

設施內山葵氣霧耕生產之研究

林宜萱、蔡明真、陳宗禮

國立中興大學農藝學系

一、摘要

山葵(*Wasabia japonica* Matsum)為十字花科之多年生草本耐陰植物，對環境需求較特殊，因此大面積田間生產受限，無法供應市場需求導致價格偏高，高經濟價值的山葵極具潛力利用設施進行大量商業生產。本研究主要建立山葵於設施內栽培最適生長條件，進行光反應曲線獲得最適栽培之二氧化碳濃度與光量，並將山葵各部位分別收穫，分析葉片、葉柄、根莖、根部與側芽之產量，並分析山葵各部位黑芥子素與異硫氰酸烯丙酯之含量，評估設施內山葵生產的經濟效益。根據光反應曲線及葉綠素螢光特性，山葵可適合生長於二氧化碳濃度 800 ppm，及光量 228 ~ 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的控制環境中。山葵在此生長環境下以氣霧耕栽培 12 個月，平均每個月單株可生產 187.5 g 鮮重葉片、665.5 g 鮮重葉柄、183.8 g 鮮重根、125.3 g 鮮重根莖以及 12.81 g 鮮重側芽，其中葉片為每公克鮮重含 0.51 g 黑芥子素，葉柄為每公克鮮重含 0.22 g 黑芥子素，根部為每公克鮮重含 0.32 g 黑芥子素，根莖為每公克鮮重含 1.56 g 黑芥子素，側芽為每公克鮮重含 1.63 g 黑芥子素，所測得的異硫氰酸烯丙酯以根莖每公斤鮮重含 1840 mg 最高，雖然山葵根莖為主要利用部位，但葉片與葉柄占全株約 75% 鮮重，可考慮利用葉片葉柄，提升利用效率。

關鍵字：山葵；發光二極體；氣霧耕栽培

二、前言

山葵(*Wasabia japonica* Matsum)為十字花科之多年生草本植物，其具有辛辣味的根莖(rhizome)常被用於製造調味品，於日本、中國、紐西蘭與台灣均有栽培(Sultana *et al.*, 2003b)。山葵性喜陰涼多濕之環境下生長，生育溫度為 8 ~ 18°C，最適溫度則為 12 ~ 15°C，夏季氣溫平均超過 23°C 時較不適宜栽培(胡，2006)。

山葵全株可分為葉片(leaf)、葉柄(petiole)、根莖、根部(root)與側芽(axillary bud)。山葵全株均可利用，品質著重在香味、辛味、甘味(sweetish)及外觀等特性(胡等,1992)，山葵根莖供鮮食用，根莖具有甘味、鮮味(fresh)與辛辣味(pungent)，根部風味類似於根莖，葉片辣而苦澀，葉柄甜且溫和；山葵葉片、葉柄多用於加工，根莖是其最具有經濟價值之部位，其異硫氰酸酯(isothiocyanates, ITCs)含量較其他部位顯著為高，山

葵特殊風味主要來自異硫氰酸酯，辛辣味最主要來自異硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate, AITC)，山葵之異硫氰酸烯丙酯可達全株異硫氰酸酯含量之 89 ~ 94%。異硫氰酸酯除了增添食物的風味外，也常用於醫藥上，已知可預防癌症與抗癌(anti-cancer)，作為抗細菌(anti-bacterial)與抗真菌藥(anti-fungal) (Márton *et al.*, 2013; Sultana *et al.*, 2003a)，異硫氰酸酯與其前驅物硫配糖體(glucosinolates, GSLs)之含量受環境、栽培方法、收穫後保存與加工方式等影響。

山葵在台灣與日本產區均因黑心病嚴重，致可供鮮食比率僅 30 ~ 40% 左右，對農民收益影響甚鉅(胡等, 1992)，又多數農民採連作，山葵遭受病害問題日漸嚴重(羅等, 2000)。山葵黑心病菌(*Phomawasabiae* Yokogi)可危害山葵全株，包括葉片、葉柄、根莖及花軸，根莖及鬚根被害時，表皮呈不規則黑色病斑，剖開內部，可見維管束呈延伸性之黑化條斑。台灣主要山葵栽培區為阿里山鄉，但由於阿里山鄉多屬國有林地，私有地甚少，農民大多在國有林地下耕種，早期政府將山葵視為森林副產物管理，新植一經發現立即剷除，但濫植情形仍繼續擴大，至民國 86 年，林務局決定請濫植人將濫植山葵自行採收並拆除一切設施後，林地收歸林務局(林, 2001)，現今由於黑心病盛行，避免連作而暫時休耕也迫使耕地未再使用被政府收回，使山葵耕地面積逐年減少。

