

國立臺灣大學生物資源暨農學院農藝學系



碩士論文

Department of Agronomy

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

甜玉米生育期推估及栽培管理之網路決策支援系統

Web-based Decision Support System for Sweet Corn
Growth Stage Estimation and Production Plans Development

陳明陽

Ming-Yang Chen

指導教授：盧虎生博士

Advisor: Hsu-Sheng Lur, Ph.D.

中華民國112年7月

July, 2023

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

甜玉米生育期推估及栽培管理之
網路決策支援系統

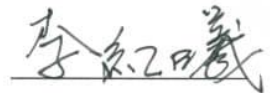
Web-based Decision Support System for Sweet
Corn Growth Stage Estimation and Production
Plans Development

本論文係陳明陽君 (R10621113) 在國立臺灣大學農藝學系
完成之碩士學位論文，於民國 112 年 7 月 25 日承下列考試
委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

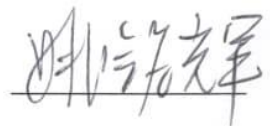
李紅曦 場長

行政院農業委員會臺中區農業改良場場長



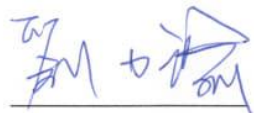
姚銘輝 博士

行政院農業委員會農業試驗所農業工程組研究員



劉力瑜 博士

國立臺灣大學農藝學系教授



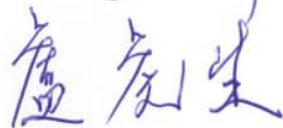
王淑珍 博士

國立臺灣大學農藝學系教授



盧虎生 博士

國立臺灣大學農藝學系教授(本論文指導教授)





誌謝

四冬前第一改對這間學校畢業，茫茫渺渺，想袂到兩冬了後我會閣踏入這個所在，雖然不管是求職抑是申請入學的過程，攏毋是足順序，但是我足有福氣的會當入來這個系所恰這間研究室。

讀研究所的這兩年，焦慮並沒有減少。但我做到了，先是在不抱持太大希望的心情下，考上了台中區地方特考，確定畢業後能有工作，並可以回到家鄉服務，這讓我和我的家人都如釋重負。

然後是如期地完成了我的論文，一個具有前後端的動態網站，網路甜玉米決策支援系統。我一個高中資訊課低空飛過的人，在這兩年間學了第一個程式設計語言，接著是第二個和第三個，最後自己建立資料庫，開發完整的網頁，儘管功能很簡單，但對我來說也是一個成就。

這段期間，我首先要謝謝我的指導教授盧虎生老師，儘管知道我有點反叛精神，在 meeting 時不時提醒我(?)，但當初還是收下了來自外系的我，在這兩年內，鼓勵我去修外系的課，資助我去上台大資訊系統訓練班的網頁實作課程。除外，讓我自由發展，讓我可以完成當初設定的目標。

謝謝實驗室同學姚箴和彥霖，帶我認識研究室，尤其是姚，無私地教我他認識的一切，十分令人敬佩，讓我能從他的基礎再往上一步延伸。謝謝生理組姊妹，一起度過碩一的種種必修課及碩士生涯。謝謝台大資訊系統訓練班，課程十分精實有內涵。謝謝口委們給予我論文修訂的建議，使我的論文更臻完善。

謝謝我的所有家人，阿媽、爸媽、兩個妹妹、姑姑和姑丈一家，在經濟與精神上的支持。

謝謝彩虹宿舍的室友們，子茗、又維、勝騰，在台北租屋還能夠有人可以互相照應。

謝謝凱傑，你是我這段期間最大的精神支柱，陪我度過了大學畢業，當兵，讀研究所的種種時光，在我忙論文忙國考的時候，也默默地打理了許多事情，真的由衷感謝。

如今我要畢業了，可能是近期的最後一次(不敢像四年前那樣把話說死)，但一切都是這麼的快速且真實，願將來的一切難關，都能像這幾年一樣，順順利利地度過。

中文摘要

智慧農業結合資通訊技術與實際資料的使用，有望提升農民在氣候變遷下的調適能力。甜玉米的適採期的預測相當關鍵，太晚採收會使品質降低。氣溫是影響作物生長最重要的氣象因子，而生育度日 (GDD) 是用來評估溫度對於作物生長反應的重要工具。近期 GDD 模式則逐漸重視高溫對於作物的影響，但仍缺乏對於個別作物品種的參數校正，在預測甜玉米的生育期的誤差過大。為此，本研究提出了一套窮舉演算法來最佳化作物參數，參數最佳化模式的表現相較傳統 GDD_{10,30} 算法，採收期預測日數與實際日數的 R² 自 0.69 – 0.79 提升到 0.93 – 0.96，RMSE 也從 5.56 至 8.60 天減少至 2.39 至 3.90 天。本研究並利用經最佳化的參數及 GDD 算法，發展出一套網路甜玉米決策支援系統，系統開發過程使用網路程式設計工具及開源氣象資料，設計出一套使用者友善的決策支援系統，可於手機及電腦上使用。其預測能力優於現行臺灣良好農業規範的生育日數法，及農試單位常用之 GDD_{10,30} 生育度日法，解決傳統生育度日模式無法精確預測甜玉米生育期的問題。此外，使用者亦可自訂參數，未來若搭配實際物候資料與參數最佳化演算法校正，有潛力套用在不同作物的物候預測上。在氣候變遷下，提供農民、企業、學術及農政單位一個快速評估作物在不同氣候條件下的生長反應的工具。

關鍵字：決策支援系統、甜玉米、生育度日、氣候變遷、物候學

英文摘要



Integration of information and communication technology (ICT) and real data in intelligence agriculture holds the potential to enhance farmers' adaptive capacity under climate change. Predicting the optimal harvesting period for sweet corn is crucial as late harvesting can result in reduced quality. Temperature is the most important weather factor influencing crop growth, and growing degree days (GDD) is an important tool for assessing the temperature response of crops. Recent GDD models have started considering the impact of high temperatures on crops but still lack parameter calibration for individual crop varieties, resulting in significant errors in predicting the growth stages of sweet corn. Therefore, this study proposes an exhaustive search method to optimize crop parameters, and the performance of the parameter optimization model is compared to the traditional $GDD_{10,30}$ algorithm. The R^2 value for predicting the harvesting period improved from 0.69-0.79 to 0.93-0.96, and the root mean square error (RMSE) decreased from 5.56-8.60 days to 2.39-3.90 days. Using the optimized parameters and GDD algorithm, a web-based decision support system for sweet corn was developed. The system utilizes web programming tools and open-source meteorological data to create a user-friendly decision support system that can be accessed through mobile phones and computers. The predictive capability of the system surpasses the current Taiwan Good Agricultural Practice's method for calculating growing days and the commonly used $GDD_{10,30}$ method employed by agricultural research units, addressing the issue of inaccurate prediction of sweet corn growth stages by traditional growing degree day models. Additionally, users can customize the parameters, and future applications may include the calibration of actual phenological data and parameter optimization algorithms for different crops' phenological predictions. In the face of climate change, this system provides farmers, businesses, academia, and

agricultural authorities with a tool to quickly assess crop growth responses under different climate conditions.



Keywords: Decision Support System, Sweet Corn, Growing Degree Days, Climate Change, Phenology

目錄

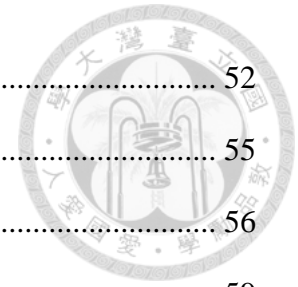


口試委員審定書	II
誌謝	III
中文摘要	IV
英文摘要	V
目錄	VII
圖目錄	X
表目錄	XI
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究問題與假說	2
1.3 研究流程與預期成果	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 臺灣甜玉米生產概況與挑戰	5
2.2 溫度與生育度日	6
2.3 改良版生育度日演算法	10
2.4 智慧農業簡介	12
2.5 農業決策支援系統簡介	14
2.6 以網路為本的農業決策支援系統	17
2.7 小結	20
第三章 研究方法	21
3.1 使用資料及演算法	21
3.1.1 氣象資料取得與處理	21
3.1.2 甜玉米各生育期栽培管理建議	22
3.1.3 以窮舉法最佳化作物參數	23



3.2	生育度日算法與生育期判斷	26
3.3	本系統架構與使用者介面設計	28
3.4	開發工具與系統建置	29
3.4.1	HTML/CSS/JavaScript/jQuery	29
3.4.2	Bootstrap	30
3.4.3	Highchart	30
3.4.4	PHP	30
3.4.5	Python	31
3.4.6	MySQL	31
3.5	網站部屬	31
第四章	結果	32
4.1	窮舉法校正後的作物參數	32
4.2	白美人的採收日期驗證	35
4.3	系統功能概述	36
4.4	生育期推估及栽培建議	39
4.5	自訂參數模式	41
第五章	討論	43
5.1	不同季節與年份的生育情形	43
5.1.1	2020 年夏秋季與冬春季的比較	43
5.1.2	2016 年、2019 年、2022 年春季的生育推估比較	44
5.1.3	GDD _{10,30} 線性模式與最佳化線性模式的比較	46
5.2	與類似系統的比較	47
5.2.1	祕魯的香蕉 GDD 系統	47
5.2.2	農業小幫手—積溫計算器	48
5.2.3	農業小幫手—作物生育期推估系統	50

5.2.4	U2U 玉米 GDD.....	52
5.3	系統的限制	55
5.4	系統的貢獻	56
第六章	結論與未來展望	59
第七章	參考文獻	60



圖目錄



圖 1 研究流程圖	4
圖 2 作物生長速率與溫度的關係。	9
圖 3 決策支援系統架構圖	14
圖 4 窮舉演算法流程圖	25
圖 5 本甜玉米系統架構圖	28
圖 6 白美人在不同 T_{base} 和 T_{opt} 參數組下的 CV 值	32
圖 7 電腦版系統首頁	37
圖 8 手機版系統首頁	38
圖 9 甜玉米生育期推估圖與栽培建議操作	40
圖 10 包含天氣預報及歷史平均展望的生育期推估圖	41
圖 11 自訂參數模式	42
圖 12 2020 夏季與冬季種植的白美人生育推估圖	44
圖 13 2016、2019 和 2022 年春植白美人的生育推估比較	45
圖 14 農業小幫手—積溫計算器	49
圖 15 農業小幫手—作物生育期推估	51
圖 16 U2U 玉米 GDD 決策支援工具的地點選擇頁面	53
圖 17 U2U 玉米 GDD 決策支援工具的 GDD 展望頁面	54

表目錄

表 1 農業決策支援系統整理表	16
表 2 作物網路決策支援系統整理表	19
表 3 甜玉米 TGAP 資料整理.....	23
表 4 白美人在不同 T_{base} 和 T_{opt} 參數組下的各生育時期目標 GDD。 ...	27
表 5 不同 GDD 模式對於食用玉米的種植至採收日數的預測表現。 ...	34
表 6 以 2021 年白美人的物候資料驗證五種模式。	35
表 7 作物 GDD 系統比較表	47





第一章 前言

1.1 研究動機

智慧農業的智慧是什麼？是我進到研究室後遇到的第一個問題。智慧的中文對應英文至少有三組近義詞，分別是 Smart、Intelligent 及 Wise，前兩者可以視為同義詞，較常用於智慧農業，後者較常用於人，故我暫且將「智慧」對應至英文的 Intelligent。

智慧 (Intelligence) 是個龐大的哲學問題，各個學說對於智慧的定義莫衷一是。Legg 及 Hutter (2007) 整理了來自字典、心理學家及人工智慧學者對於智慧的 70 個非正式的定義，並試圖歸納出一個定義，即：「智慧衡量行為者在各種環境中實現目標的能力。」然而，這樣的定義似乎不足以解釋智慧的所有內涵。

在本研究當中，我認為較有幫助的是 AllWords Dictionary (2006) 的定義：「智慧是一種能夠運用記憶、知識、經驗、理解力、推理、想像力和判斷力，以解決問題並適應新情境的能力。」

人類和計算機 (Computer) 的智慧常被拿來比較，因為兩者皆有一定的記憶力及推理能力。計算機的優勢是能夠儲存大量資料，並快速精準地檢索、計算與處理之，且不會受到身心的影響而失誤。而人類在處理不確定性、模糊性的能力更勝一籌，且具有創造力、想像力、直覺和情感判斷能力。兩者各具優勢與劣勢。

善用計算機可以大量計算且不會出錯的能力，將大量資料交給計算機處理，以幫助人類做出更好的決策和規劃，是現今人機協作 (Human Robot Collaboration) 的重點。我認為，智慧農業的智慧不只是機器的智慧，更是來自於人類的智慧，因為人類才是決定機器要如何使用資料的關鍵角色。

截至目前為止，在農業這種充滿不確定性的領域，我認為人類還是比計算機更能判斷哪些資訊是重要的。應用在智慧農業上，我們必須尋找哪些資料 (Data) 對



於農業是有助益的，並利用機器可以大量計算的特點，將這些資料轉化為對農民可用的資訊 (Information)。

而對於本篇研究，我必須在有限的資源與資料內，奠基於實驗室前人的研究，尋找一個改進現有甜玉米栽培決策的方法，並建立一個最小可行性產品 (Minimum Viable Product, MVP)，即本「網路甜玉米生育期推估及栽培決策支援系統」，下稱本系統或本決策支援系統。

1.2 研究問題與假說

甜玉米是臺灣重要的作物，然而目前農試單位提供的甜玉米栽培手冊多以生育日數作為栽培操作的參考。然而隨著時空的不同，生育日數常會無法正確呈現甜玉米的生長階段，因此實用性受到天候、季節與地域的限制。

由於氣象因子中的溫度是露天 (open-field) 農場最不可控的因素，也是影響作物生長最重要的因素。雨量也會影響甜玉米的生長，如乾旱與洪澇。乾旱逆境可以透過有效的耕地灌溉設施解決，儘管在極端缺水的狀況仍會無水可用。然而，如果每日雨量超過了 200 毫米，則可能會導致甜玉米的淹水逆境，甚至需要進行耕除。在這種情況下，只能採取強田間灌溉和排水措施來應對。本研究假設雲林種植甜玉米的耕地灌排設施皆為充足的，故將重點聚焦於氣溫對於甜玉米生長的影響，因為氣溫是較容易透過氣象預報其長期展望預測的氣象因子，也是田間最重要的氣象因素。

本篇研究的作物以超甜玉米白美人為例，輔以華珍、夏強甜玉米及黑寶糯玉米，目的是利用氣象局的氣溫資料，替雲林的農民及企業建置一個甜玉米生育期推估與栽培管理決策支援系統，相較傳統栽培管理作業曆的種植後日數不準的情形，預計能讓農民更精準預測各生育期，並提早安排各階段的栽培管理或是行銷事宜，增進決策品質。



1.3 研究流程與預期成果

本研究將問題聚焦於甜玉米在傳統栽培管理作業層的不足，與智慧農業可從中改進的方向。首先回顧臺灣的甜玉米產業概況，及傳統生育度日 (Growing Degree Days, GDD) 的發展與限制。續探討國內外智慧農業的定義與發展情形，最後將重點聚焦於智慧農業之中決策支援系統 (Decision Support System, DSS)，回顧其發展與現況。從文獻回顧之中，找尋目前臺灣可以利用的開源氣象資料，並使用網路程式設計工具開發出一套網路決策支援系統 (圖 1)。

本研究預期建立一個甜玉米栽培與生育期推估決策支援系統，系統核心奠基於姚(2023)所創之生育度日貪婪演算法推算之參數，開發過程使用網路程式設計工具及開源氣象資料，並部屬於網路上。

此系統能夠預測甜玉米在不同氣候下的生育階段。以解決農民判斷玉米的採收時期的問題，也有利於事前安排種植日期，以及提早安排後續的工作。此外，自訂參數模式可以讓農民自訂作物參數，有潛力應用在不同的甜玉米品種上，及不同作物上。

