台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 74(3):317–329 (2025)
https://doi.org/10.6156/JTAR.202509_74(3).0009

研究報告

多光譜影像技術用於早期檢測水稻蟲害之研究

曹懷文[1]　黃玉舜[1]　黃守宏[2]　賴柏羽[3]　賴明信[4,*]

摘要

曹懷文、黃玉舜、黃守宏、賴柏羽、賴明信。2025。多光譜影像技術用於早期檢測水稻蟲害之研究。台灣農業研究 74(3):317–329。

本研究針對水稻主要害蟲褐飛蝨，結合人工接種試驗與多光譜影像技術，建立一套可應用於早期預警的蟲害評估模式。試驗中模擬不同褐飛蝨族群密度處理，並使用無人機搭載多光譜相機於田間進行影像監測，蒐集植株光譜資訊。所稱『早期』係指水稻自幼穗分化期後至抽穗期前之期間，約對應二期作水稻蟲害好發時段。分析結果顯示，當常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 相對於對照組之差值超出自然變異範圍 (± 1*s*) 時，即可視為一種預警訊號，具有辨識褐飛蝨危害初期跡象之潛力，並可作為田間早期監測之初步依據。此外，本研究亦探討田區邊行水稻 (rice near border) 作為對照組替代方案之可行性，以提升實務應用之彈性。研究成果提供傳統農業人工監測以外之替代技術，亦為智慧農業蟲害監測提供可量化之操作依據。

關鍵詞：褐飛蝨、蟲害監測、多光譜、智慧農業。

前言

水稻是全球數十億人口賴以為生的重要糧食作物，其生長過程與產量穩定性直接關係到糧食安全。然而，水稻種植正面臨多重挑戰，除了氣候變遷外，病蟲害更是威脅生產穩定性的主要因素之一。其中，褐飛蝨 (*Nilaparvata lugens* (Stål)) 作為水稻重要害蟲，長期以來對水稻產量造成嚴重損害。其不僅通過吸食汁液導致植株衰弱，亦可傳播植物病毒 (Hibino 1989)，進一步影響產量與米質，對農業生產構成極大挑戰 (Chen & Cheng 1978)。為有效防治褐飛蝨，建立準確且即時的監測方法至關重要。然而傳統蟲害監測多依賴人工觀察與取樣分析，不僅耗時費力，且受人為經驗影響，難以因應大規模區域的高效監測需求。在此背景下，多光譜影像技術近年來已廣泛應用於農業領域，包括作物生長監測 (Bendig *et al*. 2015)、產量預估 (Camenzind & Yu 2024) 及病蟲害檢測 (Kerkech *et al*. 2020) 等。該技術能同時擷取多種光譜波段資訊，有助於掌握作物健康狀況，進而協助識別病蟲害的跡象，為農民提供決策依據，採取防治措施以減少損失。Ghobadifar *et al*. (2016) 利用 SPOT-5 衛星多光譜影像資料證實水稻健康狀態與常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 之間具有高度統計顯著性 ($P < 0.001$)。Prasannakumar *et al*. (2013) 則結合褐飛蝨損害分級植株與高光譜影像分析，發現波長 665 nm 的紅光反射率與危害等級呈現中度相關 ($r = 0.58$)；而以 NDVI 建構之回歸模型，顯示與危害等級之間具有顯著負相關 ($R^2 = 0.82$, $P < 0.0001$)。隨後，Prasannakumar *et al*. (2014) 於田間應用研究進一步證明，僅

投稿日期：2025 年 4 月 17 日；接受日期：2025 年 6 月 16 日。
* 通訊作者：mhlai@tari.gov.tw
[1] 農業部農業試驗所作物組計畫助理。臺灣 臺中市。
[2] 農業部農業試驗所嘉義農業試驗分所植物保護系副研究員兼系主任。臺灣 嘉義市。
[3] 農業部農業試驗所嘉義農業試驗分所植物保護系助理研究員。臺灣 嘉義市。
[4] 農業部農業試驗所作物組研究員。臺灣 臺中市。

以 NDVI 作為線性回歸模型之預測指標，即可達良好準確性 (R^2 = 0.76, P < 0.0001)。惟現有研究多聚焦於太空遙測尺度，著重於分析受害與未受害區域的植生指數或高光譜差異，以用於災損分級與精準施藥。然而此類資料常受限於空間解析度與觀測頻率，難以掌握田間小尺度變異，特別是在地形破碎與田區細碎的臺灣農業環境中，應用效果有限。因此，本研究以臺灣農業環境為例，提出一套基於無人機多光譜影像技術的褐飛蝨早期檢測方法。所稱『早期檢測』，係指水稻自幼穗分化期後至抽穗期前，且尚未出現蝨燒或稻株黃化等明顯可見蟲害特徵之前的階段。此時期亦為二期作水稻褐飛蝨族群易於爆發之關鍵時段，具備進行預警防治的實務價值。藉由多光譜影像處理技術與數據分析方法，建立一套蟲害評估模式，驗證其於早期檢測的可行性，並探索實際應用潛力，期盼此研究能為傳統蟲害監測方法提供準確且高效之替代方案，推動臺灣智慧農業發展，進一步提升病蟲害管理效率與糧食安全保障。

材料與方法

供試褐飛蝨蟲源飼養

本試驗使用之褐飛蝨蟲源飼養於農業部農業試驗所嘉義農業試驗分所溫室中，以水稻品種「台農 67 號」植株作為褐飛蝨之飼料水稻，飼養於鋁製生長箱內 (長 92 cm、寬 47 cm、高 81 cm)，經大量飼養後，取同一日齡之二齡若蟲作為供試蟲源。飼養蟲源所使用之水稻品種「台農 67 號」，該品種屬感蟲型，未具抗性，為國內常用之標準飼料稻品種，可有效維持蟲源族群之穩定性與一致性。

褐飛蝨危害試驗

試驗於 2020 年二期作期間進行 (8–11 月)，試驗田區位置為 24.031850°N, 120.690460°E，田區面積約 0.1 ha。試驗品種為水稻「台南 11 號」，採用機械插秧，行株距為 30 cm × 20 cm。田間管理依據《作物施肥手冊》建議進行，施肥總量為氮 132 kg、磷 72 kg 及鉀 48 kg (以 kg ha^{-1} 計)，基肥施用台肥寶效 39 號有機質複合肥料 (N–P_2O_5–K_2O = 12–18–12，台灣肥料股份有限公司，臺灣臺北市)，追肥與穗肥使用硫酸銨 (N–P_2O_5–K_2O = 21–0–0，台灣肥料股份有限公司，臺灣臺北市)。「台南 11 號」為目前臺灣栽種面積最廣之商業品種，選為實驗標的具代表性且利於後續技術推廣應用。本試驗採用完全隨機設計 (completely randomized design; CRD)，設置 5 個處理組 (A–E) 及 1 個對照組 (CK)，各組設 2 重複，共 12 個實驗小區。小區排列為 3 列 × 4 行之規則格網，各組間依隨機方式配置，以避免空間位置造成之系統性偏差。每一小區內設置 1.8 m × 1.8 m × 1.6 m 之 PVC 管架構成之試驗棚，棚內種植 35 叢水稻，並四周外覆蚊帳以防止褐飛蝨跳離區域，棚架頂端因無人機空拍需求無覆蓋蚊帳。於水稻生育期達到幼穗分化期 (panicle initiation stage) 時，依處理組別接種不同數量之二齡褐飛蝨若蟲 (60、125、250、500 及 1,000 insects $hill^{-1}$)，分別標示為 A 至 E 處理組，CK 組不接種作為對照組。邊行組 (rice near border; BL) 為同一試驗田區中，左右兩側往田區內數第 2 與第 3 行水稻的總合樣本 (n ≒ 1,000)。

