

作物模式化的意義及展望

The Meanings and Outlook of Crop Modeling

呂秀英

Hsiu-Ying Lu

台灣省農業試驗所農藝系試驗統計室副研究員

Statistician, Experimental Statistics Research, Department of Agronomy,
Taiwan Agricultural Research Institute.

通訊處: 台灣省台中縣霧峰鄉中正路 189 號

電話: (04)23302301-125

摘 要

作物模式化是研究作物系統、栽培管理技術及決策分析上的一種潛在有效的工具。作物模式的型態可區分為經驗模式及機制模式兩大類，兩者的作用及效能大不相同。但大多數作物模式則是折衷於嚴謹之機制與實用之經驗間的綜合模式。不同的需求所使用的模式也不盡相同。一個良好的作物模式，必須考量測量與模式化之間、模式成分之間、複雜性及簡單性之間的平衡性。為了使作物模式能預測資料庫範圍以外的事件，並能應用於較廣泛的作物管理階層，在模式提出之後，應該選擇在歧異的長期田間環境中進行校正及驗證。隨著電腦之快速發展及廣泛應用，衛星遙測資訊及物件導向程式可有效於作物模式的建構及管理。

Abstract

Crop models are potentially powerful tools in crop systems research, cultural management technology, and policy decision. Crop models can be divided into two types: empirical models and mechanistic models. The functions and capabilities of them are entirely different. However, many crop models are comprehensive models that represent a compromise between rigor of mechanism and utility of empiricism. A good crop model much achieves balance between measuring and modeling, between model components, as well as between simplicity and complexity. Different needs use different types of models. Crop models proposed for extrapolation of predictions and broader crop management applications should be calibrated and validated in diverse and long-term field environments. Along with the rapid development and widespread use of computers, remotely sensed information from satellites and object-oriented programming methods are useful for construction and management of crop models.

壹、前言

作物模式化為動態作物系統的計算模擬，起源於 30 年前系統分析及現代計算機快速發展時期。動態(dynamic)一詞用來表示作物模式在環境內對時間(以日最常見)之變化。模式化則是科學的一部份，能有效協助處理作物的複雜性，其發展至今，就好像人類的生活史一樣，從幼年期開始，粹以循規而簡單之數學模式來作為混沌不明且複雜之田間試驗的代用品，到少年期則增加了模式的複雜性及電腦上的使用，期望能夠詳細地描述出作物系統的生物與非生物之間的作用。隨著對作物管理決策分析上的需求，再加上作物科學及電腦技術之進展，更激發了作物模式化的成長及發展潛力，現在已經發展到一個充滿著活力卻頗為紛亂及多挑戰性的青春期階段。綜觀目前已建立的作物模式，絕大多數只能稱之為一種啟發式的工具，還不足以作為事實的代用品⁽⁵²⁾。這是因為作物本身是一極為複雜且異質的系統，通常很難經由試驗進行操控，但若使用親和力高的模式可在教學、研究及管理規劃上達到重要的啟發作用。這些模式可冀望於未來成熟期中，利用事實根據來進行模式修正，以使其更具有實用價值。雖然作物模式無法完全詮釋所有在作物生產上的問題，但若純粹站在學術研究及應用立場上，建立合理的模式確實可助於瞭解作物系統在許多相關不繁瑣情況下所發生的作用及反應。

貳、為什麼要建立作物模式

數學模式依 France and Thornley⁽²⁵⁾的定義為代表一系統行為的一個或一組方程式。然而，作物系統使用模式的目的是何在？Whisler *et al.*⁽⁵⁸⁾提出三個理由：(1)用來協助解釋試驗的結果，(2)作為農業研究的工具，

(3)作為農業栽培者的工具。Boote *et al.* ⁽¹²⁾則認為作物模式化現行及潛在的用途為：(1)研究知識的綜合體(合併 Whisler 等人的前兩項理由)，(2)作物系統的判斷管理，(3)作為決策分析。作物模式早已作為研究工具，但是只有在最近發展的模式看來才是用作栽培者判斷支援的工具，至於一些用在決策分析的模式則大多是關於氣候變化、水分利用、土質劣化、土壤養份及殺蟲劑等領域之研究。現簡單說明如後：

(一)以模式作為一種研究工具

許多已建立的作物模式或作物模式之某部份常有助於研究者瞭解一個農業作物種植系統的運作，例如土壤水份流通，氣孔控制或肥料營養轉移等方面之模式。利用模式之建立，將這些過程量化，除了可用來瞭解農業系統之外，多少也能預測該系統倘若作了某些變動，它將會發生怎麼樣的變化。不過模式建立之初，多半只是能反映出開發者本身的興趣及能力強度而已，對於不感興趣或欠缺的知識領域就難免會顯得較為薄弱，以致於降低了該模式的實用性及價值。對此，若利用各種學科之共同參與以及多機構之團隊合作方式，當有利於該模式之充實。

1.綜合研究上之經驗知識

利用作物模式來綜合研究之經驗知識，尤其有效^(56,58)。研究者可以使用作物模式來檢定科學擬說。所檢定之擬說不一定是預測最終產量的能力，也可以是預測中間過程的能力，例如對日平均或瞬間的植冠同化作用、呼吸作用、蒸散作用等之預測。

2.整合不同學科領域

整合各方學科知識與其間關係的模式，其應用價值絕對高於以單一學科所獨立建置者。若能有效整合各學科的研究工具，將可建立使用者導向的模式。

3.試驗的憑証

試驗資料組織化為模式化的一部份，與其將資料檔案深藏於檔

案櫃中，不如將它變成永久的憑証資料，才會對研究者有所幫助。

4. 協助遺傳改良

當作物模式變得愈是機制化及複雜化，則可用來模擬植物的遺傳特性，以協助遺傳改良，例如大豆^(14,23,60)、花生^(11,21)、棉花^(33,34,58)遺傳性狀之敏感度分析。利用模擬分析以設計特定環境下的植物改良型態^(20,28,38)、選擇適應於目標環境之基因型⁽⁵¹⁾等。

