

建立適用於臺灣亞熱帶氣候區之青花菜修正積溫預測模型¹

張佳偉^{2*}、張金元²、洪榆宸²、陳葦玲³

摘 要

青花菜(*Brassica oleracea* var. *italica*)為喜冷涼作物，在臺灣亞熱帶氣候條件下主要於秋冬裡作栽培。近年受氣候變遷影響，秋冬季異常高溫頻繁發生，使標準積溫模式(Standard Growing Degree Days, GDD)於生育期預測上產生明顯偏差，增加生產排程與採收人力調度之不確定性。本研究旨在建立一套符合亞熱帶氣候特性之非線性「修正積溫預測模型(Modified GDD)」，提升青花菜栽培品種「42號」在不同定植季節採收期預測的穩定性與適用性。本研究蒐集2021至2025年間於彰化地區青花菜田間生育調查資料(n=35)，涵蓋早秋、正冬及晚春等不同定植期，包含完整現蕾紀錄(n=23)與缺現蕾紀錄之(n=12)，搭配鄰近氣象站逐日氣溫資料進行分析。修正GDD模型依不同生育階段導入生理限制邏輯：營養生長期採用平頂切除法(Cut-off method，上限30℃)，生殖生長期採用三角懲罰法(Triangular penalty method，最適溫22℃、上限30℃)，並與僅設定基礎溫度($T_{base}=5^{\circ}\text{C}$)之標準GDD模式進行比較。結果顯示，標準GDD模式於早秋與晚春高溫條件下，全生育期積溫累積高達1280-1380 GDD，而正冬期僅累積940-990 GDD，季節間呈現較大變異，顯示標準GDD模式無法反映高溫對其之發育抑制熱障礙(Heat Penalty)。修正GDD模式則可有效校正高溫期間之無效熱累積，將不同季節的全生育期穩定收斂於950-1050 GDD之間。本研究推導出青花菜「42號」營養生長期門檻值為730修正GDD，於亞熱帶氣候條件下之積溫需求具有相對穩定性；並量化出早秋定植批次受高溫影響平均產生熱障礙約93 GDD，惟其變異程度較高，解釋了高溫環境下生理停滯導致生育延遲之現象。建議產業應用上可設定730修正GDD作為花芽分化預報，並以1000修正GDD

¹ 農業部臺中區農業改良場研究報告第 1122 號。

² 農業部臺中區農業改良場助理研究員、副研究員、助理研究員。

³ 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：張佳偉，Email: changcw@tcdares.gov.tw

作為採收期預測標準，模型能協助農民在早春或晚秋等季節遇高溫等極端氣候時，進行精準生產排程。有效降低季節性氣溫變動對生育期預測之影響，可作為氣候不穩定環境下青花菜生產排程與管理決策參考。

關鍵字：青花菜、修正積溫、高溫逆境、熱障礙、物候預測

前 言

青花菜(*Brassica oleracea* var. *italica*)為十字花科薺屬蔬菜作物，原產西歐義大利沿海，性喜冷涼氣候，屬於綠植株春化型作物。臺灣自1960年代引進優良品種後，消費量逐年提升，目前全臺種植面積約為1,500-1,750公頃，年產量超過3萬公噸，產值逾10億元，除鮮食外，亦可作為冷凍加工蔬菜，調節國內夏季蔬菜供應。主要產區集中於雲林、嘉義等地，多於秋冬裡作(11月至隔年3月)栽培(游等人，2020；沈等人，2025)。然而因臺灣位處亞熱帶氣候區，秋冬季節氣溫變異大，近年更受氣候變遷影響，「暖冬」與「早春回暖」現象頻繁發生，高溫已成為限制青花菜生育進程與產期穩定性的關鍵環境因子。

溫度為影響青花菜生長發育之主要環境因子。研究指出，青花菜營養生長適溫約為20-22℃，而花球發育最適溫度則約為15-18℃(陳等人，2013)。若花芽分化或花球發育期間遭遇高溫(>25℃)，極易導致花芽分化延遲、花球異常(如花球不平整、夾葉、貓眼)、品質劣化及產量下降(Björkman et al.,1998)。研究亦顯示，花序形成初期為青花菜對高溫逆境最為敏感之關鍵階段，高溫可能導致花器內植物荷爾蒙(phytohormones)平衡失調，進而造成發育停滯或敗育(Heather et al.,1992)。此外，高溫環境亦可能縮短花球採收適期，導致花蕾黃化與成熟度不一，增加採收人力調度之困難(郭等人，2021)。

積溫(Growing Degree Days, GDD)為目前廣泛應用於作物物候期預測之量化指標。Dufault(1997)於青花菜生育研究中比較多種基礎溫度後，建議以5℃作為積溫計算之基礎，並被後續研究廣泛採用。傳統GDD模式僅設定基礎溫度並進行線性累加，假設溫度愈高，作物發育速率愈快。但在亞熱帶高溫環境下，當氣溫超過作物生理最適範圍時，生長速率往往不再增加，甚至因高溫逆境而停滯。既有研究指出，即使為耐熱品種，高溫仍可能造成花芽分化與花球發育之延遲或停滯現象(Björkman et al.,1998；Tan et al.,2000)。溫度影響青花菜自花球啟動至採收期間之發育速率與產量表現，且可透過溫度積分模式進行預測(Grevsen,1998；Alina et al.,2010)。若沿

用傳統GDD模式，常會高估高溫期間之有效發育進度，導致物候預測產生系統性誤差。

臺灣常見的早生耐熱青花菜品種‘42號’，因具備一定程度的耐熱性而適合秋冬裡作栽培，惟目前仍缺乏其在臺灣亞熱帶氣候條件下之精確積溫參數研究，特別是在高溫逆境下的生育模式修正。多數研究仍集中於生理性狀或肥培管理層面，較少結合長期田間資料與逐日氣象數據，建立可反映高溫抑制效應的物候預測模型。因此，如何在積溫架構中納入高溫對不同生育階段之生理限制，是亞熱帶青花菜生產管理中急需補足之研究缺口。

