

'42 號'青花菜花球生長及採收成熟度之植生指數

劉文淵¹⁾ 宋好²⁾

關鍵字：青花菜花球、植生指數、花球成熟度

摘要：於田間栽培的青花菜花球成熟度並不整齊，使需多次採收，無法降低採收勞力。本研究觀察不同'42 號'青花菜花球成熟度之植生指數，選擇能辨別適時採收青花菜之植生指數，可利用於光譜影像協助採收，建立基本資料。分類'42 號'青花菜花球為稍早、適時、稍晚與過晚採收等四種成熟度，以適時採收的花球葉綠素 a、葉綠素 b、總葉綠素及 β 胡蘿蔔素有最高表現，分別為 0.87、0.30、1.29 及 0.34 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 β 胡蘿蔔素與總葉綠素之比值，稍晚採收與過晚採收的表現分別為 0.28、0.29 最高，稍早採收與適時採收表現分別為 0.26、0.27 最低。花球大小隨生育天數增加，且花球面積與花球重量有高度相關 $R^2=0.90$ 。配合不同表觀成熟度分類與花蕾葉綠素含量測定後，建議適期採收的花球冠層葉綠素濃度指數 (canopy chlorophyll content index, CCCI) 以 0.645 為採收標準。

前 言

'42 號'青花菜 (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) 為台灣秋冬季的主要栽培品種。青花菜的主要食用部位為花球和柔軟的莖上部，花球是由莖頂端形成的主花序之完全分化的未成熟花蕾共同組成，再進一步發育即會開花 (曹等, 2018)。青花菜富含多種維生素與礦物質，其中也有營養物質如蘿蔔硫素 (sulforaphane)，更被指出其對於抗癌具有正向功效 (Fahey *et al.*, 1997)。據 2017 至 2020 年統計資料顯示，全臺種植青花菜面積從 1401.94 公頃提升至 1626.94 公頃，占總蔬菜栽培面積 1.1% (農情報告資訊網, 2020)。近年食療養生風氣盛行，民眾亦透過飲食管理增強運動的訓練效果，高纖與高維生素含量的青花菜亦成為優質選擇。

不同作物採收品質的標準依外觀、成熟度、果皮轉色情況、大小與重量等而有所不同，作物成熟度的轉變可以使用其光譜的反射差異進行評估，而植生指數 (vegetation index) 可透過光譜反射強弱轉為數值加以計算，能做為作物成熟度判斷的指標之一 (Souza *et al.*,

1) 國立中興大學園藝學系碩士班學生。

2) 國立中興大學園藝學系教授、通訊作者。

2022)。近年使用無人載具(unmanned aerial vehicle, UAV)拍攝之影像在預測不同作物產量及成熟度皆有良好準確率(Psiroukis *et al.*, 2022; Wittstruck *et al.*, 2020)。青花菜於同時間種植有時花球成熟度不一致，故需多次巡田採收增加採收勞力。鑑此，本研究欲觀察不同青花菜花球成熟度之植生指數，選擇能辨別適時採收青花菜之植生指數，協助田間採收。

材料與方法

一、試驗材料：

(一) 供試品種：'42號'青花菜(Sakata Seed Corporation, Yokohama-shi, JP)

(二) 栽培介質：培養土(Jiffy, Jiffy International AS, Zwijndrecht, Netherlands)、南海蛭石2號及珍珠石，比例為 8:1:1。

(三) 栽培地點：試驗於國立中興大學園藝學系蔬菜室溫室區露天環境。

二、育苗、施肥管理播種及試驗方法：'42號'青花菜播種子於35格PE圓孔穴盤，於第五片本葉完全展開植株於八吋黑軟盆中生長。試驗時間為2022年1月2日至2月11日，盆間距離40 cm。移植後一週開提供養液，養液由山崎氏養液配方(山崎, 1982) 調整，參考高(2017)試驗無土栽培配方(表1)。養液為2-3日供給乙次，每株500 mL。定植後第27至49天使用真正肥5號(10-20-20)(福壽實業，台中，臺灣)500倍，每次施用每株500 mL，提升磷肥供給，直至花球出現。花球生長情形於肉眼可視直徑 ≥ 1 cm起5-10天，記錄花球發育之性狀至花蕾開花為止。2022年2月26日進行花球採收，另將花球外型分為四種成熟度(如表2、圖1)，共36株。

三、調查項目：

(一) 花球直徑：以俯視角度使用游標尺測量穿過花球中心的橫向與縱向直徑，單位為cm。

(二) 花苞大小：隨機取樣3棵花球並為日後固定測量目標，肉眼可視之花球直徑 ≥ 1 cm為始花第一天，調查至始花第25天止。以游標尺隨機測量4朵花蕾直徑並取平均為每株花球花苞大小，單位為cm。

表1. '42號'青花菜栽培養液配方

Table 1. Nutrient ingredients of '42' broccoli.