5. 產量歧異分析之氣候及非氣候效應

例如利用生長模式來評估氣候對產量潛勢之影響^(3,40)、將實際及氣象潛在產量之間的產量歧異予以數量化並探究其非氣候上之相關原因^(3,13,54)、評估作物產量在特定區域隨時間改變之原因並區分產量之氣候潛勢及技術潛勢⁽⁸⁾。

(二) 作物系統管理

許多作物模式是用來評估栽培管理、肥料施用、水份利用、土質劣化控制及殺蟲劑使用的最佳策略。藉由模式對資料的驗證，可以使耕種者成為更好的觀察者。縱然作物模式具有這方面的潛力，但一般栽培者卻很少應用於栽培前或栽培期間之決策管理。目前只有極少數的作物模式是因為受到研究群之強烈支持，才能被引用於農場決策分析中。

1. 協助栽培管理

很多作物模式是藉由產量對某區域長期之氣象記錄、最適栽種日期、栽植密度、行距、品系選擇、不同土系之施肥等的反應，以評估生產風險^(3,22,31,39)。

2. 協助水份及氮肥管理

這類作物模式是經由長期之氣象、土壤水份及土壤氮肥平衡成份的資料來選擇最適的水份及氮肥管理策略^(3,27,31,53,55)，並用以決定灌溉設施之投資報酬率⁽⁹⁾。

3. 幫助生產者在栽培期間作決定

倘若生產者已取得現有氣象站的氣象資料，則作物模式可根據熱單位累積、結霜期預測及害蟲活動等，來協助進行灌溉或病蟲害控制之規劃^(7,10,47,58)。

4.地區特殊性耕作

將一田區(或農場)分成許多小單位並各施以最佳管理，可使該田區獲得最佳的生產及收益，此即所謂的地區特殊性耕作(site-specific or prescription farming)。例如，近來 IBSNAT 作物生長模式與地理資訊系統(GIS)相結合，針對區域尺度及含小單位之單一田區，產生預測產量圖譜^(24,30,32)。

(三)決策分析工具

1.有助於決定最佳管理以降低肥料及殺蟲劑滲漏、土質劣化

EPIC 模式為這方面成功的實例^(61,62)，但其應用上仍有待改進，應該也要考慮水質效應的重要性⁽¹²⁾。

2.產量預測

收穫前之大面積產量預測是政府機關、商品公司及生產者所感興趣的。一些模式則嘗試解決這方面的需求，絕大多數是利用過去氣象資料來呈現此方法。當實際氣象逐漸取代預測氣象，則產量預測的不確定性亦隨之降低，但 Hodges *et al.*⁽²⁶⁾認為如土壤氮素之有效性等的剖面特性，也是大面積產量預測的一個主要輸入限制因子。雖然這些作物模式已日趨成熟，其有效性並已經過無數前導測驗加以證實，但迄今各國(包括美國在內)的農業決策單位卻仍未予以採納，反而繼續利用田間取樣方法來進行作物產量預測⁽¹²⁾。這是否意味著現有的產量預測模式仍有待修正，值得深思。

3.評估氣候變遷之效應

一些作物生長模式已用來評估全球氣候變遷之影響，如 CO₂ 濃度增加、氣溫升高及降雨型態改變等^(2,17,46)。

參、作物模式的型態

模式可以分為觀念上、物理上及數理上之三種不同型態⁽¹⁾。譬如我們對這世界如何運作及為甚麼會發生這些事都擁有個人的觀感，因此所檢定的每一個假說背後都有一個觀念模式存在。然而早期的工程師已經在使用物理模式，例如盆栽植物常被作為田間作物的物理模式，不過生物學家卻極少利用。至於數理模式在目前已相當普遍，而且其計算工具也已由機械計算機、電子計算機演變成現在的電腦。

數理模式可被劃分為許多不同方式，但主要區分為兩大類—經驗模式(empirical models)及機制模式(mechanistic models)。經驗模式，有時候稱為相關(correlative)或統計(statistical)模式，為描述變數之間的關係，但不涉及與這些變數有關的過程。機制模式，或稱為過程層次(process-level)、解釋模式(explanatory models)、模擬裝置(simulators)，為企圖明確地解釋變數間之因果關係。因此，經驗作物模式是由一些武斷選定的函數所組成以套配田間或實驗室的測量值，而機制作物模式在所有量化過程中均必須有一個健全的物理或生理作為基礎。

模式可以不同的解決層次體系來建構，其常用的時間架構及資料庫種類亦不盡相同，如圖 1 所示⁽⁵⁸⁾。較低層次的模式使用較小的時間架構，且需要在嚴密定義條件下所執行的詳細試驗資料，例如建立一個分子、有機體或細胞模式，必須以秒為時間架構，並在嚴密控制下的實驗室內進行試驗。低層次模式多屬於個別過程的模式，但這些模式可再聚集形成高層次模式。低層次模式是以數理函數表示出與變數有關的已知或假設之機制並解釋所觀察到的行為，因此以機制模式為主。較高層次模式所使用的時間架構通常較大，如小時、日、月等，當建構一個作物模式的目的是不在強調對因果關係之瞭解，而僅在描述變數間之關係，則經驗模式較為有利；反之，當欲在作物層次上進行預測時，則可以併入植物及器官之過程模式於作物模式中，使其成為作物模擬裝置，如此機制量

