

# 青花菜光合作用特性與最適氮肥施用量探討<sup>1</sup>

沈峻榮<sup>2</sup>、陳葦玲<sup>2,3</sup>

## 摘 要

為建立青花菜在臺灣栽培環境下植株光合生理及肥培管理基本參數，本試驗以鮮食用青花菜‘42’號為材料，分析環境因子對不同生育期光合作用影響，並評估最適氮肥施用量。結果顯示各生育期結果一致，以氣溫 20 及 25°C 下‘42’青花菜淨光合作用速率(Pn)較佳，Pn 值隨著光合作用光子通量密度(PPFD)增加而提升，光飽合點(Lsp)約 1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，CO<sub>2</sub> 飽和點(CO<sub>2</sub>sp)約為 800 ppm，並從田間植株光合作用實測數值推算出 PPFD、氣溫與 Pn 間呈現 Paraboloid 曲線相關。在氮肥施用量評估方面，以不同處理(0、5、20、40、80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$ )建立 3 期作植株生育及產量資料，結果以 40 及 80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  處理有較高的株幅、葉面積及地上部鮮重，其中又以 40  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  肥處理有較高的產量，花球收穫指數於春作為 36%，冬作則為 30.9%，但處理間葉片氮含量無顯著差異，貯藏品質調查則以 20 及 40  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  處理花球有較佳的表現。透過對青花菜植株光合生理資料蒐集分析，推薦 40  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  為最適施用量，有助於後續建立生長產量預測模式及協作生產管理。

關鍵字：青花菜、光合作用、氮肥、產量

## 前 言

青花菜(*Brassica oleracea* L. var *italica*)為十字花科蕓苔屬之世界性大宗蔬菜作物，由野生甘藍演化而來<sup>(24)</sup>，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<sup>(1)</sup>，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，例如芳香族及吡啶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解毒酶系統是一種具誘導非的生物性防治系統，能防護哺乳類動物之DNA免於受到生化致癌物之傷害<sup>(4)</sup>。而其中又以青花菜之硫配醣體含量較高<sup>(17,36)</sup>，消費量逐漸提升。2020-2022年臺灣青花菜種植面積年均約1,500公頃，產量3萬多公噸<sup>(12)</sup>，產值約達7億8,000萬元新臺幣，由於適合冬季裡作生產，多以契作栽培，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1個月，分切

<sup>1</sup> 農業部臺中區農業改良場研究報告第 1069 號。

<sup>2</sup> 農業部臺中區農業改良場計畫助理、副研究員。

<sup>3</sup> 通訊作者(E-mail: chenwl@tdais.gov.tw)。

後以急速冷凍(individually quick freezing, IQF)則可供應半年以上，能調節國內夏季蔬菜供應及外銷市場需求。且青花菜國內市場需求暢旺，除產季國內生產外，鮮食進口量達17,520公噸，冷凍加工品也有7,200多公噸<sup>(13)</sup>，為一具市場潛力之重要蔬菜。

光合作用是植物提供生長能量與碳同化的基本過程，除了受到植體本身生理、組織構造或型態因子影響外，亦受到光線、溫度、蒸氣壓差、CO<sub>2</sub>濃度等外在環境因子影響<sup>(7)</sup>。植物體乾物重之90%以上來自光合作用產物<sup>(3,5,10,26)</sup>，生物產量形成的生理基礎主要包含光合作用面積如葉面積指數(leaf area index, LAI)、葉面積比例(leaf area ratio, LAR)、淨光合作用同化率(net assimilation rate, NAR)、光輻射利用效率(radiation use efficiency, RUE)、光合作用時間及呼吸消耗等<sup>(33)</sup>，而作物生長速率即為淨光合作用同化率，約為光合作用同化率乘以葉面積指數，基於葉面積的光利用效率(light use efficiency, LUE)，由植被所擷取到的所有入射光之光輻射來計算，其公式為(growth rate, GR) ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) =  $\text{NAR} \cong \text{Pn} \times \text{LAR} = \text{LUE}(1 - e^{-k\text{LAI}}) \times \text{Incident PAR}$ <sup>(34)</sup>，因此瞭解環境因子對青花菜光合作用之影響，有助於預測生長模式及產量。青花菜為花菜類作物，施肥方式不同於短期葉菜類，且盛產有短期貯藏之需求，施肥需依目標調整。青花菜生育對氮、鉀及鈣的需求較大，植體內氮、鉀及鈣含量是所有元素中的前三名，分別為3.3%、5%及2%，植體若是缺氮、鉀及鈣相較於正常植株之葉面積分別減少92%、77%及96%，植體乾物重也會分別減少70%、66%及68%<sup>(14)</sup>，顯示氮肥對青花菜生長之重要性。高氮肥施用雖能提高青花菜的產量，並讓花球更加濃綠且減少畸形產生，但也容易導致莖部發生空心與腐爛<sup>(15,16)</sup>，氮肥缺乏則會導致葉片黃化，植株矮小且葉片較小，亦降低光合作用速率與氣孔導度<sup>(14)</sup>，因此適量的氮肥十分重要，然臺灣氣候環境下仍缺乏青花菜栽培基礎參數，故本試驗擬探討青花菜光合作用相關生理特性並評估最適栽培期及氮肥施用量，以供栽培管理與生育產量預測之參考。

## 材料與方法

### 一、試驗材料

以目前主流鮮食‘42’青花菜為試驗品種，4週大穴盤苗(博華育苗場，彰化，臺灣)依下列試驗定植於內含 Peltracom 泥炭土介質(Lorry Ltd., Germany)、內徑 39.5 cm、高 33 cm 的歐洲圓盆內，至於溫室內栽培或定植於臺中區農業改良場試驗田區(24°08'N, 120°32'E)，畦寬(含畦溝)1.4 m，行株距 45 cm × 45 cm，栽培管理期間視介質或土壤狀態給水維持水分充足，並依照慣行栽培方式管理。

### 二、試驗處理

試驗一：青花菜光合作用特性研究

#### 1. 光強度及氣溫之影響

定植後 15、30 及 45 天之植株移置 15、20、25 及 30±2°C 的生長箱內，馴化 24 hrs 後進行調查，生長箱內 CO<sub>2</sub> 濃度設為 400 mg·L<sup>-1</sup>，以人工光源(6400-02B LED light source)提供光強度 0-2,000

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，由全暗開始依序提供光線，其強度每次遞增  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，約 5 分鐘待植株反映穩定後，量測植株之光合作用數值，包括光合作用速率及氣孔導度等相關生理。

## 2. CO<sub>2</sub> 濃度之影響

將定植 15、30 及 45 天之植株，移置於 20 及 25±2°C 的生長箱內，馴化 24 hrs 後進行實驗，光強度設定為  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，透過 CO<sub>2</sub> 鋼瓶提供 CO<sub>2</sub> 濃度由  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  開始至  $1,200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，每次遞增  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，待植株狀態穩定 10 分鐘後，量測植株光合作用相關生理值。

## 3. 光合作用日變化

調查用青花菜取自氮肥施用量評估之田間試驗，以  $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  氮肥處理植株為取樣對象，於 2020/2/18 定植，定植後 15、30 及 45 天調查之植株自 06:00AM 至 18:00PM 光合作用相關生理變化，量測間格為 1 hrs。

### 試驗二：青花菜氮肥施用量評估

植株分別於 2019/10/16、2020/2/18 及 2020/10/19 定植，氮肥用量試驗處理在 2019 年期作施用量為 0、10、20、40 及  $60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，2020 年修正為 0、5、20、40、 $80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，施用比例及時間則依據合理化施肥手冊<sup>(11)</sup>建議如表一。

表一、青花菜於 2019 及 2020 年氮肥施用量試驗處理

Table 1. Treatment of nitrogen applied quantity for broccoli in 2019/2020 two years.

Treatment	Total fertilization ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )		Basic fertilization ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )		1st top dressing <sup>1</sup> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )		2nd top dressing ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )		3rd top dressing ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
N1	10	5	4.5	2.25	1.5	0.75	1.5	0.75	2	1.25
N2	20	20	9	9	3	3	3	3	4	5
N3	40	40	18	18	6	6	6	6	19	10
N4	60	80	27	36	9	12	9	12	12	20

<sup>1</sup>First, second, and third dressing were applied on 10, 25, and 35 day after transplanting, respectively. K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were applied 20 and  $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  for each treatment.

