

影響青花菜產量之環境及生育性狀關鍵因子分析¹

沈峻榮²、林煜恒^{3*}、陳葦玲⁴

摘 要

青花菜(*Brassica oleracea* L. var. *italica*)為臺灣重要冬季蔬菜作物，惟其生育期與產量易受氣象條件影響，常導致花球成熟不一致、不良率偏高，致使生產成本增加。本研究以臺灣常見青花菜品種‘42號’與‘綠寶(BR-8)’為材料，於110-111年期作進行連續分批定植試驗，蒐集環境因子(溫度、相對濕度、降雨量及光照輻射量)與生育性狀資料，並以皮爾森相關分析(Pearson correlation coefficient)探討不同生長階段關鍵因子對產量與不良率之影響。結果顯示，兩品種全生育期皆約為63天，惟其對環境條件之反應具明顯差異。‘42號’之有效產量與總產量主要受營養生長期與生殖生長期之降雨量與平均相對濕度影響，呈高度負相關，顯示高濕與降雨為限制其產量之主要因子；而生殖生長期之高溫與高積溫則顯著提高不良品產量與不良率。相較之下，‘綠寶(BR-8)’之有效產量與總產量對生殖生長期之積溫、最高溫與累積光照輻射量極為敏感，均呈高度負相關，且高溫逆境顯著提高畸形花球比例，顯示其耐熱性較低。生育性狀分析結果顯示，‘42號’於營養生長期之株幅、葉面積及鮮重累積易受高溫抑制，適度降雨則有助於維持生長勢；而‘綠寶(BR-8)’之營養生長性狀對環境因子反應較小，但其生育性狀累積與有效產量呈正相關。綜之，‘42號’較適合於秋冬乾冷且降雨量較少之季節栽培，以降低高濕逆境風險；‘綠寶(BR-8)’則宜於冬季及早春低溫環境下種植，以避免生殖生長期高溫造成產量與品質劣化。本研究釐清不同品種青花菜之產量關鍵影響因子，可作為栽培適期規劃之參考。

關鍵字：青花菜、生育期、氣象因子、產量、不良率

¹農業部臺中區農業改良場研究報告第1121號

^{2,3}農業部臺中區農業改良場研究助理、副研究員

⁴農業部花卉創新園區研究發展中心研究員兼中心副主任

*通訊作者：林煜恒，Email: linyh@tcdares.gov.tw

前 言

青花菜(*Brassica oleracea* L. var *italica*)為十字花科蕓苔屬世界性大宗蔬菜作物，由野生甘藍馴化而來(Fahey, 2003)，原產於西歐義大利沿海，性喜冷涼，為綠植株春化型植物。臺灣自 40 年代由美國引進青花菜，但消費量極少，直至 1966 年後，因優良品種的引進及採後處理技術普及(王與謝，2005)，再加上研究指出十字花科植物中的硫配醣體(Glucosinolate)經由芥子酶(Myrosinase)水解後產生之異硫氰酸酯(Isothiocyanate)，具有誘導預防癌症發生之代謝酵素作用之功效，例如芳香族及吲哚族硫醣苷水解之產物可藉由抑制 phase1 酵素的氧化還原能力，以及誘導 phase2 酵素的解毒代謝能力，phase2 解毒酶系統是一具誘導非生物性防治系統，能防護哺乳類動物之 DNA 免於受到生化致癌物之傷害(柯，2007)。其中又以青花菜之硫配醣體含量較高(Nicolas, 1989；Bakker *et al.*, 2009)，消費量逐漸提升。依據農糧署統計資料，113 年全國種植面積約 1,750 公頃(Hectare, ha)，產量約 34,000 公噸(ton, t)，若以 112 年全年批發市場均價 31.7 元/kg 計算，產值可達 10 億 7 千萬元。青花菜多以契作栽培為主，集中於冬季裡作 11 月至隔年 3 月，供鮮食及加工兩用，且內外銷皆有市場需求；其經採後處理冷藏調節，可供應市場 1 個月，分切後以急速冷凍(individually quick freezing, IQF)則可供應市場半年以上，既可調節國內夏季蔬菜之需求，亦可供應至外銷市場。青花菜國內市場需求逐年增加，除於國內生產，仍需由國外進口，以供應國內市場需求。根據海關進出口資料，106 年鮮食青花菜進口量為 17,000 t，冷凍加工青花菜為 7,200 t，逐年增加至 113 年鮮食進口量的 24,890 t，冷凍加工品更增加近兩倍為 13,912 t，是極具市場潛力之重要蔬菜。

青花菜的營養生長適溫為 20-22°C，蕾球發育適溫則為 15-18°C(陳等人，2013)。溫度是影響青花菜產量與花球品質的關鍵，且會影響花球分化開始時間，進而影響生長週期長短(Alina *et al.*, 2010)。栽培期間的高溫逆境為青花菜生產之限制因子之一，其產期常因高溫氣候而中斷(Mark & Thomas, 2011)。高溫逆境的影響主要是在花芽分化初期，會延遲花蕾形成時間，以及出現花芽大小不均、萼片葉片化現象、花球重量減少甚至不結花蕾等，進而影響青花菜花球的品質及產量(Heather *et al.*, 1992；Alina *et al.*, 2009；陳等人，2013；Liu & Wang, 2015)，使其只能在夏季氣溫很少超過 30°C 的地區種植(Thomas & Karen, 1998)。

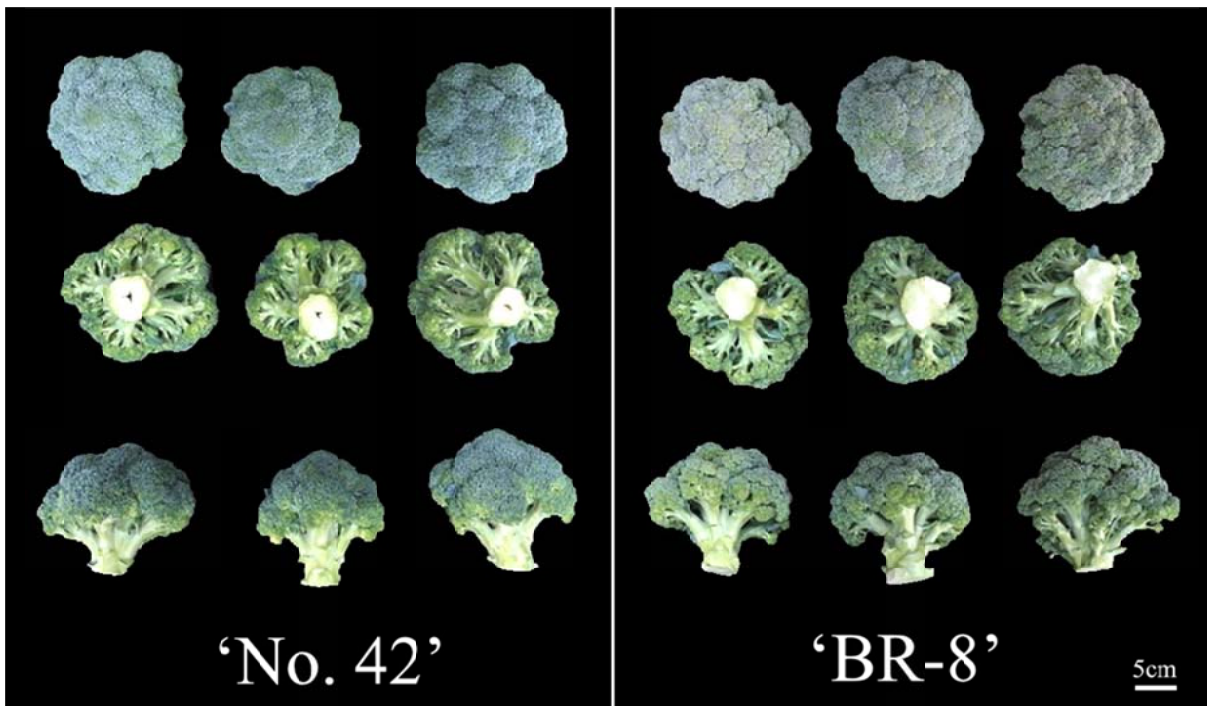
青花菜品質因不同栽培期的氣溫差異，容易造成花蕾成熟度不一，導致農民採收時須分批採收，並依賴農民的經驗判斷花球是否可採收，耗費人力與工時，是一項勞動密集度高的工作，且青花菜高溫易黃化，若沒有額外人力盡快採收便會影響青花菜品質，目前青花菜的採收部分佔總生產成本約四分之一(游等人，2020)。為提升青花菜產業經

營效益，本研究期整合生育監測資料，建構青花菜產期產量預測模式管理平台，期能助於國內生產青花菜時之風險評估、管理決策及產銷規劃，以降低生產管理成本。

材料與方法

一、試驗材料

使用兩種臺灣常見青花菜商業品種，分別為‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’之 4 週大穴盤苗(博華育苗場，彰化，臺灣)。「42 號」為日本阪田公司育成品種，具有耐高溫特性，其花蕾細緻，色澤翠綠，球型圓整，為嘉義地區普遍栽培品種，屬於早生種青花菜。「綠寶(BR-8)」為和生種子股份有限公司販售之品種，其蕾粒細、花型緊密、蕾色青綠，具有耐寒的特性，但較不耐高溫，亦屬於早生種的青花菜，是臺灣加工用主要流通品種(郭等人，2021)(圖一)。



圖一、青花菜品種‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’花球外觀。

Fig. 1. The head appearance of broccoli cultivars ‘No. 42’ and ‘BR-8’.