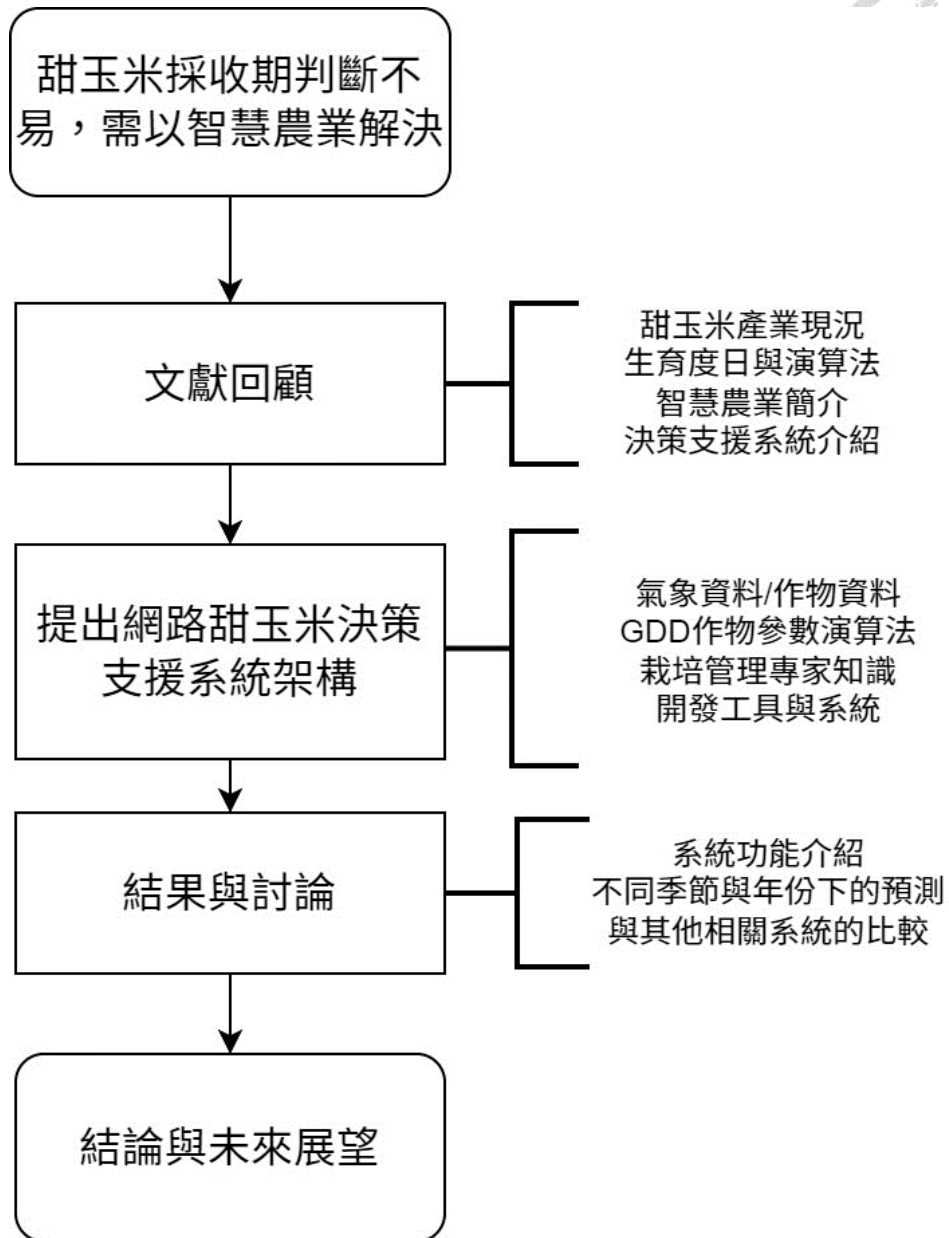


圖 1 研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 臺灣甜玉米生產概況與挑戰


根據行政院農業委員會的農業統計資料，食用玉米種植面積由 2011 年的 11467 公頃增長至 2021 年的 15450 公頃，增加了 35%。產量由 2011 年的 88135 公噸增長至 2021 年的 135165 公噸，增長了 53%。單位面積產量則由 7685 公斤/公頃增加至 8749 公斤/公頃。種植面積、產量及單位面積產量三者皆呈現增長的趨勢 (<https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/inquiry/InquireAdvance.aspx>)。

儘管農委會食用玉米產量統計除了甜玉米之外，還包含了糯玉米、白玉米及玉米筍等品項，但透過農產品批發市場交易行情站 (<https://amis.afa.gov.tw/veg/VegProdDayTransInfo.aspx>) 的資料可以得知，2022 年甜玉米的交易量為 22860 公噸，佔食用玉米總交易量的 55%，產值達 5.09 億元，顯示甜玉米在鮮食玉米市場上的重要性。

此外，農產品批發市場交易行情站更進一步將甜玉米細分為甜軟殼、甜硬殼及超甜白三種，2022 年佔最大宗的為甜軟殼（如夏強）的 46.3%，其次為超甜白（如白美人）及甜硬殼（如華珍）的 7.1% 及 1.1%。甜硬殼通常為熱帶型的甜玉米品種，外殼較硬、甜度較低、但較易栽植，甜軟殼及超甜白則多為自歐美引進的溫帶型品種，質地較軟、甜度較甜，且市場交易價格優於甜硬殼種。

2012 年時甜硬殼玉米即佔了鮮食玉米交易量的 45.2%，但在 2022 年時即被甜軟殼及超甜白的品種取代，顯示消費者轉而追求口感較佳的品種，或農民轉而追求種植價格較高的品種。

目前臺灣市售的甜玉米多為超甜玉米品種，其基因型為 *shrunken*, *sh2* 的隱性基因對(詹, 2019)，甜度較普通甜玉米 (*su1*) 高。儘管超甜玉米的採收適期較普通甜玉米長，然而超過採收適期後，穎果內的水分也將持續散失，導致經濟產量的下降，且可溶性糖含量會快速下降(Creech, 1965)，甜度亦隨之降低，影響食味品質。故於適當時間採收是甜玉米生產的重點。



目前判斷超甜玉米的採收適期的方法可分為 (1) 外觀型態法，在果穗苞葉呈現綠色，頂部花絲尚未枯萎，仍是深褐色時，並取下中段籽粒品嚐甜味，由農民的經驗判斷採收期(謝與戴, 2020)。(2) 水分含量法則是在甜玉米含水率約 75%-80% 時採收，然測定含水率為破壞性方法。(3) 生育日數法是則視品種及季節，可於種植後 70-100 天後可以採收，或由吐絲期後日數判斷。然此方法會受到季節及天氣的影響，造成誤差。(4) 生育度日法，又稱積溫法，為利用溫度推估生育期的方法，然而目前生育度日計算仍有不精準之處，應用在實際現場誤差仍有可以改進的空間。


除了溫度以外，雨量也是影響玉米的重要氣象因子。根據食用玉米防災栽培曆，日累積雨量 200mm 以上、種子浸水超過 24 小時、幼苗淹水 3 天以上 (依品種而定)，則可能造成出苗不齊、根系腐爛、葉片黃化捲縮、萎凋、植株矮化，每穗粒數減少及果穗生長速率下降。嚴重時更可能需要耕除。

甜玉米於臺灣一年四季皆可栽植，然而以秋冬季的產量為多，夏季的產量因為受高溫及病蟲害的影響而減少，且栽培至採收的日數會受到季節及天氣的影響，因此，如何穩定產量，周年生產，進行生產排程，是甜玉米產業需要考量的重點。

2.2 溫度與生育度日

植物的生育階段主要與溫度有關，而生育度日 (Growing Degree Days, GDD) 則可以用來評估溫度對於植物生長快慢的影響。

植物體內的酵素活性會受到溫度影響。高溫會使酵素變性，使其失去原有的三級結構，並失去活性；低溫則會導致酵素活性降低，因此，每種酵素都有一個最適合的溫度範圍。若將溫度對酵素的作用畫成曲線 (圖 2)，則會如山峰一般具有上升段及下降段，上升段由於分子的熱活化而增加反應速度，下降段的酵素則因為高溫而失活。在這兩段之間的山峰，可對應於最適溫度 (Optimal temperature, T_{opt})。因此，溫度對於酵素的作用是植物生長具有最適溫度的理論基礎，理論上，植物在最適溫度下，可以達到最大的生長效率。



植物生長發育與眾多酵素有關，尤以光合作用相關酵素最為重要。C3 和 C4 植物在光合作用的酵素之間有很大的差異。C4 植物透過 PEP 固碳，在低溫下，會因 Pyruvate, Phosphate Dikinase (PPDK) 活性降低而減少 PEP 生合成，進而限制光合作用速率(Edwards et al., 1985)。而 C3 植物用來固碳的 Rubisco 即使在低溫下也不受影響。

度日 (Degree Day，俗作積溫) 常用來量化溫度對於作物的影響，是一種熱-時間 (Thermal-Time) 單位。度日的概念最早來自 Réaumur (1735)，他觀察到在不同氣候中生長的小麥具有不同的「熱量累積」，因此具有不同的生長速率。

事實上度日可以分作三種，加熱度日 (Heating Degree Day)、冷卻度日 (Cooling Degree Day) 及生育度日 (Growing Degree Days, GDD)。前兩者分別用在建築物的暖氣與冷氣需求評估上，而後者則應用農業領域，如作物生育、蔬果採收期判定、病蟲害發生的情形等。以下所稱的度日皆指生育度日。

值得注意的是，在計算度日的時候，只有在給定門檻溫度 (Threshold Temperature) 之後，計算生育度日才有意義(Bonhomme, 2000)。這也意味著計算 GDD 的參數不是固定的，需要經過校正才能反映植物生長的情形。

如同第一段所述，由於作物大多會在一定以上的溫度才會生長，如 0°C 以上，且西方國家可能會使用華式溫標 ($0^{\circ}\text{C} = 32\text{ F}$)，即植物在使用華氏溫標下的生長門檻應遠大於零，因此需要引入基礎溫度 (Base Temperature, T_{base}) 的概念。

有時 T_{base} 又稱下限溫度 (Lower Threshold Temperature)，即在此溫度以下，作物的發育速率視為零。此後有許多研究試圖找出不同物種及品種間的 T_{base} ，而目前實務上則常把 T_{base} 定義為 10°C ，如甜玉米、玉米、高粱、水稻，但仍需依作物而決定最適合的 T_{base} 。

作物對溫度的生長反應其實不是線性增長的，實際上作物在接近 T_{base} 的溫度下是指數成長的，只有一小段適用線性增長，但在達到 T_{opt} 之前的總體線段其實是可以視為線性增長的 (如圖 2 的 AB 線段)。

故目前常使用的生育度日模式，常使用一種分段式的線性模式 (Piecewise Linear Regression Model)，如 (1)和 (2)的算法，即總生育度日 (GDD) 是由生育期間 n 天內的 GDD_i 加總而成的 (1)，而 GDD_i 是每日的生育度日，是將每日的平均溫度 (T_{mean}) 減去基礎溫度 (T_{base}) 而成的。若 T_{mean} 小於 T_{base} 則視為 0，若 T_{mean} 大於 T_{opt} 則視為 T_{opt} 減去 T_{base} (2)。

$$GDD = \sum_{i=1}^n GDD_i \quad (1)$$

$$GDD_i = \begin{cases} 0, & T_{mean} \leq T_{base} \\ T_{mean} - T_{base}, & T_{base} < T_{mean} \leq T_{opt} \\ T_{opt} - T_{base}, & T_{opt} < T_{mean} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{mean} = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (3)$$

GDD 的計算方式有相當多種。在上述的算法中，是將每日的溫度視為一樣的 T_{mean} ，即將每日的最高溫 (T_{max}) 和最低溫 (T_{min}) 取平均，如式 (3)所示。在計算 GDD_i 上如同計算一個長方形的面積，而以往有許多學者使用三角形或是 \sin 函數來模擬日夜溫差變化，以精細計算每日的 GDD 面積，甚至是計算每小時的熱時間 (Hourly Thermal Time)。

既然作物生長有基礎溫度及最適溫度的概念，那麼也應該有上限溫度 (Upper Threshold Temperature, T_{up}) 的概念，即超過此溫度植物的生長速率為零，以忠實反應高溫對於作物生長減緩的影響，如圖 2 的 CD 線段，超過 D 點之後植物即不再生長。有了 A、B、C 和 D (T_{base} 、 T_{opt1} 、 T_{opt2} 和 T_{up}) 四個溫度的生育度日算法，即為梯形算法，又稱三段式線性函數 (Linear Three-Segmented Spline Function)(Piper et al., 1996)或是齒狀函數 (Dent-like function) (Soltani et al., 2006)。

與梯形概念相似的名詞有溫度三基點 (Cardinal Temperatures)，即假設生物的生長有三個重要的溫度臨界值，即基礎溫度、最適溫度和上限溫度三個溫度。



然而，實際上各個門檻溫度會隨著生物的生育階段而有所變化，在不同環境下也會有不同的值，不管是溫度三基點或是梯形算法皆如此，故門檻溫度可以視為一種理論值。

計算門檻溫度及 GDD 的溫度觀測時間間隔應該要短，且最好具有較大的溫度變異，以便於利用資料的變異來進行線性迴歸，因為門檻溫度和 GDD 的估計值都來自該迴歸的斜率(Trudgill et al., 2005)。若試驗田除了溫度以外的變異可視為同質的，且試驗期間內有良好的溫度變異，應可找到良好的門檻溫度，即作物參數，使計算 GDD 時更為精確。

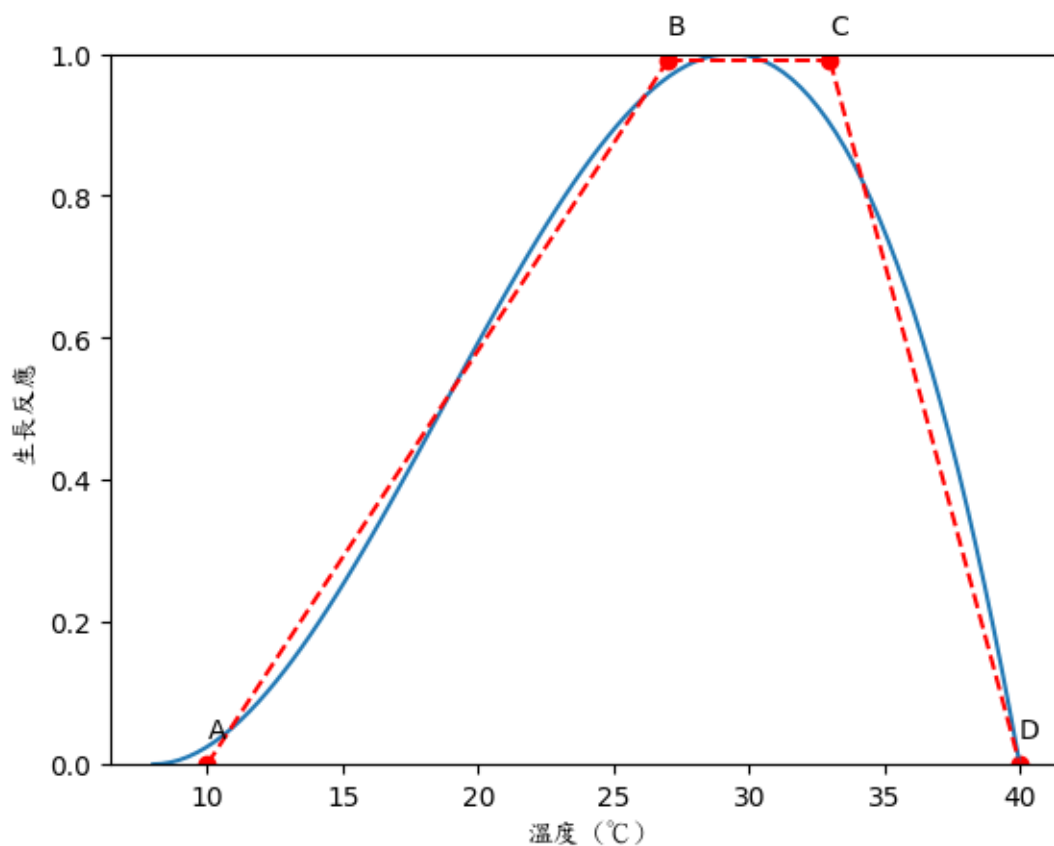


圖 2 作物生長速率與溫度的關係。

藍色實線的線段是使用 Beta 曲線來模擬作物生長在不同溫度下的反應，紅色虛線則是梯形方法，包含了本研究使用的最佳化線性算法(AB 和 BC)，上面具有 A、B、C 和 D 四個參數，分別對應 T_{base} 、 T_{opt1} 、 T_{opt2} 和 T_{up} 。將曲線視為 2 個以上的線性迴歸式組成的模式稱為分段式線性模式。



2.3 改良版生育度日演算法

早期西方的學術典範多忽略了高溫逆境對於植物生長的負面影響，某些生育階段模式只用圖 2 中的 AB 線段，假設溫度越高會讓植物的生長越快速，(Bonhomme, 2000)。

另一些模式加入了最適溫度 (T_{opt}) 的概念 (A 到 C)，考量到了高溫的影響，使當日溫度在高於 T_{opt} 之後，皆以 T_{opt} 計算。玉米最常使用的 T_{base} 和 T_{opt} 分別為 10°C 和 30°C (Gilmore Jr & Rogers, 1958; Cross & Zuber, 1972; McMaster & Wilhelm, 1997)，本研究將此種計算的 GDD 稱為 $GDD_{10,30}$ 。

值得注意的是，儘管使用的 T_{base} 和 T_{opt} 都是 10°C 和 30°C ，但計算的方式不同，皆會造成結果不同，因此任何 GDD 計算方式皆需說明清楚其計算方式。如 T_{mean} 的若以 T_{max} 和 T_{min} 平均計算，那 T_{max} 和 T_{min} 先與 T_{base} 和 T_{opt} 比較後再進行平均，或是先平均後再與 T_{base} 和 T_{opt} 比較，兩者的會有不同的結果，精準度也會不同，因此在計算 GDD 時，需說明清楚計算方式(Bonhomme, 2000)。

本實驗室的姚(2023)將線性模式 ($GDD_{10,30}$) 及氣象局均溫計算的 GDD，運用在雲林甜玉米的採收期預測上，結果發現預測值的天數變異很大，而後引入了梯形算法 (Piper et al., 1996) (5)，並最佳化參數，使 R 平方值從 0.77 提高到 0.92，預測值的標準差從 ± 7 天降低到 ± 2.7 天，優於 $GDD_{10,30}$ 模式。

取得作物生長模式的 T_{base} 常使用五種方法：分別是 (1) 生育度日的最小標準差 (Standard Deviation, SD-GDD)；(2) 生育日數的最小標準差 (SD-day)；(3) GDD 的變異係數 (Coefficient of Variation, CV-GDD)；(4) 迴歸係數 (Regression Coefficient)(Yang et al., 1995)以及 (5) RMSE 法(Ring et al., 1983)。

其中，預測效果最好的方法是 RMSE，最差的是 SD-GDD 方法，因為無法找到相對應的變異程度，找到 GDD 之間的最小標準差不代表預測天數與實際天數之間的差值為最小。而找到最小的 SD-day、CV-GDD 和迴歸係數法的預測效果相當 (Ruml et al., 2010)。

本篇與姚(2023)使用相同的最小 CV-GDD 方法，CV 常用於表示資料的相對變異程度或分散程度，算法為標準差 (σ) 除以平均數 (μ)，並以百分比 (單位：%) 呈現 (4)，比起上述 (1) 的 GDD 最小標準差或是變異數 (Variance)，其數值不會受到量測單位的影響，可用於比較具有不同單位或尺度的不同資料的變異性，在比較具有不同平均值的資料集時相當實用，故本研究使用 CV 值作為參數最佳化的判定標準。