## 二、分析與調查項目

### 1. 光合生理調查

淨光合作用(net photosynthetic rate, Pn)、氣孔導度(stomatal conductance, E)及蒸散作用(transpiration rate, gs)等生理數值測定參照 Chen 等(2014)之步驟<sup>(19)</sup>，以可攜式光合作用測定儀 LI-COR 6400xt (Li-Cor Inc., Lincoln, NE., USA)量測植株第 4 片完全展開葉，氣體流速設定為  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、上下葉片氣孔數比設為 0.2，光強度與 CO<sub>2</sub> 濃度之設定因應試驗處理調整，光合作用日變化及氮肥施用量評估為田間測量，光源設為自然光，CO<sub>2</sub> 濃度固定設為  $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 2. 植體生育性狀調查及生理表現

植株定植後每 7 天調查植株各生育性狀及光合作用相關生理反應，其中生育性狀調查項目包括株幅、地上部鮮重、總葉面積、葉面積指數、葉綠素計讀值及單位面積最終產量。不同株齡共 580 筆田間調查及單株影像，後續可用於生長建立之分析資料。

- (1) 株幅：俯瞰植株並量測最遠葉片之對角距離作為長度，再以垂直 90°量測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) 地上部鮮重：葉片鮮重與莖鮮重加總。
- (3) 總葉面積：將植株上所有葉片剪下，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。葉面積範圍以葉柄之上的葉片為主。
- (4) 葉面積指數(LAI)：葉面積指數公式=株幅/總葉面積。
- (5) 葉綠素計讀值(SPAD-502 value)：俯視植株上方選擇 3 片成熟葉，於葉緣避開葉脈處並以葉綠素計(SPAD-502, Minolta Camera Co., Tokyo)測量葉色，測得 3 片成熟葉之讀值再平均作為一重複。

## 3. 植體及土壤氮含量

- (1) 植體氮含量分析：將地上部以蒸餾水清洗兩次，經 70°C 烘乾、磨粉、灰化，以硫酸分解後，利用蒸餾法測定植體全氮濃度。
- (2) 土壤氮含量分析：取土面下 20 cm 處土壤後風乾，以體積比 1：5 的比例混和蒸餾水，放置 1hr 再取上清液，加入硫酸並以擴散法來測定土壤全氮濃度。
4. 花球儲藏品質調查：花球採收後放置於保麗龍箱內，加入碎冰預冷後貯藏在 1°C 冷藏庫，以目視觀察花球外觀及顏色變化，貯藏至 35 至 40 天花球變化為止。

## 四、試驗設計與統計

試驗採隨機完全區集設計(randomized complete block design , RCBD)，每一處理三重複。每一重複取 6 株調查。數據則以 Costat 6.2(CoHort Software, Berkeley, CA, USA)進行 Fisher's Least Significant Difference test ( $P < 0.05$ )分析各處理間有無顯著差異，並以 Sigmaplot 12.5 (SPSS Inc., USA)進行迴歸分析與繪圖。

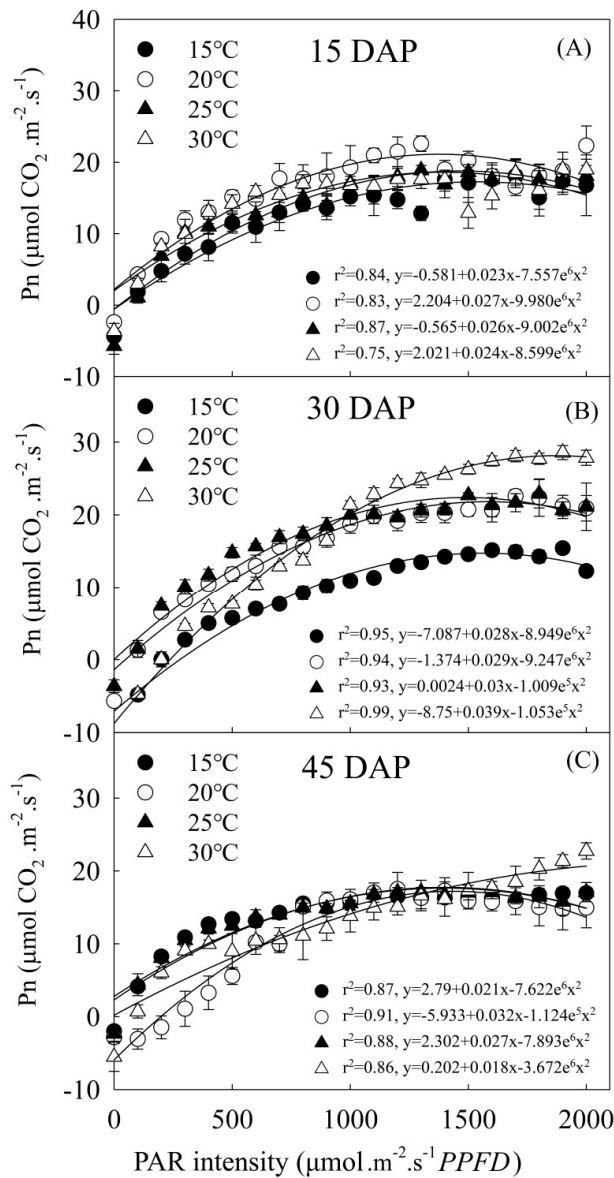
# 結 果

## 一、青花菜光合作用特性

### 1. 光強度及氣溫之影響

不同株齡(15、30、45 DAP)之青花菜栽培於不同溫度(15、20、25、30°C)下，結果顯示溫度對苗期(15DAP)的Pn影響不明顯，在不同光度下以20°C有較佳Pn值，而15°C最低，然當植株進入生長快速期(30DAP)及開花期(45DAP)，在30°C下，提高PPFD，Pn顯著增加且在2,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 時出

現尚未到達光飽和之狀態，其曲線光飽和點顯著高於其他三處理溫度。整體而言，20及25°C下青花菜Pn較佳，Lsp約1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，此時15DAP、30DAP及45DAP植株Pn值分別為26  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 及16  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，可見隨著株齡增加，最大Pn值隨之減少(圖一)。

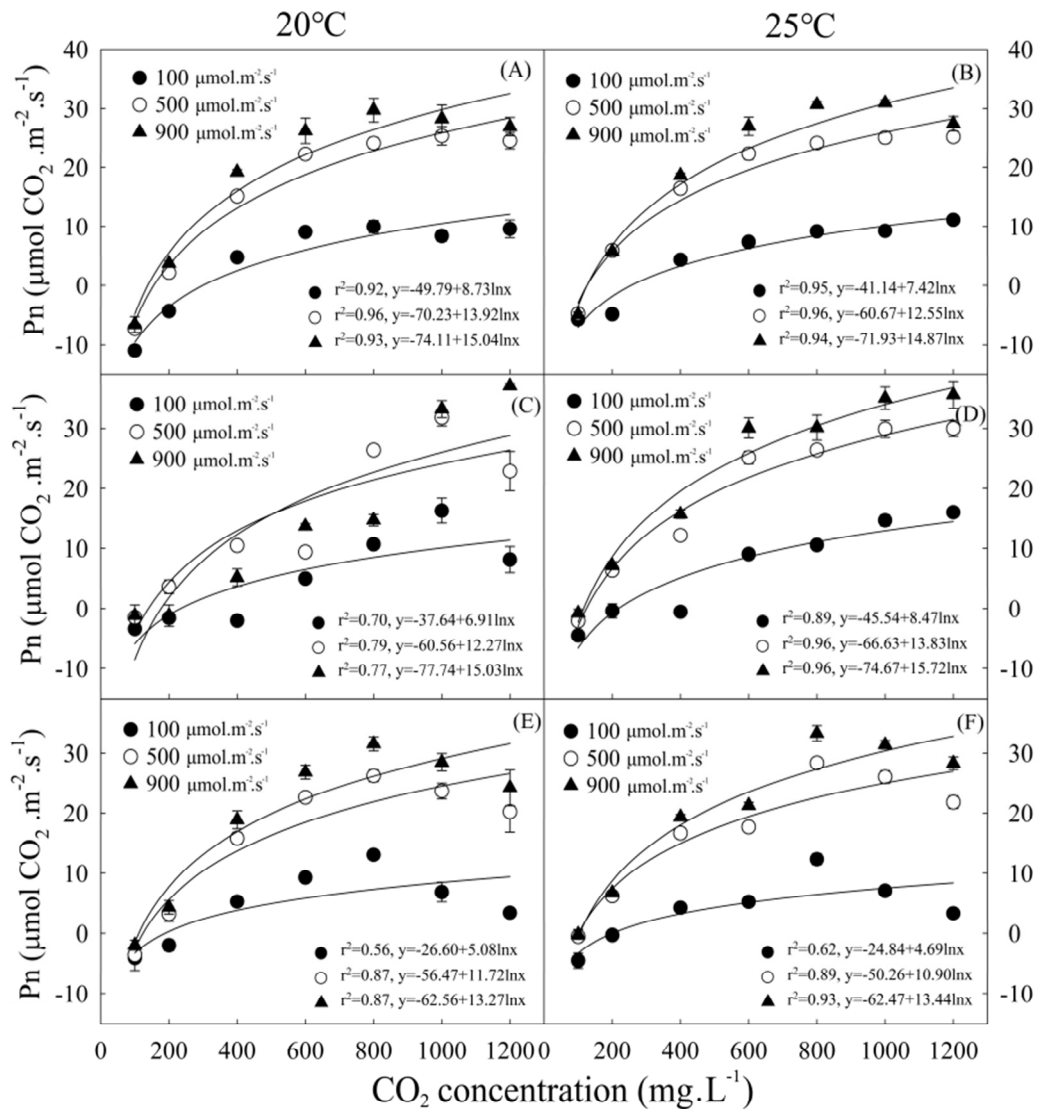


圖一、不同光強度及溫度對不同株齡青花菜‘42’淨光合作用之影響。

Fig. 1. Net photosynthetic curve of different age broccoli ‘42’ plants growth under different light intensity and temperature. (A,B: 15DAP ; C,D: 30DAP ; E,F: 45DAP).

