

# 以高通量表型體分析比較不同青花菜品種 逆境耐受性<sup>1</sup>

李杏芳<sup>2</sup>、林貞余<sup>3</sup>

## 摘 要

李杏芳、林貞余。2025。以高通量表型體分析比較不同青花菜品種逆境耐受性。臺南區農業改良場研究彙報 85：43-57。

為了蒐集青花菜在溫暖季節種植時，完整生長季的外觀和生理參數，作為耐逆境選拔的參考，本試驗以 4 個青花菜品種進行高通量表型體分析 (High-throughput phenotyping, HTP)，結果顯示傳統手測與機器自動掃描在青花菜生質量上具有高度相關性 ( $r > 0.89$ )。當溫度高於生長適溫時，日均溫與常態化差值植生指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、常態化色素葉綠素比率指數 (Normalized Pigments Chlorophyll Ratio Index, NPCI) 呈現負相關，這表示日均溫愈高，植冠葉綠素含量愈低，健康情況愈不佳。每日降雨量大於 40 mm 時，NDVI 及 NPCI 與降雨量是達顯著性負相關，這表示每日降雨量大於 40 mm 時，青花菜健康情況差。

**現有技術：**傳統外表型分析方式往往基於人工觀察和描述，容易受到觀察者的主觀偏見影響且費時費力。

**創新內容：**透過高通量表型體分析平台可快速的取得大量且精準的植物外表型分析結果。

**對產業影響：**種苗業者以高通量表型體分析平台協助進行育種工作時，能省時省力且客觀的分析大量外表型數據。

**關鍵字：**青花菜、高通量表型體分析、數位生質量

接受日期：2025 年 1 月 20 日

---

1. 農業部臺南區農業改良場研究報告第 581 號。

2. 農業部臺南區農業改良場助理研究員。712009 臺南市新化區牧場 70 號。

3. 亞蔬－世界蔬菜中心助理研究員。

## 前 言

植物外表型分析是一種對植物形態、構造、外觀特徵、生長型態和習性的研究方法，可以幫助植物學家更好的理解植物的生長、遺傳特性、適應性和演化。慣行的作物外表型分析方式往往基於人工觀察和描述，容易受到觀察者的主觀偏見影響，不同人可能會對複雜的特徵給出不同描述，這可能導致分析結果的不一致性，例如：對顏色的判斷，單就綠色就有多種說法。且人工觀察及記錄的過程需要大量時間與勞力，當面對大量的植物外表型數據時，傳統的人工分析方法常出現難以負荷的窘境。此外，有些調查項目為破壞式的取樣，例如收穫部位的產量及品質分析，導致無法取得連續性的結果。

為了快速的取得及分析大量且精準的植物外表型分析結果，近年發展出高通量表型體分析 (High-throughput phenotyping, HTP) 平台。高通量 (High Throughput) 是指在相對較短的時間內，能夠進行大規模實驗，並分析所產生的資訊<sup>(19)</sup>。此分析平台整合植物學、育種學、作物生理學、影像辨識技術以及環境控制溫室等專業知識，運用各種感測器和偵測器，透過這種高通量的影像擷取，快速捕捉大量的植物外觀及生理資訊，這些影像後續再進行 3D 建模、影像分割、特徵擷取及人工智慧學習等工作，分析待測植株的外觀特徵和植生指數，以達到節省人力、客觀且精準的篩選種原或選拔育種材料的目標<sup>(1,2,3,16)</sup>。目前高通量外表型分析平台在國際上已成為商業或研究團隊常用的工具，依建置規模及測量方式可區分為三類型：(1) 嚴格控制條件下的溫室或生長箱外表型分析平台：適用於模式作物或具代表性作物，以精確的控制環境因素，探討植物的環境適應機制，說明其遺傳影響性。例如 Ge 等人建立可見光和高光譜成像室，除了量化玉米的葉子含水量外，還分析植株生長和生育期用水動態<sup>(14)</sup>。(2) 田間地面型外表型分析平台：大多數作物育種工作是在田間進行，室內環境只能模擬而無法真實呈現實際環境，但田間容易受天氣、土壤、生物性和非生物性逆境影響，使得作物表型變得複雜<sup>(35)</sup>。例如英國的 Lyra 等人建置 Field Scanalyzer 用於監測和量化小麥器官形態特徵和冠層的高度，並進一步定位數量性狀基因座 (QTL)<sup>(25)</sup>。(3) 航空、大範圍遙感外表型分析平台：與前兩類相比空中遙感外表型分析平台可以在更短時間內收集更大規模數據，但空中平台因感測器架設於飛行器上，升空容易受天氣、有效載荷及續行力限制，且飛行高度愈高，解析度愈低<sup>(16)</sup>。例如 Holman 等人以多旋翼無人機獲取的 RGB 圖像應用於研究小麥的株高及生長速度上<sup>(17)</sup>。以上三種模式各有優缺點，應以具體的試驗需求及實際應用場域為導向，建構合宜的外表型分析平台<sup>(22)</sup>。

青花菜其營養生長適溫為 20 ~ 22°C，花蕾球發育適溫則為 15 ~ 18°C<sup>(11)</sup>；青花菜花蕾球品質及產量主要受到溫度及品種決定，生長季節的平均溫度影響花蕾球形狀、緊實度及大小等<sup>(4,13)</sup>。臺灣位於亞熱帶地區，青花菜主要產區雲林縣及嘉義縣，愈南氣候愈熱，栽培季節在每年 11 月至隔年 4 月，此時月均溫 17 ~ 23°C，適合青花菜生長。5 月之後，氣溫愈來愈高，再加上 5 月為梅雨季節，青花菜對降雨敏感，高溫多雨的環境不利於青花菜生長<sup>(28)</sup>。因此，每年 5 月至 10 月仰賴國外進口青花菜，以供應國內需求。近 20 年青花菜進口量逐年遞增，年增長率為 5.68%。為了提高青花菜自給率，延長產季，在高溫多濕環境下選拔耐熱、早熟、花球品質佳青花菜種原，是因應國內青花菜產業需求之必要措施。