便隨之增加，不過一旦機制量增加，對詳細試驗資料的需求也會相對增加。

模式中的機制量是決定模式利用性的一個重要因子。雖然機制無法量化，但可以根據作物模式的作用來加以分類，不同作物模式的型態及其作用如圖 2 所示⁽⁵⁸⁾。圖中最左邊為完全經驗模式，一般是利用複迴歸統計分析法來概述資料(SM)及進行內插預測(IP，即在資料基礎範圍內的預測行為)；隨著介入之機制量增加，模式可被定位為圖中右邊的機制模式，使用機制模式才能進行外插預測(EP，即在資料基礎範圍外的預測行為)及協助研究管理(RM，即在我們知識基礎上的確認教育)。圖中第三個向量為綜合性(comprehensiveness)，當模式中之機制量增加時，綜合性也隨之增加，模式必須同時是機制性及綜合性的，才能用來解釋試驗結果(IN)。

雖然機制模式與經驗模式之間的區分相當明確且重要，但事實上絕大多數的作物模式則是包含了機制及經驗之混合體⁽⁵⁸⁾，即在嚴謹與實用之間通常都是以折衷方式來表達⁽³⁷⁾。

肆、作物生長模式的種類

複迴歸產量模式(multiple-regression yield models)常被應用於大面積產量之估算，相當容易發展及使用，但無法定義因果關係，屬於一種經驗模式。複迴歸產量模式的特性是靜態的區域性產量估計及預測，這種經驗關係不能外插至所推導檢定的條件之外，所以在不正常年度裡無法作準確的估計。因此經驗模式之關係式一旦建立後，模式的校正(calibrate)及驗證(validate)便非常重要。

生長模擬模式(growth simulation models)是由一些代數式所組成，每一個各包含一組憑經驗所決定的常數。所謂「模擬」的意思，是模式表現得像是一個在栽培期間葉、莖、根等逐漸成長的實際作物。作物模擬

模式不僅是在預測某些像生物量或產量的最終狀態，也用於預測作物狀態隨時間之動態變化，例如預測棉鈴數隨生長季節之變化，或在某深度下土壤水份含量或溫度隨季節之變化等。作物模擬模式可再區分為兩群：一為期望能促進對作物之生理及環境交感的瞭解(科學性)，另一則期望能提供給耕種者健全的管理忠告或給予決策者周全的預測(工程性)。不同的需求所使用的模式也不盡相同。科學性作物模擬模式在分析方法上強調生理及因果性，因此屬於機制性，這樣的模式可以對模式開發者提供有效的自我教育；最佳的工程性作物模擬模式是建立在植物行為與主要環境變數間強健的經驗關係上，其本質屬於經驗性，因此僅能在測定範圍內有效地提供給栽培者健全的管理忠告，而不應該期待這種模式可以應用在所測定之環境變數範圍以外；至於其他介於科學性及工程性之間的模式，除了自我教育之外，甚少用作他途。

生物氣候模式(phenological models)是用來預測作物各生長階段之發育過程。這些預測一般是以累積熱單位(accumulated heat units)為基礎，而不一定要以機制觀念為依歸⁽⁵⁸⁾。作物氣候模式可以靜態或動態的形式存在。將氣象變異對作物產量之影響予以模式化的基本方法有兩種⁽³⁶⁾：(1)生理或因果法，其係就某特定時段內發生於植物 - 土壤系統及在植物的瞬間大氣 - 土壤環境下對生物或生理過程的詳細瞭解為基礎；(2)統計或相關法，其主要係應用統計技術(大部份為迴歸)於一地區之產量統計量樣本及同地區之氣候或氣象資料樣本上。因此，作物氣候模式可以是(1)機制型作物生長模擬裝置(mechanistic-type crop growth simulators)，利用簡化之數理表示來描述植物在物理、化學及生理機制上的複雜生長反應；(2)以統計為基礎的作物氣象分析模式(statistically-based crop-weather analysis model)，以說明作物對所選之氣象變數隨時間(或作物發育)的反應；(3)經驗統計模式(empirical-statistical models)，應用統計技術(大部分為迴歸)利用一個以上的變數來表示與季節性產量或其他作物統計量在統計上最有關係的氣象因子、土壤特性或時間趨勢^(5,6)。

過去學者多著重於作物模擬裝置之發展，但迄今我們已經了解到經驗模式通常較作物模擬裝置更能解釋試驗的變異性。但無可否認，作物模擬裝置在作外插預測時，具有更大的潛力⁽¹⁶⁾，同時更可利用到特定植物過程上之知識。固然作物模擬裝置的優越性目前已逐漸受到公認，但由於其相當複雜，需要輸入詳細的生理學及氣象學等之資訊，因此作物模擬裝置的進展及利用性一直讓人踟躕不前，相形之下經驗模式就俯拾皆是。但是很多學者卻常常將經驗模式與模擬裝置混為一談，實際上其所建立的模式是一種經驗性的模式，但卻錯誤地用來解釋因果關係或進行外插預測。為了使作物模式的效用更為廣泛，以解決更多層面的問題，建立一個同時包含高度機制性及綜合性的作物模擬模式是有其必要性。

伍、作物模式化必須要達到的平衡性

回顧作物模式化的發展歷史，主要是由生物學、物理學及工程學方面的專家介入其中，而各以其特有的方式來發展作物模式⁽³⁷⁾。物理學家深信宇宙萬物均遵循於簡單的一般法則，而作物歸屬於宇宙的一部份，因此作物模式應該以簡單的代數來建構；工程學家一開始抱持著與物理學家相同的觀點，但為考慮安全係數，而將確實且必要之變數及參數納入模式中；生物學家則相信世界上充斥著不確定性而且任何事物都有差異，因而不斷地增加模式內所含的變數量，例如通常將植冠上每一葉片都視為一個有它自己公式組的分離有機體。因此，一個良好的作物模式應該能將各學科專家所有最好的特色組合在一起，以獲致模式之平衡。

作物模式化應該考量以下三種型態的平衡性：

(一)測量與模式化之間的平衡

必須經常將實際試驗所得之資訊加入模式中以修正其結構或參數值，這種程序稱為校正。此與準確度之間有直接關聯，故經由校正程序可激發對模式使用的信心，但相對地亦須明白校正並不代表就是

