

糧食生產評估系統之建置：以水稻生產為例

陳俊仁¹ 姚銘輝^{2,*} 陳宣蘋³ 廖芳瑾³

摘要

陳俊仁、姚銘輝、陳宣蘋、廖芳瑾。2014。糧食生產評估系統之建置。台灣農業研究 63(1):84–90。

本研究目的旨在建立適用於我國之糧食生產評估系統，同時以水稻生產為例進行產量模擬與驗證。整合氣象、作物及土壤等資料庫利用 DSSAT 模式進行水稻產量模擬，並建立模式驗證機制以確認系統具有評估能力。模擬結果則以地理資訊系統進行面化，依據 5 km × 5 km 網格估算值，評估不同農業政策調整下整體水稻生產力，提供氣候變遷因應措施及農田活化等政策之依據。

關鍵詞：水稻、作物模式、地理資訊系統、氣候變遷。

前言

氣候變遷影響全球農業生產，包括影響我國糧食生產量及國外進口量，國外進口量，隨著自然災害的增加，可預期未來糧食生產量將減少，導致價格將持續飆漲，未來可能產生有錢也買不到糧食的情況，因此如何調整農業耕作方式及提高糧食自給率，以維護我國糧食安全是重要議題。Huang *et al.* (2008) 指出台灣農產業面臨諸多問題，包括糧食自給率偏低、農民年齡老化、大面積農地休耕、耕地規模小、肥料價格高漲、氣候變遷造成自然災害增加及世界糧食經濟的快速轉變等，這些因素將影響我國未來糧食的穩定供給。誠然，評估我國糧食生產潛力係作為糧食政策調整及氣候變遷因應調適策略的基礎，尤其亟待建立國家尺度之糧食生產評估系統。本研究所研發之糧食生產評估系統（圖 1），具有整合現有氣象、作物及土壤資料庫，利用作物模式評估作物生產力，並結合地理資訊系統以網格化形式呈現，以建置具有評估我國整體糧食生產力系統之評估能力。

農業生產力受許多因素影響，因此評估農業生產力必須全方面的考量，利用作物模式進行產量模擬，來評估農業生產力為常見的方法之一 (Tao *et al.* 2009; Osborne *et al.* 2013)。作物模式利用電腦以數學方式描述作物真實生長、發育及產量，當然作物模式無法涵蓋所有環境和作物間之交感，同時許多相關性是以假設性為前提，且亦非線性。Ritchie (1994) 認為作物模式有三種類型，一種為統計型模式，此種模式是由最後產量資料和區域平均天氣變數作回歸，因此這類模式僅具區域代表性，適用範圍狹窄；第二型為機制型模式，乃以數學敘述大多數作物生長及發育的過程，一般用於研究用途，因生物特性複雜，而且與環境的交感尚未完全釐清，僅由數理公式作推演有其侷限性，對於田間作物預測較不實際；第三型屬於功能型模式，以數理方程式結合田間作物經驗值用以預測複雜的作物生長過程以及和大氣、土壤環境間之交感。