例如，使用不同的溫度參數 (即不同的溫度門檻值) 計算出來的 GDD 就會具有不同的平均值與意義，很難在相同基礎下比較，而較低的變異係數則表示資料的分散程度較小，更具一致性，即具有接近的 GDD，而較高的變異係數則表示變異性較大，資料較不一致，可能會使 GDD 的範圍變大。因此，透過尋找最小的變異係數，可以找到較一致的 GDD 值。

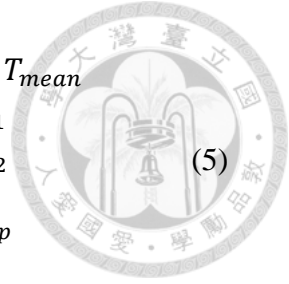
$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (4)$$

姚(2023)的梯形參數校正演算法使用了甜玉米 200 多筆田間的種植日期至採收適期的資料，使用貪婪法來找尋計算 GDD 最適合的參數組。

在給定由文獻找尋的初始的 4 個溫度值後，透過迭代 (Iteration) 法產生由初始四個參數產生鄰近不同組合的參數組，再計算各參數組的採收期 GDD 及其 CV，找到採收期 GDD 的 CV 最小的參數組，以最佳化 T_{base} 、 T_{opt1} 、 T_{opt2} 和 T_{up} 。

梯形法計算 GDD_i 的方式如(5)所示，其中 T_{mean} 為當日的平均溫度，使用氣象局提供的溫度 (Temperature) 欄位的資料， T_{base} 、 T_{opt1} 、 T_{opt2} 和 T_{up} 為計算 GDD_i 的 4 個參數，以白美人的參數為例，分別為 10、24、33 及 37 ($^{\circ}C$)。甜玉米四個生育階段的 GDD，幼苗期 (V3, Third Collared Leaf)、輪生期 (Whorl Stage, V8)、開花期 (Tasseling, VT) 及採收適期 (R3-R4) 的 GDD，分別是 198、409、595 和 878 ($^{\circ}Cd$) (姚, 2023)。

$$GDD_i = \begin{cases} 0, & T_{mean} < T_{base}, T_{up} < T_{mean} \\ T_{mean} - T_{base}, & T_{base} < T_{mean} < T_{opt1} \\ T_{opt1} - T_{base}, & T_{opt1} < T_{mean} < T_{opt2} \\ (T_{opt1} - T_{base}) \times \frac{T_{up} - T_{mean}}{T_{up} - T_{opt2}}, & T_{opt2} < T_{mean} < T_{up} \end{cases} \quad (5)$$



事實上，目前提供高溫對生育期造成的負面影響評估，有使用下降段的模式有三角形、Beta 函數(Zhou & Wang, 2018)及本篇使用的梯形模式。梯形模式需要 4 個參數少，且四個參數分別對應到作物生長的基礎溫度、最適溫度範圍及上限溫度，為具有生物學意義的參數 (Biological Meaningful Parameters)，可以提供農政單位宣導的參考。


隨著全球氣候變遷，高溫日益頻繁，以及熱帶、亞熱帶農業發展的智慧化，我們越來越需考量高溫對於作物的影響。與其他生育模式相比，有考量高於最適溫度的 (Supra-Optimal) 模式更能評估玉米對於超過 T_{opt} 的發育反應(Kumudini et al., 2014)。因此，在生育度日模式上加入高溫的影響也是必然的趨勢。

2.4 智慧農業簡介

建立於全球工業 4.0，及第四次工業革命的發展，各地也發展出農業 4.0 的願景。臺灣的農委會於 2014 年起推動「智慧農業產銷行動增值應用服務計畫」，並推出「農務 e 把抓」網頁 (<https://agrepm.coa.gov.tw/>) 與手機版應用程式等，提供農民在電腦及行動裝置紀錄耕地位置及田間操作等，可說是臺灣智慧農業的開端。

智慧農業，政府對外的文宣有翻譯成 Smart Agriculture 或 Intelligent Agriculture 等，但與智慧農業相似的名詞有不少，比起智慧農業，國外的期刊也很常使用精準農業 (Precision Agriculture)、農業 4.0 (Agriculture 4.0)、數位農業 (Digital Agriculture) 等名詞(da Silveira et al., 2021)。

根據行政院農業委員會農業試驗所的智慧農業網站 (<https://www.intelligentagri.com.tw/>)，智慧農業定義為：「以現行產業生產模式為基



礎，因應消費市場需求進行產銷規劃，生產管理上輔以省工省力機械設備、輔具及感測元件的研發應用，並結合跨領域之資通訊技術 (ICT)、物聯網 (IoT)、大數據 (Big Data) 分析、區塊鏈 (Block Chain) 等前瞻技術導入，減輕農場作業負擔降低勞動力需求，提供農民更有效率的農場經營管理模式，生產符合消費者需求，安全、安心及可追溯的農產品。」而在這些技術當中，遙測器 (Remote Sensor) 是目前最常用的技術(Cisternas et al., 2020)。

時空變異性是推動智慧農業的動力，時空變異分別代表作物、土壤和環境因子隨時間的變化，及隨距離和深度不同的變化(Kent Shannon et al., 2018)。變異性會影響產量、植物生長及病蟲害等。而智慧農業使用的資通訊技術則可以幫助農民最佳化每塊耕地所應採用的決策或操作。

目前，有 69% 的智慧農業研究應用於露天 (Open-Air) 農場，剩餘的 31% 為溫室農業(Abbasi et al., 2022)，可見大部分的智慧農業研究仍聚焦於傳統的露天農場，而非可調控環境的溫室，然而露天農場較溫室需要面對更多氣候或環境的不確定性，故為智慧農業挑戰的重點。

對於智慧農業實際上應該包含什麼架構，Cisternas 等人(2020)發表的系統性回顧文章統合了 259 篇文獻，並指出沒有文獻有發展出智慧農業的施行框架 (Framework)。

此外，智慧農業的發展尚在起步中，大多數的應用案例也都還處於原型 (Prototype) 階段(Abbasi et al., 2022)。儘管這些回顧文章可能無法涵蓋所有關鍵字，甚至智慧農業的相關關鍵字都還處於百家爭鳴，未有單一定義的狀態，故一切都顯示至智慧農業還有很多需要發展的地方。

隨著科技進入資通訊時代，農業對於精準操作的要求也日益增加，如何結合專家知識、作物生理、土壤與氣象資料，幫助農民決策是現代的農業社群需要面對的課題。而智慧農業有助於整合各領域的思考，以及結合機器算力的優點，提高農業生產效率，降低生產成本，有助於達成永續農業的目標。



2.5 農業決策支援系統簡介

人機互動常使用決策支援系統 (Decision Support System, DSS)。決策支援系統應用在農業上，透過計算氣象資料、物種資料、土壤資料及專家知識等，經由核心的計算與產出，便可以輔助農民或企業進行決策。

決策支援系統是一種資訊科技工具，通常建立於資料庫、模式 (Model)、演算法和圖形化使用者介面 (Graphical User Interface) 上 (圖 3)，能夠提取、組織和分析大量資料。DSS 可提供各種分析工具和技術，例如統計分析、模擬、優化和視覺化等，以幫助使用者分析複雜問題，提供決策者有用資訊和洞見。DSS 和使用者之間為共生關係 (Symbiosis)，透過使用者和電腦之間的互動，產生了比彼此獨立運作時大的效益(Nelson Ford, 1985)。

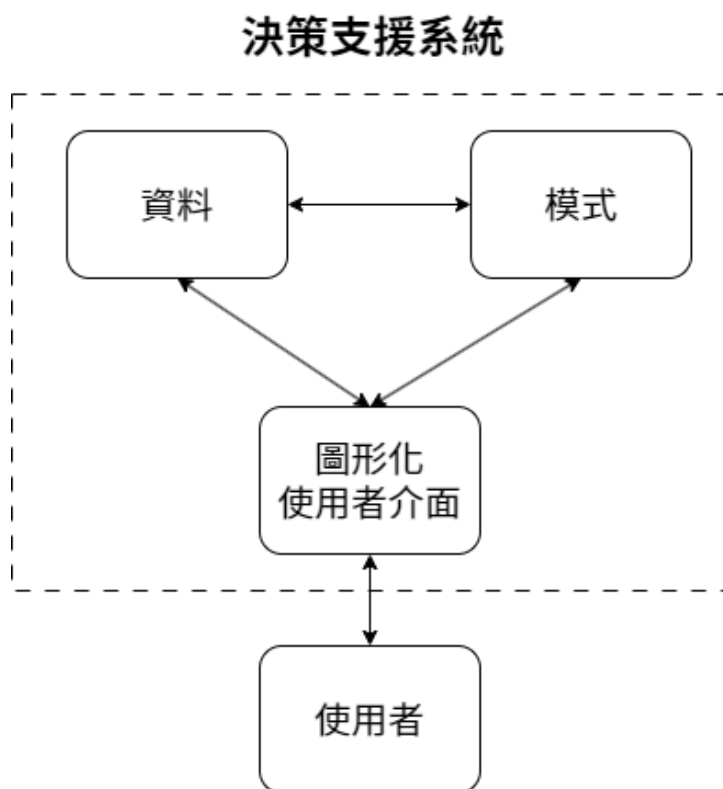



圖 3 決策支援系統架構圖

決策支援系統和專家系統的目標都是為了提高決策品質。然而，二者的基本理念和目標卻不全然相同。DSS 的目標是透過提供與該決策相關且適用的資料與



模式，支援用戶做出決策，並供用戶根據需要使用。然而，ES 的目標是向使用者提供一個始終正確的結論或決策。但由於這是不可能的，故通常只要 ES 的表現水準接近或優於專家水準即可。因此，ES 為非專家使用者提供的結論或決策比用戶自己提供的更有可能是正確的(Nelson Ford, 1985)。

農業問題的複雜性促進了開發新的農業決策工具的需求與挑戰，在處理與環境相關的複雜問題時，不僅僅需要處理數值資料的問題，還必須包括專家經驗和廣泛公眾參與(Poch et al., 2004)，以解決一些模式或數值資料暫時無法處理的問題。

由於農業問題牽涉廣泛，專家經驗可能也無法涵蓋所有使用者遇到的狀況，故應用在農業，尤其是傳統農業的開放式農田中，農業專家系統仍無法取代農業決策支援系統 (Agricultural Decision Support System，ADSS)。

ADSS 為農民提供一系列決策建議，而不直接給農民指令或命令，因為最終的決策權仍歸於農民本身(Zhai et al., 2020)。

表 1 農業決策支援系統整理表

DSS 名稱	資料來源	模式	圖形化使用者介面
以知識為本的玉米作物控制專家系統(Mite-Baidal et al., 2017)	專家知識	傳統 if-then 規則推論	手機 APP
提高作物產量和肥料利用效率的模糊決策支持系統 (Prabakaran et al., 2018)	專家和生產者知識	模糊推論系統	未呈現
農業灌溉管理決策支持系統 (Navarro-Hellín et al., 2016)	氣象資料 土壤感測器 作物和土壤特性 專家知識	機器學習 (類神經網路) PLSR 線性迴歸 ANFIS 機器學習	未呈現
苜蓿灌溉實時模糊決策支持系統(M.Li et al., 2019)	耕地資料 氣象資料 作物和土壤特性 專家知識	苜蓿生長模型 土壤水分模型 模糊推論系統	網站



表 1 整理了一些農業決策支持系統，資料來源可能有些不同，但幾乎都需要來自專家的知識，以解決相對應的問題。每個系統對於專家知識的依賴程度不同，如 Prabakaran 等人 (2018) 的施肥系統只使用了專家知識作為資料，而 Navarro-Hellín 等人 (2016) 的灌溉決策支援系統使用氣象資料、土壤感測資料及土壤作物特性作為訓練資料，並使用灌溉專家所寫出的灌溉報告 (Irrigation Reports) 作為機器學習的訓練目標。

如同 Zhai (2020) 分析的，由於計算時間的限制和農業問題的複雜性，目前農業決策支援系統仍須仰賴領域專家的知識，以免提供不準確甚至是錯誤的建議。

2.6 以網路為本的農業決策支援系統

本文稱的網路為全球資訊網 (World Wide Web, Web)。網際網路 (Internet) 及全球資訊網兩者容易混淆，網際網路是由全球的計算機和網路設備互相連結而成的網路；全球資訊網則是一個基於網際網路的分散式超媒體系統 (Distributed Hypermedia System)，它使用 HTTP 協議通訊，透過超連結連接世界各地的資訊和資源。

網頁 (Web page) 是全球資訊網上最基本的單位，是由 HTML、CSS、JavaScript 等技術構建的網路文件，透過網路傳輸到客戶端後，可以在網頁瀏覽器上顯示出來。多個網頁可以透過超連結方式互相連接，形成一個完整的網站 (Website)。而這些網站又可以透過網址在全球資訊網上被使用者造訪。

網路的普遍性使得使用者可以在任何裝置上使用網頁，包括桌上型電腦、筆記型電腦、平板電腦和手機等，且不需要特定的硬體或軟體支援。網頁的資料可以即時更新，使用者不需要下載更新檔案或版本，即可享受最新的功能和資訊。此外，網頁提供互動性的功能，使用者可以透過表單、按鈕等元素和網頁互動，讓使用者更容易理解和操作網頁的內容。

以網路為本 (Web-based) 的決策支援系統使用網頁作為使用者介面和資料輸入輸出的手段，用戶可以透過瀏覽器等網路客戶端軟體，使用網頁表單等方式輸

入相關的決策參數和資料，系統再透過後臺的演算法、資料庫等技術，對這些輸入進行處理和分析，提供決策結果和建議。

表 2 列出了一些使用網頁作為決策支援系統介面的研究，有些用於作物生育期的預測(Angel et al., 2017; Belupu & Ipanaque, 2022)，有些用於作物的灌溉管理(H.Li et al., 2018; Simionesei et al., 2020)，但都有提供給農民直接互動的使用者介面。

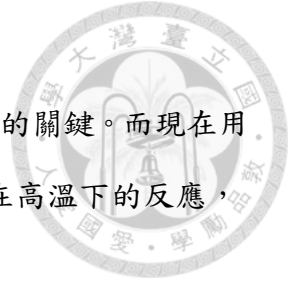
上述的系統中，目前在網路上仍存在的系統只剩下 U2U 的玉米 GDD 工具，可見系統的後續維護又為另外一個議題。

以網路為本的決策輔助系統有利於農民、企業、政府機構、學術研究機構等單位管理和分析大量的資料和資訊，並在決策過程中提供科學分析和建議，進而提升決策的精確和效率。

表 2 作物網路決策支援系統整理表

網路 DSS 名稱	資料來源	模式	使用者
香蕉氣象 DSS(Belupu & Ipanaque, 2022)	氣象資料、作物資料	生育度日模式	農民
WIDSSLI(H.Li et al., 2018)	氣象資料、作物、土壤 參數、最低灌溉需水量 等	FAO-56 dual crop coefficient approach	管理人員 農民
IrrigaSys(Simionesei et al., 2020)	氣象資料、作物、土壤 參數等	MOHID-Land model	管理人員 農民
U2U Corn GDD 工具 (Angel et al., 2017)	氣象資料、作物參數	生育度日模式	農民





2.7 小結

甜玉米是臺灣重要的雜糧或蔬菜作物，其採收期為影響品質的關鍵。而現在用於預測甜玉米生育階段的 $GDD_{10,30}$ 傳統線性方法無法反映作物在高溫下的反應，使其在高溫環境下的預測失準，並難以實際應用在田間。

因此本研究欲使用田間實際資料，來最佳化預測生育階段的作物參數，並使用具有生物對高溫的反應的分段式線性生育度日算法，來推估甜玉米的生育期。預期不管是線性加上最適溫度的模式 (式 (2), $GDD_{Tbase,Topt}$)，或是再加入下降段的梯形模式 (式(5)， $GDD_{Tbase,Topt1,Topt2,Tup}$)，透過參數最佳化，都可以得到比直接以 $GDD_{10,30}$ 等未經校正的文獻數值來計算生育度日及推估生育期還要精準的結果。

儘管智慧農業的尚未有單一明確的定義，但皆有透過資通訊技術來實施更精準的操作，以及透過人機協作達成更高的效益。農業決策支援系統便為一個智慧農業的實踐，比起專家系統，決策支援系統的定義更符合現行農業智慧輔助工具的宗旨，因農民才是最終的決策者，只是藉由計算機的算力來分析資料，以提供更進一步的洞察與判斷。網路的普遍性使得農業支援系統更易與使用者接觸，也有許多研究的決策支援系統部屬於網路上。

因此，本研究欲使用當前的網路開發工具與框架與開源氣象資料，並使用校正過的，能夠準確預測作物生育期的生育度日參數，開發出一個使用者友善的甜玉米網路決策支援系統，此網路系統可以在電腦及手機上使用，未來有機會亦可與中央氣象局及農委會的相關資料平台串接，應用在更多作物的生育期推估及作物栽培管理之上。

第三章 研究方法



3.1 使用資料及演算法

本系統計算生育期的作物模式主要使用氣象資料及作物參數。氣象資料使用中央氣象局的氣溫資料，處理方式詳見3.1.1節。作物參數衍生於鮮綠農業科技（股）公司的契作單，上面有不同品種的食用玉米自2019年至2021年的實際種植日期與採收日期。

本研究使用了三種代表性的甜玉米的資料，分別是白美人（超甜白）、夏強（甜軟殼）、華珍（甜硬殼），並加入一種糯玉米——黑寶進行對照，使用窮舉演算法（Exhaustive Algorithm）來估算最適合的作物參數（門檻溫度），並計算採收期目標GDD，以預估採收期，請詳見3.1.3小節。白美人部分，還加入了姚(2023)透過梯形貪婪最佳化演算法獲得之3個生育時期V3、V8和開花期的作物參數。