在對模式作保證。

(二) 模式成分之間的平衡

作物生長模式化中顯然最欠缺的是這種平衡性，即過程之間的平衡，例如葉片截取光線與根部吸收水份能力之間的平衡、同化物質生產與其後來至器官再分配之間的平衡等。早期在 1960 至 1970 年間，作物模式主要集中在蒸散作用及光合作用對氣候及土壤的關係探討，後來則著重於植冠光線截取的複雜模式，而目前趨勢似乎偏向於將簡單的光線模式聯結至以葉含氮素為主要變數的光合作用模式⁽⁵⁰⁾上。然而現有的模式仍未能描述出其他重要成份，例如在不同發育相控制同化物質分配至器官的原理及過程，以及根部水分及養分吸收與其生長、構造及活動間之關係等⁽³⁷⁾。在未解決這些問題之前，所建立的作物生長模式仍然不夠完整成熟。

(三) 複雜性與簡單性之間的平衡

模式開發者必須使其工作簡化到其他人都能理解的程度，但又必須使模式足夠複雜到能廣納各方知識，因此應該在能探明現有問題下儘可能使用最少的代數，但同時也必須使模式結構能適應於更多新觀念及高次交感以為改進發展用。一個特定模式所需複雜性的程度，決定於模式欲解決之問題及目的，同時也與收集資訊及模式建立檢定可用的時間有關。

陸、簡單及綜合作物模式的特性及限制

作物模式化的發展趨勢應該走向簡單的通用模式，還是綜合的機制模式？至今仍未有定論。

簡單的作物模式需要較少的輸入因子，而且較容易被理解及使用。Ritchie⁽⁴⁹⁾認為模式應儘可能簡化，兼具作用上之平衡，且應該使用合理之經驗論以納入一些不同組織層次之資訊。但過度簡化可能會使模式的

效能受到限制，以致無法描述出基因型間的差異，因而侷限於生理過程層次上之應用，同時也難以表達出對廣域栽培管理措施下之反應。因此，有時候為了使簡單模式可以四海皆通，必須在各個新地點再作校正，以期能充分適應於更多的測量反應，但如此一來模式將往往會變成非線性迴歸的型態，且所配合的參數會隨地點及年度而異，反而導致該模式在其他地區幾乎不具有預測能力^(42,43)。

一般而言，綜合性機制模式較能將基因型與環境交感之差異性予以模式化，且包含實質的回饋機制，並較能控制栽培管理條件下之變數。但由於綜合性機制模式比較複雜，所以較難以被瞭解及應用。通常這種模式需要輸入較多的資訊，但是當某一特定機制被不正確模式化時其輸出結果會不穩定。另外，倘若綜合性模式所需要的某些輸入資訊不容易被測量時，例如相對濕度或最初之土壤氮狀態等資料，就研究目的而言，我們可以特別去檢測這些資料，但就生產者實用立場而言，要求檢測這些輸入資料顯然不切實際而不可行，因此這樣的綜合性模式便不適用於田間場合。

研究者相信有一個同時是綜合且簡單的模式存在。但在顧及設計、尺度及複雜性均必須符合需求的情況下，沒有一種模式可以在所有用途上均表現最佳。就管理最佳化而言，研究者偏好少數參數的簡單模式；至於遺傳性狀評估，則需要特定性狀的機制模式。在某些場合，可能會因為簡單模式中之參數不易測量或是因為簡單模式中之效應被混淆了，故必須將複雜模式發展成好的簡單模式。除了用途需求上的考量以外，模式之使用也常受制於輸入資料的精確性及有效性。模式的輸入限制包含：(1)取得資料之成本，例如氣象服務或研究裝置之投資應用；(2)空間變異，例如某一田間的土壤特性變動相當大；(3)某些輸入所需之技術知識，例如計算水分釋放曲線；(4)時間變異，例如病蟲害再度猖獗；(5)資料品質，例如校準不正的感應器。

但無論如何，當模式開發者一再強調其所建立之模式的效能有多好

時，也應該坦白地描述其模式可能的限制。例如必須告訴使用者這個作物模式的設計目的實際上是要反應些甚麼？有甚麼樣的因素會影響模擬結果？在模式化的過程中設定了哪些假設？有哪些情況是模式所忽略或沒有反應出來的？就一個特定的模擬比較而言，有甚麼田間發生的事件或許是模式沒有說明到的？即使可以透過參數矯正來使模式適應於某一既定因素，還是必須誠實地指出：模式確實可以激發出實際上的反應，或者只是提出新的見識而已？但最終應該停留在引用假設內。

柒、模式檢驗

(一)模式的校正及驗證

校正是修正某些模式參數或關係以使模式能運作於該一個或數個地區。驗證是決定模式是否能適用於整個獨立的資料集，亦即它是否能精確地預測生長、產量及過程，對此 Whisler *et al.* ⁽⁵⁸⁾認為驗證工作應該是將已確認之模式的預測值與除了用來建立及校正模式以外的觀測值互作比較，並判斷及矯正模式的誤差，直到可符合目標為止。其實模式驗證是一種連續不斷的過程，一旦驗證結果顯示出模式在某些場合的預測效果較差時，模式開發者就不可能不再去修正模式中的誤差，於是模式又變成是一個有待新獨立測試資料來驗證的新模式。因此除非不去驗證模式，否則一旦開始便得永續下去⁽⁴¹⁾。然而，當模式驗證工作一再重複並與獨立資料互做比較後，使用者會對該模式逐漸建立起信心^(15,19)。Reifsnyder⁽⁴⁸⁾提醒模式開發者及使用者：「無論如何謹慎地根據物理原理去建構，模式也只是擬說而已」。模式應該有明確的假設前提，並產生可以測試的反應。Philip⁽⁴⁵⁾提出警告，倘若利用這些模式於教學中，卻沒有正視到這些程式其實仍繼續在進行中，而讓後學者深信這些模式是真理，這是一件極危險且謬誤的事