亞蔬－世界蔬菜中心 (World Vegetable Center, WorldVeg) 正位於北回歸線以南，氣溫較產區溫暖，適合觀察青花菜溫暖季節的生長表現。而且亞蔬 - 世界蔬菜中心擁有全台第一座

田間地面型高通量外表型分析平台，可全日非破壞性的自動量測作物在田間的外觀特徵及植生指數。此設備引自荷蘭 Phenospex 公司，所搭載之感測器 (Sensors) 為 PlantEye F500，2022 年本場與亞蔬－世界蔬菜中心合作利用此系統進行試驗，為了蒐集青花菜在溫暖季節時植株外觀和生理參數，作為耐逆境選拔的參考，本試驗以 4 個青花菜品種進行高通量表型體分析，探討不同品種 (系) 青花菜在溫暖季節 (3 月至 6 月) 的生長差異。

## 材料與方法

### 一、試驗材料及田區設計

試驗材料為 4 個品種 (系) 的青花菜，分別為 ‘B35’、‘綠寶’、‘42’ 及 ‘AVBR04’，試驗時分別標註為 BR01、BR02、BR03 及 BR04。‘B35’ 為早生耐熱青花菜品種，定植後約 35 ~ 45 天可收穫，球重約 200 ~ 300 公克；‘綠寶’ 定植後至成熟約 70 ~ 75 天可收穫，為加工用品種，球重約 600 公克；‘42’ 為阪田耐熱品種，是臺灣主要的鮮食品種，約 65 ~ 70 天可收穫，球重約 400 ~ 500 公克；‘AVBR04’ 為亞蔬－世界蔬菜中心新育成早生耐熱青花菜品系，約 60 ~ 65 天可收穫，球重約 400 ~ 500 公克。種植時採作畦栽培，畦溝中心距 1.5 公尺，畦面寬 70 公分，單行種植，株距 50 公分，一試驗單位 5 株，3 重複，採完全隨機設計 (completely random design, CRD)。畦面鋪覆黑色透氣抑草蓆，以利於後續影像處理。試驗之青花菜分 4 批定植，比較 4 個青花菜品種 (系) 在溫暖季節 (3 月至 6 月) 的生長表現，第一批於 3 月 29 日定植，之後每隔 2 週定植一批，圖 1 為每批青花菜定植及終止試驗的時間示意圖。

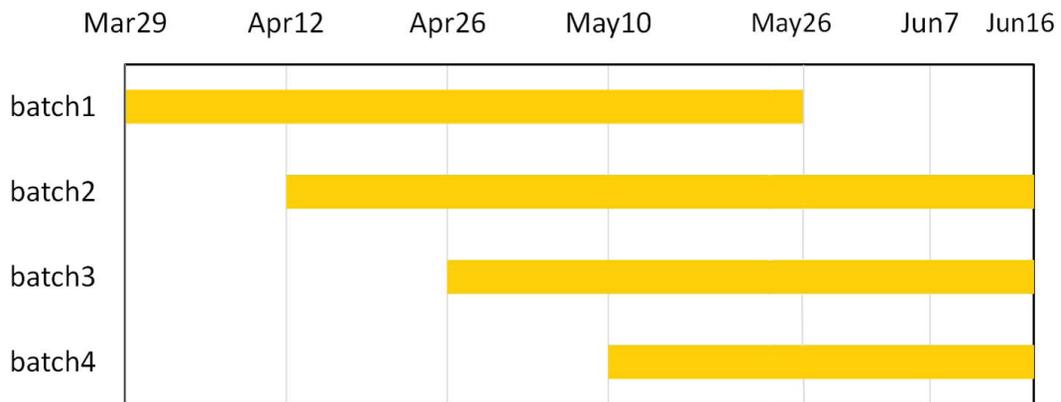


圖 1. 青花菜定植與終止試驗的時間示意圖。第 1 批於 3 月 29 日定植，之後每隔 2 週定植一批。每一批 3 重複

Fig. 1. Time diagram of broccoli transplanting and stopping test. We transplanted four batches with two week spacings between each other. The first batch was transplanted on March 29, 2022. Each batch has 3 replications

### 二、高通量數據收集

青花菜外表型數據利用亞蔬－世界蔬菜中心田間地面型高通量表型體分析平台，龍門 (Gantry) 上架設兩個三維雷射掃描器 (PlantEye F500, Phenospex, Heerlen, The

Netherlands)，一左一右掃描同一植株，解決上位葉影像遮蔽的問題，龍門沿著軌道移動，自動掃描及收集作物影像，形成三維點雲圖，之後再將影像轉化為可量化數據。PlantEye F500 可掃描影像後轉換為許多植物生長參數，例如：株高 (Plant height)、葉面積 (Leaf area)、數位生質量 (Digital biomass) 等性狀，亦可量測可見光與近紅外光的光譜反射率，收集特定波長的反射率推算特殊植生指數，例如：常態化差值植生指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、常態化色素葉綠素比率指數 (Normalized Pigments Chlorophyll Ratio Index, NPCI)、植物衰老反射指數 (Plant Senescence Reflectance Index, PSRI)。

#### (一) 數位生質量

數位生質量是植物的體積參數，並假設植物外觀具有規則性，Phenospex 針對數位生質量的計算方式是以植物的總表面積乘以植物高度，單位為  $\text{mm}^3$ 。植物的總表面積是將掃描點網格化之後，再總和所有網格面積。植物高度的計算方式是以掃描點與雷射光反射點垂直方向的高度差，為避免雜訊或其他飛行干擾物影響，去除最大的 2% 高度差，只計算其餘 98% 的高度差<sup>(36)</sup>。Phenospex 推算的數位生質量是屬於數位資料於三維空間分割上的體積單位，稱為體積像素 (Volume Pixel)，簡稱體素 (Voxel)，並賦予其單位為  $\text{mm}^3$ ，是經過體素數據轉換成相對應的體積單位，非實際的體積單位<sup>(10)</sup>。數位生質量數值愈大表示植物生長愈茂盛，亦可代表植物生長程度的綜合指標。

連續降雨的數位生質量相對變化計算是以降雨結束當天的數位生質量減去降雨前一天的數位生質量，再除以降雨前一天的數位生質量，乘以 100%，即可計算出遭遇連續降雨時數位生質量的相對變化，數值為負代表降雨期間數位生質量減少，反之數值為正代表降雨期間數位生質量增加<sup>(21)</sup>。

