. Incorporation of solar radiation and temperature to estimate production of field growing iceberg lettuce. Crop Environ. Bioinform. 16:98–108. (in Chinese with English abstract) doi:10.30061/CEB.201906_16(2).0004

Dapoigny, L., S. de Tourdonnet, J. Roger-Estrade, M.-H. Jeuffroy, and A. Fleury. 2000. Effect of nitrogen nutrition on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.), under various conditions of radiation and temperature. Agronomie 20:843–855. doi:10.1051/agro:2000162

da Silva, E. L., L. F. Martinez, and M. Yitayew. 1999. Relationship between lettuce crop coeficient and growing degree days. Hortic. Bras. 17:134–142. doi:10.1590/S0102-05361999000200012

DOP_TWCOA. 2020. The goals of agricultural production in 2020. Agric. Pol. Rev. 333:46–58. (in Chinese)

Dufault, R. J., B. Ward, and R. L. Hassell. 2009. Dynamic relationships between field temperatures and romaine lettuce yield and head quality. Sci. Hortic. 120:452–459. doi:10.1016/j.scienta.2009.01.002

Fazlil Ilahi, W. F., D. Ahmad, and M. C. Husain. 2017. Effects of root zone cooling on butterhead lettuce grown in tropical conditions in a coir-perlite mixture. Hort. Environ. Biotechnol. 58:1–4. doi:10.1007/s13580-017-0123-3

Fraile-Robayo, R. D., J. G. Álvarez-Herrera, A. J. Reyes M., O. F. Álvarez-Herrera, and A. L. Fraile-Robayo.

2017. Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. Agron. Colomb. 35:216–222. doi:10.15446/agron.colomb.v35n2.63439

Gallardo, M., R. L. Snyder, K. Schulbach, and L. E. Jackson. 1996. Crop growth and water use model for lettuce. J. Irrig. Drain. Eng. 122:354–359.

Gent, M. P. N. 2017. Factors affecting relative growth rate of lettuce and spinach in hydroponics in a greenhouse. HortScience 52:1742–1747. doi:10.21273/HORTSCI12477-17

Glenn, E. P. 1984. Seasonal effects of radiation and temperature on growth of greenhouse lettuce in a high insolation desert environment. Scientia Hort. 22:9–21. doi:10.1016/0304-4238(84)90078-5

Jackson, J. E. 1963. Relationship of relative leaf growth rate to net assimilation rate and its relevance to the physiological analysis of plant yield. Nature. 200:909. doi:10.1038/200909a0

Jackson, L., K. Mayberry, F. Laemmlen, S. Koike, K. Schulbach, and W. Chaney. 1996. Iceberg Lettuce Production in California. University of California. Division of Agriculture and Natural Resources. Richmond, CA. 6 pp.

Jenni, S. and W. Yan. 2009. Genotype by environment interactions of heat stress disorder resistance in crisphead lettuce. Plant Breed. 128:374–380. doi:10.1111/j.1439-0523.2009.01657.x

Knight, S. L. and C. A. Mitchell. 1983. Stimulation of lettuce productivity by manipulation of diurnal temperature and light. HortScience. 18:462–463.

Kögel, T. and A. Prskawetz. 2001. Agricultural productivity growth and escape from the Malthusian trap. J. Econ. Growth. 6:337–357.

Kristensen, S., E. Friis, K. Henriksen, and S. A. Mikkelsen. 1987. Application of temperature sums in the timing of production of crisp lettuce. Acta Hort. 198:217–226. doi:10.17660/ActaHortic.1987.198.27

Lafta, A., G. Sandoya, and B. Mou. 2021. Genetic variation and genotype by environment interaction for heat tolerance in crisphead lettuce. HortScience 56:126–135. doi:10.21273/HORTSCI15209-20

Lee, A. C., F. S. Liao, and H. F. Lo. 2015. Temperature, daylength, and cultivar interact to affect the growth and yield of lettuce grown in high tunnels in subtropical regions. HortScience 50:1412–1418.

Lemmen, C. 2014. Malthusian assumptions, Boserupian response in transition to agriculture models. p.87–97. *in*: Ester Boserup's Legacy on Sustainability: Orientations for Contemporary Research. Human-Environm. Interact. Vol 4. (Fischer-Kowalski, M., A. Reenberg, A. Schaffartzik, and A. Mayer, eds.) Springer. Dordrecht, The Netherlands. 267 pp.

Liao, F. H., H. Huang, L. Hung. 1993. Physiology of head formation in cabbage and Chinese cabbage. p.181–192. *in*: Proceedings of a Symposium on Vegetable Production and Development. April 11–12, 1991. Taichung, Taiwan. Taiwan Agric. Res. Inst. Taichung, Taiwan. (in Chinese with English abstract)

Maaswinkel, R. H. M. and G. W. H. Welles. 1987. Factors affecting head formation of iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.). Neth. J. Agric. Sci. 35:37–42. doi:10.18174/njas.v35i1.16756

Madariaga, F. J. and J. E. Knott. 1951. Temperature summation in relation to lettuce growth. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 58:147–152.

Masarirambi, M. T., K. A. Nxumalo, P. J. Musi, and L. M. Rugube. 2018. Common physiological disorders of lettuce (*Lactuca sativa*) found in Swaziland: A review. Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 18:50–56. doi:10.5829/idosi.aejaes.2018.50.56

Noguchi, M., K. Hoshino, and M. Kikkawa. 1981. Analysis of factors determining the vegetable crops yield. III. Effect of temperature on growth and dry matter production of lettuce at different growth stages. Bulletin of the Vegetable and Ornamental Crops Research Station. Series A. 9:47–62. (in Japanese with English abstract)

Nothmann, J. 1977. Effects of soil temperature on head development of cos lettuce. Scientia Hort. 7:97–105.

Poorter, H. and A. van der Werf. 1998. Is inherent variation in RGR determined by LAR at low irradiance and by NAR at high irradiance? A review of herbaceous species. p.309–336. *in*: Inherent Variation in Plant Growth. Physiological Mechanisms and Ecological Consequences. (Lambers, H., H. Poorter, and M. M. I. van Vuuren, eds.) Backhuys Publishers. Leiden, The Netherlands. 592 pp.

Potter, J. R. and J. W. Jones. 1977. Leaf area partitioning as an important factor in growth. Plant Physiol. 59:10–14. doi:10.1104/pp.59.1.10

Qin, L., J. He, and S. K. Lee. 2002. Response of lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth to reciprocal root-zone temperature (RZT) transfer at different growth stages. J. Hort. Sci. 77:683–690. doi:10.1080/14620316.2002.11511557

Salomez, J. and G. Hofman. 2007. A soil temperature/short-wave radiation growth model for butterhead lettuce under protected cultivation in Flanders. J. Plant Nutr. 30:397–410. doi:10.1080/01904160601171629

Seginer, I. 2003. A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. Ann. Bot. 91:623–635. doi:10.1093/aob/

mcg069

Silva, E. C., W. R. Maluf, N. R. Leal, and L. L. A. Gomes. 1999. Inheritance of bolting tendency in lettuce *Lactuca sativa* L. Euphytica. 109:1–7.

Tei, F., D. P. Aikman, and A. Scaife. 1996. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modelling. Ann. Bot. 78:645–652.

Thompson, H. C., R. W. Langhans, A. J. Both, and L. D. Albright. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 123:361–364. doi:10.21273/JASHS.123.3.361

van Henten, E. J. 1994. Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. Agric. Syst. 45:55–72. doi:10.1016/s0308-521x(94)90280-1

van Holsteijn, H. M. C. 1980. Growth of lettuce II. Quantitative analysis of growth. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen. 80(13):1–24.

Weil, D. N. and J. Wilde. 2009. How relevant is Malthus for economic development today? Amer. Econ. Rev. 99:255–260. doi:10.1257/aer.99.2.255

West, C., G. E. Briggs, and F. Kidd. 1920. Methods and significant relations in the quantitative analysis of plant growth. New Phytol. 19:200–207. doi:10.1111/j.1469-8137.1920.tb07327.x

Wheeler, T. R., P. Hadley, R. H. Ellis, and J. I. L. Morison. 1993a. Changes in growth and radiation use by lettuce crops in relation to temperature and ontogeny. Agric. For. Meteorol. 66:173–186. doi:10.1016/0168-1923(93)90069-T

Wheeler, T. R., P. Hadley, J. I. L. Morison, and R. H. Ellis. 1993b. Effects of temperature on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and the implications for assessing the impacts of potential climate change. Eur. J. Agron. 2:305–311. doi:10.1016/S1161-0301(14)80178-0

Wurr, D. C. E., J. R. Fellows, and G. E. L. Morris. 1981. Studies of the hearting of butterhead lettuce: Temperature effects. J. Hort. Sci. 56:211–218. doi:10.1080/00221589.1981.11514992

Wurr, D. C. E. and J. R. Fellows. 1984. The growth of three crisp lettuce varieties from different sowing dates. J. Agric. Sci. Camb. 102:733–745. doi:10.1017/S0021859600042301

Wurr, D. C. E., J. R. Fellows, and A. J. Pittam. 1987. The influence of plant raising conditions and transplant age on the growth and development of crisp lettuce. J. Agric. Sci. Camb. 109:573–581. doi:10.1017/S002185960008179X

Wurr, D. C. E., J. R. Fellows, and R. F. Suckling. 1988. Crop continuity and prediction of maturity in the crisp lettuce variety Saladin. J. Agric. Sci. Camb. 111:481–486. doi:10.1017/S0021859600083672

Yang, C. F. and T. C. Lin. 2017. Establishment of dynamic growth model of lettuce in subtropical region. Res. Bull. Tainan Dist. Agric. Res. Ext. Sta. 70:56–66. (in Chinese with English abstract)

Yang, C. F. and T. C. Lin. 2019. Sensitivity analysis of growth mode of lettuce in subtropical greenhouse. J. Taiwan Agric. Eng. 65(2):23–33. (in Chinese with English abstract) doi:10.29974/JTAE.201906_65(2).0003

Zarza-Silva, H. A., T. Maruo, M. Takagaki, M. Hohjo, and Y. Shinohara. 2005. Lettuce production using a commercial scale recirculated capillary hydroponic system. Jpn. J. Trop. Agr. 49:45–52. doi:10.11248/jsta1957.49.45

Zhang, L., Z. Xu, D. Xu, J. Ma, Y. Chen, and Z. Fu. 2020. Growth monitoring of greenhouse lettuce based on a convolutional neural network. Hortic. Res. 7:124. doi:10.1038/s41438-020-00345-6

Zink, F. W. and M. Yamaguchi. 1962. Studies on the growth rate and nutrient absorption of head lettuce. Hilgardia. 32:471–500.

Evaluation of the Relationship between Growth Variations of Crisphead Lettuce and Climate Conditions through Growth Analysis and Modeling

Chu-Chung Chen[1,2], Dar-Yuan Lee[3], and Kai-Wei Juang[4,*]

Abstract

Chen, C. C., D. Y. Lee, and K. W. Juang. 2021. Evaluation of the relationship between growth variations of crisphead lettuce and climate conditions through growth analysis and modeling. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):253–269.

Crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.), which is often grown in cool-season region in Taiwan is the flagship vegetable for export. Because high temperature will cause bolting without head formation (i.e., heading), head lettuce is often cultivated from early autumn until the following spring. The relationship between lettuce growth variations and seasonal climate conditions was investigated by modeling parameters in plant physiology to positively develop a smart management system for lettuce production in the field. Only leafy head (i.e., curly inner leaves) of crisphead lettuce has a market value; outer leaves are mainly used for protection during harvest, storage and transportation. However, outer leaves play an important role in plant physiology by providing photosynthate (i.e., source) to support leafy head, which is the primary utilizer of photosynthate (i.e., sink) for growing inner leaves. Growth of outer leaves could be used as an index for the yield of leafy head during harvest and planting management. This study was conducted in two experimental sites no. 427 and 382 located at Erlun Township, Yunlin County during the period 2017–2018. Growth of lettuce plants was measured in three cropping seasons (I/2017, II/2017 and I/2018). In order to investigate the relationship between growth variations and climate conditions, the Malthusian growth model was used to estimate physiological parameters: relative growth rate (RGR) and relative leaf-growth rate (RLR). The results revealed that both RGR and RLR were related to the growth variations of lettuce in three cropping seasons, which would be due to the seasonal climate changes. Higher monthly average temperature and longer monthly daylight hours enhanced the biomass accumulation and leaf area expanding. Within cropping season, the gradual increases of average temperature and daylight hours were also beneficial for plant growth. In addition, the growth models for estimation of RGR and RLR were used to simulate net assimilation rates (NARs) in shoot, given that all leaves or outer leaves were the primary source of photosynthate. Based on the simulated curves of NAR, outer leaves provided most of photosynthates, which were transferred into shoots to promote area expanding and dry mass accumulation of curly inner leaves in leafy head. The intersection of both simulated curves of NAR derived from the outer leaves and all leaves indicated the date of hearting. Eventually, an average of growing degree days (GDD = 735) was suggested to be as an index of harvest date.

Key words: Exponential function, Relative growth rate (RGR), Leaf area ratio (LAR), Net assimilation rate (NAR), Heading.

Received: May 20, 2021; Accepted: June 29, 2021.
* Corresponding author, e-mail: kwjuang@mail.ncyu.edu.tw
[1] Doctoral Student, Department of Agricultural Chemistry, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC.
[2] Associate Research Fellow, Agricultural Chemistry Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[3] Professor, Department of Agricultural Chemistry, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC.
[4] Professor, Department of Agronomy, National Chiayi University, Chiayi, Taiwan, ROC.

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):271–284 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0004

研究報告

以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性—以彰化扇頂區為例

劉滄棪[1]　林毓雯[2]　詹婉君[3]　彭宗仁[4,*]

摘要

劉滄棪、林毓雯、詹婉君、彭宗仁。2021。以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性—以彰化扇頂區為例。台灣農業研究 70(4):271–284。

本研究利用以氫氧同位素及氯離子建構而成的端點水源混合分析技術，進行彰化扇頂區地下水及八卦山地下水之補注來源分析。進一步，本研究探究濁水溪溪水、八卦山地下水與彰化扇頂區地下水三者間之關聯。結果顯示，八卦山地下水約有 47% 來自雨水入滲，53% 來自引來的濁水溪溪水。濁水溪溪水是彰化平原地下水之主要補注源，約占總補注量的 68%；其中，約有 38% 來自河床溪水直接補注，另外 30% 來自八卦山上來自濁水溪的灌溉水。也就是說，濁水溪溪水可被引至八卦山進行農業灌溉，之後灌溉水入滲形成地下水進而形成彰化平原地下水的補注水源。本水源分析研究不僅半定量證明濁水溪溪水對彰化平原地下水的重要性，也驗證了農業灌溉水的循環性。

關鍵詞：灌溉用水、穩定氫氧同位素、天然示蹤技術、扇頂地下水、彰化。

前言

依據經濟部統計資料 (Water Resources Planning Commission 1995)，1993 年台灣地區各標的用水總量約 171.06 × 10^8 m^3。其中以農業灌溉用水 97.13 × 10^8 m^3 (占約 56.6%) 最多，其次依序為農業養殖用水 28.01 × 10^8 m^3 (占約 16.4%)，生活用水 27.71 × 10^8 m^3 (占約 16.2%)，工業用水 16.84 × 10^8 m^3 (占約 9.8%)，農業畜牧用水 1.37 × 10^8 m^3 (占約 < 1%)。由此數據顯示，農業灌溉用水是水資源利用的最大支出項目。

表面上上述統計資料容易讓人誤解農業灌溉是一種高耗水產業。然而，農業灌溉用水並非全然是一種淨支出 (Tabbal *et al*. 2002)。部分灌溉水或地面水可藉由蒸發散回歸大氣，若佐以適當降雨條件，亦能再提供作為水資源；再者，灌溉亦可經由地表灌溉渠道與田間水入滲補注地下水。例如 Peng *et al*. (2012) 利用氫氧同位素技術推估桃園台地的地下水有 54% 來自台地降雨，而台地降雨中有 6% 是來自地面水 (池塘水) 的蒸發補充。此外，根據農委會資料 (Chen & Yang 2004)，在台灣農業灌溉用水中的 64% 是可經由水循環再利用的活水，其中的 66% 可補注地下水，另外的 34% 大部分回歸地面水源如河川、湖泊及海洋。因此，雖然表面上水資源收支帳中農業灌溉用水為最大耗水產業，但大多數農業灌溉用水仍可進入水圈循環而再被利用。

濁水溪沖積扇所屬之彰化、雲林兩縣為本省之主要農業生產區，灌溉用水需求殷切，但因地表水源時空分布不均，故需以地下水為輔助水源。自 1975 年起為發展農業，開始進行地

投稿日期：2020 年 9 月 16 日；接受日期：2021 年 7 月 23 日。
* 通訊作者：trpeng@nchu.edu.tw
[1] 農委會農業試驗所農業化學組研究員兼組長。台灣 台中市。
[2] 農委會農業試驗所農業化學組副研究員。台灣 台中市。
[3] 國立中興大學土壤環境科學系研究助理。台灣 台中市。
[4] 國立中興大學土壤環境科學系教授。台灣 台中市。

下水之大量開發，1981 年起又因沿海地區養殖業興起，對地下水之抽用更有變本加厲之趨勢。根據水利單位之統計 (Water Conservancy Bureau 1997)，地下水源目前已占彰、雲二縣用水總需求的 27–39%，其中灌溉用水約 10–50% 係使用地下水，禽畜、養殖及生活用水則幾乎全以地下水供應，估計工業用水之 90% 亦係來自地下水。顯見瞭解區域地下水之補注來源至為重要。

在彰化地區，八卦山脈涵養大量的山泉水，全長近 5 km 的台 76 線「八卦山隧道」，沿線設有導水測溝，汲引山泉水往東、西兩側出口每天不斷流出，據估計每天至少有 10 座游泳池的水量。而令人好奇的是，八卦山內擁有大量之地下水究竟是單純來自雨水入滲補注，還是另有其他補注來源，尚未被研究。另外，近年來政府在八卦山實行高地旱灌水源設施營運 (Ministry of Economic Affairs 2007)，此計畫規劃自集集攔河堰引濁水溪溪水引水至八卦山公池再經灌溉渠道分送至各農戶進行農業灌溉。此濁水溪溪水被引至八卦山灌溉後，是否有下滲形成八卦山地下水，或進而再補注至彰化平原地下水，迄今也尚未有任何相關研究。

理想的示蹤劑在物理性質上必須與水相同，在化學性質上又能不與水及含水層介質發生反應。近 30 年，穩定氫、氧同位素技術已是被用來追溯標的水體來源有力工具之一。以穩定氫、氧同位素技術追溯標的水體來源之原理，是建立在不同環境的水體因遭受不同程度或不同類別的同位素分化作用 (isotope fractionation)，而會有不同的氫、氧同位素組成特徵 (δ^2H 及 $\delta^{18}O$ 值) (Gat 1981b)。此外，在一般自然環境下除了像地熱水那樣的高溫環境 (溫度高於 80℃) 外，水體中的氫、氧同位素不易與周圍的岩礦發生化學反應而改變其原來的同位素組成特徵 (Gat 1981a)。因此，氫、氧穩定同位素應用在水文方面之研究是利用其具守恆的地球化學特性。所以，當天水 (雨水或地表水) 入滲形成地下水後，來源水體的氫、氧同位素組成特徵會記錄在地下水中。因此，此同位素組成特徵差異就可做為偵測地下水來源之依據，或者探討相關水體間的水體關聯性 (Clark & Fritz 1997)。另外，氯化物具活性小的特性，不易產生化學反應，因此氯離子濃度常被許多文獻用來作為示蹤劑，用以測定水的來源、移動及混合 (Clark & Friz 1997; Barth *et al*. 2006; Peng *et al*. 2014; Peng *et al*. 2016)。

因此，本研究乃利用以氫氧同位素及氯離子建構而成的端點水源混合分析技術 (Peng *et al*. 2016)，進行彰化扇頂區地下水及八卦山地下水之補注來源分析。進一步，本研究探究濁水溪溪水、八卦山地下水與彰化扇頂區地下水三者間之關聯，以驗證農業灌溉水的循環性。

材料與方法

標本採樣

本研究之區域包括八卦山台地及濁水溪沖積扇彰化扇頂區 (圖 1)。濁水溪沖積扇為台灣最大之沖積扇，北起烏溪南岸，南約止於北港溪，東以八卦山及斗六丘陵為界，西接台灣海峽，流域面積約 2,000 km^2。本研究雨水、溪水及地下水各類水體之採樣點如圖 1 所示，扼述如下：

1. 雨水：本研究長期雨水之同位素及化學數據取自 Peng *et al*. (2015) 中的資料，計有 2011–2013 三年共 161 個雨水數據。
2. 溪水：溪水在濁水溪名竹大橋 (SW1)、彰雲大橋 (SW2)、取水站 (SW3) 及溪州大橋 (SW4) 等 4 處溪水採樣。各點於 2017 年 2 月至 2018 年 2 月間每月採樣 1 次。
3. 八卦山地下水：計有 5 處地下水滲流點，分別標記為 MG1、MG2、MG3、MG4 及 MG5，各點於 2017 年 3 月至 2018 年 2 月間每月採樣 1 次。
4. 平原地下水：地下水分別採自水利署觀測井及農用灌溉井。水利署觀測井共有 5 口井分別位於二水 (PG3)、田中 (PG4) 及柑園 (PG5) 三地下水觀測站，其中二水站有 1 井 PG3，田中站有淺、深 2 井分別為 PG4-1 及 PG4-2，柑園站亦有淺、深 2 井分別為 PG5-1 及 PG5-2。農用灌溉井有 PG1 及 PG2 二站井。水利署觀測井分別於 2017 年 4 月及 9 月各採樣 1 次；農用灌溉井於 2017–2019 年間分別採樣 7 次。

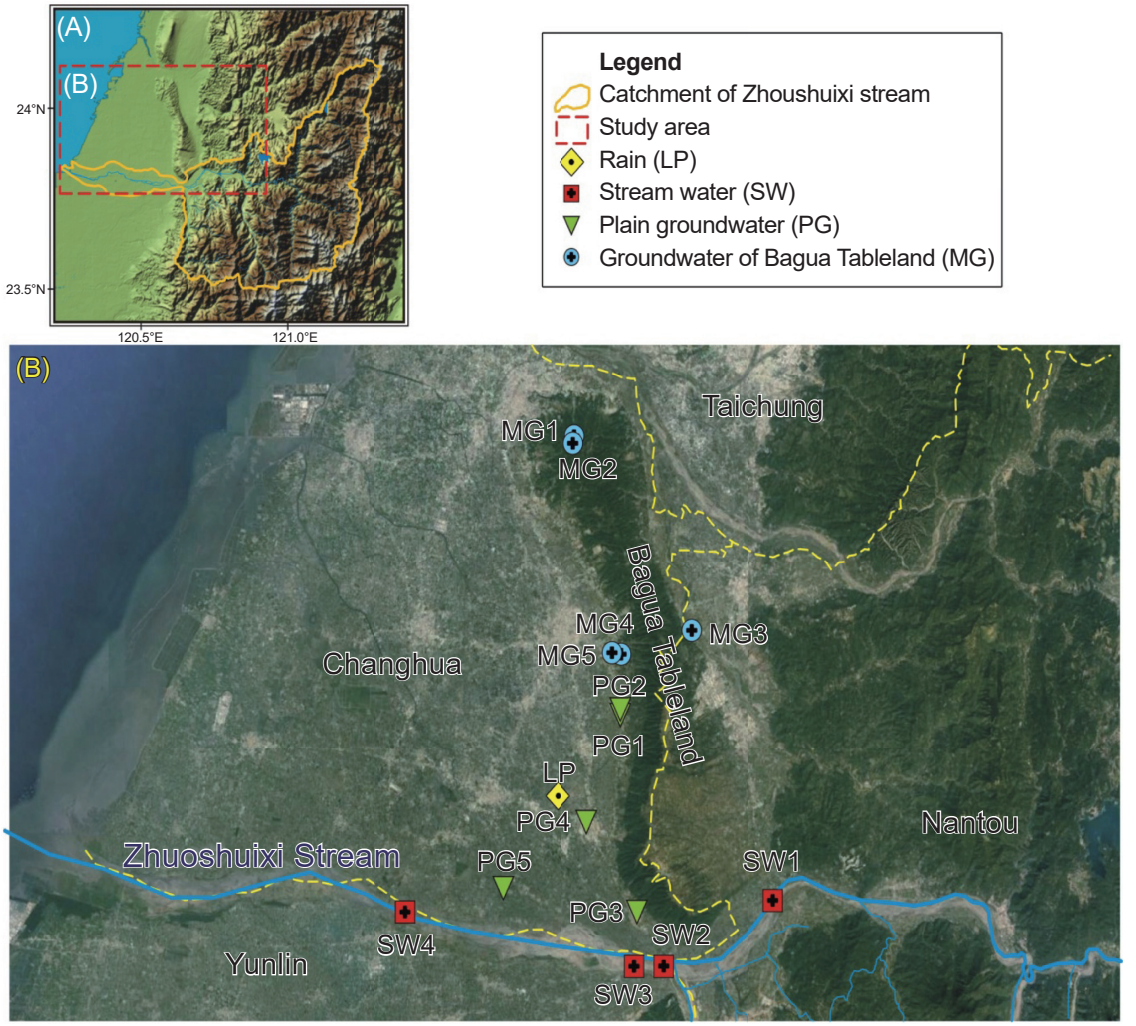


圖 1. (A) 研究區域地理位置圖；(B) 雨水 (LP)、溪水 (SW)、八卦山地下水 (MG) 及平原地下水 (PG) 採樣站位置。

Fig. 1. (A) Study area; (B) map indicating sample collection sites of rain water (LP), stream water (SW), and groundwaters including Bagua Tableland groundwater (MG) and proximal-fan groundwater (PG) in the Changhua plain.