(二)在歧異環境中檢驗模式

倘若模式開發者希望能將模式應用於界定環境或外插於歧異環境時，則有必要在這些環境中進行檢驗。此確實對模式的應用性非常重要，但對擬說檢定工作則不一定需要。根據經驗，作物模式可在同一田間地點不同年度間表現良好，然而僅在同一地點檢驗模式是一種相當薄弱的檢定，這樣的模式仍然偏向於地區特殊性，因此縱然模式的驗證有時候相當困難，但為了使所提出之作物模式能應用於較廣泛的作物管理，仍應選擇在歧異的田間環境中進行檢驗。

(三) 敏感度分析(sensitivity analysis)

改變模式中某一個別輸入變數的值，而其他則保持固定，此稱為敏感度檢定分析。一般而言，大多數作物模式對作物及氣象變數之改變都很敏感，如植物生長過程對氣溫最為敏感，其次是土壤參數。

捌、長期田間試驗資料在作物模式化上的價值

或許有些學者認為可以先利用控制環境資料來建立作物模擬模式，然後再以田間資料來進行模式的參數矯正；但是參數矯正是一項非常困難且危險的步驟，一旦參數被武斷地矯正來配合田間資料，模式機制性的特性將因而喪失。在此情形下，這種模式未必較複迴歸模式適宜。使用控制環境資料來發展作物模式，卻期待可以模擬田間的作物是不智的作法。因此，控制環境資料應該只是用來建立隨變數與自變數間之迴歸關係，然後必須再使用田間資料來矯正這些關係參數。故欲瞭解作物生長的過程，一定得有足夠的田間資料。

大部份用來驗證作物模擬裝置的資料以及某些在其模式發展上所使用的資料，都源自於短期田間試驗，短期田間試驗的顯著優點為觀測值是在科學家控制處理之下所獲得。然而，短期試驗存在以下兩個問題⁽¹⁾：(1)可能會附帶著從前項試驗而來的肥料、殺草劑及類似東西，(2)連續施用處理可能造成土壤條件之改變，而這些改變日後才會顯現出來。因此

在發展作物模式化時，應該使用長期的田間試驗資料。但是如果長期田間試驗只收集作物的最終產量及產量構成要素資料，而無法顯示出植物生長發育及其導致產量的事件順序時，反而不適用於作物模擬裝置的驗證工作。

田間資料可用來驗證作物模擬裝置，相對地作物模擬裝置也可用來解釋長期研究之結果，例如可利用模擬裝置來決定有多少產量之年度間的變異是由於氣候及土壤條件變化所引起，然後再將這些可能變因的假設計於模擬裝置中以進行檢定。使用作物模擬裝置來檢定田間資料的變因假設，以及利用田間資料來驗證並改善模式，是一種反復改良 (iterative) 的過程，即變因假設被納入作物模擬裝置後，再以田間資料作驗證，由驗證結果顯示出原來假設的缺陷，於是引發新假說的提出及檢定。因此，試驗與模擬兩者對瞭解作物的成長都同樣重要。

由於作物模擬裝置通常都是以單因子試驗資料建立，因此經由多因子試驗資料最有可能呈現出其缺失。但不能使用開發作物模擬裝置之前的早期資料，而應該使用未來新增型態之資料來進行參數矯正及驗證工作。

玖、電腦效能在作物模式化發展上的潛力

利用線性、非線性及複迴歸程式之套裝軟體來分析資料，通常即很容易地建立經驗模式。然而這些經驗模式只是在描述試驗資料，對過程的瞭解卻毫無幫助。例如選擇使用複迴歸模式來描述資料時，多半忽略各種已知環境因素是如何影響作物⁽¹⁾。事實上就生理學家或農學家的觀點來看，納入一個質或量上均不具農業意義的迴歸係數，會讓經驗模式變得毫無價值⁽²⁹⁾。Waggoner⁽⁵⁷⁾在評論用以預測作物對全球氣候變遷之反應的經驗模式時，說到：「幸運地，在我的模式中之係數都具有農業上的意義。」但是在過去及現在很多已建立的模式就未必如此，這些模式

或許對資料庫範圍內之內插預測很有幫助，但卻不能運用於資料庫範圍以外⁽¹⁶⁾，尤其是含有交感作用的非線性模式，譬如用以評估作物對全球氣候變遷之反應的模式⁽⁴⁴⁾。貿然將非線性模式運用至測定範圍之外，而推論可預測事件的發生，是一種不確實且危險的行為。

近來由於微電腦之普及，作物模式愈來愈複雜化，其不再只侷限於經驗模式，而發展出具有農業意義及外插預測潛力的模式。這類的模式將變成機制性，即可以模仿在土壤、植物及大氣上之過程，同時確保模式具有農業意義且提供更好的機會以進行資料庫範圍外之預測工作。藉由作物模擬裝置，也將引用更多的知識以促進未來模式之發展。

大面積產量估計會隨著取樣大小增加而提高準確性，因此在一個操作性產量估計程序中，欲獲得複雜作物生長模式所需要的詳細之地區土壤、氣象及管理資料，並不容易。對此，Arkin *et al.*⁽⁴⁾，Wiegand *et al.*⁽⁵⁹⁾ 及 Mass⁽³⁵⁾利用衛星遙測資訊(remotely sensed information from satellites)來促進作物模式產量估值的精確度。

建立及維護一個大型且複雜的農業整體系統(whole-system)，所需的費用相當昂貴。模式的複雜性反映出系統的複雜性，因此這是模式開發者所無法避免的。然而，藉由有效的模式化工具之支援，可有助於模式複雜性之管理並降低費用，例如 van Evert and Campbell⁽⁵⁶⁾將物件導向程式(object-oriented programming, OOP)應用在農業整體系統模式之建立及有效管理上，以最少且具明確定義的使用者介面予以概述，而發展出一種作物系統模式 - CropSyst。物件導向程式法較傳統程序法具有以下優點：(1)允許整體系統模式內及其間的成分模式互換，(2)毋須重寫既有之代碼(code)而能增加模式構築，(3)可維護某一成分一個以上的模式，(4)能根據所有指定的參數及執行模式的成分來建構一個使用者親合力介面(user-friendly interface)。在 CropSyst 模式中所使用的成分(或物件)，包含時間、氣象、作物、土壤、作物殘留物、耕地、土質劣化、蟲害族群及遷移、殺草劑施用、種植、作物輪作及輸出結果。利用物件導向程式來

