

出國報告（出國類別：研究）

農委會農業菁英培訓計畫
應用作物生長模式於大豆與玉米模擬

服務機關：行政院農業委員會農業試驗所

姓名職稱：陳柱中 助理研究員

派赴國家：美國

出國時間：107年5月30日至12月02日

摘要

機制作物生長模式為良好的作物與環境交互反應解析工具，可應用於解析不同情境下作物反應，以提供決策之依據。我國過去對於機制模式的研究大多應用於水稻，旱作系統則較少被專注，美國農業部農業研究署開發之 MAZSIM 與 GLYCIM，可加強我國在玉米與大豆之模式研析工作，而加強我國旱作在生產環境之調適性。在 2014 年台美農業科學合作會議上，提出「氣候變遷之作物反應評估與減排調適策略研擬」計畫，導入 MAZSIM 與 GLYCIM 模式，初步評估兩模式皆具有在我國使用的良好潛力，為加速對於模式之研究，美方亦鼓勵我方派員可至美國短期研習。透過本計畫的執行派送一名研究人員至美國農業部農業研究署調適性栽培系統研究室進行為期 6 個月之短期研習，利用在臺灣所收集之田間資訊進行模式參數本土化，以加速我國玉米與大豆模式之發展。在美期間學習模式之機制架構、參數調整、模擬結果驗證等工作，並參與模式調整與擴充等工作，協助模式機制的研析與修改，利用玉米模擬模式 MAZSIM 進行 AR5 下 4 個 RCP 的氣候模擬，並與美方人員共同發表於 2018 ASA, CSSA, SSSA 年會。與美方討論後續田間布置與合作事宜，透過本計畫的進行，加強台美雙方之間之農業合作。

Mechanic crop model was established to analyze the interaction between crop and environment and to simulate the crop response under different scenarios to provide results as decision support information. In Taiwan, the study on crop model had been majorly focus on rice and less on upland crops. The simulation of upland crop is important to analyze the crop and stress response to provide yield gap analysis due to more dramatically changing in soil moisture and nutrient availabilities in upland crop than in lowland crop system. The MAZSIM and GLYCIM

crop model developed by USDA/ARS have been validated in different weather and crop systems in United States or Thailand could be applied on soybean and corn simulation to improve the study on upland crop modeling in Taiwan. The cooperation project “Evaluating Crop Responses to Climate Change and Developing Strategies for Adaptation and Mitigation Using Simulation Models” was submitted on 2014 Annual Bilateral Meeting on the agricultural science cooperative programs to aim on studying the GLYCIM and MAZSIM crop model. The visiting between U.S. and Taiwan has been encouraged to accelerate the progress of modeling study in Taiwan. The goal of this project is to visit and participate the modeling development in Adaptive Cropping Systems Laboratory USDA/ARS for 6 months. The scientist was sent to ACSL from June to the end of November in 2018. The detail mechanism of MAZSIM and GLYCIM were studied and compared with the data collected in Taiwan or literature. Few parameters were modified in MAZSIM model to extent the description ability across environmental conditions of the model. Both the GLYCIM and MAZSIM model were validated to provide simulation results in high precisions. The MAZSIM model were used to analyze the corn growth under climate change condition that the weather data of four RCP under AR5 were used. The results were presented on 2018 ASA, CSSA, SSSA annual meeting. The future cooperation was discussed that the cooperation between COA and USDA were improved in this project.

一、緣起

因氣候的變化加劇，增加了田間管理的不確定性與複雜性，而近年來農業氣象預測、田間感測元件、資訊系統整合，為此不確定性增加了利基。作物生長模式整合作物與環境的交互反應，能夠用以解析環境變化對於作物生長乃至於生產的預估，而能夠提供生產者合適的調適策略。此外，作物生長模式也是評估氣候變遷對於農業栽培之衝擊，以及調適策略研擬之分析工具。

在「2014 台美農業科學合作會議」，由農試所與美國農業部研究局 (USDA/ARS) 合作辦理「氣候變遷之作物反應評估與減排調適策略研擬」計畫 (2015-2019)。在此計畫中，農試所應用 ARS 開發之 Maizsim (玉米)及 Glycim (大豆) 作物生長模式，進行模式參數本土化工作，並評估模式在台灣環境之描述性。模式包含二氧化碳濃度對作物反應之解析，可應用於目前環境下之作物生長預估，亦可用於評估 IPCC 之氣候變遷情境下對於作物生產之衝擊與調適策略。

ARS 鼓勵我國之年輕同仁參與工作，提供人員培訓機會。於本年度 (2017) 至 ARS 短期訪問，學習作物生長模式 Maizsim 與 Glycim 模式之操作，使用台灣的氣候、土壤、管理資料進行模擬，利用模擬結果與田間實測結果進行參數的研析與調校，在相對低溫環境下 (約 20 度)，模擬之生質量與生長趨勢有高估之情形，並希望與我方持續合作，在台收集該時期的相關資料，以供模式運算模式修改或參數調整使用。

本次菁英計畫延續先前之短期訪問，利用半年之時間學習美

方開發之作物生長模式完整架構，並且利用在美時間進行密切討論，以推動作物生長模式在我國之使用。

二、研習地點與行程

研習時間始自 2018 年 6 月 1 日至 11 月 30 日，為利環境適應以個人休假提早出國與延後返國，實際出國時間為 5 月 30 日，抵達國門時間為 12 月 2 日，研習地點位於美國馬里蘭州，為美國農業部農業研究署(United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDA/ARS)，貝爾次維爾農業研究中心 (Beltsville Agricultural Research Center) 的調適性栽培系統研究室 (Adaptive Cropping System Laboratory)。

研習期間參加美國農業部舉辦之 2018 IVP Science Leadership Forum，在該活動中與美方以海報方式發表台美雙方合作結果；另參加美國農藝學會舉辦之 2018 ASA and CSSA meeting，以口頭報告方式與美方共同發表研習成果。

日期	行程與工作內容	地點
107/5/30- 107/5/31/	CI8 班機前往洛杉磯國際機場、S1108 班機前往華盛頓杜勒斯機場	
107/6/1-	抵達馬里蘭州的貝爾茨維爾農業研究中心，辦理報到手續，研習作物生長模式	馬里蘭州 貝爾茨維爾
107/8/13- 107/8/17	美國農業部林務局國際訪問學者事務組 (USFS international visitor program)所舉辦之 2018 IVP Science Leadership Forum	華盛頓特區
107/11/4- 107/11/7	參加 2018 ASA and CSSA meeting，與美國農部共同發表成果	馬里蘭州 巴爾的摩
107/12/01- 107/12/02	B61808 班機前往紐約甘迺迪國際機場、CI11 班機返回桃園國際機場	

三、研習內容

(一) 作物生長模式發展

1. 模式發展簡史

二次世界大戰後電腦科技的發展促使作物生長模式的發展，最早的模式為 1965 年由瓦赫寧恩大學的 C.T. de Wit 提出的“Photosynthesis of leaf canopies”探討植物葉片光攝取以及光合作用模擬，這個模式中利用日射角度、樹冠中各葉片角度的分布比例、葉面積指數、緯度等計算作物的潛勢

產能 (potential production)。1970 年代作物生長模式開始蓬勃發展，氣孔導度、氣體交換、維持性呼吸作用 (maintenance respiration) 模擬機制趨於完備，此時開始嘗試將氣候、土壤、作物遺傳特性、植物生理以及病蟲害的因子納入探討，探討生育期、生長季節、不同器官間的乾物質分配與傳輸，並且誕生出許多機制繁複的模式，如 GOSSYM、CERES、SOYGRO 等系列模式，但由於許多模式中的參數無法直接測量或計算，而是透過校正 (calibration) 或擬合 (curve fitting) 求解。

1980 年代作物模式的使用開始廣為流行，不同的模式開始在各個區域被使用，更複雜的模式也陸續進行發展，然而模式的進化也受到挑戰，Sinclair 與 Seligman (1996) 形容此時進入作物生長模式的青春期 (Adolescence)，如同生物體一般快速的發展並充滿的衝突或挫折，此時的研究開始探究模式的潛力，並研究模式發展的化約論 (Extensive reductionism)、通用模型 (Universal model) 以及模式的驗證 (Validation)。模式發展學家試圖透過物理、化學與生理模型，透過基礎模式的建構試圖化約出如同物理模型充滿一般性 (general) 的作物生長模型，然而亦有許多案例指出複雜的模式準確度較簡單的經驗模式更低，例如簡單的蒸散模型可比 COTTAM 或 GOSSYM 更加能夠準確地描述質量平衡以及逆境的反應。隨著模式在全世界各地的使用，發現模式在許多區域的準確度有降低的情形，尤其在緯度較高或氣候區特性與發展國家差異大的情形下。此階段也開始留意到模式的本身存在相當的假設，例如為了模擬能量的分配所建構出

的需求(supply)與提供(demand)是否能夠真正代表植物體的反應，或思考簡單的 1 維光擷取以及簡單的乾物質轉換模型的極限等。

1990 年代開始作物生長模式逐漸進入成熟期，此時開始認識到作物生長模式有一定限制性，轉向將模式視為系統性分析的工具以協助問題的釐清，例如 Louarn 等人(2008)利用 ADEL-maize 模式分析低溫下對於玉米型態對於光合作用的影響；或將模式與遙測工具結合，解決農業生產區域產量差異達到精準化管理的目標(Basso et al., 2011; Basso et al., 2018)。另外基礎作物生理研究的突破也促進作物模式的發展，例如 Farquhar, von Caemmerer 和 Berry 所發表的 C3 植物光合作用模型 (FvCB) 以及後續的 C4 光合作用模型，或整合氣孔導度、蒸散作用與光合作用的混合模型(Kim and Leith, 2003)，在於溫度反應、光能擷取上的模型更加精細準確提高了模式的準確度與發展潛能。

2. 作物生長模式機制的發展

作物生育期的預測與分析是模式的開端，溫度與作物生長積溫模型可以說是模式的原形，荷蘭從 1960 年代即開始模式的發展，到 1970 年代 de Wit 等人開發了 BACR

3. 主要的模式

荷蘭從 1960 年代即開始模式的發展，到 1970 年代 de Wit 等人開發了 BACROS (BASic CROp growth Simulator) 模式，模擬作物在田間營養生長期的潛勢生長量與蒸散作用，由 BACROS 衍伸的 PHOTN 模式包含精細的光合作用架構，