目前常用的作物模式大多屬於功能型模式，包括 DSSAT (Jones *et al.* 2003)、APSIM

投稿日期：2013 年 11 月 15 日；接受日期：2014 年 1 月 27 日。

* 通訊作者：mhyao@tari.gov.tw

¹ 農委會農業試驗所農業工程組聘用助理研究員。台灣 台中市。

² 農委會農業試驗所農業工程組研究員。台灣 台中市。

³ 農委會農業試驗所農業工程組助理。台灣 台中市。

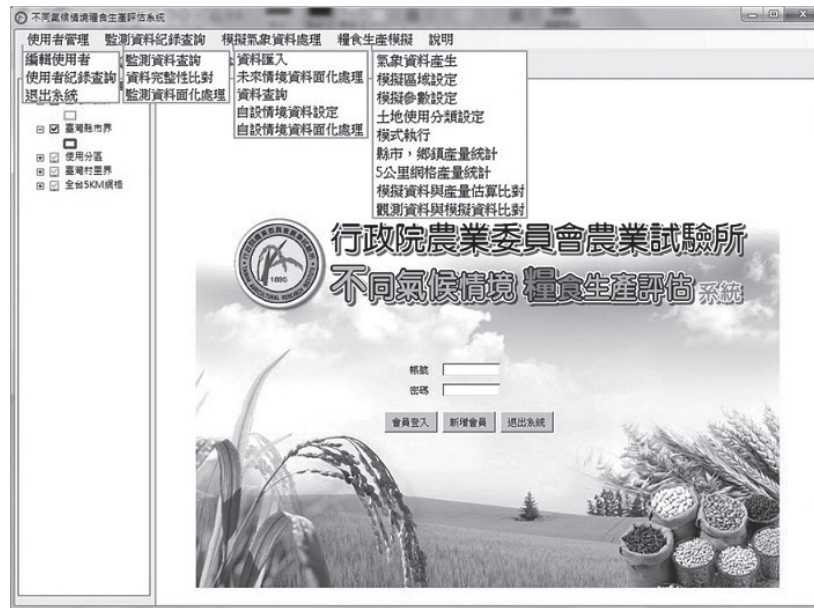


圖 1. 不同氣候情境糧食生產評估系統之畫面及功能表。

Fig. 1. The homepage and menu of the evaluation grain food production under different climate scenarios.

(McCown *et al.* 1996)、CENTURY (Parton 1996)、ORYZA 2000 (Bannayan *et al.* 2005)、EPIC (Tan & Shibasaki 2003)、STIC (Brisson *et al.* 2003) 和 DNDC (Li 2000) 等。每一種模式皆有其特殊運用目標，如 ORYZA 2000 以模擬水稻生育為主，包括 ORYZA1 (評估潛能產量)、ORYZA-W (限水生產) 及 ORYZA-N (限氮肥生產)，對於其他作物則無評估能力。EPIC 具備作物生長評估能力，特別著重於土壤沖蝕、土壤生產力及不同農田地貌管理。CENTURY 則強調在作物土壤間之營養分循環、土壤水分收支平衡及土壤有機物分解模式等。DNDC 具有評估農田溫室氣體排放估算的功能。STIC 並非為固定作物模式，而是一種作為其他模式交流的平台。APSIM 與 DSSAT 模式相近，但缺少水稻的模擬功能。

現今作物模式有許多種，其中運用最廣泛為 DSSAT 模式 (White *et al.* 2011)。該模式用於模擬均一田區作物之生長、發育、產量及土壤水分、碳及氮的變化 (Jones *et al.* 2003)，DSSAT 自 1993 年發展至今可模擬 37 種主要農作物，包括水稻、玉米、大豆、小麥及其他作物，模擬作物種類雖多，但共用土壤-作

物-大氣交感之模組。本研究所用作物模式為 DSSAT 4.5 版為綜合性模式，其所需參數甚多，包括耕地土壤特性 (質地、酸鹼度、離子含量及有機質含量等)、作物特性 (遺傳特性及生理特性) 及氣象資料。DSSAT 氣象資料輸入值為每日之最高溫度、最低溫度、日射量及日累積降雨量，施用氮肥量設定為 113 kg N ha^{-1} ，模擬過程中設定為無肥料及水分逆境。本研究室過去曾利用 DSSAT 3.0 版建立「台農 67 號」及「台中秈 10 號」兩品種之遺傳參數 (Yao *et al.* 2000)，由於新版仍沿用舊版之評估方式，因此本研究仍採用已建立之稻種遺傳參數。

材料與方法

模式開發與模擬

本研究糧食生產評估系統之開發，係採用 Visual Studio 2010 程式 C# 語言，空間資料運算採用 ESRI ArcGIS Engine 10 以上版本開發獨立運作系統。將各氣象測站之實測及模擬資料以地理資訊系統 (geographic information system; GIS) 技術進行面化，並將面化之圖資屬性資料存入資料庫。開發之糧食評估介面直

接執行 DSSAT 模式模擬功能，模擬結果之單位面積產量可和已存於資料庫中之農委會農糧署之歷年水稻坪割資料作比對。另由國土測繪中心提供之土地使用分類資料，條列各鄉鎮水稻種植面積，再由預估單位面積產量乘以種植面積得到鄉鎮總產量，累加後即可得全國水稻產量。模擬後產量值以 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 網格之 GIS 地圖方式呈現。氣象資料除現有完整觀測資料外，也預留可擴增未來氣候變遷下不同氣候情境之模擬資料，未來可依據不同氣候情境評估糧食生產量。