二、試驗場域建立

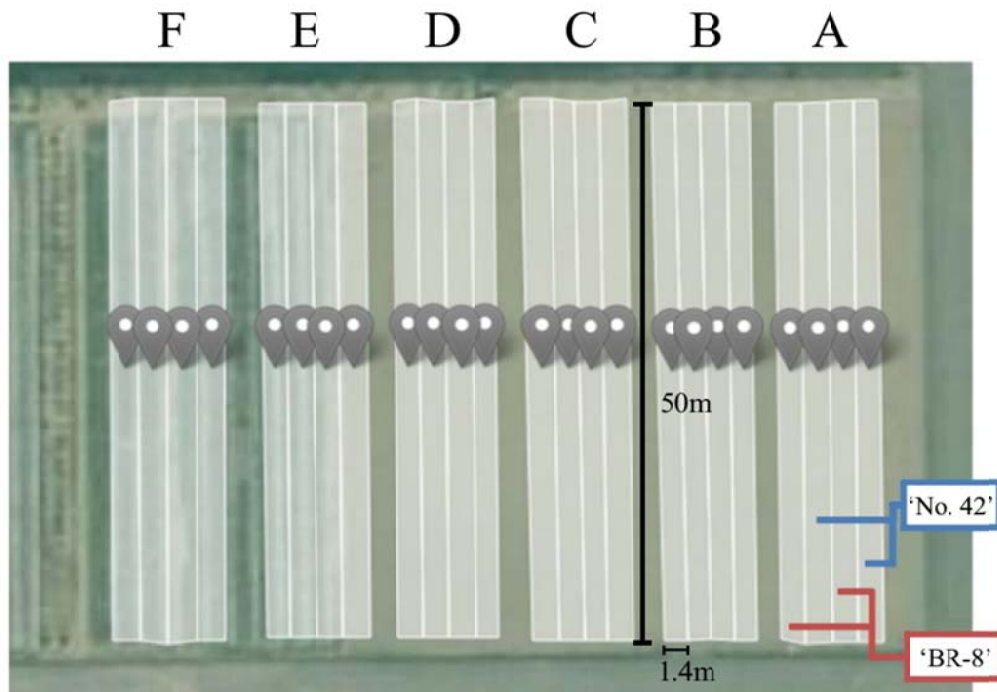
本研究於臺中區農業改良場試驗田(24°08'N, 120°32'E)進行試驗，青花菜之種植方式採 1 畦雙行三角種植，每畦長 50 m，寬(含畦溝) 1.4 m，行距 50 cm，株距 45 cm。以幼苗定植，栽培管理期間視介質或土壤狀態給水以維持水分充足，並以慣行方式管理，包括肥料施用、病蟲害及水分管理等。試驗區域共劃分為 A 至 F 共 6 個批次依序種植，每一批次之試驗田區面積為 252 m²，切分為 4 條長畦，兩品種隔畦種植各植 2 條畦，每畦種植青花菜 193 株，扣除每七天性狀調查採樣之植株，採收時青花菜數量為每畦 166 株。

A 至 F 批次依序定植，分別間隔 14 天，A 批次於 110.09.16 定植，B 批次於 110.09.30 定植，以此類推至 110.11.24 完成 F 批次定植，如表一與圖二所示。

表一、青花菜‘42 號’與‘綠寶’試驗 A-F 批次之定植時間、花芽創始日及採收日

Table 1. Transplanting, floral initiation, and harvest dates for each planting batch in broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’

Cultivar	Planting batch	Transplanting date	Floral initiation date	Harvest date
‘No. 42’	42-A	110.09.16	110.10.26	110.11.18 - 110.12.13
	42-B	110.09.30	110.11.15	110.12.07 - 110.12.24
	42-C	110.10.14	110.11.25	110.12.15 - 110.12.27
	42-D	110.10.28	110.12.15	110.12.27 - 111.01.07
	42-E	110.11.11	110.12.30	111.01.14 - 111.01.24
	42-F	110.11.24	111.01.16	111.01.24 - 111.02.08
‘BR-8’	GB-A	110.09.16	110.10.20	110.11.18 - 110.12.13
	GB-B	110.09.30	110.11.07	110.12.07 - 110.12.24
	GB-C	110.10.14	110.11.23	110.12.15 - 110.12.27
	GB-D	110.10.28	110.12.10	110.12.27 - 111.01.05
	GB-E	110.11.11	110.12.19	111.01.12 - 111.01.19
	GB-F	110.11.24	111.01.06	111.01.24 - 111.01.28



圖二、各批次定植位置圖。

Fig. 2. Transplanting layout for each planting batch. Planting and harvest dates as Table 1.

三、數據蒐集與處理

於青花菜試驗植株栽培過程中，試驗數據蒐集主要包括兩部分，分別是環境數據及作物生育性狀調查數據。建立作物的生育資料，作為分析所需之重要參數依據。

(一)環境數據：由農業氣象觀測網監測系統取得臺中區農業改良場於試驗期間的氣象數據，並依據作物生長日期，將環境數據區分成營養生長期與生殖生長期，並區分不同環境因子，將蒐集資料並換算，如表二所示。

1.積溫：植物在健康正常生長發育過程中，每日的平均溫度扣除基礎溫度後累積，即可得到某一發育階段所需的積溫(Growing degree-days, GDD)，其代表的是生物生長過程中所累積的熱量單位，也被廣泛應用於植物生長發育與成熟的溫度，積溫也適用於數種作物的產量與品質之相關研究(Gregory & Wilhelm, 1997；Kim & Yun, 2008)。本研究分別計算營養生長期及生殖生長期的積溫，以探討不同生長期熱量累積對植株及花球發育的影響。積溫的計算公式為每日平均溫度減去基礎溫度後累加求和，代表該生長期的總基溫。Robert (1997)在青花菜之生育積溫計算研究中，曾比較多種基礎溫度(0、1.7、3.1、4.4、5.8 及 7.2°C)，以評估其對生育與採收期

預測之適切性，而 Dhankhar & Chandanshive (2017)於青花菜試驗中，基礎溫度以 5°C 計算，因此本研究將其基礎溫度訂為 5°C，據以計算各生育階段之積溫。

計算公式為： $GDD = \sum(T_{\text{mean}} - T_{\text{base}})$

2. 最高溫：生育期間每日最高溫之最高溫度作為該生長期的最高溫。
3. 平均相對濕度：將生育期間每日的相對濕度平均，作為該生長期之平均相對濕度。
4. 累積光照輻射量：將生育期間每日的光照輻射量全部加總，作為該生長期之累積光照輻射量。
5. 累積降雨量：將生育期間每日的降雨量加總，作為該生長期的累積降雨量。

(二)生育性狀：作物生育性狀於定植後每 7 日調查一次，每次調查 3 株，包括營養生長期的株幅、葉片鮮重、莖鮮重、總葉面積。待花球成熟採收後，調查各批次植株生殖生長期有效產量和不良品產量，並換算總產量和不良率。

1. 株幅：俯瞰植株，量測最遠葉片之對角距離作為長度，再量測垂直 90°的另一最遠葉片之對角距離作為寬度，再套用公式： $(\text{長度}/2) \times (\text{寬度}/2) \times \pi$ ，求得該植株株幅。
2. 葉片鮮重與莖鮮重：將單株之地上部植株貼地砍下，裁剪已展開之所有成熟葉片後，秤取重量並加總即為葉片鮮重，剩餘的部位秤重即為莖鮮重。
3. 總葉面積：將單株之所有成熟葉片剪下，以 LI-3100 AREA METER (Li-Cor Inc., Lincoln, NE., USA) 測量所有葉片之葉面積，並加總得之。葉面積範圍為葉柄之上的葉片。
4. 各畦有效產量：每條畦各別採收成熟之花球，區分為正常花球及畸形花球，量測正常花球的重量即為有效產量，畸形花球或不符合商品價值花球之重量為不良品產量，有效產量與不良品產量加總為總產量。
5. 不良率：不良品產量佔總產量的比率，換算成百分比即得不良率。