描述氣孔開合、蒸散作用、二氧化碳交換、呼吸作用之關係。1980 年代的 SUCROS 模式 (Simple and Universal Crop Growth Simulator) 已包含完整的模式架構，該模式試圖建立跨作物類別可使用的通用型模式，利用一維的植冠模型配合不同的光擷取參數，簡化了作物對於，並考慮光週期、累積溫度對於生育期時的發展，以及生育時期對乾物質分配的影響，SUCROS 模型依據各作物特性進行衍生，應用於玉米、小麥、萵苣、馬鈴薯、大豆等作物，並且奠定荷蘭後續相關模式的基礎 WOFOST、MACROS、ARID CRP、SAHEL、PAPRAN、INTERNCOM、ORYZA 等模式。

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 是目前最被廣為使用的作物生長模式，起始於 1981 年國際開發總署之國際農業技術轉移基標網路計畫 (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, IBSNT)，參與開發的單位包括美國農業部、密西根大學、佛羅里達大學、夏威夷大學、波多黎各等，該模式目前由佛羅里達大學進行維護，以更新至 4.7 版，包含了 42 種作物的生長模擬。DSSAT 模式主要整合 CROPGRO 與 CERES 系列的模式，包含輪作、空間模擬的模組，方便於解析不同栽培制度對於生產系統的影響，並且有不少與遙測技術配合使用之案例。

DSSAT 模式中的 CERES (Crop Environment Resource Synthesis) 包括小麥、水稻、玉米等作物模擬的 CERES-Wheat、CERES-Rice、CERES-MAIZE，是目前最被廣為使用的模式之一，Basso 等人 (2016) 回顧 215 篇使用

CERES 模式之文獻，跨越 43 個國家不同氣候區與管理，顯示模擬與實際產量誤差依序為：玉米每公頃 1400 公斤以內 (10%相對誤差)、小麥每公頃 1200 公斤以內(約 20%相對誤差)、水稻每公頃 800 公斤以內 (約 10% 相對誤差)，預測的生育期與實際值誤差在 7 天以內。CERES 的模型亦影響到後續的作物模式，例如 Aloha pineapple 即是以 CERES MAIZE 為雛形，配合鳳梨的生育特性發展成為鳳梨生長模擬的模型。

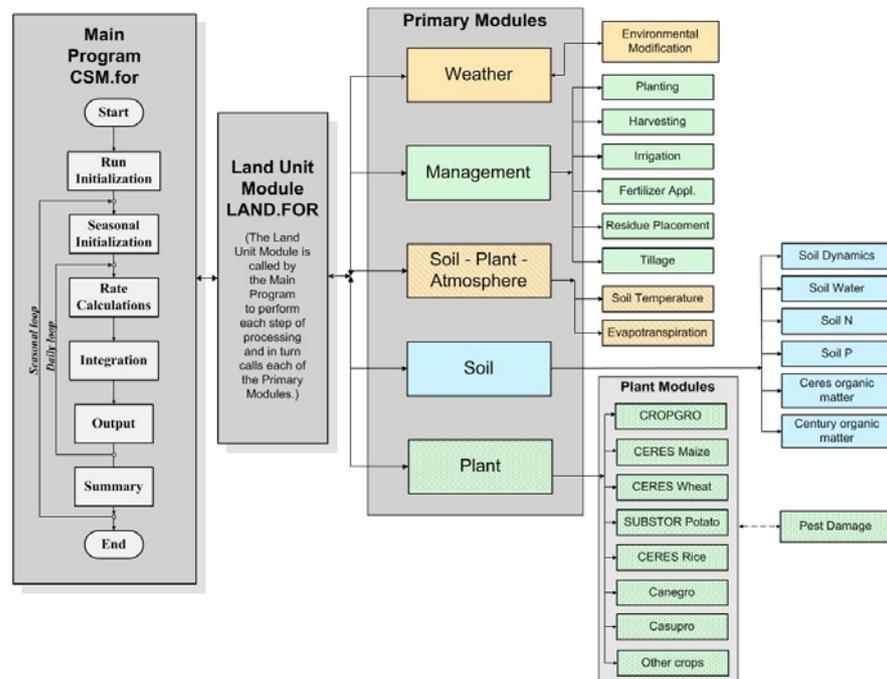


圖 1. DSSAT 模式的平台架構

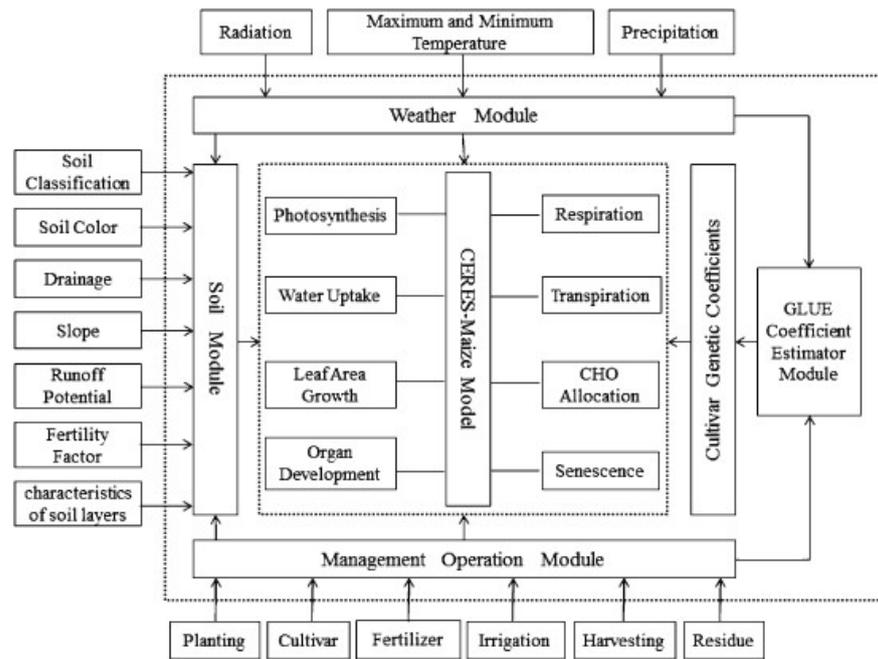


圖 2. CERES 模式架構

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 由澳洲團隊於 1901 年開始進行開發，目前模式已經更新到 7.10 版，已經有 110 個國家使用該模式。APSIM 開發過程即參考 CERES、GRO、NTRM、EPIC、CENTURY 等模式等架構，為了解析農業生產系統的問題，APSIM 模式建置有管理、輪作的模組，除了作物外並且包括森林、草原生長模擬的模組，以供解析不同植物相對於生產系統的影響。APSIM 模式強化土壤的模擬，將土壤 pH、水分、氮、磷、侵蝕因子納入，並且模擬作物殘體在生態系統之間的宿命。可模擬的作物類別包括大麥、小麥、油菜、鸚嘴豆、木薯、棉花、森林、玉米、大豆、花生、甘蔗...等。

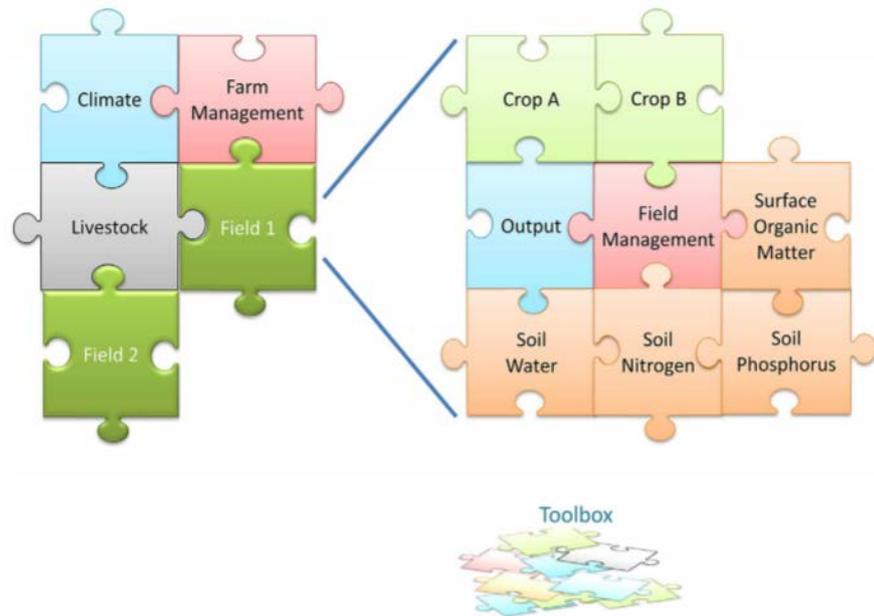


圖 3. APSIM 模式的模組化架構

STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) 也是相對新穎的作物生長模式，該模式由法國國家農業研究院 (Institut National de la Recherche Agronomique, INRA) 於 1996 年開始進行開發，設計概念為開發符合多作物需求之單一通用型模式，以樹冠型態進行模擬，模式當中設計有樹冠參數的擬合工具，方便使用者以實際量測結果進行參數擬合。STICS 模式可應用模擬的作物包含了小麥、玉米、大豆、高粱、亞麻、草地、番茄、甜菜、向日葵、碗豆、油菜、香蕉、甘蔗、胡蘿蔔、萵苣、葡萄等。模式包含了栽培系統與輪作的模組，可以解析不同耕作制度對於栽培系統的影響。

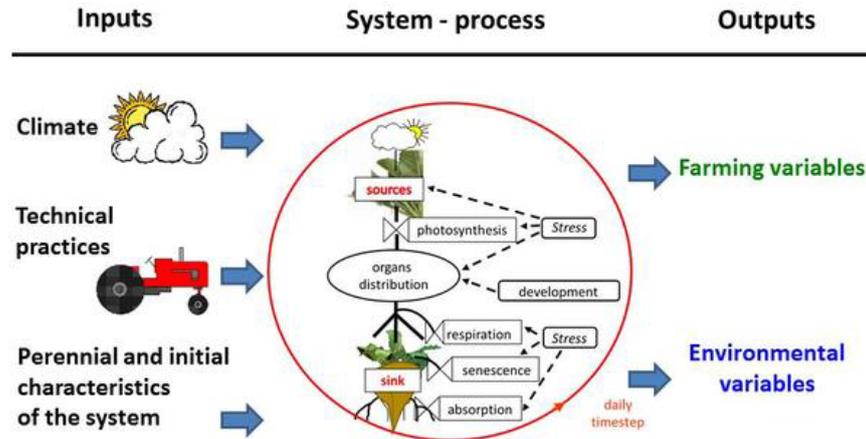


圖 4. STICS 模式架構

(二) 生長模式的應用

作物生長模式可協助研究、田間管理以及教學，在研究方面的應用包括：(1)整合研究知識、(2)整合跨學科知識、(3)作物育種改善、(4)作物管理研究；(5)區域產量分析，如美國中西部利用 SALUS 模式配合遙測技術，搭配歷史產量進行解析與分析 (Maestrini and Basso, 2018)；(6)產能落差解析 (yield gap analysis)，利用模式解析區域生產力，解析低產區域之原因以及對策 (Griffin et al., 2018)；(7)區域規劃；(8)氣候變遷衝擊分析、解析耕作制度對於環境的衝擊。田間管理方面的應用包括：(1) 最佳管理策略擬定，如密西西比州農民使用 GLYCIM 模式協助灌溉策略的擬定 (Reddy et al., 1995)；(2)定址化管理，義大利使用 SALUS 進行小麥田之田間管理，依據歷史產量、土壤特性以及作物生長模式規劃各區域最適的氮肥施用量(Basso et al., 2011)；(3) 採收前產量預估。