生長曲線下面積 (Area under growth curve, AUC) 是一個評量生長的量化指標，亦可看出其生長潛力，生長曲線下面積愈大生長勢愈佳<sup>(34)</sup>。本試驗以 Phenospex 推算的數位生質量建構 4 個青花菜品種在 4 個批次定植時的生長曲線，生長曲線下面積的計算方式是以定植後 1 到 30 天數位生質量生長曲線積分所得。

#### (二) 常態化差值植生指數 (NDVI)

植物葉片中的葉綠素會吸收紅光進行光合作用，近紅外光 (從 700 到 1,100 nm) 則會被葉片的細胞反射，植物的葉片愈多，生長愈旺盛，這些近紅外光反射量愈大。NDVI 就是建立在此原理之上，數值範圍由 -1 ~ 1，常應用於衛星遙感評估目標地區綠色植被的生長狀況，一片貧瘠無植被的田地，NDVI 數值為 0，數值愈大表示植被密度愈高，海洋的 NDVI 數值為 -1。NDVI 計算方式如下<sup>(27,31,32)</sup>：

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Phenospex 計算 NDVI 所擷取的波長如下<sup>(36)</sup>：

NIR = Near Infrared，代表擷取波長 820 ~ 860 nm 的讀值。

RED = Red band，代表擷取波長 620 ~ 650 nm 的讀值。

#### (三) 常態化色素葉綠素比率指數 (NPCI)

NPCI 數值範圍由 -1 ~ 1，隨著葉綠素與總色素含量之比率而變化，與植冠葉綠素含量相關。植冠葉綠素含量愈多，數值愈大。該指數的形式類似於 NDVI。其計算方式如下<sup>(6,30)</sup>：

$$\text{NPCI} = (\text{RED} - \text{BLUE}) / (\text{RED} + \text{BLUE})$$

Phenospex 計算 NPCI 所擷取的波長如下<sup>(36)</sup>：

RED = Red band，代表擷取波長 620 ~ 650 nm 的讀值。

BLUE = Blue band，代表擷取波長 450 ~ 480 nm 的讀值。

#### (四) 植物衰老反射指數 (PSRI)

PSRI 數值範圍由 -1 ~ 1，與類胡蘿蔔素 / 葉綠素比率相關，當 PSRI 數值增加時，表示冠層遭遇逆境、開始衰老或植物果實成熟，使得類胡蘿蔔素色素增加，PSRI 數值愈小代表植物愈健壯。可應用於植被健康監測、植物生理逆境檢測，遙測的健康植株 PSRI 數值範圍由 -0.1 ~ 0.2。其計算方式如下<sup>(26)</sup>：

$$\text{PSRI} = (\text{RED} - \text{GREEN}) / (\text{NIR})$$

Phenospex 計算 PSRI 所擷取的波長如下<sup>(36)</sup>：

RED = Red band，代表擷取波長 620 ~ 650 nm 的讀值。

GREEN = Green band，代表擷取波長 530 ~ 560 nm 的讀值。

NIR = Near Infrared，代表擷取波長 820 ~ 860 nm 的讀值。

### 三、驗證數位生質量與植株重量試驗

第 1 批定植之青花菜於 5 月 26 日終止試驗，第 2 ~ 4 批定植之青花菜因高溫及降雨逆境導致停止生長，於 6 月 16 日終止試驗，終止試驗後水平割取青花菜地上部，單株秤重，並比對由高通量表型分析平台估算之數位生質量，數位生質量與實際總重進行簡單線性回歸分析。

### 四、統計分析

本試驗數位生質量與重量之回歸分析資料是利用 Microsoft Excel 2007 (Microsoft, Wa. U.S.) 進行簡單線性回歸分析並繪製線性模型。相關性分析利用 Microsoft Excel 2007 (Microsoft, Wa. U.S.) 計算相關係數 (correlation coefficient,  $r$ )，以 T 檢定分析各處理有無顯著差異。

## 結果與討論

### 一、驗證數位生質量與植株重量試驗

為證明以高通量表型分析平台所推算的數位生質量與青花菜實際總重的相關性，因此，分別收穫不同品種青花菜地上部，單株秤重，並比對其數位生質量，不同品種青花菜數位生質量與實際重量的簡單線性回歸分析結果如圖 2。結果顯示 4 個品種 (系) 青花菜數位生質量與實際總重的回歸線略有不同，可能是不同品種青花菜的葉片角度、葉片厚度及葉片大小均不同，導致高通量表型分析平台偵測及計算時產生差異。本試驗數位生質量與實際總重的回歸線相關係數 ( $r$ ) 達 0.89 以上，顯示以高通量表型分析平台所推算的數位生質量，可以有效解釋青花菜地上部實際重量。林等人 2021 年針對大豆、甜瓜及小油菜以 PlantEye F500 自動掃描之株高、葉面積及數位生質量與傳統量測之相關係數高於 0.7，生長中期更大於 0.85<sup>(3)</sup>，此與本試驗結果相符，顯示以 PlantEye F500 自動掃描確實可替代手動測量外表型。