氫氧同位素分析

水樣品的穩定氫、氧同位素使用液態水同位素分析儀 (Triple Liquid Water Isotope Analyzer; T-LWIA-45-EP, Los Gatos Research, San Jose, CA, USA) 進行分析。此分析儀是利用光譜法中的離軸積分腔輸出光譜技術 (off-axis integrated cavity output spectroscopy; OA-ICOS)，可同時測定水樣之氫、氧同位素比值 ($^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$) (Lis *et al*. 2008; Peng *et al*. 2014)。

在操作上，水樣標本分析前先以 0.45 μm 的濾膜濾除非水溶性雜質，接著取 1.5 mL 已過濾之水樣移入 1.8 mL 的旋蓋自動進樣瓶，經自動取樣器吸取適量樣品注入已加熱至 70℃之進樣口，水樣經汽化後，水氣進入分析腔測定其氫、氧同位素比值。最後得到的氫、氧同位素的分析結果分別以 $\delta^{2}H$ 及 $\delta^{18}O$ 表示，其定義如下：

$$\delta = 1{,}000\ [(R_{Sample} / R_{SMOW}) - 1] \qquad (1)$$

其中 R_{Sample} 為樣本之 $^{2}H/^{1}H$ 或 $^{18}O/^{16}O$ 比值，R_{SMOW} 為國際標準海水 (Vienna Standard Mean Ocean Water; SMOW) 的 $^{2}H/^{1}H$ 或 $^{18}O/^{16}O$ 比值。δ 的單位以千分比 (‰) 表示。

本研究之氫、氧同位素分析是以國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency; IAEA) 所分發的標準水樣 V-SMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water 2; $\delta^{2}H = 0‰$, $\delta^{18}O = 0‰$)，及 Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP; $\delta^{2}H = -428‰$, $\delta^{18}O = -55.5‰$; Yurtsever & Gat 1981) 作為樣品校正基準。實驗室所用參考標本重複分析分析精確度 (1σ) 對氧而言優於 0.2‰，對氫而言優於 0.8‰。

氯離子濃度分析

氯離子濃度之測定是使用離子色層分析儀 (ion chromatography; 850 Professional IC, Metrohm, Herisau, Switzerland) 測定。在測定標本前，根據標本之大概濃度，使用 Merck 標準溶液調製適當濃度之檢量線。同標本二次分析之測值差不得超過 5%。

端點水源混合分析

一般而言，鄰接山區的沖積平原地下水 (PG) 有 3 個來源：當地雨水 (LP)、鄰近溪水 (SW) 以及來自鄰接山區的地下水 (MG)，四者之水量 (Q) 關聯可以下式表之：

$$Q_{PG} = Q_{LP} + Q_{SW} + Q_{MG} \quad (2)$$

以本研究而言，PG 為彰化平原地下水，LP 為彰化平原雨水，SW 為區內濁水溪溪水，MG 為八卦山地下水。

依據三端點混合分析 (end member mixing analysis; EMMA) (Liu & Yamanaka 2012; Peng *et al*. 2014)，式 (2) 可改寫成含示蹤劑之關係式：

$$T_{PG} = T_{LP}R_{LP} + T_{SW}R_{SW} + T_{MG}R_{MG} \quad (3)$$

T 為示蹤劑濃度值。R_{LP}、R_{SW}、R_{MG} 為 PG 中分別來自 LP、SW、MG 的貢獻分量；$R_{LP} = Q_{LP} / Q_{PG}$，$R_{SW} = Q_{SW} / Q_{PG}$，$R_{MG} = Q_{MG} / Q_{PG}$。

因為式 (3) 中有 3 個端點來源，因此需要 2 個互相獨立的示蹤劑 (T)。

在本研究，示蹤劑選擇氫或氧同位素，以及氯離子 (Cl^{-}) 濃度。因此，式 (3) 改寫成：

$$\delta_{PG} = \delta_{LP}R_{LP} + \delta_{SW}R_{SW} + \delta_{MG}R_{MG} \quad (4)$$

$$C_{PG} = C_{LP}R_{LP} + C_{SW}R_{SW} + C_{MG}R_{MG} \quad (5)$$

$$1 = R_{LP} + R_{SW} + R_{MG} \quad (6)$$

上式中，δ 可為 $\delta^{18}O$ 或 $\delta^{2}H$ 值，C 為 Cl^{-} 濃度值。

但如一水體 M 有二個來源 A 及 B，此二水源對標的水體 M 的貢獻度可由下式求得 (Clark & Fritz 1997)：

$$T_{M} = T_{A}R_{A} + T_{B}R_{B} \quad (7)$$

$$1 = R_{A} + R_{B} \quad (8)$$

上式中，T 可為 $\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$ 或 Cl^{-} 測值。

然而要注意的是，由式 (4)–(6) 或式 (7)–(8) 所求得之貢獻百分比為半定量之估算結果。因為式 (4)–(6) 或式 (7)–(8) 之計算不僅涉及各參數之實驗分析誤差，同時在算式的計算過程中，各參數之實驗分析誤差亦會產生傳遞誤差，因此難以推估各貢獻百分比的不確定性 (Peng *et al*. 2016)。

結果

本研究各類水體之同位素組成及 Cl^{-} 濃度分析結果列於表 1。下文中描述各類水體同位素組成及 Cl^{-} 濃度測值之平均值除雨水為雨量加權平均值外，其餘溪水及地下水測值之平均值皆為算術平均值。

雨水

根據 Peng *et al*. (2015)，2011–2013 年彰化市雨水 $\delta^{2}H$ 之平均值為 -36.0‰ ± 24.3‰，$\delta^{18}O$ 之平均值為 -5.8‰ ± 2.8‰。所有雨水之 δ 值均沿台灣中部地區氫氧同位素天水線 ($\delta^{2}H = 8.1\delta^{18}O + 11.2$) 分布 (圖 2)，顯示雨水樣本之 δ 值並未經歷蒸發作用而改變。天水 (meteoric

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl^- 濃度。

Table 1. Stable isotopic compositions and Cl^- concentration of stream water and groundwater of this study.

Sample	Sampled date	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)	Cl^- (mg L^{-1})
Stream water of Zhuoshuixi (SW)				
SW1	2017/2/10	-10.85	-75.3	3.0
	2017/3/10	-10.37	-71.3	4.1
	2017/4/7	-10.18	-70.2	4.7
	2017/5/5	-9.85	-66.5	3.2
	2017/6/9	-10.13	-68.6	2.6
	2017/7/14	-9.72	-66.5	3.2
	2017/8/4	-10.54	-73.1	3.0
	2017/9/11	-10.18	-68.1	3.7
	2017/10/6	-10.76	-71.5	2.6
	2017/11/10	-11.66	-77.7	4.4
	2017/12/7	-11.05	-76.4	2.6
	2018/1/11	-10.99	-77.0	2.4
	2018/2/8	-10.47	-69.5	2.9
SW2	2017/2/10	-8.89	-63.4	5.4
	2017/3/10	-8.32	-55.4	5.4
	2017/4/7	-8.31	-55.9	7.9
	2017/5/5	-9.60	-64.3	2.3
	2017/6/9	-9.14	-61.7	2.7
	2017/7/14	-9.05	-60.8	1.8
	2017/8/4	-9.46	-64.1	4.1
	2017/9/11	-8.73	-56.3	2.7
	2017/10/6	-9.38	-63.2	2.6
	2017/11/10	-10.46	-69.4	4.1
	2017/12/7	-10.62	-74.5	2.5
	2018/1/11	-10.73	-72.8	3.0
	2018/2/8	-9.51	-64.5	3.9
SW3	2017/2/10	-9.42	-65.8	6.6
	2017/3/10	-9.21	-60.4	7.1
	2017/4/7	-9.00	-62.6	8.1
	2017/5/5	-9.54	-64.9	3.5
	2017/7/14	-9.96	-67.1	1.5
	2017/8/4	-10.48	-71.2	4.5
	2017/9/11	-10.78	-73.1	2.8
	2017/10/6	-9.31	-62.1	3.4
	2017/11/10	-10.32	-69.1	4.3
	2017/12/7	-11.20	-74.8	2.4
	2018/1/11	-10.51	-70.1	1.4
	2018/2/8	-9.51	-62.9	4.5

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl^- 濃度。(續)

Table 1. Stable isotopic compositions and Cl^- concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)	Cl^- (mg L^{-1})
SW4	2017/2/10	-8.18	-57.0	13.1
	2017/3/10	-9.38	-63.4	4.9
	2017/4/7	-8.84	-61.0	9.8
	2017/5/5	-9.67	-66.5	3.2
	2017/6/9	-10.09	-66.7	2.7
	2017/7/14	-9.14	-62.6	3.3
	2017/8/4	-9.90	-66.6	4.4
	2017/9/11	-8.87	-60.2	3.2
	2017/10/6	-9.37	-63.2	6.1
	2017/11/10	-9.48	-64.3	6.6
	2017/12/7	-10.90	-73.2	3.2
	2018/1/11	-10.62	-71.4	0.4
	2018/2/8	-9.98	-66.6	2.8
Groundwater of Bagua Tableland (MG)				
MG1	2017/3/23	-7.62	-52.0	11.0
	2017/4/7	-7.57	-50.6	10.8
	2017/5/5	-7.66	-51.8	9.8
	2017/6/9	-7.87	-51.9	9.5
	2017/7/14	-7.88	-51.1	12.5
	2017/8/4	-7.85	-52.6	11.3
	2017/9/11	-7.99	-50.3	11.1
	2017/10/6	-7.91	-50.9	10.9
	2017/11/10	-8.03	-52.1	10.2
	2017/12/7	-7.74	-52.8	10.5
	2018/1/11	-7.75	-51.7	9.1
	2018/2/8	-7.62	-52.0	8.9
MG2	2017/6/9	-7.95	-51.8	10.0
	2017/7/14	-7.82	-50.9	12.9
	2017/8/4	-7.90	-52.5	10.8
	2017/9/11	-7.91	-51.0	12.2
	2017/10/6	-7.86	-51.7	10.9
	2017/11/10	-7.78	-51.1	12.1
	2017/12/7	-7.76	-50.9	9.6
	2018/1/11	-7.76	-51.1	8.0
	2018/2/8	-7.67	-51.5	9.1
MG3	2017/3/27	-8.00	-52.3	10.9
	2017/4/7	-7.70	-51.9	10.5
	2017/5/5	-7.88	-51.7	9.6
	2017/6/9	-8.03	-51.4	9.8
	2017/7/14	-8.12	-53.2	9.8
	2017/8/4	-7.96	-52.3	10.8

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl^- 濃度。(續)

Table 1. Stable isotopic compositions and Cl^- concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)	Cl^- (mg L^{-1})
	2017/9/11	-7.83	-52.2	9.3
	2017/10/6	-8.02	-53.1	6.9
	2017/11/10	-7.88	-51.0	9.0
	2017/12/7	-7.69	-51.8	8.5
	2018/1/11	-8.01	-52.1	6.8
	2018/2/8	-7.99	-53.5	3.4
MG4	2017/3/27	-7.83	-50.8	9.0
	2017/4/7	-7.67	-51.8	9.5
	2017/5/5	-7.73	-50.5	7.0
	2017/6/9	-7.88	-50.6	6.5
	2017/7/14	-7.82	-52.1	9.9
	2017/8/4	-7.70	-49.4	8.9
	2017/9/11	-7.74	-51.1	6.8
	2017/10/6	-7.87	-52.2	6.8
	2017/11/10	-8.24	-50.6	6.0
	2017/12/7	-7.76	-51.5	7.3
	2018/1/11	-7.79	-51.9	4.9
	2018/2/8	-8.10	-51.6	5.7
MG5	2017/3/27	-7.81	-51.2	9.8
	2017/4/7	-7.93	-52.3	9.8
	2017/5/5	-7.79	-50.3	8.5
	2017/6/9	-7.97	-52.6	8.5
	2017/7/14	-7.82	-53.4	10.6
	2017/8/4	-7.73	-51.2	8.6
	2017/9/11	-7.99	-52.4	8.3
	2017/10/6	-7.98	-52.9	9.2
	2017/11/10	-8.05	-51.2	6.6
	2017/12/7	-7.77	-50.8	9.1
	2018/1/11	-7.83	-51.3	5.5
	2018/2/8	-8.09	-53.1	5.7
Proximal-fan groundwater of Changhua plain (PG)				
PG3	2017/4/19	-8.27	-55.0	6.8
	2017/9/6	-8.15	-54.4	7.7
PG4-1	2017/4/18	-8.74	-60.0	10.6
	2017/9/6	-8.66	-60.5	9.8
PG4-2	2017/4/18	-8.44	-57.3	9.8
	2017/9/6	-8.33	-57.8	9.1
PG5-1	2017/4/18	-8.67	-60.4	11.2
	2017/9/6	-8.89	-60.7	10.6

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl^- 濃度。(續)

Table 1. Stable isotopic compositions and Cl^- concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)	Cl^- (mg L^{-1})
PG5-2	2017/4/18	-9.79	-67.3	4.2
	2017/9/6	-9.88	-68.5	4.7
PG1	2017/4/12	-7.75	-51.3	10.4
	2017/6/23	-7.52	-50.6	9.4
	2017/8/25	-7.40	-48.7	11.2
	2017/10/26	-7.53	-49.9	7.6
	2017/12/8	-7.79	-49.9	6.6
	2019/9/27	-7.27	-48.2	10.3
	2019/12/7	-6.85	-46.9	9.6
PG2	2017/4/12	-7.77	-50.5	11.7
	2017/6/23	-7.46	-49.3	10.9
	2017/8/25	-7.37	-48.6	14.1
	2017/10/26	-7.00	-49.2	10.3
	2017/12/8	-8.03	-50.5	9.3
	2019/9/27	-7.32	-48.3	12.0
	2019/12/7	-7.13	-47.1	10.4

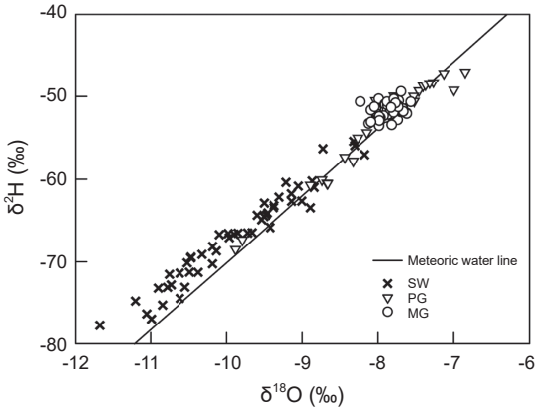


圖 2. 本研究各類水體之 $\delta^{18}O$ 與 $\delta^{2}H$ 的關係圖。圖中所示的雨水數據和台灣中部氫氧同位素天水線取自 Peng *et al*. (2015)。

Fig. 2. Plot of $\delta^{18}O$ vs. $\delta^{2}H$ of water samples of this study. The isotopic meteoric water line of central Taiwan shown in the plot are derived from Peng *et al*. (2015).

water) 乃指近期大氣循環之水體，包括雨水或不受地層化石水影響之溪水。以季節性差異而言，夏季之 δ 值較冬季之值為低；夏季 (6–9 月) 之 $\delta^{2}H$ 平均值為 -48.8 ± 19.1‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -6.9 ± 2.5‰；冬季 (11–3 月) 之 $\delta^{2}H$ 平均值為 -24.2 ± 24.8‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -4.9 ± 2.8‰。

另外，全部雨水之 Cl^- 濃度平均值為 1.95 ± 1.04 mg L^{-1}。冬季之值為 1.59 ± 1.21 mg L^{-1}，夏季之值為 2.46 ± 1.11 mg L^{-1}。夏季之值略高於冬季之值。

溪水

位於本研究最上游溪水點 (SW1) 之 $\delta^{2}H$ 與 $\delta^{18}O$ 平均值分別為 -71.7 ± 3.9‰ 與 -10.5 ± 0.5‰，位於下游溪水點 (SW4) 之 $\delta^{2}H$ 與 $\delta^{18}O$ 平均值分別為 -64.8 ± 4.4‰ 與 -9.6 ± 0.7‰ (表 1)。下游溪水點之 δ 平均值略高於上游溪水點之值。另一方面，溪水 δ 值之季節性差異不明顯。所有溪水冬季之 $\delta^{2}H$ 平均值為 -68.6 ± 6.3‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -10.1 ± 0.9‰；夏季之 $\delta^{2}H$ 平均值為 -65.8 ± 4.8‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -9.7 ± 0.6‰。

與雨水之 δ 值比較，溪水之 δ 年平均值明顯較平原雨水之 δ 值為低，此為所謂之集水區效應 (catchment effect) (Dutton *et al*. 2005)，因同位素高程效應所造成 (Peng *et al*. 2010)。

簡言之，本研究雨水在平原區 (高程約 40 m) 收取，而所採樣之溪水來自山區集水區降雨 (高程大於 2,000 m) 。根據氫氧同位素之高程效應，山區降雨之 δ 值會較平原區降雨之值為低。再者，以本研究而言，在近平原區所採之濁水溪溪水之 δ 值遠低於平原區雨水之 δ 值，且上、下游溪水之 δ 值差異小，這表示研究區內溪水之流量大且受區內雨水影響小，乃為集水區效應現象。

在 Cl^- 濃度方面，所有溪水之 Cl^- 濃度平均值為 4.0 ± 2.2 mg L^{-1} (表 1)。以季節性差異而言，冬季之平均值為 4.2 ± 2.5 mg L^{-1}；夏季之平均值為 3.1 ± 0.9 mg L^{-1}；夏季之值略低於冬季。與雨水比較，溪水之值略高於雨水大約之 2 mg L^{-1}。

八卦山地下水

八卦山地下水 (MG) 之 δ^2H 平均值為 -51.7 ± 0.9‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.9 ± 0.1‰ (表 1)。以季節性差異而言，冬季之 δ^2H 平均值為 -51.7 ± 0.7‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.9 ± 0.2‰；夏季之 δ^2H 平均值為 -51.7 ± 1.0‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.9 ± 0.1‰。夏、冬二季之 δ 平均值相近，顯示地下水之 δ 值已混合均勻化。

在 Cl^- 濃度方面，八卦山地下水 Cl^- 濃度平均值為 9.0 ± 2.0 mg L^{-1} (表 1)。以季節性差異而言，冬季之 Cl^- 濃度平均值為 8.2 ± 2.2 mg L^{-1}；夏季之值為 9.9 ± 1.7 mg L^{-1}。夏、冬二季之 Cl^- 濃度平均值相近。與研究區內雨水及溪水比較，八卦山地下水 Cl^- 濃度平均值高了約 5 mg L^{-1}。

彰化平原地下水

在水利署觀測井方面，PG3、PG4-1、PG4-2、PG5-1 及 PG5-2 地下水之 δ^2H 平均值為 -60.2‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -8.8‰，Cl^- 濃度平均值為 8.5 mg L^{-1} (表 1)；其中，PG5-2 之 δ 值與 Cl^- 濃度明顯較其它地下水為低。在農用灌溉井部份，地下水 PG1 及 PG2 之 δ^2H 平均值為 -49.2‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.4‰，Cl^- 濃度平均值為 10.3 mgL^{-1} (表 1)，其 δ 值及 Cl^- 濃度均明顯較觀測井地下水之值為高。以農用灌溉井地下水之 δ 值而言，冬季之 δ^2H 平均值為 -48.6‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.4‰；夏季之 δ^2H 平均值為 -48.9‰，$\delta^{18}O$ 平均值為 -7.4‰。夏、冬二季之 δ 平均值相近。在 Cl^- 濃度方面，冬季之平均值約 9 mg L^{-1}，夏季之值約 11 mg L^{-1}，夏季之值略較冬季為高。綜合比較顯示，平原地下水之 Cl^- 濃度與八卦山地下水之平均值相當。

平原地下水以及研究區內之溪水及八卦山地下水之 δ 值均沿台灣中部地區氫氧同位素天水線分布 (圖 2)，顯示這些溪水或地下水之 δ 值並未經歷蒸發作用或水岩之氧同位素交換反應而改變，而能反映出個水體原本之 δ^2H 及 $\delta^{18}O$ 值。

討論

平原地下水來源評估

依據式 (2)，扇頂平原地下水 (PG) 有當地雨水補注源 (LP)、鄰近溪水補注源 (SW) 及山區地下水側向補注源 (MG)。在本研究，PG 為彰化平原地下水，LP 為彰化雨水，SW 為濁水溪溪水，MG 為八卦山地下水。

以 EMMA 原理而言，如果 PG 為 LP、SW、MG 三端源水體之混合，PG 之 δ 值及 Cl^- 濃度會介於 LP、SW、MG 三端源水體的對應值之間。由圖 3 初步顯示，平原地下水 (PG) 除 PG3 與 PG5-2 外，其餘均靠近 MG (八卦山地下水) 端點水源，表示其來源主要與八卦山地下水有關。此外，由圖 3 亦顯示 PG5-2 之水源與 SW (濁水溪溪水) 有關，而 PG3 較與 SW 及 MG 有關。

依據圖 3，PG3 落於以 LP、SW、MG 為端點之三角形內，表示 LP、SW、MG 三端源水體均對 PG3 有貢獻。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}O-Cl^-$ 與 δ^2H-Cl^- 示蹤劑組合，以三端點 EMMA [式 (4)–(6)] 評估 LP、SW、MG 三端源水體分別對 PG3 的貢獻度，結果列於表 2。由表 2 顯示，LP、SW、MG 三端源水體對 PG3 的貢獻度分別約 7、27 與 66%。此結果表示 PG3 地下水主要源自八卦山地下水。

在圖 3 中，PG5-2 位於 SW、MG 二端源

水體的混合線上，表示 LP 對 PG5-2 地下水幾無貢獻。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}O$ 或 $\delta^{2}H$ 或 Cl^- 作為示蹤劑，以二端點 EMMA [式 (7)–(8)] 評估 SW、MG 三端源水體分別對 PG5-2 的貢獻度，結果列於表 3。由表 3 顯示，SW 及 MG 二端源水體對 PG5-2 的貢獻度分別約 99% 與 1%。此結果表示 PG5-2 地下水幾乎都是源自濁水溪溪水。

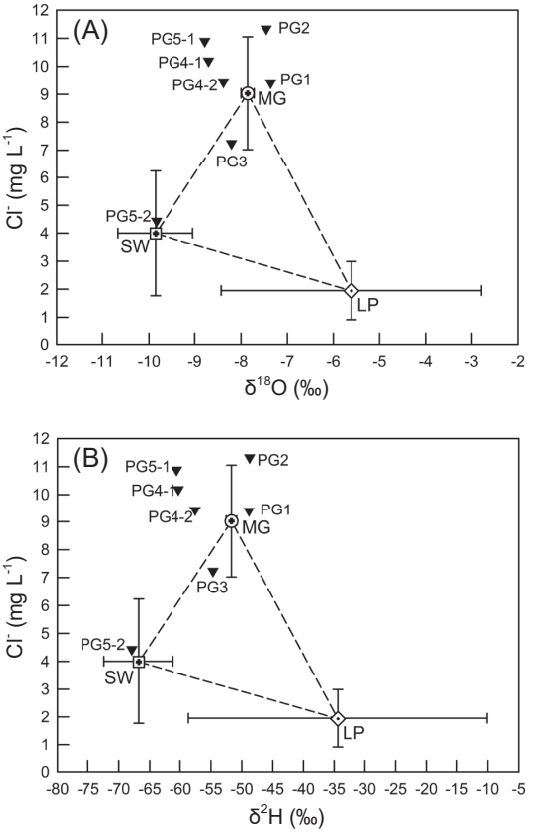


圖 3. 本研究平原地下水之 Cl^- 濃度分別與 (A) $\delta^{18}O$ 及 (B) $\delta^{2}H$ 的關係圖。

Fig. 3. Plots of (A) Cl^- vs. $\delta^{18}O$ and (B) Cl^- vs. $\delta^{2}H$ of groundwater of this study.

表 2. 由 EMMA 估算 LP、SW、MG 三端點水源對 PG3 地下水的相對貢獻度。

Table 2. Fractions of relative contributions among rain (LP), stream water (SW), and groundwater of Bagua Tableland (MG) to the groundwater PG3 derived by ternary end member mixing analysis (EMMA).

PG[z] sample	Contribution fraction					
	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)		R_{MG} (%)	
PG3	6[y]	8[x]	27[y]	27[x]	67[y]	65[x]

[z] PG: plain groundwater.
[y] Tracer pair of $\delta^{18}O$ and Cl^- used in ternary EMMA [Eqs (4)–(6)].
[x] Tracer pair of $\delta^{2}H$ and Cl^- used in ternary EMMA [Eqs (4)–(6)].

再者，依據圖 3，除 PG3 與 PG5-2 外，其餘 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG1、PG2 地下水均靠近 MG (八卦山地下水) 端點水源；然而這些地下水之 Cl^- 濃度卻比 LP、SW、MG 三端源水體之平均濃度為高，但接近 MG (八卦山地下水) 之最高濃度 11 mg L^{-1} (圖 3)，因此尚屬容許範圍。由於 Cl^- 濃度變異性大，且由圖 3 顯示，PG4-1、PG4-2、PG5-1 落點介於 SW 與 MG 二端源水體間，而 PG1、PG2 落點介於 LP 與 MG 二端源水體間。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}O$ 或 $\delta^{2}H$ 作為示蹤劑，以二端點 EMMA [式 (7)–(8)] 評估 SW、MG 二端源水體分別對觀測井地下水 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG5-2 的貢獻度，以及評估 LP、MG 二端源水體分別對農用灌溉井地下水 PG1、PG2 的貢獻度，結果均列於表 3。由表 3 顯示，在觀測井地下水方面，除 PG5-2 外，SW 的貢獻度約 26–59%，平均約 40%，MG 的貢獻度約 41–74%，平均約 60%。相較而言，由前段分析顯示 SW 對 PG5-2 貢獻度幾達 100%。在農用灌溉井地下水方面，LP 與 MG 對 PG1、PG2 的平均貢獻度分別約 17% 與 83%。

表 3. 以二端點 EMMA 估算端點水源對彰化平原地下水的相對貢獻度。

Table 3. Fractions of relative contributions of rain (LP), stream water (SW), or groundwater of Bagua Tableland (MG) to the groundwater of Changhua plain (PG) by binary end member mixing analysis (EMMA).

PG sample	Contribution fraction					
	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)		R_{MG} (%)	
PG4-1			42[z]	57[y]	58[z]	43[y]
PG4-2			26[z]	39[y]	74[z]	61[y]
PG5-1			46[z]	59[y]	54[z]	41[y]
PG5-2			99[z]	107[y]	1[z]	-7[y]
PG1	18[z]	13[y]			82[z]	87[y]
PG2	19[z]	15[y]			81[z]	85[y]

[z] Single tracer of $\delta^{18}O$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].
[y] Single tracer of $\delta^{2}H$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

表 2 及表 3 之貢獻度估算結果似有其地理位置意義 (圖 1)。例如水利署觀測井 (PG4-1, PG4-2, PG5-1, PG5-2) 之站井位置相較農用灌溉井 (PG1, PG2) 更靠近濁水溪主河道，因此其地下水有相對較多的 SW 貢獻度。相較而言，PG1、PG2 較 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG5-2 更靠近八卦山，因此其地下水有相對較多的 MG 貢獻度。

另外一個有趣的現象是，LP (研究區雨水) 的貢獻度整體而言約 0–19%，平均小於 10%，遠低於 SW、MG 二端源水體的貢獻。究其原因可能是研究區 LP 的入滲面積 (水量) 遠小於 SW、MG 二者在山區的集水面積 (水量) (圖 1)；或者是都市化的不透水建築鋪設以及農田犁底層的阻礙，限制了研究區雨水下滲的補注。

八卦山地下水來源評估

雨水基本上是八卦山地下水來源之一，然而近年來政府在八卦山實行高地旱灌水源設施營運 (Ministry of Economic Affairs 2007)，此計畫引集集攔河堰引濁水溪溪水至八卦山公池再經灌溉渠道分送至各農戶進行農業灌溉。因此，此來自濁水溪溪水的灌溉水亦能下滲補注八卦山之地下水。

根據式 (7)–(8)，以雨水及濁水溪溪水做為二端點，分別試以 $\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$ 或 Cl^- 測值估算雨水及濁水溪溪水二者對八卦山地下水之貢獻度，結果列於表 4。由表 4 顯示，以 $\delta^{18}O$ 或 $\delta^{2}H$ 作為示蹤劑，計算所得之雨水對八卦山地下水的貢獻度為 45–49%，濁水溪溪水 51–55%。

然而，若以 Cl^- 測值估算，則雨水及濁水溪溪水之貢獻度出現負值或大於 100%，顯示 Cl^- 測值不適用於此二端點 EMMA 估算。可能原因是八卦山地下水受農作影響，有額外非雨水及濁水溪溪水源之氯化物下滲溶入八卦山地下水，以致八卦山地下水之 Cl^- 測值高於雨水及濁水溪溪水。此外，雨水或溪水入滲形成地下水之過程中發生蒸發作用導致地下水 Cl^- 濃度富集亦為可能之原因。

表 4. 由 EMMA 估算 LP 及 SW 二端點水源對八卦山地下水的相對貢獻度。

Table 4. Fractions of relative contributions among rain (LP) and stream water (SW) to the groundwater of Bagua Tableland (MG) derived by binary end member mixing analysis (EMMA).