養液成分	濃度 $g \cdot L^{-1}$	養液成分	濃度 $g \cdot L^{-1}$
$Ca(NO_3)_2$	0.24	$(NH_4)H_2PO_4$	0.06
KNO_3	0.51	Fe-EDTA	0.02
$MgSO_4$	0.125	H_3BO_3	0.0012

- (三) 花球重量：由花球基部向下1 cm剪下測量，以電子秤量測花球重量，單位為g。
- (四) 花球面積：以俯視角度使用游標尺測量穿過花球中心的橫向與縱向直徑並除2以得半軸長，再以橢圓公式 $[(a+b) \times \pi]$ 計算，單位為 cm^2 。
- (五) 花蕾葉綠素a (Chl. a)、葉綠素b (Chl. b)、總葉綠素及β胡蘿蔔素(β-Carotene)含量：與其 90° 方向由邊緣至中心點剪取兩排花蕾，混合取樣樣本，再取混合後的樣本以電子精秤 $0.1 \pm 0.0005 \text{ g (W)}$ 。加入15 mL(V)萃取液(80% Acetone及20% Methanol)至玻璃試管，使花蕾完全浸泡於萃取液。以石蠟膜密封試管，置放在黑暗環境避光24小時以上。避光後的樣品以分光光度計 (U-2900, HITACHI)測量645、663、652及470 nm的吸光數值，並以下公式計算：

$$\text{Chl. a (mg/g)} : (12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}) \times V / 1000 / W$$

$$\text{Chl. b (mg/g)} : (22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}) \times V / 1000 / W$$

$$\text{Total Chl. (mg/g)} : (A_{652} - 1000 / 34.5) \times V / 1000 / W$$

$$\beta\text{-Carotene (mg/g)} : [1000 \times A_{470} - 3.27 \times (\text{Chl. a}) - 104 \times (\text{Chl. b})] / 227 \times V / 1000 / W$$

表2. '42號'號青花菜花球表觀成熟度

Table 2. Apparent maturity of '42' broccoli head.

	稍早採收	適時採收	稍晚採收	過晚採收
圓整性	表面圓整	表面圓整	側看花球面，部分花莖高於表面2 cm。	側看花球面，部分花莖高於表面2 cm以上。
花蕾大小	$< 1.8 \text{ mm}$	$1.8 \leq x \leq 2 \text{ mm}$	$\geq 2 \text{ mm}$	$\geq 2 \text{ mm}$
花莖長度	$\leq 5 \text{ cm}$	$5 \leq y \leq 7 \text{ cm}$	$7 \leq y \leq 9 \text{ cm}$	$\geq 9 \text{ cm}$

x：花蕾大小，y：花莖長度

圖1. '42號'青花菜花球成熟度分類。

Fig. 1. Classification of maturity of '42' broccoli head.



(六) 多光譜影像採樣與植生指數計算：

1. 拍攝時間與設備：以多光譜相機 RedEdge-M (Micasense, Seattle, WA, U.S.)(表3為該相機持有波段)進行拍攝，各別波段的影像位元深度為16 bit。拍攝時間為 2022年1月02日至2月11日，天氣狀態為上空無雲遮蔽之晴天，多光譜相機置於自製木製腳架上，再以相機腳架(RW-332, 樂華數位科技有限公司, 台中, 臺灣)的中軸與雲台固定相機。測量期間為上午11點30分至下午1點30分，避免相機腳架陰影出現在每張照片相同的相對位置，每週拍攝1-3次。將腳架置放手推車上，再以空心磚增加腳架底座重量防止前傾。鏡頭距離地面約250 cm。透過地上擺設捲尺，依照每20 cm拍攝乙張照片，使影像重疊率約90%。任務完成後再拍攝MicaSense的校正版(Micasense, Seattle, WA, U.S.)影像，作為輻射調整參考。
2. 地面控制點測量：進行影像拍攝前需先設計與測量地面控制點，以輔助後續模型建立使用。本試驗以塑膠栽培槽區四角落，使用測量釘定一控制點，並以測量釘為中心，繪製一5×5 cm之黑白噴漆塗製的空標。再利用即時動態差分定位技術(Real Time Kinematic, RTK)，結合中華民國內政部國土測繪中心提供之虛擬基站(e-GNSS)進行TWD97坐標量測，確保量測誤差低於1-2 公分。
3. 影像拼接與處理：使用軟體(Metashape1.6, Agisoft LLC, St. Petersburg in Russia)將拍攝影像拼接建模以獲得正射影像(orthophoto)，再將正射影像匯入地理資訊系統(Geographic information system, GIS) ArcGIS10.8 (Esri, Redlands in CA)進行影像處理。在GIS人工圈選無陰影遮蔽的葉片範圍作為遮罩(mask)，每一植株獨立圈選。將遮罩範圍內的R、RE及NIR等波段各別進行平均數統計(zonal statistic as table)，將平均值輸出至Microsoft Excel 365 (Microsoft, Wa. U.S.)彙整。
4. 植生指數：本研究以常見之植生指數，如：常態化植生差異指數 (normalized difference vegetation index, NDVI)、常態化紅邊差異植生指數 (normalized difference red edge index, NDRE)、冠層葉綠素濃度指數 (canopy chlorophyll content index, CCCI)、及基於NIR及綠反射下的常態化指數(normalized difference based on NIR and green reflectance, NDNG)作為主要分析植生指數(表4)。