建構及維護農業系統模式，看來是一種必然的發展趨勢。

拾、結 論

有關植物及其所處環境之交感作用的機制結構，所知仍相當有限。作物生理學家及農學家未來將面臨兩種主要挑戰：一為如何展現那些隱藏的結構，屬於一種科學挑戰；二為利用已知的知識來改善農業產業之管理，屬於一種工程挑戰。兩者之間的區分十分重要。最佳科學模擬模式的目標是屬於質的方面，在經過不斷的探索及嘗試失敗後，可以激發對作物之運作及其與環境之交感的思考方向。而農業(工程)模擬模式是希望透過精確的預測以建立可信賴的忠告。倘若將兩者目標混為一談，研究者的努力將會一敗塗地。作物生長模式是在研究作物管理技術及決策分析上之一種潛在有效的工具，但其仍會被錯誤表示、誤用及誤解，作物模式開發者及使用者都應注意這些可能的誤用及限制，並應瞭解模式是以各種不同的方式呈動態表現。然而作物模式化絕對不是一種毫無效果的課題，建立模式能促進瞭解以激發新的試驗及理論工作，並且可以用來解釋不同環境下田間試驗的結果，在確實小心下並能用來改善管理或降低風險。如果模式開發者能將模式壓縮，移去一些干擾的成份，那麼作物模式將會變得更加穩健明瞭。

參 考 文 獻

1. Acock, B., and M. C. Acock. 1991. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. *Agron. J.* 83:56-61.
2. Adams, R. M., C. Rosenzweig, R. M. Peart, J. T. Ritchie, B. A. McCarl, J. D. Glyer *et al.* 1990. Global climate change and US agriculture. *Nature(London)* 345:219-224.
3. Aggarwal, P. K., and N. Kalra. 1994. Analyzing the limitations set by

- climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat: II. Climatically potential yields and management strategies. *Field Crops Res.* 38:93-103.
4. Arkin, G. F., C. L. Wiegand, and H. Huddleston. 1977. The future role of a crop modeling in large area yield estimation. In: *Proc. Crop Modeling Workshop*, pp. 87-116. USDC-NOAA-EDIS-CEAS, Columbia, MO. 3-5 Oct. 1977. USDC-NOAA-EDIS, Washington, DC.
 5. Baier, W. 1973. Crop-weather analysis model. 1. Summary. *Int. J. Biometeor.* 17:313-320.
 6. Baier, W. 1979. Note on the terminology of crop-weather models. *Agric. Meteorol.* 20:137-145.
 7. Batchelor, W. D., J. W. Jones, K. J. Boote, and H. O. Pinnschmidt. 1993. Extending the use of crop models to study pest damage. *Trans. ASAE* 36:551-558.
 8. Bell, M. A., and R. A. Fischer. 1994. Using yield prediction models to assess yield gains: A case study for wheat. *Field Crops Res.* 36:161-166.
 9. Boggess, W. G., and J. T. Ritchie. 1988. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. *J. Prod. Agric.* 1:116-122.
 10. Boote, K. J., W. D. Batchelor, J. W. Jones, H. Pinnschmidt, and G. Bourgeois. 1993. Pest damage relations at the field level. In: *Systems Approaches for Agricultural Development*. (eds.) de Vries, F. P. *et al.* pp. 277-296. Vol. 2. *Proc. Int. Symp.*, Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
 11. Boote, K. J., and J. W. Jones. 1986. Applications of, and limitations to, crop growth simulation models to fit crops and cropping systems to semi-arid environments. In: *Drought Research Priorities for the Dryland Tropics*. (eds.) Bidinger, F. R. and C. Johansen. pp. 63-75. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, AP 502 324, India.
 12. Boote, K. J., J. W. Jones, and N. B. Pickering. 1996. Potential uses and

- limitations of crop models. *Agron. J.* 88:704-716.
13. Boote, K. J., J. W. Jones, and P. Singh. 1991. Modeling growth and yield of groundnut: State of the art. In: *Groundnut: A Global Perspective*. pp. 331-343. Proc. Int. Workshop, 25-29 Nov. 1991, Patancheru, India. ICRISAT, Patancheru, AP, India.
 14. Boote, K. J., and M. Tollenaar. 1994. Modeling genetic yield potential. In: *Physiology and Determination of Crop Yield*. (eds.) Boote, K. J. *et al.* pp. 533-565. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
 15. Burk, T. 1986. Growth and yield model validation: Have you ever met one you liked? In: *Data Management Issues in Forestry*. (eds.) Allen, S. and T. M. Cooney. pp. 35-39. Proc. Comput. Conf. and 3rd Annu. Meet. For. Resour. Syst. Inst., Atlanta, GA. 7-9 Apr. 1986. The Institute, Florence, AL.
 16. Chanter, D. O. 1981. The use and misuse of linear regression methods in crop modeling. In: *Mathematics and Plant Physiology*. (eds.) Rose, D. A., and D. A. Charles-Edwards. pp. 253-266. Academic Press, London.
 17. Curry, R. B., J. W. Jones, K. J. Boote, R. M. Peart, L. H. Allen, Jr., and N. B. Pickering. 1995. Response of soybean to predicted climate change in the USA. In: *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. (eds.) Rosenzweig, C. *et al.* pp. 163-182. ASA Spec. Publ. 59. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
 18. de Wit, C. T., J. Goudriaan, H. H. van Laar, F. W. T. Penning de Vries, R. Rabbinge, H. van Keulen *et al.* 1978. Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops. *Simulation Monographs*. Halsted Press, Wiley, New York.
 19. Dent, J. B., and M. J. Blackie. 1979. *Systems Simulation in Agriculture*. Applied Science Publ., Barking, Essex, UK.
 20. Dingkuhn, M., F. W. T. Penning de Vries, and K. M. Miezán. 1993. Improvement of rice plant type concepts: Systems research enables interaction of physiology and breeding. In: *Systems Approaches for*