### 二、遭遇逆境時生長參數的變化

本試驗以 Phenospex 推算的數位生質量建構 4 個青花菜品種 (系) 在 4 個批次定植

時的生長曲線，生長曲線下面積會受到初始樣品或族群大小、生長速率及承載上限所影響<sup>(34)</sup>，本試驗生長曲線下面積的計算方式是採定植後 1 到 30 天生長曲線積分所得，假設定植時初始的樣品大小相同，此段期間 4 品種(系)青花菜尚未結球，所以尚未達到承載上限，因此可藉生長曲線下面積比較 4 品種青花菜的生長速率，生長曲線下面積愈大代表生長速率愈快。表 1 顯示每批次青花菜在定植 1 ~ 30 天之平均溫度及累積降雨量。青花菜在營養生長時期的生長適溫為 20 ~ 22℃，由表 1 數據顯示每批次青花菜定植後 30 天之平均溫度及累積降雨量均不同，平均溫度在 24℃ 以上高於生長適溫，第 3 批次較第 2 批次的平均溫度高 0.1℃，累積降雨量多 223.5 mm。第 4 批次的平均氣溫最高，累積降雨量亦最多，顯示愈晚定植遭遇愈嚴重的高溫逆境及降雨逆境。圖 3 顯示不同品種(系)青花菜定植後 30 天之生長曲線下面積。第 1 批定植的青花菜生長曲線下面積最大，愈晚定植，其生長曲線下面積愈小。比較 4 品種(系)在第 2 與第 3 批次的生長曲線下面積，可發現第 2 批的生長曲線下面積明顯大於第 3 批，表示第 3 批次生長明顯受抑制。而第 2 與第 3 批次定植後 30 天的平均溫度相近，第 3 批次較第 2 批次的累積降雨量多 223.5 mm。因此推測第 3 批青花菜生長受抑制可能是因為累積降雨量多所造成。同樣的情形亦發生在泰國南部，當地 9 月至 12 月為雨季，連續性降雨使得當地青花菜生長不佳<sup>(28)</sup>，後續以塑膠布或是遮陽網防雨遮蓋，即可有效的提高青花菜生長品質及產量<sup>(29)</sup>。

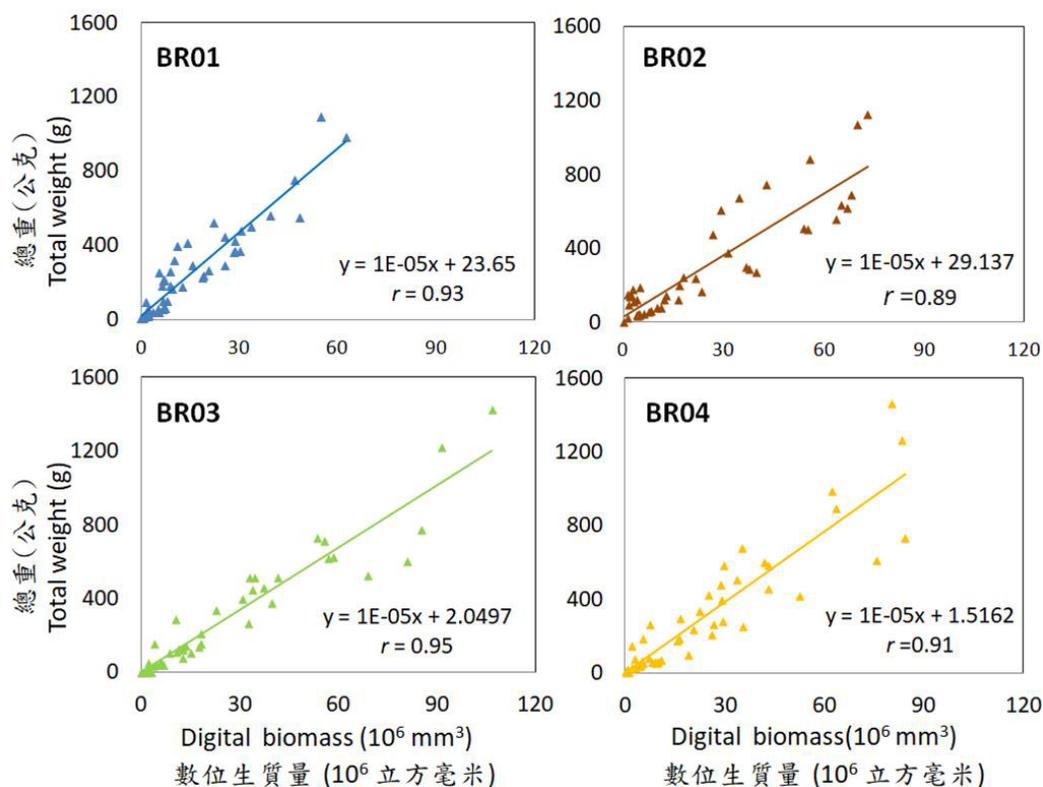


圖 2. 數位生質量與青花菜地上部重量的簡單線性回歸 (n = 48)

Fig. 2. Relationship between digital biomass and above-ground weight of Broccoli

表 1. 每批次青花菜在定植 0 ~ 30 天之平均溫度及累積降雨量

Table 1. The average temperature and accumulated rainfall of each batch of broccoli from 0 to 30 days after transplanting

	Tm (°C)	Cumulative rainfall (mm)
Batch 1	24.0	8.5
Batch 2	25.1	105.0
Batch 3	25.2	328.5
Batch 4	26.4	403.5