由於山葵對環境要求較嚴苛，屬亞熱帶地區之台灣能栽培山葵的地區很少，且田間黑心病盛行也無法進行連作，若使用密閉型設施栽培(closed plant production system)可持續產出並免於遭受黑心病危害，且可控制環境因子如溫度、光量及二氧化碳等來因應山葵對環境之需求，且環控設施水耕或氣霧栽培作物已有許多研究指出可促進營養生長、提升產量與品質(quality)等(Ritter *et al.*, 2001; Farranet *et al.*, 2006; Hayden. 2006; Palermo *et al.*, 2011)。山葵在田間栽培需耗時一年半至兩年才可收穫根莖，Sultana *et al.*(2002)於紐西蘭溫室中栽培之山葵其葉柄占全株鮮重約 60%，葉片與根莖約佔全株鮮重 20%，若能在收穫根莖前收穫葉片與葉柄等進行加工可提高其經濟效益。

本研究主要建立山葵於設施內栽培最適生長條件，進行葉綠素螢光分析作為光合作用活性，進行光反應曲線獲得最適栽培之二氧化碳濃度與光量，並將山葵各部位分別收穫，分析葉片、葉柄、根莖、根部與側芽之產量，並分析山葵各部位黑芥子素與異硫氰酸烯丙酯之含量，評估設施內山葵生產的經濟效益。

三、材料與方法

3.1 試驗材料種植

山葵材料為臺農一號/真妻組織培養苗，組培苗定植於馴化培養室，以養液馴化至少 3 星期，再移入植物工場生長室以氣霧栽培，進行生育期的評估。馴化培養室設定的溫度，日溫 25°C，夜溫設為 20°C；二氧化碳濃度設為 600 ppm；光強度為 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，光期則依生長速率調整。馴化培養後置於育苗養成室集中培育，等植株密度

夠大再移至生長室。

3.2 氣霧耕栽培

氣霧耕栽培中各栽培槽的養液供應主要透過噴霧時間和間歇時間調整，達到養液最適供應量。養液配方參考 Hoagland 養液(Hoagland and Arnon, 1950)與台中改良場萵苣配方修改而來。養液 A (control)主要成分為硝酸鈣($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、硝酸鉀(KNO_3)、硝酸銨(NH_4NO_3)、螯合鐵(Fe-EDTA)，硫酸鉀(K_2SO_4)、硫酸鎂($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、磷酸二氫鉀(KH_2PO_4)、硫酸錳($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、硫酸鋅($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、硼酸(H_3BO_3)、硫酸銅($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)與鉬酸鈉($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)， $\text{EC} = 0.5 \text{ ms cm}^{-1}$ 時，總溶質潛勢約 0.028 MPa。使用氣霧栽培，噴霧時間停 8 分噴 70 秒，養液 EC 值設定為 0.5 ms cm^{-1} ，pH 值為 6~7 之間。養液 B (+N+S)相較於養液 A 處理提高 N 為 1.37 倍，K 為 1.21 倍，Ca 為 1.26 倍，S 為 1.31 倍。試驗中未特別提出以何種養液栽培者皆為養液 A 處理。

3.3 栽培生長室最佳環控條件組合

山葵組培苗於不同光量下馴化，測定葉綠素與過氧化氫含量，葉綠素含量根據 Winternans and De Mots (1965)之方法修飾，過氧化氫含量根據 Jana and Choudhuri (1981)之方法修飾；進行葉綠素螢光分析作為光合作用活性，尋找最適馴化光量。光合作用速率與光反應曲線使用光合作用分析儀(CIRAS-2, portable photosynthesis system, PP systems)與攜帶型光合作用測量系統(LI-6400, LI-COR)夾取山葵成熟葉片，測量山葵在二氧化碳濃度 400、800 及 1200 ppm，光量 100、300、500、900、1300 和 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之光合作用速率並繪製光反應曲線。葉綠素螢光以攜帶式葉綠素螢光測定儀(portable chlorophyll fluorometer, mini-pam, Walz, Germany)測定葉綠素螢光。以 10 葉齡山葵為材料，進行光反應曲線、二氧化碳反應曲線、養分吸收反應曲線以及溫度(日、夜、根溫)生長函數，尋求環控條件最佳化組合，應用於生長室，以達到山葵栽培最大生產潛能。