2.CO<sub>2</sub>濃度之影響

由前述試驗選擇青花菜光合作用表現較佳溫度20及25°C，進一步探討光合作用CO<sub>2</sub>曲線方面，結果顯示青花菜二氧化碳飽和點(carbon dioxide saturation point, CO<sub>2</sub>sp)約為800 mg·L<sup>-1</sup>，但20°C、30DAP植株在高PPFD 900 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>下Pn並未達到CO<sub>2</sub>sp(圖二)。就整體來看，隨著PPFD增加，CO<sub>2</sub>利用效率提升，Pn值增加。



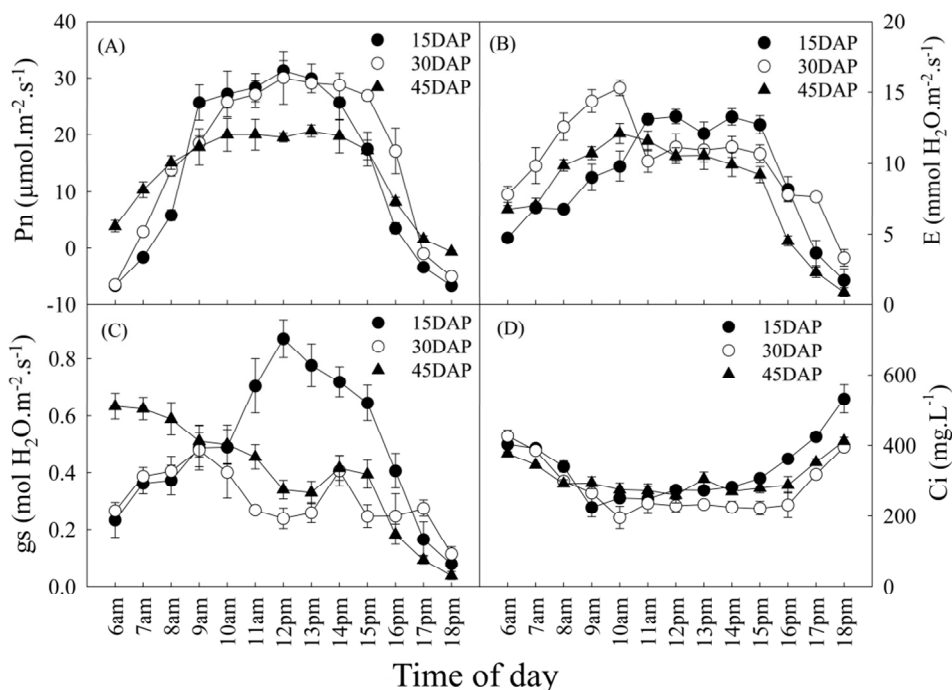
圖二、光強度及 CO<sub>2</sub> 濃度在 20 及 25°C 下對不同株齡青花菜'42'淨光合作用之影響。

Fig. 2. Net photosynthetic curve of different age broccoli '42' plants growth under different light density and CO<sub>2</sub> concentration at 20 and 25°C condition. (A,B: 15DAP ; C,D: 30DAP ; E,F: 45DAP).

### 3. 光合作用日變化

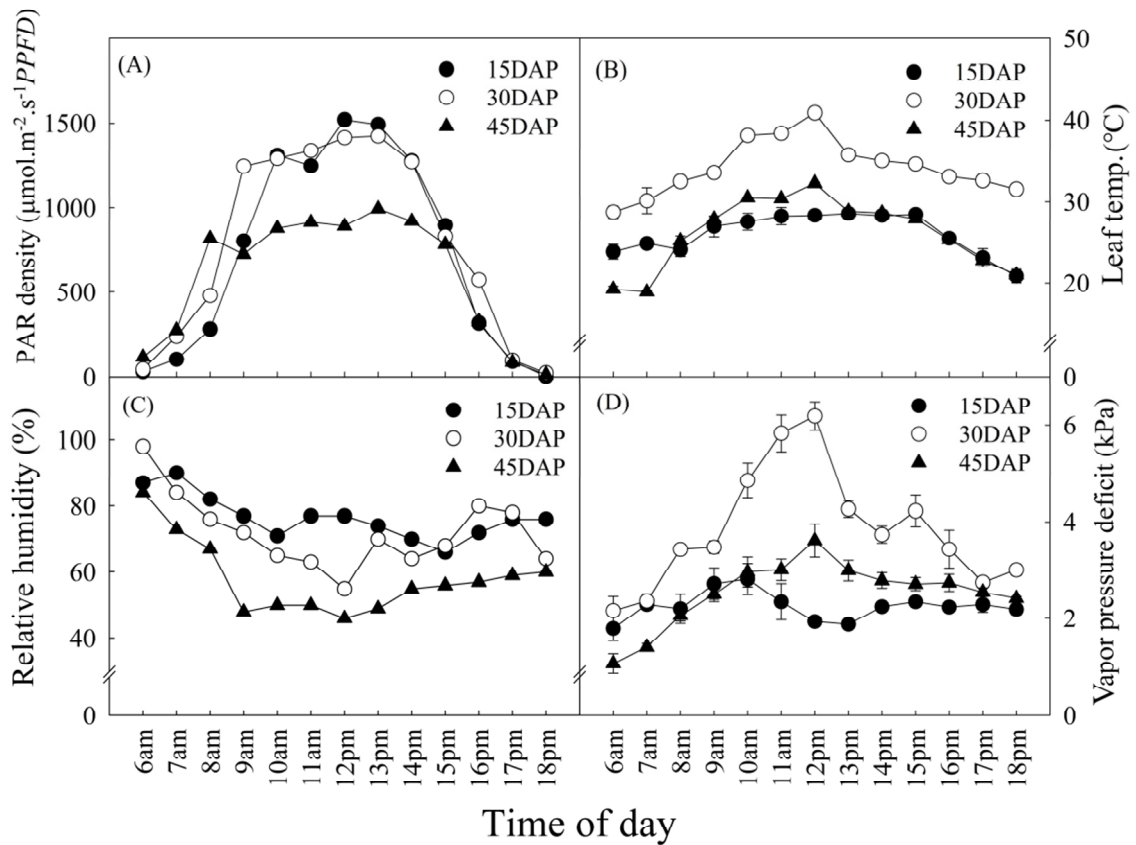
不同株齡之青花菜苗分別於 2020/3/4、2020/3/19 及 2020/4/3 調查，結果顯示 15DAP 及 30DAP 植株其 Pn 較 45DAP 高，與先前試驗結果一致，光合作用較旺盛的時間點位於上午 9 點至下午 3 點，這與光強度較高的時段相符。蒸散速率也有類似的趨勢，下午 3 點後會越來越低，這表示氣孔逐漸關閉，Pn 與 E 值也跟著下降。15DAP 植株其 gs 會隨時間越來越高，過中午 12 點後逐漸下降，30DAP 植株其 gs 則在上午 10 點後持續下降，落在 0.2-0.4 mol H<sub>2</sub>O·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 之間，45DAP 植株的 gs 在清晨最高，隨時間持續下降(圖三)；同時觀察到 30DAP 的植株在調查日葉片溫度在上午 10 點之後持續上升至 40°C 後下降，然 15DAP 與 45DAP 植株葉片溫度則維持在 25-30°C 之間(圖四)。

因光強度和溫度是影響光合作用的主要因素，故進一步分析此三個株齡植株在光強度和溫度其相互影響下的Pn變化(圖五)，並以Paraboloid( $Z=Z_0+ax+by+cx^2+dy^2$ ) 公式推算，其中 $Z=Pn$ 、 $x=PPFD$ 、 $y=air\ temperature$ ，求出15DAP青花菜 $Pn=-6.390e^{+1}+5.027x+5.822e^{-2}y-1.097e^{-1}x^2-2.190e^{-5}y^2$  ( $R^2=0.93$ )、30DAP 青花菜  $Pn=-2.103e^{+2}+1.119e^{+1}x+2.732e^{-2}y-1.411e^{-1}x^2-8.553e^{-6}y^2$  ( $R^2=0.87$ )、45DAP 青花菜  $Pn=5.632-1.615e^{-1}x+5.571e^{-2}y-6.587e^{-3}x^2-2.722e^{-5}y^2$  ( $R^2=0.93$ )。