(三)統計分析：

利用 SPSS 26 版 (IBM, Armon, USA) 進行迴歸分析 (regression analysis)，及利用 Microsoft Excel 365 (Microsoft, Wa. U.S.) 進行線性模型繪製。以決定係數 (coefficient of determination, R^2) 值大小確定變數之間的相關程度，其越接近1代表迴歸模式所能解釋之比例越高。

表 3 MicaSense RedEdge-M持有的波段。

Table 3. The wavelength of MicaSense RedEdge-M camera.

Band name	Center Wavelength (nm)	Bandwidth FWHM (nm)
Blue, B	475	20
Green, G	560	20
Red, R	668	10
Red Edge, RE	717	10
Near IR, NIR	840	40

表4. 多光譜影像之植生指數公式。

Table 4. Formula of vegetation index.

Index	Formula
normalized difference vegetation index, NDVI	$(NIR - R)/(NIR + R)$
normalized difference red edge index, NDRE	$(NIR - RE)/(NIR + RE)$
canopy chlorophyll content index, CCCI	NDRE/NDVI
normalized difference based on NIR and green reflectance, NDNG	$(NIR - G)/(NIR + G)$

結 果

'42 號'青花菜花球生長從花芽發育初期直徑約 1 cm 時開始記錄，視為始花第 0 天 (圖 2-a)。經 4 天後花苞、花球面積逐漸增大，花球直徑約 2 cm (圖 2-b)。始花後第 6 天，花球直徑約 7 cm，花蕾緊實(圖 2-c)。始花後第 14 天的花球顏色從鮮綠逐漸轉為鐵灰綠，且花球大小變化逐漸趨緩，此時花苞大小約 1.2 至 1.4 mm(圖 2-d)。始花後約第 18 至 20 天，花球面圓整，花蕾大小約 1.6 至 1.8 mm，以手感受花蕾緊實度為適時採收的成熟度(圖 2-e)。始花後第 25 天後，花球面先會因花莖抽苔而不再圓整，隨後花蕾逐漸成熟開花(圖 2-f-1、圖 2-f-2)。始花後第 36 天，花球上的花苞近全數開花(圖 2-g)。花蕾大小與花球面積有高度線性正相關 r 為 0.98(數據未顯示)，且模型推測的決定係數 R^2 為 0.95 (圖 3-a)，花

球面積也隨逐漸增加，始花後第 25 天後因花球圓整性下降及花蕾開花整齊度不一致，因



圖 2. '42 號'青花菜花球出現及開花發育情形。

圖為青花菜各階段：始花第 0 天(a)，始花第 4 天(b)，始花第 6 天(c)，始花第 14 天(d)，始花後約第 18 至 20 天(e)，始花後第 25 天(f)，始花後第 36 天(g)。

Fig. 2. The appearance and flowering development of broccoli '42'.

The picture showed the stages of broccoli: the days to first flowering(a), after 4 days(b), after 6 days(c), after 14 days(d), after 18-20 days(e), after 25 days(f), and after 36 days(g).

此難以界定測量直徑位置，數據產生較大的測量誤差(圖 3-b)。採收的'42 號'青花菜花球重量與花球面積的線性模型 R^2 為 0.90 (圖 3-c)。

始花後第 0 天在花球的影像紋理(texture)與葉片邊緣無法判別，因此從始花第 4 天開始記錄植生指數。NDVI 於始花第四天表現為 0.93，隨後值漸降低，至始花第 29 天已開始有花蕾開花，植生指數下降至 0.79 且標準差增加，至大多花蕾開花的第 40 天為 0.63，且因每植株開花花蕾數量不一而影響標準差(圖 4-a)。NDNG 始花第四天為 0.87，直至第 40 天數值僅剩 0.54，且標準差最大(圖 4-b)。NDRE 始花第四天表現 0.64 為最高，隨花球發育至開花，始花第 40 天數值僅剩 0.29(圖 4-c)。CCCI 在始花第四天數值為 0.67，始花第 8 天有最大標準差，至始花第 40 天數值為 0.46(圖 4-d)。