3.1.1 氣象資料取得與處理

本研究以雲林縣虎尾氣象站的資料為例，虎尾氣象站地址為虎尾鎮林森路一段64號（中正國民小學內），經度為東經120.4420度，緯度為北緯23.7192度，設立日期為1993年3月1日。此站於2015年5月27日至7月1日止進行儀器汰換，故該期間具有缺值。

氣象資料分為歷史觀測資料、七日氣象預報及長期氣象資料平均，因為氣象局並沒有提供歷史氣象觀測資料的應用程式介面（Application Programming Interface, API），故使用爬蟲將三種類型的資料整合進入同一個資料庫中，自己撰寫API，以下分就三項說明。

歷史觀測資料使用Python爬取中央氣象局觀測資料查詢（CWB Observation Date Inquire System, CODiS, <https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/>）中的氣象資料。觀測資料可查閱時間自西元1995年起。本研究爬取月報表中每日的氣溫（Temperature）、最高氣溫（T Max）及最低氣溫（T Min），並以日期和氣象站代碼作為主鍵（Primary Key），分別將上述資料存入ClearDB的climate資料表對應的欄



位。使用 Heroku 內建的排程計時器，於每日的中午 12 時更新資料，取代資料表中原有的七日氣象預報值。

七日氣象預報取自中央氣象局開放資料平臺之資料擷取 API (<https://opendata.cwb.gov.tw/api>)，選擇「臺灣各鄉鎮市區預報資料-臺灣各鄉鎮市區未來 1 週天氣預報」，下載雲林縣虎尾站的氣象資料。值得注意的是，1 週天氣預報分為白天及晚上的預報，時間間距分別為 06:00 - 18:00、18:00 - 隔日 06:00，即每日有二筆資料，但計算 GDD 只需要每日一筆資料，故將白天與晚上的預報值相加除以 2，得到該日的氣溫 (Temperature)、最高氣溫 (T Max) 及最低氣溫 (T Min) 平均值。分別將上述資料存入資料庫中對應的欄位。使用 Heroku 內建的排程計時器，於每日的中午 12 時更新資料，取代資料表中原有的長期氣象資料平均值。

考量資料的完整性，每日溫度的長期氣象資料平均，使用 20 年的氣象資料平均。每日最高氣溫及最低氣溫的長期氣象資料平均，自 2015 年 3 月起至 2020 年止，故實際上大約為 6 年的平均。

考量閏年的處理，計算方式將每日氣溫資料按照序數日期 (Ordinal Date, OD) 進行分組，即將每年的日期從 1 月 1 日開始編號為 1，然後依序增加到 12 月 31 日為 365，閏年則為 366。再計算每個 OD 的平均溫度，再將各 OD 的溫度填入各年分的資料表，作為未來的氣候資料展望。

3.1.2 甜玉米各生育期栽培管理建議

甜玉米栽培管理建議參考行政院農業委員會臺南區農業改良場編撰的甜玉米 TGAP，全名為：產銷履歷農產品生產過程臺灣良好農業規範 (TGAP)-雜糧特作類-甜玉米 (<https://www.afa.gov.tw/cht/index.php?act=download&ids=117587>)，使用文件當中的栽培管理作業曆，擷取各時期栽培操作重點，推薦該時期相對應的栽培管理措施 (表 3)。



表 3 甜玉米 TGAP 資料整理

生育日數	生育階段	主要栽培管理
0-5 日	播種前	基肥施用、整地、播種
5-15 日	萌芽及幼苗期	灌溉、病蟲害防治
20-45 日	輪生初期及輪生中期	間苗、灌溉、追肥、中耕除草、病蟲害防治
45-55 日	輪生後期	灌溉、病蟲害防治
55-65 日	吐絲期	灌溉、病蟲害防治
	授粉期	
65-70日	乳熟期	灌溉、病蟲害防治、採收
	糊熟期	

3.1.3 以窮舉法最佳化作物參數

筆者在以姚(2023)的貪婪演算法校正梯形 GDD 算法的 4 個參數 (T_{base} 、 T_{opt1} 、 T_{opt2} 及 T_{up}) 時，發覺此法會受到設定的初始值影響，而找到不同的參數。因為貪婪法的特性就是會找到附近的最佳解，即只要附近的參數計算出來的 CV 值沒有比目前的低，便不會再繼續尋找其他解，因此可能錯過全域的最佳解。

姚找到的四個參數分別為 10、24、33 及 37 ($^{\circ}C$)，但實際上可能因為起始參數的輸入不同，而找到不同的參數，例如 T_{base} 和 T_{opt1} 這前兩個參數，可能找到 [10, 24]、[8,25] 或 [7,26] 等不同的組合。

另外，若將 T_{opt2} 和 T_{up} 兩個溫度的起始參數值設定低於 $32^{\circ}C$ 時，如 $28^{\circ}C$ 及 $30^{\circ}C$ ，在經過數個迴圈的計算後，兩個參數就會變成 $32^{\circ}C$ ；若設定為 $32^{\circ}C$ 以上，該參數便不會改變，例如後兩個參數只要設定為 [33,40]，校正出來的結果就會是 [33,40]。

關於 T_{opt2} 和 T_{up} 兩個溫度，筆者認為是因為虎尾站的實際氣溫不會超過 32°C ，實際上在契作單上的生長季的最高溫是 31.9°C ，因此不管將 T_{opt2} 或 T_{up} 設定為 33°C 或 40°C ，只要設定為 32°C 以上，計算出來的 CV 值都會一樣（見圖 6）。故無法對於該區段的參數進行校正，也無法更進一步證實更高溫造成的生長速率降低的狀況存在，即實際上該區的甜玉米並沒有遇到梯形 GDD 算法中的生長速率下降段（即圖 2 中的 CD 線段），但理論上在更高溫的狀況下，玉米是有可能遇到高溫使生長速率下降的情形的。

既然梯形算法的前兩個參數 T_{base} 和 T_{opt1} 為 2 個與實際氣溫最接近，且最常使用的參數，故筆者提出了一個簡化版的參數校正演算法，即只校正 T_{base} 和 T_{opt1} 2 個臨界溫度，等同於有經過參數校正的線性計算方式 (2)，並使用窮舉法 (Exhaustive Algorithm) 來獲取最佳的參數，及取得使計算出來的 GDD 的 CV 值最低的方式 (Yang et al., 1995; Ruml et al., 2010)。

在此窮舉演算法中，先產出一個含有參數組集合的列表，列出所有可能的 T_{base} 和 T_{opt1} 2 個臨界溫度整數組合，在此研究中依照經驗將 T_{base} 的所有可能設定於 0°C - 14°C 之間的整數（低於 0°C 不合理）， T_{opt1} 設定介於 20°C - 34°C 之間（目前平均氣溫暫時沒有高於 32°C 的案例），共 225 種組合。

以白美人為例，白美人共有 215 筆種植至採收的實際日期，每組日期分別可以使用對應的參數組計算出含有 215 筆 GDD 值的列表，並計算此 GDD 列表的 CV，當中，會有一組 CV 最低的參數組，回傳該組使計算出來的 GDD 的 CV 最低的 T_{base} 和 T_{opt1} 組合（圖 4）。並使用此方法來計算白美人、夏強、華珍及黑寶等四種食用玉米的參數，及採收適期 GDD。

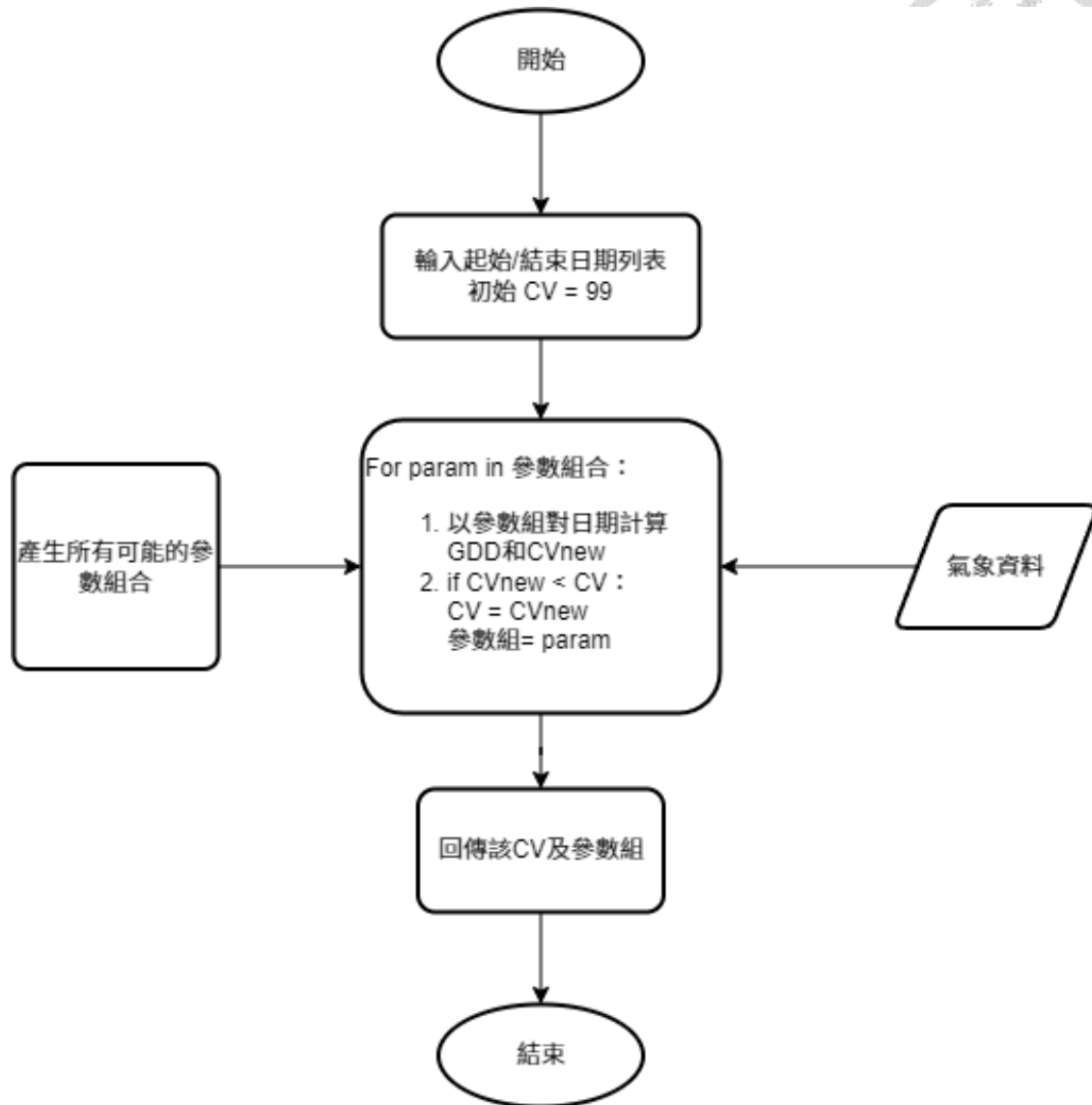


圖 4 窮舉演算法流程圖

此外，本系統亦加入未經最佳化校正參數的 $GDD_{10,30}$ 的現行算法，以供比較。氣象資料中的溫度亦使用了兩種計算方式，一種是日最高溫與日最低溫相加除以 2，如式 (3)，以及直接使用中央氣象局提供的當日溫度，結果請見 4.1，詳細參數請見表 4 和表 5。



3.2 生育度日算法與生育期判斷

本研究使用分段式的線性方法計算每日的生育度日，需要 T_{base} 、 T_{opt} 和目標 GDD 三個參數。 T_{base} 、 T_{opt} 除了最佳化的參數，還加入了傳統的 $GDD_{10,30}$ 算法，計算方式請參考公式 (1)和 (2)。使用的均溫有兩種，一種為氣象局提供的均溫，另一種為日最高溫與日最低溫的平均 (3)。

如此一來，每種玉米品種 GDD 會有四種計算方式，分別是：

- I. GDD 最佳化參數組 + 氣象局均溫 (t)
- II. $GDD_{10,30}$ + 氣象局均溫 (t)
- III. GDD 最佳化參數組+ 日最高最低溫平均 (式 3)
- IV. $GDD_{10,30}$ + 日最高最低溫平均 (式 3)

實際運作上，前端在判斷使用者選擇何種計算方式後，傳送給後端。後段透過 PHP 程式先宣告兩個陣列，第一個陣列存取日期，第二個陣列存取每日累加的 GDD。第一個陣列存取自種植期開始第 1 天至第 140 天的日期，接著遍歷資料庫中各日期的每日溫度，依照前端提供的算法計算 GDD_i ， GDD_i 的初始值為 0，每天計算一次並加總至前一天的值，存入第二個陣列，如此一來，第二個陣列為持續遞增的 GDD 陣列。

生育期及採收期判斷將甜玉米的生育期分為幼苗期、輪生期、開花期及採收適期，以白美人的算法 $GDD_{7,26}$ 為例，目標 GDD 分別為 264、545、797 和 1170 ($^{\circ}Cd$)，使用二分搜尋法 (Binary Search) 尋找第一個大於目標 GDD 的日期，並存下這 4 個階段的日期。

目前只有白美人有幼苗期、輪生期、開花期的生育期調查資料(姚, 2023)，因此參考白美人梯形算法的 $GDD_{10,24,33,37}$ 的四個生育期的目標 GDD，即 198、409、595 和 878 ($^{\circ}Cd$)，分別以各 GDD 算法的採收期目標 GDD 為準，對前三個生育期 GDD 進行線性內插，得到幼苗期、輪生期、開花期的目標 GDD。

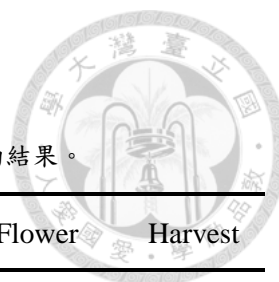


表 4 白美人在不同 T_{base} 和 T_{opt} 參數組下的各生育時期目標 GDD。

括號表示為以白美人梯形算法的 $GDD_{10,24,33,37}$ 的目標 GDD 進行線性內插法的結果。

品種	T_{mean}	$T_{base} (^{\circ}C)$	$T_{opt} (^{\circ}C)$	V3	Whorl	Flower	Harvest
白美人	t	7	26	(264)	(545)	(797)	1170
		10	30	(221)	(456)	(667)	979
	(3)	8	27	(262)	(542)	(793)	1164
		10	30	(239)	(493)	(721)	1058

其他食用玉米的品種參數目前只有採收期的目標 GDD，請見表 5。



3.3 本系統架構與使用者介面設計

本系統由四個部分組成 (圖 5)，分別是 (1) 更新歷史氣象資料與氣象預報資料的氣象資料模組、(2) 儲存氣象資料的結構化查詢語言 (Structured Query Language, SQL) 資料庫、(3) 計算 GDD 的作物生育模式，並產出繪圖資料的後端系統，以及 (4) 供使用者輸入種植日期、玉米品種等資料，並與資料互動的圖像化使用者介面。

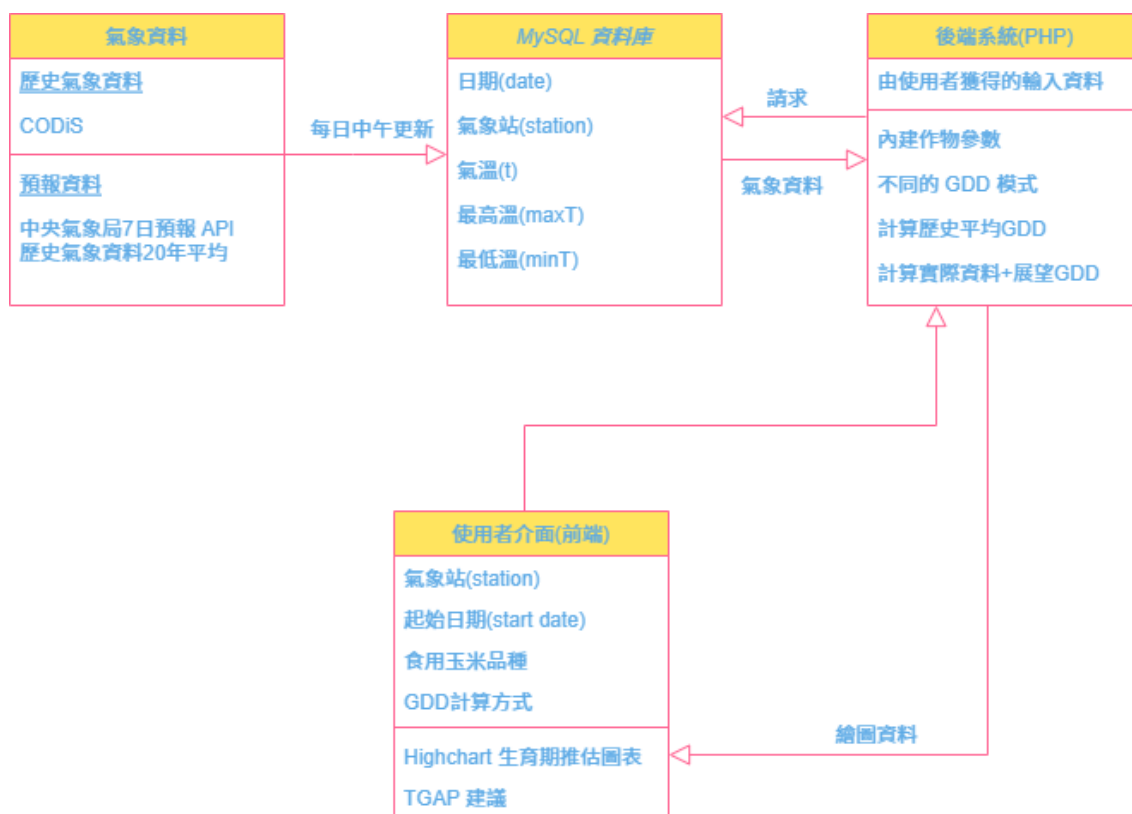


圖 5 本甜玉米系統架構圖

本系統由氣象資料更新模組、MySQL 資料庫、後端系統和使用者介面 (前端系統) 組成。

本系統的使用者介面設計套用 Shneiderman 等人(2016)的八個設計黃金準則，分別是：

1. 遵守一致性 (Strive for Consistency)
2. 尋求通用性 (Seek Universal Usability)
3. 提供有意義的回饋 (Offer Informative Feedback)