模式氣象資料建立

系統研發是以水稻生產區之產量面化為目標，而水稻生產受氣象影響，因此需要詳細氣象資料，而我國中央氣象局氣象觀測網能提供 DSSAT 作物模式所需氣象資料，包括日最高溫、日最低溫、日射量及日累降雨量等氣象因子觀測值之測站共 67 站，各測站均為局屬氣象站。在進行 DSSAT 模式預測結果之資料平面化工作時，為使測站在空間分佈上具有代表性，少數測站之日射量缺值部分，則由日照時數及溫度差所建立之回歸方程式推估 (Chen *et al.* 1994; Yao *et al.* 2002)。本研究氣象資料年

份取自 2006–2010 年共 5 年的資料，同時將台灣劃分為 1,568 個 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的網格 (圖 2)，先進行 67 個測站之氣象資料完整性 (係指單一年度有紀錄之氣象天數占總天數之百分比) 分析，當完整性低於 90% 則不採用，因此實際可用的測站約 45–50 個之間。將選取之測站的單一氣象因子資料進行單一年度逐日資料內插面化工作，四種氣象因子每年將產生 1,460 張逐日氣象面化圖，再以網格為單位，將內插後之網格氣象資料輸入 DSSAT 模式內，即可產生水稻產量網格圖。其中，海拔高度超過 500 m 以上不納入計算，因為超過此高度水稻種植極少。

水稻生育與氣象因子之分析

為瞭解水稻生育與氣象因子之關係，實測驗證資料有兩個來源，其一為農委會農業試驗所進行之水稻豐歉試驗，自 1993 年一期作至 2012 年二期作止共 20 年，合計 40 個期作資料。生育資料是由插秧後 3 週開始調查，包括每週調查葉乾重、桿乾重、穗重、葉面積，並於成熟期調查產量及產量構成要素。由於試驗目的在分別探討四種氣象因子和產量間的關係 (表 1)，因此分別利用 20 期的一期或二期水稻產量變化與四種氣象因子變化趨勢，進行相關

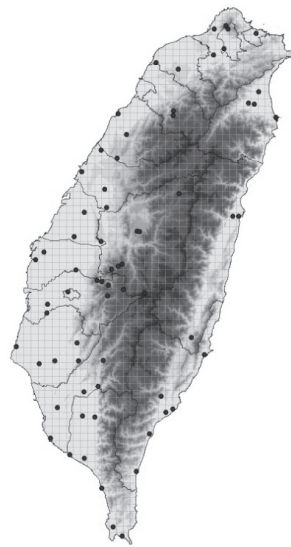


圖 2. DSSAT 模式所用氣象測站空間分布及台灣地區 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 網格。

Fig. 2. Spatial distribution of weather stations for DSSAT model and $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ mesh in Taiwan area.

分析。由於水稻試區是在固定田區，由專人負責作一致的管理，並適度控制病蟲害發生，因此可盡量排除非氣象的影響因子，並以農委會農糧署所提供的 2006–2010 年鄉鎮水稻坪割調查資料作為區域水稻產量驗證資料的來源。

結果與討論

模擬值的驗證結果

由糧食評估系統所模擬之我國西南部 (大台中市至屏東縣) 水稻一、二期產量如圖 3，

一期作產量顯然高於二期作，這和一期作生育日數較長有關。當然，模擬結果需驗證與實測值的差異。圖 4 為我國西南部水稻栽培面積大於 1,000 ha 之鄉鎮共 55 個，以近 5 年 (2006–2010 年) 坪割水稻產量與模擬結果以座標顯示。兩者呈現一定程度的相關性，經進行 F 檢定，結果顯示 F 值 (= 0.782677) 小於臨界值 (= 0.819481)；另由直接檢視 $P (F \leq f) = 0.0255 > 0.025$ 結果，顯示接受兩變方相等的虛無擬說，即觀測值與模擬值兩組資料變異性大小沒有差異 (圖 4)。若經由平均絕對值誤

表 1. 水稻二期作之平均生質量與氣象因子之相關性。

Table 1. Correlation coefficients between the mean biomass of rice (*Oryza sativa* L.) and meteorological factors recorded at trial site of Taiwan Agricultural Research Institute during two cropping seasons in 1993–2012.