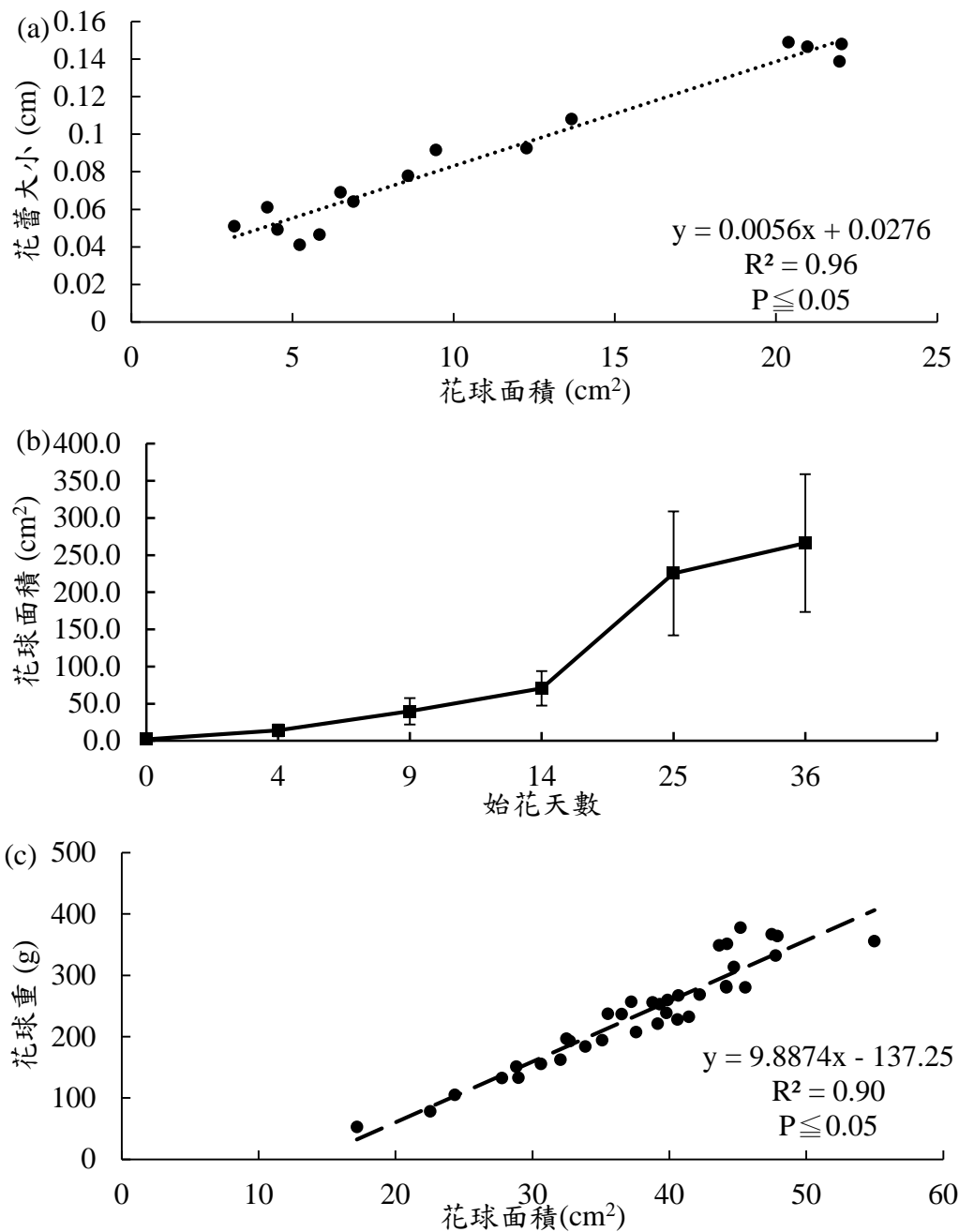


圖 3. '42 號'青花菜花苞大小與花球面積之關係(a)、花球面積變化(b)及花球面積與重量之關係(c)。

Fig. 3. The relationship between bud size and head area(a), change in head area(b), and relationship between head area and weight(c) of '42' broccoli. Vertical bars represent $\pm SE(n=3)$