	Contribution fraction			
MG sample	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)	
MG1	49[z]	47[y]	51[z]	53[y]
MG2	48[z]	47[y]	52[z]	53[y]
MG3	45[z]	45[y]	55[z]	55[y]
MG4	47[z]	48[y]	53[z]	52[y]
MG5	46[z]	46[y]	54[z]	54[y]

[z] Single tracer of $\delta^{18}O$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].
[y] Single tracer of $\delta^{2}H$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

濁水溪溪水的重要性

表 2 及表 3 中所列之濁水溪溪水對彰化平原地下水的貢獻度為濁水溪溪水的直接貢獻。然而，濁水溪溪水被引至八卦山灌溉後下滲形成八卦山地下水後會再補注至彰化平原地下水，此為濁水溪溪水對彰化平原地下水的間接貢獻。也就是說，八卦山地下水對彰化平原地下水之貢獻度中含有濁水溪溪水的成分。表 5 中之間接貢獻度為八卦山地下水對彰化平原地下水的貢獻度 (表 2 及表 3 中的 R_{MG}) 與濁水溪溪水對八卦山地下水貢獻度 (表 4 中的 R_{SW}) 之乘積；直接貢獻度與間接貢獻度之和即為濁水溪溪水對彰化平原地下水之總貢獻度 (表 5)。由表 5 顯示，此總貢獻度在水利署觀測井地下水方面 (PG3, PG4-1, PG4-2, PG5-1, PG5-2)，為 62–100%，PG5-2 幾為來自溪水之直接貢獻。在農用灌溉井地下水方面 (PG1, PG2)，溪水總貢獻度約為 42–45%，且全部來自間接貢獻。

表 5 之整理有 2 個意涵：(1) 濁水溪溪水是彰化平原地下水之主要補注源。(2) 農業灌溉用水並非全然是一個單一環節的淨支出。例如濁水溪溪水可被引至八卦山進行農業灌溉，之後灌溉水入滲形成地下水進而形成彰化平原地下水的補注水源，這也驗證農業灌溉水的循環性，說明農業灌溉用水並非全然被視為淨支出，在部分環節它亦扮演水資源補注的角色。

誌謝

本試驗由國立中興大學及行政院農業委

表 5. 濁水溪溪水對彰化平原地下水之貢獻度。

Table 5. Contributions of stream water of Zhuoshuixi to the groundwater of Changhua plain (PG).

PG sample	Direct contribution[z] (%)	Indirect contribution[y] (%)	Total contribution[x] (%)
PG3	27	35 [= (53%) (66%)]	62
PG4-1	50	27 [= (53%) (51%)]	77
PG4-2	33	36 [= (53%) (68%)]	69
PG5-1	53	25 [= (53%) (48%)]	78
PG5-2	100	0 [= (53%) (0%)]	100
PG1	0	45 [= (53%) (85%)]	45
PG2	0	42 [= (53%) (83%)]	42

[z] The mean R_{SW} value of each groundwater in Tables 2 or 3.
[y] The indirect contribution is the product of the mean R_{MG} of each groundwater in Tables 2 and 3 and the mean R_{SW} (*ca*. 53%) in Table 4.
[x] Total contribution = direct contribution + indirect contribution.

員會農業試驗所提供經費，計畫編號 NCHU-TARI 10806。

引用文獻

Barth, J. A. C., W. Stichler, M. Bergemann, and H. Reincke. 2006. Can conductivity and stable isotope tracers determine water sources during flooding? An example from the Elbe River in 2002. Int. J. River Basin Manag. 4:77–83. doi:10.1080/15715124.2006.9635278

Chen, R. K. and C. H. Yang. 2004. Discussion on the feasibility of rice water-saving cultivation (1) Water consumption and saving. Tech. Service Quart. Bull. 60:1–4. (in Chinese)

Clark, I. D. and P. Fritz. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press. Boca Raton, FL. 342 pp. doi:10.1201/9781482242911

Dutton, A., B. H. Wilkinson, J. M. Welker, G. J. Bowen, and K. C. Lohmann. 2005. Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. Hydrol. Process. 19:4121–4146. doi:10.1002/hyp.5876

Gat, J. R. 1981a. Groundwater. p.223–240. *in*: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.

Gat, J. R. 1981b. Isotopic fractionation. p.21–34. *in*: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.

Lis, G., L. I. Wassenaar, and M. J. Hendry. 2008. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}O/^{16}O$ measurements of microliter natural water samples. Anal. Chem. 80:287–293.doi:10.1021/ac701716q

Liu, Y. and T. Yamanaka. 2012. Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. J. Hydrol. 464–465:116–126. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.053

Ministry of Economic Affairs. 2007. Essentials of reservoir operation of Jiji Weir. Laws and Regulations Retrieving System. Ministry of Economic Affairs, R.O.C. https://law.moea.gov.tw/LawContentSource.aspx?id=FL011614 (visit on 03/10/2021) (in Chinese)

Peng, T. R., C. C. Huang, J. E. Chen, W. J. Zhan, L. W. Chiang, and L. C. Chang. 2016. Evaluating the relative importance of groundwater recharge sources in a subtropical alluvial plain using tracer-based ternary end member mixing analysis (EMMA). Water Resour. Manag. 30:3861–3878. doi:10.1007/s11269-016-1393-8

Peng T. R., C. H. Wang, C. C. Huang, L. Y. Fei, C. T. A. Chen, and J. L. Hwong. 2010. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region. Earth Planet. Sc. Lett. 289:357–366. doi:10.1016/j.epsl.2009.11.024

Peng, T. R., C. H. Wang, S. M. Hsu, N. C. Chen, T. W. Su, and J. F. Lee. 2012. Use of stable water isotopes to assess sources and influences of slope groundwater on slope failure. Hydrol. Process. 26:345–355. doi:10.1002/hyp.8130

Peng, T. R., K. Y. Chen, W. J. Zhan, W. C. Lu, and L. T. J. Tong. 2015. Use of stable water isotopes to identify hydrological processes of meteoric water in montane catchments. Hydrol. Process. 29:4957–4967. doi:10.1002/hyp.10557

Peng, T. R., W. C. Lu, K. Y. Chen, W. J. Zhan, and T. K. Liu. 2014. Groundwater-recharge connectivity

between a hills-and plains' area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity. J. Hydrol. 517:226–235. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.010

Tabbal, D. F., B. A. M. Bouman, S. I. Bhuiyan, E. B. Sibayan, and M. A. Sattar. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. Agric. Water Manag. 56:93–112. doi:10.1016/S0378-3774(02)00007-0

Water Conservancy Bureau. 1997. Research Report on Preliminary Analysis of Groundwater Hydrology of Choshuixi Alluvial Fan. Taiwan Prov. Gov. Taichung, Taiwan. 178 pp. (in Chinese)

Water Resources Planning Commission. 1995. Water Resources of Taiwan. Ministry of Economic Affairs, R.O.C. Taipei, Taiwan. 334 pp. (in Chinese)

Yurtsever, Y. and J. R. Gat. 1981. Atmospheric waters. p.103–142. *in*: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.

Verifying the Circularity of Agricultural Water Using Natural Tracer-Based End Member Mixing Analysis: A Case Study of the Proximal-Fan Region of Changhua

Tsang-Sen Liu[1], Yu-Wen Lin[2], Wen-Jun Zhan[3], and Tsung-Ren Peng[4,*]

Abstract

Liu, T. S., Y. W. Lin, W. J. Zhan, and T. R. Peng. 2021. Verifying the circularity of agricultural water using natural tracer-based end member mixing analysis: A case study of the proximal-fan region of Changhua. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):271–284.

This study employed the end member mixing analysis (EMMA) approach constructed with hydrogen/oxygen isotopes ($\delta^{18}O/\delta^{2}H$) and chloride-ion (Cl^-) concentration to study the sources of groundwater in proximal-fan region and Bagua Tableland in Changhua County, Taiwan. This study also depicted the relationship among Zhuoshuixi stream water, Bagua Tableland groundwater, and plain groundwater in the proximal-fan region. The results indicate that approximately 47% of Bagua-Tableland groundwater comes from rainwater infiltration, and the remaining 53% from Zhuoshuixi stream water. The Zhuoshuixi stream water is the main source recharging groundwater in Changhua Plain, accounting for 68% of the total recharge of the proximal-fan groundwater. Of 68%, approximately 38% comes from direct recharge via the riverbed, and other 30% comes from the Bagua Tableland groundwater containing the stream water derived from the Zhuoshuixi. In other words, Zhuoshuixi stream water can be streamed to Bagua Tableland for irrigation. Thereafter, part of and the irrigation water may percolate to form groundwater of the Bagua Tableland, which then recharges groundwater in the Changhua Plain. This study not only semi-quantitatively confirms the importance of stream water of Zhuoshuixi to groundwater of Changhua Plain, but also verifies the circularity of agricultural irrigation water.

Key words: Agricultural irrigation water, Stable hydrogen and oxygen isotopes, Natural tracer approach, Proximal-fan groundwater, Changhua.

Received: September 16, 2020; Accepted: July 23, 2021.
* Corresponding author, e-mail: trpeng@nchu.edu.tw
[1] Researcher and Division Director, Division of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[2] Associate Researcher, Division of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[3] Research Assistant, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.
[4] Professor, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):285–297 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0005

研究報告

殺蟲劑對嘉義地區水稻褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 與白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 之室內藥效評估

賴柏羽 [1]　黃守宏 [2,*]

摘要

賴柏羽、黃守宏。2021。殺蟲劑對嘉義地區水稻褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 與白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 之室內藥效評估。台灣農業研究 70(4):285−297。

本研究利用藥劑噴布法及秧苗浸藥法評估 20 種成品農藥對 2016 年嘉義地區採集之水稻褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 及白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 族群 4–5 齡若蟲之致死效果，結果顯示以藥劑噴布法測試對褐飛蝨及白背飛蝨致死率最高之藥劑，分別為 48.34% 丁基加保扶水基乳劑及 16% 可尼丁水溶性粒劑，其致死率分別為 84.7% 及 93.4%，其次為 20% 達特南水溶性粒劑及 20% 免扶克乳劑，致死率介於 69.0–80.3%；以秧苗浸藥法測試對褐飛蝨致死效果，致死率最高之藥劑為 75% 歐殺松水溶性粉劑及 48.34% 丁基加保扶水基乳劑，致死率介於 75.7–91.0%，而對白背飛蝨之致死率較高之藥劑則為 20% 免扶克乳劑、48.34% 丁基加保扶水基乳劑及 25% 派滅淨可濕性粉劑，其處理後白背飛蝨之致死率皆為 84.7%。綜合以上測試結果顯示，僅有 20% 達特南水溶性粒劑、48.34% 丁基加保扶水基乳劑及 20% 免扶克乳劑等 3 種藥劑為同時對褐飛蝨及白背飛蝨具有較佳致死效果之藥劑，因此未來於水稻害蟲防治藥劑選用上，需考量登記藥劑種類外，藉由監測田間飛蝨類族群發生種類並審慎選擇有效藥劑，始能達到經濟有效之防治效果。

關鍵詞：褐飛蝨、白背飛蝨、殺蟲劑、藥劑噴布法、秧苗浸藥法。

前言

褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 及白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 為水稻 (*Oryza sativa* L.) 之重要害蟲，同時也具有長距離遷移能力，其危害遍及台灣乃至於整個亞洲水稻栽培地區 (Dyck & Thomas 1979)。此兩種飛蝨於分類上屬於半翅目 (Hemiptera) 蠟蟬亞目 (Fulgoromorpha) 稻蝨科 (Delphacidae) 昆蟲，兩者危害方式相近，常於水稻田混棲發生，並以刺吸式口器通過吸食水稻韌皮部汁液並在植株內產卵危害，影響水稻分蘗及稔實率，嚴重將導致水稻減產，甚至使水稻全株萎凋，形成蝨燒 (hopper burn) 而稻穀無法收成之情形，影響產量至鉅，可造成水稻產量平均 30% 之損失 (Cheng 1976)。此外，褐飛蝨可能做為媒介昆蟲傳播水稻草狀矮化病 (rice grassy stunt virus; RGSV)、皺縮矮化病 (rice ragged stunt virus; RRSV) 及萎凋矮化病毒 (rice wilted stunt virus; RWSV) (Chen & Chiu 1989; Cabauatan *et al*. 2009)；白背飛蝨可媒介南方水稻黑條矮縮病 (southern rice black streaked dwarf virus; SRBSDV) 等病毒病害 (Xu *et al*. 2012)。

台灣每年之褐飛蝨及白背飛蝨族群蟲源主要由海外遷入，褐飛蝨及白背飛蝨於台灣水稻栽培期間發生世代數相似，水稻生育初期即可遷入本田建立族群，歷經 3–4 世代繁衍，族群密度於水稻生育後期達到高峰。過去台灣主要遷入害蟲為褐飛蝨，然而隨遷出地區水稻栽

投稿日期：2021 年 6 月 24 日；接受日期：2021 年 8 月 2 日。
* 通訊作者：shhuang@tari.gov.tw
[1] 農委會農業試驗所嘉義分所植物保護系助理研究員。台灣 嘉義市。
[2] 農委會農業試驗所嘉義分所植物保護系副研究員。台灣 嘉義市。

培品種改變，特別是在中國華南地區之白背飛蝨族群於近年有逐漸增加趨勢 (Sogawa *et al*. 2003, 2009)，近年台灣監測結果亦發現白背飛蝨遷入數量逐漸攀升 (Cheng & Huang 2004)，水稻發生害蟲相將可能隨之改變。海外遷入之褐飛蝨及白背飛蝨除了直接影響族群密度及水稻受害程度之外，對藥劑之感受性亦受到遷出地區之影響 (Matsumura *et al*. 2008)，特別是主要以藥劑進行防治的地區，將會增加害蟲發生預測與蟲害管理困難度，尤其害蟲產生之抗藥性對遷移性害蟲而言，影響層面更為嚴峻 (Matsumura *et al*. 2009)，因此對遷移性害蟲來自不同遷出地之差異，並定期重新審視現行用藥對遷移性害蟲之感受性變化，為蟲害管理之重要工作。

化學殺蟲劑在台灣仍為農民針對水稻飛蝨類危害之主要防治方法之一，目前台灣登記防治之藥劑種類除早期登記者外，尚包含延伸使用種類，依據政府公告登記於「水稻褐飛蝨」之藥劑共 69 種，依有效成分種類則可分成 32 種，其中氨基甲酸鹽類藥劑占 53%、合成除蟲菊酯類占 16%、新尼古丁類及有機磷類藥劑各占 9%；然而防治白背飛蝨之藥劑係參考登記於「水稻稻蝨類」之藥劑計有 22 種，依有效成分種類則可分成 12 種且皆為延伸使用藥劑 (Plant Protection Manual 2021)，因此農友在白背飛蝨之藥劑選擇上常選擇與褐飛蝨一併防治，然而褐飛蝨用藥中，部分藥劑自 1970 年代登記至今已時間久遠，並自 1977 年後便未針對登記藥劑進行田間篩選試驗 (Cheng & Liu 1978)，使得後來遷入之 2 種飛蝨族群，對於藥劑感受性情形並不明瞭，且登記於褐飛蝨之藥劑雖多，但同時對白背飛蝨亦具效果之藥劑亦需確認，因此本研究藉由檢測現行登記及延伸使用藥劑，且目前於市面上仍有生產販售種類者，針對 2016 年嘉義地區之褐飛蝨及白背飛蝨族群以藥劑噴布法、秧苗浸藥法進行致死率效果評估，期望瞭解該年度遷入之 2 種飛蝨害蟲族群對登記藥劑之感受性差異及變化。

材料與方法

供試蟲源及飼養方式

本試驗使用之褐飛蝨及白背飛蝨試驗蟲源為 2016 年自嘉義縣民雄鄉水稻田 (23°31'37.3"N, 120°26'01.8"E) 採集，於嘉義農業試驗分所溫室中，以感蟲品種水稻植株「台農 67 號」及「台中在來 1 號」作為褐飛蝨及白背飛蝨之飼料水稻，飼養於鋁製生長箱內 (長 92 cm、寬 47 cm、高 81 cm)，經大量飼養後，以繁殖 4 世代以內之蟲源供後續試驗使用。

供試藥劑及配製

本試驗供試之 20 種殺蟲劑成品農藥皆由一般市面上之農藥行購得，試驗使用之藥劑及稀釋倍數為 16.00% 可尼丁 (clothianidin) 水溶性粒劑 (立農化學股份有限公司，台灣雲林縣) 3,000×、25.00% 賽速安 (thiamethoxam) 水溶性粒劑 (台灣先正達股份有限公司，台灣台北市) 10,000×、75.00% 歐殺松 (acephate) 水溶性粉劑 (龍燈生物科技股份有限公司，台灣台北市) 1,500×、10.00% 百滅寧 (permethrin) 乳劑 (龍燈生物科技股份有限公司) 2,000×、20.00% 達特南 (dinotefuran) 水溶性粒劑 (惠光股份有限公司，台灣台南市) 3,000×、20.00% 免扶克 (benfuracarb) 乳劑 (嘉泰企業股份有限公司，台灣桃園市) 500×、20.00% 芬化利 (fenvalerate) 乳劑 (好速化學股份有限公司，台灣新竹市) 3,000×、48.34% 丁基加保扶 (carbosulfan) 水基乳劑 (嘉泰企業股份有限公司) 1,000×、10.00% 依芬寧 (etofenprox) 乳劑 (億豐農化廠股份有限公司，台灣台中市) 750×、50.00% 丁基滅必蝨 (fenobucarb) 乳劑 (日農科技股份有限公司，台灣台南市) 1,000×、9.60% 益達胺 (imidacloprid) 溶液 (台灣拜耳股份有限公司，台灣台北市) 3,000×、50.00% 滅必蝨 (isoprocarb; MIPC) 可濕性粉劑 (日佳農藥股份有限公司，台灣台北市) 5,000×、25.00% 派滅淨 (pymetrozine) 可濕性粉劑 (富農化學工業股份有限公司，台灣桃園市) 1,500×、10.00%

氟尼胺 (flonicamid) 水分散性粒劑 (台灣石原產業股份有限公司，台灣台北市) 2,000×、40.00% 納乃得 (methomyl) 水溶性粒劑 (台灣杜邦股份有限公司，台灣台北市) 800×、25.00% 布芬淨 (buprofezin) 可濕性粉劑 (日佳農藥股份有限公司) 1,500×、85.00% 加保利 (carbaryl) 可濕性粉劑 (日農科技股份有限公司) 1,700× 及 50.00% 安丹 (propoxur) 可濕性粉劑 (日佳農藥股份有限公司) 1,000×。另外，40.00% 丁基加保扶可濕性粉劑 (好速化學股份有限公司) 及 18.20% 益達胺水懸劑 (日農科技股份有限公司) 係參考登記藥劑中，相同劑型之有效成分 (active ingredient; AI) 濃度進行配置，稀釋倍數為 1,067× 及 5,688× (表 1)，依上述不同藥劑之稀釋倍數，以蒸餾水進行配置。

以藥劑噴布法評估殺蟲劑對褐飛蝨及白背飛蝨之致死效果

取 15 隻褐飛蝨或白背飛蝨 4–5 齡若蟲，以二氧化碳迷昏約 5–10 s 後，輕置於墊有圓型濾紙 (直徑 9 cm) 之塑膠培養皿 (直徑 9 cm)，利

表 1. 試驗所用之殺蟲劑類別、濃度、劑型及有效成分濃度。

Table 1. The chemical group, nominal concentration, formulation and active ingredient concentration of the insecticides.

Common name	Chemical group	Nominal concentration	Formulation[z]	Dilution times	AI concentration[y] (mg L^{-1})
Acephate	Organophosphate	75.00%	SP	1,500	500.0
Benfuracarb	Carbamate	20.00%	EC	500	400.0
Buprofezin	Chitin biosynthesis inhibitor	25.00%	WP	1,500	166.7
Carbaryl	Carbamate	85.00%	WP	1,700	500.0
Carbosulfan	Carbamate	40.00%	WP	1,067	374.9
Carbosulfan	Carbamate	48.34%	EW	1,000	483.4
Clothianidin	Neonicotinoid	16.00%	SG	3,000	53.3
Dinotefuran	Neonicotinoid	20.00%	SG	3,000	66.7
Etofenprox	Pyrethroid	10.00%	EC	750	133.3
Fenobucarb	Carbamate	50.00%	EC	1,000	500.0
Fenvalerate	Pyrethroid	20.00%	EC	3,000	66.7
Flonicamid	Selective homopteran feeding blockers	10.00%	WG	2,000	50.0
Imidacloprid	Neonicotinoid	9.60%	SL	3,000	32.0
Imidacloprid	Neonicotinoid	18.20%	SC	5,688	32.0
Isoprocarb	Carbamate	50.00%	WP	5,000	500.0
Methomyl	Carbamate	40.00%	SG	800	500.0
Permethrin	Pyrethroid	10.00%	EC	2,000	50.0
Propoxur	Carbamate	50.00%	WP	1,000	500.0
Pymetrozine	Selective homopteran feeding blockers	25.00%	WP	1,500	166.7
Thiamethoxam	Neonicotine	25.00%	SG	10,000	25.0

[z] EC: emulsifiable concentrate; EW: emulsion, oil in water; SC: suspension concentrate; SG: water soluble granule; SL: soluble concentrate; SP: water soluble powder; WG: water dispersible granule; WP: wettable powder.
[y] AI concentration: The concentration of active ingredient of the insecticides.

用噴藥塔 (Potter spray tower, Burkard Manufacturing Co., Ltd., UK)，以高壓噴霧 (10 lb in^{-2}) 將供試藥液均勻噴布於蟲體，每皿噴灑藥量為 3 mL，並以蒸餾水作為對照組，每處理 3 重複，處理後蟲體移至供有水稻秧苗之塑膠杯中 (直徑 7 cm、高 12 cm)，分別於 1、2 及 3 d 後觀察並記錄蟲體死亡率。蟲體死亡率評估方式為蟲體腹面朝上並失去反應能力視為死亡 [Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) 2012]。

以水稻秧苗浸藥法測試殺蟲劑對褐飛蝨及白背飛蝨之致死效果

將整株水稻秧苗完全浸泡於 400–450 mL 供試藥液或蒸餾水中，浸泡時間約 10 s，浸泡植株後置於陰涼處 1–2 h 直至完全晾乾。藥劑處理後之水稻秧苗放入塑膠杯中 (直徑 7 cm、高 12 cm)，再接種入褐飛蝨或白背飛蝨 4–5 齡若蟲，每重複 15 隻，每處理 3 重複，於處理後 1、2 及 3 d 觀察並記錄蟲體死亡率。蟲體死亡率評估方式為蟲體腹面朝上並失去反應能力視為死亡 (IRAC 2012)。

統計分析

試驗所得到之蟲體死亡率，參考校正死亡率公式 (Abbott 1925) 計算校正後之死亡率，校正死亡率數據先進行雙因子變方分析 (two-way analysis of variance; two-way ANOVA)，再以最小顯著差異測驗法 (Fisher's least significant difference test; LSD test) 進行比較 ($P < 0.05$)。

結果

以藥劑噴布法評估殺蟲劑對褐飛蝨及白背飛蝨之影響

以藥劑噴布法測試 20 種登記藥劑於登記濃度下對褐飛蝨之致死率，試驗結果如表 2 所示，其中以 48.34% 丁基加保扶水基乳劑之處理對褐飛蝨之致死率最高，於施藥後 3 d，褐飛蝨死亡率達 84.7%。而 20% 免扶克乳劑、25% 賽速安水溶性粒劑、50% 丁基滅必蝨乳劑、20% 達特南水溶性粒劑及 10% 百滅寧乳劑等 5 種藥劑之處理，則褐飛蝨於處理 3 d 後，褐飛蝨死亡率為 70.7–80.3%，與 48.34% 丁基加保扶水基乳劑之效果間無顯著差異。其中，達特南、丁基加保扶及丁基滅必蝨於施藥 1 d 後即有顯著之殺蟲效果，致死率分別為 81.7%、71.3% 及 73.7%。另外供試藥劑對白背飛蝨之致死率結果如表 3 所示，16% 可尼丁水溶性粒劑處理後，白背飛蝨之死亡率相較其他供試藥劑處理為高，於施藥後 1 d，白背飛蝨死亡率即高達 88.9%，3 d 後之死亡率為 93.4%。而 20% 達特南水溶性粒劑、75% 毆殺松水溶性粉劑、25% 派滅淨可濕性粉劑及 20% 免扶克乳劑處理之白背飛蝨，施藥後 3 d 之死亡率則介於 69.0–80.0%。

以水稻秧苗浸藥法測試殺蟲劑對褐飛蝨及白背飛蝨之影響

將水稻秧苗浸藥後測試不同藥劑對褐飛蝨之致死率，結果如表 4 所示，供試藥劑中以 75% 歐殺松水溶性粉劑對蟲體之致死效果最為明顯，褐飛蝨於接觸浸藥秧苗 3 d 後之死亡率達 91.0%，致死效果其次為 48.34% 丁基加保扶水基乳劑，褐飛蝨死亡率為 75.7%，兩種藥劑所造成之死亡率間無顯著差異。16% 可尼丁水溶性粒劑、20% 免扶克乳劑、50% 安丹可濕性粉劑、25% 派滅淨可濕性粉劑、10% 氟尼胺水分散性粒劑、25% 布芬淨可濕性粉劑及 40% 丁基加保扶可濕性粉劑等藥劑則具 57.7–69.0% 之致死率，而 10% 百滅寧乳劑僅造成 2.3% 之死亡率。另外測試藥劑對白背飛蝨之致死結果則如表 5 所示，以 20% 免扶克乳劑、48.34% 丁基加保扶水基乳劑及 25% 派滅淨可濕性粉劑處理之蟲體死亡率最高，處理後 3 d 後之死亡率皆為 84.7%，而 20% 芬化利乳劑、25% 賽速安水溶性粒劑、10% 氟尼胺水分散性粒劑及 40% 納乃得水溶性粒劑等處理之蟲體死亡率介於 69.0–76.0%，上述各藥劑處理間之致死率並無顯著差異。

討論

本研究結果顯示現行登記不同藥劑種類對褐飛蝨及白背飛蝨對之致死率具有相當大的差異，不論是以藥劑噴布法或水稻秧苗浸藥法進

表 2. 利用藥劑噴布法測試褐飛蝨對登記藥劑之殺蟲效果。

Table 2. Insecticidal effects of the insecticides against *Nilapravata lugens* by using tower spray method.