圖三、不同株齡‘42’青花菜之淨光合作用(A)、蒸散速率(B)、氣孔導度(C)及細胞間隙CO<sub>2</sub>濃度(D)日變化。

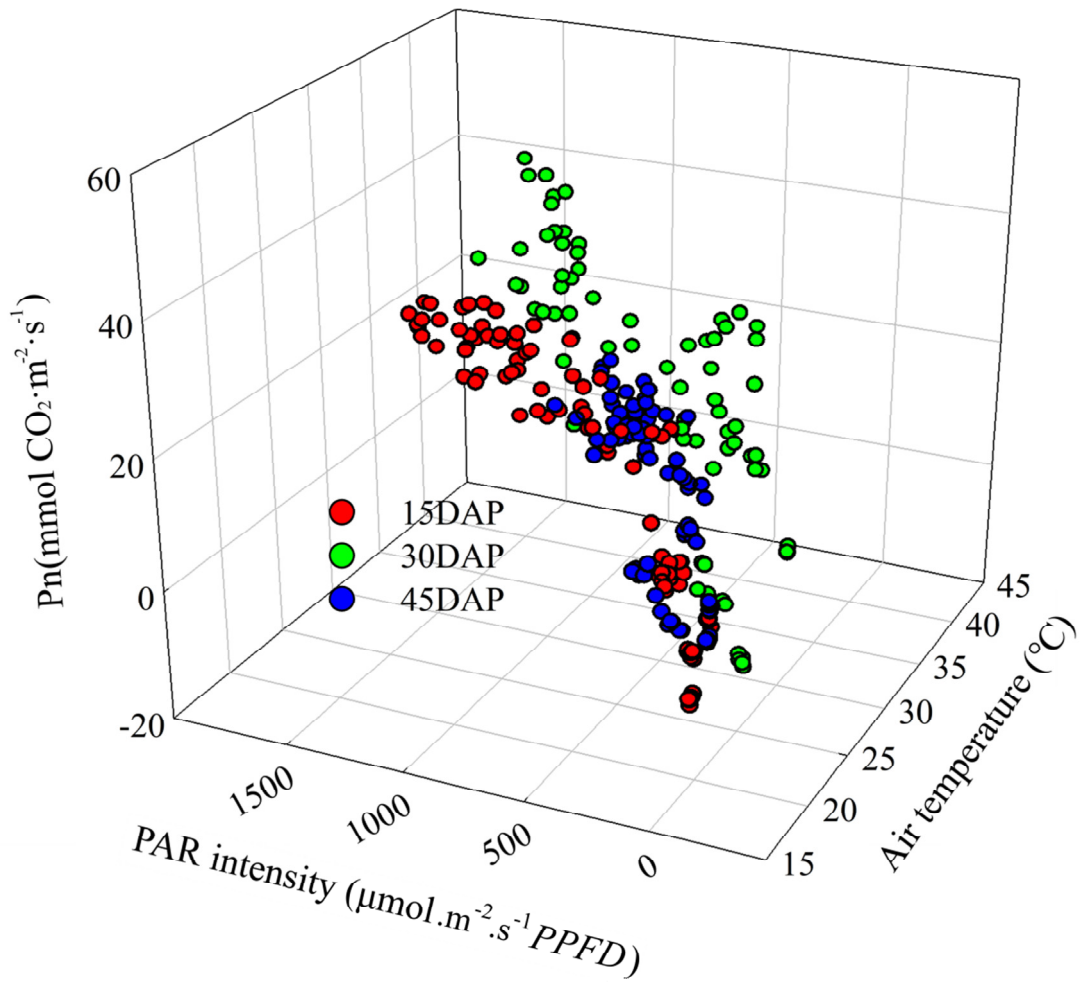
Fig. 3. Daily change of net photosynthetic rate, Pn (A), transpiration rate, E (B), stomatal conductance, gs (C), cellular CO<sub>2</sub> concentration, Ci (D) of different age broccoli ‘42’ plants.



圖四、不同株齡‘42’青花菜之光合作用生理日變化調查期間環境對應光強度(A)、葉溫(B)、相對溼度(C)及蒸氣壓值(D)。

Fig. 4. The daily changes of photosynthetic related traits including light intensity (A), leaf temperature (B), relative humidity (C), and vapor pressure (D) during the measuring day of different age broccoli '42' plants.



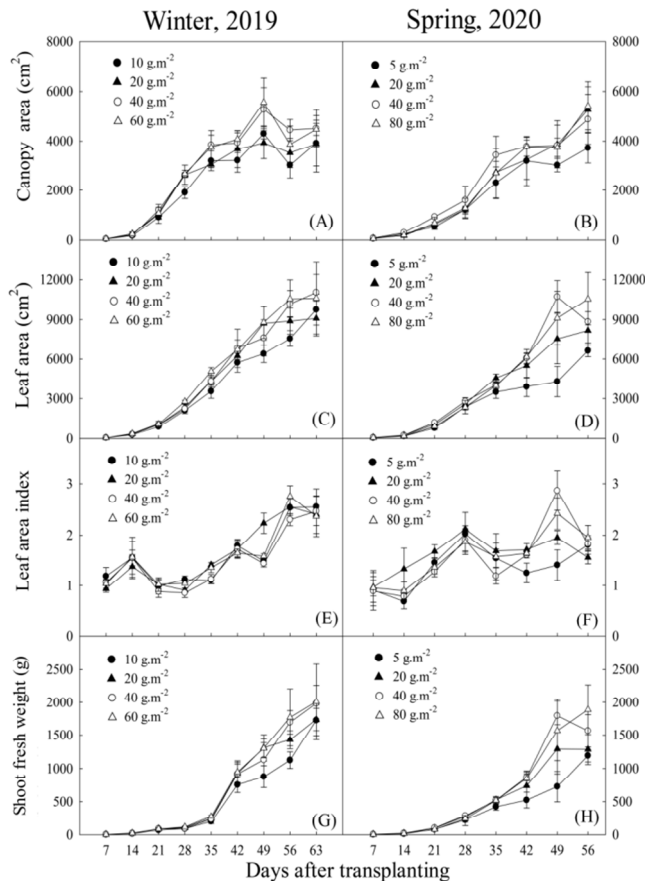


圖五、不同株齡‘42’青花菜植株之淨光合作用、光強度與溫度之相互關係。

Fig. 5. The relationship between net photosynthetic rate, PPFD, and air temperature of different age broccoli ‘42’ plants.

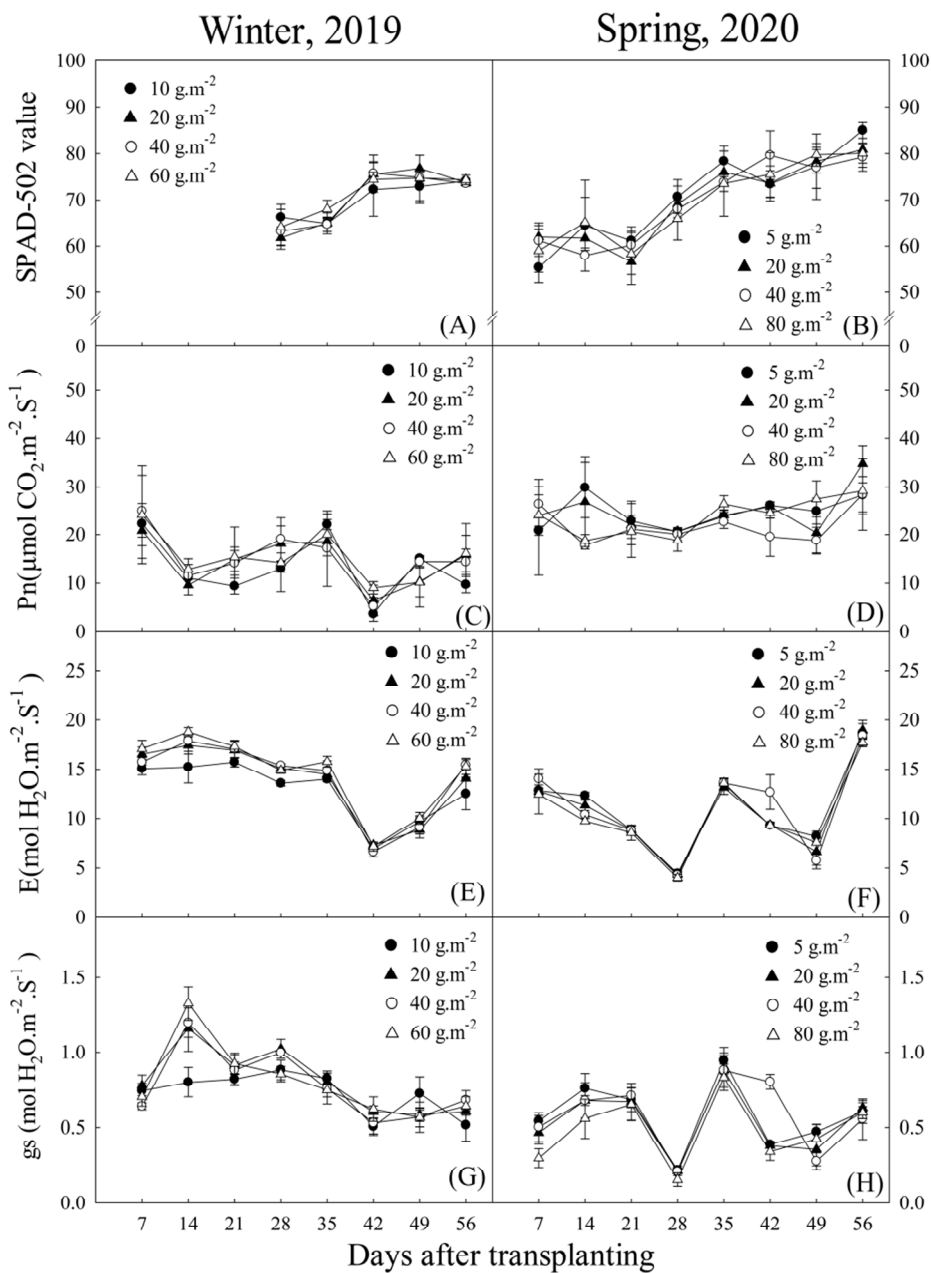
## 二、青花菜最適氮肥施用量

本試驗於2019年冬作及2020年春、冬作共三季，利用不同N肥施用量(5/10、20、40及60/80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )調查青花菜不同的生長表現，2019冬作青花菜的生育天數約為63天，2020春季與冬季的青花菜生育天數分別為62天及59天，分析這三季栽培期之平均溫度分別為22.2 $^{\circ}\text{C}$ 、20.2 $^{\circ}\text{C}$ 及23.2 $^{\circ}\text{C}$ 。本試驗結果顯示，青花菜定植後21-49天為快速生長期，此時株幅、葉面積、葉面積指數和地上部鮮重皆會大幅度增加，葉綠素計SPAD-502讀值在生長後期亦有增加，但氮肥施用中除5和10  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 處理表現較差外，其它處理間並無顯著差異(圖六、圖七A和七B)。光合相關生理指標Pn、E及gs則是受到環境和植物年齡的影響，氮肥施用量除2019年冬作生育初期E和gs外，處理間亦無顯著差異(圖七C-H)。