曲線下面積(Area Under the Curve, AUC)為一種整合時間序列資料之分析方法，常用於量化變數隨時間變化之整體表現。本研究採用梯形法(trapezoidal rule)進行數值積分，以計算每批植株於營養生長期間生育性狀之累積變化量。

AUC 可同時整合數值變化幅度與其持續時間，除可用於描述作物生育性狀之生長累積外，亦常應用於量作物於逆境條件下之生理反應。有研究利用 AUC 計算植被指數之時間變化，並探討其與馬鈴薯產量間之相關性(Sivarajan, 2011；Stan, 2020)；亦有研究以 AUC 量化辣椒於淹水及病原逆境下，其光譜反射指標之變化幅度(Soumaila *et al.*, 2008)。

因此，本研究參考上述方法，將各生育性狀每週次量測值視為時間序列資料，利用梯形法計算其曲線下面積，以作為青花菜生育性狀於營養生長期間之累積指標(表三)。其計算方式為將相鄰兩次量測值(第 i 週與第 $i+1$ 週)視為一梯形，以上下底平均值乘以量測間隔時間($\Delta Time$)，再加總整個生育期內各梯形面積，其公式為：

$$AUC = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(X_i + X_{i+1})}{2} \times \Delta Time$$

其中， X_i 與 X_{i+1} 分別代表第 i 週與第 $i+1$ 週之生育性狀量測值， $\Delta Time$ 為相鄰兩次量測之時間間隔(日)。AUC 值代表該生育性狀於營養生長期間隨時間變化之累積總量，並進一步分析其與環境及產量性狀之關係。

四、影響產量之相關參數換算

為探討兩品種之產量變異及其關鍵影響因子，本研究以皮爾森相關係數(Pearson correlation coefficient, r)分析各項環境因子(積溫、最高溫、平均相對濕度、累積光照輻射量、累積降雨量)及生育性狀(株幅、總葉面積、葉片鮮重、莖鮮重)與四項產量指標(有效產量、總產量、不良品產量、不良率)間之線性相關程度。相關分析分別於營養生長期與生殖生長期進行，以評估不同生長階段環境條件對青花菜產量與品質之影響。

皮爾森相關係數公式為：
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

r 值表示兩變數間線性關聯的強度與方向，當 r 值越接近 1，代表線性關係越強；正值表示正相關，負值表示負相關。相關性之顯著性以 p -value 進行檢定，顯著水準設定如下：

- $p < 0.05$ 表示達顯著相關(*)
- $p < 0.01$ 表示高度顯著相關(**)
- $p < 0.001$ 表示極高度顯著相關(***)

為利於結果詮釋，本研究依據相關係數 r 之絕對值，將相關強度劃分為以下五個等級：

- 0.90 – 1.00：極高度相關(Very high correlation)
- 0.70 – 0.90：高度相關(High correlation)
- 0.50 – 0.70：中度相關(Moderate correlation)
- 0.30 – 0.50：低度相關(Low correlation)
- 0.00 – 0.30：極低或無相關(Negligible or no correlation)

本研究以相關分析結果作為判斷影響產量與品質之關鍵環境因子和生育性狀的基礎，並進一步於結果與討論中，結合不同生長階段與品種間之反應差異，解析氣象條件透過生育性狀影響青花菜產量與品質之可能機制。

表二、生育環境參數調查項目及數據轉換

Parameter	Units	Vegetative growth stage	Reproductive growth stage
Temperature	°C	*Veg_GDD	Repro_GDD
		Veg_Tmax	Repro_Tmax
Relative humidity	%	Veg_Mean_RH	Repro_Mean_RH
Solar radiation	MJ/m ²	Veg_Solar	Repro_Solar
Rainfall	mm/hr	Veg_Rain	Repro_Rain

Table 2. Growth environment parameters investigated and data transformations

*Veg means vegetative growth stage ; Repro means reproductive growth stage.

GDD: growing degree days ; Tmax: maximum temperature ; Mean_RH: mean relative humidity ; Solar: accumulated solar radiation ; Rain: accumulated rainfall

表三、生育性狀調查項目及其 AUC 累積數據轉換

Table 3. Growth traits investigated and AUC-based cumulative data transformation

Parameter	Units	Data transformation
Canopy area	cm ²	*AUC Canopy area (AUC_CA)
Total leaf area	cm ²	AUC Total leaf area (AUC_LA)
Leaf fresh weight	g	AUC Leaf fresh weight (AUC_LFW)
Stem fresh weight	g	AUC Stem fresh weight (AUC_SFW)
Marketable yield	kg	Marketable yield
Non-marketable yield	kg	Non-marketable yield
Total yield	kg	Total yield
Rate of malformed heads	%	Rate of malformed heads

*AUC : means area under the curve.

結果與討論

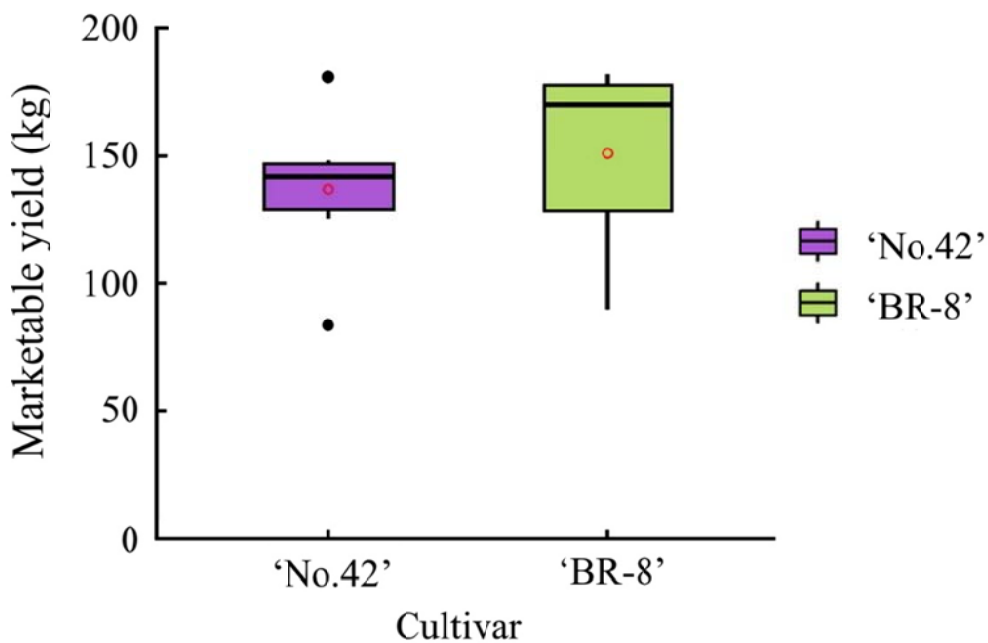
一、作物園藝分析

針對青花菜‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’的產量結果與生育日數進行探討。產量方面分為總產量及不良品產量，並換算為不良率。而生育日數方面區分為營養生長期與生殖生長期，營養生長期為定植日到開花日，生殖生長期為開花日到採收日，定植日與採收日間