Pesticide commodity	Cumulative mortality (mean ± SD, %)[z]		
	Day 1	Day 2	Day 3
Acephate 75% SP[y]	31.0 ± 3.5 fg[x]	40.0 ± 7.0 cd	42.3 ± 8.1 fgh
Benfuracarb 20% EC	56.0 ± 10.1 cd	74.0 ± 20.3 a	80.3 ± 10.3 ab
Buprofezin 25% WP	0.7 ± 1.2 h	4.3 ± 4.0 g	20.0 ± 3.5 i
Carbaryl 85% WP	0.7 ± 1.2 h	17.7 ± 7.5 efg	31.0 ± 0.0 hi
Carbosulfan 40% WP	2.0 ± 0.0 h	9.0 ± 7.0 fg	44.3 ± 24.1 fgh
Carbosulfan 48.34% EW	71.3 ± 10.3 ab	76.0 ± 17.1 a	84.7 ± 7.5 a
Clothianidin 16% SG	73.0 ± 11.3 ab	64.3 ± 15.0 ab	60.0 ± 11.3 cdef
Dinotefuran 20% SG	81.7 ± 10.6 a	77.7 ± 4.0 a	74.0 ± 0.0 abc
Etofenprox 10% EC	31.3 ± 7.5 f	45.0 ± 7.0 bcd	53.7 ± 8.1 defg
Fenobucarb 50% EC	73.7 ± 10.0 ab	76.0 ± 6.0 a	76.0 ± 6.9 abc
Fenvalerate 20% EC	28.7 ± 2.5 fg	31.3 ± 5.0 cde	48.7 ± 14.6 efgh
Flonicamid 10% WG	18.0 ± 0.0 g	26.7 ± 4.0 def	49.0 ± 17.6 efgh
Imidacloprid 9.6% SL	32.0 ± 4.6 ef	36.3 ± 13.7 cde	48.3 ± 10.8 efgh
Imidacloprid 18.2% SC	22.0 ± 7.0 fg	50.3 ± 8.1 bc	53.3 ± 7.5 defg
Isoprocarb 50% WP	27.7 ± 1.2 fg	37.0 ± 10.0 cde	53.0 ± 6.0 defg
Methomyl 40% SG	44.7 ± 6.5 de	44.7 ± 15.0 bcd	49.0 ± 13.0 efgh
Permethrin 10% EC	34.0 ± 10.0 ef	36.3 ± 22.3 cde	70.7 ± 17.0 abcd
Propoxur 50% WP	0.0 ± 0.0 h	11.3 ± 4.0 fg	37.7 ± 6.5 ghi
Pymetrozine 25% WP	57.7 ± 4.0 cd	48.7 ± 7.5 bc	64.7 ± 4.0 bcde
Thiamethoxam 25% SG	64.3 ± 20.5 bc	60.3 ± 22.5 ab	78.0 ± 10.1 abc

[z] Mortality rates were corrected with control using Abbott's formula.
[y] EC: emulsifiable concentrate; EW: emulsion, oil in water; SC: suspension concentrate; SG: water soluble granule; SL: soluble concentrate; SP: water soluble powder; WG: water dispersible granule; WP: wettable powder.
[x] Values in the same column with different letters show significant difference by the lease significant difference (LSD) test at 5% level.

行測試，同時對兩種飛蝨皆具良好殺蟲效果之藥劑種類甚少，綜合兩種測試方法對蟲體之致死率結果，20% 達特南水溶性粒劑、48.34% 丁基加保扶水基乳劑及 20% 免扶克乳劑等 3 種藥劑對兩種飛蝨相對具有較佳之致死效果。其中，48.34% 丁基加保扶水基乳劑與有效成分相同之 40% 丁基加保扶可濕性粉劑，對兩種飛蝨及不同方式測試之殺蟲效果卻有顯著落差，因以登記稀釋倍數稀釋後，兩種藥劑之有效成分濃度相差約 1.3 倍所造成，因此在藥劑輪用之基礎上，可優先選擇 48.34% 丁基加保扶水基乳劑進行防治，殺蟲表現較佳。另外，屬於有機磷劑之歐殺松，殺蟲效果雖相對其他殺蟲劑之表現較佳，但由於國人攝取之每日容許攝入量 (acceptable daily intake; ADI) 達到總量管制 (< 80% ADI) 之因素，藥物毒物試驗所已自 2018 年 8 月將其列為限制登記使用農藥，刪除於水稻使用之範圍。

探討不同藥劑測試方式對褐飛蝨及白背飛蝨之影響，本試驗以藥劑噴布法及秧苗浸藥法進行處理，結果顯示相同藥劑種類及濃度下，多數屬於新尼古丁類之藥劑以噴布法處理之死亡率較秧苗浸藥法處理明顯，其他藥劑則未顯示明顯差異。化學藥劑會受其本身對害蟲之作用特性不同，適合用於藥劑測試之方式亦不同 (Portilla *et al*. 2018)，Gerami (2013) 利用不同生物檢測方法，測試棉蚜 (*Aphis gossypii* Glover) 對尼古丁類藥劑之感受性，結果顯示直接將無翅成蟲浸泡益達胺及賽速安藥液處理後，兩種藥劑之半數致死劑量 (lethal dose;

表 3. 利用藥劑噴布法測試白背飛蝨對登記藥劑之殺蟲效果。

Table 3. Insecticidal effects of the insecticides against *Sogatella furcifera* by using tower spray method.

Pesticide commodity	Cumulative mortality (mean ± SD, %)[z]		
	Day 1	Day 2	Day 3
Acephate 75% SP[y]	68.4 ± 5.0 b[x]	71.2 ± 8.2 bc	77.6 ± 2.7 bc
Benfuracarb 20% EC	53.4 ± 3.9 bc	60.0 ± 7.7 cd	69.0 ± 13.3 bcde
Buprofezin 25% WP	9.0 ± 3.5 f	28.7 ± 4.5 ghi	37.7 ± 4.0 jkl
Carbaryl 85% WP	9.0 ± 3.5 f	17.7 ± 13.5 ij	26.3 ± 11.5 l
Carbosulfan 40% WP	9.0 ± 3.5 f	13.3 ± 4.0 j	26.7 ± 6.5 l
Carbosulfan 48.34% EW	24.0 ± 8.1 ef	34.9 ± 7.7 fgh	47.8 ± 5.1 hij
Clothianidin 16% SG	88.9 ± 19.2 a	93.4 ± 3.9 a	93.4 ± 0.0 a
Dinotefuran 20% SG	68.6 ± 6.9 b	75.5 ± 6.7 b	80.0 ± 4.1 b
Etofenprox 10% EC	20.8 ± 12.9 ef	25.4 ± 11.8 hij	30.0 ± 12.0 kl
Fenobucarb 50% EC	21.4 ± 14.0 ef	41.1 ± 10.7 efg	51.8 ± 8.9 ghi
Fenvalerate 20% EC	11.1 ± 3.8 f	22.2 ± 6.7 hij	40.0 ± 6.7 ijk
Flonicamid 10% WG	44.3 ± 10.3 cd	62.7 ± 4.0 bc	64.3 ± 7.5 def
Imidacloprid 9.6% SL	53.7 ± 5.7 bc	60.0 ± 9.6 cd	63.7 ± 4.7 defg
Imidacloprid 18.2% SC	62.3 ± 4.5 bc	68.3 ± 1.2 bc	67.0 ± 3.6 cde
Isoprocarb 50% WP	31.0 ± 10.1 de	47.0 ± 17.1 def	61.3 ± 8.0 efg
Methomyl 40% SG	7.0 ± 0.0 f	17.7 ± 6.5 ij	37.7 ± 4.0 jkl
Permethrin 10% EC	15.4 ± 10.4 ef	31.7 ± 5.1 gh	52.1 ± 7.0 fgh
Propoxur 50% WP	11.0 ± 3.5 f	17.7 ± 0.6 ij	35.7 ± 10.3 jkl
Pymetrozine 25% WP	24.3 ± 4.0 ef	62.7 ± 4.0 bc	73.7 ± 4.0 bcd
Thiamethoxam 25% SG	44.5 ± 7.5 cd	49.0 ± 10.2 de	64.4 ± 7.7 de

[z] Mortality rates were corrected with control using Abbott's formula.
[y] EC: emulsifiable concentrate; EW: emulsion, oil in water; SC: suspension concentrate; SG: water soluble granule; SL: soluble concentrate; SP: water soluble powder; WG: water dispersible granule; WP: wettable powder.
[x] Values in the same column with different letters show significant difference by the lease significant difference (LSD) test at 5% level.

LD_{50}) 皆明顯低於葉片浸藥後再接種棉蚜之處理，由於新尼古丁類藥劑同時具備觸殺及胃毒性 (MacBean 2012)，此類作用於神經系統之藥劑，主要藉由在植物體內系統性移行，使害蟲經口服攝入毒性 (Mullins 1993)，然而對於桃蚜 [*Myzus persicae* (Sulzer)]、柑桔木蝨 (*Diaphorina citri* Kuwayama) 等多種半翅目害蟲皆顯示具抗取食性 (antifeeding) 之效果 (Nauen 1995; Nauen *et al*. 1998; Boina *et al*. 2009; Byrne *et al*. 2017)，可能影響藥效表現，因此以藥劑噴布法來測試此類藥劑，較能明顯且快速地評估藥效 (Gerami 2013)。另外，本試驗測試藥劑種類中，部分藥劑有效成分本身無明顯急毒性殺蟲效果，例如已知造成害蟲取食抑制特性之派滅淨及氟尼胺，以及抑制半翅目幾丁質生合成之生長調節劑 (insect growth regulator; IGR) 布芬淨等，分別藉由影響弦音感知器而抑制取食最終導致飢餓死亡，及幾丁質生合成受抑制，影響半翅目昆蟲蛻皮而死亡。以局部滴定法 (topical application method) 或藥劑噴布法測試，此 3 類藥劑於短期內結果不太明顯 (Heinrichs *et al*. 1984; Griffiths *et al*. 1991; Tsujimoto *et al*. 2016)，藥劑測試方式常以植體浸藥並延長觀察時間至 5–10 d (Heinrichs *et al*. 1984; Wang *et al*. 2008; IRAC 2012; Matsumura *et al*. 2017)，或計算成蟲接觸藥劑後至下一子代數量減少之亞致死效應 (sublethal effect) 進行藥效評估 (IRAC 2012; Roditakis *et al*. 2014;

表 4. 利用水稻秧苗浸藥法測試褐飛蝨對登記藥劑之殺蟲效果。

Table 4. Insecticidal effects of the insecticides against *Nilaparvata lugens* by using rice seedling dipping method.

Pesticide commodity	Cumulative mortality (mean ± SD, %)[z]		
	Day 1	Day 2	Day 3
Acephate 75% SP[y]	24.3 ± 6.5 de[x]	75.7 ± 25.0 a	91.0 ± 0.0 a
Benfuracarb 20% EC	17.7 ± 6.5 ef	29.0 ± 17.1 efg	58.0 ± 7.0 bcde
Buprofezin 25% WP	42.7 ± 4.0 bc	55.7 ± 11.5 abc	64.7 ± 11.5 bcd
Carbaryl 85% WP	11.0 ± 0.0 fgh	35.7 ± 13.5 cdef	51.3 ± 6.5 cdef
Carbosulfan 40% WP	18.0 ± 0.0 ef	40.0 ± 10.1 cdef	57.7 ± 11.5 bcde
Carbosulfan 48.34% EW	24.0 ± 0.0 de	71.0 ± 3.5 a	75.7 ± 8.1 ab
Clothianidin 16% SG	11.7 ± 12.0 fgh	42.0 ± 30.0 bcdef	60.3 ± 23.6 bcd
Dinotefuran 20% SG	5.0 ± 5.6 ghi	4.7 ± 4.0 hi	24.0 ± 7.0 gh
Etofenprox 10% EC	7.3 ± 6.4 ghi	31.0 ± 17.1 defg	48.7 ± 23.6 def
Fenobucarb 50% EC	24.7 ± 11.5 de	46.7 ± 11.5 bcde	53.3 ± 10.7 cdef
Fenvalerate 20% EC	13.0 ± 10.1 fg	22.3 ± 13.6 fghi	39.7 ± 14.0 efg
Flonicamid 10% WG	53.3 ± 4.0 a	64.3 ± 4.0 ab	64.7 ± 6.5 bcd
Imidacloprid 9.6% SL	0.0 ± 0.0 i	5.3 ± 9.2 hi	13.3 ± 23.1 hi
Imidacloprid 18.2% SC	2.3 ± 4.0 hi	11.3 ± 4.0 ghi	13.3 ± 7.5 hi
Isoprocarb 50% WP	4.0 ± 0.0 ghi	11.3 ± 8.1 ghi	46.7 ± 8.1 def
Methomyl 40% SG	24.0 ± 0.0 de	38.0 ± 3.5 cdef	47.0 ± 3.5 def
Permethrin 10% EC	0.0 ± 0.0 i	0.0 ± 0.0 i	2.3 ± 4.0 i
Propoxur 50% WP	33.3 ± 4.0 cd	53.3 ± 7.5 abcd	62.7 ± 4.0 bcd
Pymetrozine 25% WP	48.7 ± 8.1 ab	55.7 ± 13.5 abc	69.0 ± 7.0 bc
Thiamethoxam 25% SG	9.7 ± 9.1 fghi	24.7 ± 23.6 efgh	35.3 ± 15.0 fg

[z] Mortality rates were corrected with control using Abbott's formula.
[y] EC: emulsifiable concentrate; EW: emulsion, oil in water; SC: suspension concentrate; SG: water soluble granule; SL: soluble concentrate; SP: water soluble powder; WG: water dispersible granule; WP: wettable powder.
[x] Values in the same column with different letters show significant difference by the lease significant difference (LSD) test at 5% level.

Tsujimoto *et al*. 2016; Matsumura *et al*. 2017)，然而本次結果中卻發現兩種飛蝨以此類藥劑之成品農藥測試時，3 d 內之死亡率相對於多數藥劑來的高，可能與成品農藥中除了有效成分外，另添加其他佐劑成分有關。

根據本試驗褐飛蝨及白背飛蝨對不同藥劑之感受性差異以藥劑噴布處理之結果，整體而言，褐飛蝨對氨基甲酸鹽類之藥劑感受性普遍較白背飛蝨高，而白背飛蝨則是對新尼古丁類藥劑感受性較高，與 Huang (2013) 檢測 2007–2010 年間台灣西部地區飛蝨族群之結果相似。試驗發現同為新尼古丁類之不同藥劑對褐飛蝨之殺蟲效果之間具明顯差異，其中益達胺對 2016 年間嘉義地區褐飛蝨族群之殺蟲效果明顯不佳，顯示褐飛蝨對益達胺具極高之抗藥性風險 (Chung *et al*. 1982; Nagata *et al*. 2002)。於褐飛蝨主要遷出區，越南紅河三角洲及中國華中以南之水稻栽培區經過多年大面積選汰，益達胺抗藥性已逐年攀升，隨後便發現具有益達胺抗藥性之褐飛蝨族群於台灣及日本等地發生 (Nagata *et al*. 2002; Matsumura *et al*. 2008, 2009)，2006 年間嘉義地區褐飛蝨及白背飛蝨對益達胺之感受性結果顯示，褐飛蝨對益達胺之 LD_{50} 為 9.1–18.1 μg g^{-1}，相較於白背飛蝨對益達胺之 LD_{50} (0.16–0.22 μg g^{-1})，具有較高之容忍性 (Matsumura *et al*. 2008)。2009 年後，東亞地區白背飛蝨對益達胺、達特南及賽速安感受性仍高 (Matsumura *et al*. 2009;

表 5. 利用水稻秧苗浸藥法測試白背飛蝨對登記藥劑之殺蟲效果。

Table 5. Insecticidal effects of the insecticides against *Sogatella furcifera* by using rice seedling dipping method.

Pesticide commodity	Cumulative mortality (mean ± SD, %)[z]		
	Day 1	Day 2	Day 3
Acephate 75% SP[y]	35.3 ± 14.0 cd[x]	46.7 ± 11.5 efg	66.7 ± 14.0 bc
Benfuracarb 20% EC	37.7 ± 18.0 cd	51.0 ± 25.4 def	84.7 ± 6.5 a
Buprofezin 25% WP	53.7 ± 4.0 ab	64.3 ± 7.5 bcd	66.7 ± 8.1 bc
Carbaryl 85% WP	2.3 ± 4.0 g	8.7 ± 11.5 j	13.3 ± 10.7 g
Carbosulfan 40% WP	2.3 ± 4.0 g	11.0 ± 10.1 j	22.3 ± 10.3 fg
Carbosulfan 48.34% EW	31.0 ± 17.6 cde	62.0 ± 10.1 bcde	84.7 ± 6.5 a
Clothianidin 16% SG	26.7 ± 7.5 de	51.3 ± 14.0 def	62.3 ± 17.2 bc
Dinotefuran 20% SG	26.7 ± 7.5 de	55.3 ± 4.0 cdef	67.0 ± 10.7 bc
Etofenprox 10% EC	17.7 ± 13.5 efg	24.3 ± 14.0 hij	39.7 ± 14.0 def
Fenobucarb 50% EC	22.0 ± 3.5 def	53.7 ± 11.5 cdef	62.3 ± 19.6 bc
Fenvalerate 20% EC	22.0 ± 3.5 def	39.7 ± 11.5 fg	69.0 ± 10.1 abc
Flonicamid 10% WG	44.7 ± 15.0 bc	69.0 ± 3.5 bc	73.7 ± 4.0 ab
Imidacloprid 9.6% SL	8.0 ± 2.6 fg	14.3 ± 4.7 ij	32.7 ± 4.5 ef
Imidacloprid 18.2% SC	6.7 ± 0.6 fg	16.7 ± 1.2 ij	36.0 ± 4.6 def
Isoprocarb 50% WP	29.0 ± 10.1 cde	31.0 ± 7.0 ghi	44.3 ± 14.0 de
Methomyl 40% SG	60.3 ± 7.5 ab	75.3 ± 4.0 ab	76.0 ± 0.0 ab
Permethrin 10% EC	17.7 ± 11.5 efg	40.0 ± 7.0 fgh	53.3 ± 10.7 cd
Propoxur 50% WP	4.3 ± 4.0 g	24.7 ± 7.5 hij	33.7 ± 10.3 ef
Pymetrozine 25% WP	61.7 ± 2.9 a	86.7 ± 3.8 a	84.7 ± 4.0 a
Thiamethoxam 25% SG	28.7 ± 8.1 de	57.7 ± 4.0 cde	69.0 ± 10.1 abc

[z] Mortality rates were corrected with control using Abbott's formula.
[y] EC: emulsifiable concentrate; EW: emulsion, oil in water; SC: suspension concentrate; SG: water soluble granule; SL: soluble concentrate; SP: water soluble powder; WG: water dispersible granule; WP: wettable powder.
[x] Values in the same column with different letters show significant difference by the lease significant difference (LSD) test at 5% level.

Wen *et al*. 2009; Huang 2013)，顯示白背飛蝨尚未對新尼古丁類藥劑產生明顯抗藥性，值得注意的是，具益達胺抗性之褐飛蝨對賽速安具交互抗性 (Matsumura *et al*. 2008)，因此在防治上需謹慎選用以防藥效不彰。

本試驗測試氨基甲酸鹽類藥劑結果中，丁基加保扶及免扶克之殺蟲表現較佳，Yasudomi *et al*. (1994) 以葉部施用免扶克 (500 mg L^{-1}) 對 1980 年日本之褐飛蝨族群具 67% 之死亡率，與本試驗以 400 mg L^{-1} 處理之結果 (58.0%) 相似，而褐飛蝨對丁基加保扶相較於丁基滅必蝨及加保扶較為敏感，原因可能是尚未發展出明顯之抗藥性 (Wen *et al*. 2009; Min *et al*. 2014)。氨基甲酸鹽類藥劑自 1960 年代應用於水稻害蟲防治至今，歷史相當悠久，早期大量施用下，1970–1980 年間已有前人指出台灣地區褐飛蝨對加保利、加保扶、納乃得、滅必蝨及安丹等藥劑產生明顯抗藥性 (Ku *et al*. 1976; Chung *et al*. 1982)，1970–2007 年間東亞地區褐飛蝨及白背飛蝨族群對加保利之 LD_{50} 呈大幅度上升 (Hosoda 1983; Nagata *et al*. 2002; Matsumura *et al*. 2008, 2009)，相比之下，丁基滅必蝨於 1992 年後整體 LD_{50} 無明顯上升 (Endo & Tsurumachi 2001; Nagata *et al*. 2002; Matsumura *et al*. 2008, 2009)，但台灣之褐飛蝨族群對丁基滅必蝨之感受性受遷出地區之用藥習慣影響，而產生相當大之變化 (Matsumura *et al*. 2009; Huang 2013)，另外，本試驗之結果亦顯示加保利之殺蟲效果最差，可能與加保利自 1956 年推出至今仍為目前台灣之主流

防治藥劑有關 (Agriculture and Food Agency 2020)。

比較本試驗 3 種合成除蟲菊酯類藥劑對兩種飛蝨之影響，不同藥劑致死效果差異懸殊。以藥劑噴布法測試結果顯示，褐飛蝨對此類藥劑比白背飛蝨略為敏感 (Matsumura *et al*. 2014)，而同一藥劑以秧苗浸藥測試結果大多較噴布法測試差，如百滅寧以藥劑噴布法對褐飛蝨之死亡率 70.7% 相比，以秧苗浸藥法測試死亡率僅有 2.3%，可能由於本次測試之合成除蟲菊酯類藥劑皆不具系統性，僅由秧苗表面接觸之劑量所造成。前人研究顯示，對有機磷類及氨基甲酸鹽藥劑產生抗藥性之褐飛蝨，同時亦對百滅寧具相當高之交互抗性，在芬化利及依芬寧上則未發現明顯升高情形 (Chung *et al*. 1982; Ozaki & Kassai 1984; Matsumura *et al*. 2014)。褐飛蝨對百滅寧與芬化利之感受性差異，可能由於化學結構使解毒機制不同，百滅寧之化學結構上不具 α-氰基，除本身容易氧化降解外，褐飛蝨對百滅寧之代謝途徑類似於馬拉松 (malathion) 及滅必蝨 (MIPC)，透過酯酶 (esterase) 代謝為低毒或無毒物質而容易產生交互抗性 (Chung & Sun 1983; Dai & Sun 1984)。細胞色素 P450 單氧化酶 (cytochrome P450 monooxygenases; CYP) 為褐飛蝨對芬化利具抗藥性之主要原因 (Ling *et al*. 2011)，與不同作用機制藥劑，如益達胺、陶斯松 (chlorpyrifos)、芬普尼 (fipronil)、滅必蝨、布芬淨及沙蠶毒素類 (nereistoxin analogues) 殺蟲劑間則未發現明顯之交互抗性 (Liu *et al*. 2003)，因此田間施用上須考量不同藥劑間之相互影響。

由於水稻褐飛蝨及白背飛蝨之發生生態習性相似，常於田間混合發生，若能選擇同時對兩種飛蝨皆有防治效果之藥劑較為理想，綜合本研究結果，達特南及丁基加保扶為現階段較適合用於同時防治褐飛蝨及白背飛蝨之藥劑，其他多數藥劑則僅對其中一種飛蝨較有效，且對於水稻上之另一危害方式相似之重要害蟲斑飛蝨 [*Laodelphax striatellus* (Fallén)] 之防治效果仍有待評估外，若藥劑選用不當，則可能使其中一種害蟲崛起，造成危害。更甚者，即使選用之成品農藥為防治效果較佳之有效成分，可能因部分藥劑登記稀釋倍數無法達到有效殺蟲濃度，或施藥方式無法使藥劑附著於褐飛蝨棲息之莖基部處，而造成殺蟲劑量不足 (Cheng & Liu 1978)，害蟲受亞致死效應之激效，從而促進取食及繁殖潛能導致後續危害更為嚴重 (Cheliah & Heinrichs 1980)，長年下來，田間害蟲族群亦會逐漸形成抗藥性問題，最終導致害蟲之再猖獗 (resurgence)。台灣地區之飛蝨類害蟲危害受外來遷移影響非常大，有效的監測藥劑感受性及降低殺蟲劑的選汰壓力為相當重要之工作，於田間若蟲發生時，優先選擇經篩選致死率較高之藥劑或利用不同作用機制殺蟲劑輪用方式，尤其於中南部二期稻作飛蝨類害蟲易發生期間，依照田間害蟲密度監測施用 1–3 次藥劑，並且搭配種植抗蟲品種水稻，水稻收穫後盡速耕犁田間稻樁及再生稻之殘存蟲源、適量的施用氮肥，以及天敵保護，藉以抑制褐飛蝨之族群的增長於經濟危害水平 (抽穗前為 5–10 隻/叢，其後為 20 隻/叢左右) (Cheng 1978) 之下，綜合以上防治方式以達到經濟且有效之防治效果並符合政府推動農藥減量之目標。

誌謝

本研究承蒙研究室同仁楊雪鳳、蕭繡琴及賴錦雲小姐等辛勞協助試驗調查等工作，在此一併致謝。

引用文獻

Abbott, W. S. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol. 18:265–267. doi:10.1093/jee/18.2.265a

Agriculture and Food Agency. 2020. Analysis of pesticide residues in rice 2020. Agric. Food Agcy, COA, EY, ROC. https://www.afa.gov.tw/upload/cht/attachment/27507f1a8be6dbb316cfb3dbf50b89a9.pdf (visit on 04/09/2021) (in Chinese)

Boina, D. R., E. O. Onagbola, M. Salyani, and L. L. Stelinski. 2009. Antifeedant and sublethal effects of imidacloprid on Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. Pest Manag. Sci. 65:870–877. doi:10.1002/ps.1767

Byrne, F. J., M. P. Daugherty, E. E. Grafton-Cardwell, J. A. Bethke, and J. G. Morse. 2017. Evaluation of systemic neonicotinoid insecticides for the management of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* on

containerized citrus. Pest Manag. Sci. 73:506–514. doi:10.1002/ps.4451

Cabauatan, P. Q., R. C. Cabunagan, and I. R. Choi. 2009. Rice viruses transmitted by the brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål. p.357–368. *in*: Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia. (Heong, K. L. and B. Hardy, eds.) Int. Rice Res. Inst. Los Baños, Philippines. 460 pp.

Chelliah, S. and E. A. Heinrichs. 1980. Factors affecting insecticide-induced resurgence of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* on rice. Environ. Entomol. 9:773–777.

Chen, C. C. and R. J. Chiu. 1989. Transmission of rice wilted stunt virus by brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål). Bull. Taichung Dist. Agric. Improv. Stn. 23:3–10. (in English with Chinese abstract)

Cheng, C. H. 1976. Assessment of rice losses caused by the brown plant hopper and the rice green leafhopper. Plant Prot. Bull. 18:147–160. (in Chinese)

Cheng, C. H. 1978. Determination of the economic injury levels of the brown planthopper in Taiwan. I. Control of the brown planthopper at various population density in relation to grain yield and net return. J. Agric. Res. China 27:229–236. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.197809.0004

Cheng, C. H. and T. S. Liu. 1978. Reevaluation of chemicals for the brown planthopper control in Taiwan. J. Agric. Res. China 27:1–11. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.197803.0001

Cheng, C. H. and S. H. Huang. 2004. Population fluctuations and forecasting of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* on rice in Chiayi region, Taiwan. Plant Prot. Bull. 46:315–332. (in Chinese with English abstract) doi:10.6715/PPB.200412_46(4).0002

Chung, T. C., C. N. Sun, and C. Y. Hung. 1982. Resistance of *Nilaparvata lugens* to six insecticides in Taiwan. J. Econ. Entomol. 75:199–200. doi:10.1093/jee/75.2.199

Chung, T. C. and C. N. Sun. 1983. Malathion and MIPC resistance in *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). J. Econ. Entomol. 76:1–5. doi:10.1093/jee/76.1.1

Dai, S. M. and C. N. Sun. 1984. Pyrethroid resistance and synergism in *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae) in Taiwan. J. Econ. Entomol. 77:891–897. doi:10.1093/jee/77.4.891

Dyck, V. A. and B. Thomas. 1979. The brown planthopper problem. p.3–17. *in*: Brown Planthopper: Threat to Rice Production in Asia. (International Rice Research Insitute, ed.) Internl. Rice Res. Inst. Los Baños, Philippines. 369 pp.