本研究提出一套以生育階段為核心、納入高溫生理懲罰機制之修正積溫預測架構，以修正線性積溫模式於亞熱帶高溫條件下可能產生之系統性誤差。於熱時間與作物物候模型中，除基礎溫度(base temperature)外，常另納入上限溫度(upper threshold)或以基礎溫度、最適溫度與最高溫度組成之cardinal temperatures，藉以描述高溫下發育速率不再增加，甚至下降之現象；其中，上限截頂(cut-off)與三角型溫度反應(triangular temperature response)為常見之處理(Baskerville and Emin, 1969; Yan and Hunt, 1999)。本研究依據青花菜高溫生理與花球發育研究結果，將營養生長期與生殖生長期分別設定不同之高溫限制邏輯：營養生長期以30°C作為有效溫度上限，生殖生長期則設定最適溫22°C、上限溫30°C，以反映青花菜於高溫條件下之發育抑制現象(Björkman and Pearson, 1998; 陳等人, 2013)。試驗蒐集2021至2025年間中部地區青花菜田間生育資料，結合鄰近氣象站逐日氣溫資料，建立適用於臺灣亞熱帶氣候條件之修正積溫(Modified GDD)預測模型，並驗證其於花芽分化與採收期預測之穩定性與適用性。

材料與方法

一、供試材料與試驗地點

試驗以臺灣青花菜早生品種‘42號’為試驗材料。試驗田區：(1)臺中區農業改良場試驗田(彰化縣大村鄉，24°00'N, 120°32'E)；(2)彰化縣竹塘鄉專業農戶田區。皆採慣行栽培管理。試驗期間涵蓋2021年至2025年，共計跨越5個年度之多年期作栽培。

二、資料蒐集與分組

本研究共蒐集35筆具有完整定植與採收紀錄之田間數據(如附表一)。為探討季節性氣候差異，本研究依據定植月份將所有樣本明確劃分為三個氣候群集：早秋群

集(9-10月定植，初期遇高溫， $n=11$)、正冬群集(11-1月定植，氣候適宜， $n=20$)及晚春群集(2-3月定植，後期遇高溫， $n=4$)。

在模型建立與驗證策略上，本研究先自受熱逆境影響最小的「正冬群集」中，篩選出具備完整現蕾紀錄之批次作為「建模基準組(Calibration Set, $n=11$)」，用以推導並建立營養生長期的生理積溫門檻值。隨後，將此建立好之模型參數，套用於其餘包含早秋、晚春及部分正冬在內的「跨季驗證組(Validation Set, $n=24$)」，檢驗模型在非當季、且面臨高溫逆境時的真實預測準確度。

三、氣象資料來源

逐日氣象資料(最高溫、最低溫、平均溫)取自鄰近試驗田區之農業氣象觀測站。大村試驗田數據取自交通部中央氣象署農業氣象觀測網「臺中農改」測站(代碼72G600)，竹塘試驗田數據取自「田頭村」測站(代碼C2G980)。

四、積溫計算模式

為探討高溫對青花菜發育之影響，本研究採用「標準積溫模式」與「修正積溫模式」進行比對。基礎溫度(T_{base})設定為 5°C ，係參照 Dufault 與 Dhankhar & Chandanshive (Dufault, 1997；Dhankhar et al., 2017)之研究。

(一) 標準積溫模式(Standard GDD Model)採用傳統線性累加方式，不設上限溫度。計算公式如下：

$$GDD_{std} = \sum_{i=1}^n \max(0, T_{avg,i} - T_{base})$$

其中 $T_{avg,i}$ 為第 i 日之平均氣溫， T_{base} 為作物生長發育所需的最低臨界溫度。

(二) 修正積溫模式(Modified GDD Model)考量亞熱帶氣候高溫對青花菜不同發育階段之生理限制，本試驗依據高溫逆境下青花菜生理(陳等人，2013)及青花菜花芽分化生理條件(Björkman et al., 1998)之研究，將生育期劃分為營養生長期與生殖生長期，分別導入不同高溫限制參數：

1. 營養生長期(Vegetative Growth Stage)：定植日至現蕾日，主要為葉片及生物量之累積，對高溫耐受度較高。採用平頂切除法(Cut-off Method)，即當日平均氣溫超過設定之上限溫度時，僅以上限值作為有效溫度參與積溫計算，以避免高溫條件下不具生理效益之熱量被持續線性加總。此類以上限溫度限制熱量累積之處理方式，已廣泛應用於熱時間與 degree-day 計算概念中(Baskerville and Emin, 1969)。依據陳等(2013)之研

究指出，青花菜在30°C以上光合作用效率顯著下降，且熱逆境指標(如過氧化氫)升高。故設定生長上限溫度(T_{upper})為30°C，當氣溫超過此限值光合作用效率不再增加。

$$T_{eff} = \min(T_{avg}, 30)$$

$$GDD_{veg} = \max(0, T_{eff} - 5)$$

其中 T_{eff} 為有效溫度(effective temperature)，表示經上限溫度修正後，實際用於當日積溫計算之溫度值；當日平均氣溫未超過30°C時， T_{eff} 等於 T_{avg} ，超過30°C時則以30°C計，以避免高溫條件下無效熱量被高估。