(三) 美國農部開發之模式機制研習

1. 田間調查方式比對

玉米生育調查先前在台灣進行之調查方式與美方相當，包括葉齡判斷、葉鞘、葉身、莖桿等調查方式皆無問題。美方增加紀錄葉尖數量，另以最高穗上的葉片(ear leaf) 作為營養診斷葉。為了驗證模式中所使用的鍾型方程式，測量每一葉片之葉長與葉面積。不論玉米穗的大小，皆視為穗軸分別模擬。在模式的模擬上，將葉鞘歸入莖的一部分進行分析。生育時期、根、莖、葉的調查方式皆與美方相同。株高的部分主要紀錄土表到最高節的距離為基準，另外可記錄子葉到最高節的長度作為另一個株高指標。

2. MAZISIM 模式機制

MAZISIM 模式是一個組合模式，由環境模擬與作物模擬的兩個部分所組成，環境模擬由研究室所開發之 2D Soil 模式進行系統模擬，2D soil 以有限元解析土壤環境的質量與能量平衡，能解析土壤剖面各節點之但模式所需資料包括土壤(各土壤剖面之物理與化學特性)、氣候(逐時或逐日)、田間管理(施肥以及灌溉)、種植紀錄(播種、採收)、品種參數(該品種葉齡)等，模擬結果包括逐時之作物資訊(葉齡、葉尖數、各部位乾重、水分平衡、氮平衡、總光合作用(Pg)、淨光合作用(Pn)、逆境指數、生育時期)，葉片資訊(各時期下每一葉片之潛勢葉面積、實際葉面積、累積溫度、生育階段)、各時期土壤剖面資訊(各節點土壤

溫度、水分含量、水分勢能、空氣含量、有效性氮濃度)、土壤剖面各型態之氮濃度(銨態氮、硝酸態氮、有機態氮、總氮)、氮素平衡(作物吸收、土壤含量、淋洗、脫氮作用)。

2D Soil 模式以 Fortran 語言進行撰寫，該模式處理作物環境的模擬，包括日照時數、日射角度、土壤溫度、土壤水分平衡、土壤氮素平衡、根的生長模擬、水分吸收、元素吸收等模組。作物的部分以 C++ 語言進行撰寫，以物件導向風格進行撰寫，使用的物件包括植物、氣體平衡、葉片、生育階段發展等作物生育期的發展則是使用 Yan and Hunt (1999)所發表之 Beta function 進行模擬，公式如下：

$$r(T) = R_{max} \left[\frac{T_{Ceil} - T}{T_{Ceil} - T_{opt}} \right] \left[\frac{T}{T_{opt}} \right]^{T_{opt}/(T_{Ceil}-T_{opt})}$$

其中 T 表示溫度、Tceil 表示最大溫度、Topt 表示最是溫度，該方程式描述生育速率對溫度之反應曲線，包含低溫的生育發展遲滯區間，低溫至最適溫度之生育速率隨溫度線性增加之線性區間、接近最適溫度之生育速率增加幅度緩慢、最適溫度與最大溫度之間之生育速率降低等。模式針對個別葉片進行模擬，使用 Beta function 計算葉片之 initiation, appearance 以及 mature 的時間點。

在光合作用-氣體平衡的部分，使用 Farquhar Photosynthesis Model (FvCB model) 進行模擬，另外結合氣體平衡之公式求取胞間二氧化碳濃度，解決過往使用經驗式進行估計之方式，使用熱力學方式計算在不同溫度下

之酵素活性，FvCB 模式能夠涵蓋光反應、二氧化碳濃度反應、溫度反應等模擬。因模式當中結合氣體平衡之模擬，使得模式對於環境濕度、二氧化碳濃度對於氣孔影響之模擬，其主要公式如下：

$$A = \min\{A_c, A_j\}$$

其中 A 是淨光合作用 ($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)， A_c 是受 Rubisco 活性決定速率的二氧化碳同化作用 (Rubisco limited CO₂ assimilation)， A_j 是受電子傳遞鏈決定速率的二氧化碳同化作用 (electron transport limited CO₂ assimilation)，其計算公式如下：

$$A_c = \min\{(V_p + g_s - R_m)(V_{cmax} - R_d)\}$$

$$A_j = \min\left\{\left(\frac{xJ}{2} + g_{bs}C_m - R_m\right)\left(\frac{(1-x)J}{3} - R_d\right)\right\}$$

其中， V_p 是 PEP carboxylation rate， g_s 是氣孔導度， R_d 光照下的粒線體呼吸作用， R_m 是葉肉細胞粒線體呼吸作用， C_m 是葉肉細胞中的二氧化碳分壓 ($\mu \text{ bar}$)， x 是電子傳遞鏈的分配速率。

使用酵素動力學的 Michaelis-Menten 方程式描述二氧化碳濃度與碳固定作用，其公式為

$$V_p = V_{p \max} \frac{C_m V_{p \max}}{C_m + K_p}$$

光合輻射強度對於電子傳遞鏈活性的影響則使用：

$$\theta J^2 - J(I_2 + J_{max}) + I^2 J_{max} = 0$$

其中 theta 是經驗參數，其數值為 0.7。

各個參數受溫度的影響則使用熱力學的形式進行描述：

$$g(T_k) = k_{25} \exp\left[\frac{E_a(T_k-298)}{298RT_k}\right] \frac{[1+\exp(\frac{298S-H}{298R})]}{1+\exp(\frac{ST_k-H}{RT_k})}$$

而蒸散作用的模擬公式如下：

$$E = 2g_v \left(\frac{e_s(T_L) - e_a}{P_a}\right)$$

$$e_s(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97 + T}\right)$$

$$T_L = T_a + \frac{R_{abs} - \varepsilon\sigma T_a^4 - \lambda g_v D/P_a}{C_p(g_h + g_r) + \lambda[(de_s(T_a))/dT]/P_a]g_v}$$

葉面積模擬則以溫度為變數進行模擬，取代傳統由葉乾重以及比葉面積 (Specific leaf area, SLA) 之方式計算葉面積，所使用的公式如下

$$\frac{dA_i}{dt} = (Ae_i ke_i) \times \frac{\exp[-ke_i(t - te_i)]}{\{1 + \exp[-ke_i(t - te_i)]\}^2} \times f(t)$$

其中 Ae_i 為為第 i 葉的潛勢葉面積， te_i 是第 i 葉到達 50% 最大葉面積所需的累積溫度(以 8 度為積溫計算)， ke_i 是用來描述每一葉片生育速度的參數， $f(t)$ 是用來描述溫度對潛勢葉面積影響的。

使用 Bell function 描述每一葉的潛勢葉面積，其公式如下：

$$Ae_i = Ae_m \exp\left[a \left(\frac{NL_i}{N_m} - 1\right)^2 + b \left(\frac{NL_i}{N_m} - 1\right)^3\right]$$

其中 Ae_m 和 N_m 是最大葉的葉面積和葉齡， Ae_i 和 NL_i 是第 i 葉的葉面積和葉齡， a 和 b 是參數，可由葉片的最大葉齡數(N_t)求取得知：

$$N_m = 5.63 + 0.33N_t$$

$$a = -10.61 + 0.25N_t$$

$$b = -5.99 + 0.27N_t$$

而最大葉的葉面積受品種的最大葉齡影響，當最大葉齡月大時，該葉的葉面積越大，Fournier and Andrieu (1998) 使用經驗式描述兩者的關係，並發現可用來描述不同品種之玉米，其公式如下：

$$Ae_m = L_M 0.75 W_{max} \exp(-1.17 + 0.047N_t)$$

$$L_M = \sqrt{L_{M_min}^2 + k(N_t - N_g)}$$

$$W_{max} = 0.106L_M$$

其中 L_M 是最大葉的葉長， L_{M_min} 是玉米最大葉的最小長度，Fournier and Andrieu (1998) 使用 97 cm 描述法國的品種，而 Kim 等人(2013)則使用 115 cm 描述美國的品種，我們發現台灣的品種為 105 cm， k 是常數 24， N_g 是品種的最小葉齡數， N_t 是模擬情境下的全株葉齡數。

3. GLYCIM 模式機制

大豆生長模式機制研習 GLYCIM 模式由美國農業部

於 1985 年發表第一版，該模式包含完整之架構，並且討論高二氧化碳環境對於大豆生育之反應。所需資料包括土壤、氣候(逐日)、田間管理(施肥、灌溉)、種植紀錄(初始時間與採收及間)、農地資訊(經緯度)、以及大豆於發芽後之基礎資訊。模式全部以 Fortran 語言進行撰寫，以副程式(subroutine)方式處理個別模擬組成。

GLYCIM 模式主要是以逐時模擬方式進行，輸入的氣候資料可為逐日或逐時，若使用逐日氣候資訊，模式會先將氣候轉換為逐時資料，在進行後續模擬。使用累積溫度的邏輯模擬營養生長期 (Vegetative stage) 的變化，其公式如下

$$PDV = \left(\frac{0.018 \times T_{air} - 0.11}{24} \right) * PARM2$$

其中 PDV 是營養生長期的增加速率， T_{air} 是大氣溫度(逐時)，PARM2 是各品種的經驗參數，因使用逐時模擬，要換成每日的單位時需除以 24。

模式使用累積溫度配合光週期進行計算生殖生長期 (Reproductive stage) 的變化。

花芽誘發(floral induction)時期(R0)的模擬，考率光週期的長短，夏至(每年的第 173 日)前後有不同的模擬方式：

當 JDAY 小於或等於 173 時，

$$DR = 1 / \left(\frac{35 \times (PHOTO - DIFIMG^{1.46}) - PERIOD}{24} \right)$$

若 JDAY 大於 173 時，

$$DR = 1 / \left(\frac{9 \times (\text{PHOTO} - \text{DIFIMG}^{1.31}) - \text{PERIOD}}{24} \right)$$