4. 為相連動作設計訊息 (Design Dialogs to Yield Closure)
5. 盡可能減少錯誤 (Prevent Errors)
6. 允許取消上個動作 (Permit Easy Reversal of Actions)
7. 讓使用者掌握控制權 (Support Internal Locus of Control)
8. 降低短期記憶負擔 (Reduce Short Term Memory Load)

以期開發出一個使用者友善的圖形介面。

下列的段落分別就本系統的各個部分及所使用的方法、工具詳細說明。

3.4 開發工具與系統建置

3.4.1 HTML/CSS/JavaScript/jQuery

HTML、CSS 與 JavaScript 為建構網頁的三大語言，HTML (Hypertext Markup Language, 超文本標示語言) 是用以呈現網頁結構的標準標記語言，為網頁的骨幹。CSS (Cascading Style Sheets, 階層式樣式表) 可以為 HTML 添加樣式，如不同字型、顏色、排版等，如同網頁的皮肉。而 JavaScript 則可以讓網頁與使用者產生互動，按鈕或輸入文字後產生相應的動作即為一例，如同網頁的神經系統。

而 jQuery 是 JavaScript 函式庫，具有許多簡潔的函數和方法，方便處理文件物件模型 (Document Object Model, DOM)、事件處理、動畫效果、AJAX 請求等常見的網頁操作。使開發者容易修改網頁的內容、樣式與屬性，處理點擊、滑動、鍵盤輸入等動作。

使用 jQuery 可以透過簡潔的語法來選擇和操作 HTML 元素，並對它們進行各種操作，例如修改內容、樣式、屬性等。它還提供了方便的事件處理方法，使開發者可以輕鬆地添加和處理事件，提高網頁的互動性。

本系統使用 HTML、CSS 與 JavaScript 三者作為使用者端 (前端) 的程式語言。而 jQuery 套件使開發過程更為簡潔容易。



3.4.2 Bootstrap

本系統使用 Bootstrap 5 前端開源框架 (<https://v5.bootcss.com/>), 建立使用者友善的圖形化介面。Bootstrap 可以建構響應式網頁設計 (Responsive Web Design, RWD), 使開發的網頁容易在不同大小的裝置縮放與調整佈局。且具有行動裝置優先的設計理念, 使網頁在小螢幕上的更容易使用及閱讀。

此外, Bootstrap 5 提供了一套現成的 CSS 樣式, 包括按鈕、表單、導覽列等, 使網頁的外觀整齊劃一, 並增加美感。

尤其是 Bootstrap 的網格系統 (Grid System), 採用水平的行 (Row) 和垂直的欄 (Column) 來排版網頁, 並設定大、中、小螢幕的斷點, 使同樣的區塊在不同大小的螢幕中佔據不同的欄寬, 使開發人員能夠使用同一套程式碼, 開發出在不同裝置上都具有和諧編排的版面配置。

3.4.3 Highchart

Highcharts 是一個用於網頁和行動裝置上呈現互動式圖表和地圖的 JavaScript 圖表庫。它可以用於製作各種各樣的圖表, 例如折線圖、柱狀圖、圓餅圖、散布圖等。Highcharts 可以根據使用者需求定義圖表的樣式和效果, 並具有互動性。此外, 它也支持動態更新圖表資料, 使得圖表能夠隨著資料的變化而即時更新。因為上述幾種優點, 本系統使用其免費版本作為繪製圖表的工具。

3.4.4 PHP

PHP 英文名為 Hypertext Preprocessor, 超文字前處理器。根據 w3techs.com 的資料顯示, 有 77.5% 的網站使用 PHP 作為伺服器端的程式語言 (w3techs.com, 2023)。因其易用性及相容性, 至今大多數的網站仍使用 PHP 做為伺服器端程式語言, 顯示其熱門程度。

本系統以 PHP 連結 MySQL 資料庫, 並將計算過後的結果傳給前端的 JavaScript 與 Highchart 套件繪製生育度日推估圖。



程式使用物件導向程式設計，將類似功能的程式碼放入同一個類別 (Class)，減少程式碼重複的次數。

3.4.5 Python

Python 是一種高階直譯式程式語言，其語法簡潔易讀，讓初學者能輕鬆上手且使用便捷。本系統使用其 requests 套件向網頁伺服器發送 HTTP 請求，獲取網頁內容。再將獲取的網頁內容傳遞給 BeautifulSoup 4 (bs4) 套件進行解析和處理，提取所需資料。再使用 pymysql 套件連接 MySQL 資料庫，將提取的資料存入 MySQL 資料庫中。

3.4.6 MySQL

MySQL 是一種開源的關聯式資料庫管理系統，由瑞典 MySQL AB 公司開發。是一種常見的資料庫管理系統，常用於網站應用程式的後端資料庫管理。本研究使用 Heroku 的 ClearDB 服務建立和管理 MySQL 資料庫。

3.5 網站部屬

本研究將網站部屬於 Heroku 雲端平臺 (<https://heroku.com>)。Heroku 是一種平臺式服務 (Platform as a Service, PaaS)，使開發人員可以在網際網路上建構、執行及管理應用程式。即涵蓋伺服器和作業系統，到所有網路、儲存空間、中介軟體、工具等，不必負責基礎設施的管理和維護。此外，Heroku 還提供了一些擴充和套件，如資料庫服務、快取、日誌等等。

本系統的實際網址為：<https://corn-dss.herokuapp.com/index.php>

第四章 結果



4.1 窮舉法校正後的作物參數

窮舉法會找到所有可能的參數組集合中，使對應 GDD 的 CV 值最小的參數組。經過窮舉法校正後，不同的食用玉米品種會具有不同的最適參數組，也代表著不同的品種特性。

利用氣象局的均溫，及不同 T_{base} 和 T_{opt} 的參數組對於 n 個自種植起至採收止的日期，可以計算出 n 個 GDD 值，並計算其對應的 CV，結果如圖 6 所示。以白美人為例，其 CV 值在 T_{base} 和 T_{opt} 分別為 7°C 和 26°C 時可以達到最低。

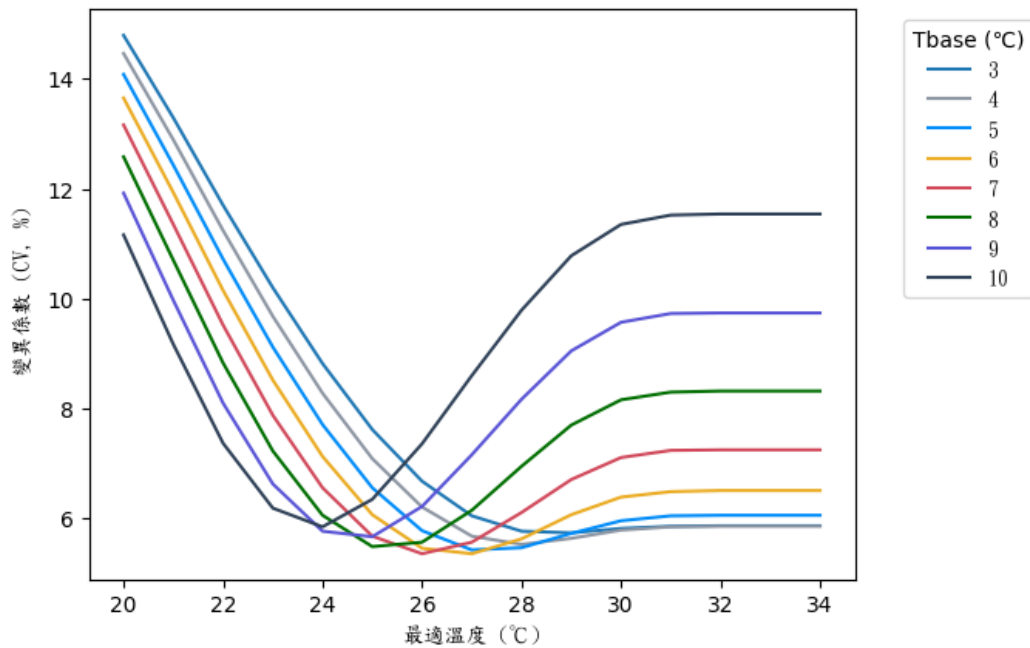


圖 6 白美人在不同 T_{base} 和 T_{opt} 參數組下的 CV 值

從圖 6 也可以見到，儘管參數組的設定為離散的整數，仍可見 T_{base} 、 T_{opt} 及 CV 形成了一個類似三維的立體空間，由不同參數組計算出的 CV 值有如一個具有山谷和高峰的形狀，CV 最小值的部分即為一個低谷，低谷部分對應的參數組即為適合的參數。

不同的 T_{base} 之下，即不同顏色的曲線之中皆有一個 CV 為最小的參數組 [T_{base} , T_{opt}]，即曲線的最低點，例如 [10, 24]、[9, 25]、[8, 25]、[7, 26]、[6, 27]、[5, 27] 等，

而[7, 26]只是當中的一組使 CV 最小參數，意味者在不同 T_{base} 下皆可找到一組適合的 T_{opt} 。隨著 T_{opt} 高於 32°C ，CV 也會趨於定值，推測是因為虎尾站的歷史高溫並未超過 32°C ，試驗期間的最高溫為 2020 年 7 月 14 日的 31.9°C ，若 T_{opt} 設為高於 32°C 等同於沒有加入 T_{opt} 的效果。

利用窮舉法算出的 T_{base} 和 T_{opt} 組合表現如表 5 所示，分別比較了校正前後的模式表現，以及校正過後的採收目標 GDD 值。相較傳統的 $\text{GDD}_{10,30}$ 比起來，不同品種經校正的 GDD 模式的預測天數與實際觀測天數的判定係數 (Coefficient of Determination, R^2) 自 0.69 – 0.79 之間提升到 0.93 – 0.96 之間，RMSE 也從 5.56 至 8.60 (天) 減少至 2.39 至 3.90 (天)。

比較四種方法的 R^2 和 RMSE 可見：(a) GDD 參數最佳化+氣象局均溫 = (c) GDD 參數最佳化+ 高低溫平均 > (d) $\text{GDD}_{10,30}$ + 高低溫平均 > (b) $\text{GDD}_{10,30}$ + 氣象局均溫。

不同參數組下的各生育期的目標 GDD 也如表 4 所示，其中只有白美人有 V3、輪生期和開花期的參數，其他品種只有採收期的參數。



表 5 不同 GDD 模式對於食用玉米的種植至採收日數的預測表現。

T_{mean} 算法的 t 為使用氣象局提供的每日平均溫度，(3) 為公式 (3) 的日最高溫與日最低溫平均。 T_{base} 和 T_{opt} 各自使用了最佳化的參數及慣行使用的 10/30 參數組。GDD 為該算法的平均 GDD、 SD_{GDD} 和 CV_{GDD} (%) 分別為 GDD 的標準差與 CV、 R^2 和 RMSE 分別為模式預測天數與實際觀測天數的判定係數及均方根誤差。N 為計算 GDD 的樣本數。

品種	T_{mean}	T_{base}	T_{opt}	GDD	SD_{GDD}	CV_{GDD}	R^2	RMSE	N
	°C	°C	°C	°Cd	°Cd	%	day		
白美人	t	7	26	1170	51.2	4.38	0.95	3.56	215
		10	24	882	44.1	5.00	0.94	3.90	
		10	30	979	108.2	11.05	0.69	8.60	
	(3)	8	27	1164	51.4	4.41	0.95	3.63	
		10	30	1058	89.7	8.58	0.78	7.22	
夏強	t	5	28	1362	46.0	3.38	0.95	2.39	94
		10	30	1013	82.6	8.15	0.75	5.56	
	(3)	6	29	1353	46.6	3.44	0.95	2.47	
		10	30	1069	68.5	6.41	0.85	4.40	
華珍	t	5	31	1623	62.8	3.87	0.93	3.24	42
		10	30	1207	71.1	5.89	0.79	5.65	
	(3)	7	32	1507	58.7	3.89	0.93	3.24	
		10	30	1257	58.9	4.69	0.88	4.23	
黑寶	t	4	31	1600	58.0	3.63	0.96	2.77	20
		10	30	1116	92.7	8.31	0.73	7.17	
	(3)	6	31	1479	53.8	3.63	0.96	2.74	
		10	30	1158	68.7	5.93	0.86	5.08	



4.2 白美人的採收日期驗證

驗證共使用 5 種模式，分別是使用氣象局均溫的最佳化線性模式 $GDD_{7,26}$ 、最佳化梯形模式 $GDD_{10,24, (33,37)}$ 和線性模式 $GDD_{10,30}$ ，以及使用最高溫與最低溫平均的最佳化線性模式 $GDD_{8,27}$ 和線性模式 $GDD_{10,30}$ ，並使用 2021 年契作單上的種植至採收期的白美人物候資料來驗證，發現經最佳化的使用氣象局均溫的 $GDD_{7,26}$ 、 $GDD_{10,24}$ 以及使用最高溫與最低溫平均的 $GDD_{8,27}$ 預測效果皆佳， R^2 值分別達到 0.97、0.95 及 0.97，RMSE 也分別只有 1.76、2.35 和 1.76，優於使用氣象局均溫或使用最高溫與最低溫平均的 $GDD_{10,30}$ 模式 (表 6)。

顯示經過校正後的線性模式，不管是使用氣象局的均溫，或是最高溫與最低溫的平均，皆可以準確預測作物的生育期。

表 6 以 2021 年白美人的物候資料驗證五種模式。

T_{mean} 算法的 t 為使用氣象局提供的每日平均溫度，(3) 為公式 (3) 的日最高溫與日最低溫平均。 T_{base} 和 T_{opt} 為基礎溫度和最適溫度。 R^2 和 RMSE 分別為模式預測天數與實際觀測天數的判定係數及均方根誤差。 N 為資料大小。

品種	T_{mean}	T_{base}	T_{opt}	R^2	RMSE	N
	°C	°C	°C		day	
白美人	t	7	26	0.97	1.76	23
		10	24	0.95	2.35	
		10	30	0.88	3.62	
	(3)	8	27	0.97	1.76	
		10	30	0.63	6.30	



4.3 系統功能概述

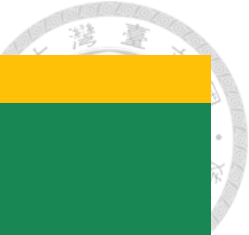
本決策支援系統採用一頁式網頁設計，讓使用者不用跳轉到不同的頁面，可以在單一的頁面上輸入資料及閱覽結果，使操作更為直覺。系統亦採用 Bootstrap5 開發響應式網頁程式，在不同的螢幕大小上會顯示不同的版面配置，不管在手機、平板或是電腦上都可以良好的操作與閱讀 (圖 7、圖 8)。

Bootstrap 的網格系統將螢幕分為 12 欄，同樣的元素不同的螢幕大小中，可以以佔據不同欄數呈現，故能讓開發者有效的調控不同裝置的排版。

以本系統的電腦版，即大螢幕為例，左半邊為資料輸入欄，占了 4 欄；右半邊為留給產出生育期推估結果的方塊，占了 8 欄。隨著進入小螢幕及手機版的頁面，輸入欄位和輸出欄位都會展滿整個螢幕的寬，即佔滿 12 欄，方便使用者在較小的螢幕上閱讀與操作。

資料輸入欄使用 Bootstrap 預設的表單樣式，提供使用者輸入文字、日期、下拉式選單等不同資料輸入，且避免使用者輸入不符合格式的資料。

透過 jQuery JavaScript 函式庫，執行 AJAX 請求，讓使用者不需要重新載入整個網頁，或跳轉至其他頁面，即可更新結果在結果輸出的區塊，供使用者閱覽生育推估的結果。



著時 -- 甜玉米決策支援系統

- 著時(Tiéh-sí)的作物於適宜環境中生長，最佳時刻採收，口感鮮美，品質卓越。
- 本系統使用實際氣溫資料及作物參數計算GDD，預測甜玉米開花及採收時間。
- 有利於農民事前規劃工作，提高產量和品質。

生育期推估模式

地號/負責人

種植日期

品種

選擇氣象站

生育度日計算方式

請輸入資料並按下按鈕，以繪製生長曲線圖

[系統說明](#)

[繪製生長曲線圖](#)

著時 -- 甜玉米決策支援系統 指導教授：盧虎生 梯形GDD算法/作物參數：姚箴 資料庫、API及網站介面設計：陳明陽	相關論文 林奇鴻的論文 姚箴的論文 陳明陽的論文	相關資源 農業小幫手--積溫計算器 農業小幫手--作物生育期推估 Link 3
---	--	---

台大農藝系 作物生理與品質研究室 版權所有 © 2023

圖 7 電腦版系統首頁



首頁



蒞時 -- 甜玉米決策支援系統

- 蒞時(Tiòh-si)的作物於適宜環境中生長·最佳時刻採收·口感鮮美·品質卓越。
- 本系統使用實際氣溫資料及作物參數計算GDD·預測甜玉米開花及採收時間。
- 有利於農民事前規劃工作·提高產量和品質。