2. 生殖生長期(Reproductive Growth Stage)：現蕾日至採收日。採用三角懲罰法(Triangular Penalty Method)，以基礎溫度(T_{base})、最適溫度(T_{opt})與最高溫度描述高溫下發育速率之變化。可表達作物發育速率於最適溫附近達到最高，當溫度高於最適溫後逐漸下降，並於最高溫時降為零，為作物物候與熱時間模型常見之處理架構(Yan and Hunt, 1999)。參考 Björkman & Pearson (1998)對青花菜花芽分化之研究，當花序發育在超過25°C時發生停滯(Arrest)現象。本研究考量田間日夜溫差緩衝效應，設定最適溫度(T_{opt})為22°C、上限致死溫度(T_{max})為30°C。當氣溫超過最適溫時，發育速率隨溫度升高而遞減；超過上限溫時，視為無效積溫($GDD=0$)。

$$GDD_{rep} = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{avg} \leq 5 \\ T_{avg} - 5 & \text{if } 5 < T_{avg} \leq 22 \\ (22 - 5) \times \frac{30 - T_{avg}}{30 - 22} & \text{if } 22 < T_{avg} < 30 \\ 0 & \text{if } T_{avg} \geq 30 \end{cases}$$

修正GDD模式中，先以營養生長期公式逐日累積修正積溫；當累積值首次達730 GDD之當日，仍視為營養生長期，並自次日起切換為生殖生長期，套用三角懲罰法進行積溫計算。採收期預測，依兩模型之全樣本實際累積平均值設定及提前預告原則，設定為1000 GDD。當自定植日起累積值首次達到採收閾值之日期，即定義為預測採收日，計算比較預測天數與實際天數之平均絕對誤差(MAE)。

五、物候推估與熱障礙量化

因部分試驗批次缺乏現蕾日紀錄，本研究建立物候推估流程。參數推導邏輯因青花菜在早秋與晚春易受高溫逆境影響而產生發育延遲，若直接使用全部具現蕾日紀錄的數據($n=23$)平均值，恐造成門檻值因熱障礙而產生高估誤差。因此本研究利用前述「建模

基準組」之數據統計營養生長期積溫需求，以平均積溫作為營養生長期的生理積溫常數 (Physiological Constant)。

無現蕾日之批次自定植日起逐日累加積溫，當累積數值達到該門檻值之日期，即定義為「推估現蕾日」，據此劃分營養生長與生殖生長階段。

為量化高溫環境下作物所累積之無效積溫與生育延遲，本研究定義「熱障礙差異值 (Heat Penalty)」，計算公式為同一批次下「標準積溫模式累積值」減去「修正積溫模式累積值」之差額，用以量化高溫環境下作物所累積之無效積溫與生育延遲。

六、統計分析

試驗數據利用Microsoft Excel進行整理與積溫運算。採用皮爾森積動差相關係數(Pearson correlation coefficient, r)分析氣溫因子與生育日數之相關性；並計算各栽培季節下兩種積溫模式之變異係數(Coefficient of Variation, CV%)，以評估模型之穩定性與預測能力。

結 果

一、氣候條件與採收天數之季節性變異

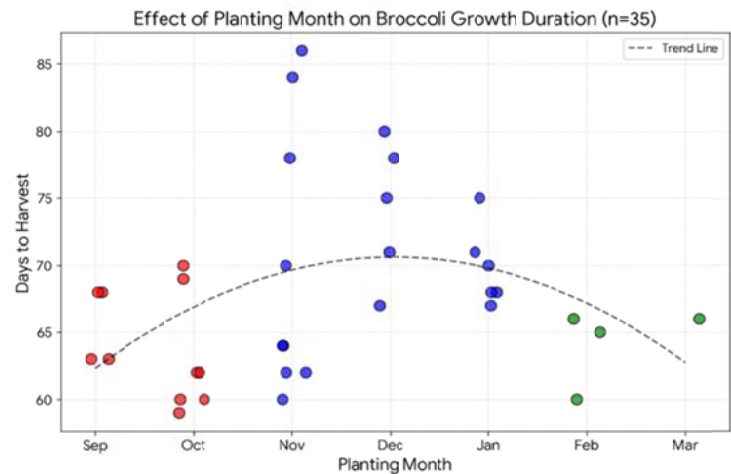
本研究彙整2021-2025年間共35筆田間試驗資料(如附表一)，涵蓋早秋(9-10月)、正冬(11-1月)及晚春(2-3月)等不同定植期，可觀察到氣候條件與生育表現呈現顯著季節性差異。正冬群集平均氣溫 $18.0 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ，落在青花菜適合的生理溫度範圍($15-22^{\circ}\text{C}$)，標準差小(1.1°C)，氣候相對穩定，其平均定植至採收天數為 71.0 ± 7.4 天，為三群集中最長。早秋群集平均氣溫 $22.8 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ ，初期頻繁遭遇 25°C 至 30°C 以上高溫，其平均定植至採收天數為 64.0 ± 4.0 天。晚春群集平均氣溫為 $21.1 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ ，後期逐漸進入升溫環境，平均定植至採收天數為 64.3 ± 2.9 天，與早秋相似。

各批次實際定植至採收天數介於59至86天之間(圖一)，最短者出現在早秋定植批次，最長者則出現在正冬定植批次，兩者相差達27天。即青花菜採收天數與定植月份之關係並非單純線性，可能受不同季節、氣溫、生育階段之生理發育及環境等因素共同影響。

表一、不同栽培季節下青花菜‘42號’之氣象條件與定植至採收天數
Table 1. Summary of meteorological conditions and growth duration of broccoli ‘42’ in different cropping seasons

Cropping Season	Planting Month	Mean Temperature (°C)	Mean Growth Duration (Days)	Range (Days)	Sample Size (n)
Early Autumn	Sep - Oct	22.8±1.9	64.0±4.0	59 -70	11
Winter	Nov - Jan	18.0±1.1	71.0±7.4	60 -86	20
Late Spring	Feb - Mar	21.1±1.9	64.3±2.9	60 -66	4

Note: Data represents mean ± standard deviation. Statistics are derived from 35 field datasets collected between 2021 and 2025.