的日數差為總生育日數。

(一)有效產量分布

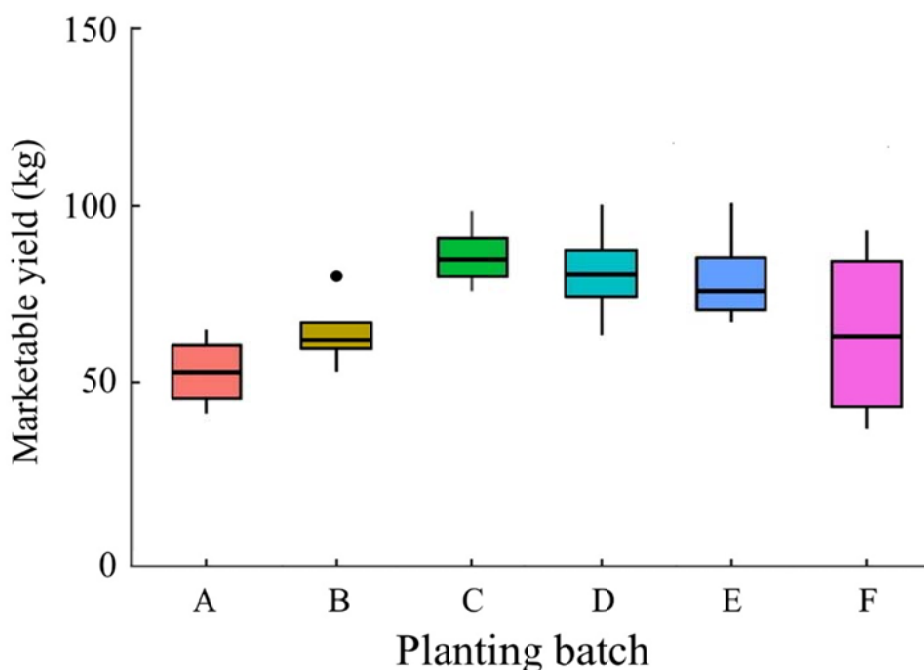
青花菜‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’的有效產量分布(圖三),其中‘42 號’的產量較為集中,但有兩個極端值。品種‘綠寶’的產量數據分布較分散,但沒有出現極端值。另外分析各批次的有效產量分布,以 C 批次差異最小, F 批次差異最大, C、D、E 三個批次的產量都較高,且數據較為集中(圖四)。



圖三、青花菜品種‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’六個批次之有效產量分布。

Fig. 3. Distribution of marketable yield for 6 batches of broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’.

Planting and harvest dates as Table 1.



圖四、青花菜‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’合併計算各批次之有效產量分布。

Fig. 4. Distribution of marketable yield in each planting batch of broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’ combined. Planting and harvest dates as Table 1.

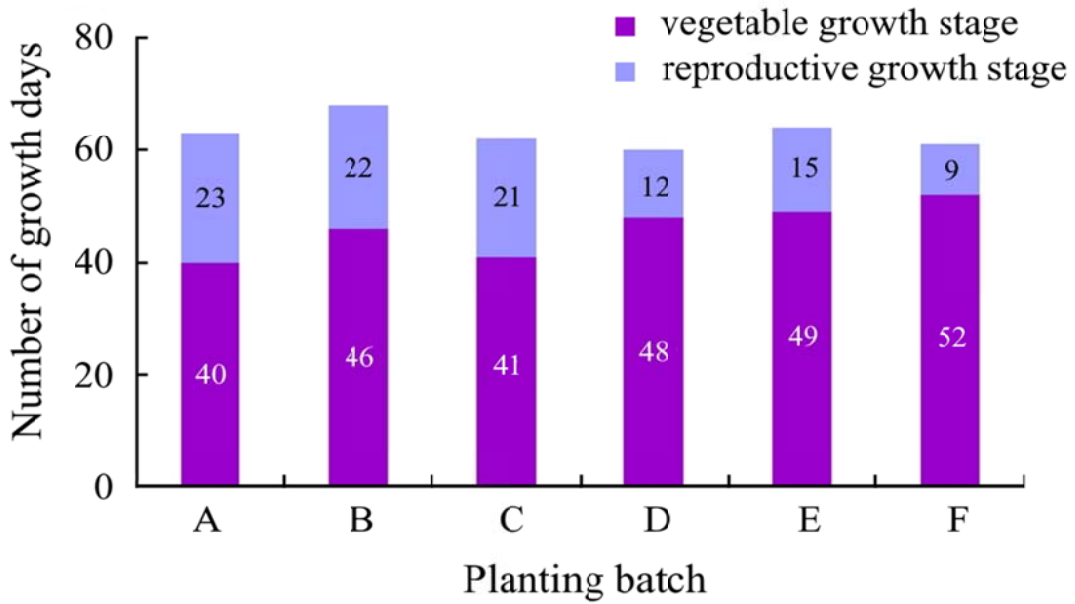
(二)生育日數

1. 青花菜‘42 號’

青花菜‘42 號’的生育日數平均為 63 天，各批次的全生育期長度相差不大，落於 60 至 68 天。但 D-F 批次的平均生殖生長期僅有 12 天，比 A-C 批次的平均生殖生長期 22 天短，相差較大(圖五)。

2. 青花菜‘綠寶(BR-8)’

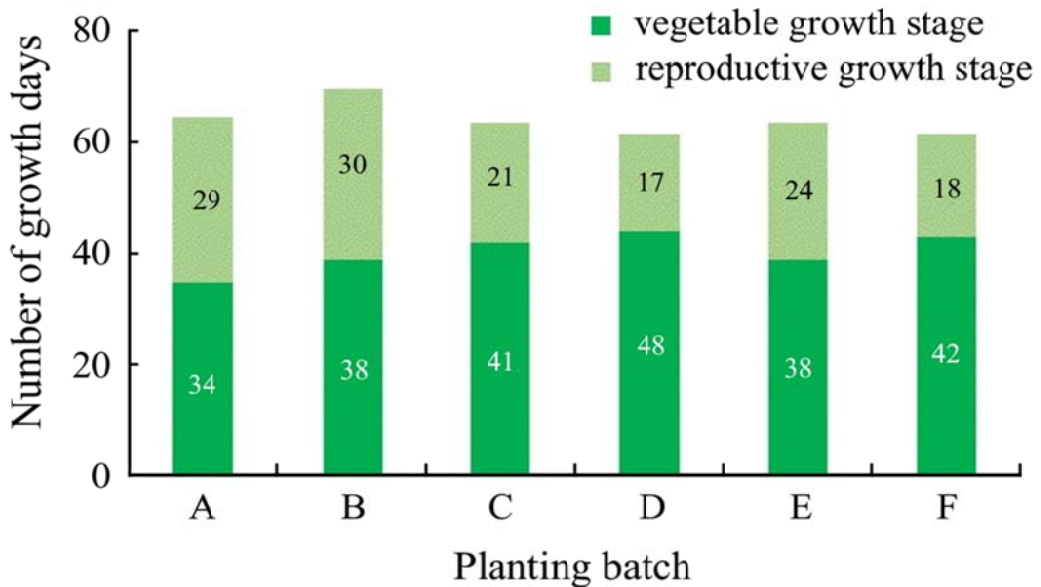
青花菜‘綠寶(BR-8)’生育平均日數同樣為 63 天，各批次的全生育期長度未有明顯差異，相較於‘42 號’植株，‘綠寶(BR-8)’更早進入生殖生長期，生殖生長期的天數較長，但各批次間仍有差異，A、B 批次之平均生殖生長期比 C-F 批次長(圖六)。



圖五、青花菜‘42 號’於各批次之生育天數。

Fig. 5. Growth days for broccoli ‘No. 42’ in each planting batch.

Planting and harvest dates as Table 1.



圖六、青花菜‘綠寶(BR-8)’於各批次之生育天數。

Fig. 6. Growth days for broccoli ‘BR-8’ in each planting batch.

Planting and harvest dates as Table 1.

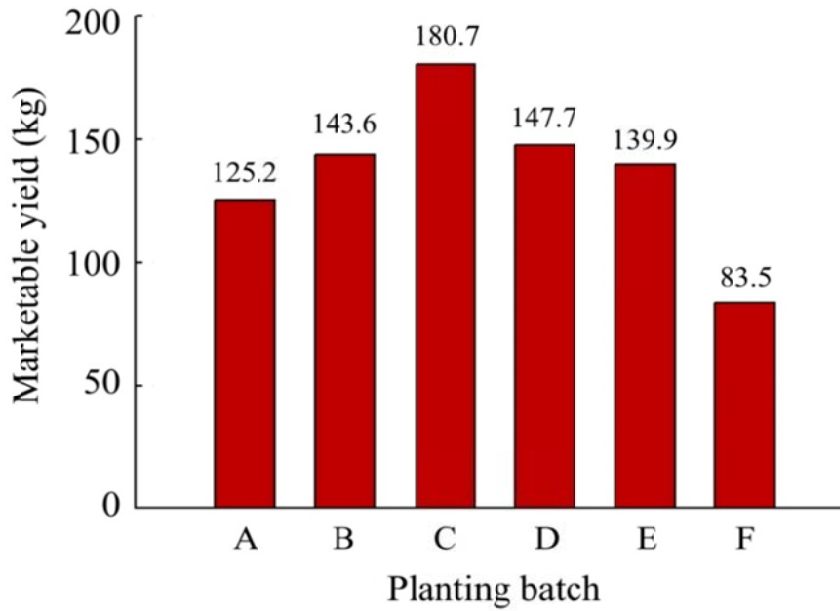
(三)有效產量分析

1. 青花菜‘42 號’