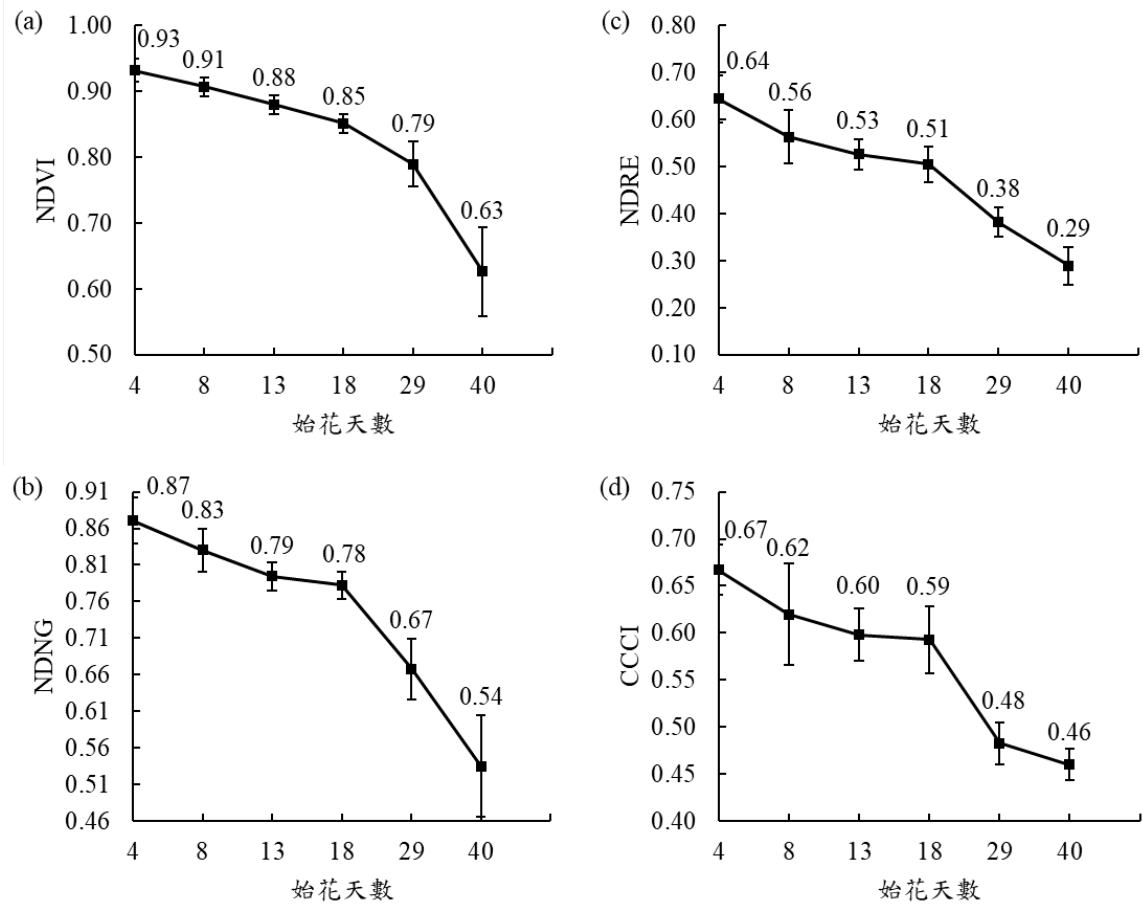


圖 4. '42'青花菜花球生長時之植生指數變化 NDVI(a)、NDNG(b)、NDRE(c)、CCCI(d)。

Fig. 4. The change of vegetation index of '42' broccoli head during growth NDVI (a), NDNG (b), NDRE(c), and CCCI(d). Vertical bars represent $\pm SE(n=3)$.