圖一、不同定植月份對青花菜全生育日數之影響。不同顏色分別代表不同栽培季節群集：紅色為早秋9-10月定植、藍色為正冬11-1月定植、綠色為晚春2-3月定植。X軸為定植月份，Y軸為定植至採收天數。

Fig. 1. Effect of planting month on total growth duration of broccoli. Red, blue, and green indicate Early Autumn (Sep-Oct), Winter (Nov-Jan), and Late Spring (Feb-Mar), respectively. X-axis: planting month; Y-axis: days from planting to harvest.

二、營養生長期門檻值之推導

為確定青花菜‘42 號’從營養生長期轉向生殖生長期的生理積溫需求，本研究採用 11 筆正冬建模基準組數據進行分析。推導出標準積溫模式與修正積溫模式兩者之關鍵預測參數，如表二。分析結果日均溫皆未觸發修正模型所設定的高溫懲罰閾值(30℃)，

兩種模式計算出之正冬子集營養生長期平均積溫完全相同，皆為 782.2 GDD(標準差為 64.6 GDD)。

數據顯示，部分早生批次在累積約 717 GDD 時即啟動花芽分化。基於農業實務操作預報原則，本研究將門檻值設定為 730 修正 GDD，約與平均值減去 1 倍標準差相近 (782.2-64.6 =717.6)，以此作為判定花芽分化啟動的通用門檻值。以此數值應用於驗證組的物候推估，界定營養期與生殖期的時間分界。

標準積溫模式計算之全樣本平均總積溫為 1056.9 GDD，而修正積溫模式計算之全樣本平均總積溫為 1024 GDD。

表二、營養生長期積溫門檻值之推導過程(冬季建模組數據)(n=11)

Table 2. Derivation of the vegetative growth threshold based on winter calibration batches (n=11)

Batch ID	Planting Date	Observed Floral Initiation Date	Vegetative Growth Duration (Days)	Standard GDD Accumulation	Modified GDD Accumulation
21-Winter-01	2021/01/14	2021/03/10	55	743.4	743.4
21-Winter-02	2021/01/29	2021/03/25	55	795.5	795.5
21-Winter-03	2021/11/11	2021/12/30	49	743.3	743.3
21-Winter-04	2021/11/11	2021/12/30	49	743.3	743.3
21-Winter-05	2021/11/25	2022/01/16	52	717.6	717.6
21-Winter-06	2021/11/25	2022/01/16	52	717.6	717.6
23-Winter-03	2023/11/07	2023/12/29	52	841.5	841.5
23-Winter-04	2023/12/07	2024/01/29	53	717.7	717.7
24-Winter-02	2024/11/28	2025/02/05	69	841.3	841.3
24-Winter-03	2024/11/29	2025/02/12	75	899	899
24-Winter-04	2024/12/03	2025/02/12	71	844	844
Mean			57.5	782.2	782.2
Standard Deviation (SD)			9.4	64.6	64.6
Set Threshold				730	730

Note: This table only includes batches planted between November and January with complete floral initiation records (n=11). The threshold is set at the mean minus one standard deviation (rounded) to cover the requirements of early-maturing individuals.

三、標準與修正積溫模式之穩定性比較

為評估模式的廣泛適用性，本研究納入全數35筆田間試驗數據(含建模組與驗證組)進行分析，比較「標準GDD」與「修正GDD」在不同季節下的全生育期累積積溫統計特徵(表三)。

結果顯示，在早秋定植批次中，標準GDD之平均累積值為1211.9 GDD，變異係數(CV)為12.4%；修正GDD為1118.7 GDD，CV為7.0%。在晚春定植批次中，標準GDD之平均累積值為1103.2GDD，CV為14.4%，修正GDD之平均累積值為948.6 GDD，CV為5.6%。正冬批次中，標準GDD之平均累積值為962.5 GDD，修正GDD之平均累積值為952.5 GDD，兩種模式之CV均為7.7%。

表三、標準積溫與修正積溫模式在不同栽培季節之全生育期累積積溫比較

Table 3. Comparison of accumulated GDD statistics between Standard and Modified models across different cropping seasons (n=35)

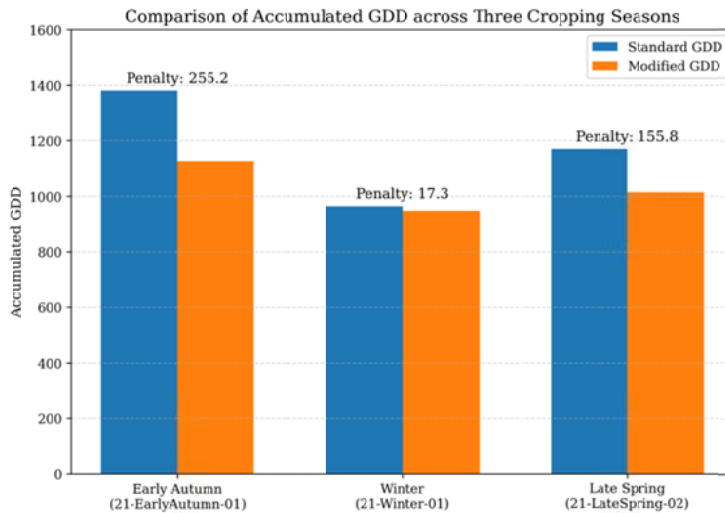
Cropping Season	GDD Model	Mean Accumulated GDD	Standard Deviation (SD)	Coefficient of Variation (CV%)
Early Autumn	Standard GDD	1211.9	149.8	12.4%
	Modified GDD	1118.7	78.8	7.0%
Winter	Standard GDD	962.5	74.6	7.7%
	Modified GDD	952.5	73.1	7.7%
Late Spring	Standard GDD	1103.2	158.6	14.4%
	Modified GDD	948.6	52.7	5.6%