Endo, S. and M. Tsurumachi. 2001. Insecticide susceptibility of the brown planthopper and the white-backed planthopper collected from southeast Asia. J. Pestic. Sci. 26:82–86. (in Japanese) doi:10.1584/jpestics.26.82

Gerami, S. 2013. Different exposure methods to neonicotinoids influenced biochemical characteristics in cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). Arch. Phytopathol. Pflanzenschutz. 46:1622–1631. doi:10.1080/03235408.2013.773671

Griffiths, D. C., S. P. Maniar, L. A. Merritt, A. Mudd, J. A. Pickett, B. J. Pye, L. E. Smart, and L. J. Wadhams. 1991. Laboratory evaluation of pest management strategies combining antifeedants with insect growth regulator insecticides. Crop Prot. 10:145–151. doi:10.1016/0261-2194(91)90063-W

Heinrichs, E. A., R. P. Basilio, and S. L. Valencia. 1984. Buprofezin, a selective insecticide for the management of rice planthoppers (Homoptera: Delphacidae) and leafhoppers (Homoptera: Cicadellidae). Environ. Entomol. 13:515–521. doi:10.1093/ee/13.2.515

Hosoda, A. 1983. Decrease in susceptibility to organophosphorus and carbamate insecticides in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae). Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 27:55–62. (in Japanese with English abstract)

Huang, S. H. 2013. New approaches to the integrated management of the rice planthopper guild in Taiwan. Doctoral Dissertation, Dept. Entomol. Coll. Bioresour. Agric., National Taiwan University. Taipei, Taiwan. 152 pp. (in Chinese with English abstract) doi:10.6342/NTU.2013.02626

Insecticide Resistance Action Committee. 2012. IRAC susceptibility test method series: Method no. 005 ver. 4. https://irac-online.org/content/uploads/Method_005_v4.1.pdf (visit on 04/09/2021)

Ku, T. Y., C. Y. Hsin, and S. C. Wang. 1976. Toxicity of some commonly used insecticides to brown planthopper *Nilaparvata lugens* and green rice leafhopper, *Nephotettix cineticeps*, and their resistance problems. Taiwan Agric. 12:148–163. (in Chinese with English abstract)

Ling, S. F., H. Zhang, and R. J. Zhang. 2011. Effect of fenvalerate on the reproduction and fitness costs of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* and its resistance mechanism. Pestic. Biochem. Physiol. 101:148–153. doi:10.1016/j.pestbp.2011.08.009

Liu, Z. W., Z. J. Han., Y. C. Wang, L. C. Zhang, H. W. Zhang, and C. J. Liu. 2003. Selection for imidacloprid resistance in *Nilaparvata lugens*: Cross-resistance patterns and possible mechanisms. Pest

Manag. Sci. 59:1355–1359. doi:10.1002/ps.768.

MacBean, C. 2012. The Pesticide Manual.16th ed. BCPC. Alton Hampshire, UK. 1439 pp.

Matsumura, M., H. Takeuchi, M. Satoh, S. Sanada-Morimura, A. Otuka, T. Watanabe, and D. V. Thanh. 2008. Species-specific insecticide resistance to imidacloprid and fipronil in rice planthoppers *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* in East and South-East Asia. Pest Manag. Sci. 64:1115–1121. doi:10.1002/ps.1641

Matsumura, M., H. Takeuchi, M. Satoh, S. Sanada-Morimura, A. Otuka, T. Watanabe, and D. V. Thanh. 2009. Current status of insecticide resistance in rice planthoppers in Asia. p.233–244. *in*: Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia (Heong, K. L. and B. Hardy, eds.) Int. Rice Res. Inst. Los Baños, Philippines. 460 pp.

Matsumura, M., S. Sanada-Morimura, A. Otuka, R. Ohtsu, S. Sakumoto, H. Takeuchi, and M. Satoh. 2014. Insecticide susceptibilities in populations of two rice planthoppers, *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*, immigrating into Japan in the period 2005–2012. Pest Manag. Sci. 70:615–622. doi:10.1002/ps.3590

Matsumura, M., S. Sanada-Morimura, and T. Fujii. 2017. Manual for Testing Insecticide Susceptibility in Rice Planthoppers. Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization (KARC/NARO). Okinawa, Japan. 26 pp.

Min, S., S. W. Lee, B. R. Choi, S. H. Lee, and D. H. Kwon. 2014. Insecticide resistance monitoring and correlation analysis to select appropriate insecticides against *Nilaparvata lugens* (Stål), a migratory pest in Korea. J. Asia Pac. Entomol. 17:711–716. doi:10.1016/j.aspen.2014.07.005

Mullins, J. W. 1993. Imidacloprid: A new nitroguanidine insecticide. p.183–198. *in*: Pest Control with Enhanced Environmental Safety. Symp. Ser. 524. (Duke, S. O., J. J. Menn, and J. R. Plimmer, eds.) Amer. Chem. Soc. Washington, DC. 360 pp. doi:10.1021/bk-1993-0524.ch013

Nagata, T., T. Kamimuro, Y. C. Wang, S. G. Han, and N. M. Noor. 2002. Recent status of insecticide resistance of long-distance migrating rice planthoppers monitored in Japan, China, and Malaysia. J. Asia Pac. Entomol. 5:113–116. doi:10.1016/S1226-8615(08)60139-9

Nauen, R. 1995. Behaviour modifying effects of low systemic concentrations of imidacloprid on *Myzus persicae* with special reference to an antifeeding response. Pestic. Sci. 44:145–153. doi:10.1002/ps.2780440207

Nauen, R., H. Hungenberg, B. Tollo, K. Tietjen, and A. Elbert. 1998. Antifeedant effect, biological efficacy and high affinity binding of imidacloprid to acetylcholine receptors in *Myzus persicae* and *Myzus nicotianae*. Pestic. Sci. 53:133–140.

Ozaki, K. and T. Kassai. 1984. The insecticidal activity of pyrethroids against insecticide-resistant strains of planthoppers, leafhoppers and the housefly. J. Pestic. Sci. 9:61–66. doi:10.1584/jpestics.9.61

Plant Protection Manual. 2021. Diseases and insect pests of rice. Taiwan Agric. Chem. Toxic Subst. Res. Inst. Taichung, Taiwan. https://otserv2.tactri.gov.tw/ppm/ (visit on 04/09/2021) (in Chinese)

Portilla, M., R. G. Luttrell, K. A. Parys, N. Little, and K. C. Allen. 2018. Comparison of three bioassay methods to estimate levels of tarnished plant bug (Hemiptera: Miridae) susceptibility to acephate, imidacloprid, permethrin, sulfoxaflor, and thiamethoxam. J. Econ. Entomol. 111:2799–2808. doi:10.1093/jee/toy244

Roditakis, E., N. Fytrou, M. Staurakaki, J. Vontas, and A. Tsagkarakou. 2014. Activity of flonicamid on the sweet potato whitely *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) and its natural enemies. Pest Manag. Sci. 70:1460–1467. doi:10.1002/ps.3723

Sogawa, K., G. J. Liu, and J. H. Shen. 2003. A review on hyper-susceptibility of Chinese hybrid rice to insect pests. Chinese J. Rice Sci. 17:23–30. doi:10.3321/j.issn:1001-7216.2003.z1.003

Sogawa, K., G. Liu, and Q. Qiang. 2009. Prevalence of whitebacked planthoppers in Chinese hybrid rice and whitebacked planthopper resistance in Chinese japonica rice. p.257–280. *in*: Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia. (Heong, K. L. and B. Hardy, eds.) Int. Rice Res. Inst. Los Baños, Philippines. 460 pp.

Tsujimoto, K., S. Sugii, S. Sanada-Morimura, and M. Matsumura. 2016. A new method for monitoring the susceptibility of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae), to pymetrozine by combining topical application and measurement of offspring number. Appl. Entomol. Zool. 51:155–160. doi:10.1007/s13355-015-0374-3

Wang, Y., C. Gao, Z. Xu, Y. C. Zhu, J. Zhang, W. Li, D. Dai, Y. Lin, W. Zhou, and J. Shen. 2008. Buprofezin susceptibility survey, resistance selection and preliminary determination of the resistance mechanism in *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). Pest Manag. Sci. 64:1050–1056. doi:10.1002/ps.1606

Wen, Y. C., Z. Liu, H. Bao, and Z. Han. 2009. Imidacloprid resistance and its mechanisms in field popu-

lations of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål in China. Pestic. Biochem. Physiol. 94:36–42. doi:10.1016/j.pestbp.2009.02.009

Xu, Y., W. W. Zhou, Y. J. Zhou, J. X. Wu, and X. P. Zhou. 2012. Transcriptome and comparative gene expression analysis of *Sogatella furcifera* (Horváth) in response to southern rice black-streaked dwarf virus. PLoS ONE. 7:e36238. doi:10.1371/journal.pone.0036238

Yasudomi, N., M. Usui, N. Osaki, Y. Aoki, and N. Umetsu. 1994. Studies on the insecticidal properties of benfuracarb against the brown rice planthopper, *Nilaparvata lugens* (STÅL) (Hemiptera: Delphacidae). Appl. Entomol. Zool. 29:369–375. doi:10.1303/aez.29.369

Laboratory Evaluation of the Effect of Insecticides for Controlling Brown Planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] and Whitebacked Planthopper [*Sogatella furcifera* (Horváth)] in Chiayi Region

Po-Yu Lai[1] and Shou-Horng Huang[2,*]

Lai, P. Y. and S. H. Huang. 2021. Laboratory evaluation of the effect of insecticides for controlling brown planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] and whitebacked planthopper [*Sogatella furcifera* (Horváth)] in Chiayi region. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):285−297.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effectiveness of twenty registered insecticides on 4th–5th instar nymph of brown planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] and whitebacked planthopper [*Sogatella furcifera* (Horváth)] collected from Chiayi region during 2016. The morality of both planthopper species was tested by tower spray and rice seedling dipping methods in laboratory conditions. The results from tower spray tests on brown and whitebacked planthopper indicated that carbosulfan (48.34% EW) and clothianidin (16% SG) were the most effective insecticides, causing the morality at 84.7% and 93.4% respectively, followed by dinotefuran (20% SG) and benfuracarb (20% EC), mortality between 69.0–80.3%. Acephate (5% SP). Carbosulfan (48.34% EW) exhibited the mortality (75.7–91.0%) significantly higher than others on brown planthopper. Although benfuracarb (20% EC), carbosulfan (48.34% EW) and pymetrozine (25% WP) are commonly recommended for controlling whitebacked planthopper, the mortalities were 84.7% using the rice seedling dipping method. Judging from all results among the twenty insecticides by two test methods, dinotefuran (20% SG), carbosulfan (48.34% EW) and benfuracarb (20% EC) were effective for controlling both brown- and whitebacked planthoppers. To effectively control rice pests, occurrence of planthopper species in the field must be closely monitored. In addition to registered insecticides, efforts are needed to select more effective insecticides in order to achieve cost-effective management.

Key words: *Nilaparvata lugens* (Stål), *Sogatella furcifera* (Horváth), Insecticide, Tower spray method, Rice seedling dipping method.

Received: June 24, 2021; Accepted: August 2, 2021.

* Corresponding author, e-mail: shhuang@tari.gov.tw

[1] Assistant Research Fellow, Department of Plant Protection, Chiayi Agricultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Chiayi, Taiwan, ROC.

[2] Associate Research Fellow, Department of Plant Protection, Chiayi Agricultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Chiayi, Taiwan, ROC.

台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 70(4):299–309 (2021)
DOI:10.6156/JTAR.202112_70(4).0006

研究報告

氮肥施用量與採收前光照處理對設施栽培圓葉萵苣生長與硝酸鹽含量之影響

蕭巧玲 [1]　何佳勳 [2]　楊純明 [3,4*]

摘要

蕭巧玲、何佳勳、楊純明。2021。氮肥施用量與採收前光照處理對設施栽培圓葉萵苣生長與硝酸鹽含量之影響。台灣農業研究 70(4):299–309。

葉菜類蔬菜對於硝酸鹽的蓄積除了遺傳因子控制之外，栽培過程中的氮肥管理及光照亦是 2 項影響植體硝酸鹽含量變化原因。本研究於行政院農業委員會農業試驗所農場之簡易塑膠布設施內進行，探討於 4 種氮肥處理下，在採收前以輔助人工光源調節設施內光環境對圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* cv. 'Ming Feng No. 3') 生長及硝酸鹽含量之影響。試驗係以發光二極體 (light-emitting diode; LED) 及省電燈泡 (energy-saving light bulb; ELB) 為人工光源，計有藍光 LED (LED_B)、紅光 LED (LED_R)、藍紅光 LED ($LED_{3B:1R}$)、紅藍光 LED ($LED_{3R:1B}$) 及省電燈泡 (ELB) 等 5 種，另以不照光 (no light) 為對照，共計 6 種光照處理。試驗結果顯示，在 30 kg N · ha^{-1} 及 203 kg N · ha^{-1} 兩種較低氮肥處理下圓葉萵苣植體具有較低硝酸鹽含量，當氮肥提高至 346 kg N · ha^{-1} 及 376 kg N · ha^{-1} 雖可獲得較高生長表現 (包括株高、地上部鮮重及葉數)，但亦使植體蓄積較多硝酸鹽。此 4 種氮肥處理植株於採收前 6 h 進行不同光照處理時，經與不照光處理比較，可發現 4 種氮肥處理搭配輔助光照皆有降低硝酸鹽含量之效果。其中，在 376 kg N · ha^{-1} 氮肥處理下，以 LED_B 及 $LED_{3B:1R}$ 可使硝酸鹽分別降低 14% 及 23%。又將 376 kg N · ha^{-1} 氮肥處理植株於採收前 4 h 及 6 h，分別以 LED_B、ELB 進行光照處理，結果顯示皆可減少圓葉萵苣植體硝酸鹽，且兩處理間無顯著差異。經分析葉片淨二氧化碳交換速率 (視同光合作用速率) 與植體硝酸鹽含量間之相關性，結果顯示兩者間呈現顯著的二次曲線關係，即硝酸鹽含量隨著光合作用速率的升高而呈曲線型下降；當光合作用速率提高至 4.5 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 以上時，植體硝酸鹽含量可維持於 3,000 mg kg^{-1} (3,000 ppm) 以下。綜合本研究結果，顯見氮肥施用量將明顯影響圓葉萵苣植體生長量及硝酸鹽含量，若於採收前進行額外輔助光照處理，將可獲得調降硝酸鹽含量效果，而於相近效果下，則以 4 h 光照時間較 6 h 者可節省用電成本。

關鍵詞：硝酸鹽、葉萵苣、光環境、發光二極體、氮肥。

前言

硝酸鹽 (nitrate; NO_3^-) 在許多植物 (如青花菜、花椰菜、芥藍菜、根菜類等) 植體中皆可發現，亦為植物氮肥來源之一，尤為葉菜類蔬菜吸收氮素之主要型式。然而，若於生產過程中不當施用氮肥，尤其過量使用時，雖然也許可以加速達到採收期，卻常有硝酸鹽累積情形 (Marschner 1995; Li *et al*. 2013)，引起消費者對農產品安全的疑慮。在國人日趨重視食品安全的氛圍下，如何控制或甚至減少農產品中的硝酸鹽含量，已成為現階段農業生產的重要課題之一。

一般而言，硝酸鹽本質並無毒性，令人擔

收件日期：2021 年 5 月 4 日；接受日期：2021 年 8 月 17 日。
* 通訊作者：cmyang0616@gmail.com
[1] 農委會農業試驗所作物組副研究員。台灣 台中市。
[2] 農委會農業試驗所作物組助理研究員。台灣 台中市。
[3] 農委會農業試驗所作物組前研究員兼組長。台灣 台中市。
[4] 明道大學精緻農業學系副教授。台灣 彰化縣。

憂的主因係當經過攝食進入人體後轉成亞硝酸鹽 (nitrite)，容易與氧競爭血紅素 (hemoglobin) 之結合位置，形成變性血紅素 (methemoglobin)，致使紅血球攜氧能力降低，導致高鐵血紅蛋白血症 (methemoglobinemia) (Kim-Shapiro *et al*. 2005)。長期食用過量硝酸鹽的食材，將可能導致毒性反應，並形成缺氧狀態，而發生呼吸急促、心律不整等現象 (Block 2020)。硝酸鹽在人體內被代謝後形成之亞硝酸鹽會與蛋白質等其他食物消化後形成之二級胺結合，產生亞硝胺 (nitrosamines) 等致癌物質。在動物試驗中，亞硝胺具有強烈肝毒性，會引起腸胃道及肝臟的癌症 (Sanchez-Echaniz *et al*. 2001; Du *et al*. 2007)。

世界衛生組織 (World Health Organization; WHO) 特別評估並制定每人每公斤體重每日硝酸鹽攝取安全容許量為 3.7 mg kg^{-1} d^{-1} (World Health Organization 1996)，歐盟於 2006 年規範菠菜與萵苣依不同品種、栽培季節及環境訂定硝酸鹽含量應在 2,000–4,500 mg kg^{-1} (ppm)。惟因後續評估 4 萬多種蔬菜種植條件仍可能無法達到上述的標準，因此在 2011 年時放寬修正為 2,000–5,000 mg kg^{-1} (Official Journal European Union 2011)。

由於葉菜類蔬菜硝酸鹽累 (蓄) 積決定於硝酸鹽吸收、同化及運送，除了遺傳因子控制之外，環境中光照、溫度、採收時間及儲藏條件亦會影響硝酸鹽之含量 (European Food Safety Authority 2008; Hsiao *et al*. 2013)。因此，歐盟所訂定之硝酸鹽限量標準，亦依照不同栽培環境而有差異。一般從根部所吸收硝酸鹽進入植體後，需經過還原作用，植體才得以真正利用，並進一步化合成植體所需各種胺基酸及蛋白質，供作物生長發育所需。硝酸鹽在植體中含量受硝酸鹽還原酶 (nitrate reductase; NR) 代謝活性及速率影響，而硝酸鹽還原酶則受多種因子調控，包括光照、溫度、光合作用、荷爾蒙及生長速率等皆可能影響其合成與活性 (Crawford 1995; Li & Oaks 1995)。栽培環境中之光照訊號刺激能活化硝酸還原酶活化而調節硝酸鹽含量，葉片液泡中硝酸鹽也受到光照影響而有濃度及運送之變化 (Cookson *et al*. 2005)。以藍光光照 5 min 後，觀察阿拉伯芥葉肉細胞中硝酸鹽含量變化，當在暗期 (不照光) 時硝酸鹽會貯存在液泡中，待有光照時從液泡中釋放到細胞質中，並且在由暗期轉換至光期之過渡期間，硝酸鹽還原酶受光及細胞質中低濃度硝酸鹽活化並開始合成 (Cookson *et al*. 2005)。因而，光影響植體硝酸鹽含量，似乎能實際運用作為調節蔬菜硝酸鹽含量之工具。

在日照不充足地區，人工光源之應用十分普遍，以避免蔬菜硝酸鹽累積現象。例如，東歐立陶宛採用人工補光方式，在採收前 3 d 加強紅光發光二極體 (light-emitting diode; LED) 光照，可使不同品種葉萵苣硝酸鹽含量降低達 20–56%。以光週期 12 h 條件栽培波菜，觀察在不同光強度下植體硝酸鹽含量日夜變化，發現當逐步調高光強度時，植體硝酸鹽含量隨光強度增加逐漸下降。尤其在開始光照後 3 h 內，即能明顯降低硝酸鹽含量，而且亞硝酸鹽含量變化趨緩 (Chang *et al*. 2013)。由此可知，栽培環境中之光照條件對植體中硝酸鹽含量之調整極為重要，吾人也可據以作為主動調節植體硝酸鹽含量之工具。

作物栽培仍以陽光為主要光源，但陽光易受季節及氣候環境等影響，人們因此將光知識及人工光源延伸利用於各種設施 (或溫室)，以人工光源來提供或補充作物所需光照環境，使農作物避免負向自然環境之威脅，得以在設施內持續生產甚或提高生產物之質量。目前人工光源利用於作物栽培之種類頗多，包括有省電燈泡 (energy-saving light bulb; ELB)、螢光燈、水銀燈、高壓鈉燈及發光二極體 (LED) 等多種。其中，LED 已逐漸普遍利用於簡易設施、先進 (精密) 設施、植物工場及其他用途，成為當前最具農業應用潛力人工光源之一。由於 LED 使用直流電源，可以調整光照強度、頻率及光質比例，又具有散熱率低、壽命長及發光效率高等特性，能夠產生連續光源、間歇性光源及組合光源來提供作物不同生長階段所需光環境 (Jao & Fang 2000; Fang & Jao 2004)。

萵苣類蔬菜係台北市果菜批發市場成交量最高之前十大蔬菜，依其葉型及品種 (系) 等可多樣分類，可供炒食、煮食或生食，其中圓葉萵苣莖部肥大且軟嫩，乃國人喜愛之葉用蔬

菜種類。Wang *et al*. (1998) 曾調查 28 種葉萵苣栽培種之硝酸鹽含量，發現品種間含量差異甚大，圓葉種葉萵苣則歸屬於硝酸鹽高累積型之一。有鑑於葉菜類蔬菜硝酸鹽累積問題之重要性，以及光環境對調節硝酸鹽含量之潛在應用性，本研究延續先前試驗結果 (Hsiao *et al*. 2013)，透過不同氮肥管理及人工光源補充等試驗條件，探討及釐清其對調節圓葉萵苣硝酸鹽含量之差異。期以提供農企業/農民生產低硝酸鹽圓葉萵苣栽培技術改進之參考，因應消費者對於健康安全蔬菜生產之高度需求。

材料與方法

圓葉萵苣之種植及栽培管理

本研究在位於台中市霧峰區之行政院農業委員會農業試驗所農場簡易塑膠布設施內進行試驗，以圓葉萵苣 (*Lactuca sativa*) 「明豐 3 號」 ('Ming Feng No. 3') 作為參試材料，分別於 2012 年 5 月至 10 月期間栽植，共計種植 8 批次。栽培介質採用泥炭土 (Tref, Jiffy Products International BV, Zwijndrecht, The Netherlands)、3 號珍珠石 (南海蛭石工業，台灣新北市) 及炭化稻殼按比例 (v/v/v = 3 : 1 : 1) 混合均勻，介質 pH 值約為 5.5–6.5 間。將介質填入 56 cm (L) × 36 cm (W) × 20 cm (H) 栽植籃。圓葉萵苣種子以 0.45 g pot^{-1} 均勻撒播，播種後 5–7 d 進行疏苗 (thinning)。

在播種前及生育中期 (播種後 15–17 d) 分別施用基肥及追肥等不同氮肥組合 (表 1)，包括 1 倍追肥 (F1)、1 倍基肥 + 1 倍追肥 (F2)、2 倍基肥 (F3) 及 2 倍基肥 + 1 倍追肥 (F4) 等 4 種組合，氮肥 (素) 含量高低分別換算為 30、203、346 及 376 kg N · ha^{-1}，據以釐清不等氮肥施用量對圓葉萵苣生長及硝酸鹽含量之影響。

病蟲草害管理

葉用萵苣常見病害包括菌核病、葉斑病及露菌病，但本試驗期間少有前述病害發生，因此未施用病害防治藥劑。惟蟲害係本試驗栽培過程易出現之生物性危害因子，包括甜菜葉蛾、小菜蛾。因此，為減少蟲卵可能殘留於介質及盆器中，在播種前將 6% 培丹粒劑 (cartap hydrochloride) 1 g pot^{-1} 與基肥混拌入介質中，作為預防性控制來減少蟲害發生。種植圓葉萵苣前，簡易設施周圍已先懸掛甜菜夜蛾性費洛蒙誘蟲盒，降低甜菜葉蛾發生率。生育期間如遇每株圓葉萵苣有甜菜夜蛾幼蟲約 3–5 隻時，即施用稀釋 1,500× 之 2.15% 因滅汀乳劑 (emamectin benzoate)，以防止蔓延。簡易設施建置於農田土壤之上，以雜草抑制蓆鋪設地面，以減少雜草種子萌發，遇有雜草植株穿透抑制蓆則以人工除草方式摘除，降低病蟲源寄生。

採收前額外輔助光照處理

本主題共進行試驗 I 及試驗 II 兩項，前者在於探討光照處理效果，後者在於比較光照處理時程 (6 h 及 4 h) 之差異。試驗 I 在圓葉萵苣播種後約 30 d 可達商業販售之採收期，於收穫當日之日出前 6 h，施以不同光波段之照光處理，包括發光二極體 (LED) 燈泡 (電壓

表 1. 不等氮肥投施量組合之處理代號及氮素含量。

Table 1. Codes and various nitrogen contents in fertilizer in different fertilization treatments.

Treatment code	Treatment description	Organic fertilizer	Urea [$CO(NH_2)_2$]	Ordinary superphosphate [$CaH_4(PO_4)_2$]	Potassium chloride (KCl)	No. 1 composite fertilizer[z]	Total nitrogen
		kg ha^{-1}					
F1	1× top-dressing	-	-	-	10	150	30
F2	1× basal + 1× top-dressing	3,750	50	25	60	150	203
F3	2× basal	7,500	100	50	100	-	346
F4	2× basal + 1× top-dressing	7,500	100	50	110	150	376

[z] No. 1 composite fertilizer includes N, P_2O_5 and K_2O in ratio of 20 : 5 : 10, respectively, made by Taiwan Fertilizer Company (TFC), Taiwan.

110 V、功率 10 W，工業研究院，台灣新竹市) 和省電燈泡 (電壓 110–120 V、功率 23 W，台灣飛利浦電子公司，台灣台北市)，後者指一體式緊湊型螢光燈泡 (compact fluorescent lamp; CFL)。人工光源設置於葉萵苣植株上方 0.85 m，隨植株高度調整以維持相同距離，計有藍光 LED (LED_B，波長 440–460 nm，光強度 1.63 μmol m^{-2} s^{-1})、紅光 LED (LED_R，波長 640–660 nm，光強度 4.91 μmol m^{-2} s^{-1})、藍紅光 LED ($LED_{3B:1R}$，3 藍光 + 1 紅光，光強度 2.98 μmol m^{-2} s^{-1})、紅藍光 LED ($LED_{3R:1B}$，3 紅光 + 1 藍光，光強度 3.59 μmol m^{-2} s^{-1})、省電燈泡 (ELB，含有 430、540 及 610 nm 等 3 個中心波長，光強度 1.64 μmol m^{-2} s^{-1}，色溫 6500K，Philips Helix 晝光色)，以不照光為對照組 (no light control)，共計 6 種光環境，以探究收穫前人為補光對圓葉萵苣植體中硝酸鹽含量之效應。試驗 II 係為瞭解縮短光照處理時程 (時間) 對圓葉萵苣植體硝酸鹽含量是否存在差異效果，乃以藍光 LED (LED_B) 及晝光色省電燈泡 (ELB) 分別於收穫當天之日出前光照 4 h 或 6 h，比較不同處理時程之植體硝酸鹽含量。

植體硝酸鹽分析

照光結束後及日出前，切取試驗之圓葉萵苣植株地上部，以檢測植體硝酸鹽含量。取 300 g 圓葉萵苣植體，以均質機 (Model 275, Norwalk Compressor Company, Stratford, CT, USA) 打碎並攪拌均勻後，加入 600 mL 70℃之 RO (reverse osmosis) 逆滲透水。再由此取 1 mL 混合溶液，以去離子水 (deionized water) 定量至 20 mL 後，置於 100℃水浴槽內加熱 30 min。待冷卻後，利用濾紙 (Whatman, No. 5) 過濾出澄清液，吸取 1 mL 之澄清液並定量至 5 mL。經震盪均勻後，以 2 通道數位檢測系統 (Astoria 2 Analyzer System, Astoria-Pacific International, Clackamas, OR, USA) 分析圓葉萵苣植體硝酸鹽含量。

圓葉萵苣植株生長性狀及光合作用調查與試驗統計

光照處理結束後，量測圓葉萵苣之葉片淨二氧化碳交換速率 (視同光合作用速率)。以光合作用氣體分析系統 (LI-6400XT, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 夾取植株中心往外數第 4 片完全展開葉，將 1 cm^2 葉室的氣體分析器置於葉片上部 1/3 處，夾取時間為每葉 3 min，流速設定 150 μmol s^{-1}，取 80、90 及 100 s 測值之平均值為該葉片代表值。各光照處理皆有 3 重複 (3 栽植籃)，每重複皆量測 3 株葉片之淨二氧化碳交換速率 (μmol CO_2 m^{-2} s^{-1})，取 3 株平均值為各重複代表值，再取 3 重複之均值為各光照處理代表值。光合作用速率量測完成後，切取地上部植株以調查生長性狀，包含株高、葉片數、地上部鮮重及乾重 (80℃烘乾 72 h)，每處理 3 重複，每重複調查 6 株。

本試驗期間收集試區鄰近之農業試驗所一級農業氣象測站測值 (月報表)，包括每日的日均溫 (daily mean air temperature, ℃)、日射量 (daily irradiance, MJ m^{-2})、日照時數 (sunshine hours, h) 及相對濕度 (relative humidity, %) (表 2)。本研究室於簡易網室內進行，試驗環境相同，採完全隨機設計 (Completely Randomized Design; CRD)，將栽植籃逢機擺放，4 重複，每重複共計 4 種肥料及 6 種光照處理。試驗資料以行政院農業委員會購置之 SAS-EG 視窗版軟體進行統計分析，再以 SigmaPlot (Version 8.0) 統計繪圖軟體繪製圖形。

結果與討論

氮肥處理影響圓葉萵苣植體硝酸鹽含量及生長性狀表現

本研究於試驗期間根據所施用肥料之基肥及追肥的倍率換算總氮素投施量 (表 1)，於採收前量測圓葉萵苣植體硝酸鹽含量及生長性狀，同時量測各生育期間之氣象變因平均值及累加值，包括日均溫、日射量、日照時數及相對濕度等氣象參數，亦計算平均生育期 (日數) (表 2)，提供氣象環境訊息。由氮肥最低投施量 30 kg N · ha^{-1} (1 倍追肥) 至最高投施量 376 kg N · ha^{-1} (2 倍基肥 + 1 倍追肥)，比較採收時之植體硝酸鹽含量可知，植體硝酸鹽含量有隨著氮肥投施量增加而升高的趨勢 (圖 1)，惟受到施用方法影響。因此，仍應釐清氮肥投施量與硝酸鹽含量關係。如何適量投施氮肥，以充分利用於植株生長而不致累 (蓄) 積硝酸鹽於植

表 2. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 於 2012 年 5 月至 10 月試驗期間不同栽植期量測氣象變因之累加值與平均值。

Table 2. The accumulated and mean values of climatic variables during different growing periods of lettuce (*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') cultivated under protected structure from May to October in 2012.