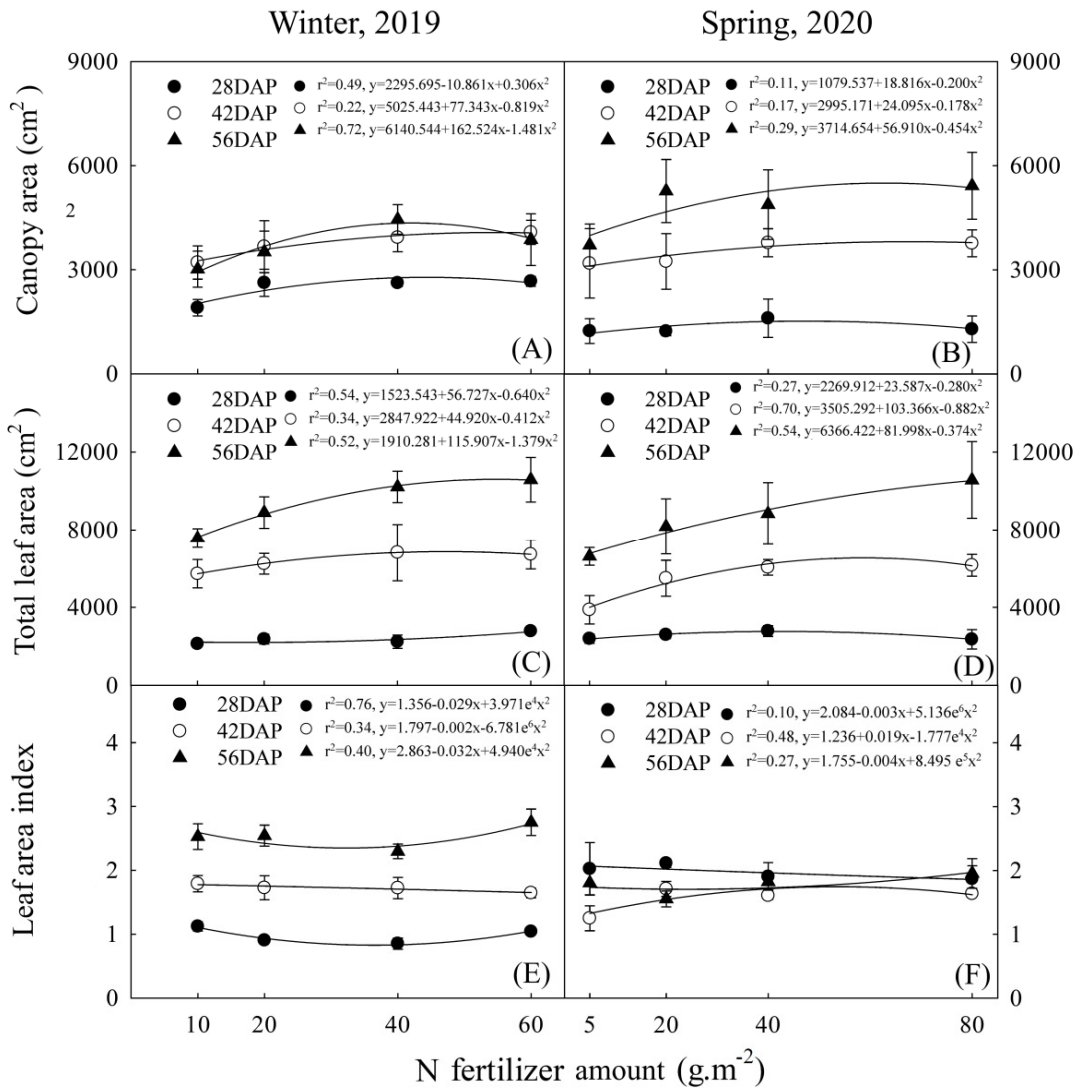
圖六、兩個栽培期間不同氮肥施用量對青花菜'42'植株之株幅(A、B)、總葉面積(C、D)、LAI值(E、F)及植體地上部鮮重(G、H)等性狀之影響。

Fig. 6. Effect of N fertilizer amount on shoot growth included canopy area (A, B), total leaf area (C, D), LAI (E, F) and shoot fresh weight (G, H) of broccoli '42' during two cropping.



圖七、兩個栽培期間不同氮肥施用量對青花菜‘42’植株之葉綠素計 SPAD-502 讀值(A、B)、淨光合作用速率(C、D)、蒸散速率(E、F)及氣孔導度(G、H)等生理特性之影響。

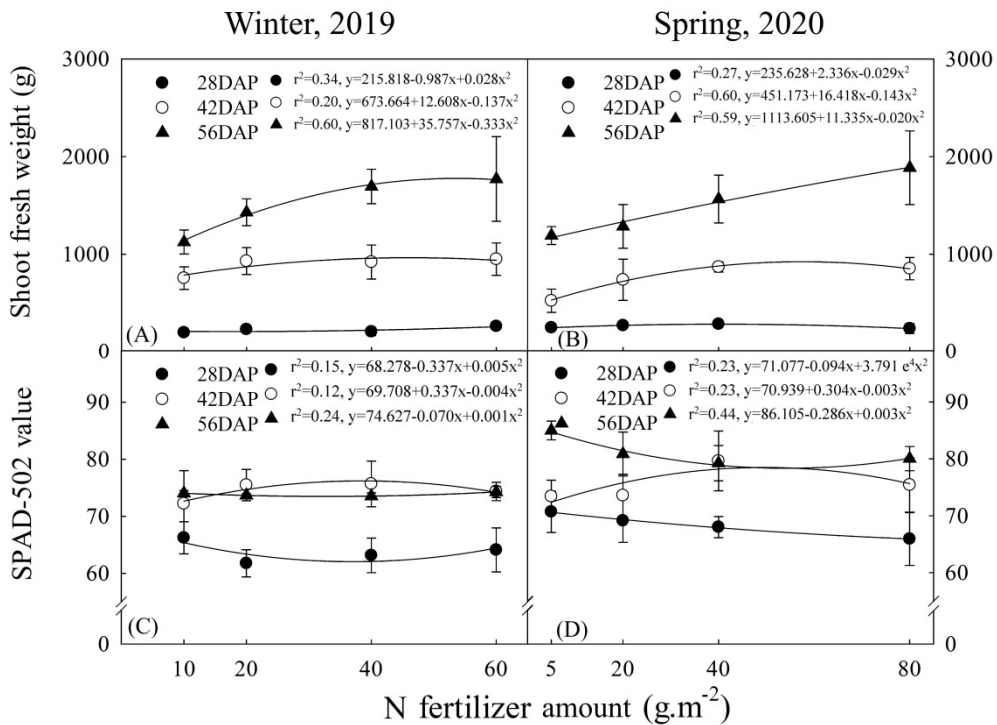
Fig. 7. Effect of N fertilizer amount on broccoli ‘42’ plant performances included chlorophyll meter SPAD-502 reading (A,B), net photosynthetic rate (C,D), transpiration rate (E,F), and stomata conductivity (G,H) during two cropping.



圖八、兩期作氮肥施用量與不同株齡青花菜‘42’植株株幅(A、B)、總葉面積(C、D)及葉面積指數(E、F)之相關性。

Fig. 8. The relationship between N fertilizer amount, plant canopy area (A, B), total leaf area (C, D), and leaf area index (E, F) of different age broccoli ‘42’ plant in two cropping.