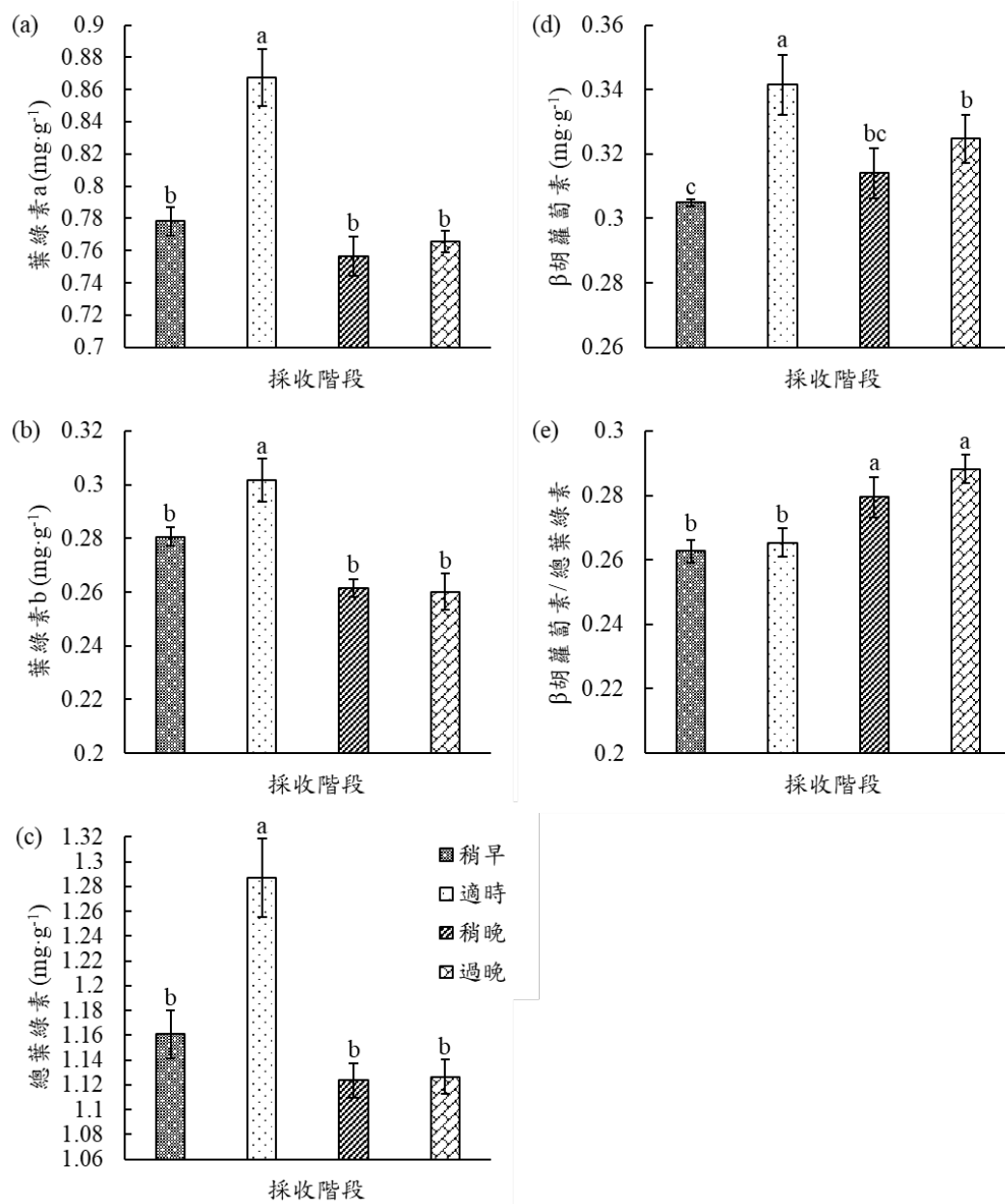


圖 5. '42 號'青花菜花球在不同採收階段分類下的葉綠素及 β 胡蘿蔔素含量葉綠素 a (a)、葉綠素 b (b)、總葉綠素(c)、β 胡蘿蔔素(d)、β 胡蘿蔔素/總葉綠素(e)。

Fig. 5. Chlorophyll and β-carotene contents of '42' broccoli head under different harvest stage. chlorophyll a (a), chlorophyll b(b), total chlorophyll(c), β-carotene(d), and ratio of β-carotene to total chlorophyll(e).

²Means with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level. Vertical bars represent ± SE(n=3).