Cropping season	Mean biomass (g pl ⁻¹)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Solar radiation (MJ season ⁻¹)	Precipitation (mm season ⁻¹)
1 st crop	63.92	-0.10	-0.28	0.69**	-0.08
2 nd crop	54.15	0.22	0.01	0.46**	-0.39*

*, **Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels according to the correlation analysis.

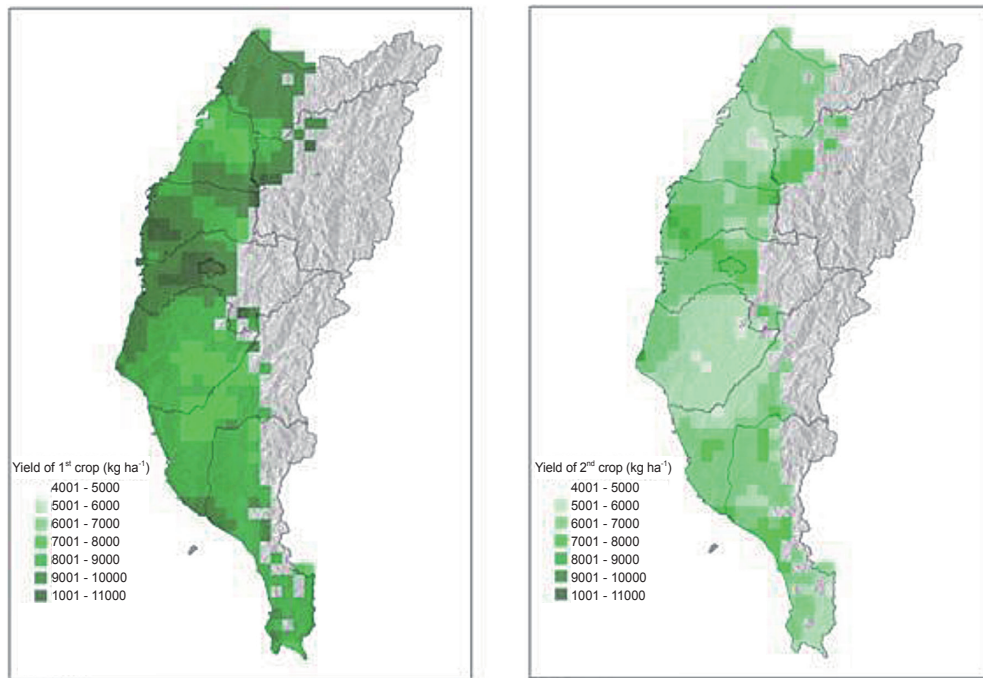


圖 3. 台灣西南部水稻一、二期水稻模擬產量。

Fig. 3. Simulated rice grain yield of first and second crop seasons of west-south area in Taiwan.

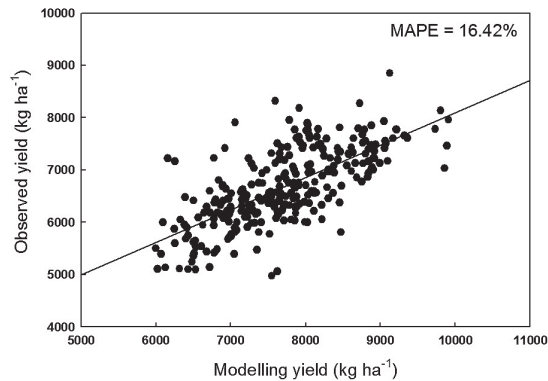


圖 4. 水稻實測產量與 DSSAT 模擬產量之相關性。圓點代表水稻種植面積大於 1,000 公頃之鄉鎮。

Fig. 4. The relationship between observed rice yield and simulated by the DSSAT model. Each point was represented the village of paddy rice cultivation area \geq 1,000 ha.