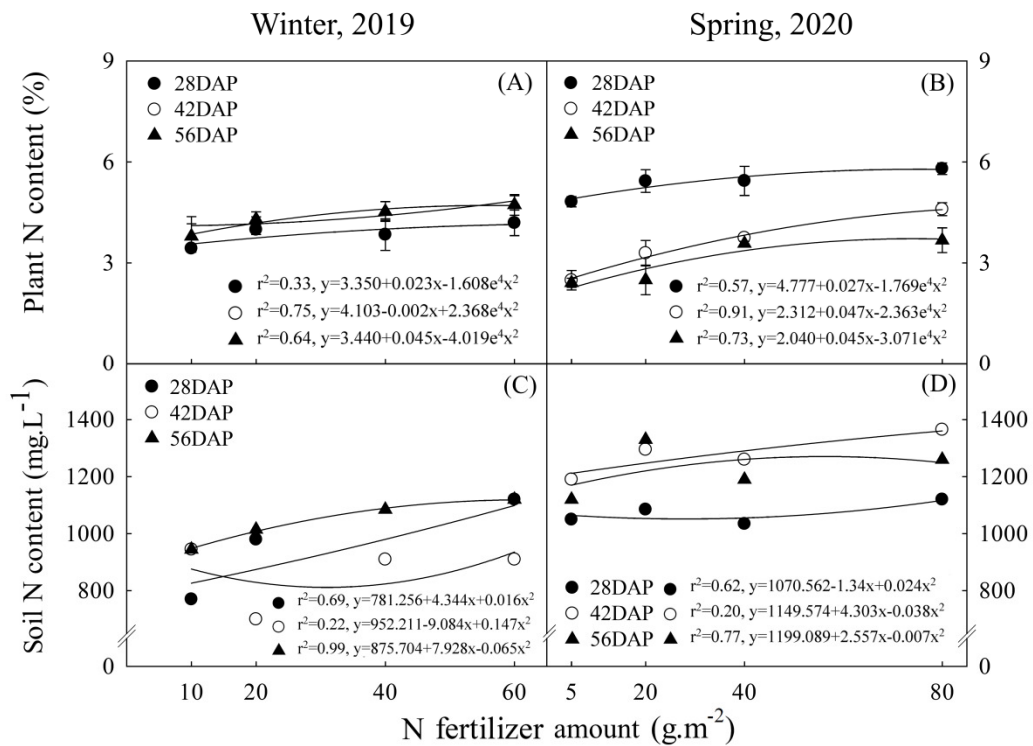
在本試驗中所分析之三期作結果一致，定植後不同株齡植株之株幅和總葉面積與氮肥施用量呈現正相關，隨著氮肥施用量增加從5/10 g·m<sup>-2</sup>增加到20~40 g·m<sup>-2</sup>各項生育性狀有提升的趨勢，但相關係數偏低，然LAI則無此趨勢(圖八，僅顯示2019冬作和2020春作數據)。地上部鮮重趨勢與株幅、總葉片趨勢類似，但在SPAD-502葉綠素讀值則在冬春兩期作表現不一致，冬作環境下不同株齡數據與氮肥施用無相關性，在春作28DAP及56DAP時反而呈現氮肥施用越多，葉綠素計讀值越低的負相關趨勢(圖九，僅顯示2019冬作和2020春作數據)。



圖九、氮肥施用量與不同株齡青花菜‘42’植株地上部鮮重(A、B)及葉綠素計 SPAD-502 讀值(C、D)之相關性。

Fig. 9. The relationship between N fertilizer amount, shoot fresh weight (A, B) and chlorophyll meter SPAD-502 reading (C, D) of different age broccoli ‘42’ plants.

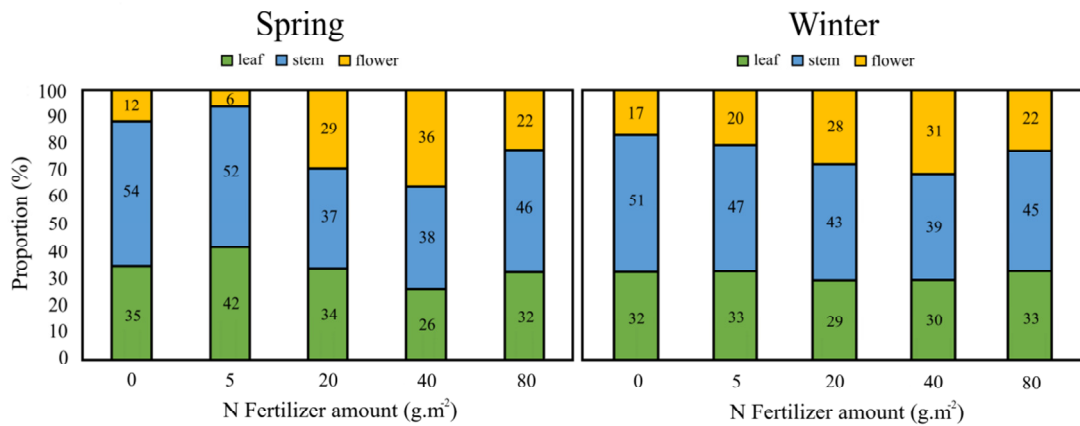
進一步分析植體及土壤中氮含量，氮肥施用量與其呈指數相關，在 108 年冬作植體 N 含量隨著株齡增加，42DAP 及 56DAP 較多，28DAP 較少；而在 109 年春作則趨勢相反，28DAP>42DAP>56DAP (圖十，僅顯示 2019 冬作和 2020 春作數據)。



圖十、氮肥施用量與不同株齡青花菜‘42’植體(A、B)與土壤氮含量(C、D)之相關性。

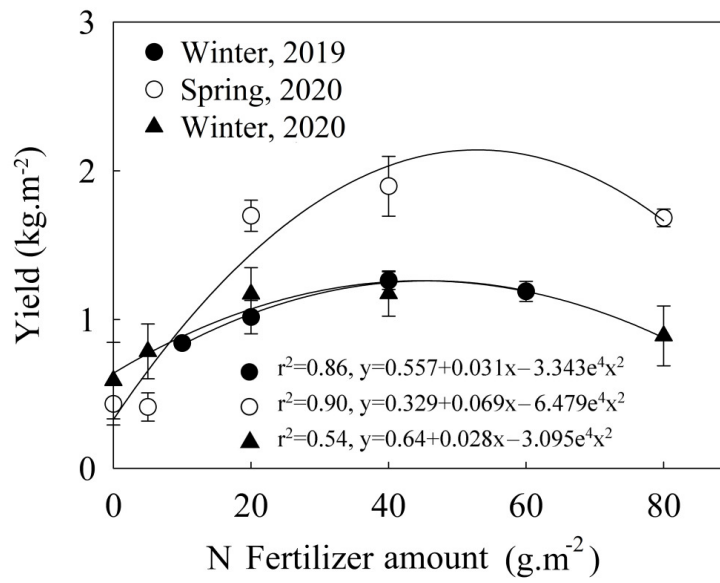
Fig. 10. The relationship between N fertilizer amount, plant (A, B), and soil (C, D) N content of different age broccoli '42' plants.

花球是青花菜最具商品價值部位，分析花球佔植株總鮮重之比例，有助於推估產量，結果顯示花球採收率在 2020 年兩期作皆以 40 g·m<sup>-2</sup> 較高，春及冬作分別為 36% 和 31 % (圖十一)，冬作的花球佔全株比例較小。計算單位面積產量，試驗三期作亦以 40 g·m<sup>-2</sup> 處理較佳，不同年份同一期作趨勢與結果一致，顯示試驗數據具重複性可信度高，而同一期作不同季節產量差異大，表示其生育、產量甚至其肥料利用效率受氣候影響，108 年冬作及 109 年春、冬作產量分別為 1.26 kg·m<sup>-2</sup>、1.89 kg·m<sup>-2</sup> 及 1.14 kg·m<sup>-2</sup> (圖十二)。



圖十一、不同季節氮肥施用量對青花菜‘42’其葉片、莖與花球佔全株比例之差異。

Fig. 11. The proportion of leaf, stem, and flower of broccoli ‘42’ shoot with different N fertilizer amount in two seasons.

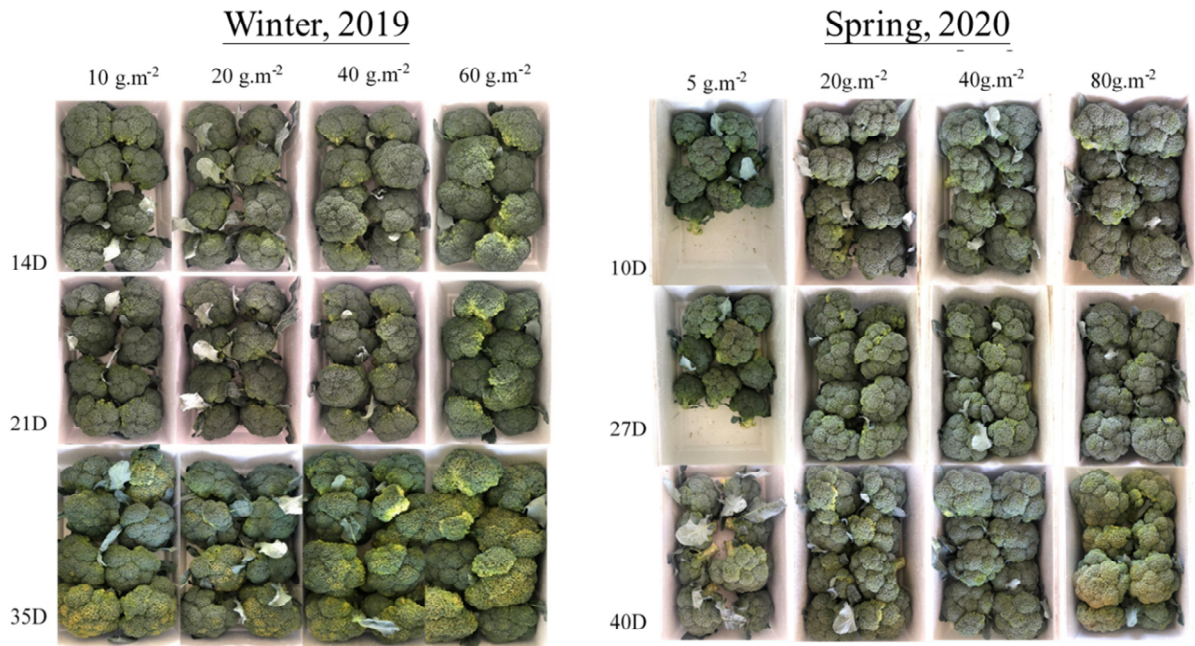


圖十二、'42'青花菜不同栽培期氮肥施用量與最終產量之相關性。

Fig. 12. The relationship between N fertilizer amount and final yield of broccoli '42' during three croppings.