		Temperature (℃)		Irradiance (MJ m^{-2})		Sunshine hours (h)		Relative humidity (%)	
Growing period	Duration (d)	Sum	Ave.	Sum	Ave.	Sum	Ave.	Range	Ave.
1	05/21–06/24 (35)	950.7	27.2	561.9	16.1	167.8	4.8	73.1–94.5	84.4
2	05/28–06/27 (31)	852.5	27.5	472.5	15.2	133.4	4.3	73.1–94.5	85.0
3	06/04–07/04 (31)	866.4	27.9	473.5	15.3	132.9	4.3	73.1–94.5	83.7
4	07/06–08/05 (31)	886.4	28.6	505.4	16.3	170.7	5.5	70.0–96.3	81.2
5	07/13–08/13 (32)	905.7	28.3	487.0	15.2	152.8	4.8	71.1–96.3	81.9
6	07/20–08/20 (32)	894.8	28.0	452.5	14.1	136.1	4.3	76.2–96.3	84.1
7	07/27–08/27 (32)	896.5	28.0	458.6	14.3	145.9	4.6	76.2–96.3	83.5
8	09/10–10/10 (31)	808.0	26.1	550.1	17.7	263.8	8.5	69.0–83.7	76.5
Mean	(32)	882.6	27.7	495.2	15.5	162.9	5.1	72.7–94.1	82.5

體中，乃圓葉萵苣及其他葉菜類必須建立之施肥技術。固然栽培期間僅施用 1 倍量追肥處理之植體硝酸鹽含量最低，僅約 1,200 mg ka^{-1}，然其外觀株型未達該商品之販售要求，顯見在此施用量下並不足以供應植株生長所需 (Hsiao *et al*. 2013)。2 倍基肥 (346 kg N · ha^{-1}) 之氮肥投施量較 1 倍基肥 + 1 倍追肥 (203 kg N · ha^{-1}) 者高，然後者之硝酸鹽含量卻多約1,200 mg kg^{-1}，可知施肥時機似乎亦是影響植體硝酸鹽含量重要因素之一。此外，由於基肥於圓葉萵苣播種前即混合入介質中，經過植體吸收及水分淋洗等過程，原有氮肥於生育後期可能已所剩無幾 (Fan *et al*. 2014)，因此高基肥用量未必能拉長介質供應氮素之時間，卻避免了植體硝酸鹽的蓄積。在最高氮量之 2 倍基肥 + 1 倍追肥 (376 kg N · ha^{-1}) 處理下，能於植株生育權期充分供應期所需氮素，但亦使植體累積高於 4,500 mg kg^{-1} 之硝酸鹽含量。由此研究結果顯示，1 倍基肥 + 1 倍追肥 (203 kg N · ha^{-1}) 施肥方法可以使植體有相對較少之硝酸鹽及較佳生長性狀 (僅低於最高氮肥量處理)。據此，合理氮肥施用方法及投施量宜先行建立，俾使蔬菜栽培系統既能促進植株生長又能控制植體硝酸鹽於合理範圍。

在植體硝酸鹽含量與植株生長性狀間之關係方面 (圖 2)，隨著氮肥投施量增加，植株生

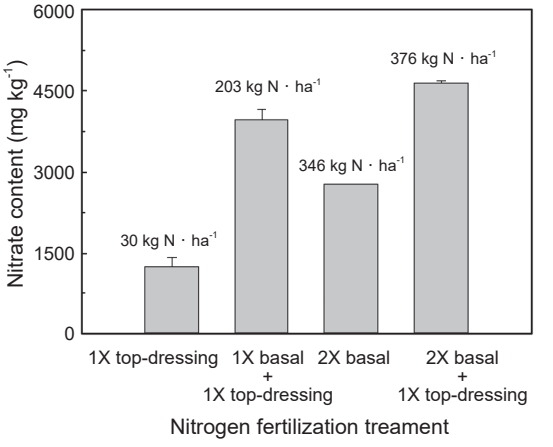


圖 1. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 於 2012 年 5 月至 10 月試驗期間，施用不同氮肥處理組合之植體硝酸鹽含量。不同氮肥處理分別於播種前及生育中期 (播種後 15–17 d) 以基肥及追肥施用，包括 1 倍追肥、1 倍基肥 + 1 倍追肥、2 倍基肥及 2 倍基肥 + 1 倍追肥等 4 種組合，氮肥 (素) 含量高低分別換算為 30、203、346 及 376 kg N · ha^{-1}。

Fig. 1. Effects of different amounts of nitrogen fertilizer applications on nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') grown under protected structure from May to October in 2012. Basal fertilizer and top-dressing were applied before seed sowing and at two weeks after seed sowing, respectively. Total nitrogen was calculated as 30 kg N · ha^{-1} for 1× top-dressing, 203 kg N · ha^{-1} for 1× basal + 1× top-dressing, 346 kg N · ha^{-1} for 2× basal, and 376 kg N · ha^{-1} for 2× basal + 1× top-dressing, respectively.

長性狀 (如株高、地上部鮮重及葉數) 亦隨之增長，尤其葉數可達到顯著之二次曲線關係。雖然硝酸鹽型式 (或稱硝酸態) 氮肥增加與鮮重間之關係未達統計顯著，似乎仍可期待施用此類氮肥對鮮重之促進作用。其次，施用硝酸態氮肥若未能完全利用，將形成植體高量硝酸鹽蓄積之負面結果。因此，本試驗最高氮肥施用量處理雖有最大生長促進，卻也蓄積了高量 (4,500 mg kg^{-1}) 之植體硝酸鹽。一般植體內之硝酸鹽很快即被分布至各部位利用，然而其他條件 (如環境因子、發生生物性逆境) 如未能配合，將會造成過多硝酸鹽之累積。再者，植物對於氮肥種類具有偏好性，通常旱作作物 (如葉菜類) 對於硝酸態氮肥的吸收利用高於銨態氮肥。因此，如能適當比例混用硝酸態及硝酸態氮肥，將可改變部分作物之硝酸鹽及銨在農作物 (如大白菜、番茄及玉米等) 植體中的分布、利用及累積 (Li *et al*. 2013)。惟此是否可延用於圓葉萵苣，尚待進一步研究及瞭解。

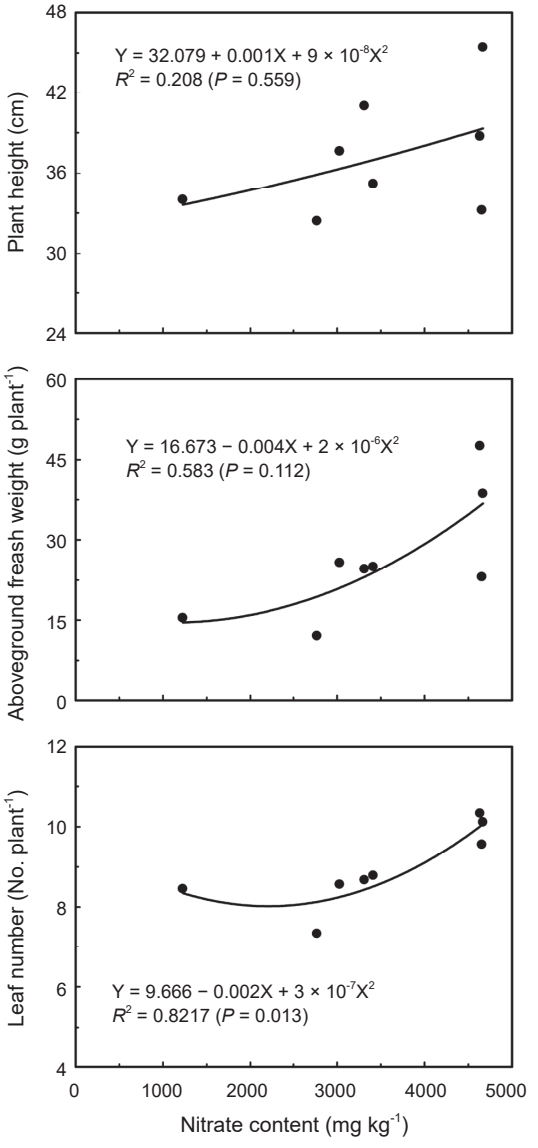


圖 2. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 以不同氮肥處理之植體硝酸鹽含量與生長性狀 (包括株高、地上部鮮重及葉數) 之二次曲線關係圖。

Fig. 2. Changes in plant height, aboveground fresh weight and leaf number in plants of lettuce (*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') grown under protected structure with nitrate contents of plants that treated with varied amounts of nitrogen fertilizer.

特定光環境對不同氮肥處理之圓葉萵苣植體硝酸鹽含量的影響

葉菜類蔬菜硝酸鹽累 (蓄) 積決定於對硝酸態肥料吸收、同化、運送及植株生長速度之綜合交感，除了遺傳因子控制之外，環境中光照長短、強弱及光波段亦會影響硝酸鹽含量變化 (Wang *et al*. 1998)。本研究比較 4 種氮肥在 6 種人工光源環境中的硝酸鹽含量，分析結果發現不同氮肥之間與不同人工光源之間都存在極顯著差異，且氮肥及光源之間有極顯著交感作用，表示不同氮肥在不同人工光源處理的植體硝酸鹽含量有所不同 (表 3)，因此應當慎選合適的人工光源搭配氮肥用量。

續探討圓葉萵苣採收前額外給予 6 h 人工

表 3. 四種氮肥及 6 種光照處理對圓葉萵苣硝酸鹽含量之變方分析表。

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for of 6 lighting treatments under four nitrogen application rates on nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* cv. 'Ming Feng No. 3').

Parameter	*df*	*F*
N application rates (N)	3	6.06**
Lighting condition (L)	5	650.11**
N × L	14	10.31**
Error	71	

**denote significance at 1% level.

光源照射的補光處理，對降低硝酸鹽含量之效應 (表 4)。試驗結果顯示除了 F2 肥料處理外，其他 5 種人工光源對不同氮肥處理之圓葉萵苣硝酸鹽含量皆有不等程度之調節作用。在較高肥料的 F4 處理中，雖有較佳的生長性狀 (圖 2)，然在未提供人工照光環境下之硝酸鹽含量可高達 4,652 mg kg^{-1}。以最小顯著性差異測驗 (least significant difference; LSD) 結果顯示，輔以額外光照可相對調降硝酸鹽含量。比較不同人工光源處理對圓葉萵苣硝酸鹽含量之影響，發現 LED_B 及 $LED_{3B:1R}$ 可分別使硝酸鹽顯著降低至 4,003 mg kg^{-1} 及 3,586 mg kg^{-1}，即約降低 14% 及 23% 累積量，而多波段之 ELB 與不照光比較，亦明顯降低了 15%。研究 (Matsumoto *et al*. 2010; Samuolienė *et al*. 2011) 指出，不同萵苣品種間對感受光照而調節硝酸鹽含量之特性存有差異，以混合不同比例之藍紅光栽培 'Greenwave' 萵苣，可使其硝酸鹽含量降至3,000 mg kg^{-1} 以下，而紅葉萵苣 'Multired 4' 與綠葉萵苣 'Multigreen 3' 兩品種以紅光補光則可降低植體硝酸鹽含量最高達 56%，惟淡綠葉萵苣 'Multiblond 2' 經過紅光照射後卻增加超過 6 倍硝酸鹽含量。本研究所選用之「明豐 3 號」圓葉萵苣似乎對藍光波段具有調節硝酸鹽含量之正向反應，藍光加上紅光亦然，而對於所引起之生理反應未來仍需加以探究。

在本研究之光照環境下，採收前光照 6 h 所需用電量約為 0.3 度電 [(10 W × 6 h × 5 bulbs m^{-2})/1,000 瓩時 (kW h)]，雖僅於採收前照射，長期使用仍屬一可觀成本支出。為評估減少光照時間是否能維持降低硝酸鹽之效應，乃以 LED_B 及 ELB 分別光照 4 h 及 6 h，檢視對硝酸鹽含量之差別 (顯著性差異測驗結果如表 5)。比較不照光之對照組，4 h 及 6 h 之光照時間皆能有效降低硝酸鹽含量。以 LED_B 而言，雖然 6 h 光照效果略優於 4 h 光照者效，然衡量用電成本下，4 h 之成本支出相對較少。ELB 之 2 種光照時間對調節硝酸鹽效果未有顯著差異，顯示縮短光照時間至 4 h 仍可達到降低硝酸鹽含量效果。綜此試驗結果，從節能角度而言，4 h 光照較能減少用電成本支出 (用電量 0.2 度電)，值得推薦為降低硝酸鹽含量之光照時程 (間)。

表 4. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 投施不等量氮肥組合在不同光照處理 [含發光二極體 (LED) 及省電燈泡等人工光源] 下對植體硝酸鹽含量之影響。光照處理係在採收日之黎明前 6 h 實施。

Table 4. Effects of lighting treatments by light-emitting diodes (LEDs) and energy-saving light bulb (ELB) on nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* cv. 'Ming Feng No. 3') applied with different amounts of nitrogen fertilizer cultivated under protected structure. The lighting treatments started at 6 h after dawn before harvest.

	F1[z]	F2	F3	F4
Treatment	Nitrate content (mg kg^{-1})			
No-light control	1,227 a[y]	3,966 a	2,771 ab	4,652 a
LED_B[x]	56 d	3,935 a	2,557 bc	4,003 b
LED_R	836 b	3,896 a	2,994 a	3,756 b
$LED_{3B:1R}$	624 bc	3,869 a	2,559 c	3,586 b
$LED_{3R:1B}$	818 b	-	2,471 bc	4,615 a
ELB	534 c	4,090 a	2,391 c	3,935 b
$LSD_{0.05}$	230	287	250	471

[z] F1, applied 1× top dressing at two weeks after seed sowing (a total of 30 kg N · ha^{-1}); F2, applied 1× basal fertilizer at seed sowing and 1× top-dressing at two weeks after sowing, respectively (a total of 203 kg N · ha^{-1}); F3, applied 2× basal fertilizer at seed sowing (a total of 346 kg N · ha^{-1}); F4, applied 2× basal fertilizer at seed sowing and 1× top-dressing at two weeks after sowing (a total of 376 kg N · ha^{-1}), respectively.

[y] Within a column means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level of probability by the Fisher's least significant difference (LSD) procedure.

[x] LED_B: 10 W blue light LED; LED_R: 10 W red light LED; $LED_{3B:1R}$: 10 W LED with combination of 3 blue light and 1 red light; $LED_{3R:1B}$: 10 W LED with combination of 3 red light and 1 blue light; ELB, 23 W energy-saving light bulb. LED: light-emitting diode.

表 5. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 以 F4 氮肥投施量組合下在採收前以不同光照處理 [藍光發光二極體 (LED) 或省電燈泡] 4 h 或 6 h 之植體中硝酸鹽含量。

Table 5. Nitrate contents in lettuce (*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') applied with F4 nitrogen fertilization[z] and different lighting treatments with blue light LED (light-emitting diode) or ELB (energy-saving light bulb) in 4 h or 6 h before harvest grown under protected structure.

Treatment	Nitrate content (mg kg^{-1})
No light control	4,653 a[y]
LED_B-4 h	4,240 B
LED_B-6 h	4,030 B
ELB-4 h	4,066 B
ELB-6 h	4,235 ab
$LSD_{0.05}$	494

[z] F4, applied 2× basal fertilizer at seed sowing and 1× top-dressing at two weeks after seeding sowing, respectively, with a total of 376 kg N · ha^{-1}.

[y] Within a column means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level of probability by the Fisher's least significant difference (LSD) procedure.

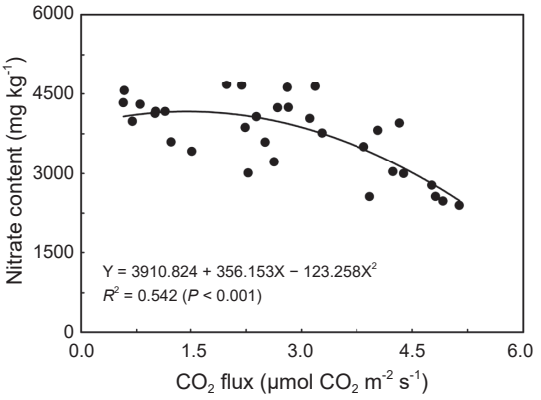


圖 3. 在簡易設施栽培之圓葉萵苣「明豐 3 號」(*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') 於 2012 年 5 月至 10 月試驗期間，量測之葉片淨二氧化碳交換速率 (視同光合作用速率) 與硝酸鹽之二次曲線關係圖。

Fig. 3. Relationship between nitrate content and CO_2 flux (i.e., photosynthetic rate) in lettuce (*Lactuca sativa* var. 'Ming Feng No. 3') grown under protected structure from May to October in 2012.

光合作用對植體硝酸鹽含量之影響

為瞭解光合作用對圓葉萵苣植體硝酸鹽含量之影響，乃進行葉片淨二氧化碳交換速率 (視同光合作用速率) 之量測，並分析相同葉片之硝酸鹽含量，將兩者間關係繪製於圖 3。根據結果，可發現光合作用與硝酸鹽含量之間呈現顯著二次曲線關係，隨著光合作用速率逐漸提升則植體硝酸鹽含量呈現下降趨勢。當光合作用速率提高至 4.5 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 時，硝酸鹽含量可維持於 3,000 mg kg^{-1} 以下 (圖 3)。據此推測，採收前額外人工光照可能促進光合作用進行，新生成之碳水化合物可以利用植體硝酸鹽而減少硝酸鹽含量。有研究 (Stitt 1999; Samuolienė *et al*. 2009) 指出，光合作用所增加之單醣 (如葡萄糖) 有助於協同調節硝酸鹽同化成為胺基酸，另光照刺激引起硝酸鹽釋放與儲存時，能改變蛋白質合成酵素活性進而調節氮素在碳水化合物與胺基酸合成間之分配，直接或間接的降低硝酸鹽含量。又除了光合作用之外，光照亦可活化硝酸鹽還原酶 (nitrate reductase) 促使同化硝酸鹽，此作用也是光照調節硝酸鹽之直接證據。未來研究可進一步釐清不同光波段對硝酸鹽還原酶之影響，以及造成硝酸鹽含量之改變，作為未來實際運用之理論基礎。

結論

總結本研究試驗結果，可知適當氮肥投施量係控制圓葉萵苣植體硝酸鹽含量之主要方法，而生產管理者若為促進植株生長或縮短達到採收所需日數而提高氮肥使用量，例如因應颱風過後菜價飆升時之蔬菜供給，則可採取適當施肥方法及於採收前利用人工輔助光照，來獲得增進圓葉萵苣生產之效果。為期兼顧增產及維持硝酸鹽含量於臨界值以下，則合理之氮肥投施量、施用方法及光照處理組合將可構成圓葉萵苣之最佳栽培技術。本項系列研究未來將探討不同波段、光輻射強度及光照期程對於其他葉菜類蔬菜生長及硝酸鹽含量之影響，

以擴大應用範圍來回應消費者對農產品安全之需求。

引用文獻

Block, J. 2020. Nitrate Poisoning of Livestock. V839. Extension Knowledge. North Dakota State University. Fargo, ND. 4 pp.

Chang, A. C., T. Y. Yang, and G. L. Riskowski. 2013. Ascorbic acid, nitrate, and nitrite concentration relationship to the 24 hour light/dark cycle for spinach grown in different conditions. Food Chem. 138:382–388. doi:10.1016/j.foodchem.2012.10.036

Cookson, S. J., L. E. Williams, and A. J. Miller. 2005. Light-dark changes in cytosolic nitrate pools depend on nitrate reductase activity in Arabidopsis leaf cells. Plant Physiol. 138:1097–1105. doi:10.1104/pp.105.062349

Crawford, N. M. 1995. Nitrate: Nutrient and signal for plant growth. Plant Cell. 7:859–868. doi:10.1105/tpc.7.7.859

Du, S. T., Y. S. Zhang, and X. Y. Lin. 2007. Accumulation of nitrate in vegetables and its possible implications to human health. Agric. Sci. China. 6:1246–1255. doi:10.1016/S1671-2927(07)60169-2

European Food Safety Authority. 2008. Nitrate in vegetables- Scientific opinion panel on contaminants in the food chain. EFSA J. 689:1–79. doi:10.2903/j.efsa.2008.689

Fan, Z., S. Lin, X. Zhang, Z. Jiang, K. Yang, D. Jian, Y. Chen, J. Li, Q. Chen, and J. Wang. 2014. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production. Agric. Water Manage. 144:11–19. doi:10.1016/j.agwat.2014.05.010

Fang, W. and R. C. Jao. 2004. Effects of different light intensity and quality on the growth of potato plantlets *in vitro* using super-bright red and blue LED. Seed Nurs. (Taiwan) 6(2):56–73. (in Chinese with English abstract) doi:10.30077/SN.200406.0006

Hsiao, C. L., C. M. Yang, C. H. Ho, S. J. Tsai, Y. W. Lin, and T. S. Liu. 2013. Effects of nitrogen fertilization and climatic environment on growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa*) grown under protected structure. Crop Environ. Bioinform. 10:284–289. (in Chinese with English abstract) doi:10.30061/CEB.201312_10(4).0006

Jao, R. C. and W. Fang. 2000. Simulation of light environment under blue and red LEDs. J. Agric. Mach. 9(3):51–63. (in Chinese with English abstract) doi:10.30062/JAM.200009.0004

Kim-Shapiro, D. B., M. T. Gladwin, R. P. Patel, and N. Hogg. 2005. The reaction between nitrite and hemoglobin: The role of nitrite in hemoglobin-mediated hypoxic vasodilation. J. Inorg. Biochem. 99:237–246. doi:10.1016/j.jinorgbio.2004.10.034

Li, S. X., Z. H. Wang, and B. A. Stewart. 2013. Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. Adv. Agron. 118:205–397. doi:10.1016/B978-0-12-405942-9.00005-0

Li, X. Z. and A. Oaks. 1995. The effect of light on the nitrate and nitrite reductases in *Zea mays*. Plant Sci. 109:115–118. doi:10.1016/0168-9452(95)04159-R

Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. Academic Press. London, UK. 889 pp. doi:10.1016/B978-0-12-473542-2.X5000-7

Matsumoto, T., H. Itoh, Y. Shirai, N. Shiraishi, and Y. Uno. 2010. Effects of light quality on growth and nitrate concentration in lettuce. J. SHITA. 22:140–147. (in Japanese with English abstract) doi:10.2525/SHITA.22.140

Official Journal of European Union. 2011. Commission regulation (EU) No 1258/2011 of 2 December 2011 amending regulation (EU) No 1886/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. 54:L320/15–17. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:320:0015:0017:EN:PDF (visit on 04/28/2021)

Samuolienė, G., A. Urbonavičiūtė, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, P. Vitta, and A. Žukauskas. 2009. Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. HortScience. 44:1857–1860. doi:10.21273/HORTSCI.44.7.1857

Samuolienė, G., A. Brazaitytė, R. Sirtautas, A. Novičkovas, and P. Duchovskis. 2011. Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce. J. Food Agric. Environ. 9:271–274. doi:10.1234/4.2011.2267

Sanchez-Echaniz, J., J. Benito-Fernández, and S. Mintegui-Raso. 2001. Methemoglobinemia and consumption of vegetables in infants. Pediatrics. 107:1024–1028. doi:10.1542/peds.107.5.1024

Stitt, M. 1999. Nitrate regulation of metabolism and growth. Curr. Opin. Plant Biol. 2:178–186. doi:10.1016/S1369-5266(99)80033-8

Wang, S. T., S. L. Lin, W. N. Chang, and C. H. Hsiao. 1998. Cultivar's differences in nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). J. Agric. Res. China. 47:63–70. (in Chinese with English abstract) doi:10.29951/JARC.199803.0005

World Health Organization. 1996. Toxicological evaluation of certain food additives and contaminants in Food /Prepared by the forty-fourth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organization. Geneva, Switzerland. 465 pp.

Effects of Nitrogen Fertilizer Amounts and Lighting Treatment before Harvest on Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa*) under Protected Structures

Chiao-Ling Hsiao[1], Chia-Hsun Ho[2], and Chwen-Ming Yang[3,4*]

Hsiao, C. L., C. H. Ho, and C. M. Yang. 2021. Effects of nitrogen fertilizer amounts and lighting treatment before harvest on growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa*) under protected structures. J. Taiwan Agric. Res. 70(4):299–309.