四、高溫熱障礙(Heat Penalty)之量化分析

圖二從35筆樣本中挑選具代表性的早秋(21-Early Autumn-01)、正冬(21-Winter-01)與晚春(21-Late Spring-02)各1筆試驗批次來呈現積溫差異。在適溫的正冬(1月中旬定植)，標準模式與修正模式的累積數值幾乎一致，熱障礙僅17.3 GDD；然在遭遇熱逆境的早秋(9月中旬定植)與晚春(3月中旬定植)中，標準GDD顯著飆高，分別產生了高達255.2與155.8 GDD的無效熱障礙。

為驗證修正GDD模型，本研究從35筆資料中選取「早秋」與「晚春」案例各1筆資料，見表四。早秋案例(21-早秋-01)於9月中旬定植，10月上旬前平均氣溫皆介於29-31℃，10月中旬後平均氣溫常介於24-26℃，以標準GDD模式分析在累積至約43天(約10月底)即達可採收門檻，但實際上需等到63天。修正GDD模式扣除約255

GDD無效熱能，將預測校正為55天達可採收，縮小誤差。晚春案例(21-晚春-02)於2月底定植，生長後期遇春季高溫。標準GDD估算之生長發育較快，預測58天採收。修正模型則透過生殖生長期的三角懲罰機制，推導出高溫導致發育停滯，得到65天的預測採收日，與實際66天幾乎一致。



圖二、不同栽培季節代表性批次之積溫累積量比較。

Fig. 2. Comparison of accumulated GDD for representative batches across cropping seasons.

針對早秋與晚春兩個極端群集，分析「無效積溫(熱障礙)」發生於哪個發育階段。其中21-LateSpring-03因生殖生長期連續高溫，造成採收預期顯著偏差(附表一)，為避免其對回歸參數與統計過度影響，Heat Penalty分析及採收期預測誤差之驗證排除該筆資料(表五)。統計數據顯示青花菜‘42號’之熱障礙在營養生長階段低，多集中在生殖生長期(早秋平均92.7 GDD，晚春平均89.5 GDD)。觀察早秋定植時日平均氣溫約在28-29℃，持續超過30℃設定上限的現象少，「花芽分化啟動期」處於氣溫較高的10月中下旬，導致花球發育初期受抑制。晚春定植時氣溫涼冷，營養生長期無障礙，進入採收期(4-5月)時氣溫快速回升至25-30℃。此時為花球膨大期，以標準GDD模式計算，將因高溫產生無效積溫，而修正GDD模型則透過「三角懲罰機制($T_{opt}=22^{\circ}\text{C}$, $T_{max}=30^{\circ}\text{C}$)」避免無效積溫快速累積造成誤判。

本研究以生殖生長期平均氣溫為自變數(x)，熱障礙(Heat Penalty)為應變數(y)進行線性迴歸分析。結果顯示兩者之間呈顯著正相關($R^2 = 0.65$, $p < 0.01$)(圖三)。其線性回歸方程式為：

$$y = 22.53x - 401.28$$

依據此回歸方程式推估，當生殖生長期平均氣溫約高於17.81℃時，Heat Penalty可能開始出現正值；且在此線性關係下，均溫每上升1℃，Heat Penalty約增加22.53 GDD。

表四、早秋與晚春代表性案例之積溫與預測差異比較表

Table 4. Comparison of GDD accumulation and prediction discrepancies between representative Early Autumn and Late Spring batches

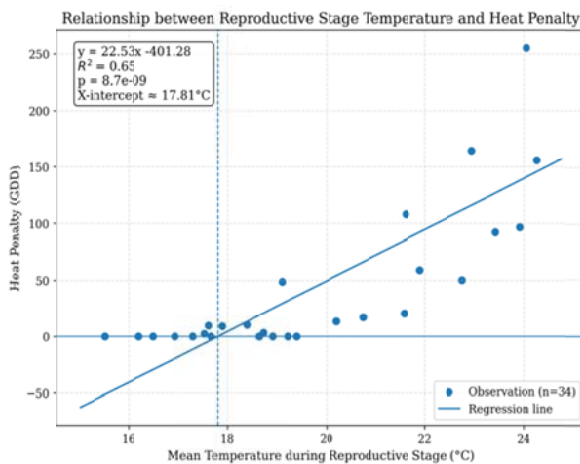
Comparison Item	Early Autumn Case	Late Spring Case
Batch ID	21-Early Autumn-01	21-Late Spring-02
Planting Date	Sep16	Feb26
Actual Harvest Date	Nov18	May 03
Actual Duration	63 Days	66 Days
Modified GDD Model		
Total Accumulated GDD	1125 GDD	1013.5 GDD
Predicted Days	55 Days (Error -8 Days)	65 Days (Error -1 Days)
Standard GDD Model		
Total Accumulated GDD	1380.2 GDD (Overestimated)	1169.3 GDD (Overestimated)
Predicted Days*	43 Days (Error -20 Days)	58 Days (Error -8 Days)
Heat Penalty	255.2 GDD	155.8 GDD

Note: Predicted days for the Standard GDD model were simulated assuming a harvest target of 1000 GDD for comparison purposes.