生育期推估模式

地號/負責人

種植日期



品種

選擇氣象站

生育度日計算方式

[系統說明](#)

繪製生長曲線圖

圖 8 手機版系統首頁



4.4 生育期推估及栽培建議

使用者輸入地號/負責人、種植日期、品種、氣象站、GDD 計算方式等資料後，按下繪製生長曲線圖按鈕，即可產生生育期推估圖及建議操作表格 (圖 9)，最下方並設有下載結果的按鈕，供使用者下載資料。

地號/負責人的欄位會使生育期推估圖標題加上地號/負責人，方便使用者辨識。種植日期為使用氣象資料及推算各生育階段的重點，故設定為必填。品種有白美人、夏強、華珍及黑寶等作物參數可選，氣象站目前只有虎尾氣象站的資料。而 GDD 計算方式則有 (1) $GDD_{10,30}$ + 高低均溫 (常用方法)、(2) $GDD_{10,30}$ + 均溫、(3) 梯形最佳參數 + 均溫 (系統預設)、(4) 梯形自訂參數 + 均溫，4 種模式供使用者選擇。系統預設的計算方式為 (3) 梯形最佳參數+ 均溫 (系統預設)，較 (1) 和 (2) 的 $GDD_{10,30}$ 為準確。

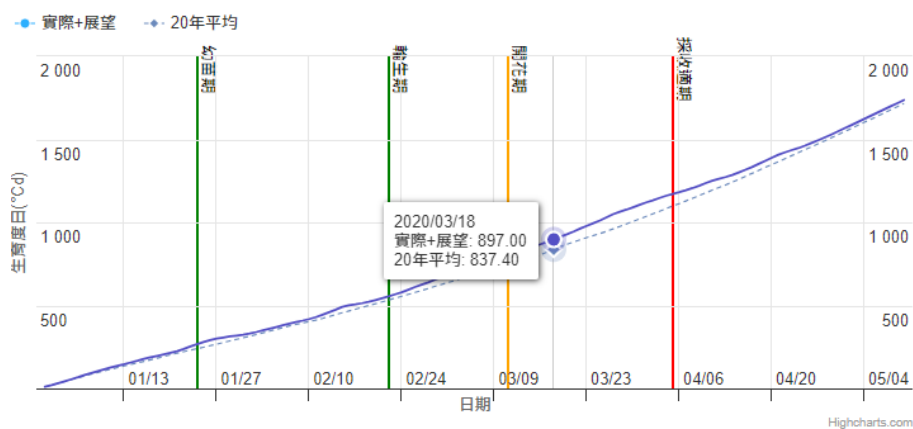
生育期推估圖本身為 Highchart 的互動式折線圖，使用者可以移動游標至資料點觀看每日的累積生育度日 (以實線表示)，並與 20 年平均的生育度日比較 (以虛線表示)，如圖 9 所示。

本系統將甜玉米自播種後的生育階段分為四個時期，分別是幼苗期、輪生期、開花期及採收適期，並分別在 GDD 達到對應的目標值時，回傳該預估到達日期，在互動圖表上面畫出四條垂直線，分別對應四個生育階段的到達日期。以 2020 年 1 月 1 日種植甜玉米的農民 A 為例，預估其種植的甜玉米會在 1 月 24 日到達幼苗期，2 月 22 日到達輪生期，3 月 11 日到達開花期，4 月 5 日可以採收。



農民A 白美人 生育期推估

氣象資料來源: 中央氣象局



生育階段	預估日期	生育日數	建議操作
播種	2020/01/01	0	基肥施用、整地、播種
幼苗期	2020/01/24	23	灌溉、病蟲害防治
輪生期	2020/02/22	52	間苗、灌溉、追肥、中耕除草、病蟲害防治
開花期	2020/03/11	70	灌溉、病蟲害防治
採收適期	2020/04/05	95	灌溉、病蟲害防治、採收

參考資料: [甜玉米TGAP](#)

下載結果

圖 9 甜玉米生育期推估圖與栽培建議操作

建議操作表格除了以文字列出生育階段的預估到達日期外，並另外計算從種植起到該生育時期的種植日數，方便使用者參考。由圖中可見 2020 年 1 月 1 日種植的甜玉米大約 95 天後可以採收。

栽培建議操作參考臺南區農業改良場編撰的甜玉米 TGAP 的栽培管理作業曆，擷取各時期栽培操作重點，推薦該時期相對應的栽培管理措施，播種前提醒農民需要整地及施用基肥，各時期皆須注意灌溉及病蟲害防治，輪生期需要中耕除草，詳細資料的超連結亦放在下方的參考資料中，供使用者直接點入連結閱覽完整的 TGAP 操作。

若為當年度的 GDD 具有三個不同顏色，分別是實際歷史觀測資料（紫色）、氣象局七日預報（淺綠）、以及 2001 年至 2020 年的每日氣溫平均計算出的長期氣

溫展望 (水藍色)，如圖 10 所示。由 6 月 1 日起的實際氣象資料的 GDD (實線) 與 20 年氣溫平均的 GDD (虛線) 為重合，是因為 2023 年 6 月過後的每日氣溫與歷史氣溫平均皆會高於 T_{opt} 的 26°C ，故使每日增加的 GDD 相同，兩條曲線重疊。

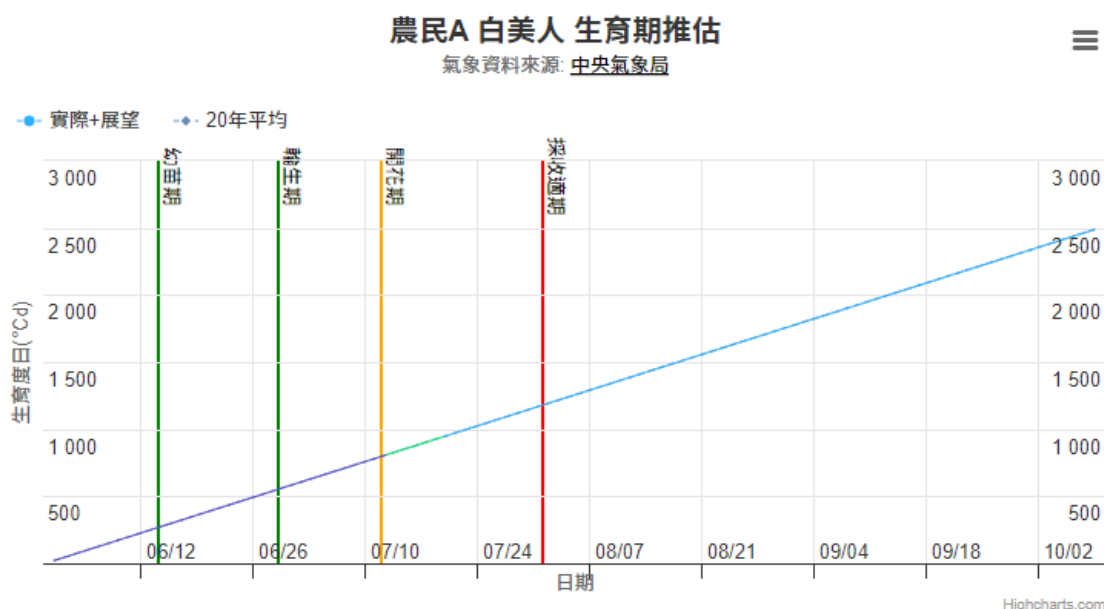


圖 10 包含天氣預報及歷史平均展望的生育期推估圖

GDD 曲線的三種顏色分別是實際歷史觀測資料 (紫色)、氣象局七日預報 (淺綠) 以及長期氣溫展望 (水藍色)，截圖日期為 2023 年 7 月 13 日。

4.5 自訂參數模式

自訂參數模式可以透過選擇生育度日計算方式的「梯形自訂參數 + 均溫」展開功能視窗，此模式可以供使用者輸入自訂的梯形算法的八個參數，分別是計算 GDD 的基礎溫度、最適溫度 1、最適溫度 2 及上限溫度。以及 4 個生育階段的目標 GDD，分別是萌芽期、輪生期、開花期及採收期，並使用氣象局的均溫來計算 GDD。

舉例來說，假設透過梯形貪婪演算法取得某甜玉米的 4 個溫度臨界值分別為 11、26、35 及 40°C ，萌芽期、輪生期、開花期及採收期的 GDD 分別為 200、

380、600 和 890 ($^{\circ}\text{Cd}$)，那使用者便可以輸入上述的參數，來預估甜玉米的生育階段與採收期。

透過設定不同的作物溫度參數，及不同的目標 GDD，可以使此系統應用在不同的甜玉米品種，以精準預測不同品種的差異，將來甚至有潛力應用在不同的作物上，如水稻、毛豆、短期葉菜類等。

生育期推估模式

地號/負責人

農民A

種植日期

2023/06/01

品種

白美人

選擇氣象站

虎尾

生育度日計算方式

梯形自訂參數 + 均溫

[系統說明](#)

請輸入自訂參數組

基礎溫度	最適溫1	最適溫2	上限溫度
11	26	35	40
萌芽期GDD	輪生期GDD	開花期GDD	採收期GDD
200	380	600	890

繪製生長曲線圖

圖 11 自訂參數模式

第五章 討論



5.1 不同季節與年份的生育情形

儘管臺灣的緯度跨越北緯 22 度至北緯 25 度之間，但氣溫變化仍會因地理位置而異，就算在同一個地點，也會受到不同季節及年份的影響。

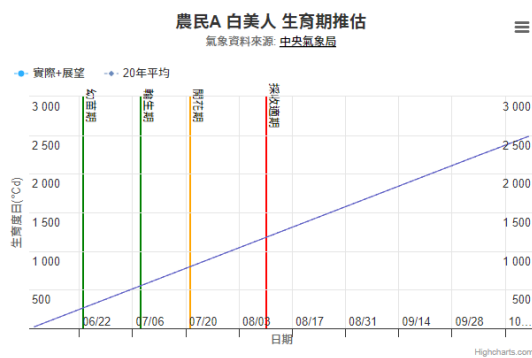
以雲林縣虎尾鎮的溫度來說，虎尾站 2001-2020 的每日平均溫度，最高溫出現在 7 月的 30°C，最低溫出現在 1 月的 16°C。而虎尾站的溫度如同臺灣其他的氣象站溫度一樣，近 20 年來的平均溫度大致都是穩定上升的，會使得作物生育期因為溫度升高而縮短。

然而，氣溫在同一個季節內的變化還算是相對穩定的，故還是可以透過長期的氣象觀測資料，來了解同一個季節的氣溫趨勢和變化，進而推估作物的生長情形。

5.1.1 2020 年夏秋季與冬春季的比較

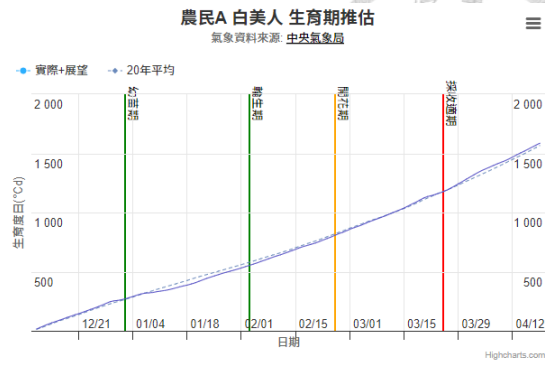
以本系統的 $GDD_{7,26}$ 算法來說，白美人需要 1170°Cd 的目標 GDD 才能採收。而虎尾於夏季的日均溫常高於最適溫度 26°C。

故西元 2020 年 6 月 10 日種植的白美人，需要的生育日數可用下列方式計算： $1170^{\circ}\text{Cd} / (26^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C}) - 1 \doteq 61$ 天。而在同年年底 12 月 10 日種植的白美人，若其生長季的平均溫度大約為 18°C，即需要 $1170^{\circ}\text{Cd} / (18^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C}) - 1 \doteq 105$ 天，才能採收 (圖 12)。



生育階段	預估日期	生育日數	建議操作
播種	2020/06/10	0	基肥施用、整地、播種
幼苗期	2020/06/23	13	灌溉、病蟲害防治
輪生期	2020/07/08	28	間苗、灌溉、追肥、中耕除草、病蟲害防治
開花期	2020/07/21	41	灌溉、病蟲害防治
採收適期	2020/08/10	61	灌溉、病蟲害防治、採收

參考資料：[甜玉米TGAP](#)



生育階段	預估日期	生育日數	建議操作
播種	2020/12/10	0	基肥施用、整地、播種
幼苗期	2021/01/02	23	灌溉、病蟲害防治
輪生期	2021/02/03	55	間苗、灌溉、追肥、中耕除草、病蟲害防治
開花期	2021/02/25	77	灌溉、病蟲害防治
採收適期	2021/03/25	105	灌溉、病蟲害防治、採收

參考資料：[甜玉米TGAP](#)

(a)

(b)

圖 12 2020 夏季與冬季種植的白美人生育推估圖

(a) 為 2020 年 6 月 10 日種植的甜玉米，預計 61 天後可以採收。(b) 為 2020 年 12 月 10 日種植的甜玉米，預計 105 天後可以採收。

夏秋季與冬春季的生育日數相差了 44 天，相當於一個半月。而這樣的時間差，便會影響許多農事操作的安排。若如 TGAP 將生育日數設為一個定值，會失去許多參考價值。

對照契作單上實際的種植日期，2020 年 6 月 14 日種植的甜玉米實際採收種植後日數為 60 天，2020 年 12 月 8 日種植的甜玉米實際採收種植後日數為 104 日，皆與預測值相近。

5.1.2 2016 年、2019 年、2022 年春季的生育推估比較

就算是同一個季節的氣溫變化，在不同年份仍可能受到氣候變遷、聖嬰現象或反聖嬰現象等因素的影響，而有所不同。以 2016 年、2019 年和 2022 年的 1 月 10 日的氣溫及生育階段推估為例，三個年份的生育情形便有很大的差異 (圖 13)。

比較三個年份的 GDD 與生育日數，同樣在 1 月 10 日栽種的白美人，以 2022



年為基準年，因其氣溫與生育階段 GDD 與 20 年平均值相近，種植後需要 96 天便可以採收。

2016 年春季氣溫則低於 20 年平均值，生育期間的 GDD 累積較慢，種植後需要 103 天才能採收，較往年平均值慢了一週。而 2019 年 1 月 10 日種植的白美人生育期氣溫則高於 20 年平均值，累積 GDD 較快，僅需 89 天就能採收，比往年平均值快了 7 天就能採收。

同樣是 1 月 10 日種植的白美人，2016 年和 2019 年的白美人的採收日期便相差了 14 天，這樣會嚴重影響農民或公司的出貨，以及種植期間的農事操作安排。若能提早預知栽培期間氣溫變化對甜玉米生長速率快慢的影響，將能使農民在工作上更能提前安排事項。

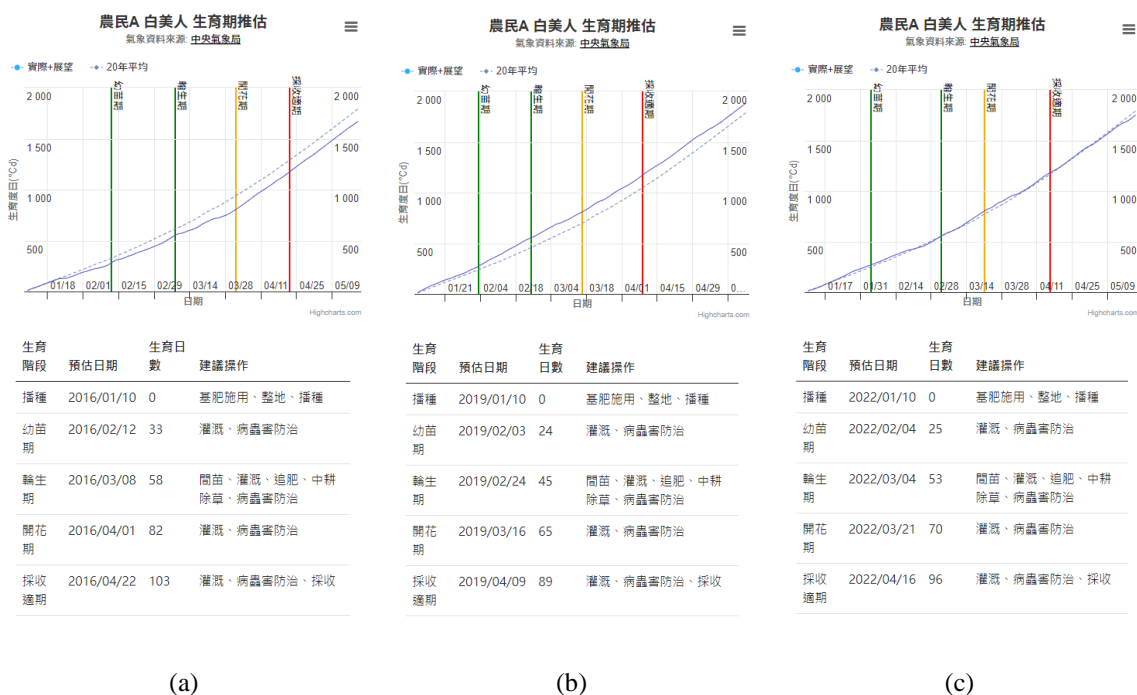


圖 13 2016、2019 和 2022 年春植白美人的生育推估比較

(a) 為 2016 年春天，氣溫較氣候平均值為低，生育期較歷年平均長；(b) 為 2019 年春天，氣溫較氣候平均值為高，生育期較歷年平均短 (c) 為 2022 年春天，氣溫與氣候平均值相當，生育期亦與歷年平均相似。



5.1.3 GDD_{10,30} 線性模式與最佳化線性模式的比較

在此段落中，將比較不同時期中，白美人的 GDD_{10,30} 線性模式與最佳化線性模式 (GDD_{7,26}) 的預測日數，並與實際契作單上面的種植與採收日期比較。