稻株多光譜影像收集

本研究使用無人機搭載多光譜相機 MicaSense RedEdge-M (AgEagle Aerial Systems Inc., Wichita, KS, USA) 測量試驗田區植株光譜反射率。RedEdge-M 具備 5 個波段，其中心波長 (center wavelength) 與光譜帶寬 (bandwidth full width at half maximum; bandwidth FWHM) 分別為藍光 (blue: 475 nm/20 nm)、綠光 (green: 560 nm/20 nm)、紅光 (red: 668 nm/10 nm)、紅邊 (red-edge; RE: 717 nm/10 nm) 及近紅外光 (near-infrared; NIR: 840 nm/40 nm)。飛行條件設定為航向與側向重疊率皆 85%，飛行高度距地面 120 m，影像解析度為 8.2 cm $pixel^{-1}$。飛行前後拍攝反射率校正板 (calibrated reflectance panel, MicaSense, AgEagle Aerial Systems Inc., Wichita, KS, USA)，以利後續影像資料校正。飛行任務執行時間為當地

時間 11:00–13:00，期間為 2020 年 8 月 11 日至 11 月 13 日，共執行 31 次多光譜影像拍攝任務。每次影像皆作為獨立資料點保留，最終共獲得 12 小區 × 31 時間點，共計 372 筆數據，作為建構完整時序變化曲線之依據。

多光譜影像處理

本研究使用 Pix4Dmapper (version 4.5.6) 對多光譜影像進行前處理與拼接，生成正射影像後使用 ArcGIS (version 10.4) 建立 shapefile，並框選需要提取光譜的區域後，將正射影像與 shapefile 載入 R (version 3.6.2) 中進行處理與分析。使用套件涵蓋統計建模 (lme4, doBy)、資料處理 (reshape, plyr, dplyr, data.table)、空間資料分析 (raster, rgdal, sp, gdalutils, shapefiles, maptools, spdep, classInt, velox, lidR)、視覺化呈現 (RColorBrewer)、循環資料統計分析 (CircStats)、影像閾值處理 (autothresholdr)，以及資料集處理 (stats19)。最終將框選區域的光譜值與植生指數匯出為 csv 檔案，用於後續分析。

植生指數之選取與分類

植生指數之選取依據相關文獻綜述 (Bannari *et al*. 1995; Zeng *et al*. 2022) 與資料庫 Index DataBase (https://www.indexdatabase.de/; Henrich *et al*. 2009; Henrich *et al*. 2012) 所提供之資訊，並綜合考量使用普遍性、光譜有效波段限制與公式計算之實用性，篩選出候選植生指數共 27 個 (表 1)。為利後續分析與評估，並考量各指數代表之生理意義，將所選植生指數分類為 4 類：(1) NDVI 系列，該類指數主要由近紅外光與其他波段的比值計算而成，數值落於 ± 1 之間；(2) 環境參數校正，考慮不同環境因子對紅光與近紅外光反射率之影響，藉由引入校正參數提升指數穩定性；(3) 植物體色素相關類，利用植株中特定色素對特定波段之反射特性，推估植體色素含量變化；(4) 未分類，包含具應用潛力但不易歸類之常用指數。

植生指數與褐飛蝨危害相關性建置

數據分析首先以線性回歸評估各植生指

表 1. 本研究所使用之候選植生指數一覽表。

Table 1. List of candidate vegetation indices for this study.

Abbreviation[z]	Name	Formula[y]	Type[x]	Reference
NDVI	Normalized difference vegetation index	(NIR − R)/(NIR + R)	1, Red/NIR	Rouse *et al*. (1974)
NDRE	Normalized difference NIR/rededge index	(NIR − RE)/(NIR + RE)	1, RE/NIR	Barnes *et al*. (2000)
GNDVI	Normalized difference NIR/green index	(NIR − G)/(NIR + G)	1, Green/NIR	Gitelson *et al*. (1996)
BNDVI	Normalized difference NIR/blue index	(NIR − B)/(NIR + B)	1, Blue/NIR	Yang *et al*. (2004)
NDGR	Normalized difference green-red index	(G − R)/(G + R)	1, VIS	Hunt *et al*. (2005)
NDGB	Normalized difference green-blue index	(G − B)/(G + B)	1, VIS	Hunt *et al*. (2005)
RBNDVI	Red-blue NDVI	(NIR − (R + B))/(NIR + (R + B))	1, VIS/RE	Wang *et al*. (2007)
GBNDVI	Green-blue NDVI	(NIR − (G + B))/(NIR + (G + B))	1, VIS/RE	Wang *et al*. (2007)
EVI	Enhanced vegetation index	2.5(NIR − R)/((NIR + 6R − 7.5B) + 1)	2, VIS/NIR	Huete *et al*. (2002)
EVI2	Enhanced vegetation index 2	2.5(NIR − R)/(NIR + 2.4R + 1)	2, Red/NIR	Jiang *et al*. (2008)
SAVI	Soil adjusted vegetation index	(1 + L) (NIR − R)/(NIR + R + L)[w]	2, Red/NIR	Huete (1988)
OSAVI	Optimized soil adjusted vegetation index	(1 + Y) (NIR − R)/(NIR + R + Y)[v]	2, Red/NIR	Rondeaux *et al*. (1996)

表 1. 本研究所使用之候選植生指數一覽表。(續)

Table 1. List of candidate vegetation indices for this study. (continued)