‘42 號’的有效產量以 C 批次的產量最高，F 批次的產量最低。‘42 號’在 A-F 批次的有效產量分布近似鐘型曲線(圖七)。由圖八可以觀察到 A 批次的不良率最高(16%)，B-F 批次的不良率較低，僅 F 批次的不良率略為再上升，可以推斷高不良率是 A 批次產量減損的主因。由圖九可以看到各批次的降雨量在生育期間的變化，A-C 批次在生殖生長期為無降雨，而 D-F 批次在生殖生長期則有出現降雨。推測這可能是影響 D-F 批次產量減損的原因。其中又以 F 批次的降雨量最多，日累積降雨量大可能是 F 批次總產量減少的原因。

2. 青花菜‘綠寶(BR-8)’

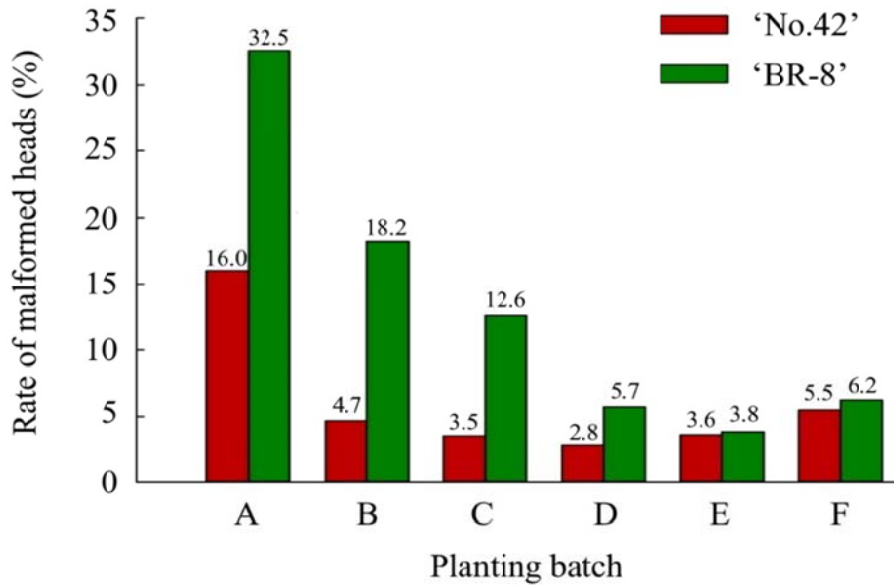
‘綠寶(BR-8)’在 C-F 批次的有效產量相對穩定，但 A、B 批次的有效產量則少了許多(圖十)。由圖八可以觀察到 A 批次的不良率最高達 32.5%，而 B、C 兩批次為次高，分別為 18.2%及 12.6%，可以推斷‘綠寶(BR-8)’的不良率是有效產量減損的主要因素。分析 A-F 批次生育期間的日均溫差異(圖十一)，較早定植的 A、B 批次，其營養生長期的日均溫較高，分別為 27.2 及 25.2°C，相比之下，C-F 批次的營養生長期的日均溫分別為 22.8、21.1、19.8 及 18.5°C，很接近青花菜營養生長及花球發育的適合溫度，分別為 20-22°C 與 15-18°C(陳等人，2013)。探討生殖生長期的日均溫，A-F 批次生殖生長期平均日均溫分別為 22.4、21.1、19.3、18.5、16.8 及 16.9°C，由此可以推斷出生育期間較高的日均溫會影響青花菜的發育，尤其是生殖生長期間的日均溫影響更大，使不良率提高而減損有效產量。



圖七、青花菜品種‘42 號’各批次之有效產量。

Fig. 7. Marketable yield for broccoli ‘No. 42’ in each planting batch.

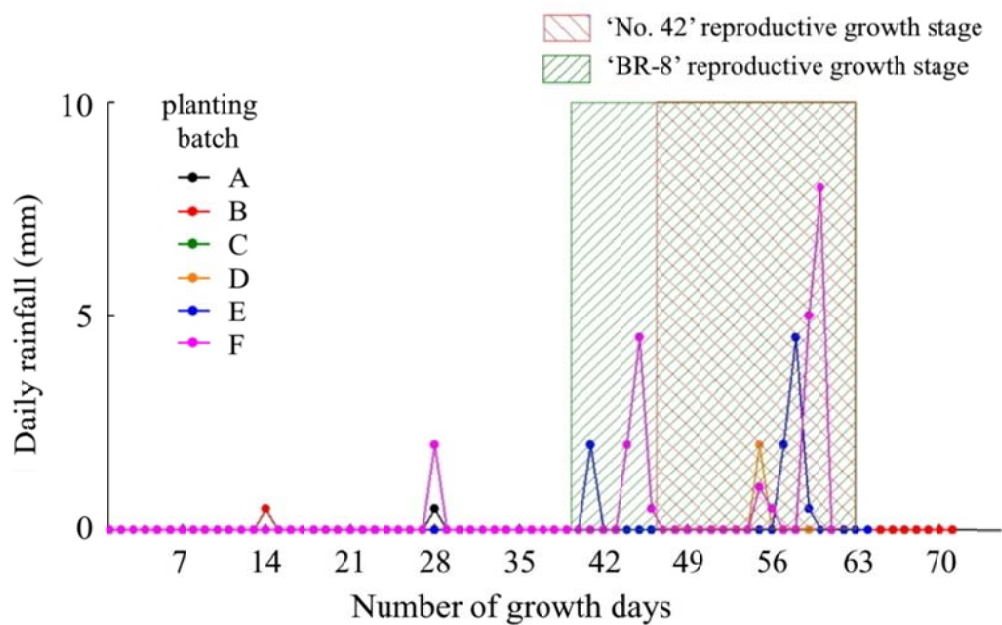
Planting and harvest dates as Table 1.



圖八、青花菜‘42 號’與‘綠寶(BR-8)’各批次之不良率。

Fig. 8. Rate of malformed heads for broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’ in each planting batch.

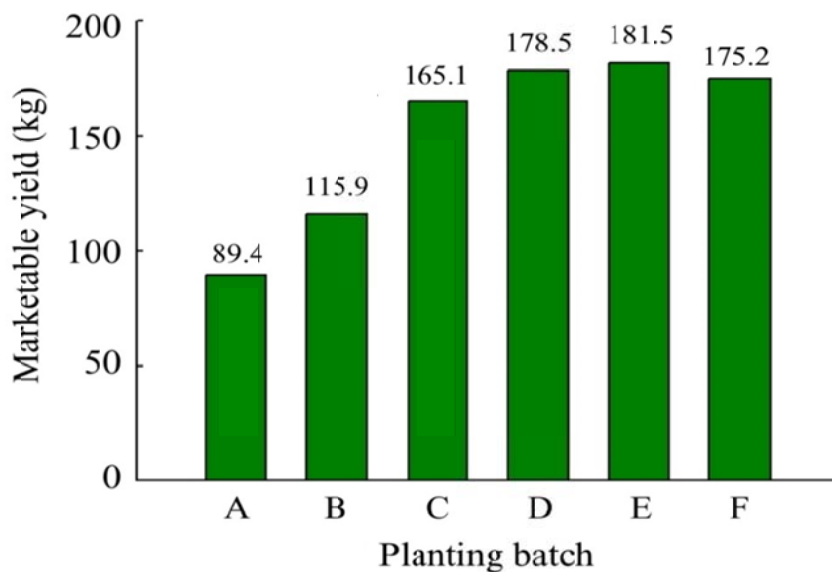
Planting and harvest dates as Table 1.



圖九、各批次青花菜生長期之每日降雨量。

Fig. 9. Daily rainfall in each planting batch of broccoli.