- Agricultural Development. (eds.) de Vries, P. F. *et al.* pp.19-35. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
21. Duncan, W. G., D. E. McCloud, R. L. McGraw, and K. J. Boote. 1978. Physiological aspects of peanut yield improvement. *Crop Sci.* 18: 1015-1020.
22. Egli, D. B., and W. Bruening. 1992. Planting date and soybean yield: Evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. *Agric. For. Meteorol.* 62:19-29.
23. Elwell, D. L., R. B. Curry, and M. E. Keener. 1987. Determination of potential yield-limiting factors of soybeans using SOYMOD/OARDC. *Agric. Syst.* 24:221-242.
24. Engel, T., G. Hoogenboom, J. W. Jones, and P. W. Wilkens. 1995. AEGIS/WIN: A spatial agricultural and environmental decision support system for windows. ASAE Pap. ASAE, St. Joseph, MI.
25. France, J. and J. H. M. Thornley. 1984. *Mathematical Models in Agriculture.* Butterworths, London.
26. Hodges, T., D. Botner, C. Sakamoto, and J. M. Haug. 1987. Using the CERES-MAIZE model to estimate production for the U. S. Cornbelt. *Agric. For. Meteorol.* 40:293-303.
27. Hood, C. P., R. W. McClendon, and J. E. Hook. 1987. Computer analysis of soybean irrigation management strategies. *Trans. ASAE* 30:417-423.
28. Hunt, L. A. 1993. Designing improved plant types: A breeder's viewpoint. In: *Systems Approaches for Agricultural Development.* (eds.) de Vries, F. P. *et al.* pp. 3-17. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
29. Laird, R. J., and F. B. Cady. 1969. Combined analysis of yield data from fertilizer experiments. *Agron. J.* 61:829-834.
30. Jones, J. W. 1993. Decision support systems for agricultural development. In: *Systems Approaches for Agricultural Development.* (eds.) de Vries, F.

- P. *et al.* F. P. pp. 459-471. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
31. Keating, B. A., R. L. McCown, and B. M. Wafula. 1993. Adjustment of nitrogen inputs in response to seasonal forecast in a region with high climatic risk. In: Systems Approaches for Agricultural Development. (eds.) de Vries, F. P. *et al.* pp. 233-252. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands
 32. Lal, H., G. Hoogenboom, J. -P. Calixte, J. W. Jones, and F. H. Beinroth. 1993. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. *Trans. ASAE* 36: 175-184.
 33. Landivar, J. A., D. N. Baker, and J. N. Jenkins. 1983a. Application of GOSSYM to genetic feasibility studies: I. Analyses of fruit abscission and yield in okra-leaf cottons. *Crop Sci.* 23:497-504.
 34. Landivar, J. A., D. N. Baker, and J. N. Jenkins. 1983b. Application of GOSSYM to genetic feasibility studies: II. Analyses of increasing photosynthesis, specific leaf weight and longevity of leaves in cotton. *Crop Sci.* 23:504-510.
 35. Mass, S. J. 1988. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron J.* 80:655-662.
 36. McQuigg, J. D. 1976. Modeling the impacts of climatic variability for the purpose of estimating grain yields. In: *Modeling Climate-Plants-Soils.* pp.4-18. Symp. Univ. Guelph.
 37. Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agron. J.* 88:695-697.
 38. Muchow, R. C., and P. S. Carberry. 1993. Designing improved plant types for the semiarid tropics: Agronomists' viewpoint. In: Systems Approaches for Agricultural Development. (eds.) de Vries, F. P. *et al.* pp. 37-61. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6 Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
 39. Muchow, R. C., G. L. Hammer., and R. L. Vanderlip. 1994. Assessing

- climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments: II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology. *Field Crop Res.* 36:235-246.
40. Muchow, R. C., T. R. Sinclair, and J. M. Bennett. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.* 82:338-343.
41. Oreskes, N., K. Shrader-Frechette, and K. Belitz. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science (Washington, DC)* 263:641-646.
42. Overman, A. R., and W. G. Blue. 1990. Estimating yields and forage N for bahiagrass production in Florida. *Soil Crop Sci. Fla. Proc.* 49:113-117.
43. Overman, A. R., S. R. Wilkinson, and G. W. Evers. 1992. Yield response of bermudagrass and bahiagrass to applied nitrogen and overseeded clover. *Agron. J.* 84:998-1001.
44. Passioura, J. B. 1996. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering? *Agron. J.* 88:690-694.
45. Philip, J. R. 1991. Soils, natural science, and models. *Soil Sci.* 151:91-98.
46. Pickering, N. B., J. W. Jones, and K. J. Boote. 1995. Adapting SOYGRO V5.42 for prediction under climate change conditions. In: *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts.* (eds.) Rosenzweig, C. *et al.* pp. 77-98. ASA Spec. Publ. 59. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
47. Rabbinge, R., and L. Bastiaans. 1989. Combination models, crop growth and pests and diseases. In: *Simulation and System Management in Crop Protection.* (eds.) Rabbinge, R. *et al.* Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen.
48. Reifsnnyder, W. E. 1989. A tale of ten fallacies: The skeptical enquirer's view of the carbon dioxide/climate controversy. *Agric. For. Meteorol.* 47:349-371.
49. Ritchie, J. T. 1989. A user-orientated model of the soil water balance of