Abbreviation[z]	Name	Formula[y]	Type[x]	Reference
ARI	Anthocyanin reflectance index	(1/G) − (1/RE)	3, Green/RE	Gitelson *et al*. (2001)
mARI	Modified anthocyanin reflectance index	(G(-1) − RE(-1)) × NIR	3, VIS/NIR	Gitelson *et al*. (2006)
CVI	Chlorophyll vegetation index	(NIR/G) × (R/G)	3, VIS/NIR	Vincini *et al*. (2008)
CCCI	Canopy chlorophyll content index	((NIR − RE)/(NIR + RE))/((NIR − R)/(NIR + R))	3, Red/NIR	El-Shikha *et al*. (2008)
CIgreen	Chlorophyll index green	(NIR/G) (-1)	3, Green/NIR	Gitelson *et al*. (2003)
CIrededge	Chlorophyll index red-edge	(NIR/RE) (-1)	3, RE/NIR	Gitelson *et al*. (2003)
GCC	Green chromatic coordinate	G/(R + G + B)	3, VIS	Cheng *et al*. (2020)
LCI	Leaf chlorophyll index	(NIR − RE)/(NIR + R)	3, VIS/NIR	Datt (1999)
MCARI	Modified chlorophyll absorption in reflectance index	((RE − R) − 0.2(RE − G)) × (RE/R)	3, VIS/RE	Daughtry *et al*. (2000)
MCARI1	Modified chlorophyll absorption in reflectance index 1	1.2 × (2.5(NIR − R) − 1.3(NIR − G))	3, VIS/RE	Haboudane *et al*. (2004)
TCARI	Transformed chlorophyll absorption in reflectance index	3((RE − R) − 0.2(RE − G) × (RE/R))	3, VIS/RE	Haboudane *et al*. (2002)
SR	Simple ratio	(NIR/R)	4, Red/NIR	Tucker (1979)
mSR	Modified simple ratio	(NIR/R − 1)/sqrt(NIR/R + 1)	4, VIS/NIR	Chen (1996)
GLI	Green leaf index	(2G − R − B)/(2G + R + B)	4, VIS	Louhaichi *et al*. (2001)
VARIgreen	Visible atmospherically resistant index green	(G − R)/(G + R − B)	4, VIS	Gitelson *et al*. (2002)

[z] NDVI: normalized difference vegetation index; NDRE: normalized difference red edge index; GNDVI: green normalized difference vegetation index; BNDVI: blue normalized difference vegetation index; NDGR: normalized difference green-red index; NDGB: normalized difference green-blue index; RBNDVI: red-blue normalized difference vegetation index; GBNDVI: green-blue normalized difference vegetation index; EVI: enhanced vegetation index; EVI2: two-band enhanced vegetation index; SAVI: soil adjusted vegetation index; OSAVI: optimized soil adjusted vegetation index; ARI: anthocyanin reflectance index; mARI: modified anthocyanin reflectance index; CVI: chlorophyll vegetation index; CCCI: canopy chlorophyll content index; CIgreen: chlorophyll index green; CIrededge: chlorophyll index red edge; GCC: green chromatic coordinate; LCI: leaf chlorophyll index; MCARI: modified chlorophyll absorption ratio index; MCARI1: modified chlorophyll absorption ratio index 1; TCARI: transformed chlorophyll absorption ratio index; SR: simple ratio; mSR: modified simple ratio; GLI: green leaf index; VARIgreen: visible atmospherically resistant index green.

[y] The spectral bands referenced in the formula column are blue (B), green (G), red (R), red-edge (RE), and near-infrared (NIR).

[x] VIS is an abbreviation for visible spectroscopy. The numbers in the type column represent classification types in this study: 1. NDVI series, 2. environmental reflectance adjustment, 3. pigment content, and 4. unclassified.

[w] The correction factor used in the formula is Y = 0.16.

[v] The correction factor used in the formula is L = 0.75.

數 (表 1) 與水稻生長狀況之相關性，排除呈非線性相關之指數；隨後以決定係數 (coefficient of determination, R^2) 大於 0.9 作為篩選門檻，選取主要候選指數。為評估處理組與對照組間 NDVI 差異是否超出自然變異範圍，本研究以對照組內部變異為基礎，設定 ± 0.0135 為自然變異門檻，據以建立 NDVI 差值熱圖，呈現各處理組於各時間點相對於對照組的偏離狀況。進一步為補強差異穩定性之判斷，採用 bootstrap 重抽樣法對處理組與對照組之 NDVI 差值進行 1,000 次有放回抽樣，估算平均差異超出自然變異門檻之機率，作為處理效應穩定性之補充指標。另針對所選指數，亦進行配對樣本 *t* 檢定 (paired samples *t*-test) 以分析處理組與對照組間之統計差異，惟該檢定僅作為輔助性分析，並非處理效果判定之依據。所有統計計算與視覺化均於 R (version 3.6.2) 環境中進行，並使用基本統計與圖形套件協助資料處理與呈現。

結果與討論

水稻「台南 11 號」生育期之 NDVI 自然變異特性

為進行異常狀況之判別，須先確定水稻在慣行耕作條件下的生長自然變異範圍，以作為後續分析與比較之依據。紅光與近紅外光波段 (red-NIR) 所構成的植生指數，為目前應用最廣泛的指標類型之一。故本研究首先針對「台南 11 號」水稻於全生育期內的 NDVI 變化進行分析，並繪製其時序趨勢圖，以描繪各生育階段之自然變異特徵 (圖 1)。結果顯示，NDVI 從插秧後至營養生長期快速上升，於幼穗分化期前後達到峰值；孕穗期間則趨於平穩，抽穗期開始後則逐步下降。顯示水稻於孕穗期間，植株生長勢呈現緩幅波動。本研究後續針對異常狀況之分析，將以此期間的自然變異範圍作為判別基準，該時段亦與前言所述之『早期檢測』目標相符，具備實務應用意義。

NDVI 應用於水稻健康狀態識別與蟲害發生偵測之可行性

在未受外力干擾的情況下，水稻田區間之生長勢理應具備一致性。為建立異常值偵測依據，本研究透過量化 NDVI 的自然變異程度作為判定基準。研究中選取對照組水稻在插秧後 50–80 d 的 NDVI 資料，計算每日標準差的平均值 (± 1*s*; s = 0.0135)，做為自然變異閾值。當實驗組 NDVI 與對照組之差異超過此閾值，即視為可能受到蟲害影響。如圖 2 所示，接種褐飛蝨後，各處理組的 NDVI 差異 (ΔNDVI) 呈現不同程度的下降趨勢，且與蟲口密度呈