使用品種參數(PARM3)描述各品種差異

$$DR = DR * \text{PARM3}$$

其中 PHOTO 為有效光週期、PERIOD 為 DIFIMG 為花芽誘導的最大光週期。

從花芽誘發(R0)到始花期(R1)的模擬方式為：

$$DR = \frac{0.018\text{TAIRL} - 0.11}{\text{RLEAF} \times 24} \times \text{PERIOD} \times (1 - \text{SGTLI})$$

$$DR = DR \times \text{PARM4}$$

從始花期(R1)到盛花期(R2)的模擬方式為：

$$DR = \text{PDR} \times \text{PARM5} \times \text{PERIOD} \times (1 - \text{SGTLI})$$

從盛花期(R2)到始莢期(R3)的模擬方式為：

當 JDAY 小於或等於 173 時，

$$\text{PDR} = 1 / \left(\frac{2 + 9 \times (\text{PHOTO} - \text{DIFIMG}^{1.31}) - \text{PERIOD}}{24} \right)$$

若 JDAY 大於 173 時，

$$\begin{aligned} &\text{PDR} \\ &= 1 / \left(\frac{2 + 35 \times (\text{PHOTO} - \text{DIFIMG}^{1.41}) - \text{PERIOD}}{24} \right) \end{aligned}$$

$$\text{PDR} = \text{DR} \times \text{PARM6}$$

從始莢期(R3)到盛莢期(R4)的模擬方式為：

$$PDR = \left(\frac{1}{(1.2 * PHOTO) - 6} \right) / (24 * PARM7)$$

R4 之後的生育時期，則使用種子充實速率(SDFILL)模擬各階段種子的充實，其公式為：

若 RSTAGE 介於 4 到 6 時，

$$RSTAGE = 4.0 + SDFILL \times 2.7 \times PARM8$$

若 RSTAGE 介於 6 到 7 時，

$$RSTAGE = 6.0 + \left(SDFILL - \frac{2}{2.7 \times PARM8} \right) \times 4.0 \times PARM9$$

模式中包含模擬土壤中的水分與氧氣濃度，透過水分、養分與生育時期以及土壤總體密度等特性，模擬根的生長、對於水分的利用。

GLYCIM 模式主要透過溫度直接模擬葉面積的變化，分別針對主幹與側枝的葉片進行模擬，主幹葉面積之模擬係從營養生長期與葉形之相關式進行模擬，配合不同品種使用不同的倍率參數進行調整。葉乾重係以葉面積與葉片厚度與轉換係數進行計算，以二氧化碳濃度、日射量計算葉片厚度。模式使用質量平衡方式，透過碳水化合物供應，模擬逆境對於葉片萎凋之影響。以 R3 時期之光合作用能量計算最大豆莢重量，再以質量平衡方式計算豆莢乾重，實際的產量的模擬，則是將水分逆境與缺氮逆境影響列入考量，計算每小時之氮供應以及

碳水化合物供應量，以豆莢、豆仁的碳水化合物、胺基酸組成比例，計算實際的乾重。

(四) 模式的測試與調整

1. 玉米模式(MAIZSIM)

模式測試玉米生長模式使用反線性速率反應曲線 (Beta function)，不同參數狀態下對於反應曲線的影響。針對模式在低溫狀況下，模擬之葉齡發展速度較實際速度快之情形，調整與萌芽相關非線性溫度方程式的參數，使其在低溫的狀況下有較慢之速率，而一般溫度下無明顯之差異(圖 5)。

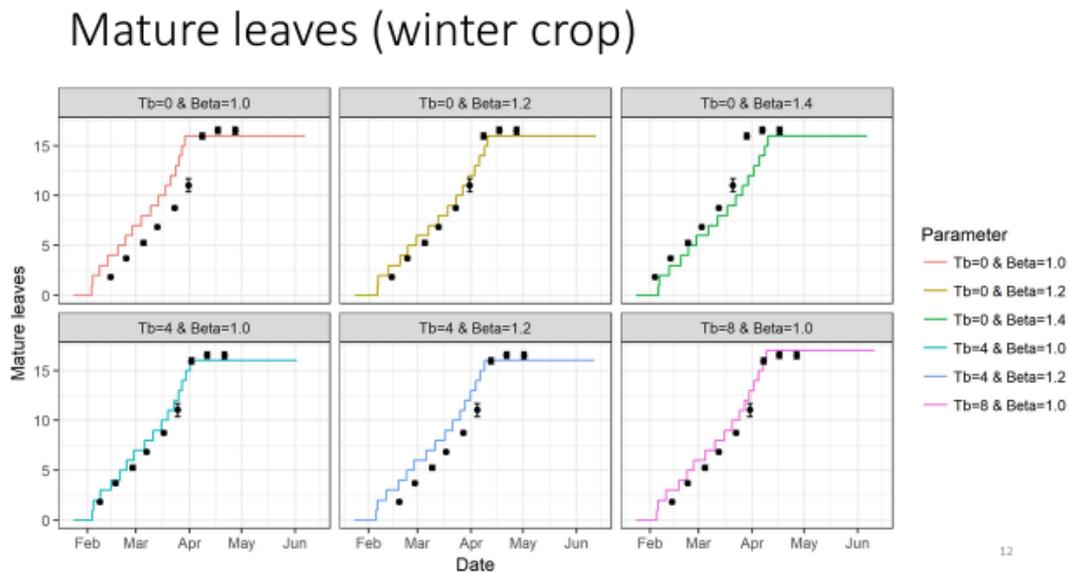


圖 5. 溫度反應曲線不同的參數對於葉齡模擬的影響。

比對模式以及其他文獻對於葉長溫度反應，結果顯示模式當中所使用之非線性速率方程式，與其他文獻中調查之資料相符(圖 6)。

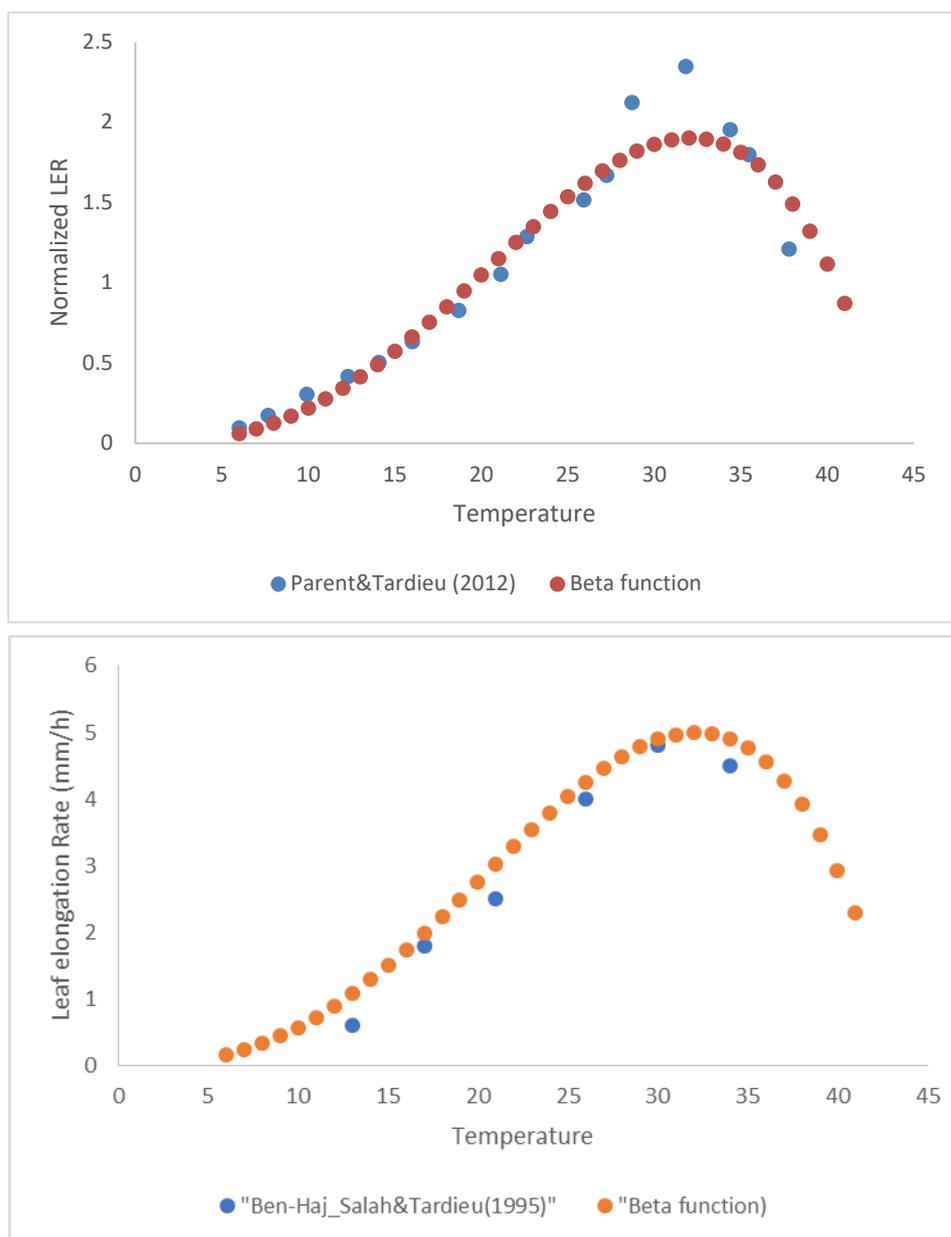


圖 6. 比對 MAZSIM 對於葉長變化的溫度反應曲線與其他文獻結果，上圖：MAZSIM 模式使用的反應方程式為橘色點，Parent&Tardieu(2013)所提出的熱力學模式為藍色點；下圖：MAZSIM 模式使用的反應方程式為橘色點，Ben-Haj Salah & Tardieu(1995)實測資料為藍色點。