表五、早秋與晚春群集之熱障礙(Heat Penalty)分布階段統計

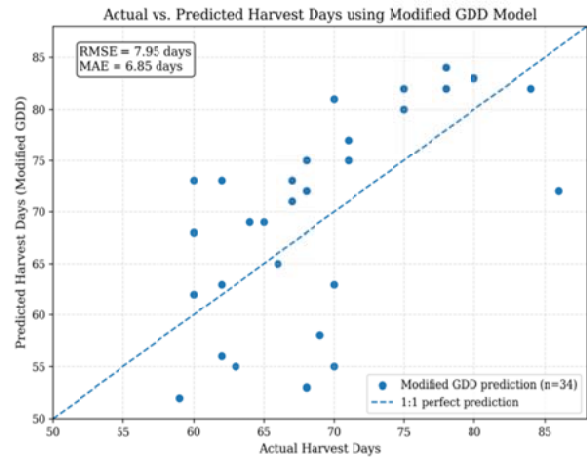
Table 5. Distribution of Heat Penalty across growth stages in Early Autumn and Late Spring clusters

Cluster	Vegetative Growth Penalty	Reproductive Growth Penalty	Primary Source of Penalty
Early Autumn (Sep-Oct)	0.5±0.9 GDD	92.7±94.7 GDD	Reproductive Growth Stage
Late Spring (Feb-Mar)	0.0±0.0 GDD	89.5±67.7 GDD	Reproductive Growth Stage



圖三、生殖生長期平均氣溫與熱障礙 (Heat Penalty) 之線性關係(排除極端 heat-forced 批次 21-Late Spring-03, $n=34$)。

Fig. 3. Linear relationship between mean temperature during the reproductive stage and heat penalty.



圖四、利用修正 GDD 模式預測之採收天數與實際田間採收天數之散佈圖 (排除極端 heat-forced 批次 21-Late Spring-03, $n=34$)。

Fig. 4. Scatter plot comparing actual harvest days to predicted harvest days using the Modified GDD model ($n=34$).

五、採收期預測準確度驗證

利用本研究建立的修正GDD模式參數(營養期門檻730 GDD, 全生育期目標1000 GDD), 進行採收日預測, 並與實際田間觀測天數進行逐筆比對, 驗證結果如圖四。多數樣本點分布於1:1 對角線附近, 表示修正GDD模式預測之採收天數與實際採收天數具良好一致性。

排除生殖生長期極端高溫之「21-Late Spring-03」, 本研究針對34筆樣本進行預測誤差分析(表六)。修正GDD模式的平均絕對誤差(MAE)6.85 天, 均方根誤差(RMSE)7.95天, 整體誤差變異係數(CVRMSE)11.64%, 各項指標皆優於標準GDD模式。

表六、標準與修正積溫模式於各栽培季節之採收天數預測誤差分析

Table 6. Prediction error analysis of harvest days using Standard and Modified GDD models across different cropping seasons.

Cropping Season	Sample Size (n)	Model	MAE (Days)	RMSE (Days)	CV(RMSE)
Early Autumn	11	Standard GDD	13.18	15.11	23.61%
		Modified GDD	8.64	9.78	15.29%
Winter	20	Standard GDD	5.55	6.55	9.22%
		Modified GDD	6.25	7.12	10.00%
Late Spring	3	Standard GDD	5.33	5.89	9.25%
		Modified GDD	4.33	5.2	8.16%
Total (Excluding extreme heat-forced batch)	34	Standard GDD	8.00	10.11	14.84%
		Modified GDD	6.85	7.95	11.64%

Note: MAE is the mean absolute error between predicted and observed harvest days. RMSE is the root mean square error, with greater sensitivity to large errors. Lower values indicate better prediction accuracy. Prediction error analysis was conducted after excluding the extreme heat-forced batch 21-Late Spring-03.

討 論

一、亞熱帶環境下修正積溫模型之穩定性與必要性

綜合不同定植季節之生育日數與積溫分析結果，青花菜於亞熱帶氣候條件下，其發育並非隨氣溫升高而呈現線性加速關係。特別是在早秋與晚春等高溫風險較高之批次中，即使氣溫較高使標準GDD累積迅速，實際生育日數卻未相應縮短，顯示以日曆天數或線性標準GDD模型，容易造成產期預測的系統性偏差。反映在亞熱帶環境中，作物發育行為已明顯偏離線性溫度反應假設。

相較之下，本研究建立修正GDD模式，透過劃分生育階段並納入高溫生理限制邏輯，使跨季節批次之全生育期積溫需求收斂於較穩定區間，以氣候最穩定的正冬數據(11筆)建立基礎模型，套用於非當季的早秋與晚春進行跨季驗證，有效降低各季節變異係數，表三修正GDD模式成功將早秋與晚春兩者的CV%縮小至7.0%與5.6%，顯示當作物發育存在明確的最適溫範圍與高溫抑制現象時，僅以線性熱時間

作為生育時鐘可能不足，必須考慮高溫所造成的有效熱量折減或發育停滯效應，方能合理描述田間實際發育行為。

二、高溫懲罰(Heat Penalty)之量化意義與生理連結

本研究進一步以Heat Penalty(標準GDD與修正GDD之差值)量化高溫條件下所產生的「無效熱累積」，使高溫逆境的影響由經驗性描述轉為可計算分析的指標。由分階段分析可知，Heat Penalty主要集中於生殖生長期(現蕾至採收)，顯示青花菜‘42號’在花球啟動與發育階段對高溫更為敏感。此現象與文獻指出高溫可能導致花序發育停滯或延遲之結果一致(Heather et al.,1992；Björkman & Pearson,1998)，亦呼應國內研究所述高溫逆境下生理壓力上升與同化作用效率下降的特性(陳等人，2013)。

由生殖生長期之平均氣溫與Heat Penalty回歸分析($y = 22.53x - 401.28$)可知，當回歸線 $y = 0$ 時，其對應之氣溫約為 17.81°C ，表示當生殖期均溫接近或低於此推估溫度時，高溫造成的Heat Penalty趨近於零，顯示高溫抑制效應較不明顯。此數值與文獻所指出青花菜花球發育適溫範圍($15-18^{\circ}\text{C}$)呼應(陳等人，2013)，顯示本研究所設定之參數具備合理的生理基礎。另一方面，透過該回歸斜率可知，當生殖期均溫超過適溫範圍後，每上升 1°C ，作物全生育期將額外累積約22.53單位的無效積溫，合理解釋暖冬或早秋栽培中常見的現象：儘管熱量累積迅速，花球發育卻反而因高溫抑制而延後。

