

應用主成份分析評估氣候變遷對作物產量 因子之影響

Assessment of Climate Change Impact on Crop Yields in Northern Taiwan using Principal Component Analysis

國立中央大學
土木工程學系
教授

吳瑞賢*
Ray-Shyan Wu

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
教授

李明旭
Ming-Hsu Li

國立中央大學
土木工程學系
碩士

方紀棠
Ji-Tang Fang

摘 要

氣候變遷為長期氣候特徵發生變化，而糧食生產受氣候影響，當氣候發生改變時，溫度、降雨型態等各種氣候因子皆會發生改變，而進一步對糧食生產造成影響，如作物品質、產量等。台灣最主要之糧食作物為水稻，其產量為農業生產及糧食安全之重要指標。本研究使用台灣氣候變遷推估與資訊平台建置(TCCIP)所提供之 SRES (Special Report on Emissions Scenarios, SRES)情境模擬之未來氣候分析預測情境，採用 A1B 之情境，並使用氣象合成模式(WGEN)繁衍日解析之降雨量與日均溫，進而推估日最高溫、日最低溫及日輻射量。再利用 The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)作物模式評估未來氣候變遷下稻作生長天數及產量之變化。

DSSAT 模式所需之基本氣象資料主要有下列四項：日輻射量、日最高溫、日最低溫及日降雨量。將影響產量之因子運用多變量統計分析中之主成份分析法，選取影響產量之因子有開花前之累積日輻射量、開花前之累積生育度數、開花前之累積作物生長需水量、開花前之生長天數、開花後之累積日輻射量、開花後之累積生育度數、開花後之作物生長需水量及開花後之生長天數，進行基期資料(1985~1990)與近未來(2020~2039)資料之主成份分析，分析結果可以得知在基期條件下影響產量的主要因子為稻作開花後之溫度。在近未來條件下系集模式及 CM3 模式中影響產量的主要成因為稻作開花前之溫度，而 MK3_0 模式中影響產量的主要成因為稻作開花前之日輻射量。

*通訊作者，國立中央大學土木工程學系教授，32001 桃園縣中壢市五權里 2 鄰中大路 300 號，raywu@ncu.edu.tw

關鍵詞：氣候變遷，水稻，DSSAT 作物模式，主成份分析。

ABSTRACT

Climate change affects all agriculture activities. When long-term climate pattern has changed, the weather factors, such as temperature and rainfall, might affect the quality and quantity of crop growth. Paddy rice is the most important crop productions in Taiwan and accounts for more than 70% of total water resources usage. The quantity of rice productions is a very important index for food security and agriculture management. This study utilizes the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model to analyze the variations of growth days and quantity of paddy rice under climate change. The Weather Generator Model (WGEN) was used to generate daily rainfall and daily mean temperature. Maximum and minimum daily temperature and solar radiation were then estimated by regression functions of daily mean temperature and daily rainfall from historical data. Rice productions were estimated by the DSSAT model. The Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project (TCCIP) provides future climate projections and the A1B scenarios of Special Report on Emissions Scenarios were selected in this study. To understand the dominant factors affecting crop yields under climate change, the Principal Component Analysis(PCA) was applied to analyze DSSAT results for both periods of baseline data (1985~1990) and near future data (2020~2039). Accumulated solar radiation, accumulated growing degree, crop water requirement and growing days were retrieved for performing PCA. Climate variations projected by ensemble models and CM3 model showed accumulated growing degree before blossom is the most important factor, while in MK3_0 mode is the accumulated solar radiation before blossom.

Keywords: Climate Change, Rice, DSSAT, PCA.

一、前 言

1.1 研究動機與目的

氣候變遷可能造成溫度變化及降雨型態改變，而氣候條件改變會影響作物之生長環境，造成作物生長時間、季節的改變，亦會對作物產量之品質與數量造成衝擊。陳亭羽(2012)提及農業生產所需的水、土壤及遺傳物種等自然資源可能受到氣候暖化、降雨改變及極端氣候所造成的災害衝擊而減少或劣化，使作物產量及品質下降，以至於危及糧食安全。

農業活動受氣候影響相當大，當氣候發生改

變時，溫度、降雨型態將受到影響，進而對農業用水及產量造成影響。台灣地區每年總農業用水需求占整體水資源年需水量之百分之七十，而農業灌溉用水量又占總農業用水量之百分之六十，為農業用水最大宗，因農業用水缺水容忍度較民生用水及工業用水為大，當發生乾旱時，農業用水往往會被移用以供應其他標的用水。因此農業灌溉用水量發生改變，用水結構發生變化，極可能對產量造成影響。