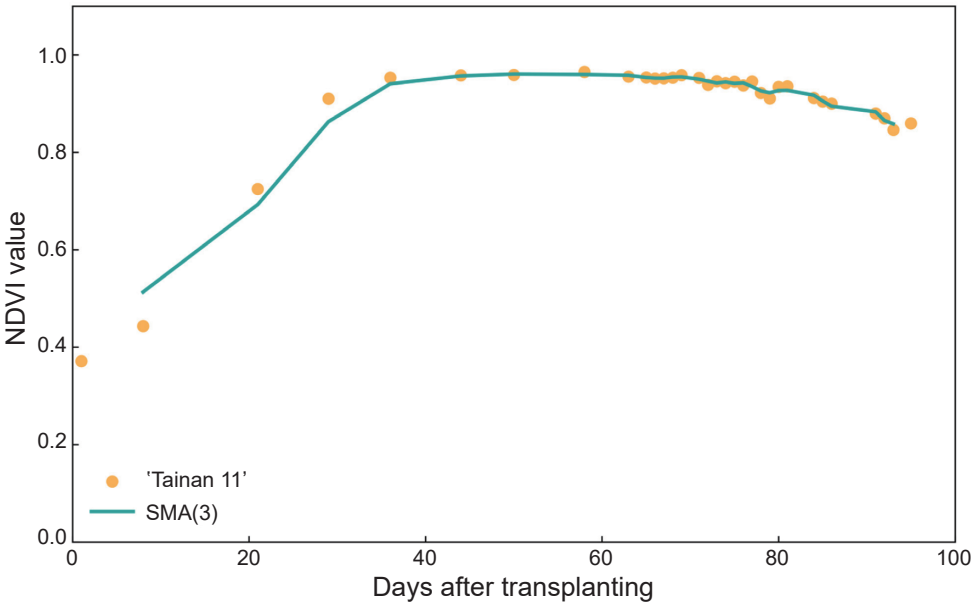


圖 1. 「台南 11 號」水稻全生育時期之常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 變化。X 軸為插秧後天數，Y 軸為 NDVI 數值。圖中呈現 2 類資料：實際觀測之 NDVI 值 (以點表示) 與經簡單移動平均 (simple moving average; SMA) 處理後的趨勢線 (以線段表示)。結果顯示，NDVI 由秧苗期至幼穗分化期逐漸上升，於幼穗分化期至孕穗期趨於穩定，並在孕穗後期略為下降。反映水稻不同生育階段之反射光譜特性變化。

Fig. 1. Temporal changes in normalized difference vegetation index (NDVI) for the rice cultivar 'Tainan 11' throughout the entire growth period. The x-axis represents days after transplanting, and the y-axis indicates NDVI values. Two types of data are presented: observed NDVI values (dots) and trend lines derived from simple moving average (SMA) smoothing (lines). The results show that NDVI increased gradually from the seedling stage to the panicle initiation stage, remained stable through the booting stage, and slightly declined during the late booting stage. This pattern indicates the spectral reflectance characteristics associated with different growth stages of rice.

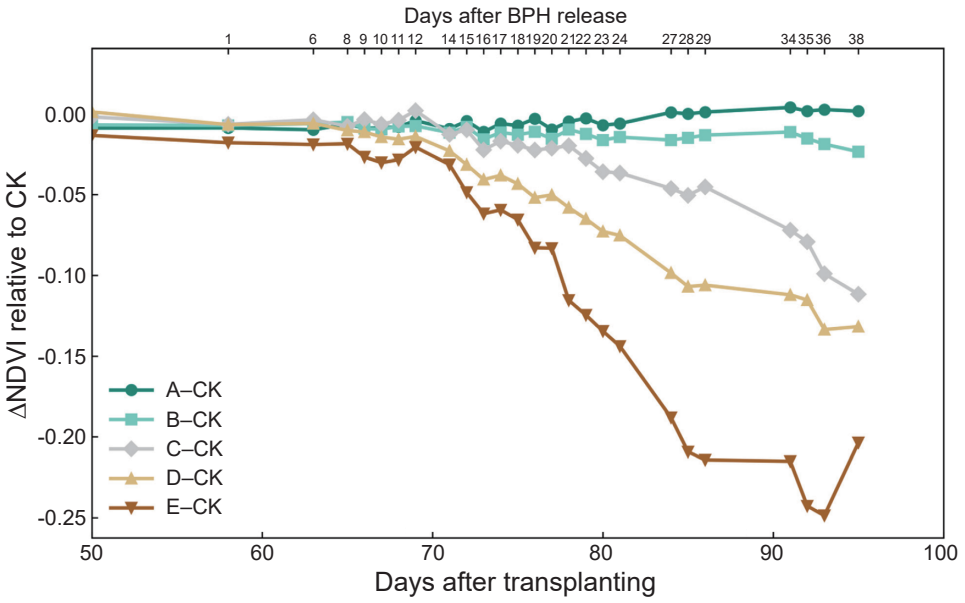


圖 2. 不同褐飛蝨密度危害下「台南 11 號」水稻生長勢之變化。本圖顯示不同接蟲密度處理下，水稻常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 差異值隨時間之變化趨勢。X 軸下方為插秧後天數，上方為褐飛蝨釋放後天數；Y 軸為處理組相對於對照組之 NDVI 差異值。實驗組包含對照組 (CK) 與 5 種接蟲密度處理組，分別為 A (60 insect hill^{-1})、B (125 insect hill^{-1})、C (250 insect hill^{-1})、D (500 insect hill^{-1}) 及 E (1,000 insect hill^{-1})。

Fig. 2. Growth response of 'Tainan 11' rice under different brown planthopper (BPH) infestation densities. The figure illustrates temporal trends in normalized difference vegetation index (NDVI) differences between treatment and control groups under varying BPH densities. The lower x-axis indicates days after transplanting, while the upper x-axis represents days after BPH release. The y-axis shows the NDVI deviation relative to the control. Experimental treatments include a control group (CK) and five infestation densities: A (60 insects hill^{-1}), B (125 insects hill^{-1}), C (250 insects hill^{-1}), D (500 insects hill^{-1}), and E (1,000 insects hill^{-1}).

正相關。處理組 E–CK (1,000 insect hill^{-1}) 在接蟲後 1–3 d 即快速下降，最終 ΔNDVI 降幅超過 0.25，顯示其受害程度最為嚴重；D–CK (500 insect hill^{-1}) 與 C–CK (250 insect hill^{-1}) 則分別於接蟲後約 10 d 與 15 d 開始明顯偏離對照組。相較之下，A–CK 與 B–CK 所呈現的差異幅度有限，ΔNDVI 變化接近零。此圖清楚反映褐飛蝨蟲口密度對水稻生長勢的累積性影響。進一步以熱圖觀察 (圖 3A)，CK–E 組在接蟲後 1 d (插秧後 58 d)、CK–D 在接蟲後 10 d (插秧後 67 d)、CK–C 組在接蟲後 16 d (插秧後 73 d) 即已超過變化閾值，顯示生長勢異常開始發生。為評估這些差異是否具有統計穩定性，本研究進一步針對各處理組進行 bootstrap 重抽樣分析 (n = 1,000)。結果顯示，隨處理強度由 A 組至 E 組遞增，超出門檻的平均機率亦由 27.4% 增至 81.5% (表 2)，呈現與熱圖相符之趨勢。此結果強化了熱圖 (圖 3A) 所示的觀察結論，證明視覺上偏離門檻較大的區域 (棕色)，在統計上亦具有較高的出現機率，具實質解釋意義。為系統性評估各處理組 (A–E) 與對照組 (CK) 間 NDVI 表現之差異，本研究針對對照組 (CK-I 與 CK-II) 分別與各處理組子組 (例如 A-I 與 A-II) 進行 4 組配對 t 檢定 (four pairwise t-tests)，並彙整其最小 t 值、最大 P 值、平均效果量 (Cohen's d) 及 Fisher 合併 P 值，以評估處理效應之顯著性與一致性。結果顯示 (表 2)，處理組 C 與 E 及 CK 間之差異最為穩定且顯著，4 組配對檢定皆達顯著標準 (最大 P 值分別為 0.006 與