四、結果與討論

4.1 設施內山葵最適栽培光量與二氧化碳濃度

為了解山葵對光能的捕捉利用效率及設施內最適之二氧化碳濃度，於定植後約 5 個月時，在二氧化碳濃度 400、800 及 1200 ppm，光量 100、300、500、900、1300 和 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 進行光合作用速率測定，以獲得光反應曲線(圖一)，後可經由曲線算出在二氧化碳濃度 400 ppm 下，最大光合作用速率(maximum photosynthetic rate, V_{max})為 13.63 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $1/2 V_{\text{max}}$ 為 6.81 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， K_m 值為 422.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，也就是欲達到最大光合作用速率之一半時需要光量 422 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，起始斜率(initial slope)為 0.029 $\text{CO}_2 \text{ photon}^{-1}$ ；二氧化碳濃度為 800 ppm 下， V_{max} 為 18.62 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $1/2 V_{\text{max}}$ 為 9.31 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，欲達到最大光合作用速率之一半時需

要光量 $228 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，起始斜率 $0.054 \text{ CO}_2 \text{ photon}^{-1}$ ；二氧化碳濃度為 1200 ppm 下， V_{max} 為 $20.72 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ， $1/2 V_{\text{max}}$ 為 $10.36 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，欲達到最大光合作用速率之一半時需要光量 $298 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，起始斜率 $0.046 \text{ CO}_2 \text{ photon}^{-1}$ (表一)。

山葵在二氧化碳濃度 800 ppm 與 1200 ppm 的環境下，在光量 100 與 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時光合作用速率均顯著高於 400 ppm ($P \text{ value} < 0.05$)，而在其他光量 500 、 900 、 1300 和 $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下之光合作用速率則與 400 ppm 無顯著差異。由於山葵在二氧化碳濃度 800 ppm 與 1200 ppm 之光合作用速率(圖一)、最大光合作用速率與起始斜率無明顯差異(表一)，故認為設施內二氧化碳 800 ppm 即可，不需達到 1200 ppm ，由於光量受設施層架高度與電費等限制，無法達到高光量，為使植株光合作用速率至少達到最大光合作用速率之一半，栽培光量高於 $228 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 為佳。

將定植 5 個月之山葵植株分別置於 100 、 250 與 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 三個光量照射下進行葉綠素螢光測定，可獲得光照下最小螢光值(minimal fluorescence, F_o')、光照下最大螢光值(maximal fluorescence, F_m')、PSII 光量子產量(quantum yield of PSII, ΦPSII) 與非光化學消散(non-photochemical quenching, NPQ)。 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之 F_o' 值為 0.313 ， F_m' 值為 0.937 ， ΦPSII 為 0.664 ，NPQ 為 0.736 ； $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 F_o' 值為 0.308 ， F_m' 值為 0.879 ， ΦPSII 為 0.649 ，NPQ 為 0.752 ； $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 F_o' 值為 0.336 ， F_m' 值為 0.832 ， ΦPSII 值為 0.595 ，NPQ 值為 0.766 (表二)。

100 、 250 與 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 三個光量下之 F_o' 值沒有顯著差異； $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 F_m' 值顯著高於 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ， $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 F_m' 值顯著高於 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； 100 與 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 ΦPSII 值顯著高於 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ； $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照下之 NPQ 值顯著高於 100 與 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (表二)。由表一與圖一可知栽培光量需高於 $228 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 為佳，表二可知 100 與 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 為較適當之栽培光量，綜合以上結果，本研究認為栽培光量在 $228 \sim 400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 較為適合。

4.2 山葵之植株性狀調查

山葵定植 1 月時葉片數為 6.0 片，定植 2 月為 10.5 片，定植 3 月為 19.8 片，定植 4 月為 29.5 片，定植 5 月為 48.9 片，定植 6 月為 59.6 片，定植 7 月為 69.9 片，定植 8 月為 83.9 片，定植 9 月為 115.9 片，定植 10 月為 147.9 片，定植 11 月為 170.3 片，定植 12 月為 201.5 片(表三)。