三、在地化參數應用

過去溫帶地區作物物候預測多採線性GDD架構，以設定 T_{base} 來描述發育進程；研究指出自花球啟動後起算之溫度積分，可有效描述青花菜花球生長並預測特定頭球大小之到達時間(Grevsen,1998)；而在亞熱帶地區因高溫抑制效應，模型容易出現跨季節失穩。本研究進一步在亞熱帶條件下將高溫抑制效應納入生殖生長期之修正架構。保留 $T_{\text{base}} = 5^{\circ}\text{C}$ (與既有青花菜研究一致)，進一步以分階段方式導入高溫限制：營養期以cut-off(上限 30°C)描述高溫下發育增益不再增加，生殖期以triangular penalty($T_{\text{opt}} = 22^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{\text{max}} = 30^{\circ}\text{C}$)描述超過最適溫後發育速率遞減甚至無效的情形，作為針對亞熱帶栽培環境的預測修正，將‘42號’的物候預測參數具體化，成為可操作的門檻值(營養期730修正GDD與採收期約1000修正GDD)，以利作為栽培排程與採收人力調度的決策依據。同時本研究提供了一個可移植的概念框架：當作物在特定

發育階段存在明確高溫抑制區間時，僅採線性熱時間可能產生系統性偏差，需以階段化與懲罰函數處理，才能反映生理真實發育。

四、研究限制、適用範圍與後續擴充方向

本研究以2021-2025年間35筆田間批次資料建立與驗證模型，並涵蓋試驗站與農戶慣行管理情境，結果顯示其在實務可接受範圍內具備預測能力。然而，本研究亦存在部分限制：首先，本模型聚焦於溫度因子，尚未納入可能影響發育與田間表現的其他逆境或管理變因(例如連續降雨造成的濕害壓力、病害風險、土壤水分狀態等)；其次，門檻值(如730修正GDD)係以具完整現蕾紀錄之適溫批次推導，雖具有穩定性與可操作性，但在不同品種或更極端氣候情境下是否需校正，仍有待擴充資料驗證。

分析結果顯示在晚春如3月上旬定植之「21-Late Spring-03」，修正模型產生了嚴重誤差，較實際延遲達32天。此為作物在不同發育階段面臨高溫的「生理歧異性」。修正GDD模型之生殖期設定 $T_{\max}=30^{\circ}\text{C}$ 發育將完全停滯，GDD積累為0。在早秋「花芽分化期」遇高溫氣候時符合；但當晚春於「採收末期」遭遇逾 30°C 高溫，此時植株已完成花芽分化，面臨高溫生理逆境，傾向於加速老化、花球鬆散甚至提早抽薹(Bolting)以完成生命週期，而非停滯生長(Farnham et al., 2011; 陳等人, 2013)。因此在實務應用上，建議修正模型之最佳適用定植期為「9月至翌年2月」；而3月後定植者，當模型於生殖生長期給出GDD連續為0的遞延訊號時，栽培管理決策應解讀為「將失去商品價值」之高風險預警，而非預測採收日。

為提升模型在極端氣候下的應用性，未來可評估加入事件型或階段型的附加懲罰項(例如以降雨或霪雨作為風險修正因子)，使模型由「單因子GDD」延伸為「多逆境物候預測」工具，進一步強化其在生產排程上的應用價值。

致 謝

本研究承蒙蔬菜研究室沈峻榮、許誌裕、農機研究室李東霖、劉志聰、李安心、茆聰銘及賴碧琴等同仁鼎力配合協助，方得以順利完成，謹此一併誌謝。

參考文獻

1. 沈峻榮、林煜恒、陳葦玲。2025。影響青花菜產量之環境及生育性狀關鍵因子分析。臺中區農業改良場研究彙報,168, 51-75

2. 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。
3. 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，78, 32-45。
4. 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，148, 47-60。
5. 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.
6. Baskerville, G. L., & Emin, P. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. Ecology, 50(3), 514-517.
7. Björkman, T., & Pearson, K. J.1998. High temperature arrest of inflorescence development in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.). Journal of Experimental Botany, 49, 101-106.
8. 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.
9. Dufault, R. J.1997. Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 122, 169-174.
10. Farnham, M. W., & Björkman, T.2011. Breeding Vegetables Adapted to High Temperatures: A Case Study with Broccoli. HortScience.
11. Grevsen, K.1998. Effects of temperature on head growth of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*): parameter estimates for a predictive model. J. Hort. Sci. Biotechnol.,73,235-244.
12. 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.
13. Tan, D. K. Y., Birch, C. J., Wearing, A. H., & Rickert, K. G.2000. Predicting broccoli development I. Development is predominantly determined by temperature rather than photoperiod. Scientia Horticulturae,84(3-4),227-243.
14. Yan, W., & Hunt, L. A. 1999. An Equation for Modelling the Temperature Response of Plants using only the Cardinal Temperatures. Ann. Bot., 84(5), 607-614.

附 錄

附表一：青花菜‘42號’35筆試驗批次之標準與修正積溫模式計算及預測誤差比較表

Appendix Table1. Full dataset of field observations and GDD model predictions.