- wheat. In: *Wheat Growth and Modeling*. (eds.) Day, W., and R. K. Atkins. pp. 293-305. Plenum, New York.
50. Sellers, P. J., J. A. Berry, G. J. Collatz, C. B. Field, and F. G. Hall. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration: III. A re-analysis using improved leaf models and new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.* 42:187-216.
51. Shorter, R., R. J. Lawn, and G. L. Hammer. 1991. Improving genotypic adaptation in crops: A role for breeders, physiologists and modellers. *Exp. Agric.* 27:155-175.
52. Sinclair, T. R. and Noam G. Seligman. 1996. Crop modeling : From infancy to maturity. *Agron. J.* 698-703.
53. Singh, U., P. K. Thornton, A. R. Saka, and J. B. Dett. 1993. Maize modeling in Malawi: A tool for soil fertility research and development. In: *Systems Approaches for Agricultural Development*. (eds.) de Vries, F. P. *et al.* pp. 253-276. Vol. 2. Proc. Int. Symp., Bangkok, Thailand. 2-6. Dec. 1991. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands.
54. Singh, P., K. J. Boote, A. Y. Rao, M. R. Iruthayaraj, A. M. Sheikh, S. S. Hundal, R. S. Narang, and Phool Singh. 1994. Evaluation of the groundnut model PNUTGRO for crop response to water availability, sowing dates, and seasons. *Field Crops Res.* 39: 147-162.
55. Thornton, P. K., and J. F. MacRobert. 1994. The value of information concerning near-optimal nitrogen fertilizer scheduling. *Agric. Syst.* 45:315-330.
56. van Evert, F. K., G. S. Campbell. 1994. A collection of object-oriented simulation models of agricultural systems. *Agron. J.* 86:325-331.
57. Waggoner, P. E. 1984. Agriculture and carbon dioxide. *Amer. Sci.* 72:179-184.
58. Whisler, F. D., B. Acock, D. N. Baker, R. E. Fye, H. F. Hodges, J. R. Lambert, H. E. Lemmon, J. M. McKinion, and V. R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40:141-208.

59. Wiegand, C. L., A. J. Richardson, and E. T. Kanemasu. 1979. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. *Agron. J.* 71:336-342.
60. Wilkerson, G. G., J. W. Jones, K. J. Boote, K. T. Ingram, and J. W. Mishoe. 1983. Modeling soybean growth for crop management. *Trans. ASAE* 26:63-73.
61. Williams, J. R., C. A. Jones, and P. T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.
62. Williams, J. R., C. A. Jones, J. R. Kiniry, and D. A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE* 32:497-511.

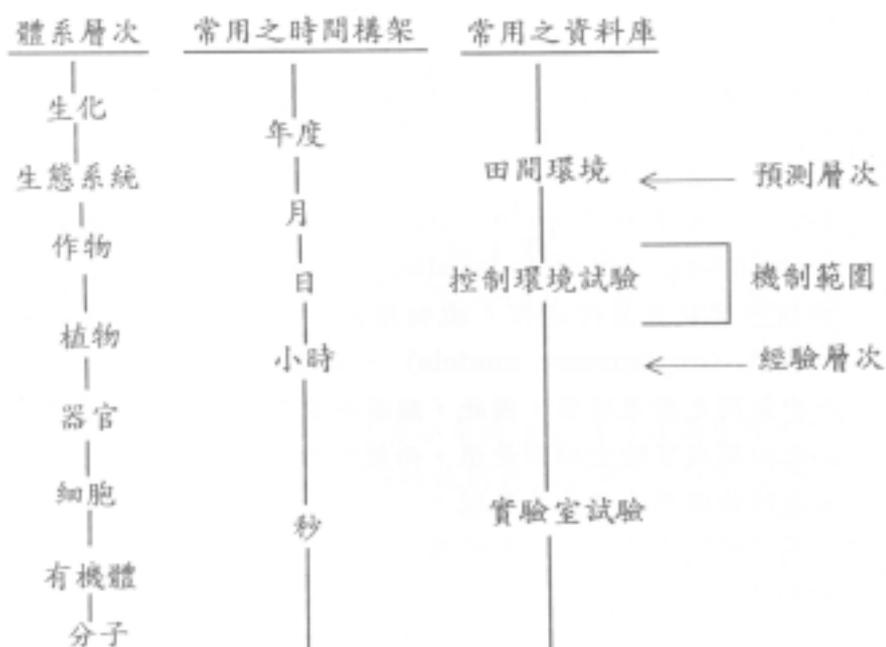
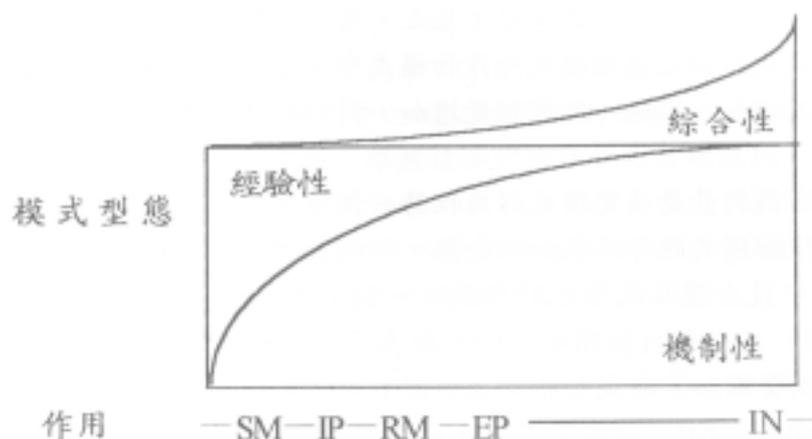


圖 1. 以解決層次為基礎之模式的一個摺疊分類規劃 (Whisler 等, 1986)。



注：SM：概述資料；IP：內插預測；RM：研究管理；
EP：外插預測；IN：試驗結果解釋

圖2. 作物模式型態及其作用 (資料來源同圖1)。