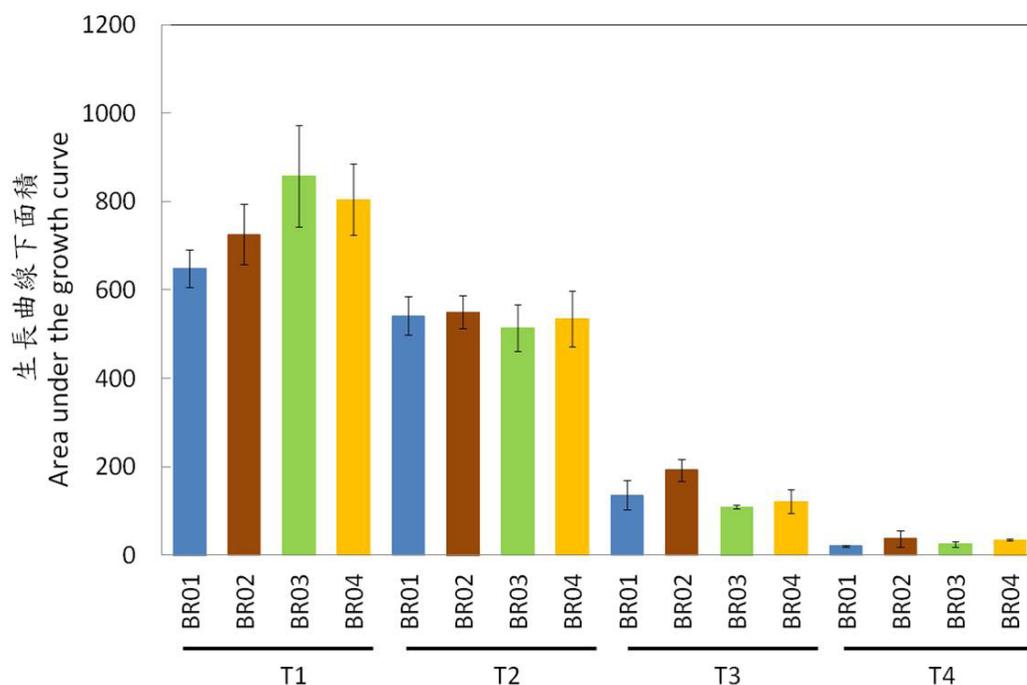


圖 3. 不同品種青花菜定植後 30 天之生長曲線下面積。4 種不同顏色各代表 4 種不同品種，T1 ~ T4 代表 4 批不同的定植時間

Fig. 3. Area under growth curve of different varieties after 30 days transplanting. Each of the four colors represent a different broccoli variety. The T1-T4 represent which batch they were in. The later batches will have less accumulated in digital biomass

以 Phenospex 推算的數位生質量建構 4 個青花菜品種 (系) 的生質量曲線，第 1 ~ 3 批定植之青花菜數位生質量生長曲線如圖 4，4 種不同顏色線條代表 4 個不同品種 (系) 青花菜，第 4 批定植之青花菜由於環境逆境的關係，定植之後近乎停止生長，因此並未在圖中顯示。圖 4 下方紅色虛線表示每日的平均溫度，藍色虛線表示每日的降雨量，其中有 3 次連續降雨，分別在 5 月 11 日 ~ 5 月 17 日、5 月 24 日 ~ 5 月 30 日及 6 月 4 日 ~ 6 月 12 日。由圖 4 可以看出每批次種植的青花菜數位生質量曲線均不同，第 1 批青花菜的數位生質量曲線最高曾達到  $2 \times 10^8 \text{ mm}^3$  較其他批次高。第 2 批青花菜的數位生質

量曲線在 5 月 17 日時 4 品種 (系) 數位生質量曲線急劇下降，推測可能是遭遇第 1 次連續降雨所造成。

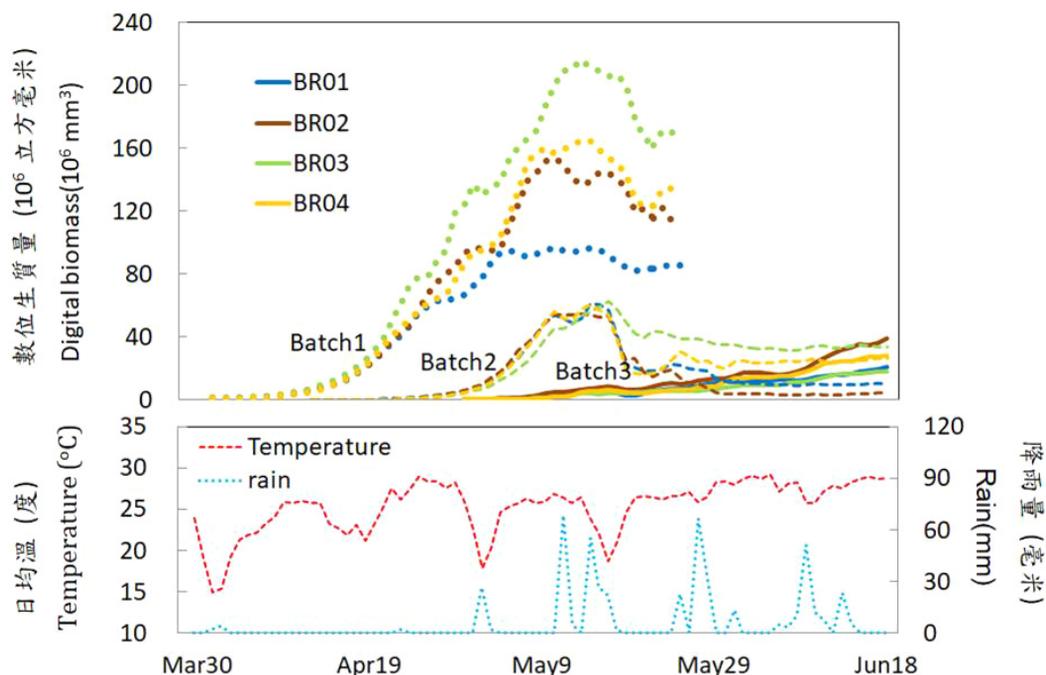


圖 4. 第 1 ~ 3 批定植青花菜數位生質量之變化，4 種不同顏色線條各代表 4 個不同品種 (系) 青花菜。下圖中藍色虛線表示每日的降雨量，紅色虛線表示每日的平均溫度

Fig. 4. The digital biomass of four broccoli varieties in batch 1 ~ 3. Each of the four colors represents a different broccoli variety. The blue dotted line on the graph represents the rainfall daily. The red dotted line represents the average temperature

比較 4 個品種 (系) 青花菜遭遇第 1 次連續降雨 (5 月 11 日 ~ 5 月 17 日) 時數位生質量之相對變化 (表 2)。結果顯示 BR01 在 4 批次定植之數位生質量相對變化均為負值，顯示其遭遇連續降雨時數位生質量減少，因此推測 BR01 對連續降雨最敏感。BR03 在 4 批次定植之數位生質量相對變化均為正值，顯示其遭遇連續降雨時數位生質量有增加，因此推測 BR03 對連續降雨耐受性較佳。

比較不同批次定植的青花菜遭遇第 1 次連續降雨時數位生質量之相對變化 (表 2)，結果顯示第 1 及第 2 批定植青花菜中，除了 BR03 的數位生質量相對變化為正值，BR01、BR02 及 BR04 的數位生質量相對變化均為負值，表示在遭遇第 1 次連續降雨時 BR03 數位生質量有增加，而 BR01、BR02 及 BR04 的數位生質量降低，其中又以第 2 批定植青花菜的數位生質量下降明顯高於其他批次。遭遇第 1 次連續降雨時，第 1 批定植青花菜已陸續開始結球，已進入生殖生長，第 2 批定植之青花菜已處於營養生長後期，尚未開始結球，第 3 及第 4 批定植之青花菜尚處於營養生長前期。試驗結果顯示第 2 批定植之青花菜數位生質量受降雨影響最大，因此推論青花菜於營養生長後期對連續降雨敏感，此時遭遇連續降雨，使青花菜萎凋生長受阻。