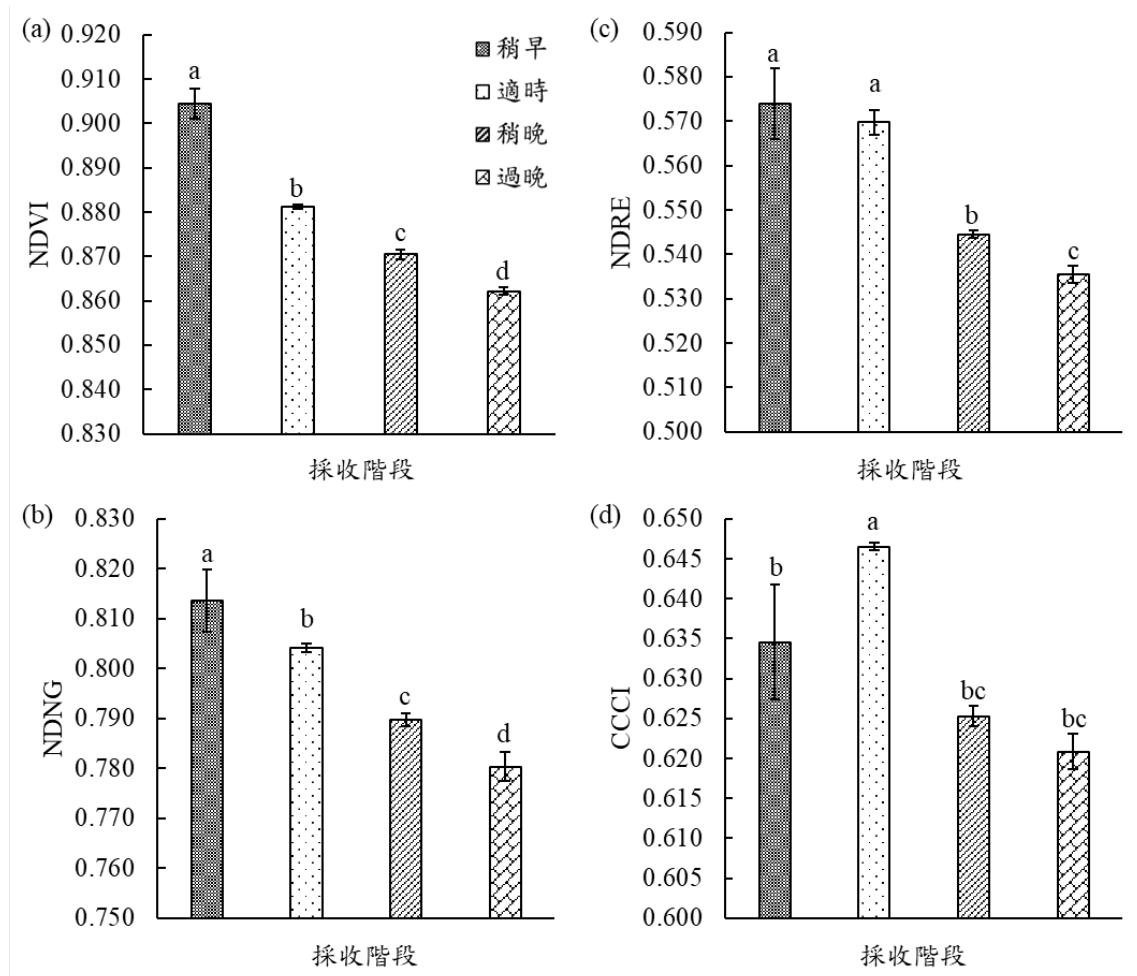


圖 6. '42 號'青花菜花球在不同採收分類下的植生指數(a) NDVI、(b) NDNG、(c) NDRE、(d) CCCI。

Fig. 6. The vegetation indices of '42' broccoli head under different harvest classifications (a) NDVI, (b) NDNG, (c) NDRE, (d) CCCI.

²Means with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level. Vertical bars represent \pm SE(n=3).

討 論

青花菜花球是由未成熟花蕾共同組成，花蕾體積因發育逐漸增加亦使面積增寬，花蕾充實進而讓花球面積逐漸增大與球面觸感緊緻。花莖也因不斷吸收養分後逐漸增長，其長度可能受環境高溫與肥料量的過量而加速抽長(林，2013)，花球面會因花莖抽苔長度使花面不平整，且花蕾體積過大，緊實度降低影響觸感緊實與口感，失去商品價值(圖2)。花球

的面積與重量有顯著正相關(圖5)，Wittstruck等人(2020)利用無人載具拍攝‘Hokkaido’南瓜(*Cucurbita max.*)田間影像以預測和計量產量，結果證實南瓜果實能以橢圓公式作為有效公式計算影像中的果實俯拍面積，而照片計算的果實俯視面積與實際產量預測模型準確率 R^2 為0.84，然其中可能受到葉片遮蔽降低橢圓公式推算面積與重量的準確度。圖5顯示青花菜花球俯視測量之長寬軸，經計算後花球面積與實際產量具正相關，預測模型準確率 R^2 為0.90，未來亦可發展以花球面積推測產量之模型。

實驗表觀分類青花菜花球四個成熟度，花球發育使色素含量產生改變(圖5-a、5-b、5-c、5-d)。在稍早採收之青花菜花蕾的葉綠素a、葉綠素b、總葉綠素含量及β胡蘿蔔素平均值最低，而稍晚採收及因老化關係其含量亦顯著低於適時採收，前述三者多於統計上無顯著差異，適時採收之花蕾含量皆為最高。然於葉綠素a、b含量最高時，β胡蘿蔔素含量亦較其他處理高。葉片老化過程總葉綠素會隨葉綠素a降解而降低，β胡蘿蔔素降解速度較慢，β胡蘿蔔素與總葉綠素的比值可視為葉片老化程度，數值越高代表β胡蘿蔔素含量比例較多(Sims and Gamon, 2002)。本實驗進行表觀判斷時於肉眼無法明顯看出花球黃化，經色素測定後發現雖β胡蘿蔔素與總葉綠素比值平均差異僅0.02，稍早採收與適時採收的表現仍顯著低於稍晚與過晚採收(圖5-e)。

花球的植生指數如NDVI、NDNG、NDRE與CCCI等隨發育天數逐漸降低，其可能因花蕾體積逐漸增加，使原先緊密的花球面形成凹凸不平整反射面，於陽光照射下易形成花球影像中一點一點的陰影(噪點)，因而產生植生指數的下降；花球逐漸成熟時球面形成蠟質，顏色由鮮綠色逐漸轉為鐵灰綠，而蠟質能影響光譜反射率(Ribeiro da Luz, 2006)，進而改變植生指數。本試驗所用的植生指數中多與葉綠素有關，受葉綠素含量的改變以及開花後的黃花表現，及抽薹後的遮蔽陰影面積增加皆可能使植生指數降低。