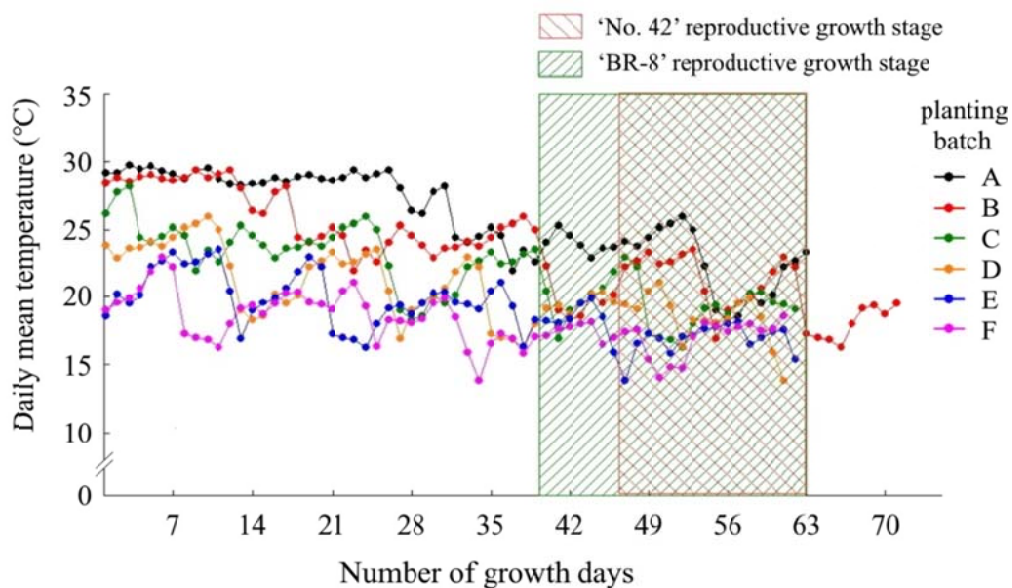
Planting and harvest dates as Table 1.



圖十、青花菜‘綠寶(BR-8)’各批次之有效產量。

Fig. 10. Marketable yield for broccoli ‘BR-8’ in each planting batch.

Planting and harvest dates as Table 1.



圖十一、青花菜各批次之日均溫。

Fig. 16. Daily mean temperature in each planting batch of broccoli.

Planting and harvest dates as Table 1.

二、影響青花菜產量關鍵因子分析

為探討影響青花菜‘42 號’及‘綠寶(BR-8)’產量的關鍵因子，故分析青花菜營養生長與生殖生長期間，環境因子(溫度、濕度、雨量和光照輻射量)與生育性狀的變化累積(植株株幅、總葉面積、葉片鮮重與莖鮮重)對四項產量指標(總產量、有效產量、不良品產量與不良率)之相關性，並於環境因子對青花菜生育性狀累積之影響關係，進一步探討其對青花菜產量之影響。

(一) 青花菜‘42 號’產量影響關鍵因子分析

1. 有效產量與總產量

如表四所示，品種‘42 號’總產量與有效產量之關鍵影響因子十分相近，具有高度一致性。環境因子方面，在營養生長期，累積降雨量和兩者均呈現高度負相關(有效產量： $r = -0.767^{**}$ ；總產量： $r = -0.817^{**}$)；在生殖生長期，累積降雨量與平均相對濕度也同樣呈現高度負相關(Repro_Rain:有效產量： $r = -0.716^{**}$ ；總產量： $r = -0.796^{**}$) (Repro_Mean RH:有效產量： $r = -0.725^{**}$ ；總產量： $r = -0.811^{**}$)，這部份顯示品種‘42 號’對降雨和高濕度非常敏感，無論是在營養生長期或生殖生長期，高降雨與高濕度都是導致總產量與有效產量下降的關鍵環境限制因子。如同 Karistsapol & Quanchit (2014)研究指出，在泰國 9 月至 12 月持續大雨使得氣候潮濕，導致青花菜

因黑腐病而減產。高溫和高濕等環境條件有利於黑腐病的傳播，若生長期間的雨水較多，容易使青花菜感染黑腐病，進而影響青花菜的生長速度和產量，而造成損失 (Arden & Alan, 1986)。

2. 不良品產量與不良率

在不良品方面，皆與生殖生長期最高溫與積溫間呈現高度正相關(Repro_Tmax : $r = 0.744^{**}$; Repro_GDD : $r = 0.729^{**}$)，生殖生長期累積光照輻射量亦與不良品產量呈中度正相關($r = 0.652^{*}$)。而在不良率方面有相似的影響因子，生殖生長期的最高溫與積溫皆與不良率之間呈現中度正相關(Repro_Tmax : $r = 0.669^{*}$; Repro_GDD : $r = 0.621^{*}$)，這些結果顯示生殖生長期間的高溫狀態是導致‘42 號’花球發育不良最主要的环境因子，使得不良品產量增加及不良率上升。

3. 環境因子對生育性狀的影響

表五顯示，營養生長期的環境因子對於株幅、總葉面積、葉片鮮重與莖鮮重等性狀具有顯著影響。其中營養生長期最高溫與四者皆呈現極高度負相關(AUC_CA : $r = -0.932^{***}$; AUC_LA : $r = -0.848^{**}$; AUC_LFW : $r = -0.912^{***}$; AUC_SFW : $r = -0.874^{***}$)，積溫亦呈現高度負相關(AUC_CA : $r = -0.784^{**}$; AUC_LA : $r = -0.713^{**}$; AUC_LFW : $r = -0.789^{**}$; AUC_SFW : $r = -0.745^{**}$)，可見‘42 號’在營養生長階段對高溫極為敏感，導致葉、莖之生長勢被削弱。於營養生長期，較高的溫度累積會抑制葉片擴張，進而影響光合產物的累積，使植株呈現較弱的營養生長勢。此外，營養生長期累積降雨量則是與生育性狀累積呈現中度至高度正相關(AUC_CA : $r = 0.814^{**}$; AUC_LA : $r = 0.686^{*}$; AUC_LFW : $r = 0.750^{**}$; AUC_SFW : $r = 0.695^{**}$)，顯示營養生長期間適度降雨會減緩高溫逆境的影響，使植株生長較為穩定。進一步分析生育性狀對產量之影響，由表六可見四種生育性狀累積量與不良品產量和總產量具有中度負相關($r = -0.578$ 至 -0.644)，代表植株在營養生長期間若能累積較多的生物量，可減少不良品產生；而總產量與生育性狀累積呈負相關，主因是總產量為有效產量和不良品產量的總和，因而與不良品的趨勢相近。

‘42 號’對氣象具高度敏感性，營養生長期間的高溫會抑制生長勢，而適度水分有助於青花菜株幅、葉面積與鮮重等生物量累積。這些生育性狀累積與不良品呈負相關，代表營養期生長越健壯，其不良品產量越低。在生殖生長期間的高溫與高濕環境則會顯著減少有效產量。由於總產量包括有效產量與不良品產量兩部分，有效產量顯著下降時，也會反應在總產量的下降。

(二) 品種‘綠寶(BR-8)’產量影響關鍵因子分析

1. 有效產量與總產量

如表四所示，‘綠寶(BR-8)’的有效產量受到多項生殖期氣象因子的強烈影響，特別是生殖生長期的溫度與日照輻射量。其中，有效產量與生殖生長期積溫之間呈高度負相關($r = -0.887^{***}$)，與生殖生長期最高溫亦呈高度負相關($r = -0.862^{***}$)，以及生殖生長期累積日照輻射量同樣顯示高度負相關($r = -0.860^{***}$)，總產量(Total yield)亦有相同的影響，其與生殖生長期積溫之間呈中度負相關($r = -0.767^{**}$)，與生殖生長期累積日照輻射量呈中度負相關($r = -0.739^{**}$)，與生殖生長期最高溫則呈中度負相關($r = -0.712^{**}$)，此結果顯示‘綠寶(BR-8)’對生殖期高溫與強日照極為敏感。

2. 不良品產量與不良率

‘綠寶(BR-8)’的不良品產量與不良率明顯受到生殖期高溫、高積溫與高日照影響。不良品產量方面，不良品產量與生殖生長期最高溫之間呈極高度正相關($r = 0.918^{***}$)，與生殖生長期積溫和累積日照輻射量皆呈高度正相關(Repro_GDD： $r = 0.862^{***}$ ；Repro_Solar： $r = 0.846^{***}$)。不良率有相同的影響，其與生殖生長期最高溫與積溫之間皆呈極高度正相關(Repro_Tmax： $r = 0.935^{***}$ ；Repro_GDD： $r = 0.915^{***}$)，與生殖生長期累積日照輻射量呈高度正相關($r = 0.884^{***}$)。此外，營養生長期最高溫與不良率亦呈現高度正相關($r = 0.839^{***}$)。這些結果顯示綠寶(BR-8)對高熱環境十分敏感，尤其是在生殖生長期，若遭遇高溫逆境會影響花球發育異常，使不良率顯著提升。強日照伴隨著高溫，當花球發育期間遭遇熱逆境會影響花芽細胞分化受阻，陳等人(2013)研究青花菜在花芽分化期的高溫，會導致花芽發育大小不均，以及萼片膨大或蓬鬆化，還有花梗抽長和花蕾褐化敗育等現象，導致花球鬆散、變形或黃化，致使不良品顯著增加。Thomas & Karen (1998)研究也指出青花菜在生殖生長期間，嚴重的熱傷害會導致花芽發育過小而無法採收，影響花球的品質及總產量減少。