株高在定植 1 月時為 9.3 公分，定植 2 月為 15.1 公分，定植 3 月為 18.8 公分，定植 4 月為 23.9 公分，定植 5 月為 30.0 公分，定植 6 月為 32.5 公分，定植 7 月為 35.8 公分，定植 8 月為 37.4 公分，定植 9 月為 38.4 公分，定植 10 月為 39.3 公分，定植 11 月為 38.8 公分，定植 12 月為 39.5 公分，受限於設施內層架高度，株高可能已至極限(表三)。

山葵全株與各部位鮮重均逐月提升(表四)，全株鮮重定植 6 月時 404.6 公克，定植 7 月時 457.2 公克，定植 8 月時 757.9 公克，定植 9 月時 938.0 公克，定植 10 月時 1148.3 公克，定植 11 月 1274.25 公克 (表四)。定植 4 個月時已有根莖形成，根莖鮮

重定植 6 月時 38.8 公克，定植 7 月時 41.6 公克，定植 8 月時 61.9 公克，定植 9 月時 80.4 公克，定植 10 月時 89.6 公克，定植 11 月 105.6 公克 (表四)。葉片鮮重定植 6 月時 117.6 公克，定植 7 月時 137.1 公克，定植 8 月時 187.6 公克，定植 9 月時 207.7 公克，定植 10 月時 257.1 公克，定植 11 月 242.7 公克。葉柄鮮重定植 6 月時 198.8 公克，定植 7 月時 207.2 公克，定植 8 月時 399.0 公克，定植 9 月時 483.2 公克，定植 10 月時 597.0 公克，定植 11 月 687.1 公克 (表四)。根部鮮重定植 6 月時 44.5 公克，定植 7 月時 65.9 公克，定植 8 月時 100.1 公克，定植 9 月時 155.4 公克，定植 10 月時 195.2 公克，定植 11 月 229.2 公克。分芽鮮重定植 6 月時 4.96 公克，定植 7 月時 5.42 公克，定植 8 月時 9.34 公克，定植 9 月時 11.25 克，定植 10 月時 9.37 公克，定植 11 月 9.63 公克。

本設施內栽培之山葵定植 12 月後全株鮮重已至 1274.3 公克，葉片鮮重 187.5 公克，葉柄鮮重 665.5 公克，根部鮮重 183.8 公克，根莖鮮重 125.3 公克，分芽鮮重 12.51 公克，可知全株鮮重中占最高比例為葉柄鮮重(52.2%)，其次為葉片(14.8%)、根部(14.4%)，再來為根莖(9.8%)，最後為分芽(1.0%)。

4.3 設施內山葵之成分

山葵全株均可利用，其品質著重在香味、辛味、甘味及外觀等特性(胡等，1992)，山葵特殊風味主要來自異硫氰酸酯，辛辣味最主要來自異硫氰酸烯丙酯，以其前驅物黑芥子素含量作為一指標。山葵組培苗馴化四周後，定植於設施內進行氣霧耕栽培，環境設定如材料方法中所示，定植 6 個月後開始進行植株各部位黑芥子素分析(表五)。

植株各部位鮮重之黑芥子素含量部分(表五)，定植 6 月葉柄黑芥子素含量為 0.27 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.16 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.04 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 0.53 mg g⁻¹ FW，因沒有取樣到側芽故無側芽黑芥子素含量資料，定植 6 月之根莖黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)最高，其次為葉柄，葉片與根部含量無顯著差異。定植 7 月葉柄黑芥子素含量為 0.07 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.28 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.09 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 1.5 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 0.29 mg g⁻¹ FW，定植 7 月之根莖黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)最高，其次為葉片，側芽含量與葉片、葉柄及根部無顯著差異，根部與葉柄含量最低。定植 8 月葉柄黑芥子素含量為 0.19 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.36 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.10 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 1.63 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 0.22 mg g⁻¹ FW，定植 8 月之根莖黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)最高，其次為葉片，再來為側芽，側芽與葉柄含量無顯著差異，根部含量最低。定植 9 月之葉柄黑芥子素含量為 0.5 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.58 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.44 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 3.13 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 1.50 mg g⁻¹ FW，定植 9 月之根莖黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)最高，其次為側芽、葉片與葉柄，葉片與葉柄含量與根部無顯著差異。定植 10 月之葉柄黑芥子