表 2. 不同批次定植之 4 品種 (系) 青花菜遭遇第 1 次連續降雨時數位生質量之相對變化  
 Table 2. Relative changes in digital biomass of four lines of broccoli varieties in different batches when encountered the first continuous rainfall

Batch	BR01	BR02	BR03	BR04
1	-16.40%	-18.38%	3.22%	-3.88%
2	-63.34%	-62.71%	5.51%	-65.62%
3	-25.57%	17.20%	88.88%	73.32%
4	-21.83%	32.68%	57.96%	0.42%

### 三、遭遇逆境時植生指數的變化

#### (一) 溫度與青花菜植生指數之相關性分析

青花菜屬於溫帶作物，其生長適溫為 15 ~ 22°C，生長季節的平均溫度影響青花菜花蕾球形狀、緊實度及大小，本試驗 4 批次進行時的平均溫為 24 ~ 28°C，溫度略高於其生長適溫。以第 1 批定植的青花菜進行溫度與青花菜植生指數之相關性分析 (表 3)，探討溫度對青花菜植生指數的影響。結果顯示不同品種 (系) 的植生指數 NDVI 及 NPCI 與日均溫的相關係數是達顯著負相關。NDVI 與植被密度及光合有效輻射相關，在精準農業的應用上，NDVI 數據提供作物茂密程度及健康指標衡量標準，NDVI 數值愈大，植物愈茂密，健康情況愈佳<sup>(31,32)</sup>。NPCI 與植冠葉綠素含量相關，植冠葉綠素含量愈多，數值愈大<sup>(30)</sup>。表示在溫度高於其生長適溫的情形下，溫度升高時，植冠健康情況愈不佳。

表 3. 日均溫與 4 品種 (系) 青花菜植生指數之相關係數 (*r*)

	BR01	BR02	BR03	BR04
NDVI	-0.56**	-0.73**	-0.56**	-0.71**
NPCI	-0.71**	-0.74**	-0.75**	-0.75**
PSRI	-0.12	-0.16	-0.13	-0.18

\*,\*\* represent  $P < 0.05$  and  $0.01$ , respectively.  $n = 25$ .

#### (二) 降雨量與青花菜植生指數之相關性分析

以第 1 批定植的青花菜進行每日降雨量與青花菜植生指數 NDVI (表 4) 及 NPCI (表 5) 之相關性分析，來看降雨量對青花菜植生指數的影響，每日降雨量又以降雨量多寡區隔為 0 ~ 20 mm，20 ~ 40 mm，> 40 mm 分別與植生指數進行相關性分析。結果顯示降雨量 0 ~ 20 mm 時，不同品種 (系) 的 NDVI 及 NPCI 與降雨量是達顯著正相關，但降雨量 > 40 mm 時，不同品種 (系) 的 NDVI 及 NPCI 與降雨量是達顯著負相關。

#### (三) 日射量與青花菜植生指數之相關性分析

前面提到當每日降雨量大於 40 mm 時，降雨量增加時 NPCI 減少，而降雨時日射量平均為 8.1 MJ/m<sup>2</sup>，為探討 NPCI 減少是因降雨或是日射量減少所造成，因此進行低日射量 (< 10 MJ/m<sup>2</sup>) 與青花菜植生指數 NPCI (表 6) 之相關性分析，結果顯示不同品種 (系) 的 NPCI 與日射量是無顯著相關。可能是因為青花菜的光飽和點低，大約為 690  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (9)，相當於日射量約為 6.5 MJ/m<sup>2</sup>，降雨時的平均日射量尚高於光飽和點，因此推論降雨量大於 40 mm 時，NPCI 數值減少，極可能是降雨造成，非因日射量減少所造成。

表 4. 降雨量與 4 品種 (系) 青花菜常態化差值植生指數 (NDVI) 之相關係數 (*r*)

Table 4. The correlation coefficient (*r*) of the precipitation daily and the NDVI indices

Rainfall (mm)	BR01	BR02	BR03	BR04
0 ~ 20	0.33**	0.35**	0.36**	0.30**
20 ~ 40	0.21	0.22	0.29*	0.23
> 40	-0.99**	-0.97**	-0.97**	-0.98**

\*,\*\* represent  $P < 0.05$  and  $0.01$ , respectively. Precipitation 0 ~ 20 mm  $n = 315$ , 20 ~ 40 mm  $n = 60$ , > 40 mm.  $n = 30$ .

表 5. 降雨量與 4 品種 (系) 青花菜常態化色素葉綠素比率指數 (NPCI) 之相關係數 (*r*)

Table 5. The correlation coefficient (*r*) of the precipitation daily and the NPCI indices

Rainfall (mm)	BR01	BR02	BR03	BR04
0 ~ 20	0.32**	0.18**	0.16**	0.11*
20 ~ 40	-0.17	-0.10	0.12	-0.11
> 40	-0.91**	-0.93**	-0.92**	-0.83**

\*,\*\* represent  $P < 0.05$  and  $0.01$ , respectively. Precipitation 0 ~ 20 mm  $n = 315$ , 20 ~ 40 mm  $n = 60$ , > 40 mm.  $n = 30$ .

表 6. 日射量與 4 品種 (系) 青花菜常態化色素葉綠素比率指數 (NPCI) 之相關係數 (*r*)

Table 6. The correlation coefficient (*r*) of the solar radiation daily and the NPCI indices

	BR01	BR02	BR03	BR04
NPCI	-0.19	0.06	0.11	-0.14

\*,\*\* represent  $P < 0.05$  and  $0.01$ , respectively.  $n = 105$ .