花球採收後先以碎冰預冷後貯藏在1°C冷藏庫，觀察其貯藏性，高氮肥處理(60 g·m<sup>-2</sup>及80 g·m<sup>-2</sup>)的花球儲藏期較短，冬及春作分別在貯藏14及27天時，花球邊緣出現黃化，5 g·m<sup>-2</sup>及10 g·m<sup>-2</sup>氮肥施用處理之花球貯藏性亦不佳。整體來看春作花球儲藏性較冬作佳，冬作貯藏期可到21天，春作則可到40天以上，又以40 g·m<sup>-2</sup>氮肥處理表現最好，儲藏40天後仍有良好的花球外觀品質(圖十三)。



圖十三、兩個栽培期不同氮肥施用量之青花菜‘42’花球採後貯存於1°C之花球情形。

Fig. 13. The postharvest quality of flower head storage at 1°C of broccoli ‘42’ with four N fertilizer amount during winter and spring cropping.

## 討 論

溫度與光照是影響青花菜生長的重要環境因子<sup>(27)</sup>，植物的生長發育都有其特定的溫度需求，一般而言，植物在適當範圍下，其光合作用會隨著溫度增加而提高，而植物的最適溫度皆有所不同，C4型植物較高約為30-40°C，C3型植物較低約為20-30°C，CAM型植物則約為35°C<sup>(6,7,8)</sup>。青花菜為C3型之綠植株春化型植物，性喜冷涼，其營養生長及花球發育適溫分別為20-22°C與15-18°C，若發育期間遇到高溫會影響青花菜的花芽發育，導致青花菜花球品質不良甚至不結球而影響產量<sup>(9)</sup>。

於本試驗中觀察到青花菜的淨光合速率Pn值隨著光強度增加而提升(圖一)，植株在20及25°C的光飽合點約為1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，此與前人研究中，青花菜光飽合點為1,070  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之結果相符<sup>(30)</sup>，此時植株的Pn值介於16-26  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。然30及45DAP植株在30°C的Pn值隨著PPFD的提升，於2,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD時其Pn值在28與20  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 且趨於光飽和狀態，可能是由於溫度與光強度提高，促使光合作用速率加快。另在光合作用與二氧化碳濃度試驗中(圖二)，觀察到30DAP植株在20°C下，隨著CO<sub>2</sub>濃度越高，Pn值持續上升且未達飽合點，推測30DAP植株為營養旺盛期，在生長適溫及光強度高的條件下，CO<sub>2</sub>濃度足以供應植株進行光合作用，因此淨光合作用速率會更快，CO<sub>2</sub>飽合點會往上提高。

當太陽輻射很強和溫度很高的狀況下，植物葉片吸收能量會使葉片溫度比氣溫高5°C以上，葉片會透過蒸散作用來釋放熱能，但同時也會有調節的方式來為避免水分流失過多<sup>(6)</sup>，在本試驗中觀察到30DAP植株光合作用日變化其葉片溫度在白天時高達35-40°C，且氣孔導度與蒸散速率皆有下降的趨勢(圖四)，多數蔬菜在這種環境下，其光合作用日變化會呈現雙曲線，稱為光午休現象，在下午1點會有下降的趨勢，多數學者認為這和環境低空氣濕度與高蒸氣壓差(vapour pressure deficit, VPD)而造成氣孔關閉，進而導致光合作用下降<sup>(8)</sup>。部分青花菜研究觀察到青花菜之蒸氣壓差大多位於0.5-2 kPa左右<sup>(21)</sup>，而30DAP植株在遭遇高溫時，蒸氣壓差高達6 kPa，為避免水分散失，進而促使部分氣孔關閉以及蒸散速率下降，此與光午休現象發生的環境條件類似，然而光合作用並未因此而下降(圖三)，推測可能原因是由於栽培環境並非連續高溫，未導致青花菜發生不可逆的高溫障礙，因此淨光合速率仍與光強度的變化有近似的趨勢。

Cha等人(2020)進行研究指出，青花菜種植於日夜溫35/30°C的環境，和日夜溫20/15°C之對照組植株相比，其葉綠素a與b的含量並沒有顯著差異<sup>(18)</sup>，但其莖部的EC值高於對照組，表示高溫逆境之植株其水分及離子運輸有受到影響，可能與本試驗中觀察到氣孔關閉而影響蒸散速率之結果相呼應。中度高溫逆境並不會造成光系統II (photosystem II, PS II)發生嚴重損傷，雖然會抑制光系統II的修復，但其減少光合作用的影響是能夠逆轉的，因此可以推測如30DAP所遇到的中度高溫逆境狀況，植株調節氣孔是減緩逆境影響的方式之一。

青花菜植株營養生長及生殖生長期的溫度與光照處理亦有所不同，營養生長期間溫度提高能誘發花芽生成，而生殖生長期間溫度處理於品種間沒有顯著的差異，至於光週期及光輻射變化則無顯

著影響<sup>(35)</sup>。在本實驗中，2019冬作青花菜的生育天數約為63天，2020春季與冬季的青花菜生育天數分別為62天及59天。三季栽培期之平均溫度分別為22.2°C、20.2°C及23.2°C。栽培期間的平均溫度僅相差約3°C，對植株的生育天數及開花期影響不大。然光照量的差異影響花球產量，觀察本試驗中兩年三季的栽培期間光照輻射量(solar radiation)，2019年冬及2020年春、冬作分別為1005.17、1128.26及798.46 MJ/m<sup>2</sup> (數據未顯示)，而40 g·m<sup>-2</sup>氮肥於三期作之花球產量分別為1.26 kg·m<sup>-2</sup>、1.89 kg·m<sup>-2</sup>及1.14 kg·m<sup>-2</sup>，另外花球佔全株比例於2020年春及冬作的分別為36%和31%(圖十一)，顯示較高的光照量確實能促進花球發育並提高產量。

生物量累積與光輻射量呈線性關係，提高與截取更多光輻射量能增加生物量的累積，Monteith 定義生物量累積和截取輻射量的比值稱為光輻射利用效率(radiation-use efficiency, RUE)，大多數作物在良好的生長環境其RUE可達1.4 g MJ<sup>-1(33)</sup>，且RUE會隨葉面積指數及生育階段而改變<sup>(3)</sup>，Vågen 等人研究顯示青花菜增加氮肥施用量，能提高其LAI約2.7-4.6倍，進而提高RUE約63%，最高能達到2.5 g MJ<sup>-1</sup>，透過增加葉面積與LAI，來獲得更多的輻射攔截量，進而提高生物量之累積<sup>(40)</sup>。

青花菜是氮肥需求高的作物，氮肥能影響青花菜的產量及品質<sup>(25,40)</sup>，增加氮肥施用量能提高植株鮮重並促進花球提早成熟<sup>(15,16)</sup>，增加花球的重量與直徑<sup>(22,23,29,32,37,38,41,42)</sup>，然依品種及栽培環境不同，建議氮肥施用量亦有所差異(圖六、圖七)。氮肥施用量較高，其花球畸形率下降，顏色會更加濃綠，但莖部空心 and 頭爛病的發生率也會增加(圖十三)。部分研究認為氮肥施用量於22-27 g·m<sup>-2</sup><sup>(16,20,23,28,31,39)</sup>及30-50 g·m<sup>-2</sup>為佳<sup>(15,25,41)</sup>，本試驗中有較佳產量之氮肥施用量為40 g·m<sup>-2</sup>，此與前人研究相符且花球品質較其它處理佳，可提供青花菜肥培管理之參考。

本試驗針對青花菜不同生育階段之環境因子與NAR進行分析並推導公式，從植株生育調查中分析LAI變化，可用於計算青花菜的生長速率，且青花菜春及冬作採收參數harvest index (HI) 分別設定為36%及31%，則可推估最終產量，協助栽培者以合理適量之施肥管理，配合水分管理以因應氣候環境變化，有效降低生產之成本，提高產量及品質以增加收益。

## 參考文獻

1. 王仕賢、謝明憲 2005 農家要覽農作篇(二)青花菜 增修訂三版豐年社 臺北 臺灣。
2. 艾希珍、張振賢、楊秀華 2000 一些蔬菜作物光合與蒸騰特性研究 園藝學報 27: 371-373。
3. 姚銘輝、陳守泓、梁連勝 2005 水稻之氣象資源利用效率探討- I. 輻射利用效率 台灣農業研究 54(2): 123-134。
4. 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 81。
5. 柯勇 2002 植物生理學 藝軒圖書出版社 臺北 臺灣。
6. 徐善德、廖玉琬 2009 植物生理學 初版二刷 偉明圖書有限公司 臺北。
7. 翁仁憲 1989 溫度對蔬菜光合作用及呼吸作用之影響 第二屆設施園藝研討會專集