往常農業試驗單位提供的 GDD_{10,30} 模式，往往直接使用 10°C 的基礎溫度，而未經校正。這樣算出來的目標 GDD 常是有一個較大變異的 (表 5)，以農業試驗所的技術服務專刊為例，其提供的白美人採收期 GDD 的算法為吐絲期後 282°Cd -340°Cd (謝與戴, 2020)。GDD 並非為一個定值，代表著誤差範圍大，在應用上具有一定的挑戰性。

利用 GDD_{10,30} 算法預測 2020 年 3 月 15 日種植的白美人的四個生育時期的生育日數的預測值分別為 18、38、53、72 天，而 GDD_{7,26} 算法的結果為 17、36、51、71 天，兩者的結果為相似的。

在預測 2020 年 6 月 15 日種植的採收適期生育日數時，GDD_{10,30} 算法的結果為 53 天，GDD_{7,26} 算法的結果為 61 日，而對應契作單上白美人在夏季的採收期生育日數為 60 天，GDD_{10,30} 算法的採收日較實際值提早了 7 天，因其高估了高溫對於甜玉米生長速率的影響。

而在預測 2020 年 11 月 15 日種植的採收適期生育日數時，GDD_{10,30} 算法的結果為 109 天，GDD_{7,26} 算法的結果為 100 天，契作單上實際採收日期為隔年的 2 月 20 日，生育日數 98 天，本系統的 GDD_{7,26} 算法較為準確。而以 GDD_{10,30} 算法來說，至第 98 天 (2 月 20 日) 累積的 GDD 才 938°Cd，距離原先設定的 1058°Cd 還有一段距離。

筆者認為現行 GDD_{10,30} 模式的最適溫度未經統計計算，即設定為 30°C，應是造成 GDD_{10,30} 誤差極大的原因。GDD_{10,30} 算法在實際應用上具有相當大的不穩定性，在夏季的高溫下會高估 GDD_i，即高估高溫對玉米生長的助益，使計算出來的生育日數過短。反之，因為目標 GDD 為一個定值，使其估計冬季低溫下的生育日數過



長。而最佳化參數算法的估計值則顯較現行 GDD_{10,30} 算法更為穩定，更具應用價值。

5.2 與類似系統的比較

預測作物生育期的決策支援系統有 (1) 使用氣象站資訊的香蕉網路決策支援系統 (Belupu & Ipanaque, 2022)，以下簡稱香蕉 GDD；(2) U2U 決策支援工具—玉米 GDD (https://mygeohub.org/groups/u2u/purdue_gdd)(Angel et al., 2017)，以下簡稱玉米 GDD，和 (3) 農業氣象觀測網監測系統的農業小幫手—作物生育期推估 (https://agr.cwb.gov.tw/NAGR/agriculture_helper/crop_growth)。


表 7 作物 GDD 系統比較表

系統名稱	地點	作物	GDD 計算方式	目標 GDD 來源
本系統	臺灣	甜玉米	梯形/線性 (有最適溫度)	田間觀測值經參數最佳化演算法而來
香蕉 GDD	祕魯	香蕉	線性	文獻
作物生育期推估	臺灣	甜玉米 毛豆	線性	文獻
玉米 GDD	美國	玉米	線性 (有最適溫度)	種子袋的生育日數轉成 GDD

5.2.1 祕魯的香蕉 GDD 系統

Belupu 和 Ipanaque(2022)的網路香蕉決策支援系統，使用不同地點及來源的氣象資料，並轉換為香蕉的生長、開花和採收預測結果。該系統使用 Python 和 Node.js 等開源工具開發，DSS 透過氣象站的 APIs 或與 LoRaWAN 等物聯網新協議與不同氣象站交換資料，資料儲存在 MySQL 資料庫。透過此系統，農民將能透過氣象資料推估當前的葉片和果串生長速率。

此系統由祕魯皮烏拉大學 (Universidad de Piura) 自動控制與電子工程系發表



在電機電子工程師學會 (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) 的會議文章。其使用的 GDD 和 T_{base} 參數為參考舊時的文獻，可能無法適用於所有品種，也缺乏實際種植資料驗證；對未來採收日期的推估也僅使用平均每日的 GDD 來計算。然而，此系統有使用物聯網獲取氣象資料，也有陽春的使用者介面，不失為一個簡易的農業 DSS 示範。

5.2.2 農業小幫手—積溫計算器

氣象局的農業小幫手可以分為積溫計算器和作物生育期推估兩個子系統。

農業小幫手的兩系統的優勢為擁有所有氣象站的歷史資料和預報資料，可以讓全臺灣的使用者利用鄰近氣象站及該區的氣象預報進行 GDD 計算和生育期推估。

積溫計算器可以讓使用者自訂參數，具有相當的泛用性。積溫計算器可以自行定義 T_{base} ，和目標 GDD。GDD 計算方式也有 3 種模式可以選擇：

- i. $(T_{max} + T_{min}) / 2 - T_{base}$
- ii. $(T_{max} \text{ 上限 } 30 + T_{min} \text{ 下限 } 10) / 2 - T_{base}$
- iii. 均溫 - T_{base}

而本甜玉米決策支援系統使用的線性 GDD 計算方式與上述的 3 種方法不同，本系統是先將 T_{max} 和 T_{min} 平均後，獲得 T_{mean} ，計算時再設定下限為 10°C ，上限為 30°C 。若使用均溫 (T) 也是以相同的方式處理，如公式 (2)。

積溫計算器的好處是，若有某種作物的線性 GDD 參數，則可以直接使用積溫計算器預估各個目標 GDD 到達時期。積溫計算器因為沒有限定特定的作物，故沒有納進作物 GDD 系統比較表 (表 7)。使用時，也需注意上述不同的 GDD 計算方法所造成的推估差異。

積溫計算器的劣勢是無法跨年度計算，當年底無法達到目標 GDD 時，會顯示「目前尚無跨年度計算功能，所選當年度至 12/31 無法到達目標積溫」，這會使某



些可以跨年度栽培的作物或是裏作無法使用，使實用性受到影響，如本研究的甜玉米其實是重要的冬季作物之一。

此外，儘管其擁有氣象站的氣象資料，還是會出現大量缺值的狀況，如 2023 年 5 月 1 日起計算的 GDD，從 5 月 15 日至 6 月 8 日止 (截圖時間 2023 年 6 月 8 日) 具有缺值 20 多日的狀況，使當年度的預測值較歷年平均的推估晚了 20 多日 (圖 14)。

筆者建議往後氣象局可以使用缺值補遺方法來補氣溫缺值，方便各界人士利用氣象資料，例如陳等人 (2014) 所推薦的「克利金 (Kriging) 空間統計法再經過系統性的均誤修正後的修補法」，甚至直接以 15 年或 20 年等長期氣候平均值補遺，都會比不處理缺值來得好，畢竟在 GDD 的計算上，只要有幾天的缺值，便會有幾天的預測誤差，故有補值就會優於完全不處理缺值。



圖 14 農業小幫手—積溫計算器

可以讓使用者選擇氣象站以及鄉鎮預報，GDD 計算設定部分可以設定起始日期、當年度推估方式、基礎溫度及 GDD 計算方式及目標 GDD。截圖時間 2023 年 6 月 8 日。



5.2.3 農業小幫手—作物生育期推估系統

相較上述的積溫計算器，作物生育期推估系統雖然可以跨年度計算，但是無法選擇基礎溫度，也未寫出 GDD 的計算方式。

儘管有兩種作物可以選擇：分別是毛豆高雄 9 號和甜玉米華珍，但以系統並未說明 GDD 是如何計算的，以玉米來說，其引用的文獻設定的基礎溫度為 8°C 或 50°F ，而文獻中的 GDD 則為非線性計算方式(Kim et al., 2012)。

根據該系統對兩種作物生育階段的推估，參考的生育階段參數來自於文獻資料。以玉米華珍來說，使用的成熟 GDD 參數為 2600 $\text{GDD}_{50\text{F}}$ 或 1700 $\text{GDD}_{8\text{C}}$ ，這些參數是根據 Kim 等人(2012)的研究所提供。

需要注意的是，這些成熟階段參數是根據 Pioneer 公司所生產的玉米品種而來，且使用的玉米成熟階段應與鮮食甜玉米的成熟階段不同。一般玉米的成熟階段為 R6 (Physiological Maturity, Black Layer)，而甜玉米的適宜採收階段則為 R3-R4 (Milk - Dough) 之間，故筆者認為該文獻的參數不應直接套用於甜玉米華珍上，否則會無法預測實際值。



(a)

Step1: 選擇參考測站

雲林縣 | 虎尾鎮 | 虎尾站

站名: 虎尾站
 代碼: C0K330
 地址: 虎尾鎮林森路一段64號(中正國民小學內)
 海拔: 38公尺
 經緯度: 120.442036, 23.719183
 起訖時間: 1992-12-12 ~

Step2: 推估基本資訊設定

播種日期: 2023-03-01

推估模式: 玉米-華珍

當年度推估模式: 所選年度紀錄+未來45天預報+去年紀錄(玉米)
 生育期推估方式: 相關文獻請參考(玉米) 文獻1

完成設定, 開始計算

(b)

所選測站: 虎尾站 起始日期: 2023-03-01 推估模式: 玉米-華珍
 鄰近預報點-近期天氣資訊: 雲林縣-虎尾鎮-玉米 | 雲林縣-虎尾鎮-臺大華研校區 | 雲林縣-虎尾鎮-屏東路

生育期	日期	所選年度(2023)	所選年度(2022)
尚未出土	日期	03/01-03/11	03/01-03/10
	參考積溫	15°C-171°C	21°C-162°C
	距起始天數	0-10天	0-9天
幼苗期	日期	03/12-04/04	03/11-04/04
	參考積溫	190°C-646°C	191°C-649°C
	距起始天數	11-34天	10-34天
驗生期	日期	04/05-04/29	04/05-04/29
	參考積溫	671°C-1250°C	668°C-1257°C
	距起始天數	35-59天	35-59天
抽穗期	日期	04/30-05/05	04/30-05/07
	參考積溫	1299°C-1433°C	1304°C-1458°C
	距起始天數	60-65天	60-67天
開花吐絲期	日期	05/06-05/21	05/08-05/24
	參考積溫	1463°C-1863°C	1483°C-1876°C
	距起始天數	66-81天	68-84天
籽粒充實期	日期	05/22-06/01	05/25-06/05
	參考積溫	1895°C-2194°C	1904°C-2237°C
	距起始天數	82-92天	85-96天
採收適期	日期	06/02-06/05	06/06-06/09
	參考積溫	2225°C-2318°C	2266°C-2348°C
	距起始天數	93-96天	97-100天

圖 15 農業小幫手—作物生育期推估

(A) 選擇播種日期為 2023 年 3 月 1 日, 推估模式為玉米-華珍, (B) 為生育階段推估結果, 可以注意該系統的參考 GDD 的數值為浮動的非定值, 以及 GDD 的單位可能有誤值, 應為 °Cd。截圖時間 2023 年 6 月 8 日。

上述 GDD_{50F} 代表以基礎溫度 50°F (10°C) 計算的 GDD 需要 2600°Fd，簡單除以 1.8 換算成以基礎溫度 10°C 的 GDD，則大約為 1444°Cd。而 GDD_{8c} 代表以基礎溫度 8°C 計算的 GDD 需要 1700°Cd。

實際操作該系統的目標 GDD 似乎為一浮動值，介於 2200°Cd 至 2500°Cd 之間，可能是計算方式有誤，但因為系統也未說明目標 GDD，故無法證實 (圖 15，截圖時間 2023 年 6 月 8 日)。

根據本實驗室的田間調查，華珍以 GDD_{10,30} 和最高最低溫平均計算的採收期 GDD，大約為 1250°Cd(林, 2019)，根據本研究由鮮綠契作單計算的 GDD_{10,30} 的採收期 GDD 為 1257°Cd，兩者資料相符，由此可推斷，該系統使用的參數並不適用於甜玉米華珍。

以華珍來說，華珍可以周年栽培，根據本研究使用的契作單，在七月種植夏作大約 65 天左右即可採收，而在「作物生育期推估系統」的推估下則需近 76-79 日，將近了兩週的誤差。而此系統推估冬季(12 月初種植)的時間需 140 天，則較實際值(120 天)晚了約 3 週的時間，可以說是相當不準。

缺乏實際資料校正的決策支援系統，可能會讓使用者做出錯誤的決策，因此不可不慎。因此，鑒於該系統的參考資料、使用之參數及 GDD 計算方法的限制，使用該系統時應審慎評估其正確性與準確性。

5.2.4 U2U 玉米 GDD

U2U (Useful to Usable) 計畫是由美國農業部 (USDA) 農業與食品研究計畫 (AFRI) 補助，暫譯為「從實用到易用」的研究計畫，宗旨為跨領域整合研究，結合了氣象學家、農學家、電腦科學家、社會科學家、及傳播推廣領域的科學和知識，建立了數個網路決策支援工具 (<https://hprcc.unl.edu/agroclimate/>)。

U2U 玉米 GDD 計畫提供農民和決策者面對氣候變遷的實用資訊，幫助農民在多變的氣候下做出更明智的決策(Angel et al., 2017)。U2U 的氣象資料使用網格氣

象資料，而非氣象站資料，避免了缺值問題。其入口頁面使用地圖輸入，資料涵蓋範圍跨越整個玉米帶（圖 16）（https://mygeohub.org/groups/u2u/purdue_gdd）。



圖 16 U2U 玉米 GDD 決策支援工具的地點選擇頁面

範圍涵蓋了美國生產的玉米帶。截圖時間 2023 年 6 月 8 日。

使用的作物 GDD 參數透過種子袋上面的種植日數 (Comparative Relative Maturity rating, CRM) 而欄，使用線性公式轉換成的吐絲期 GDD ($R^2 = 0.88$) 和成熟期 GDD ($R^2 = 0.94$)。讓農民可以透過輸入種子袋上的種植日數，預測吐絲期及何時可以收穫（圖 17）。

其使用實時的網格氣象資料，30 天氣象預報，以及 30 年的歷史氣象平均來展望 30 天後到年底的 GDD 發展。也提供了歷年 GDD 的最大值和最小值。並提供歷年成熟期的最早日期與最晚日期。

除此之外，因為美國的玉米帶的早春和深秋可能會遇到霜凍害，對作物造成傷害，而農民就可能為了避免霜凍害而選擇了早熟但低產的品種。故此系統亦提供了往年的霜凍害發生頻率圖，讓農民在避免氣候風險的可能下，自行評估種植

日期與收穫日期，最大化產量與收益。亦符合農業 DSS 讓最終決定權交由農民的精神。

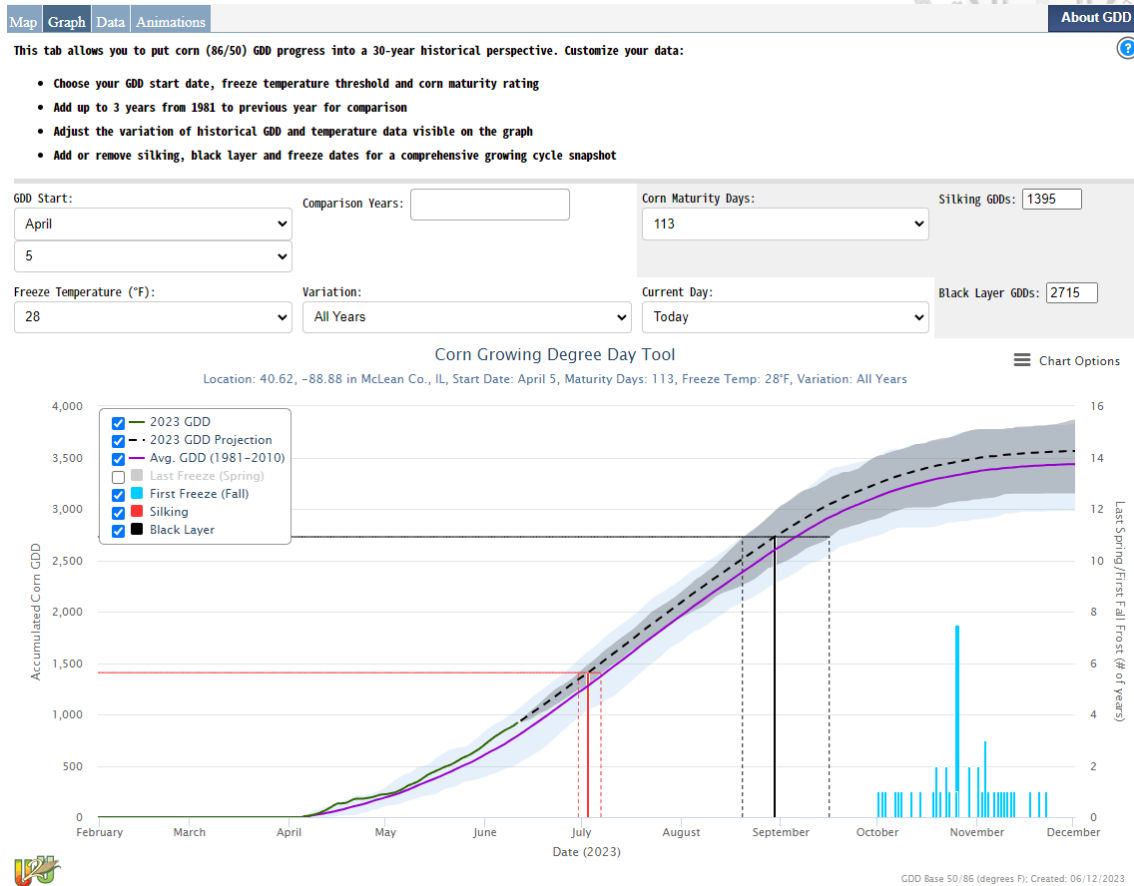


圖 17 U2U 玉米 GDD 決策支援工具的 GDD 展望頁面

使用者可以使用實際氣象資料及長期天氣展望推估玉米的收穫期，系統並顯示歷年最早發生霜凍的時間與頻率，供農民選擇適合的品種與栽種時期。截圖時間 2023 年 6 月 8 日。