Batch ID	Planting Date	Observed Floral Date	Actual Harvest Date	Actual Days	Actual Standard GDD	Actual Modified GDD	Predicted Days-Modified	Modified Error (Days)	Predicted Days-Standard	Standard Error (Days)
--- Early Autumn (Sep-Oct) ---										
21-EarlyAutumn-01	2021-09-16	2021-10-26	2021-11-18	63	1380.2	1125	55	-8	43	-20
21-EarlyAutumn-02	2021-09-16	2021-10-26	2021-11-18	63	1380.2	1125	55	-8	43	-20
21-EarlyAutumn-03	2021-09-30	2021-11-15	2021-12-07	68	1329	1221.1	53	-15	48	-20
21-EarlyAutumn-04	2021-09-30	2021-11-15	2021-12-07	68	1329	1221.1	53	-15	48	-20
21-EarlyAutumn-05	2021-10-14	2021-11-23	2021-12-15	62	1110.4	1096.8	56	-6	55	-7
21-EarlyAutumn-06	2021-10-14	2021-11-25	2021-12-15	62	1110.4	1096.8	56	-6	55	-7
21-EarlyAutumn-07	2021-10-28	2021-12-15	2021-12-27	60	987.1	987.1	62	2	62	2
21-EarlyAutumn-08	2021-10-28	2021-12-15	2021-12-27	60	987.1	987.1	62	2	62	2
22-EarlyAutumn-01	2022-10-07		2022-12-15	69	1340.2	1175.8	58	-11	49	-20
22-EarlyAutumn-02	2022-10-21		2022-12-30	70	1212	1163.3	55	-15	52	-18
23-EarlyAutumn-01	2023-10-06	2023-11-26	2023-12-04	59	1165.6	1106.7	52	-7	50	-9
--- Winter (Nov-Jan) ---										
21-Winter-01	2021-01-14	2021-03-10	2021-03-23	68	963.7	946.4	72	4	71	3
21-Winter-02	2021-01-29	2021-03-25	2021-04-06	67	1041.4	944.9	71	4	65	-2
21-Winter-03	2021-11-11	2021-12-30	2022-01-14	64	940	940	69	5	69	5
21-Winter-04	2021-11-11	2021-12-30	2022-01-14	64	940	940	69	5	69	5
21-Winter-05	2021-11-25	2022-01-16	2022-01-24	60	840.4	840.4	73	13	73	13
21-Winter-06	2021-11-25	2022-01-16	2022-01-26	62	870.8	870.8	73	11	73	11
22-Winter-01	2022-11-10		2023-01-19	70	1093.4	1084.2	63	-7	63	-7
22-Winter-02	2022-12-01		2023-02-10	71	939	939	77	6	75	4
22-Winter-03	2022-12-16		2023-03-01	75	953.4	943.6	80	5	79	4
23-Winter-01	2023-01-05		2023-03-17	71	951.5	951.5	75	4	74	3
23-Winter-02	2023-01-18		2023-03-27	68	946.6	896.4	75	7	72	4
23-Winter-03	2023-11-07	2023-12-29	2024-01-08	62	991.6	991.6	63	1	63	1
23-Winter-04	2023-12-07	2024-01-29	2024-02-12	67	923.6	920.2	73	6	73	6
24-Winter-01	2024-11-11		2025-02-05	86	1166.2	1166.2	72	-14	72	-14
24-Winter-02	2024-11-28	2025-02-05	2025-02-14	78	946.5	946.5	82	4	82	4
24-Winter-03	2024-11-29	2025-02-12	2025-02-21	84	1025.7	1025.7	82	-2	82	-2
24-Winter-04	2024-12-03	2025-02-12	2025-02-21	80	970.6	970.6	83	3	83	3
24-Winter-05	2024-12-05		2025-02-21	78	937.8	937.8	84	6	84	6
25-Winter-01	2025-01-02		2025-03-18	75	927.3	916.8	82	7	81	6
25-Winter-02	2025-01-13		2025-03-24	70	879.6	877.2	81	11	78	8
--- Late Spring (Feb-Mar) ---										
21-LateSpring-01	2021-02-09	2021-04-05	2021-04-15	65	1054.6	962.4	69	4	63	-2
21-LateSpring-02	2021-02-26	2021-04-25	2021-05-03	66	1169.3	1013.5	65	-1	58	-8
21-LateSpring-03	2021-03-12		2021-05-17	66	1279.6	929.8	98	32	55	-11
23-LateSpring-01	2023-02-04		2023-04-05	60	909.2	888.8	68	8	66	6

Establishment of a Modified Growing Degree Day Prediction Model for Broccoli in Taiwan's Subtropical Climate¹

Chia-Wei Chang^{2*}, Chin-Yuan Chang², Yu-Chen Hung²
and Wei-Ling Chen³

ABSTRACT

Climate change-induced high temperatures in subtropical Taiwan reduce the accuracy of conventional Growing Degree Day (GDD) models for predicting broccoli phenology. This study developed a Modified GDD model for the primary cultivar ‘No.42’ using 35 cultivation batches (2021-2025), incorporating stage-specific physiological constraints: a cut-off method (upper limit 30°C) for the vegetative stage and a triangular penalty function (optimum 22°C, maximum 30°C) for the reproductive stage. Compared with the standard model (Tbase = 5°C), which overestimates effective thermal accumulation under high-temperature conditions, the modified model more accurately reflects crop developmental responses by excluding ineffective heat accumulation. The vegetative-to-reproductive transition was identified at 730 modified GDD, while heat-induced developmental inhibition (“Heat Penalty”) averaged approximately 93 GDD in early autumn plantings, albeit with high variability. These results explain the systematic underestimation of harvest time by conventional GDD models under warm conditions. Accordingly, thresholds of 730 modified GDD for floral initiation and 1000 modified GDD for harvest are recommended to improve prediction accuracy and support production scheduling under increasingly unstable climatic conditions.

Key words: broccoli, Modified Growing Degree Days (GDD), heat stress, heat penalty, phenology prediction

¹ Contribution No.1122 from Taichung DARES, MOA.

² Assistant Researcher, Associate Researcher, Assistant Researcher and Assistant Researcher of Taichung DARES, MOA.

³ Researcher and Deputy Director of of Floral Industry Innovation Center, Ministry of Agriculture, COA.

*Corresponding Author: Chia-Wei Chang, Email: changcw@tcdares.gov.tw