調整潛勢葉面積(potential leaf area)之相關參數，利用全株葉面積、單株各葉葉面積資料，解決模式高估葉面積之情形(圖 7、圖 8)。

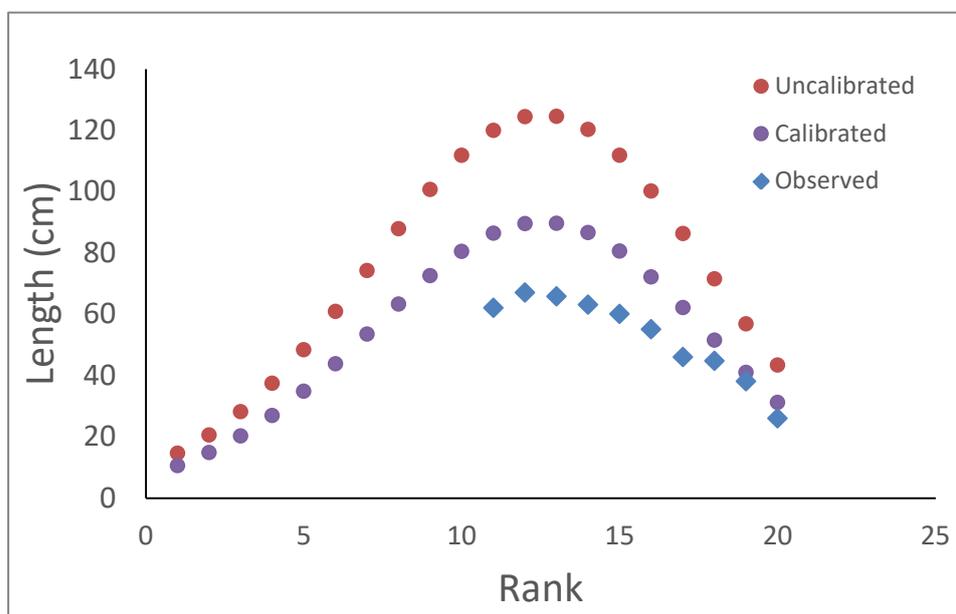


圖 7. 玉米葉面積模擬之方程式參數調整。

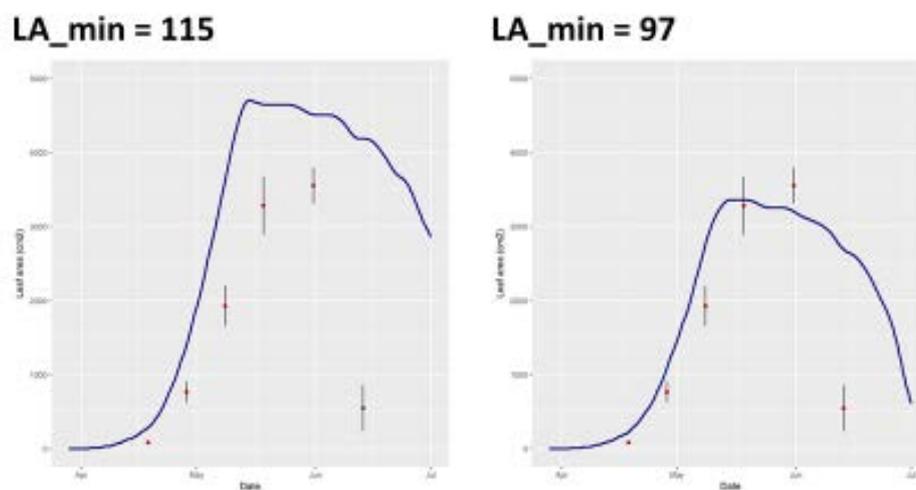


圖 8. 玉米葉面積模擬之方程式參數調整前後比較。

修正模式當中模擬葉面積發展之公式，模式當中葉面積的方程式當中有單位不吻合之情形，該情形將高估每一葉片在低溫狀態下之生長速率。調整公式後，發現模式對於葉齡之模擬更加準確，因模式當中對於葉齡的模擬包括葉尖出現(leaf tip appearance)以及葉片延展(leaf expansion)兩部分，調整之函式修正葉片延展之速率，使其更能夠正確描述溫度之影響。另外，該調整也使模式當中對於缺水、缺氮、遮蔭等逆境之模擬能力。

經由所有的修正之後，利用 RMSE、ME、D value 以及 Efficiency Factor (EF) 分析模擬與實測結果，MAIZSIM 模式能夠精準的模擬葉齡的變化，模式略為高估葉面積與地上部乾重，低估莖與葉乾重，高估穗乾重，顯示模式使用之單葉模擬搭配非線性溫度反應方程式能夠精準模擬單葉的變化，模式所使用的機制能夠有效的模擬葉面積的發展與乾物質的累積，然而乾物質的分配上與實際結果仍有不同，後續可針對此部分設計實驗以調整乾物質分配係數。

在氣候變遷情境上，利用氣候產生器 MarkSimGCM (Weather Generating Tool) 產出 2021-2095 年之間，IPCC AR5 下 4 個排放路徑 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) 中部地區的氣候資料，從 NASA 網站上下載各個排放情境之 CO₂ 濃度。選用甜玉米華珍模擬春作(選用 2 月 10 號)、秋作(選用 8 月 20 號)，在坊質壤土下，慣行灌溉、施肥量(每公頃 120 公斤氮)，分析每 20 年區間的變化。結果顯示 4 個排放路徑下，春作並無明顯的產量

變化，然而秋作在 RCP 6.0 以上則有逐年產量下降的趨勢，在 RCP 8.5 的情境下秋作玉米產量減少 25% 以上。

2. 大豆模式(GLYCIM)

選擇台灣兩個主要的毛豆品種(高雄 9 號、高雄 11 號)進行模式的研析，利用旗山、長治與霧峰的調查數據進行條參與驗證。

在本次出訪前，曾經針對該二品種建立參數，然而先前的模擬結果尚不理想，本次針對各個參數進行研析，並針對以下的參數進行調整：大豆生長模式調整初始狀態的根條件，先前設定之根密度過高，因此在模擬時候經常發現缺水之情形。確認初始狀態之根重量對於後期生育的影響不大，然而根的分布情形影響水分變化。研析葉面積模擬參數。修正株高模擬參數，並進行測試與修正。修正豆仁與豆莢乾物質分配參數，修正後之參數與較接近模式預設值。

結果顯示，大豆模式可準確模擬營養生長期、生殖生長期、葉面積、葉乾重、株高、莖乾重，並在大部分區域能準確描述籽粒與莢殼的乾重，以及毛豆的豆莢鮮重。

(五) 參加其他學術活動

參加相關學術活動參加美國農業部林務局國際訪問學者事務組(USFS international visitor program)所舉辦之 2018 IVP Science Leadership Forum，與相關參加國家進行交流。參加美國農藝學會年會，與美國農業部共同發表。

四、心得與建議

1. 作物生長模式經過 30 年以上的發展，模式的單一機制或整體的完整性均有長足的進步，實用於田間管理的案例也越來越多。作物生長模式也是提供氣候變遷對作物反應系統性解析的工具，建議我國應持續投入作物生長模式相關的研究。
2. 美國農業部農業研究署所開發的 MAZSIM 與 GLYCIM 在台灣具有相當好的潛力，另外模式所使用的機制亦具有單獨使用的潛力，後續將規劃邀請美方專家來台，與我國相關研究人員進行討論，提升我國在模式化研究的相關能量。