素含量為 0.48 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.59 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.6 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 2.8 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 9.93 mg g⁻¹ FW，定植 10 月之根莖黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)均顯著高於側芽、葉柄與葉片。定植 11 月之葉柄黑芥子素含量為 0.86 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.14 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.09 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 2.40 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 2.11 mg g⁻¹ FW；定植 12 月之葉柄黑芥子素含量為 0.22 mg g⁻¹ FW，葉片黑芥子素含量為 0.51 mg g⁻¹ FW，根部黑芥子素含量為 0.32 mg g⁻¹ FW，根莖黑芥子素含量為 1.56 mg g⁻¹ FW，側芽黑芥子素含量為 1.63 mg g⁻¹ FW；定植 12 月之之根莖與側芽黑芥子素含量(mg g⁻¹ FW)均顯著高於葉柄、葉片與葉柄。

另將山葵各部位進行異硫氰酸烯丙酯含量分析，得到葉片異硫氰酸烯丙酯平均含量為 585.10 mg kg⁻¹ FW，葉柄異硫氰酸烯丙酯平均含量為 243.92 mg kg⁻¹ FW，根莖異硫氰酸烯丙酯平均含量為 1840.35 mg kg⁻¹ FW，根部異硫氰酸烯丙酯平均含量為 212.61 mg kg⁻¹ FW，側芽異硫氰酸烯丙酯平均含量為 972.06 mg kg⁻¹ FW (表六)，根莖之異硫氰酸烯丙酯含量最高，其次為側芽、葉片與葉柄，根部最低。

五、結論

本研究指出山葵以密閉型設施加上氣霧栽培可提升山葵產量，並加快山葵生長速度，且不會受到病蟲危害導致產量降低，每月可收穫地上部之葉片葉柄產出以增加經濟收益。綜合年度試驗結論如下：

1. 已成功建立植物工場內山葵氣霧耕栽培生產技術一套，可供生產業者應用。
2. 建立植物工場山葵正常生長的環控參數，提供植物工場生產業者引用。
3. 未來需建立養液回收系統並利用自然光以降低水電等成本耗費。
4. 持續找出山葵在室內栽培降低成本及提高產量與品質之栽培模式。

六、參考文獻

1. 胡敏夫。2006。山葵。台灣農家要覽農作篇(二)。行政院農業委員會。pp. 287-294。
2. 胡敏夫、王昭月、劉慧瑛。1992。臺灣主要山葵栽培品種(系)間品質之評價。中華農藝研究。41: 35-42。
3. 羅朝村、王貴美。2000。台灣山葵地上部之真菌病害種類與發生調查。植物病理學會刊。9: 17-22。
4. Farran, I. and A. M. Mingo-Castel. 2006. Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. Am. J. Potato Res. 83: 47-53.
5. Hayden, A. L. 2006. Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome,

and root crops. *HortScience* 41: 536-538.

6. Hoagland, D. R. and D. I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agr. Expt. Sta. Circ.* 347:1-32.
7. Jana, S. and M. Choudhuri. 1981. Glycolate metabolism of three submerged aquatic angiosperms during aging. *Aquat. Bot.* 12: 345-354.
8. Márton, M. R., A. Krumbein, S. Platz, M. Schreiner, S. Rohn, A. Rehmers, V. Lavric, V. Mersch-Sundermann, and E. Lamy. 2013. Determination of bioactive, free isothiocyanates from a glucosinolate-containing phytotherapeutic agent: A pilot study with in vitro models and human intervention. *Fitoterapia* 85: 25-34.
9. Palermo, M., R. Paradiso, S. D. Pascale, and V. Fogliano. 2011. Hydroponic cultivation improves the nutritional quality of soybean and its products. *J. Agric. Food Chem.* 60: 250-255.
10. Ritter, E., B. Angulo, P. Riga, C. Herran, J. Relloso, and M. S. Jose. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Res.* 44: 127-135.
11. Sultana, T., D. L. McNeil, N. G. Porter, and G. P. Savage. 2003a. Investigation of isothiocyanate yield from flowering and non-flowering tissues of wasabi grown in a flooded system. *J. Food Comp. Anal.* 16: 637-646.
12. Sultana, T., N. G. Porter, G. P. Savage, and D. L. McNeil. 2003b. Comparison of isothiocyanate yield from wasabi rhizome tissues grown in soil or water. *J. Agric. Food Chem.* 51: 3586-3591.
13. Sultana, T., G. P. Savage, D. L. McNeil, and N. G. Porter. 2002. Effects of fertilization on the allyl isothiocyanate profile of above-ground tissues of New Zealand-grown wasabi. *J. Sci. Food Agric.* 82: 1477-1482.
14. Wintermans, J. F. and A. De Mots. 1965. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their pheophytins in ethanol. *Biochim. Biophys. Acta.* 109: 448-453.