差率 (mean absolute percentage error; MAPE) 作為預測模式好壞之評估指標，使能夠客觀獲得模擬值與實測值之間的差異程度，由結果可知 MAPE = 16.42%，屬於優良的預測 (MAPE = 10–20%)。由於 DSSAT 模擬出的產量大多會較實際坪割產量為高，主要是在 DSSAT 模式設定為無肥料、水分逆境及病蟲害發生，而就實際現況而言，取得每一鄉鎮水稻栽培條件及生長狀態的詳細資料並不可行。由過去 5 年坪割實測資料，年際間產量變異約在 \pm 1,000 kg，而大部分鄉鎮之模擬與實測產量之差值大多落在此範圍內，因此本系統之產量模擬結果仍屬可接受。

另就產量空間分布而言，在雲林縣及嘉義縣有水稻高產區，而屏東縣及高雄市水稻產量相對的低，顯示 DSSAT 可以反應出產量在空間上的變化。本系統研發目的不僅限於估算產量，由空間上產量的差異作為未來適栽區的規劃也是目標之一。我國未來糧食作物生產將受極端天氣影響，以水稻生育而言，苗期遭受低溫害，開花期高溫害及成熟期因風雨害之倒伏，對產量皆有明顯影響。由農業氣象觀點，適栽區應選擇遭受災害受損較少之地區生產，才能確保穩定糧食生產，由本系統所估算之空間區域產量可作為這方面研究的基礎。

在產量模擬及驗證過程中，各個資料庫的

完整性皆有需要加強的部分，包括氣象、作物及土壤資料庫皆然。舉例而言，表 1 是整理農業試驗所進行 20 年之水稻豐歉試驗及氣象資料的結果，可發現一期作水稻乾物重產量和日射量相關係數達 0.69，其餘因子不顯著；二期作日射量與水稻乾物重之相關係數仍達顯著水準，另累積雨量與乾物重呈負相關。綜合來說，顯然 DSSAT 所需氣象因子中以日射量最為重要。Jong *et al.* (1982) 研究指出夏威夷所種植玉米可由日射量解釋 78.5% 產量的變異，說明了日射量變化是作物生長的主要變異來源。由區域或全國性產量預測角度而言，國內現行的日射量資料在觀測點數及地域分佈並不足夠，以 2010 年為例，全國共有 1,117 個氣象站分佈於各地，其中雨量測站相當密集，而具有最高溫度及最低溫度之測站也有 180 個，但有日射量資料之測站僅 67 個，扣除高山及離島，分布在農業區的測站則寥寥可數。因此，在增進區域氣象預測能力及糧食產量預估準確性的前提下，具有日射量觀測項目之氣象測站不足將是一大隱憂。

本研究室曾進行氣候變遷衝擊下水稻生產影響評估之研究 (Yao *et al.* 2000; Yao & Chen 2009)，近年來國際上針對未來氣候之預測能力已有大幅度進展，同時作物模式也隨著對作物生理的瞭解而不斷的版本升級，對於作物生長及產量具有更佳的描述及預測功能，所評估之空間尺度亦逐漸加大，對於全國性的作物產量預測有更佳的準確性。DSSAT 模式過去以單一作物個別分析方式模擬產量，近年也發展田區不同作物之產量面化分析模組 (Thorp *et al.* 2008)，產量預估值之輸出檔案可與地理資訊系統之 ArcGIS 連結，自動產生面化之分析結果，可評估區域內之不同作物之整體生產力。但因 DSSAT 內建 GIS 版本過久且操作不易，此外，系統氣候資料匯入功能不易，每一筆模擬資料需人工操作，面對大量氣象資料須耗費極多時間。因此，本系統即為研發自動模擬系統並結合新版 GIS 軟體，整合各項參數之資料庫，由參數選定、敏感度分析、模擬產量及面化出圖等，建立一貫化運算流程，將可有效縮短評估時間。

我國過去對於農作物生產的評估及預測研究相當有限，且多僅限於資料調查及個案性推估研究，缺乏整體性研究，不利於擬訂整體農業政策評估及氣候變遷因應策略之科學基礎。評估國家糧食安全性可由脆弱度 (vulnerability) 及回復力 (resilience) 之優先次序的觀念，擬定各項調適策略以因應氣候變遷的衝擊。本系統研發目的即在整合現有資料庫，利用作物模式進行整體糧食生產的估算，經與實測資料比較結果 (圖 3 及圖 4)，系統能掌握水稻產量的變化，未來將針對其他糧食作物進行生產潛力之評估，期以有助於各項農地政策調整及氣候變遷因應策略之用。

誌謝

本研究感謝農委會資訊中心 E 化計畫 (101 農科-8.2.4-農-C1) 以及國科會兩個計畫 (NSC-101-2625-M-002) (NSC 102-2621-M-492-001) 的支持，特表謝意。