五、其他圖表

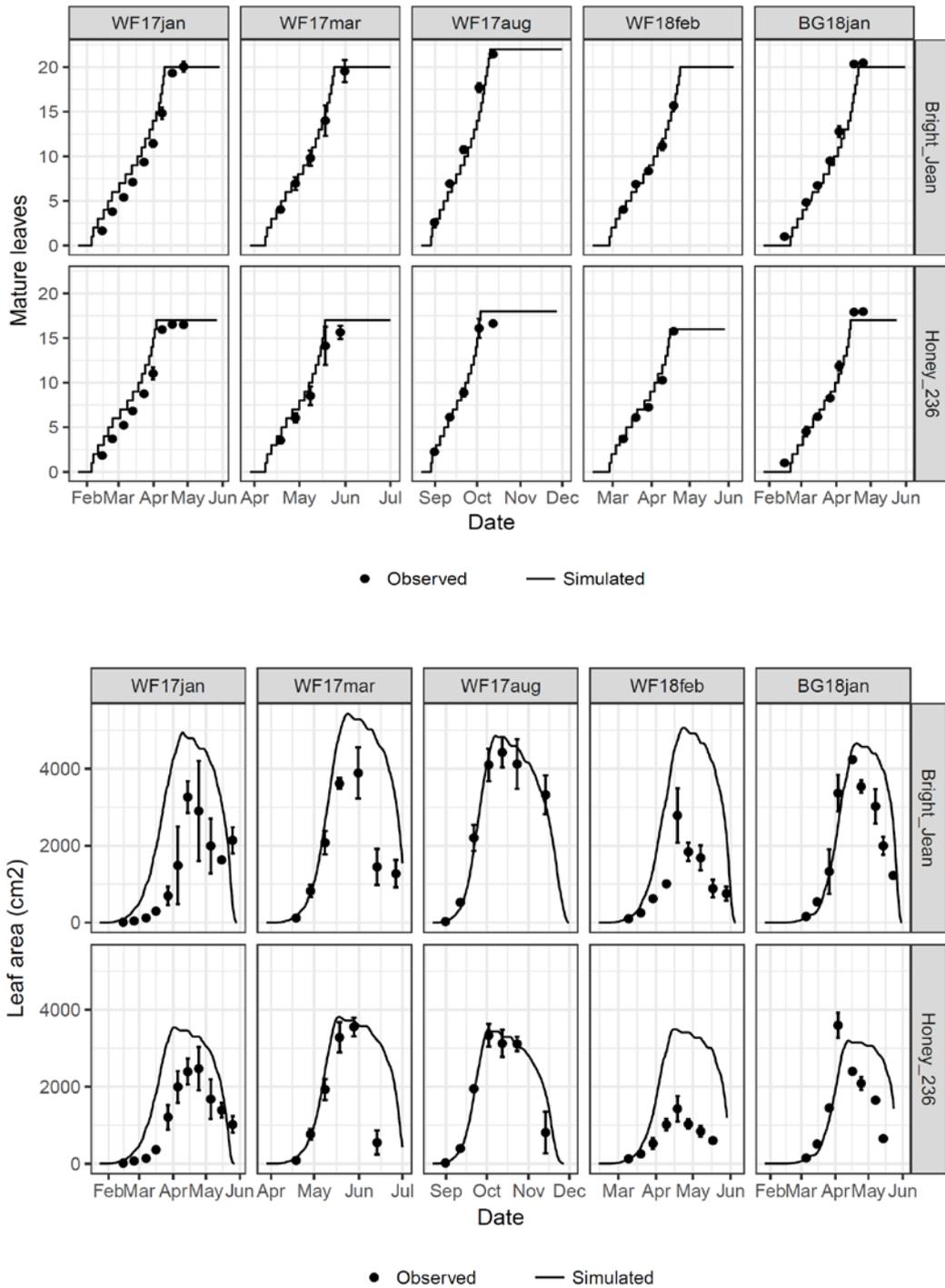


圖 9. 華珍與蜜寶 236 之實際調查與 MAIZISM 模擬之葉齡(上圖)與葉面積(下圖)。

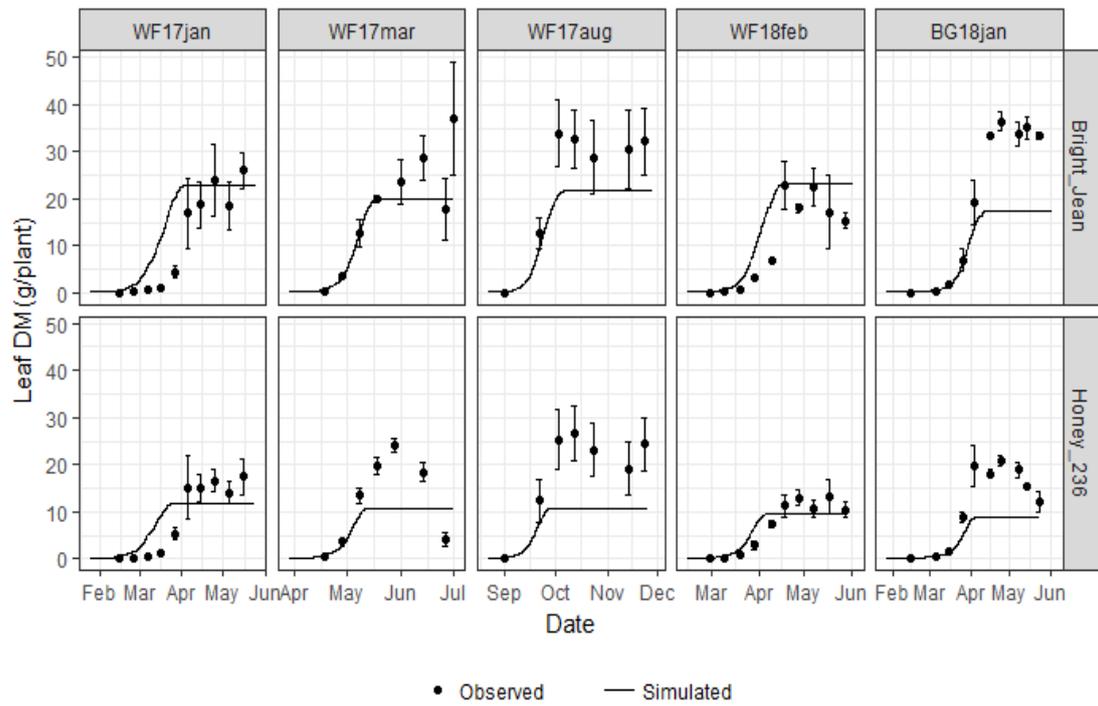
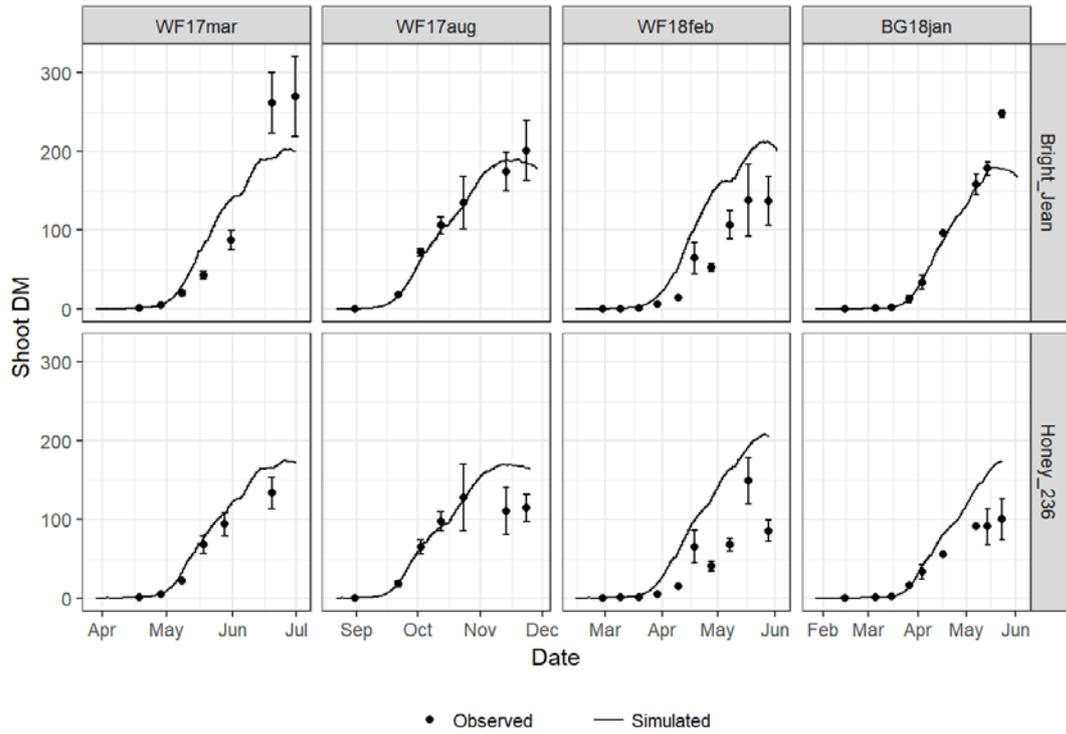