隨著環境溫度增高，高等植物葉綠體中類囊體對高溫敏感，所以高溫會使得光合作用效率減低，蒸散速率增加<sup>(18)</sup>。長期淹水逆境會使得青花菜營養生長及生殖生長均受影響，葉面積及葉綠素含量減少，進而影響光合作用及產量<sup>(8)</sup>。為了生存，植物必須對高溫或是淹水逆境做出相對應的調節機制，耐性青花菜品種會有葉片中葉綠素含量增高、氣孔電導度及過氧化氫含量減少的反應，敏感的品種在遭遇逆境時，葉綠素含量及生質量減少的幅度較

大<sup>(23,33)</sup>，本試驗在降雨量 0 ~ 20 mm 時，降雨量與 NPCI 呈現正相關，可能是因為降雨量少於 20 mm 時，青花菜為提高光合作用效率，使葉片葉綠素含量增加，NPCI 隨之增加，但降雨量大於 40 mm 時，土壤水分含量高，植物根部吸水量降低，葉片 ABA 累積，細胞膨壓降低，氣孔關閉，氣體交換率降低進而導致光合作用效率降低，植株萎凋黃化<sup>(5,7,12)</sup>，因此，本試驗中植物體在連續降雨後數位生質量降低，NDVI 及 NPCI 數值降低。

雜交育種的過程中，F2 族群擁有最高的遺傳歧異度，每個單株的基因型亦不同，當面對成千上萬的 F2 單株時，單靠人工調查很難即時完成，而高通量表型分析平台能夠快速的獲得大量且精準的植物外表型分析結果，為利於高通量表型分析平台準確量測單株性狀，因此本試驗採 1 畦 1 行，株距寬於一般田間栽培密度，適用於初步篩選大量 F2 單株，後續育種篩選時，仍建議以傳統種植密度 1 畦 2 行，株距 30 ~ 35 公分為主。且經過兩種不同種植密度的篩選，表現優良的單株亦能確保其在不同種植密度時穩定性較佳。

在文獻中可以找到許多利用植生指數用於檢測、分類和量化特定生物性引起的病蟲害<sup>(15)</sup>，甚至在模擬氣候變遷，溫度升高二氧化碳濃度提高的情況下，也能利用 NDVI 等指數辨識青花菜黑腐病<sup>(24)</sup>。大麥上乾旱試驗中，在表徵特徵出現跡象前 10 天，已能提早利用特定光譜偵測到受乾旱影響的植物<sup>(20)</sup>。近年來利用光譜影像及植生指數分析檢測植物遭遇逆境的研究日益增加，提早偵測到逆境的發生，農民可儘早採取急救措施，減輕農作物損失。

## 結 論

本研究結果顯示傳統測量青花菜全株重與機器自動掃描生質量上具有高度相關性 ( $r > 0.89$ )，顯示以高通量表型分析平台所推算的數位生質量，可以有效解釋青花菜地上部實際重量，並達到節省人力、客觀且精準的目的。但試驗中仍有許多限制，例如：露天環境中容易受天氣、土壤、生物性逆境影響，使得作物外表型變得複雜，種植畦面是否水平容易影響外觀性狀 (株高、葉面積、數位生質量等) 的量測。若能導入農地雷射整平技術，提高畦面平整，高通量表型分析平台定能更精準估算植株外觀性狀。

臺灣青花菜栽培季節在每年 10 月至隔年 4 月，5 月之後氣溫愈來愈高，再加上 5 月為梅雨季節，青花菜對連續降雨敏感，欲延長青花菜之產期除著重在品種的耐熱性之外，亦不容忽視連續降雨之耐受性。由試驗結果可知，‘42’ 對降雨的耐受性較佳，生育期約 65 天，3 月上旬之前種植，可於 5 月上旬收穫，‘B35’ 生長期短，對連續降雨最為敏感，建議在 3 月中旬以前種植，4 月底收穫，容易避過梅雨季。

## 引用文獻

1. 林大鈞、李承彬、林思妤、游舜期、杜元凱、楊佐琦。2022。我國自動化作物外表型分析平台的新里程碑－農業試驗所國家植物表型體分析中心。農業試驗所技術服務季刊。119：21-25。
2. 林思妤、林大鈞、楊佐琦。2019。農試所自動化作物表型體設施簡介。農業試驗所技術服務季刊。119：21-25。
3. 林思妤、杜元凱、游舜期、傅月英、林大鈞。2021。植物表型體分析平台於蔬菜自動外

- 表型分析之應用。台灣農業研究。70(1)：11-23。
4. 林經偉、許涵鈞、陳昇寬、吳雅芳、鄭安秀。2014。青花菜合理化施肥及健康管理。臺南區農業改良場技術專刊。103-1。
  5. 高景輝。2008。淹水逆境下之植物生理。
  6. Bannari, A., K. Khurshid, K. Staenz and J. Schwarz. 2006. Wheat crop chlorophyll content estimation from ground-based reflectance using chlorophyll indices. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, 112-115.
  7. Bradford K. J. and S.F. Yang. 1981. Physiological responses of plants to waterlogging. HortScience 16(1): 25-30.
  8. Casierra, P. F. and O. J. E. Peña. 2022. Prolonged waterlogging reduces growth and yield in broccoli plants (*brassica oleracea* var. *italica*). Gesunde Pflanzen, 74(2): 249-257.
  9. Chae, S. H., H. J. Kim, H. W. Moon, Y. H. Kim and K. M. Ku. 2022. Agrivoltaic Systems Enhance Farmers' Profits through Broccoli Visual Quality and Electricity Production without Dramatic Changes in Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates. Agronomy:12, 1415.
  10. Chmielewski, Sz. and P. Tompalski. 2017. Estimating outdoor advertising media visibility with voxel-based approach. Appl. Geogr. 87: 1-13.
  11. Decoteau, D. R. 2000. Vegetable Crops. PrenticeHall. Upper Saddle River, NJ, USA. p464.
  12. Drew M. C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48: 223-250.
  13. Duclos, D. V. and T. Björkman. 2015. Gibberellin control of reproductive transitions in *Brassica oleracea* curd development. Amer. Soc. Hort. Sci. 140(1): 57-67.
  14. Ge, Y., G. Bai, V. Stoerger and J. C. Schnable. 2016. Temporal dynamics of maize plant growth, water use, and leaf water content using automated high throughput RGB and hyperspectral imaging. Comp. Electron. Agric. 127: 625-632.
  15. Govind, A., M. Bhavanarayana, J. Kumari and A. Govind. 2005. Efficacy of different indices derived from spectral reflectance of wheat for nitrogen stress detection. J. Plant Interact. 1(2): 93-105.
  16. Granier, C. and D. Vile. 2014. Phenotyping and beyond: modelling the relationships between traits. Curr. Opin. Plant Biol. 18: 96-102.
  17. Holman, F., A. Riche, A. Michalski, M. Castle, M. Wooster and M. Hawkesford. 2016. High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. Remote Sens. 8: 1031.
  18. Inada, H., M. A. Yamabe and M. Nakahara. 2010. Effects of environmental factors on stomatal diffusive conductance and transpiration rate of leaves of tomato seedlings. Bulletin of the Horticultural Institute, Ibaraki Agricultural Center 17: 17-22.
  19. Inglese, J. and D. S. Auld. 2009. Application of High Throughput Screening (HTS) Techniques: Applications in Chemical Biology in Wiley Encyclopedia of Chemical Biology. 2: 260-274.
  20. Kersting, K., Z. Xu, M. Wahabzada, C. Bauckhage, C. Thureau, C. Roemer, A. Ballvora, U. Rascher, J. Leon and L. Pluemer. 2015. Pre-symptomatic prediction of plant drought stress