引用文獻

- Bannayan, M., K. Kobayashi, H. Y. Kim, M. Lieffering, M. Okada, and S. Miura. 2005. Modeling the interactive effects of atmospheric CO₂ and N on rice growth and yield. *Field Crops Res.* 93:237–251.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y. M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J. P. Gaudillère, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin, and H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18:309–332.
- Chen, C. L., C. F. Lin, and T. S. Liu. 1994. Estimate and analysis of solar radiations in Taiwan. *J. Taiwan Agric. Res.* 43:77–92. (in Chinese with English abstract)
- Huang, C. T., T. Y. Fu, and S. S. Chang. 2008. Crops and food security-experiences and perspectives from Taiwan. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* 18:520–526.
- Jones, J. W., G. G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18:235–265.
- Jong, S. K., J. L. Brewbaker, and C. H. Lee. 1982. Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. *Crop Sci.* 22:13–18.
- Li, C. S. 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58:259–276.
- McCown, R. L., G. L. Hammer, J. N. G. Hargreaves, D. P. Holzworth, and D. M. Freebairn. 1996. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50:255–271.
- Osborne, T., G. Rose, and T. Wheeler. 2013. Variation in the global-scale impacts of climate change on crop productivity due to climate model uncertainty and adaptation. *Agric. For. Meteorol.* 170:183–194.
- Parton, W. J. 1996. The CENTURY model. p.283–293. *in: Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets.* NATO ASI series I. (Powlson, D. S., P. Smith, and J. U. Smith, eds.) Springer. Heidelberg, Berlin. 429 pp.
- Ritchie, J. T. 1994. Classification of crop simulation models. p.3–14 *in: Crop Modeling and Related Environmental Data: A Focus on Applications for Arid and Semiarid Regions in Developing Countries.* (Uhlir P. F. and G. C. Carter, eds.) CODATA. Paris. 239 pp.
- Tan, G. and R. Shibasaki. 2003. Global estimation of crop productivity and the impact of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecol. Model.* 168:357–370.
- Tao, F., M. Yokozawa, and Z. Zhang. 2009. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agric. For. Meteorol.* 149:831–850.
- Thorp, K. R., K. C. De Jonge, A. L. Kaleita, W. D. Batchelor, and J. O. Paz. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Comput. Electr. Agric.* 64:276–285.
- White, J. W., G. Hoogenboom, B. A. Kimball, and G. W. Wall. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crop. Res.* 124:357–368.
- Yao, M. H. and S. H. Chen. 2009. The impact evaluation of climate change on the growth and yield of rice. *Crop Environ. Bioinform.* 6:141–156. (in Chinese with English abstract)
- Yao, M. H., H. S. Lur, C. Chu, and J. C. Tsai. 2000. The applicability of DSSAT model to predict the production of rice and to evaluate the impact of climate change. *J. Taiwan Agric. Res.* 49:16–28. (in Chinese with English abstract)
- Yao, M. H., S. Chen, K. S. Chi, and J. C. Tsai. 2002. Estimating solar radiation from daily temperature data. *J. Agric. Res. China* 54:73–83. (in Chinese with English abstract)

Establishing an Evaluation System for Food Production: A Case Study on Rice Production

Chun-Jen Chen¹, Ming-Hwi Yao^{2,*}, Hsuan-Ping Chen³, and Fang-Ching Liao³

Abstract

Chen, C. J., M. H. Yao, H. P. Chen, and F. C. Liao. 2014. Establishing an evaluation system for food production: A case study on rice production J. Taiwan Agric. Res. 63(1):84–90.

The purpose of this study was to setup an evaluation system for grain crop production in Taiwan. Take paddy rice production as an example, the system adopted DSSAT model and used weather, crops and soil databases for model simulation. The simulated outputs were used to evaluate the entire regional paddy rice productivity based on a 5 km × 5 km coordinate system with the aid of geography information system (GIS). The verification system to validate simulation outputs was also established. By using the evaluation system with various environmental conditions, it would provide valuable information for strategy planning to cope with climate change as well as to activate the reuse of fallow land.

Key words: Rice (*Oryza sativa* L.), Crop model, Geography information system (GIS), Climate change.

Received: November 15, 2013; Accepted: January 27, 2014.

* Corresponding author, e-mail: mhyao@tari.gov.tw

¹ Contract Assistant Research Fellow, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

² Research Fellow, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

³ Research Assistant, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.