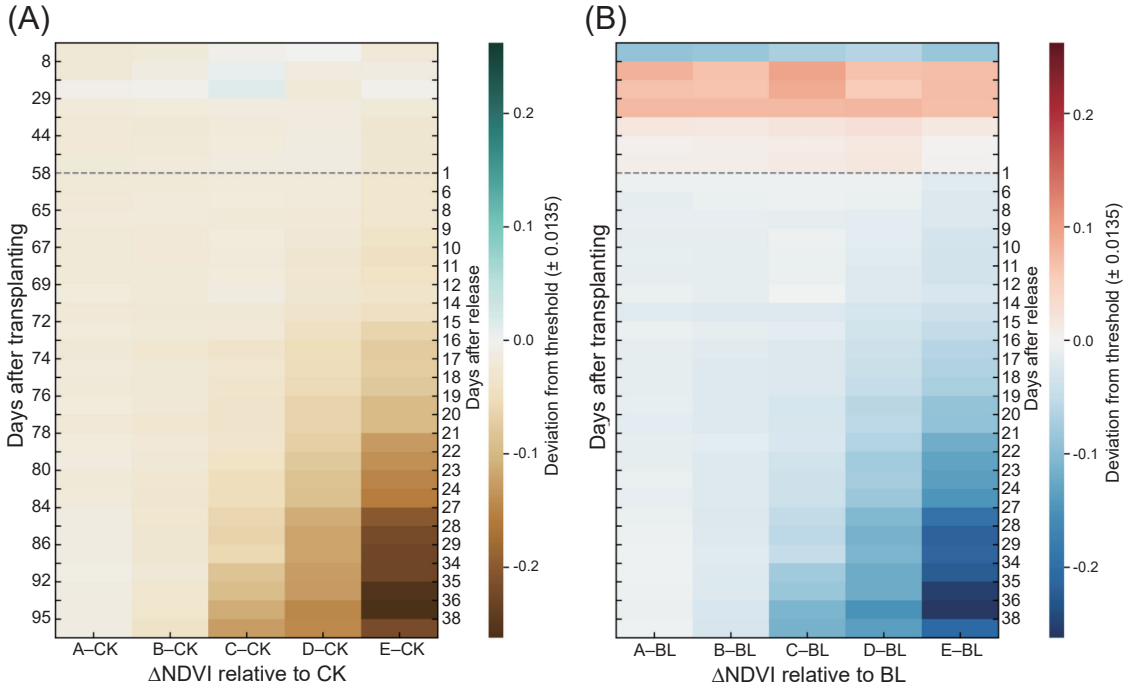


圖 3. 各接蟲密度處理組相對於對照組與邊行組之常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 偏離程度熱圖。(A) 顯示處理組相對於對照組 (CK) 之 NDVI 差異值；(B) 顯示處理組相對於邊行組 (BL) 之差異值。X 軸表示各處理組別；Y 軸左側為插秧後天數，右側為釋放褐飛蝨後天數，灰色虛線表示接蟲日。色階表示 ΔNDVI 偏離自然變異閾值 (± 0.0135) 之程度，採對稱色階配置。此圖呈現不同接蟲密度處理下水稻生長勢變化之時間動態與影響強度，視覺化呈現以自然變異閾值判斷水稻受害程度與預警時間之決策參考。

Fig. 3. Heatmaps of normalized difference vegetation index (NDVI) deviation under different brown planthopper (BPH) infestation densities relative to the control and rice near border (BL) groups. (A) shows the ΔNDVI of each treatment group relative to the control (CK), and (B) shows the ΔNDVI relative to the rice near border group (BL). The x-axis represents treatment groups; the left y-axis indicates days after transplanting, and the right y-axis indicates days after BPH release. The gray dashed line marks the infestation day. The color scale represents the degree of deviation from the natural variation threshold (± 0.0135), with a symmetric diverging palette. These heatmaps visualize the temporal dynamics and severity of rice growth suppression under different infestation densities, providing a reference for damage assessment and early-warning decisions based on the natural variation threshold.

0.0001)，平均 Cohen's d 效果量亦分別達 0.68 與 0.98，屬中至大型效果。相較之下，A 組與 B 組雖經 Fisher 合併 P 值亦顯著 ($P < 10^{-10}$)，惟其個別配對檢定結果不一致 (最大 P 值分別高達 0.376 與 0.728)，且平均效果量相對偏低，顯示處理效應穩定性不足。綜上所述，本研究透過 NDVI 的量化分析結合自然變異閾值判別法，建立了水稻生長異常之合理判別依據，並進一步驗證其在蟲害影響下的實用性與穩定性，展現此方法於田間監測與植株健康評估上的應用潛力。

稻田邊行稻株的光譜值作為對照組參照之可行性評估

在產業利用上，要找到可以作為『對照組』的稻株並不容易，若設立『對照田』又擔心管理或土壤質地差異，造成干擾。使用田區的邊行稻株光譜作為對照組，可以將干擾因子減至最低，可能是解決此問題的有效方法。此方法乃基於褐飛蝨習性的觀察，當褐飛蝨在棲息田區時，通常會選擇稻田內部不透風的地方聚集，通風的邊行稻株受到蟲害較少。具體而

表 2. 對照組 (CK) 與處理組 (A–E) 之間的常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 差異統計摘要。

Table 2. Summary statistics of normalized difference vegetation index (NDVI) differences between control and treatment groups.

Group[z]	Boot[y]	Min t[x]	Max P[w]	Mean d[v]	Fisher P[u]	Significance[t]
A	27.4%	0.90	0.3760	0.40	7.85×10^{-19}	***
B	32.1%	0.35	0.7280	0.91	3.40×10^{-17}	***
C	54.5%	2.93	0.0063	0.68	3.02×10^{-10}	**
D	63.4%	0.05	0.9580	0.76	2.25×10^{-13}	***
E	81.5%	4.49	0.0001	0.98	6.07×10^{-17}	***

[z] Each treatment group (e.g., A-I and A-II) was evaluated through four pairwise comparisons against the control groups (CK-I and CK-II).

[y] Proportion of bootstrap replicates from 1,000 resampling comparisons between each treatment group (A–E) and the control (CK) at matched time points (50–80 d after transplanting; DAT). A higher proportion indicates more consistent NDVI deviation induced by treatment effects.

[x] The smallest absolute *t*-value among the four CK–treatment pairwise comparisons, representing the weakest statistical support among the four tests.