3. 環境因子對生育性狀的影響

由表五可以看到，營養生長期間的環境因子對於‘綠寶(BR-8)’的生育性狀累積量並無顯著影響，顯示‘綠寶(BR-8)’營養生長期對於環境敏感度較低，生長勢相較於‘42號’比較穩定。而生育性狀對產量的影響可由表六觀察到，株幅、總葉面積、葉片鮮重與莖鮮重等性狀的生長累積對於有效產量與總產量皆呈中度正相關($r = 0.583^*$ 至 0.654^*)，且莖鮮重累積對於不良率呈中度負相關，這顯示營養生長期間的生長勢越強，可以反應在有效產量的增加，並且減少不良品產生。

整體而言，‘42 號’與‘綠寶(BR-8)’的產量與不良率均受到栽培環境的氣象因子高度影響，但兩者對環境的反應有所不同，尤其在營養生長期的差異較大，除了高溫之外，‘42 號’對於濕度也十分敏感，降雨量多，且高相對濕度的環境下，產量顯著減少。而‘綠寶(BR-8)’雖然在營養生長期間，環境因子對生育性狀的累積較無顯著影響，營養生長與生殖生長期間的高溫與強日照則是顯著影響產量與不良率，在熱逆境下更容易產生不良品與畸形，顯示‘綠寶(BR-8)’的耐熱性較‘42 號’低。根據相關係數來判斷，品種‘42 號’最主要的影響因子為營養生長期降雨量、以及生殖生長期降雨量和平均相對濕度，其容易因降雨和濕度而造成生理性病害或生育障礙。‘綠寶(BR-8)’的部分最主要因子為生殖生長期的積溫、最高溫、光照與相對濕度，以及營養生長期的最高溫與積溫。

三、栽培適期探討

根據研究結果顯示，‘42 號’在春季栽培的產量表現沒有秋至冬季栽種高，原因是春季的雨量較多，而栽培環境雨量與濕度對於‘42 號’影響較大，因此春季並不適合‘42 號’生長。‘綠寶(BR-8)’對於溫度的反應較大，高溫逆境會導致畸形花球增加，從秋季定植後日均溫會逐漸下降，反應在‘綠寶(BR-8)’的有效產量會提高，綜合上述結果，‘42 號’適應營養生長期溫度較高、生殖生長期溫度較低，且降雨量較少的季節，因此避開較多雨的春季，選擇在秋冬季種植與採收較適合，有效產量和總產量可以提高。而‘綠寶(BR-8)’對生殖生長期的高溫與光照極為敏感，較適合生長於溫度較低的季節，因此適合種植並採收於冬季與春季，避免夏季與秋季的高溫影響‘綠寶(BR-8)’的花球品質與產量。

在本次研究中可以發現定植日對於有效產量的影響非常明顯，‘42 號’最高產區的有效產量比整期作平均有效產量高出 32.10%，而‘綠寶(BR-8)’最高產區的有效產量比整期作平均有效產量高出 20.27%；研究結果顯示，透過精確掌握影響產量的關鍵參數以安排適當的種植時機，可以減少因環境導致的產量損失，進而有效提高產量。另外透過在栽培管理上，針對‘42 號’需優先管理濕度與病害的風險，而‘綠寶(BR-8)’則應加強生殖生長期間的降溫與遮陰措施，將可以增加有效產量，並減少畸形花球的產生。

表四、環境因子與青花菜‘42 號’與‘綠寶’四項產量指標間之相關係數(r)及其顯著性(p -value)

Table 4. Correlation coefficients (r) and p -values between environmental factors and four yield indicators of broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’

Parameter	Marketable yield		Total yield		non-marketable yield		rate of malformed heads	
	r	p -values	r	p -values	r	p -values	r	p -values
‘No. 42’								
Veg_GDD	0.157	0.625	0.292	0.357	0.606	0.037*	0.539	0.070
Repro_GDD	0.343	0.275	0.504	0.094	0.729	0.007**	0.621	0.031*
Veg_Tmax	0.431	0.162	0.572	0.052	0.639	0.025*	0.517	0.085
Repro_Tmax	0.195	0.544	0.360	0.250	0.744	0.006**	0.669	0.017*
Veg_Mean RH	-0.587	0.045*	-0.572	0.052	0.056	0.863	0.177	0.583
Repro_Mean RH	-0.725	0.008**	-0.811	0.001**	-0.396	0.203	-0.223	0.487
Veg_Solar	-0.312	0.323	-0.220	0.492	0.409	0.187	0.451	0.141
Repro_Solar	0.431	0.162	0.575	0.051	0.652	0.022*	0.528	0.078
Veg_Rain	-0.767	0.004**	-0.817	0.001**	-0.238	0.457	-0.064	0.844
Repro_Rain	-0.716	0.009**	-0.796	0.002**	-0.372	0.233	-0.205	0.523
‘BR-8’								
Veg_GDD	-0.755	0.005**	-0.627	0.029*	0.797	0.002**	0.796	0.002**
Repro_GDD	-0.887	0.000***	-0.767	0.004**	0.862	0.000***	0.915	0.000***
Veg_Tmax	-0.785	0.003**	-0.653	0.021*	0.825	0.000***	0.839	0.000***
Repro_Tmax	-0.862	0.000***	-0.712	0.009**	0.918	0.000***	0.935	0.000***
Veg_Mean RH	-0.286	0.367	-0.254	0.426	0.262	0.410	0.262	0.411
Repro_Mean RH	0.683	0.014*	0.557	0.060	-0.745	0.005**	-0.719	0.008**
Veg_Solar	-0.627	0.029*	-0.504	0.095	0.702	0.011*	0.691	0.013*
Repro_Solar	-0.860	0.000***	-0.739	0.006**	0.846	0.000***	0.884	0.000***
Veg_Rain	0.197	0.540	0.161	0.616	-0.212	0.508	-0.201	0.531
Repro_Rain	0.479	0.115	0.377	0.227	-0.553	0.062*	-0.532	0.075

Correlation coefficients (r) were calculated using Pearson’s correlation analysis.

*, **, and *** indicate significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

Veg and Repro represent vegetative and reproductive growth stages, respectively.

表五、環境因子與青花菜‘42 號’與‘綠寶’生育性狀因子間之相關係數(r)及其顯著性(p -value)

Table 5. Correlation coefficients (r) and p -values between environmental factors and growth traits of broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’

Growth trait	AUC_CA		AUC_LA		AUC_LFW		AUC_SFW	
	r	p -values	r	p -values	r	p -values	r	p -values
‘No. 42’								
Veg_GDD	-0.784	0.003**	-0.713	0.009**	-0.789	0.002**	-0.745	0.005**
Veg_Tmax	-0.932	0.000***	-0.848	0.000***	-0.912	0.000***	-0.874	0.000***
Veg_Mean RH	0.484	0.111	0.313	0.322	0.427	0.166	0.363	0.246
Veg_Solar	-0.263	0.408	-0.158	0.623	-0.270	0.396	-0.201	0.530
Veg_Rain	0.814	0.001**	0.686	0.014*	0.750	0.005**	0.695	0.012*
‘BR-8’								
Veg_GDD	-0.209	0.515	-0.380	0.224	-0.366	0.242	-0.377	0.228
Veg_Tmax	-0.355	0.257	-0.473	0.121	-0.462	0.130	-0.486	0.109
Veg_Mean RH	-0.339	0.282	-0.362	0.247	-0.400	0.198	-0.438	0.155
Veg_Solar	0.030	0.927	-0.136	0.674	-0.114	0.725	-0.127	0.695
Veg_Rain	0.118	0.715	0.217	0.498	0.197	0.540	0.132	0.684

Correlation coefficients (r) were calculated using Pearson’s correlation analysis.

*, **, and *** indicate significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

Veg and Repro represent vegetative and reproductive growth stages, respectively.