- using dirichlet-aggregation regression on hyperspectral images. AAAI. <https://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI12/paper/view/4932>.
21. Lazarević, B., M. Kontek, K. Carović-Stanko, J. Clifton-Brown, M. Al Hassan, L. M. Trindade and V. Jurišić. 2021. Multispectral image analysis detects differences in drought responses in novel seeded. *Agronomy*. 11(6):1038.
  22. Li, D., C. Quan, Z. Song, X. Li, G. Yu, C. Li and A. Muhammad. 2021. High-Throughput Plant Phenotyping Platform (HT3P) as a Novel Tool for Estimating Agronomic Traits From the Lab to the Field. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8: 623705.
  23. Lin, H. H., K. H. Lin, S. C. Chen, Y. H. Shen and H. F. Lo. 2015. Proteomic analysis of broccoli (*Brassica oleracea*) under high temperature and waterlogging stresses. *Bot Stud.* 56(1): 18.
  24. Lowe, A., N. Harrison and A. P. French. 2017. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant methods*, 13(1): 80.
  25. Lyra, D. H., N. Virlet, P. Sadeghi-Tehran, K. L. Hassall, L. U. Wingen, S. Orford, S. Griffiths, M. J. Hawkesford and G. T. Slavov. 2020. Functional QTL mapping and genomic prediction of canopy height in wheat measured using a robotic field phenotyping platform. *J. Exp. Bot.* 71: 1885-1898.
  26. Merzlyak, M. N., A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova and V. Y. Rakitin. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiol. Plant.* 106: 135-141.
  27. Myneni, R. B., F. G. Hall, P. J. Sellers, and A. L. Marshak. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 481-486.
  28. Nooprom, K., Q. Santipracha and S. Te-chato. 2013. Effect of planting date and variety on growth and yield of broccoli during the dry season in southern Thailand. *IJPAES*. 3: 121-124.
  29. Nooprom, K., Q. Santipracha and S. Te-chato. 2014. Growth and yield of broccoli under different rain protectors during the rainy season in songkhla province, southern Thailand. *Kasetsart J.* 48: 1-8.
  30. Peñuelas, J., J. A. Gamon, A. L. Fredeen, J. Merino and C. B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48: 135-146.
  31. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., 309-317.
  32. Sellers, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6: 1335-1372.
  33. Ryo, H., J. Yutaka and S. Takashi. 2023. Varietal differences in wet damage of Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) under waterlogging conditions. *J. Hortic. Res.* 32(2).
  34. Todor, H., K. Dulmage, N. Gillum, J. R. Bain, M. J. Muehlbauer and A. K. Schmid. 2014. A transcription factor links growth rate and metabolism in the hypersaline adapted archaeon *Halobacterium salinarum*. *Mol. Microbiol.* 93: 1172-1182.

35. Virlet, N., K. Sabermanesh, P. Sadeghi-Tehran and M. J. Hawkesford. 2017. Field scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Func. Plant Biol.* 44: 143-153.
36. Please refer to Phenospex Web site. <https://www.phenospex.com/>.

# Comparing stress tolerance of different broccoli varieties by High-Throughput Phenotyping system<sup>1</sup>

Lee, H. F.<sup>2</sup> and C. Y. Lin<sup>3</sup>

## Abstract

To gather the appearance and physiological parameters of broccoli throughout its entire growing season during warm weather planting, serving as a reference for stress tolerance selection, this experiment employed high-throughput phenotyping (HTP) on four broccoli varieties. The findings reveal a strong correlation ( $r > 0.89$ ) between traditional manual measurements and an auto-phenotyping platform regarding biomass parameters. When temperatures exceed the optimal growth range, the daily average temperature shows a negative correlation with both the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Pigments Chlorophyll Ratio Index (NPCI), indicating that higher temperatures result in decreased chlorophyll content and worsened conditions for broccoli. Furthermore, when daily precipitation is more than 40 mm, NDVI and NPCI exhibit a significantly negative correlation with precipitation, indicating that too much precipitation can have an adverse effect on the growth of broccoli.

### What is already known on this subject?

Traditional phenotype analysis methods are often based on manual observation and description which are easily affected by the observer's subjective bias and are time-consuming and laborious.

### What are the new findings?

Through the high-throughput phenotyping system, a large number of accurate plant phenotype results can be quickly obtained.

### What is the expected impact on this field?

When the breeding companies use the high-throughput phenotyping system to assist in the breeding work, it can save time and effort and objectively analyze a large amount of phenotype data.

**Key words:** Broccoli, High throughput phenotyping system, Digital biomass

Accepted for publication: January 20, 2025

- 
1. Contribution No. 581 from Tainan District Agricultural Research and Extension Station.
  2. Assistant Researcher, Tainan District Agricultural Research and Extension Station. 70 Muchang, Hsinhua, Tainan 712009, Taiwan, R.O.C.
  3. Assistant Researcher, World Vegetable Center.