[w] The largest *P*-value among the four CK–treatment pairwise comparisons. A higher value may indicate inconsistent treatment effects across replicates.

[v] The mean Cohen's d across the four CK–treatment pairwise comparisons was used to estimate the average effect size. According to Cohen's guidelines, values above 0.8 represent large effects, while values around 0.5 indicate moderate differences.

[u] To evaluate the overall treatment effect across the four CK–treatment pairwise comparisons, Fisher's combined probability test was applied. This method yields a single *P*-value reflecting the joint significance of all comparisons.

[t] Significance codes: $^{*}P < 0.05$; $^{**}P < 0.01$; $^{***}P < 0.001$, based on Fisher's combined *P*-value across the four pairwise tests.

言，本研究將田區邊行的第 2、3 行稻株光譜作為對照，通過測量這些邊行稻株的光譜值，計算其植生指數的平均值，並將其與田區內部的對照組進行比較，評估邊行稻株作為對照組的可行性 (圖 4)。結果顯示，邊行組 (BL) 在生育初期的生長勢較對照組 (CK) 平均值低，顯示其生長早期受邊際效應影響。然而，在本研究設定的自然變異閾值時期 (插秧後 50–80 d)，邊行組之 NDVI 數值皆落於區間內，顯示其在此階段的生長趨勢與對照組趨於一致。因此，即使邊際效應導致生長早期具落差，後期仍能穩定落入標準閾值範圍 (± 1s; s = 0.0135)，不影響作為基準時的判別準確性 (圖 3B)。通過這種方法，能夠在無需明確對照組的情況下，利用邊行作為對照，有效判斷水稻是否受到褐飛蝨的危害。此方式不僅提高田間蟲害檢測的靈活性與可靠性，也為精準農業提供新的技術手段。

討論

本研究透過評估水稻生育期間植生指數的時序變化模式，初步探討其在蟲害檢測上的應用潛力，並提出一種基於 NDVI 自然變異閾值的簡易判別方式，用於區分健康與受蟲害影響之稻株。多項植生指數 (如 canopy chlorophyll content index (CCCI)、leaf chlorophyll index (LCI)、NDVI、normalized difference red edge index (NDRE) 及 modified simple ratio (mSR)) 與水稻生長勢呈現良好相關性 (表 3)，以 NDVI 為例，其在孕穗期間變化穩定 (圖 1)，並於接蟲處理後，部分實驗組能明顯觀察到呈現下降趨勢 (圖 2)，顯示其對異常生長具備敏感性。基於上述觀察，本研究提出一項基於自然變異的 NDVI 閾值判別法，簡化多光譜影像於水稻生長異常鑑別上的應用流程。於本研究案例中，此閾值能區分出 NDVI 偏低之區域 (圖 3)，顯示其在蟲害早期預警上具潛在應用價值，惟仍需進一步驗證其穩定性與通用性。前人研究中，Prasannakumar *et al*. (2013) 發現波長 665 nm 的紅光反射率可反映褐飛蝨危害，Ghobadifar *et al*. (2016) 亦指出 NDVI 能識別水稻健康狀態。本研究選擇延續前述紅光波段植生指數之應用架構，雖監測尺度由衛星遙測轉為無人機近地觀測，但所得結果仍與上述研究發現一致。惟本研究聚焦於受害初期之檢測潛力，因此僅以不同密度的蟲口數模擬初期可

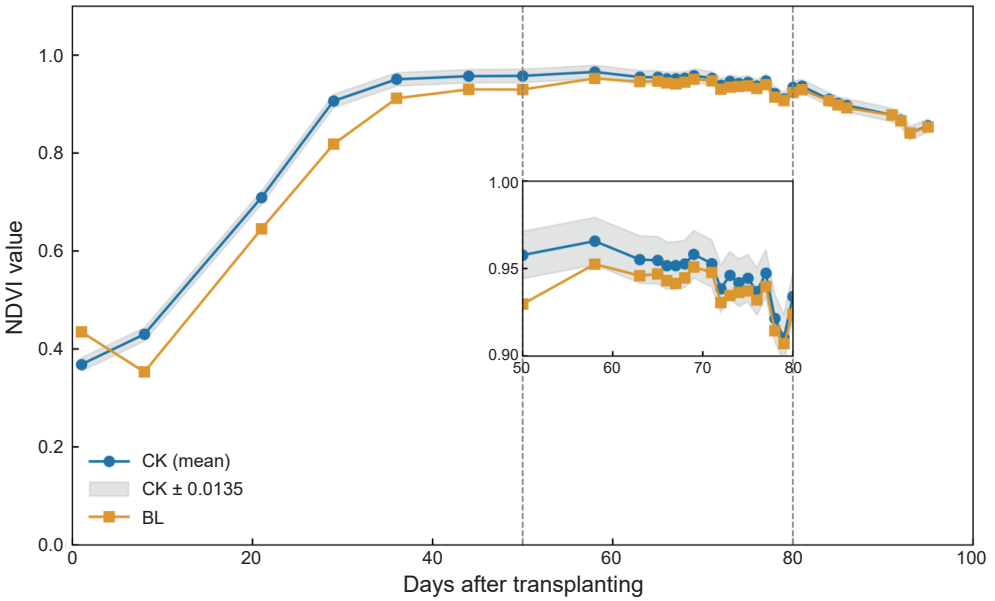


圖 4. 「台南 11 號」對照組與邊行組於全生育期間之常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index; NDVI) 變化趨勢。X 軸為插秧後天數，Y 軸為 NDVI 數值。藍線表示對照組 (CK) 之平均 NDVI，灰色區域為自然變異閾值範圍 (± 0.0135)；橘線為邊行組 (BL) 之 NDVI。虛線為計算自然變異閾值所採用之時間範圍 (50–80 d after transplanting; DAT)。圖中另嵌入局部放大圖，以突顯該期間兩組之 NDVI 細部變化。

Fig. 4. Temporal trends of normalized difference vegetation index (NDVI) for the control group and rice near border throughout the growth period of 'Tainan 11'. The x-axis represents days after transplanting, and the y-axis indicates NDVI values. The blue line shows the mean NDVI of the control group (CK), and the shaded gray area represents the natural variation threshold (± 0.0135); the orange line represents the NDVI of rice near border. Dashed lines indicate the time range (50–80 d after transplanting; DAT) used to calculate the natural variation threshold. An inset panel highlights the detailed NDVI differences between the two groups during this period.