圖 10. 華珍與蜜寶 236 之實際調查與 MAIZISM 模擬之地上部乾重(上圖)與葉乾重(下圖)。

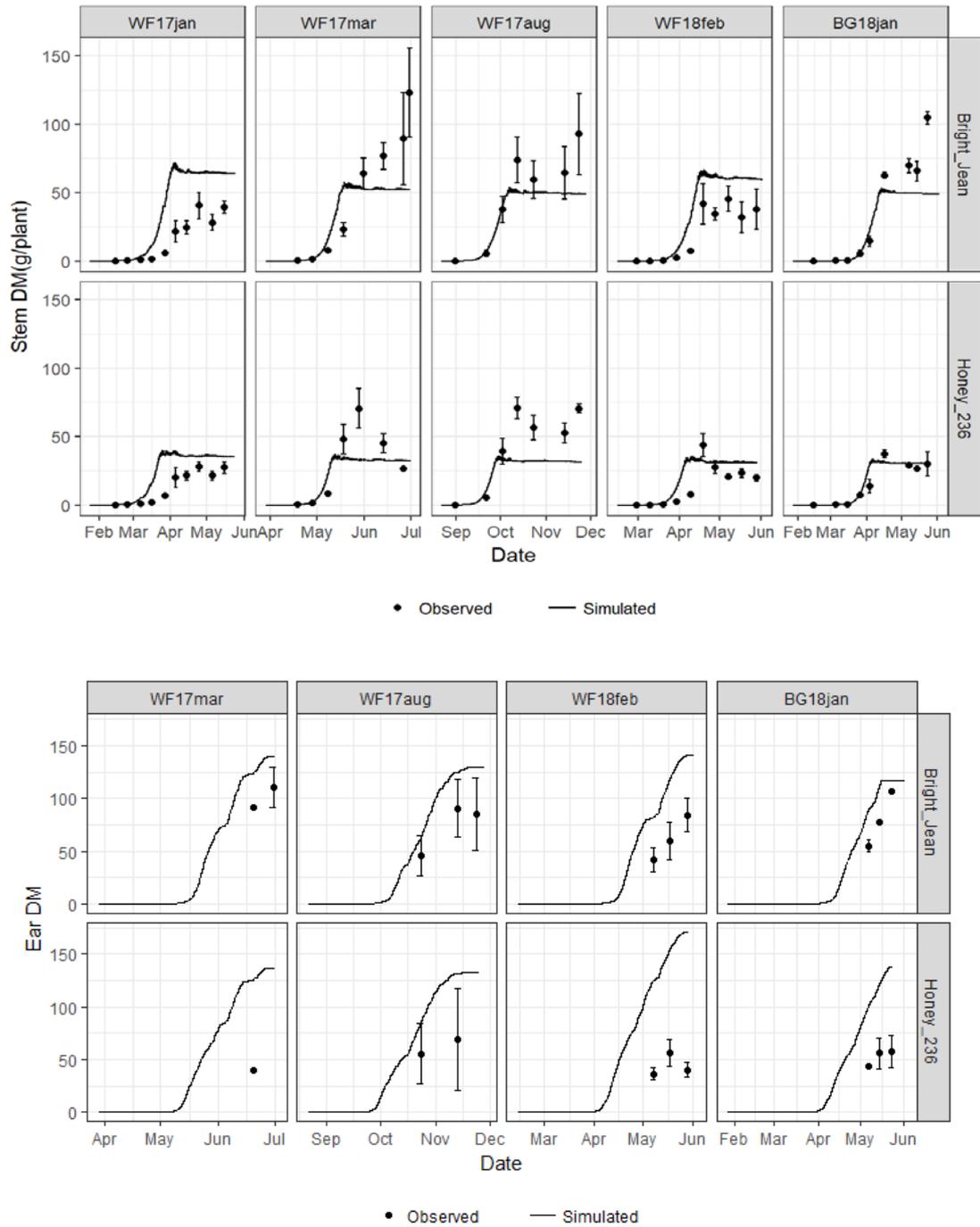


圖 11. 華珍與蜜寶 236 之實際調查與 MAIZISM 模擬之莖乾重(上圖)與穗乾重(下圖)。

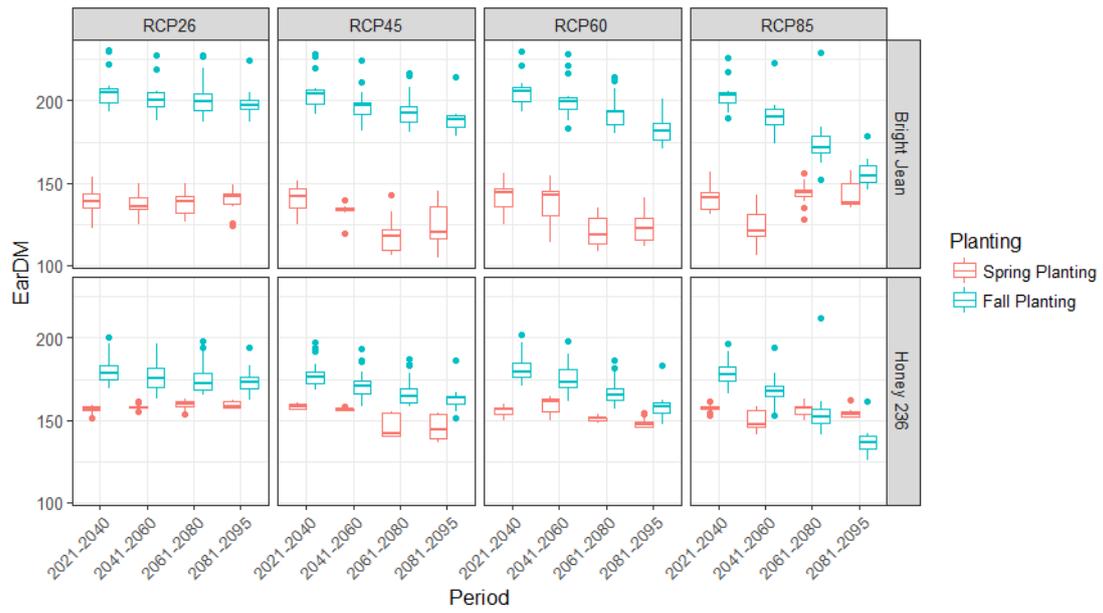


圖 12. 氣候變遷情境下，對春作與秋作玉米之產量影響。

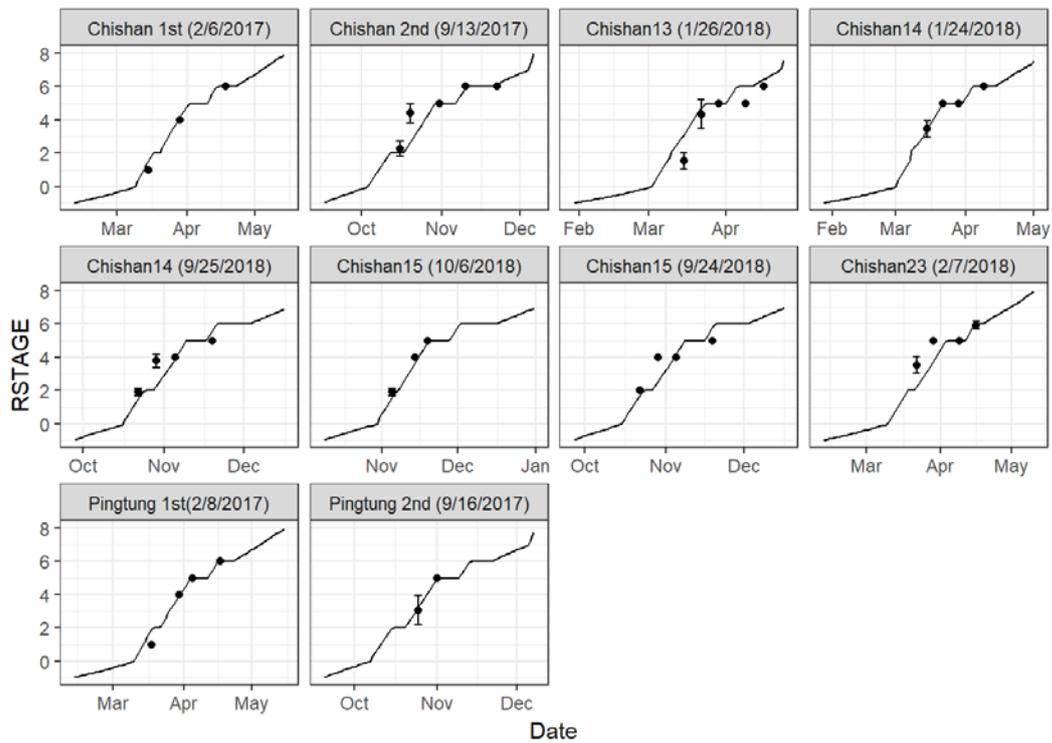
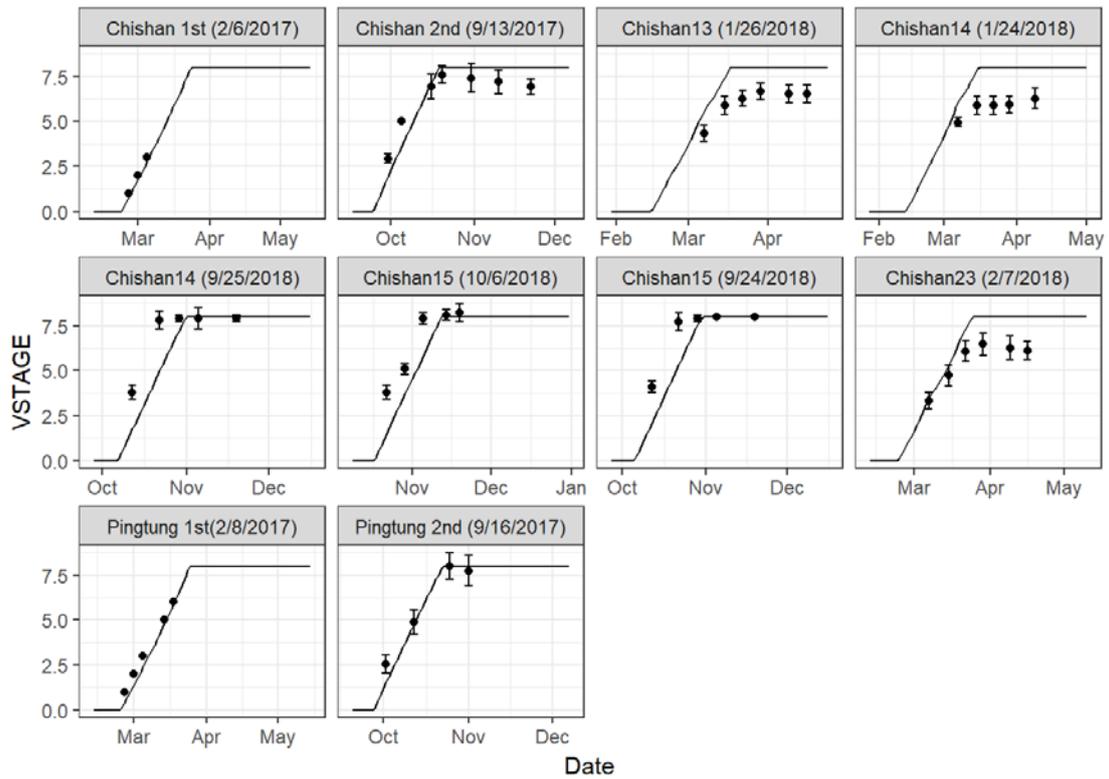


圖 14. 毛豆高雄 9 號營養生長期(上圖)與生殖生長期(下圖)模擬與實際調查結果比較。

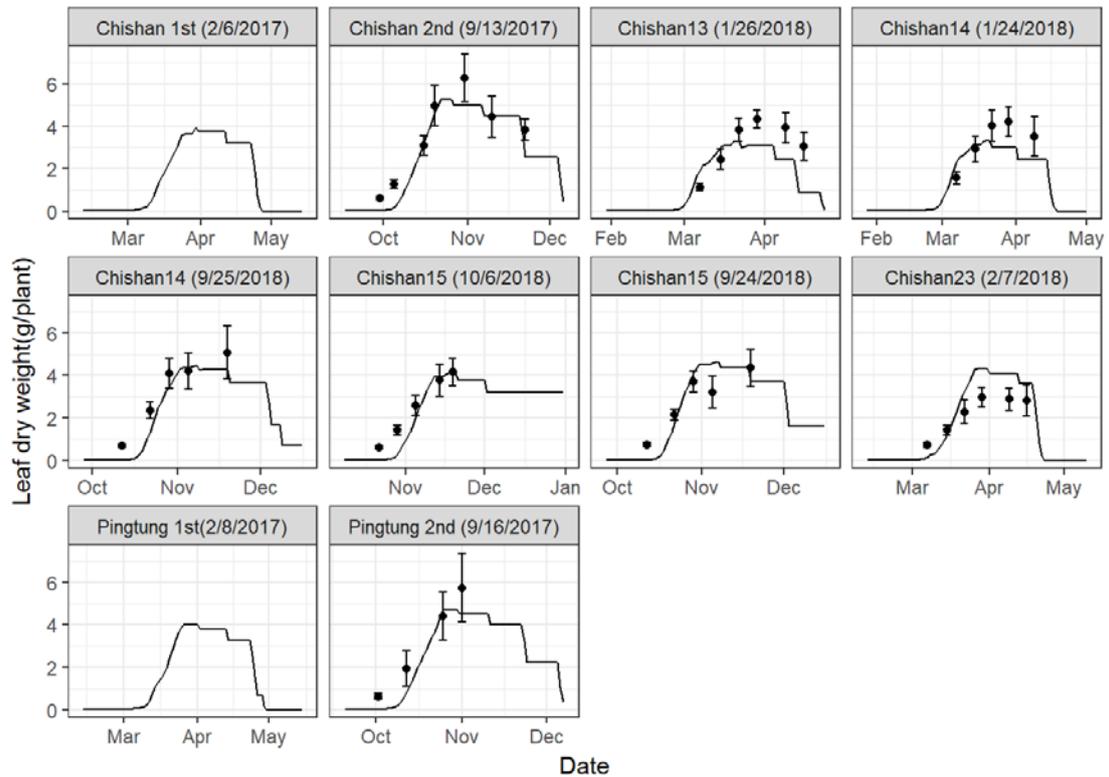
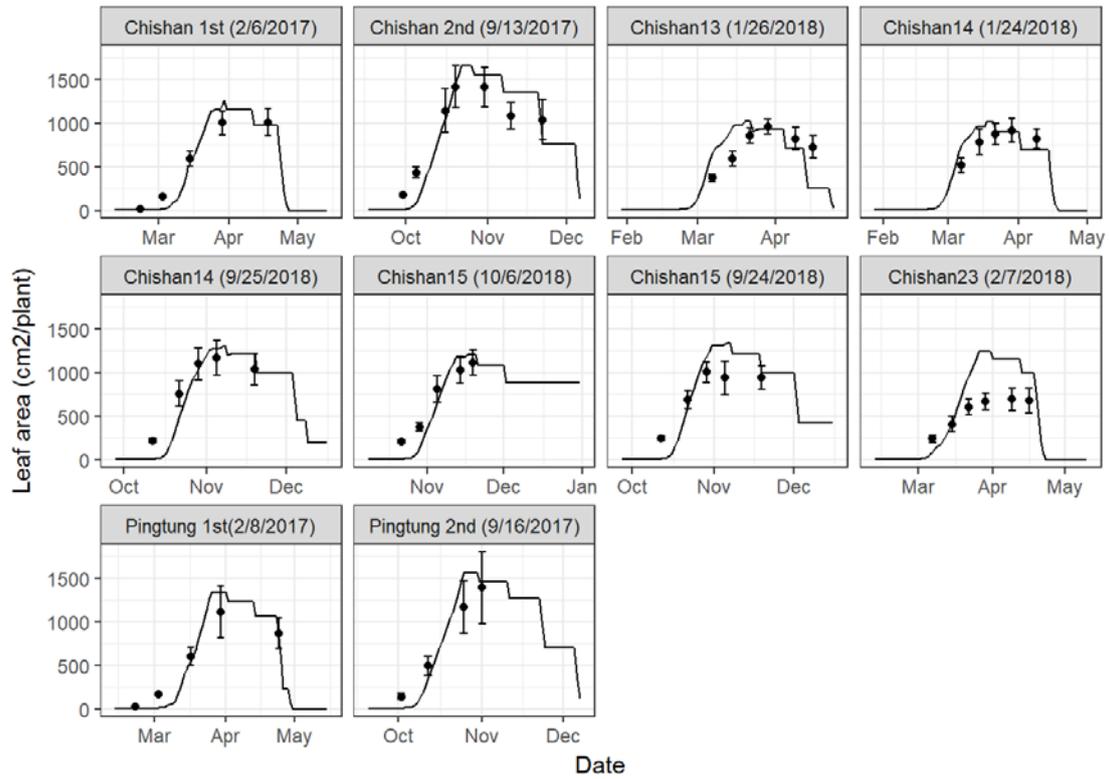