*AUC means area under the curve ; CA: canopy area ; LA: total leaf area ; LFW: leaf fresh weight ; SFW: stem fresh weight

表六、青花菜‘42 號’與‘綠寶’生育性狀與四項產量指標間之相關係數(r)及其顯著性(p -value)

Table 6. Correlation coefficients (r) and p -values between growth trait variables and four yield indicators of broccoli ‘No. 42’ and ‘BR-8’

Growth trait	Marketable yield		Total yield		non-marketable yield		rate of malformed heads	
	r	p -values	r	p -values	r	p -values	r	p -values
‘No. 42’								
AUC_CA	-0.511	0.089	-0.653	0.021*	-0.644	0.024*	-0.505	0.094
AUC_LA	-0.462	0.130	-0.596	0.041*	-0.606	0.037*	-0.476	0.118
AUC_LFW	-0.435	0.157	-0.578	0.049*	-0.644	0.024*	-0.518	0.084
AUC_SFW	-0.451	0.141	-0.584	0.046*	-0.604	0.037*	-0.478	0.116
‘BR-8’								
AUC_CA	0.587	0.045*	0.583	0.047*	-0.387	0.214	-0.491	0.105
AUC_LA	0.610	0.035*	0.605	0.037*	-0.405	0.191	-0.492	0.104
AUC_LFW	0.585	0.046*	0.559	0.059	-0.441	0.151	-0.505	0.094
AUC_SFW	0.654	0.021*	0.606	0.037*	-0.538	0.071	-0.612	0.034*

Correlation coefficients (r) were calculated using Pearson’s correlation analysis.

*, **, and *** indicate significance at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

Veg and Repro represent vegetative and reproductive growth stages, respectively.

*AUC means area under the curve ; CA: canopy area ; LA: total leaf area ; LFW: leaf fresh weight ; SFW: stem fresh weight

結 論

本研究針對青花菜兩品種及不同產期對其產量之影響進行探討，並透過環境數據與生理性狀的蒐集，瞭解影響青花菜產量的主要關鍵因子，未來的研究應用方向可以擴大至結合不同作物或品種的栽培環境關鍵參數與數據累積，進一步開發精準化的栽培方案，針對不同地區與品種，提供最佳種植時間與模式的建議，從而進一步提升產量與品質，增進生產者的收益。若能深化與契作商及農民的合作，透過實地應用與使用者反饋，加深在田間管理中的應用價值，並建立教育與推廣機制，讓更多生產者能受惠於數據驅動的農業技術。

參考文獻

1. 農業部農糧署農情報告資源網。2023。 https://agr.afa.gov.tw/afa/afa_frame.jsp
2. 農業氣象觀測網監測系統。2023。
https://agr.cwa.gov.tw/NAGR/history/station_month
3. 海關進出口統計資料。2025。 https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA31_LIST
4. 王仕賢、謝明憲。2005。農家要覽農作篇(二)青花菜 增修訂三版。P.451-454。豐年社 臺北。
5. 柯侑婷。2007。十字花科蔬菜中硫醣苷含量與芥子酶特性之研究。臺灣大學園藝學研究所學位論文。
6. 郭明池、謝明憲、彭瑞菊、張為斌、邱冠融。2021。加工用青花菜品種延長產期試作及省工一次施肥效益評估。臺南區農業改良場研究彙報第 78 號。
7. 陳葦玲、蕭政弘、蕭瑞展。2013。高溫逆境下青花菜之生理、組織結構變化及開花表現之研究。臺中區農業改良場研究彙報第 121 號 p.9-24。
8. 游詩妮、吳建銘、李昱錡、林靈。2020。中部地區甘藍農友轉作青花菜意願之研究。臺中區農業改良場研究彙報第 148 號 p.47-60。
9. Alina K., Włodzimierz K., Mikołaj K. 2009. Effect of temperature on the yield and quality of broccoli heads. *Vegetable Crops Research Bulletin* 71, 51-58.
10. Alina K., Włodzimierz K., Mikołaj K., Jolanta L., Tomasz S., Barbara F. 2010. The effect of temperature on the broccoli yield and length of the period from head initiation to harvest. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 9(3), 167-174.
11. Arden F. S., Alan A. M. 1986. *Vegetable Diseases and Their Control*, pp. 251-253. New York : J. Wiley.
12. Bakker C. J., Swanton C. J., McKeown A. W. 2009. Broccoli growth in response to increasing rates of pre-plant nitrogen. I. Yield and quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(3), 527-537.
13. Dhankhar S. K., Chandanshive A. V. 2017. Energy requirements for attainment of different phenological stages in broccoli inbreds. *Indian J. Hort.* 74(4), 623-626.
14. Fahey J. W. 2003. Brassicas. In "Encyclopedia of food science and nutrition", eds. C. Benjamin, T. Luiz and F. Paul. pp. 606-615. St Louis : Academic Press.
15. Gregory S. M., Wilhelm W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.*, 4(87), 291-300.

16. Heather D. W., Sieczka J. B., Dickson M. H., Wolfe D. W. 1992. Heat tolerance and holding ability in broccoli. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 117, 887-892.
17. Karistsapol N., Quanchit S. 2014. Incidence of bacterial disease and yield of broccoli as influenced by different rain protectors and varieties during the rainy season in southern Thailand. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 7(13), 2687-2692.
18. Kim J. H., Yun J. I. 2008. On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climate surfaces for South Korea, *Korean J. of Agri. and Fore. Meteorol.*, 10(1), 1-8.
19. Mark W. F., Thomas B. 2011. Evaluation of experimental broccoli hybrids developed for summer production in the eastern United States. *HortScience*, 46, 858-863.
20. Misael T. D. Jr. 1989. Growth and development studies with broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) : a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Horticulture at Massey University. Massey University.
21. Monteith J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 281(980), 277-294.
22. Nicolas T. 1989. Effect of nitrogen sources and rates on yield and hollow stem development in broccoli. *Can. J. Plant Sci.* 69, 1049-1053.
23. Robert J. D. 1997. Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122, 169-174.
24. Sivarajan S. 2011. Estimating yield of irrigated potatoes using aerial and satellite remote sensing. a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Irrigation Engineering at Utah State University.
25. Soumaila S., El-Sebai O.I., Sanderson R. 2008. Severity of Verticillium wilt, plant growth, and spectral reflectance indices of chile pepper under periodic flooding and no-flooding conditions. *HortScience* 43(2), 414-419.
26. Stan L. 2020. High-resolution UAV time series for crop monitoring to evaluate Plant-Soil Feedback in a potato experiment. a thesis submitted in partial fulfilment of the degree of Master of Science at Wageningen University and Research Centre.
27. Thomas B., Karen J. P. 1998. High temperature arrest of inflorescence development broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.). *J. Exp. Bot.*, 49, 101-106.

Analysis of Key Environmental and Growth Trait Factors Affecting Broccoli Yield¹

Chun-Jung Shen²、Yu-Heng Lin^{3*} and Wei-Ling Chen⁴

ABSTRACT

Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) is an important winter vegetable crop in Taiwan. However, its growth period and yield are highly influenced by environmental conditions, often resulting in uneven curd maturity, increased malformed heads, and elevated production costs. through sequential planting trials conducted during the 2021–2022 growing seasons. Environmental variables, including temperature, relative humidity, rainfall, and solar radiation, as well as growth traits, were systematically collected and analyzed using Pearson's correlation analysis to identify key factors affecting yield and quality at different growth stages. The results showed that, for cultivar 'No. 42', marketable and total yield were strongly and negatively correlated with rainfall and mean relative humidity during both vegetative and reproductive growth stages, indicating that excessive moisture was the primary limiting factor for yield. In addition, high temperature and growing degree days (GDD) during the reproductive growth stage significantly increased non-marketable yield and the rate of malformed heads. In contrast, cultivar 'BR-8' was highly sensitive to thermal and radiative conditions during the reproductive growth stage. Marketable and total yield exhibited strong negative correlations with growing degree days, maximum temperature, and cumulative solar radiation, while high-temperature stress markedly increased the proportion of malformed heads, indicating lower heat tolerance.

Overall, the results indicate that 'No. 42' is better suited to cultivation during cool and relatively dry autumn–winter seasons to avoid high humidity stress, whereas 'BR-8' should

¹Contribution No.1121 from Taichung DARES, MOA.

^{2,3}Research assistant and Associate Researcher of Taichung DARES, MOA

⁴Researcher and Deputy Director of of Floral Industry Innovation Center, Ministry of Agriculture, MOA

*Corresponding Author Email: linyh@tcdares.gov.tw

be planted in winter to early spring under cooler conditions to minimize heat stress during the reproductive growth stage. This study clarifies cultivar-specific key environmental factors affecting broccoli yield and quality, providing a scientific basis for optimizing planting schedules and for the future development of growth period and yield prediction models.

Keywords: *Brassica oleracea* L. var. *italica*, growth period, environmental factors, yield, abnormal heads