與本系統相較，上述的 U2U 系統並不支援跨年度運算，是因為美國的玉米栽培制度並不會跨越冬季，然而臺灣的甜玉米可以終年栽培，故需考量可以跨年度計算的狀態，因此本系統設定為可以跨年度計算的。

除此之外，U2U 還有加入霜凍機率的顯示，在臺灣的冬季雖然也會發生霜凍害，但與霜凍害比起來，高溫和極端雨量對食用玉米的影響可能更為巨大。夏季的高溫可能會使玉米減產，而超過 200mm 的日累積雨量可能會使玉米耕除。美國飼料玉米的霜凍害可以透過改變種植時間和依照霜期的長短而選擇早熟或晚熟的



品種來調適。然而臺灣甜玉米為周年生產的特性，在面對高溫 and 極端雨量時的負面影響是否有辦法透過事前的規劃或預防來避免，還是只能被動應對減少災害，是設計類似系統時是否把上述因子納入需考量的點。

除了上述的系統之外，台灣還有幾個以實際田間資料建模，並建立 DSS 的案例。例如阿龜微氣候（蜂巢數據科技股份有限公司）的「有機大豆生長模型與種植決策輔助系統」 (<https://news.agriweather.online/企業學研案例 2/>, 造訪時間：2023 年 8 月 2 日)，以及凌聚農業科技股份有限公司的「智耕雲」系統 (<https://www.linkjoin.com.tw/JoinFarm/>, 造訪時間：2023 年 8 月 2 日)，然而上述系統因為屬於商業運作的系統，故無法窺知其內部使用的作物生長模式，未來可以進一步與其比較。

5.3 系統的限制

農業決策支援系統常見問題有：圖形化介面不使用者友善、功能單一受限、未做使用者需求分析，及考量未全面等(Zhai et al., 2020)。

在圖形化介面方面，因為本系統使用的是網路常用的框架，如 HTML 的預設表單和 Bootstrap 5 的網格系統，使網站的外觀一致，且使用者介面可以隨著使用者的裝置而自動改變大小，使介面更加美觀。此外，本系統也使用了各種互動性元素，如下拉式選單、按鈕等，這些元素可以提升使用者與系統的互動體驗。相較先前研究的介面，應更加直觀易用。

本系統主要提供的功能有，利用氣象資料來預測採收期，以及提供各時期的栽培建議。目前系統的功能建議主要來自於專家學者的建議，未來，若要讓更多領域的人士，仍需採納更多潛在使用者的需求，這部分可能還得仰賴更多社會科學或傳播學領域人士的合作。

以下就本系統目前的氣象資料與作物參數限制來說明。

資料方面，本系統的氣象資料目前只有來自氣象局 CODIS 資料庫的虎尾氣象站的歷史資料，以及虎尾區的氣象預報。但氣象站屬於自動站，氣溫資料有缺值

的問題，若有氣溫缺值，則會直接少算生育度日，進而延遲到達特定生育階段的生育日數預測。

作物參數方面，目前本系統只有白美人有使用梯形 GDD 算法的 4 個參數，夏強、華珍和黑寶實際上是使用了線性算法的 2 個參數而已。實際上，白美人的參數受限於虎尾站氣象資料的日均溫很少高於 33°C，實際上可說是只用到了前 3 個參數，33°C 以上至 37°C 的下降段目前還沒有遇到。

而溫度門檻參數只能透過作物在廣泛的溫度變化生長獲得的發育資料，才能確定(Bonhomme, 2000)。目前後面兩個參數，最適溫度 2 和上限溫度在未來仍需要更多證明。保守的來說，本系統使用的梯形 GDD 算法，主要有使用上升段 (T_{base} 至 T_{opt1}) 以及平緩段 (T_{opt1} 至 T_{opt2}) 之間的算法。可能跟玉米的上限溫度，及高溫臨界值比目前的實際觀測值還要高有關。

此外，本系統的參數在最佳化的計算當中，使用的是雲林縣當中不同耕地的資料，而實際上生育度日的計算必須有一些先決條件，作物不能是光週期敏感的，不能有春化作用，此外不能有水分或養分逆境等(Bonhomme, 2000)。這些都是參數化中並未考量的點，儘管如此，使用參數校正的過程仍然使 R^2 值達到 0.93 – 0.96 之間，可見此參數演算法的潛力與實用性。

5.4 系統的貢獻

本系統使用經田間資料最佳化的作物參數，並用最佳化的參數計算 GDD 及撰寫推估生育期的網路決策支援系統。系統整合來自氣象局歷史氣象資料及縣市預報 API，提供雲端的數位服務。並將氣象資料視覺化，轉換為具有作物生理意義且使用者友善的圖表，有利於農民或企業利用氣象資料進行生產管理與計畫 (Production Management and Plan)。

梯形算法的好處在於使用經過參數化校正過程的基礎溫度、最適溫度 1、最適溫度 2 和上限溫度，使其成為具有生物學意義的參數，有潛力用來評估作物的特性。以最適溫度 1 為例，白美人為溫帶品種，其校正出來的 T_{opt1} 為 27°C，而熱帶

品種的華珍和糯玉米的 T_{opt1} 為 31°C ，或許未來可以作為一種作物對於氣候適應性的指標。

總而言之，本系統使用的最佳化 GDD 模式預測的生育日數優於目前農事栽培操作曆（如 TGAP、表 3）上的生育日數，也優於目前農業試驗單位常用的 $GDD_{10.30}$ 模式，原本不同時期種植的同一種作物需使用不同的目標 GDD，現在只需要使用一種，更符合使用者的直覺，也使得預測更為精準。

而準確預測作物的生長發育階段，是作物能否適應當地氣候和產量潛力的關鍵(Kumudini et al., 2014)，更是農業智慧化精準化的重要一步。

最後，回頭檢視 3.3 節提到的八個設計黃金準則 (Shneiderman et al., 2016)，在不同的指標上皆有達成相當的目標。

1. 遵守一致性 (Strive for Consistency)：本系統套用了 Bootstrap 框架，雖然是較為陽春的介面，但整體性仍可使人一目了然。
2. 尋求通用性 (Seek Universal Usability)：因為是一種經驗模式，確定可用在雲林及鄰近地區的四種食用玉米生育期預測上，其他地區可能仍需校正。未來可為個別農戶或是企業，使用當地氣象站或個人氣象站資料，最佳化其作物生育期模式。
3. 提供有意義的回饋 (Offer Informative Feedback)：按下按鈕後，即可產生生育期推估圖，及栽培管理建議。
4. 為相連動作設計訊息 (Design Dialogs to Yield Closure)：可以透過輸入資料並按下按鈕來獲得資訊。
5. 盡可能減少錯誤 (Prevent Errors)：如果沒有氣象資料或計算期間找不到該生育階段的日期，會顯示「沒有資料」。
6. 允許取消上個動作 (Permit Easy Reversal of Actions)：使用者可以透過再次按按鈕來更新結果圖表。
7. 讓使用者掌握控制權 (Support Internal Locus of Control)：使用者可

以自訂種植日期及品種等設定，此外還有自訂參數模式。

8. 降低短期記憶負擔 (Reduce Short Term Memory Load)：因為是一站式網頁，所有所需的資料都在同一個頁面上，輸入的資料也不多，可以大大減輕使用者的短期記憶負擔。此外，也提供下載按鈕，讓使用者可以把推估圖表下載到自己的裝置。

上述的設計準則，政府或研究機構在設計決策支援系統時也應該納入考量，才能使系統的更易使用。

第六章 結論與未來展望

本研究使用開源氣象資料與由田間資料經最佳化計算的作物參數，利用網頁設計程式語言建立一個甜玉米生育期推估及栽培決策支援系統，並部屬於網路上，介面使用者友善。在氣候變遷下，提供一個快速評估作物對溫度反應的工具。

本系統幫助農民利用氣象資料、氣象預報與生育期推估模式，選擇適合的播種日期，安排生長季的農業操作，如灌溉管理和病蟲害管理等，使農民可以在關鍵時期控制水量、肥料，並可以提早安排採收及銷售事宜。

這樣的資訊和工具可以提高農民的生產效率、減少風險、節省成本，同時幫助農民應對氣候變化所帶來的挑戰。

而本系統使用的梯形 GDD 模式，在計算 GDD 時有使用 4 個具生物學意義的參數，未來將可以收集不同種作物在不同時期栽種的資料，結合當地的氣象站資料，進行資料探勘，有潛力準確地利用現有資料預測生育期，推廣至更多作物上。並可以和現有農事曆串接，如 TGAP 等，使農政單位提供的農事建議操作能與實際氣象站結合。

除了氣象站資料之外，亦可以串接田間感測器，及個人氣象站資料，使溫度資料更貼近當地的微氣候，有助於提升預測品質。未來，也可以串接在「農業 e 把抓」等現行的簿記系統，整合入「作物優質生產整合資訊平台」，或是加入氣象局和農委會的「農業氣象觀測網監測系統」，使系統功能更為完善。

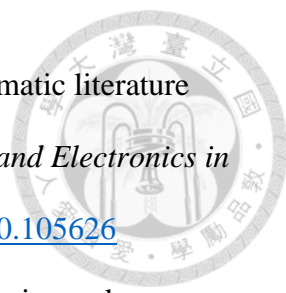
而農業改良單位在改良作物的新品種時，可使用其田間試驗的物候資料，透過作物參數最佳化的過程計算其適用的物候模式，並連同新品種命名時公布物候模式，供農友及各界人士參考，可以促進農業操作的智慧化與精準化。

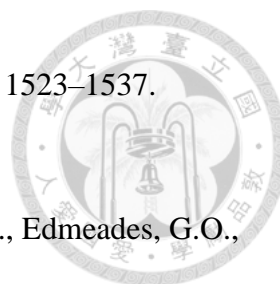
物候模式不僅可以用在植物，還可以用在變溫無脊椎動物的預測上，可用於病蟲害預測。而使用易獲得的開源資料準確預測生育時期，是讓作物模式可以讓一般民眾也能使用的第一步，未來可以以此基礎開發更多易用的作物產量、品質、灌溉、施肥或病蟲害防治模式與策略，以朝向農業智慧化前進。

第七章 參考文獻



- 林奇鴻. (2019). 超甜玉米果穗品質變化與冠層微氣象之相關性分析. 臺灣大學農藝學研究所學位論文 (2019年). <https://doi.org/10.6342/NTU201901901>
- 姚箴. (2023). 甜玉米生理支持型專家系統之建立. 臺灣大學農藝學研究所學位論文 (2023年)
- 陳雲蘭, 陳品好, 詹智雄, 沈里音, 馮智勇, 劉家豪, 林佑蓉, 中央氣象局 & 多采科技有限公司. (2014). 台灣自動氣象站氣溫資料補遺方法探討及網格化分析. 103年天氣分析與預報研討會. A5-5.
- 詹雅勛. (2019). 轉作選擇甜玉米產業概況. 種苗科技專訊, 107, 25–27.
- 謝光照, & 戴宏宇. (2020). 鮮食用玉米收穫適期之判斷. 農業試驗所技術服務專刊, 122, 1-7.
- Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
- Angel, J. R., Widhalm, M., Today, D., Massey, R., & Biehl, L. (2017). The U2U Corn Growing Degree Day tool: Tracking corn growth across the US Corn Belt. *Climate Risk Management*, 15, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2016.10.002>
- Belupu, I., & Ipanaque, W. (2022). A web decision support system for banana farmers centralizing information from different weather stations. 2021 *IEEE International Conference on Aerospace and Signal Processing (INCAS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/incas53599.2021.9666930>
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using ‘degree.day’ units. *European Journal of Agronomy*, 13 (1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7)

- 
- Cisternas, I., Velásquez, I., Caro, A., & Rodríguez, A. (2020) . Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, 105626. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- Creech, R. G. (1965) . Genetic control of carbohydrate synthesis in maize endosperm. *Genetics*, 52 (6) , 1175. <https://doi.org/10.1093/genetics/52.6.1175>
- Cross, H. Z., & Zuber, M. S. (1972) . Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agronomy Journal*, 64 (3) , 351–355. <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400030029x>
- daSilveira, F., Lermen, F. H., & Amaral, F. G. (2021) . An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106405. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106405>
- Edwards, G. E., Nakamoto, H., Burnell, J. N., & Hatch, M. D. (1985) . Pyruvate, Pi dikinase and NADP-malate dehydrogenase in C₄ photosynthesis: properties and mechanism of light/dark regulation. *Annual Review of Plant Physiology*, 36 (1) , 255–286. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.36.060185.001351>
- Gilmore Jr, E. C., & Rogers, J. S. (1958) . Heat units as a method of measuring maturity in corn 1. *Agronomy Journal*, 50 (10) , 611–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000100014x>
- Kent Shannon, D., Clay, D. E., & Sudduth, K. A. (2018) . An introduction to precision agriculture. *Precision Agriculture Basics*, 1–12. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0084>
- Kim, S.-H., Yang, Y., Timlin, D. J., Fleisher, D. H., Dathe, A., Reddy, V. R., & Staver, K. (2012) . Modeling temperature responses of leaf growth, development, and



biomass in maize with MAIZSIM. *Agronomy Journal*, 104 (6) , 1523–1537.

<https://doi.org/10.2134/agronj2011.0321>

Kumudini, S., Andrade, F.H., Boote, K.J., Brown, G.A., Dzotsi, K.A., Edmeades, G.O.,

Gocken, T., Goodwin, M., Halter, A.L., Hammer, G.L., Hatfield, J.L., Jones, J.W.,

Kemarian, A.R., Kim, S.-., Kiniry, J., Lizaso, J.I., Nendel, C., Nielsen, R.L.,

Parent, B., Stöckle, C.O., Tardieu, F., Thomison, P.R., Timlin, D.J., Vyn, T.J.,

Wallach, D., Yang, H.S. & Tollenaar, M.. (2014) . Predicting maize phenology:

intercomparison of functions for developmental response to temperature.

Agronomy Journal, 106 (6) , 2087–2097. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0200>

Legg, S., & Hutter, M. (2007) . A collection of definitions of intelligence. *Frontiers in*

Artificial Intelligence and Applications, 157, 17.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.0706.3639>

Li, H., Li, J., Shen, Y., Zhang, X., & Lei, Y. (2018) . Web-based irrigation decision

support system with limited inputs for farmers. *Agricultural Water Management*,

210, 279–285. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.08.025>

Li, M., Sui, R., Meng, Y., & Yan, H. (2019) . A real-time fuzzy decision support system

for alfalfa irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104870.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.104870>

McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997) . Growing degree-days: one equation, two

interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87 (4) , 291–300.

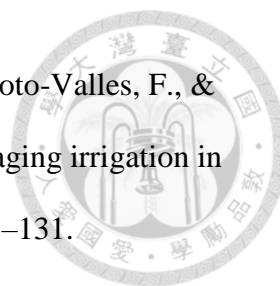
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)

Mite-Baidal, K., Delgado-Vera, C., Solís-Avilés, E., Jiménez-Icaza, M., Baque, W., &

Santos-Chico, M. P. (2017) . Knowledge-Based Expert System for Control of Corn

Crops. *Technologies and Innovation*. Springer International Publishing, 749,

84–95. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67283-0_7



Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016) . A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121–131.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2016.04.003>

Nelson Ford, F. (1985) . Decision support systems and expert systems: A comparison.

Information & Management, 8 (1) , 21–26. [https://doi.org/10.1016/0378-7206\(85\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0378-7206(85)90066-7)

Piper, E. L., Boote, K. J., Jones, J. W., & Grimm, S. S. (1996) . Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*, 36 (6) , 1606-1614.

<https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600060033x>

Poch, M., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., Sanchez-Marre, M., & Cortés, U. (2004) .

Designing and building real environmental decision support systems.

Environmental Modelling & Software, 19 (9) , 857–873.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.03.007>

Prabakaran, G., Vaithiyathan, D., & Ganesan, M. (2018) . Fuzzy decision support system for improving the crop productivity and efficient use of fertilizers.

Computers and Electronics in Agriculture, 150, 88–97.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.03.030>

Ring, D. R., Harris, M. K., Jackman, J. A., & Henson, J. L. (1983) . A FORTRAN computer program for determining start date and base temperature for degree day models. *Texas Agricultural Experiment Station (USA)* . No. 1537.

Ruml, M., Vuković, A., & Milatović, D. (2010) . Evaluation of different methods for determining growing degree-day thresholds in apricot cultivars. *International*



Journal of Biometeorology, 54, 411–422.

<https://doi.org/10.1007/s00484-009-0292-6>

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M. S., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2016) . Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction. Pearson.

Simionesei, L., Ramos, T. B., Palma, J., Oliveira, A. R., & Neves, R. (2020) . IrrigaSys: A web-based irrigation decision support system based on open source data and technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105822.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105822>

Soltani, A., Robertson, M. J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., & Sarparast, R. (2006) . Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and forest meteorology*, 138 (1-4) , 156-167.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.004>

Trudgill, D.I., Honek, A., Li, D., & vanStraalen, N. M. (2005) . Thermal time--concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146 (1) , 1–14.

<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.04088.x>

w3techs.com. (2023, April 21) . Usage statistics of PHP for websites.

<https://w3techs.com/technologies/details/pl-php>

Yang, S., Logan, J., & Coffey, D. L. (1995) . Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74 (1) , 61–74. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M)

Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020) . Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>

Zhou, G., & Wang, Q. (2018) . A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports*, 8 (1) , 10149. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>