能之受害狀況，並未對試驗組水稻進行危害分級。此設計係基於早期預警之應用場景出發考量，若受害狀況已明顯至可被分級，則多已失去提早介入防治之意義。統計檢定結果雖顯示各處理組間具顯著差異 (表 2)，惟受限於本研究每處理組僅設置 2 重複樣區 (n = 2)，其統計推論力相當有限。本文所呈現之配對 t 檢定結果，僅供觀察趨勢與差異方向之參考，並未據以作為支持本研究結論之依據。為補強統計推論力，本文進一步採用 bootstrap 重抽樣技術，模擬各處理組間 NDVI 分布之穩定趨勢與處理強度差異。重抽樣以對照組 NDVI 值的自然變異 (即樣本標準差 s = 0.0135) 為基礎，生成模擬分布以反映不同處理組可能出現的變異幅度。結果顯示，各處理組於重複抽樣下呈現一致且具層次之機率分布趨勢 (表 2)，顯示其與實際蟲口密度設定具一致性。雖無傳統統計檢定之顯著性支持，該結果仍提供本方法於辨識處理強度差異上的潛在可行性，亦有助於彌補小樣本設計所造成之推論限制。為提升本方法之實務應用潛力，本研究提出以本田邊行水稻當作對照組替代基準的可行性 (圖 3 與圖 4)。分析結果顯示，在本實驗設定的防治預警時期 (50–80 d after transplanting; DAT) 內，邊行組之 NDVI 數值大致落於對照組 NDVI 的 1 個樣本標準差 (± 1s) 範圍內，初步指出在目前資料量有限的情況下，對邊行組 (BL) 與對照組 (CK) 於數值表現上具有一定程度相似性，顯示其作為替代比較基準的潛力。綜上所述，本研究所提出之基於 NDVI 自然變異的判別方法，於中高蟲口密度 (> 250 insect hill^{-1}) 處理條件下展現初步可行性；此外，將本田邊行組作為田間參照標準的可能性，亦為後續實務操作提供可行的應用途徑。然而，目前整體方法

表 3. 「台南 11 號」全生育時期的植生指數二次多項式回歸模型之決定係數。

Table 3. The coefficient of determination (R^2) of the quadratic polynomial regression model for vegetation indices across the full growth period of 'Tainan 11'.

	Coefficient of determination (R^2)	
Abbreviation[z]	Replicate 1	Replicate 2
NDVI	0.93	0.94
NDRE	0.93	0.92
GNDVI	0.62	0.59
BNDVI	0.75	0.71
NDGR	0.49	0.41
NDGB	0.48	0.48
RBNDVI	0.88	0.88
GBNDVI	0.69	0.67
EVI	0.41	0.37
EVI2	0.42	0.39
SAVI	0.39	0.42
OSAVI	0.47	0.51
ARI	0.21	0.25
mARI	0.68	0.67
CVI	0.53	0.41
CCCI	0.91	0.93
CIgreen	0.76	0.77
CIrededge	0.81	0.78
GCC	0.63	0.55
LCI	0.95	0.94
MCARI	0.41	0.37
MACRI1	0.41	0.36
TCARI	0.59	0.73
SR	0.83	0.81
mSR	0.93	0.91
GLI	0.66	0.59
VARIgreen	0.14	0.16

[z] NDVI: normalized difference vegetation index; NDRE: normalized difference red edge index; GNDVI: green normalized difference vegetation index; BNDVI: blue normalized difference vegetation index; NDGR: normalized difference green-red index; NDGB: normalized difference green-blue index; RBNDVI: red-blue normalized difference vegetation index; GBNDVI: green-blue normalized difference vegetation index; EVI: enhanced vegetation index; EVI2: two-band enhanced vegetation index; SAVI: soil adjusted vegetation index; OSAVI: optimized soil adjusted vegetation index; ARI: anthocyanin reflectance index; mARI: modified anthocyanin reflectance index; CVI: chlorophyll vegetation index; CCCI: canopy chlorophyll content index; CIgreen: chlorophyll index green; CIrededge: chlorophyll index red edge; GCC: green chromatic coordinate; LCI: leaf chlorophyll index; MCARI: modified chlorophyll absorption ratio index; MCARI1: modified chlorophyll absorption ratio index 1; TCARI: transformed chlorophyll absorption ratio index; SR: simple ratio; mSR: modified simple ratio; GLI: green leaf index; VARIgreen: visible atmospherically resistant index green.

對於低蟲口密度 (< 125 insect hill^{-1}) 受害情形的辨識能力仍待強化，後續仍需進一步驗證其穩定性與通用性，以支撐其在實際監測情境中的廣泛應用。若本研究所揭示之初步成果與方法方向獲得認可，則以下 3 個發展策略應值得進一步推進與支持：首先，擬擴充試驗資料至多個生長期與年度，藉以建立具時序穩定性的 NDVI 自然變異閾值範圍，強化模型在不同生

育條件下之泛用性。其次，考慮導入空間統計方法 (如空間自相關指標與局部離群值分析等) 與自適應門檻演算法，以強化植株異常區之空間判別能力，進一步提升預警模型對田間異常分布的感知敏銳度。第三，未來將探索以空間異常偵測取代時序分析之可能性，特別是在高頻率觀測條件受限之情境中，建立以同時期樣區為基礎之異常判別架構。整體而言，本策略於近程可提供具實用性的多光譜蟲害預警參數，中程可藉使用者回報資料擴充數據庫、提升適用範圍，並於長程以空間分析取代時序分析，有效提升處理效率並降低技術成本。

引用文獻

Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, and A. R. Huete. 1995. A review of vegetation indices. Remote Sens. Rev. 13:95–120. doi:10.1080/02757259509532298

Barnes, E. M., T. R. Clarke, S. E. Richards, P. D. Colaizzi, J. Haberland, M. Kostrzewski, ... M. S. Moran, 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. *in*: Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. July 16–19, 2000. Bloomington, MN. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. Madison, WI.

Bendig, J., K. Yu, H. Aasen, A. Bolten, S. Bennertz, J. Broscheit, ... G. Bareth. 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 39:79–87. doi:10.1016/j.jag.2015.02.012

Camenzind, M. P. and K. Yu. 2024. Multi temporal multispectral UAV remote sensing allows for yield assessment across European wheat varieties already before flowering. Front. Plant Sci. 14:1214931. doi:10.3389/fpls.2023.1214931

Chen, C. N. and C. C. Cheng. 1978. The population levels of *Nilaparvata lugens* (Stål) in relation to the yield loss of rice. I. Plant Prot. Bull. Taiwan 20:197–209.