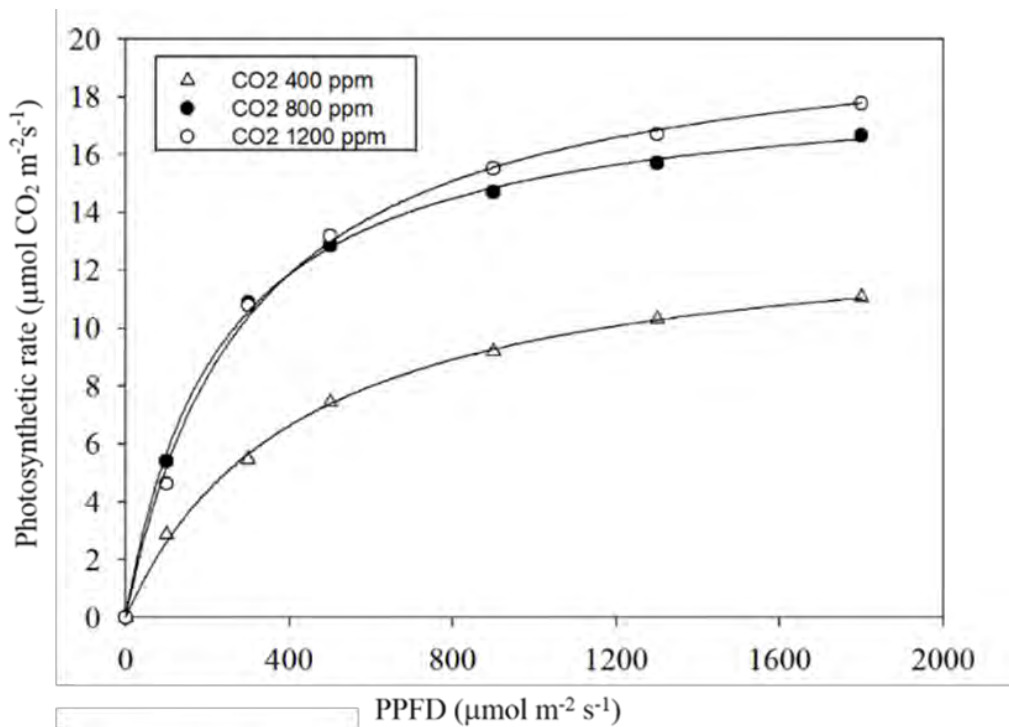


圖 1 山葵在不同二氧化碳濃度下之光反應曲線

表 1 山葵在不同二氧化碳下光反應特性

CO ₂ (ppm)	Vmax (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1/2 Vmax (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Km (µmol m ⁻² s ⁻¹)	Initial slope (CO ₂ photon ⁻¹)
400	13.63	6.81	422.2	0.029 b
800	18.62	9.31	227.9	0.054 a
1200	20.72	10.36	297.9	0.046 a

山葵定植 5 個月後進行光合作用速率測定。以最小顯著差異測驗法(Fisher's least significant difference method, LSD)進行不同二氧化碳濃度下光反應特性之比較，不同字母表示具有顯著差異(P value < 0.05)。

表 2 山葵光照下之葉綠素螢光特性

Light intensity (µmol m ⁻² s ⁻¹)	Fo'	Fm'	ΦPSII	NPQ
100	0.313	0.937 a	0.664 a	0.736 c
250	0.308	0.879 b	0.649 a	0.752 b
400	0.336	0.832 c	0.595 b	0.766 a

定植 5 個月後進行不同光量照射下之葉綠素螢光測定。以最小顯著差異測驗法(Fisher's least significant difference method, LSD)進行不同光量照射下光照下最小螢光值(minimal fluorescence, Fo')、光照下最大螢光值(maximal fluorescence, Fm')、PSII 光量子產量(quantum yield of PSII, ΦPSII)及非光化學消散(non-photochemical quenching, NPQ)之比較，不同字母表示具有顯著差異(P value < 0.05)。