圖 15. 毛豆高雄 9 號葉面積(上圖)與葉乾重(下圖)模擬與實際調查結果比較。

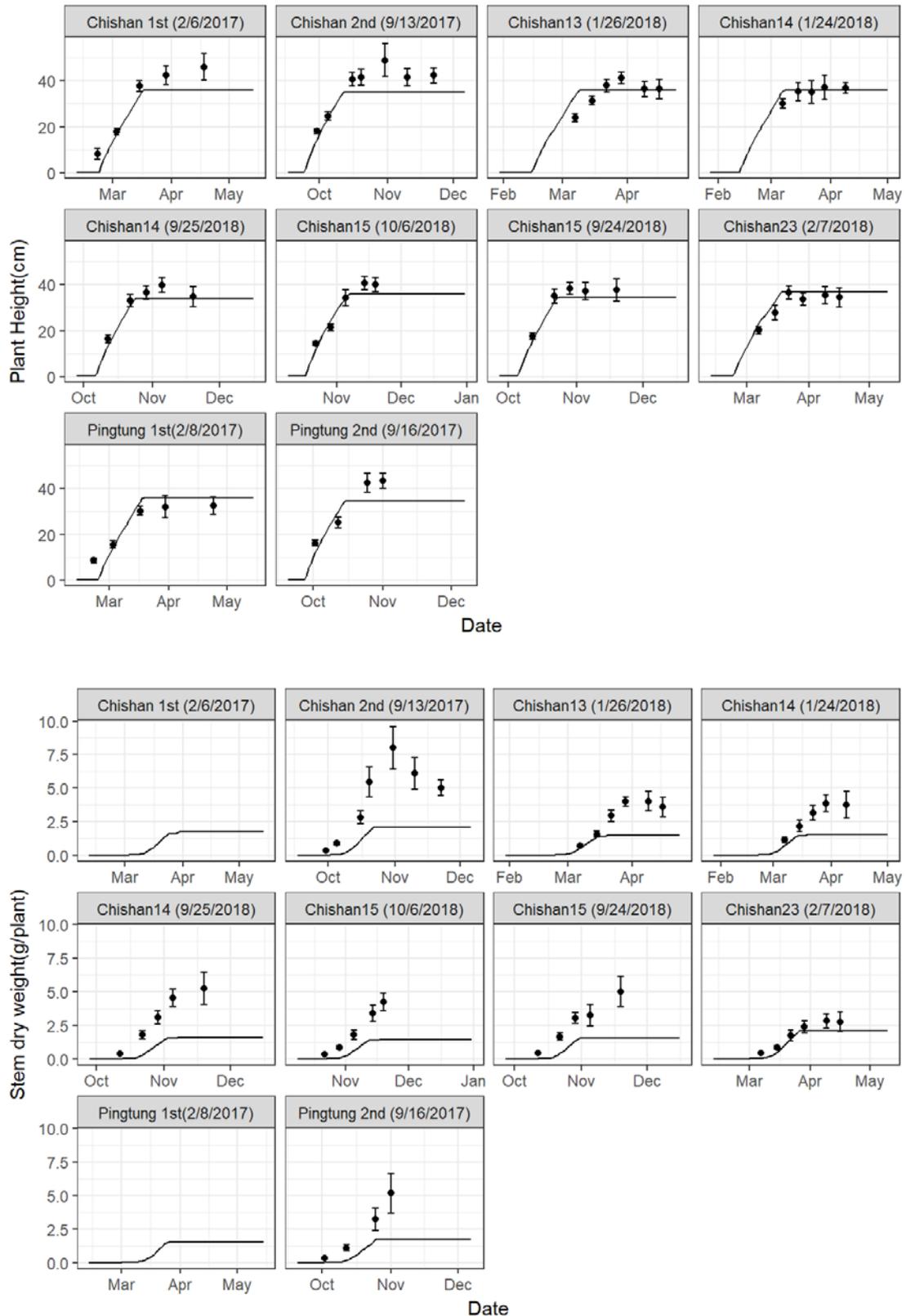


圖 16. 毛豆高雄 9 號株高(上圖)與莖乾重(下圖)模擬與實際調查結果比較。

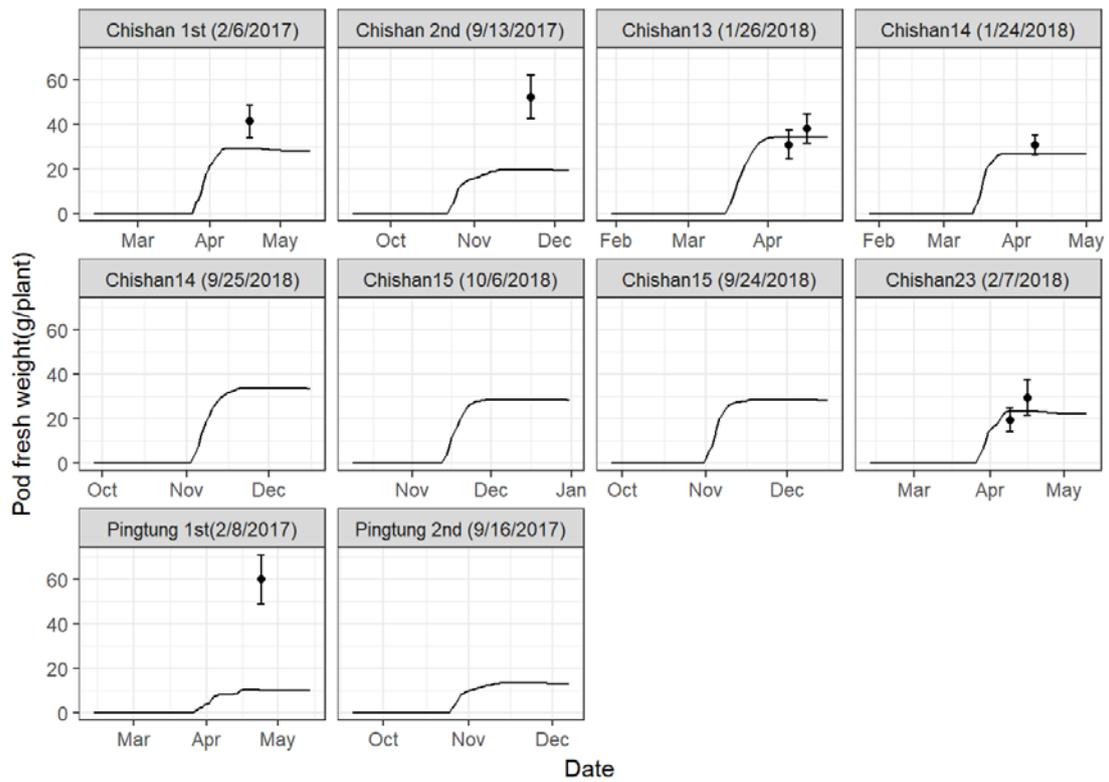
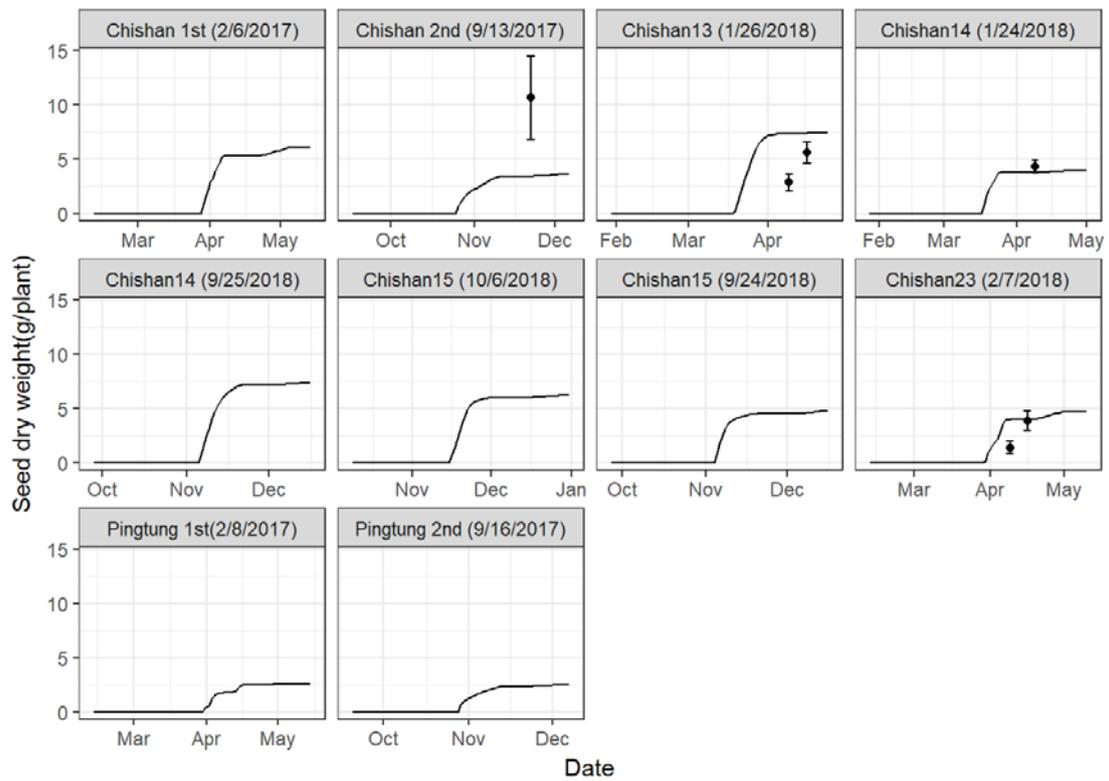


圖 16. 毛豆高雄 9 號籽粒乾重(上圖)與豆莢鮮重(下圖)模擬與實際調查結果比較。