Abstract

Accumulation of nitrate content in leafy vegetables is affected by not only genetic factors but also nitrogen (N) fertilization and lighting conditions during plant growth. Pot experiments were conducted under a protected structure covered with plastics in an experimental farm located in the Taiwan Agricultural Research Institute. Four amounts of N fertilizers were applied during growing period of lettuce (*Lactuca sativa* cv. 'Ming Feng No. 3'). Supplemental lighting was provided by different artificial light sources at 4 or 6 h before harvest. A total of 6 supplemental lighting treatments using light-emitting diode (LED) and energy-saving light bulb (ELB; a compact fluorescent lamp) were used as light sources and plants treated with no light as a control. Results showed that plants treated with N fertilizer at a rate of 30 and 203 kg N · ha^{-1} had comparatively lower nitrate contents than those of higher N inputs. Increasing the amount of N fertilizer promoted plant growth. Plants after being applied with higher N rates (346 and 376 kg N · ha^{-1}) showed better growth, in terms of traits of plant height, aboveground fresh weight and leaf number, however, higher N generated a greater nitrate accumulation. The contents of nitrate were compared in lettuce plants after being treated with 6 h of supplemental lighting of blue light LED (LED_B), red light LED (LED_R), 3 blue/1 red mix LED ($LED_{3B:1R}$), 3 red/1 blue mix LED ($LED_{3R:1B}$), or ELB before harvest. The results indicated that a lower nitrate content was found in plants treated with supplemental lighting prior to harvest in all 4 nitrogen application rates, compared to that of plants without light treatment. At the highest nitrogen rate of 376 kg N ·ha^{-1}, the nitrate content reduced by 14% and 23% with the treatments of LED_B and $LED_{3B:1R}$, respectively. No difference was found among plants treated with 4 h and 6 h of supplemental lighting of either LED_B or ELB in plants applied with 376 kg N · ha^{-1}. The relationship between photosynthetic rate (i.e., net CO_2 flux) and nitrate content was curvilinear, in which nitrate content was decreased curvilinearly with the increasing of photosynthetic rates in leaves of lettuce. At photosynthetic rate greater than 4.5 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, nitrate content was maintained in less than 3,000 mg kg^{-1} (3,000 ppm). Accordingly, this study demonstrated the effects of nitrogen fertilization on nitrate content and growth performance in lettuce. To further reduce nitrate content at time of harvesting, a supplemental lighting by artificial light sources for 4 h prior to harvest would be as effective as that of 6 h to save energy cost.

Key words: Nitrate, Lettuce (*Lactuca sativa*), Light environment, Light-emitting diodes (LEDs), Nitrogen fertilization.

Received: May 4, 2021; Accepted: August 17, 2021.

* Corresponding author, e-mail: cmyang0616@gmail.com

[1] Associate Research Fellow, Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

[2] Assistant Research Fellow, Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

[3] Former Research Fellow and Division Director, Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

[4] Associate Professor, Department of Post Modern Agriculture, Ming Dao University, Changhua County, Taiwan, ROC.

台 灣 農 業 研 究

(原《中華農業研究》期刊)

第七十卷　目次

第一期

研究報告

陳繹年、吳東鴻、陳美君、陳珮臻	簡易經濟的稻熱病菌 (*Pyricularia oryzae*) 產孢誘導方法	1
林思妤、杜元凱、游舜期、傅月英、林大鈞	植物表型體分析平台於蔬菜自動外表型分析之應用	11
黃仁麒、吳雅芳、蔡佳欣、周浩平、林宜賢、陳穎練	液化澱粉芽孢桿菌 Ba01 防治馬鈴薯青枯病之探討	24
倪蕙芳、許淑麗、賴素玉、張淑芬、林靜宜	4-4式波爾多液對咖啡銹病防治效果評估	43
洪美珠、許詩涵、曾信翰、葛兆年	花嘴鴨對插秧期水稻田的棲地選擇	54
鄭櫻慧、陳金枝、簡蘭懿、張清安	豇豆微斑駁病毒之鑑定與生物特性分析	67

第二期

研究報告

梁鈺平、吳昭蓉、蔡惠文、倪蕙芳	*Lasiodiplodia theobromae* 及 *Lasiodiplodia pseudotheobromae* 在台灣引起之酪梨枝條潰瘍病	81
曹麗玉	十字花科蔬菜重要病毒發生調查與影響蚜蟲傳播效率之條件探討	98
董耀仁、許北辰	評估取食木油桐 (*Vernicia montana* Loureiro) 花外蜜對基徵草蛉 (*Mallada basalis* Walker) 與安平草蛉 (*Mallada desjardinsi* Navás) 存活之影響	108
陳威臣、曹進義、吳姿穎、夏奇鋸	根莖直徑與兩階段連續培養方式對薑組培苗增殖與生長之影響	117

曹進義、陳威臣、吳姿穎、夏奇鈮 種子成熟度與播種介質對台灣白及種子瓶外非共生發芽之影響 129

蔡蕷隍、陳冠妏、黃健瑞 台灣南部地區番石榴園炭疽病菌 (*Colletotrichum* spp.) 多樣性及對殺菌劑之敏感性 140

第三期

研究報告

李奇峰、余素芳 大黃葉蚤 [*Podontia lutea* (Olivier, 1790)] 和褐帶凹緣葉蚤 [*P. dalmani* Baly, 1865] 的重新描述與大黃葉蚤的生物學注解 (鞘翅目：金花蟲科：螢金花蟲亞科：葉蚤族) 157

廖大經、吳永培 水稻「台農82號」誘變系與混系栽培下的稻熱病抗病性及產量表現之研究 170

夏奇鈮、陳威臣、許秀惠、林楨祐、曹進義、林子凱 花椰菜雙單倍體誘變平台建立 182

湯佳蓉、蔡叔芬、陳思妤、馮繹升 由 *Corynespora cassiicola* 引起之羅勒枝枯病 196

游舜期、王怡雯、林思妤、黃慶儀、林大鈞 以甜瓜原生質體短暫性表現轉殖系統快速評估基因編輯效果 206

賴信順、林鳳琪 台灣南部長豇豆園內薊馬類 (Thysanoptera: Thripidae) 的取樣計畫 217

第四期

研究報告

蔡承祥、彭宗仁、劉滄棪、林毓雯、詹婉君 以元素特徵區別台灣茶葉與國外茶葉之初步研究 231

羅惠齡、林楨祐、王三太、洪千雅 葉用芥藍新品種「鳳山1號」之育成 243

陳柱中、李達源、莊愷瑋 以生長分析和模式化評估結球萵苣的生長變異與氣候條件之關聯 253

劉滄棪、林毓雯、詹婉君、彭宗仁 以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性—以彰化扇頂區為例 271

賴柏羽、黃守宏 殺蟲劑對嘉義地區水稻褐飛蝨 [*Nilaparvata lugens* (Stål)] 與白背飛蝨 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 之室內藥效評估 285

蕭巧玲、何佳勳、楊純明 氮肥施用量與採收前光照處理對設施栽培圓葉萵苣生長與硝酸鹽含量之影響 299

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH

(Formerly Journal of Agricultural Research of China)

Contents of Volume 70

Number 1

Research Articles

Yi-Nian Chen, Dong-Hong Wu, Mei-Chun Chen, and Pei-Chen Chen	A Simple and Economical Method to Induce Sporulation of *Pyricularia oryzae*	1
Ssu-Yu Lin, Yuan-Kai Tu, Shuen-Chi You, Yue-Ying Fu, and Da-Gin Lin	Application of Plant Phenomics Platform for Automatic Phenotyping of the Vegetable Crops	11
Zen-Chi Huang, Ya-Fang Wu, Chia-Hsin Tsai, Hau-Ping Chou, Yi-Hsien Lin, and Ying-Lien Chen	Biological Control of Potato Bacterial Wilt Caused by *Ralstonia solanacearum* with *Bacillus amyloliquefaciens* Ba01	24
Hui-Fang Ni, Sui-Li Hsu, Su-Yu Lai, Shu-Fen Chang, and Ching-Yi Lin	Evaluation of Control Efficacy of 4-4 Bordeaux Mixture Against Coffee Rust	43
Mei-Jhu Hong, Shih-Han Hsu, Shin-Han Tseng, and Chao-Nien Koh	Habitat Selection of the Eastern Spot-Billed Duck (*Anas zonorhyncha*) in Rice Paddies during the Seedling Transplanting Period	54
Ying-Huey Cheng, Chin-Chih Chen, Lan-Yi Chien, and Chin-An Chang	Identification and Biological Characteristics of Cowpea Mild Mottle Virus in Taiwan	67

Number 2

Research Articles

Yu-Ping Liang, Chao-Jung Wu, Hui-Wen Tsai, and Hui-Fang Ni	Avocado Branch Canker Disease Caused by *Lasiodiplodia theobromae* and *Lasiodiplodia pseudotheobromae* in Taiwan	81
Li-Yu Tsao	Occurrence and Aphid Transmission of Important Virus Diseases in Cruciferous Vegetables	98
Yaw-Jen Dong and Pei-Chen Hsu	Effect of Feeding with Extrafloral Nectar Secretion by Wood Oil Tree (*Vernicia montana* Lour) on Survival of Lacewings, *Mallada basalis* Walker and *Mallada desjardinsi* Navás	108
Uei-Chern Chen, Chin-Yi Tsao, Tzu-Ying Wu, and Chi-Ni Hsia	Effects of Rhizome Diameter and Two-Stage Continuous Culture on Proliferation Rate and Growth of *In Vitro Zingiber officinale* Plantlets	117
Chin-Yi Tsao, Uei-Chern Chen, Tzu-Ying Wu, and Chi-Ni Hsia	Effects of Seed Maturity and Growth Media Composition on *In Vivo* Asymbiotic Germination of *Bletilla formosana* (Hayata) Schltr.	129
Shuen-Huang Tsai, Kuan-Wen Chen, and Chien-Jui Huang	Genetic Diversity and Fungicide Sensitivity of *Colletotrichum* spp. Isolated from Guava Fields in Southern Taiwan	140

Number 3

Research Articles

Chi-Feng Lee and Su-Fang Yu	Redescription of *Podontia lutea* (Olivier, 1790) and *P. dalmani* Baly, 1865 (Insecta: Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini), with Notes on the Biology of *P. lutea*	157

Dah-Jing Liao and Yong-Pei Wu	Study on the Mixed-Line Cultivation Model of Rice Variety ‘Tainung 82’ Mutant Lines for Resistance of Blast and Grain Yield	170
Chi-Ni Hsia, Uei-Chern Chen, Shiow-Huey Hseu, Chen-Yu Lin, Chin-Yi Tsao, and Tzu-Kai Lin	Establishment of a Doubled Haploid Mutagenesis Platform in Cauliflower	182
Jia-Rong Tang, Shu-Fen Tsai, Szu-Yu Chen and I-Sheng Feng	*Corynespora cassiicola* Causes Dieback on Basil	196
Shuen-Chi You, Yi-Wen Wang, Ssu-Yu Lin, Ching-Yi Huang and Da-Gin Lin	Using Transient Expression and Transfection System of Melon Protoplasts for Rapid Evaluation of Genome Editing	206
Hsin-Shun Lai and Feng-Chyi Lin	Sampling Plan for Thrips (Thysanoptera: Thripidae) on Yardlong Bean in Southern Taiwan	217

Number 4

Research Articles

Cheng-Hsiang Tsai, Tsung-Ren Peng, Tsang-Sen Liu, Yu-Wen Lin, and Wen-Jun Zhan	Preliminary Study of Differentiating Imported Tea from Taiwan Tea by Elemental Characteristics	231
Hui-Ling Lo, Chen-Yu Lin, San-Tai Wang, and Chien-Ya Hong	New Hybrid of Chinese Kale ‘Fengshan No. 1’ for Edible Leaves	243
Chu-Chung Chen, Dar-Yuan Lee, and Kai-Wei Juang	Evaluation of the Relationship between Growth Variations of Crisphead Lettuce and Climate Conditions through Growth Analysis and Modeling	253
Tsang-Sen Liu, Yu-Wen Lin, Wen-Jun Zhan, and Tsung-Ren Peng	Verifying the Circularity of Agricultural Water Using Natural Tracer-Based End Member Mixing Analysis: A Case Study of the Proximal-Fan Region of Changhua	271
Po-Yu Lai and Shou-Horng Huang	Laboratory Evaluation of the Effect of Insecticides for Controlling Brown Planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] and Whitebacked Planthopper [*Sogatella furcifera* (Horváth)] in Chiayi Region	285
Chiao-Ling Hsiao, Chia-Hsun Ho, and Chwen-Ming Yang	Effects of Nitrogen Fertilizer Amounts and Lighting Treatment before Harvest on Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa*) under Protected Structures	299

台 灣 農 業 研 究

作者索引

王三太 243
王怡雯 206
何佳勳 299
余素芳 169
吳永培 170
吳東鴻 10
吳姿穎 117, 129
吳昭蓉 97
吳雅芳 24
李奇峰 169
李達源 253
杜元凱 11
周浩平 24
林大鈞 11, 206
林子凱 182
林宜賢 24
林思妤 11, 206
林楨祐 182, 243
林毓雯 231, 271
林鳳琪 217
林靜宜 43
洪千雅 243
洪美珠 54
倪蕙芳 43, 97
夏奇鋸 117, 129, 182
張淑芬 43
張清安 67
曹進義 117, 129, 182
曹麗玉 98
梁鈺平 97
莊愷瑋 253
許北辰 108
許秀惠 182
許淑麗 43
許詩涵 54
陳金枝 67
陳冠妏 140
陳威臣 117, 129, 182
陳思妤 196
陳柱中 253
陳美君 10
陳珮臻 10
陳穎練 24
陳繹年 10
傅月英 11
彭宗仁 231, 271
曾信翰 54
游舜期 11, 206
湯佳蓉 196
馮繹升 196
黃仁麒 24
黃守宏 285
黃健瑞 140
黃慶儀 206
楊純明 299
葛兆年 54
董耀仁 108
詹婉君 231, 271
廖大經 170
劉滄琴 231, 271
蔡佳欣 24
蔡叔芬 196
蔡承祥 231
蔡惠文 97
蔡彝隍 140

鄭櫻慧 67
蕭巧玲 299
賴信順 217
賴柏羽 285
賴素玉 43
簡蘭懿 67
羅惠齡 243

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH

(Formerly Journal of Agricultural Research of China)

Authors Index

Chang, Chin-An	79
Chang, Shu-Fen	53
Chen, Chin-Chih	79
Chen, Chu-Chung	269
Chen, Kuan-Wen	156
Chen, Mei-Chun	1
Chen, Pei-Chen	1
Chen, Szu-Yu	205
Chen, Uei-Chern	128, 139, 195
Chen, Ying-Lien	42
Chen, Yi-Nian	1
Cheng, Ying-Huey	79
Chien, Lan-Yi	79
Chou, Hau-Ping	42
Dong, Yaw-Jen	116
Feng, I-Sheng	205
Fu, Yue-Ying	23
Ho, Chia-Hsun	309
Hong, Chien-Ya	252
Hong, Mei-Jhu	66
Hseu, Shiow-Huey	195
Hsia, Chi-Ni	128, 139, 195
Hsiao, Chiao-Ling	309
Hsu, Pei-Chen	116
Hsu, Shih-Han	66
Hsu, Sui-Li	53
Huang, Chien-Jui	156
Huang, Ching-Yi	216
Huang, Shou-Horng	297
Huang, Zen-Chi	42
Juang, Kai-Wei	269
Koh, Chao-Nien	66
Lai, Hsin-Shun	229
Lai, Po-Yu	297
Lai, Su-Yu	53
Lee, Chi-Feng	157
Lee, Dar-Yuan	269
Liang, Yu-Ping	81
Liao, Dah-Jing	181
Lin, Chen-Yu	195, 252
Lin, Ching-Yi	53
Lin, Da-Gin	23, 216
Lin, Feng-Chyi	229
Lin, Ssu-Yu	23, 216
Lin, Tzu-Kai	195
Lin, Yi-Hsien	42
Lin, Yu-Wen	242, 284
Liu, Tsang-Sen	242, 284
Lo, Hui-Ling	252
Ni, Hui-Fang	53, 81
Peng, Tsung-Ren	242, 284
Tang, Jia-Rong	205
Tsai, Cheng-Hsiang	231
Tsai, Chia-Hsin	42
Tsai, Hui-Wen	81
Tsai, Shuen-Huang	156
Tsai, Shu-Fen	205
Tsao, Chin-Yi	128, 139, 195
Tsao, Li-Yu	107
Tseng, Shin-Han	66
Tu, Yuan-Kai	23
Wang, San-Tai	252

Wang, Yi-Wen	216	Wu, Yong-Pei	180
Wu, Chao-Jung	81	Yang, Chwen-Ming	309
Wu, Dong-Hong	1	You, Shuen-Chi	23, 216
Wu, Tzu-Ying	128, 139	Yu, Su-Fang	157
Wu, Ya-Fang	42	Zhan, Wen-Jun	242, 284

台 灣 農 業 研 究

關鍵詞索引

Lasiodiplodia pseudotheobromae 97
Lasiodiplodia theobromae 97
人為干擾 54
十字花科蔬菜 98
三維雷射掃描 11
小孢子培養 182
元素含量 231
分生孢子 10
分類學 169
天然示蹤技術 271
木油桐 108
木蠟樹 169
水深 54
水稻 170
主成分分析 231
台灣 97
生物防治 24
白背飛蝨 285
光環境 299
地景生態 54
安平草蛉 108
作物 11
抗血清 67
亞磷酸 43
兩階段連續培養 117
咖啡 43
枝枯病 196
枝條潰瘍病 97
波爾多液 43
空間分布 217
芥藍 243
花外蜜 108
花椰菜 182
表型體 11
金花蟲 169
長豇豆 217
青枯病菌 24
非共生發芽 129
保育生物防治 108
指數函數 253
炭疽病菌 140
相對生長率 (RGR) 253
原生質體 206
扇頂地下水 271
秧苗浸藥法 285
蚜蟲傳播 98
豇豆微斑駁病毒 67
馬鈴薯青枯病 24
高通量 11
基因組編輯 206
基徵草蛉 108
族群親緣分析 140
殺蟲劑 285
液化澱粉芽孢桿菌 24
液態培養 117
液態菌種 10
淨同化率 (NAR) 253
混系栽培 170
甜瓜真核轉譯起始因子4E 206
甜菜西方黃化病毒 98
產孢 10
組培根莖 117
野漆樹 169
單倍體誘變 182

氮肥 299
番石榴 140
發光二極體 299
硝酸鹽 299
結球 253
微體繁殖 117
葉用 243
葉面積比 (LAR) 253
葉萵苣 299
農田生態系 54
酪梨 97
彰化 271
漆樹科 169
誘變系 170
鳳山1 號 243
樣本數量 217
稻熱病 10, 170
褐飛蝨 285
銹病 43
燕麥粉培養基 10
蕪菁嵌紋病毒 98
鞘蛋白 67
薊馬 217
薑 117
嚮導RNA 206
雙單倍體 182
顏色偏好 217
穩定氫氧同位素 271
羅勒 196
藥劑敏感性 140
藥劑噴布法 285
灌溉水圳 54
灌溉用水 271
蘭花種子 129
蘭菌 129
鐵刀木棒狀桿孢菌 196
鑑別非台灣茶 231
邏輯斯回歸 170

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH

(Formerly Journal of Agricultural Research of China)

Key Words Index

3-dimensional laser scanner	23
Agricultural irrigation water	284
Anacardiaceae	157
Antisera	79
Aphid transmission	107
Asymbiotic germination	139
Avocado	81
Bacillus amyloliquefaciens Ba01	42
Basil	205
Beet western yellow virus	107
Biological control	42
Blast	181
Bordeaux mixture	53
Branch canker	81
Brassica oleracea var. *botrytis* L.	195
Changhua	284
Chinese kale	252
Cm-eIF4E	216
Coat protein	79
Coffee	53
Coffee rust disease	53
Colletotrichum spp.	156
Color preference	229
Conidia	1
Conservation biological control	116
Corynespora cassiicola	205
Cowpea mild mottle virus (CpMMV)	79
Crop	23
Cruciferous vegetable	107
Dieback	205
Doubled haploid	195
Dual gRNA	216
Edible leaves used	252
Elemental concentration	242
Exponential function	269
Extrafloral nectar	116
Farmland ecosystem	66
‘Fengshan No. 1’	252
Fungicides sensitivity test	156
Genomic editing	216
Guava (*Psidium guajava* L.)	156
Haploid mutagenesis	195
Heading	269
High-throughput phenotyping data	23
Human disturbance	66
Identify non-Taiwan tea	242
In vitro rhizome	128
Insecticide	297
Irrigation channel	66
Landscape ecology	66
Lasiodiplodia pseudotheobromae	81
Lasiodiplodia theobromae	81
Leaf area ratio (LAR)	269
Leaf beetles	157
Lettuce (*Lactuca sativa*)	309
Light environment	309
Light-emitting diodes (LEDs)	309
Liquid culture	128
Liquid spawn	1
Logistic regression	181
Mallada basalis	116
Mallada desjardinsi	116

Micropropagation 128
Microspore culture 195
Mixed-line cultivation 181
Mutant lines 181
Natural tracer approach 284
Net assimilation rate (NAR) 269
Neutralized phosphorous acid 53
Nilaparvata lugens (Stål) 297
Nitrate 309
Nitrogen fertilization 309
Oat flour agar 1
Orchid mycorrhiza 139
Orchid seed 139
Phylogenetic analyses 156
Plant phenomics platform 23
Potato bacterial wilt 42
Principal component analysis (PCA) 242
Protoplast 216
Proximal-fan groundwater 284
Pyricularia oryzae 1
Ralstonia solanacearum 42
Relative growth rate (RGR) 269
Rhus succedanea 157
Rhus sylvestris 157
Rice 181
Rice seedling dipping method 297
Sample size 229
Sogatella furcifera (Horváth) 297
Spatial pattern 229
Sporulation 1
Stable hydrogen and oxygen isotopes 284
Taiwan 81
Taxonomy 157
Thrips 229
Tower spray method 297
Turnip mosaic virus 107
Two-stage continuous culture 128
Vernicia montana 116
Water depth 66
Yardlong bean 229
Zingiber officinale 128

台灣農業研究　評閱者名單

第 70 卷 (2021)

王三太
農業試驗所鳳山分所蔬菜系

王智立
國立中興大學植物病理學系

安寶貞
農業試驗所植物病理組

吳文哲
國立台灣大學昆蟲學系暨研究所

吳立心
國立屏東科技大學植物醫學系

吳振發
國立中興大學園藝學系

李宗祐
國立臺灣師範大學地理學系

杜宜殷
國立台灣大學園藝暨景觀學系

沈偉強
國立台灣大學植物病理與微生物學系

林子凱
農業試驗所作物組

林宗俊
農業試驗所植物病理組

林明瑩
國立嘉義大學植物醫學系

侯豐男
國立中興大學昆蟲學系

洪爭坊
國立中興大學植物病理學系

洪挺軒
國立台灣大學植物病理與微生物學系

洪傳揚
國立台灣大學農業化學系

倪蕙芳
農業試驗所嘉義分所植物保護系

張正
國立中興大學園藝學系

張孟基
國立台灣大學農藝學系

郭寶錚
國立中興大學農藝學系

陳金枝
農業試驗所植物病理組

曾敏南
高雄區農業改良場作物環境課

黃文理
國立嘉義大學農藝學系

黃晉興
農業試驗所植物病理組

黃紹毅
國立中興大學昆蟲學系

黃莉欣
農業藥物毒物試驗所農藥應用組

黃誌川
國立臺灣大學地理環境資源學系

葉文斌
國立中興大學昆蟲學系

劉天麟
茶業改良場茶葉機械課

蔡文錫
國立嘉義大學植物醫學系

蔡志濃
農業試驗所植物病理組

蔡育彰
國立台灣大學農藝學系

蔡致榮
農業試驗所

鄧汀欽
農業試驗所植物病理組

鄭明倫
國立自然科學博物館生物學組

賴明信
農業試驗所作物組

賴鴻裕
國立中興大學土壤環境科學系

戴淑美
國立中興大學昆蟲學系

鍾文鑫
國立中興大學植物病理學系

羅正宗
農糧署南區分署

羅筱鳳
國立台灣大學園藝暨景觀學系

關政平
農業試驗所生物技術組

Reviewers, Journal of Taiwan Agricultural Research

Volume 70, 2021

Ann, Po-Jan
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Chang, Chen
Department of Horticulture, National Chung Hsing University

Chang, Men-Chi
Department of Agronmy, National Taiwan University

Chen, Chin-Chih
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Chung, Wen-Hsin
Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University

Dai, Shu-Mei
Department of Entomology, National Chung Hsing University

Deng, Ting-Chin
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Do, Yi-Yin
Department of Horticulture and Landscape Architecture, National Taiwan University

Hong, Cheng-Fang
Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University

Hong, Chwan-Yang
Department of Agricultural Chemistry, National Taiwan University

Hou, Feng-Nan
Department of Entomology, National Chung Hsing University

Huang, Jin-Hsing
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Huang, Jr-Chuan
Department of Geography, National Taiwan University

Huang, Li-Hsin
Pesticide Application Division, Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute

Huang, Wen-Li
Department of Agronomy, National Chiayi University

Hung, Ting-Hsuan
Department of Plant Pathology and Microbiology, National Taiwan University

Hwang, Shaw-Yhi
Department of Entomology, National Chung Hsing University

Jeng, Ming-Luen
Department of Biology, National Museum of Natural Science

Kuan, Cheng-Ping
Division of Biotechnology, Taiwan Agricultural Research Institute

Kuo, Bau-Jeng
Department of Agronomy, National Chung Hsing University

Lai, Hung-Yu
Department of Soil and Environmental Science, National Chung Hsing University

Lai, Ming-Hsin
Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute

Lee, Tsung-Yu
Department of Geography, National Taiwan Normal University

Lin, Ming-Ying
Department of Plant Medicine, National Chiayi University

Lin, Tzu-Kai
Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute

Lin, Tsung-Chun
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Liu, Tien-Lin
Tea Machinery Section, Tea Research & Extension Station

Lo, Hsiao-Feng
Department of Horticulture and Landscape Architecture, National Taiwan University

Lo, Jeng-Chung
Southern Region Branch, Agriculture and Food Agency

Ni, Hui-Fang
Department of Hortriculture, Chia-Yi Agricultural Experiment Branch

Shen, Wei-Chiang
Department of Plant Pathology and Microbiology, National Taiwan University

Tsai, Jyh-Nong
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Tsai, Wen-Shi
Department of Plant Medicine, National Chiayi University

Tsai, Yu-Chang
Department of Agronmy, National Taiwan University

Tsay, Jyh-Rong
Taiwan Agricultural Research Institute

Tseng, Min-Nan
Crop environment section, Kaohsiung District Agricultural Research and Extension Station

Wang, Chih-Li
Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University

Wang, San-Tai
Department of Vegetable Crops, Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch

Wu, Chen-Fa
Department of Horticulture, National Chung Hsing University

Wu, Li-Hsin
Department of Plant Medicine, National Pingtung University of Science and Technology

Wu, Wen-Jer
Department & Graduate Institute of Entomology, National Taiwan University

Yeh, Wen-Bin
Department of Entomology, National Chung Hsing University

「台灣農業研究」稿約

一、 本刊為行政院農業委員會農業試驗所發行之學術性期刊 (季刊)，刊登國內、外農業試驗研究相關之研究稿件：

專題論述：由本所期刊編審會或總編輯邀請專家撰寫。

研究報告：關於農業科學未曾發表之研究報告，按題目、作者、摘要、前言、材料與方法、結果、討論、結論 (一般略去，或併入討論)、誌謝 (可略去)、引用文獻等依序撰寫，表與圖附於其後，全文以不超過10印刷頁為原則。其中，'結果' 與 '討論' 如有必要，可合併成'結果與討論'。

研究簡報：關於農業科學未曾發表之簡短原始研究報告，不須分章節撰寫 (亦可參照研究報告次序)，但須附中英文摘要，全文以不超過4印刷頁為原則。

二、 稿件應以中文或英文撰寫，以文書軟體MS WORD®格式儲存成檔案 (檔案類型以Word 97–2003或以上版本文件為佳)。文稿以A4大小 (長29.6公分，寬21公分) 兩倍行高 (double space) 繕打，加行號，12號字體，左邊對齊，版面應預留上下3公分，左右2公分之空間，並自第二頁起在右下角以阿拉伯數字註明頁數。撰寫時，中文以細明體、英文以Times New Roman字體打字；英文字距及句距皆一字節。