表 3 山葵定植後葉片數、株高

定植後時間(月)	葉片數(片)	株高(公分)
0 個月	5.4 ± 0.97	8.29 ± 1.07
1 個月	6.0 ± 0.82	9.31 ± 1.05
2 個月	10.5 ± 2.17	15.13 ± 2.84
3 個月	19.8 ± 3.88	18.75 ± 2.63
4 個月	29.5 ± 6.85	23.9 ± 3.48
5 個月	48.9 ± 13.69	30.04 ± 2.5
6 個月	59.6 ± 18.07	32.49 ± 1.89
7 個月	69.9 ± 48.71	35.84 ± 1.65
8 個月	83.9 ± 39.95	37.42 ± 6.17
9 個月	115.9 ± 49.51	38.42 ± 4.20
10 個月	147.9 ± 60.55	39.25 ± 6.67
11 個月	170.3 ± 59.08	38.77 ± 4.77
12 個月	201.5 ± 44.31	39.54 ± 8.89

表 4 山葵植株各部位鮮重

定植後 時間(月)	葉片鮮重 (公克)	葉柄鮮重 (公克)	根部鮮重 (公克)	莖部鮮重 (公克)	分芽鮮重 (公克)	全株鮮重 (公克)
6 個月	117.6 ± 55.45	198.8 ± 118.7	44.5 ± 22.7	38.8 ± 20.6	4.96 ± 8.75	404.6 ± 211.6
7 個月	137.1 ± 104.6	207.2 ± 170.8	65.9 ± 38.9	41.6 ± 38.7	5.42 ± 7.24	457.2 ± 343.3
8 個月	187.6 ± 54.2	399.0 ± 100.7	100.1 ± 23.7	61.9 ± 28.5	9.34 ± 2.42	757.9 ± 225.9
9 個月	207.7 ± 74.1	483.2 ± 97.3	155.4 ± 41.5	80.4 ± 18.3	11.25 ± 6.88	938.0 ± 147.2
10 個月	257.1 ± 94.3	597.0 ± 110.2	195.2 ± 33.6	89.6 ± 25.6	9.37 ± 7.01	1148.3 ± 413.0
11 個月	242.7 ± 64.6	687.1 ± 178.7	229.2 ± 30.7	105.6 ± 30.7	9.63 ± 8.21	1247.2 ± 243.5
12 個月	187.5 ± 45.3	665.5 ± 132.2	183.8 ± 30.6	125.3 ± 29.3	12.81 ± 10.25	1274.3 ± 322.5

表 5 設施栽培山葵之黑芥子素含量

定植月數	葉柄	葉片	根部	根莖	側芽
黑芥子素含量(mg g ⁻¹ FW)					
6	0.27 b	0.16 bc	0.04 c	0.53 a	-
7	0.07 c	0.28 b	0.09 c	1.50 a	0.29 bc
8	0.19 cd	0.36 b	0.10 d	1.63 a	0.22 c
9	0.50 bc	0.58 bc	0.44 c	3.13 a	1.50 b
10	0.48 b	0.59 b	0.60 b	2.80 a	0.86 b
11	0.14 b	0.32 b	0.09 b	2.40 a	2.11 a
12	0.22 b	0.51 b	0.32 b	1.56 a	1.63 a

山葵馴化 4 周後定植，在二氧化碳 800 ppm，光量 300 μmol m⁻² s⁻¹ 下生長，以最小顯著差異測驗法(Fisher's least significant difference method, LSD)進行同一月份不同部位黑芥子素含量之比較，不同字母表示具有顯著差異(P value < 0.05)。

表 6 設施栽培山葵之異硫氰酸烯丙酯含量

定植月數	異硫氰酸烯丙酯含量(mg kg ⁻¹ FW)				
數	葉片	葉柄	根莖	根部	分芽
9	811.19	210.91	2173.67	403.23	743.67
10	395.75	210.09	1400.81	72.05	1317.52
11	548.36	310.77	1946.58	162.56	854.99
平均	585.10±129.52	243.92±44.03	1840.35±260.7	212.61±62.14	972.06±248.47