Chen, J. M. 1996. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. Can. J. Remote Sens. 22:229–242. doi:10.1080/07038992.1996.10855178

Cheng, R., T. S. Magney, D. Dutta, D. R. Bowling, B. A. Logan, S. P. Burns, ... C. Frankenberg. 2020. Decomposing reflectance spectra to track gross primary production in a subalpine evergreen forest. Biogeosciences 17:4523–4544. doi:10.5194/bg-17-4523-2020

Datt, B. 1999. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using *Eucalyptus* leaves. J. Plant Physiol. 154:30–36. doi:10.1016/S0176-1617(99)80314-9

Daughtry, C. S. T., C. L. Walthall, M. S. Kim, E. B. de Colstoun, and J. E. McMurtrey III. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. Remote Sens. Environ. 74:229–239. doi:10.1016/S0034-4257(00)00113-9

El-Shikha, D. M., E. M. Barnes, T. R. Clarke, D. J. Hunsaker, J. A. Haberland, P. J. Pinter Jr., ... T. L. Thompson. 2008. Remote sensing of cotton nitrogen status using the canopy chlorophyll content index (CCCI). Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 51:73–82. doi:10.13031/2013.24228

Ghobadifar, F., W. Aimrun, and M. N. Jebur. 2016. Development of an early warning system for brown planthopper (BPH) (*Nilaparvata lugens*) in rice farming using multispectral remote sensing. Precis. Agric. 17:377–391. doi:10.1007/s11119-015-9422-9

Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, and M. N. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sens. Environ. 58:289–298. doi:10.1016/S0034-4257(96)00072-7

Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, R. Stark, and D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sens. Environ. 80:76–87. doi:10.1016/S0034-4257(01)00289-9

Gitelson, A. A., G. P. Keydan, and M. N. Merzlyak. 2006. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. Geophys. Res. Lett. 33:L11402. doi:10.1029/2006GL026457

Gitelson, A. A., M. N. Merzlyak, and O. B. Chivkunova. 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. Photochem. Photobiol. 74:38–45. doi:10.1562/0031-8655(2001)0740038OPANEO2.0.CO2

Gitelson, A. A., A. Viña, T. J. Arkebauer, D. C. Rundquist, G. Keydan, and B. Leavitt. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. Geophys. Res. Lett. 30:1248. doi:10.1029/2002GL016450

Haboudane, D., J. R. Miller, E. Pattey, P. J. Zarco-Tejada, and I. B. Strachan. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sens. Environ. 90:337–352. doi:10.1016/j.rse.2003.12.013

Haboudane, D., J. R. Miller, N. Tremblay, P. J. Zarco-Tejada, and L. Dextraze. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. Remote Sens. Environ. 81:416–426. doi:10.1016/S0034-4257(02)00018-4

Henrich, V., C. Götze, A. Jung, C. Sandow, D. Thürkow, and C. Gläßer. 2009. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. p.16–18. *in*: Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications. March 16–19, 2009. Tel Aviv, Israel. European Association of Remote Sensing Laboratories. Strasbourg, France.

Henrich, V., G. Krauss, C. Götze, and C. Sandow. 2012. IDB-www.indexdatabase.de Entwicklung einer Datenbank für Fernerkundungsindizes: Ziele und Eigenschaften der IDB. AK Fernerkundung. Tech. Rep. Bochum, Germany. (in German)

Hibino, H. 1989. Insect-borne viruses of rice. p.209–241. *in*: Advances in Disease Vector Research. (K. F. Harris, ed.) Springer. New York. 412 pp. doi:10.1007/978-1-4612-3292-6_8

Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25:295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X

Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, and L. G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens. Environ. 83:195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Hunt, E. R., Jr., M. Cavigelli, C. S. T. Daughtry, J. E. McMurtrey III, and C. L. Walthall. 2005. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. Precis. Agric. 6:359–378. doi:10.1007/s11119-005-2324-5

Jiang, Z., A. R. Huete, K. Didan, and T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sens. Environ. 112:3833–3845. doi:10.1016/j.rse.2008.06.006

Kerkech, M., A. Hafiane, and R. Canals. 2020. Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. Comput. Electron. Agric. 174:105446. doi:10.1016/j.compag.2020.105446

Louhaichi, M., M. M. Borman, and D. E. Johnson. 2001. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. Geocarto Intl. 16(1):65–70. doi:10.1080/10106040108542184

Prasannakumar, N. R., S. Chander, and R. N. Sahoo. 2014. Characterization of brown planthopper damage on rice crops through hyperspectral remote sensing under field conditions. Phytoparasitica 42:387–395. doi:10.1007/s12600-013-0375-0

Prasannakumar, N. R., S. Chander, R. N. Sahoo, and V. K. Gupta. 2013. Assessment of brown planthopper, (*Nilaparvata lugens*) [Stål], damage in rice using hyperspectral remote sensing. Int. J. Pest Manag. 59:180–188. doi:10.1080/09670874.2013.808780

Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sens. Environ. 55:95–107. doi:10.1016/0034-4257(95)00186-7

Rouse, J. W., Jr., R. H. Haas, D. W. Deering, J. A. Schell, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA. Tech. Rep. E75-10354. Washington, DC. 390 pp.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 8:127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0

Vincini, M., E. Frazzi, and P. D'Alessio. 2008. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. Precis. Agric. 9:303–319. doi:10.1007/s11119-008-9075-z

Wang, F. M., J. F. Huang, Y. L. Tang, and X. Z. Wang. 2007. New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice. Rice Sci. 14:195–203. doi:10.1016/S1672-6308(07)60027-4

Yang, C., J. H. Everitt, J. M. Bradford, and D. Murden. 2004. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability. Precis. Agric. 5:445–461. doi:10.1007/s11119-004-5319-8

Zeng, Y., D. Hao, A. Huete, B. Dechant, J. Berry, J. M. Chen, ... M. Chen. 2022. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. Nat. Rev. Earth Environ. 3:477–493. doi:10.1038/s43017-022-00298-5

Preliminary Study on Multispectral Imaging Techniques for Early Pest Detection in Rice Production

Huai-Wen Tsao[1], Yu-Shun Huang[1], Shou-Horng Huang[2], Po-Yu Lai[3], and Ming-Hsin Lai[4,*]

Abstract

Tsao, H. W., Y. S. Huang, S. H. Huang, P. Y. Lai, and M. H. Lai. 2025. Preliminary study on multispectral imaging techniques for early pest detection in rice production. J. Taiwan Agric. Res. 74(3):317–329.

This study focuses on the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* (Stål)), a major pest in rice cultivation, and proposes an early-stage pest detection approach that integrates artificial infestation experiments with unmanned aerial vehicle-based multispectral imaging. Treatments with varying insect population densities were simulated, and rice spectral responses were monitored using multispectral imagery collected during the experiment. In this study, the term "early stage" refers to the period between the panicle initiation and heading stages, and corresponds to the typical outbreak period of brown planthopper (BPH) infestations in the second cropping season. Results showed that when the normalized difference vegetation index (NDVI) deviated from the control group by more than the natural variation range (± 1*s*), such deviation could serve as an early-warning signal with the potential to indicate the onset of BPH infestation. The feasibility of using rice plants near field borders as a substitute reference for formal control plots was also evaluated to improve the feasibility for field operation. The proposed approach provides a quantifiable basis for pest monitoring and serves as a potential alternative to traditional manual scouting in the context of smart agriculture.

Key words: Brown planthopper, Insect pest monitoring, Multispectral, Smart agriculture.

Received: April 17, 2025; Accepted: June 16, 2025.

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

[1] Project Assistants, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

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

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

[4] Research Fellow, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.