三、 投稿者在本刊線上投審系統首頁 (http://www.ipress.tw/J0042) 點選'投稿'，確認及點選稿件已依照稿約撰寫無誤後，下一步即填寫稿件資料，務請填寫封面信函，再依序填寫作者資料、上傳檔案及確認提交。

四、 稿件格式：

題　　目：宜簡短，能充分反應文旨，並附簡題 (Running title) (中文12字；英文6字以內為原則)。英文題目除介系詞、連接詞等字外，每字第一字母應大寫。報告如有機關所屬編號，請列於誌謝。

作　　者：作者姓名置中，作者二人或二人以上時，以中文一全形空格間隔之；英文姓名則名在前姓氏在後，作者二人或二人以上時，以 " , " 相隔，最後一人前加 "and" 字樣，其表示方法如Chen-Seng Huang, Chen-Chang Chen, and Chyr-Guan Chen。每一作者須附小註，以說明所屬機關單位與職稱，通訊作者附予星號" * "，並須附電子郵件信箱。題目與作者同置第一頁。

摘　　要：不分段落、宜簡潔明確。摘要之前應加作者、年代、題目、期刊、及卷期，摘要之後應附關鍵詞 (Key words)，關鍵詞不超過五個，每個英文關鍵詞第一字母應大寫。摘要以不超過五百字為原則。以中 (英) 文發表者須附英 (中) 文摘要，置於本文之後，且內容須與中 (英) 文摘要相符，並附通訊作者、作者之小註。

本　　文：依序為前言 (INTRODUCTION)、材料與方法 (MATERIALS AND METHODS)、結果 (RESULTS)、討論 (DISCUSSION)、結論 (CONCLUSIONS)、誌謝 (ACKNOWLEDGMENTS)、引用文獻 (REFERENCES)。除學名、專有名詞、化學式、數學公式、數字、度量衡單位及縮寫外，文句中不得中外文並用，需使用英 (外) 文以助明瞭時，須將英 (外) 文括號置於中文之後。材料與方法、結果兩部分如有必要須分段 (節)，每一段內並可再分小段，以助明瞭文稿內容。各段題目 (heading) 單行置於該段之前，小段題目 (subheading) 直接置於小段之首。如因結果繁複不易聯接討論，可合併成'結果與討論 (RESULTS AND DISCUSSION)'。如有附錄，請置於引用文獻之前。

表　格：

1. 每一表格應分別繕製，須以MS WORD®中 “表格” 工具製作，上方須有標題，以句點結尾，並按文中出現順序加上**表1. (Table 1.)**，**表2. (Table 2.)** 等冠號。
2. 中文稿之表格標題應中英文並列，冠號與表幅齊頭，表內項目及內容以英文書寫。英文標題及各欄英文細目，除第一字之第一字母大寫外，餘均小寫。單位使用SI units (如 $g\ L^{-1}$、$Mg\ ha^{-1}$、$m\ s^{-1}$)，一律單數、英文字母。
3. 表格應加分析、簡化與歸納後始可列表。每一表格應在文中標示清楚，以便對照，且每一表格應單頁製作。
4. 表中內容如需說明，均須附加小註，以z, y, x, ...等縮小小寫字母置於右上角，並於表下依次敘述。表格僅列橫線。星號 “* (5%顯著性水準)”、“** (1%顯著性水準)” 保留統計顯著性使用。
5. 性質類同之圖與表，務請精簡與合併。

圖　片：

1. 手繪圖版以黑色墨水於白色紙上分別繪製，掃描後存成JPG電子檔 (或JPEG電子檔) 上傳。如以電腦繪圖，力求清晰，亦存成JPG檔 (或JPEG檔) 上傳，或直接貼於本文之後。請勿使用MS Office內建軟體繪圖，建議使用專業繪圖軟體 (如Sigma Plot) 繪製。
2. 圖中所有標示應以英文書寫 (Arial字型) 或註明於標題之後小標一律以(A), (B), (C), ...編號，編號以置入圖框為原則，分類學則可以1, 2, 3, ...標示。
3. 照片以光面紙為原則，清晰度以縮小50%可判讀為宜。多幅照片儘量製成併版；如有特別指明，應加圈或箭頭表明。顯微照相，應加比例尺大小；照片大小以不超過版面 (25 cm × 18 cm) 為宜，掃描後存成JPG檔 (或JPEG檔) 上傳，解析度300 dpi或以上，並直接貼於本文之後。
4. 圖版及照片應有標題，並按文中出現的順序加上 **(圖1)** (**Fig. 1**)、**(圖2)** (**Fig. 2**) 等冠號，在文中須標示清楚，以便對照。中文稿標題應中英文併列，英文稿標題以英文書寫即可，力求明確。
5. 除併圖外，每一圖片應單頁製作。
6. 圖版及照片未達印製之解析度要求，文稿將不予刊登。

誌　謝：不分段落，包括人物、經費來源、報告之機關賦予編號等。誌謝可略去。

引用文獻：

1. 列舉確實曾引用之文獻。文獻以登載於學術性期刊、書籍、研討會之文章及學位論文為限 (不含推廣報告)，如引用網路學術性報告，須加註瀏覽、下載日期及網址路徑。
2. 文中涉及引用文獻時，根據該文獻的作者與年代加以括號：如 (Sung 1991)、(Lo 1991, 1992)、(Chen & Ho 1983)、(Sung 1991; Hsu *et al*. 1992)，以年代先後為序置於引用文處。
3. 文獻一律以英文撰寫，以姓名字母為序。作者相同時以年代先後為序。
4. 文獻之書寫方法以期刊為例，依序為作者、年代、題目、期刊、卷數、頁數。在每卷每期之頁碼都從數字 1開始的期刊，才必須加上期數。
5. 期刊名須依該期刊公告之縮寫撰寫；如無者，請參照Biosciences Information Service (1992) 出版之 “Serial Sources for the BIOSIS Previews Database” 或依該學術領域之慣例撰寫。

6. 文獻書寫範例如下：

(1) 原中文報告引用文獻出自學術性期刊

Hsu, S. H., T. Y. Chung, T. C. Kuo, and S. F. Wang. 1992. Studies on the micro-climate of greenhouse. I. Light environment of greenhouse. J. Agric. China 157:34–43. (in Chinese with English abstract)

(2) 原中文報告引用文獻出自著作性書籍

Sung, J. M. 1991. Nitrogen Metabolism of Rice. Chinese Agronomy Press. Taipei. 100 pp. (in Chinese)

(3) 原中文報告引用文獻出自編輯性書籍

Yang, C. M. and C. Y. Lin. 2003. Studies on rice precision farming system. p.1–12. *in*: Rice Precision Farming System. (Yang, C. M. and C. Y. Lin, eds.) Taiwan Agric. Res. Inst. Pub. No. 105. Taichung, Taiwan. 252 pp. (in Chinese with English abstract)

(4) 原中文報告引用文獻出自研討會專刊

Chang, C. A. 2001. Application and extension of virus-free seedling for the control of virus diseases of passion fruit in Taiwan. p.31–38. *in*: Proceeding of Symposium on Application of Healthy Plant for Control of Plant Diseases. November 24, 2001. Taichung, Taiwan.Taiwan Phytopathol. Soc. Publ., Taichung. (in Chinese with English abstract)

(5) 原報告引用文獻出自特定網頁資料

Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylä Stud. Biol. Environ. Sci. 163. Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland. https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf (visit on 12/16/2014)

五、 單位、縮寫格式、括號及統計分析

1.凡文中出現之數值，除非另有特別之意義，一律用阿拉伯數字書寫。數字在句首之英文稿，改以文字表示。單位則用國際公認標準符號 (SI units) 代替全文，各常用之縮寫單位參照說明如下：

(1) 長度：公里 (km)、公尺 (= 米) (m)、公分 (= 厘米) (cm)、公釐 (= 毫米) (mm)、微米 (μm)。

(2) 重量 (W)：公噸 (Mg)、公斤 (kg)、公克 (g)、毫克 (mg)、微克 (μg)。

(3) 容積 (V)：公升 (L)、公撮 (= 毫升) (mL)、微升 (μL)。

(4) 面積：公頃 (ha)、平方公尺 (m^2)、平方公分 (cm^2)。

(5) 溫度：攝氏 (℃)、絕對溫度 (K，但須加以說明)。

(6) 時間：日 (天) (d)、時 (h)、分 (min)、秒 (s)。

(7) 濃度：莫耳 (M)、千分之一莫耳 (mM)、當量 (N)、千分之一當量 (mN)。

(8) 重力加速度：*g*。

(9) 分子量：kDa。

(10) 肥料三要素：如以肥料種類N-P_2O_5-K_2O，如以元素N-P-K。

2.其他之縮寫：平均 (*avg*.)、大約 (*ca*.)、直徑 (diam.)。

3.括號：括號字型全以半形 ( )，括號前後各空一格。

4.統計分析：達顯著性水準以*、**或處理間顯著差異區分，以a、b、c、…表示者均應加註顯著機率值*P* (例如$P < 0.01$)；各統計量請採慣用符號，例如相關係數 (*r*) 、決定係數 (R^2)、變異係數 (cv)、標準差 (sd)、平均值標準差 (se) 等。

5.其他問題：

(1) 單位與其前面數值之間應空一格，如220 g。

(2) 數學運算符號與其前後數值之間應各空一格，如$P = 0.014$、23.6 ± 3.0、15×2。

(3) 在 ±、to的前後數值若含有單位，在單位相同時保留後單位即可，以減少贅詞，如23.6 ± 3.0%、20 to 30℃。在×的前後數值則保留，如15 cm × 2 cm。

(4) 數值起迄符號用– (半型破折號；EN Dash)，勿用 ~ 或 -，且與前後兩數值之間無須留空格，如3–6、2005–2007年、7月20–25日。

(5) 年代一律用西元。

(6) 濃度與容量單位使用mg L^{-1} (勿用ppm)。

(7) 轉速單位使用× *g* (勿用rpm)。

六、 其他注意事項

1. 本刊採網路線上投審，來稿請至本刊線上投審系統網址 (http://www.ipress.tw/J0042) 進行投稿作業，投稿前務請詳閱稿約及投稿須知，並可參閱最新一期報告。
2. 生物學名以斜體字表示，屬名第一字母大寫。學名於摘要、本文、每一圖表中第一次出現時，須寫全名，如*Citrus sinensis*；第二次出現時，屬名保留第一字母後加句點 “.”，種名全寫，如*C. sinensis*。生物學名於本文中首次出現時應加註命名者，如*Oryza sativa* L.。
3. 中文稿件中，外文名詞應儘量翻譯成中文，若是不常見名詞應於文中第一次出現時以括號標出原文。摘要及本文中，英文縮寫於第一次出現時，須附全名。圖版及照片如有英文縮寫，應於標題中附全名，表格內之英文縮寫，須於小註附全名。
4. 農作物品種名須加上單引號，中文用「」(如水稻「台粳9號」、木瓜「台農2號」)，英文用‘’ (如rice ‘TK9’, papaya ‘TNG2’)。

七、 投稿方式

1. 稿件內容務須依照上列規定格式書寫及線上投稿，本期刊編審會保有修改與退稿之權利。文稿經本期刊接受後，由作者負責前二校。除筆誤與錯字外，作者在校稿時，不得擅自更改內容與數據。
2. 投稿前請詳閱稿約及參見最一期刊登報告，投審稿件程序請上網參閱本期刊網址：http://www.ipress.tw/J0042。

八、 投稿本期刊之稿件，不得投稿其他刊物。稿件經本期刊接受後，刊登權屬發行單位農業試驗所所有，非經本所書面同意，不得轉載或移轉他處發表。本期刊具專屬版權，恕不受理一稿兩投之文章 (已刊載或投寄國內外有版權刊物之文章，請勿再投稿本刊)。若有上述情事除依相關法律處理責由作者自負外，本刊將列入紀錄永不受理其投稿。

九、 本刊以黑白印製為原則，彩圖經編審會同意得以彩色編印。本期刊彩圖編印收費標準調整如下表，由作者自行向廠商支付，未付清前稿件將不予刊登。

彩圖編印收費標準：

總張數	總價 (元)	計價公式
1	5,000	5,000 × 1
2	7,000	5,000 × 1 + 2,000 × 1
3	9,000	5,000 × 1 + 2,000 × 2
4	11,000	5,000 × 1 + 2,000 × 3
5	13,000	5,000 × 1 + 2,000 × 4
6 張以上	15,000 起	5,000 × 1 + 2,000 × (*n* – 1)

十、 其他未盡事宜本期刊得隨時修正或補充。

Instructions to Authors

Journal of Taiwan Agricultural Research (revised on 2 December 2019)

General Information

The *Journal of Taiwan Agricultural Research* (JTAR) is published four issues annually by the Taiwan Agricultural Research Institute (TARI). Researchers and scientists willing to make the contribution in the fields of agricultural development by publishing their full papers of original research, reviews, or short communications in the Journal are highly welcome and appreciated. Research staff affiliated with TARI is not a requirement for publishing in JTAR. All manuscripts should be submitted online at the Journal's website, http://www.ipress.tw/J0042. Follow its instructions. Submissions to JTAR must not simultaneously submit to any other scientific or technical journal.

Scope

After critical review and approval by the editorial board, JTAR publishes articles in plant science; biotechnology; agricultural chemistry; plant protection; agricultural engineering; agricultural economics and extension; industrial strategic management; biostatistics; and bioinformatics. Articles reporting experimentation or research findings in these fields will be peer-reviewed as research articles. Short articles (no more than 4 printed pages) concerned with experimental techniques, results, or unique phenomena will be peer-reviewed as short communications. Review articles will be under invitation by the editorial board of JTAR.

Style

See the latest issue of JTAR for style and layout. General rules are as follows:

- All abbreviations should be defined at the first mention and in tables and figures, and be used throughout the entire article.
- The Latin names of organisms (e.g., plants, pathogens, insects and pests) must always list when appeared at first appearance (in Abstract or text). Give the complete binomial and authorities.
- At first listing both the common and chemical names of pesticides must be given.
- SI units must be used in the manuscript.
- Use the 24-h time system (e.g., 0200 and 1400) and abbreviate dates such as 3 October 2015 or 10/03/2015.
- Except when used with units, spell out numbers one through nine. Put commas for the decimal separator (e.g., 1,356,078 and 6,078) and place a zero before the decimal point (e.g., 0.6078 and 0.078).

Preparation of Manuscript Files

All submitted manuscript files should write in Chinese or English and save it in Microsoft Word 97–2003 or later versions (.doc files or .docx files). Other word processing software is not accepted. High-resolution figure files may be included in manuscript and submitted separately in forms of .jpg files

or .doc files or .docx files, one figure per file. Do not use word processing features such as automated bulleting and numbering, head and subhead formatting, or internal linking. Text should be typed in A4 size (29.6 cm long, 21 cm wide) in double-spaced and be numbered and aligned to the left side, while tables use single-spaced. Only one font and size (font no. 12) is used. Provide the document with an upper and lower margin of 3 cm and a left and right margin of 2 cm. Starting from the second page, indicate the page number on the lower right corner. When typing the manuscript, use the font of MingLiu (細明體) for Chinese and Times New Roman for English. Leave a single space between each English word and sentence. The author submitting the manuscript should click on "Authors" on the front page of Journal's Online Submission and Review System. Under "Author" page, click "Submit a new manuscript". Confirm submission checklist and then complete the information related to the manuscript including a cover letter.

Follow the sequence and instructions to fill out and upload the information. JTAR adopts a double-blind review for all submitted manuscripts. Reviewers will be able to download the submitted files that authors upload to the system. There are three main types of articles published by JTAR, i.e., "Reviews", "Research Articles", and "Short Communications".

Reviews. A review article is invited by editor-in-chief of JTAR and will be reviewed and revised to assure an appropriate style and content.

Research Articles. Write a research article according to the mentioned scope in the following sequence: title, author(s), abstract, and text. Attach tables, figure captions, and figures at the end of text. In general, each manuscript should not exceed 10 printed pages.

Short Communications. An article that has a size less than 4 printed pages concerned with experimental techniques, results, or unique phenomena may be published as a short communication when accepted.

Title. A title highlights the subject and purpose of the article briefly but clearly. Use common names of crops, avoid abbreviations, and limit words where possible. Except prepositions and connectives, capitalize each word in the English title. Write down the suggested running title, with no more than twelve Chinese characters or six English words, in the next sentence.

Author. List names of all authors below the title and place an asterisk after the corresponding author. The next sentence lists professional titles, institutions and complete addresses of all authors. Provide e-mail address of the corresponding author. Place title and author(s) on the same page.

Abstract. Each article has a single self-contained paragraph, containing the rationale, objectives, methods, results, and their meaning or scope of application specifically. Identify the important details to interpret the results but try not to exceed five hundred words. Do not cite references and avoid equations. In the next sentence, include no more than five key words and capitalize the first letter of each word. If the manuscript written in Chinese (English), place English (Chinese) abstract after the main text of the manuscript.

Text. The text includes the following sections in sequence: INTRODUCTION, MATERIALS AND METHODS, RESULTS, DISCUSSION, CONCLUSIONS (optional), ACKNOWLEDGMENTS (may be omitted), and REFERENCES. If required, combine the results and discussion section into "RESULTS AND DISCUSSION", and incorporate the conclusions into the discussion. If there is an appendix, place

it before the references. Except necessary, do not mix English with other languages. If required, place headings and subheadings at the head of paragraphs of the sections MATERIALS AND METHODS and RESULTS.

Tables. Prepare tables with the tables feature of MS WORD®; do not use tab keys, space bars, or graphics boxes. Number tables consecutively with one table per page. Place tables at the end of text. Each datum needs to be contained in a defined cell. Table heads should be complete and self-contained but brief. All variables should be defined and abbreviations be spelled out in table footnotes. Follow the order of z, y, x, w, v, u, …. The *, **, and *** are used only to show statistical significance at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively. Lack of significance indicates as NS. Asterisks or letters next to values indicate statistical significance and should align them in the same cell as the value. All footnotes should be set on separate lines. Capitalize only the first word in a row of the body of a table with the exception of proper nouns. Use only SI units (e.g., μg L^{-1}, Mg ha^{-1}, and m s^{-1}) in the singular forms.

Figures. Provide clear contrast figures in high-resolution JPG files (≧ 300 dpi) and upload them on-line as individual files and attach them after tables; one figure one page. Keep relative sizes of symbols, letters, and numbers as the original should be larger than the intended final size. Use English for letters in Arial font. Explain curves or symbols in a legend within the figure. JTAR will publish figures in black and white. Color figures, images, photos or maps are subject to the agreement of the editorial board and fee must be paid before the manuscript is published in the journal. Photographs and drawings for graphs and charts should be prepared with good contrast of dark and light and no more than the size of 25 cm × 18 cm. Use English for figure captions and separate captions for figures. A caption should be concise but given in sufficient detail. Define the crop or soil involved, the major variables presented, the place and year, and the abbreviations and symbols used in the caption. Indicate the scale for illustrations.

Acknowledgments. If required, provide it in a single paragraph. List institutional sponsors, the institutional article number, and contribution acknowledgment.

References. The reference section lists published literature and unpublished reports, theses, and dissertations cited in the manuscripts. Alphabetize the list by the surnames of the first author, followed by the other authors. Cite unpublished data, personal communications, and reports in the text only (in parentheses). Give the authors, year, complete article title, abbreviated journal title, volume number, and inclusive pages for journal articles. Give the authors, year, chapter title, pages, complete book title, book editor, publisher, and place of publication for book chapters. Add also the place and date of the conference for proceedings. For electronic references and others, see the current issues of JTAR. Single author references precede multiple-author references for the same first author. Use chronological order for references with identical authorship. Add a lowercase letter (i.e., a, b, c, etc.) to the year to identify same-year or multiple-author references for text citation. Write the author and year of the cited references inside parentheses; for example, (Chen & Ho 1983; Sung 1991; Hsu *et al.* 1992). Refer to the "Serial Sources for the BIOSIS Previews Database" published by Biosciences Information Service (1992) for the abbreviations of an academic journal. Some reference examples:

- Reference from an academic journal written in Chinese:
  Hsu, S. H., T. Y. Chung, T. C. Kuo, and S. F. Wang. 1992. Studies on the micro-climate of greenhouse. I. Light environment of greenhouse. J. Agric. Res. China 157:34–43. (in Chinese with English abstract)
- Reference from a book written in Chinese:
  Sung, J. M. 1991. Nitrogen Metabolism of Rice. Chinese Agronomy Press. Taipei. 100 pp. (in Chinese)
- Reference from an edited book written in Chinese:
  Yang, C. M. and C. Y. Lin. 2003. Studies on rice precision farming system. p.1–12. *in*: Rice Precision Farming System. (Yang, C. M. and C. Y. Lin, eds.) Taiwan Agric. Res. Inst. Pub. No. 105. Taichung, Taiwan. 252 pp. (in Chinese with English abstract)
- Reference from a proceedings written in Chinese:
  Chang, C. A. 2001. Application and extension of virus-free seedling for the control of virus diseases of passion fruit in Taiwan. p.31–38. *in*: Proceeding of Symposium on Application of Healthy Plant for Control of Plant Diseases. Taichung, Taiwan. November 24, 2001. Taiwan Phytopathol. Soc. Publ., Taichung. (in Chinese with English abstract)
- Reference from a website:
  Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylä Stud. Biol. Environ. Sci. 163. Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland. https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf (visit on 12/16/2014)

Units, Abbreviations, and Statistical Analysis

Use the SI system (Systéme International de Unités) in JTAR. Some commonly used abbreviated units:

- Length: kilometers (km), meter (m), centimeter (cm), millimeter (mm), micrometer (μm)
- Weight (W): ton (Mg), kilogram (kg), gram (g), milligram (mg), microgram (μg)
- Volume (V): litre (L), millilitre (mL), microlitre (μL)
- Surface: hectare (ha), square meter (m^2)
- Temperature: Celsius (℃), absolute temperature (K, but must be indicated)
- Time: day (d), hour (h), minute (min), second (s)
- Concentration: mole (M), millimole (mM), normal (N), millinormal (mN)
- Gravitational acceleration: *g*
- Molecular weight: kDa
- Three macronutrients in fertilizers: element─N-P-K ; equaivalent quantity─N-P_2O_5-K_2O

  Other abbreviations:

- Average: *avg*.
- Approximate: *ca*.
- Diameter: diam.
- Concentration: e.g. mg L^{-1}.
- Frequency of a rotation: × *g*.

Statistical Analysis

Manuscripts should contain enough details of experimental design so that the results can be judged for validity and repeatability. The symbols * and ** are used to show differences in statistical significance. Add *P* value (e.g. $P < 0.01$) when a, b, c, ... are used to classify statistical significance. Examples of commonly used symbols: *r* for correlation coefficient, R^2 for coefficient of determination, cv for coefficient of variation, sd for standard deviation, and se for standard error.

Accepted Manuscripts

When a submitted manuscript is accepted, corresponding author will receive notification from an editor or editor-in-chief, and the accepted files will be used for press. Authors are responsible for obtaining all permissions for use of materials in the manuscripts from other publishers and should notify the editor at the time the manuscript is accepted. JTAR reserves the right to publish and republish any parts submitted with a manuscript.

Plagiarism

Manuscripts may be screened for plagiarism upon submission. If there appears significant duplicate content with other sources, the manuscript will be forwarded to the journal editor for evaluation and action.

Editorial Board

Editor-in-Chief

Hsieh, Ting-Fang
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute

Editors

Ann, Pao-Jen
Division of Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute
Chang, Ruey-Jang
Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute
Chang, Yung-Ho
Department of Food and Nutrition, Providence University
Chen, Chien-Chung
Division of Applied Zoology, Taiwan Agricultural Research Institute
Chen, Chiling
Division of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute
Chen, Chung-Li
Department of Agronomy, National Chung Hsing University
Chen, Iou-Zen
Department of Horticulture and Landscape Architecture, National Taiwan University
Chen, Suming
Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University
Chen, Yu-Hui
Department of Agricultural Economics, National Taiwan University
Chien, Li-Hsien
Department of Applied Economics, National Chung Hsing University
Chung, Wen-Hsin
Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University
Do, Yi-Yin
Department of Horticulture and Landscape Architecture, National Taiwan University
Hou, Feng-Nan
Department of Entomology, National Chung Hsing University
Huang, Chao-Chia
Division of Crop Science, Taiwan Agricultural Research Institute
Huang, Jenn-Wen
Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University
Huang, Pung-Ling
Department of Horticulture and Landscape Architecture, National Taiwan University
Huang, Yuh-Ming
Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University
Juang, Kai-Wei
Department of Agronomy, National Chiayi University
Kao, Ching-Huei
Department of Agronomy, National Taiwan University
Ku, Hsin-Mei
Department of Agronomy, National Chung Hsing University
Kuo, Bau-Jeng
Department of Agronomy, National Chung Hsing University
Lin, Huey-Ling
Department of Horticulture, National Chung Hsing University
Lin, Yann-Rong
Department of Agronomy, National Taiwan University
Liu, Li-Yu
Department of Agronomy, National Taiwan University
Lu, Hsiu-Ying
Miaoli District Agricultural Research and Extension Station
Lu, Kuang-Hui
Department of Entomology, National Chung Hsing University
Shen, Wei-Chiang
Department of Plant Pathology and Microbiology, National Taiwan University
Tsay, Jyh-Rong
Taiwan Agricultural Research Institute
Tseng, Menq-Jiau
Department of Horticulture, National Chung Hsing University
Tzou, Yu-Min
Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University
Wang, Chan-Sen
Department of Agronomy, National Chung Hsing University
Wang, Shu-Jen
Department of Agronomy, National Taiwan University
Wu, Wen-Jer
Department & Graduate Institute of Entomology, National Taiwan University
Yang, Jeng-Tze
Department of Entomology, National Chung Hsing University
Yen, Gow-Chin
Department of Food Science and Biotechnology, National Chung Hsing University

Invited Editors

Shih, Hsien-Tzung
Division of Applied Zoology, Taiwan Agricultural Research Institute
Sung, Yu
Department of Horticulture, National Chung Hsing University
Tung, Ching-Pin
Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University

Editorial Assistants

Wang, Li-Jung
Editorial Office of Journal of Taiwan Agricultural Research
Wang, Zi-Yu
Editorial Office of Journal of Taiwan Agricultural Research

Consultants to Editorial Office

Chen, Lit-Fu
Division of Technical Service, Taiwan Agricultural Research Institute
Wu, Yi-Yan
Division of Technical Service, Taiwan Agricultural Research Institute

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL RESEARCH

Vol. 70 No. 4 December 31, 2021

Published by Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture

Publisher	Hsueh-Shih Lin
Editor-in-Chief	Ting-Fang Hsieh
Address	No.189, Zhongzheng Rd., Wufeng Dist., Taichung City 413008, Taiwan, ROC
Website	http://www.tari.gov.tw/jtar; E-mail: jtar@tari.gov.tw; Tel: +886-4-2331-7236
Submission	https://www.ipress.tw/J0042
Press	Ainosco Press
Address	18F, No.80, Sec.1, Chenggong Rd., Yonghe Dist., New Taipei City 234634, Taiwan, ROC
Tel	+886-2-2926-6006
E-mail	press@airiti.com
Price	NT$ 175 (per copy)
Distributor	1. GB Books / 1F., No.209, Songjiang Rd., Taipei City 104472, Taiwan, ROC GB Website: http://www.govbooks.com.tw; Tel: +886-2-2518-0207 2. Wunan Books / No.6, Zhongshan Rd., Taichung City 400002, Taiwan, ROC Tel: +886-4-2226-0330