植生指數於薄荷及油菜莢等作物的採收成熟度的應用已有部分成果(Prasad *et al.*, 2022；Singh *et al.*, 2021)，本試驗配合採收後的表觀分類與植生指數發現NDVI、NDNG、NDRE與CCCI可有效分類不同花球成熟度。稍早採收的標準差因樣本數較少，使組內變異較大。NDVI、NDRE及NDNG在統計上各組的分類明顯的主因可能受花球緊實程度不同，稍早採收的花球花蕾較小，影像的像素無法精細表示花蕾產生的陰影，因此可能將其與陰影平均，使之在影像中看不見噪點，植生指數受之上升。稍晚與過晚採收的花蕾較大，花球鬆散使其在影像成像中的陰影增加，加上葉綠素含量較低，蠟質的提升，皆可能影響各別波段的吸收與反射，降低植生指數的表現。CCCI在本次試驗中能夠更有效分類出適時採收的花球，其為NDRE及NDVI之比值，可能增幅葉綠素含量的變化，因此建議青花菜花球以CCCI為適時採收之植生指數，閾值為0.645。

參考文獻

- 山崎肯哉。1982。養液栽培全編。博友社。日本。
- 林經偉。2013。青花菜栽培之土壤及施肥管理。臺南區農業專訊 85:13-17。
- 高德錚。2017。液肥配方在設施蔬菜栽培之調配與應用實務。臺中區農業改良場特刊 133:189-205。
- 行政院農委會。2020。農情調查資訊查詢。農情報告資訊網。
<https://agr.afa.gov.tw/afa/afa_frame.jsp>。
- 曹幸之、廖芳心、李阿嬌、許家言、王自存、黃益田。2018。蔬菜學。五南出版社。臺北。臺灣。
- Fahey, J. W., Y. Zhang, and P. Talalay. 1997. Broccoli sprouts: an exceptionally rich source of inducers of enzymes that protect against chemical carcinogens. *Proceedings Natl. Acad. Sci.* 94:10367-10372.
- Prasad, N., M. Semwal, and A. Kalra. 2022. Hyperspectral vegetation indices offer insights for determining economically optimal time of harvest in *Mentha arvensis*. *Ind. Crops Prod.* 180. Doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114753.
- Psiroukis, V., B. Espejo-Garcia, A. Chitos, A. Dedousis, K. Karantzalos, and S. Fountas. 2022. Assessment of different object detectors for the maturity level classification of broccoli crops using UAV imagery. *Remote Sens.* 14. Doi: 10.3390/rs14030731.
- Ribeiro da Luz, B. 2006. Attenuated total reflectance spectroscopy of plant leaves: a tool for ecological and botanical studies. *New Phytol.* 172(2):305-318.
- Sims, D. A. and J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ.* 81: 337-354.
- Singh, K. D., H. S. Duddu, S. Vail, I. Parkin, and S. J. Shirtliffe. 2021. UAV-based hyperspectral imaging technique to estimate canola (*Brassica napus* L.) seedpods maturity. *Can. J. Remote Sens.* 47(1):33-47.
- Souza, J. B. C., S. L. H. de Almeida, M. Freire de Oliveira, A. F. D. Santos, A. L. D. B. Filho, M. D. Meneses, and R. P. D. Silva. 2022. Integrating Satellite and UAV Data to Predict Peanut Maturity upon Artificial Neural Networks. *Agr.* 12(7). Doi.org/10.3390/agronomy12071512.
- Wittstruck, L., I. Kühling, D. Trautz, M. Kohlbrecher, and T. Jarmer. 2020. UAV-based RGB imagery for Hokkaido pumpkin (*Cucurbita max.*) detection and yield estimation. *Sensors.* 21(1). Doi: 10.3390/s21010118.

The Vegetation Index of Growth and Harvesting Maturity of '42' Broccoli Head

Wen-Yuan, Liu¹⁾ Yu Sung²⁾

Key words : Broccoli, Vegetation index, Head maturity

Summary

Broccoli maturity of the broccoli head was inconsistent, which need for multiple harvests could not reduce the harvesting labor. To observe the vegetative index of '42' broccoli head of different maturity and choose the vegetation index that could identify the appropriate time to harvest broccoli in this study. The '42' broccoli heads were classified into four maturity levels: early, timely, later, and over late harvesting. The timely harvested head had the highest performance of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and β -carotene, which were 0.87, 0.30, 1.29 and 0.34 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The performance of later and over late harvesting were the highest at 0.28 and 0.29, respectively, and the performances of earlier harvesting and timely harvesting were 0.26 and 0.27, respectively, the lowest. The size of head increased with the growth days, and there was a high correlation between head area and head weight $R^2 = 0.90$. After combining with the classification of different apparent maturity and the determination of the chlorophyll content of flower buds, it was recommended that the canopy chlorophyll content index (CCCI) of the head matured at the appropriate time was 0.645 as the harvested standard.

1) Student in M.S. program, Department of Horticulture, National Chung Hsing University.

2) Professor, Department of Horticulture, National Chung Hsing University. Corresponding author.