- 209-217。
8. 陳葦玲、錢昌聖、莊佩蓉 2017 花胡瓜光合作用特性之研究 臺中區農業改良場研究彙報 135: 25-37。
  9. 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 121: 9-24。
  10. 舒英杰、周玉麗 2005 蔬菜植物光合特性研究進展 長江蔬菜 9: 34-38。
  11. 羅秋雄 2005 作物施肥手冊 農業部農糧署 117。
  12. 農情報告資源網 2021 [https://agr.afa.gov.tw/afa/afa\\_frame.jsp](https://agr.afa.gov.tw/afa/afa_frame.jsp)
  13. 海關進出口統計資料 2020  
[https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30\\_LIST;APGAJSESSIONID=HGdykR5d6StsJhvG41L9L85wm1R7vXZqj7rjTYTG65HIBtp2J2dL!1038621913](https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30_LIST;APGAJSESSIONID=HGdykR5d6StsJhvG41L9L85wm1R7vXZqj7rjTYTG65HIBtp2J2dL!1038621913)
  14. Almeida, H. J. D., V. M. V. Carmona, V. S. Cavalcante, A. B. C. Filho, R. D. M. Prado, R. A. Flores, B. M. M. N. Borges and M. Mauad. 2020. Nutritional and visual diagnosis in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.) Plants: disorders in physiological activity, nutritional efficiency and metabolism of carbohydrates. *Agronomy*, 10(10) 1572.
  15. Babik, I. and K. Elkner. 2000. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on yield and quality of broccoli. In *Workshop Towards and Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production* 571: 33-43.
  16. Bakker, C. J., C. J. Swanton and A. W. McKeown. 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.
  17. Bhattacharya, A., Y. Li, K. L. Wade, J. D. Paonessa, J. W. Fahey and Y. Zhang. 2010. Allyl isothiocyanate-rich mustard seed powder inhibits bladder cancer growth and muscle invasion. *Carcinogenesis*, 31(12): 2105-2110.
  18. Cha, S. J., H. J. Park, J. K. Lee, S. J. Kwon, H. K. Jee, H. Baek, H. N. Kim and J. H. Park. 2020. Multi-sensor monitoring for temperature stress evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Journal of Applied Biological Chemistry*, 63(4): 347-355.
  19. Chen, W. L., W. J. Yang, H. F. Lo and D. M. Yeh. 2014. Physiology, anatomy, and cell membrane thermostability selection of leafy radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis* Pers.) with different tolerance under heat stress. *Scientia Horticulturae* 179: 367-375.
  20. Cutcliffe, J. A., D. C. Munro and D. C. MacKay. 1968. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and manure on terminal, lateral, and total yields and maturity of broccoli. *Canadian Journal of Plant Science* 48(5): 439-446.
  21. Erdem, Y., L. Arin, T. Erdem, S. Polat, M. Deveci, H. Okursoy and H. T. Gültaş. 2010. Crop water

- stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Agricultural Water Management*, 98(1): 148-156.
22. Everaarts, A. P., C.P. de Moel and P. de Willigen. 1996. Stikstofbemesting en nutriëntenopname van broccoli. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, verslag nr. 216.
23. Everaarts, A.P., and P. de Willigen 1999. The effect of nitrogen and the method of application on yield and quality of broccoli. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 47:123-133.
24. Fahey, J.W., 2003. Brassicas. In: Caballero B, Trugo L, Fingla SP (eds) *Encyclopedia of food science and nutrition*. Academic, St Louis, 606-61503.
25. Feller, C. and M. Fink. 2000. Nmin target values for field vegetables. In *Workshop Towards and Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production* 571: 195-201.
26. Flore, J. A. and A. N. Lasko. 1989. Environmental and physiological regulation of photosynthesis in fruit crops. *Horticultural Reviews* 11: 111-157.
27. Francescangeli, N., M. A. Sangiacomo and H. Martí. 2006. Effects of plant density in broccoli on yield and radiation use efficiency. *Scientia Horticulturae*, 110(2): 135-143.
28. Greenwood, D. J., T. J. Cleaver, M. K. Turner, J. Hunt, K. B. Niendorf and S. M. H. Loquens 1980. Comparison of the effects of nitrogen fertilizer on the yield, nitrogen content and quality of 21 different vegetable and agricultural crops. *The Journal of Agricultural Science*, 95(2): 471-485.
29. Gutezeit, B. 1996. Effect of N supply on growth and yield of broccoli measured non-destructively by gamma-scanning. *Acta Horticulturae* 428: 45-52.
30. Jihua, Y., X. Jianming and S. Yingjie. 2002. Studies on the photosynthetic characteristics of broccoli. *Lanzhou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*, 38(2): 111-114.
31. Kowalenko, C. G. and J. W. Hall. 1987. Effects of nitrogen applications on direct-seeded broccoli from a single harvest adjusted for maturity. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112(1): 9-13.
32. Letey, J., W. M. Jarrell, N. Valoras and R. Beverly. 1983. Fertilizer application and irrigation management of broccoli production and fertilizer use efficiency. *Agronomy Journal* 75: 502-507.
33. Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 281(980): 277-294.
34. Poorter, H., N. P. Anten and L. F. Marcelis. 2013. Physiological mechanisms in plant growth models: do we need a supra-cellular systems biology approach?. *Plant, cell & environment*, 36(9): 1673-1690.
35. Tan, D. K. Y., C. J. Birch, A. H. Wearing and K. G. Rickert. 2000. Predicting broccoli development I. Development is predominantly determined by temperature rather than photoperiod. *Scientia*

- Horticulturae, 84(3-4): 227-243.
36. Tang, L., J. D. Paonessa, Y. Zhang, C. B. Ambrosone and S. E. McCann. 2013. Total isothiocyanate yield from raw cruciferous vegetables commonly consumed in the United States. *Journal of functional foods*, 5(4): 1996-2001.
  37. Thompson, T. L., T. A. Doerge, and R. E. Godin. 2002. Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli: I. Yield, quality, and nitrogen uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1): 186-192.
  38. Tremblay, N. 1989. Effect of nitrogen sources and rates on yield and hollow stem development in broccoli. *Canadian Journal of Plant Science* 69: 1049-1053.
  39. Vågen, I. M. 2003. Nitrogen uptake in a broccoli crop. 1: Nitrogen dynamics on a relative time scale. In XXVI International Horticultural Congress: Toward Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production 627: 195-202.
  40. Vågen, I. M., A. O. Skjelvåg and H. Bonesmo. 2004. Growth analysis of broccoli in relation to fertilizer nitrogen application. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(3): 484-492.
  41. Yoldas, F., S. Ceylan, B. Yagmur, and N. Mordogan. 2008. Effects of nitrogen fertilizer on yield quality and nutrient content in broccoli. *Journal of Plant Nutrition*, 31(7): 1333-1343.
  42. Zebarth, B. J., P. A. Bowen and P. M. A. Toivonen 1995. Influence of nitrogen fertilization on broccoli yield, nitrogen accumulation and apparent fertilizer-nitrogen recovery. *Canadian Journal of Plant Science* 75:717-725.

# Investigation on the Characteristics of Photosynthesis and Optimal Nitrogen Fertilization Quantity for Broccoli<sup>1</sup>

Chun-Jung Shen <sup>2</sup> and Wei-Ling Chen <sup>2,3</sup>

## ABSTRACT

The basic parameters included photosynthetic and fertilizer parameters for broccoli growth under Taiwan's environment was absented. The aim of this study was to analyze the effects of climatic factors on photosynthesis and evaluate optimal amounts of nitrogen fertilizer applied through using the major broccoli '42' as experiment material. The results showed that the net photosynthetic rate (Pn) of broccoli was higher at 20 and 25°C ambient temperature and increased with elevated photosynthetic photon flux density (PPFD) until light saturation point (Lsp) and CO<sub>2</sub> saturation point (CO<sub>2</sub>sp) was readed, which was approximately 1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  and 800  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. Besides, the parabolic curve relationship was exsited among PPFD, ambient temperature, and Pn. Regarding the evaluation of nitrogen fertilizer amount, plant growth and final yield were collected over three croppings in two years with different levels (0, 5, 20, 40, and 80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$ ). The results were found consistently in all three croppings that 40 and 80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  treatment had high canopy area, leaf area, and shoot fresh weight, furthermore 40  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  application had high yield and harvested indices for flower heads, 36% in spring and 30.9% in winter, respectively. However, there was no significant difference in leaf nitrogen content within N treatments. The flower heads of 20 and 40  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{N}$  treatments performed better storage quality. In conclusion, the photosynthetic traits and optimal nitrogen fertilizer for broccoli were well analyzed, the results would accelerate the establishment of yield prediction model and assist production management in the future.

**Keywords:** broccoli, photosynthesis, nitrogen fertilizer, yield

---

<sup>1</sup> Contribution No.1069 from Taichung DARES, COA.

<sup>2</sup> Research assistant and associate researcher of Taichung DARES, COA.

<sup>3</sup> Corresponding author (E-mail: chenwl@tdais.gov.tw).