作物生長與氣象環境之間的交互作用相當複雜，在不同時間與空間皆有不同之反應，因此針對農作物受氣候變遷影響之衝擊評估經常藉

由作物模式進行分析與討論，作物模式中需要各種的氣象資料及水文地文資料，其中氣象資料以溫度、降雨量及輻射量最廣為探討其變化對作物產量之影響。

氣候發生改變極有可能影響作物產量，氣候變遷情境可以提供對未來氣候變化之推估，對於未來作物產量之變化目前多數採用作物模式，模擬未來氣候變遷時作物之產量，本研究使用 The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) 作物模式進行作物產量之模擬。此作物模式所需之主要氣象資料有日最高溫、日最低溫、日降雨量及日輻射量，利用氣象合成模式及各文獻建立上述所需資料，進行作物產量之模擬。由於作物產量受多種產量變數影響，產量變數可有氣象資料、遺傳資料、土壤資料，本研究以氣象資料進行產量變數之探討，如：溫度、輻射量等因素。各種變數間的關係並非獨立發生，是彼此間有所關聯，對於解釋影響產量複雜之資料，以往的單變量統計分析程序過於繁瑣，因此使本研究利用多變量統計分析法中之主成份分析法，進行資料的分析，藉由主成份分析法得以了解影響產量之重要成份，可提供建立未來糧食安全之指標。

1.2 文獻回顧

水稻是臺灣最主要的糧食作物，其產量是農業生產及糧食安全重要指標。氣候變遷會造成氣溫及降雨等氣象因子的改變，而氣溫及降雨型態的變化會對作物生長及其產量造成改變，因此氣候變遷為影響作物生長及產量的重要因素之一。

政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2007 年第四次評估報告中分析不同地區之地表溫度資料，結果顯示全球平均溫度持續增溫中，近百年(1906-2005 年)的線性趨勢為 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ，近五十年(1956-2005 年)的增溫幅度更是近百年的兩倍。溫室效應帶來全球暖化及氣候快速變遷日益顯著，除了造成不規則氣候現象交迭出現，亦形成水資源的不穩定性與不確定性，楊純明(2007)指出欲達到農業水資源有效使用，應

當回顧現有灌溉技術與方法，積極謀取水分利用效率與效能提升，才能夠在有限水資源供應下獲得最大生產效益。Parry *et al.* (2007)在 IPCC WGII 報告中指出全球暖化已是廣泛的趨勢，在低緯度地區微量的暖化($1\sim 2^{\circ}\text{C}$)即可能造成作物產量的下降；而蘇宗振(2009)綜合學者研究整理得知，氣候暖化對台灣地區糧食生產的影響發現，臺灣農作物生育期縮短，產量下降；尤其是夜溫的升高，對水稻及糧食作物產量及品質影響極大。

農耕過程中氣象環境和作物之間的關係相當複雜，作物生長在不同時間及空間的反應與表現有別，因此針對農作物之評估常需藉助於作物模式。目前具氣候評估能力之作物模式甚多，而 DSSAT 模式是由 CERES 模式系列所發展出來，廣泛運用於水稻栽培國家以評估氣候變遷衝擊(Tsvetsinskaya *et al.*, 2003; Mall and Aggarwal, 2002)。周玫君(2004)利用 DSSAT 模式於耕種日期不變的前提下，模擬未來氣候變遷下臺灣稻米產量，其結果顯示，在不考慮未來二氧化碳濃度變化時，稻米一期作及二期作的產量均有減少的趨勢。Jansen (1990)利用 MACROS (Modules of an Annual Crop Simulator)作物模式，探討東亞地區氣候變遷下水稻之生產情形，結果指出在溫度略為增高的情況下，產量會增加，但溫度增加若超過 0.8°C ，產量反而會減少。姚銘輝與陳守泓(2009)以 DSSAT 探討不同的氣候型態對稻作生長及其產量之變化，並分析氣候因子對稻作產量的影響，以氣溫、日輻射量、降雨等三項因子最為廣為探討，結果顯示 DSSAT 模式可適用於臺灣地區，產量實際觀測值和 DSSAT 模擬值有極佳的相關性，相關係數約為 0.7-0.8 之間。

為使分析資料縮減及結構簡化，本研究使用主成份法(Principal Component Analysis, PCA)以少數幾個主成份，代替原來多個解釋變數。許東鳴(2009)分析淡水河流域長期觀測水文資料在時間與空間上之變異，利用線性迴歸與無母數趨勢檢定來評估時序資料變化趨勢，並利用主成份分析進行空間變異分析。Babu *et al.* (2009)、Koklu *et al.* (2009)及張傳恩(2009)等分別討論水

質變數在季節、流量及空間上的變化，再利用多變量統計進行資料之分析，以便對研究地區之水質變化的因素有更充分了解，其利用主成份分析法分析出多種影響水質之主成份，便對其成份之重要因子進行解釋。

二、模式簡介

2.1 DSSAT 模式

DSSAT 為由美國 IBNSAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 農業技術轉移所發展之作物生長模擬系統，可用來整合環境、氣象對作物影響；已被超過 100 多國的農業學家使用長達 15 年以上。此系統將作物、土壤、氣象數據結合後應用在不同的方案上，使用者可藉由農作物的生長模擬結果，模擬出不同作物在世界各地的生產狀況，做為日後快速評估新作物的生產方法。

DSSAT 模式計算水稻每一階段之生育日數是依據生育度數法(growing degree days, GDD)決定。生育度數的基本定義為：特定的生育期中，每日之最高溫與最低溫的平均值減去基礎溫度(base temperature)的總和，其方程式如式 1。式中 GDD 為生育度數； T_{max} 代表每日最高溫度(°C)； T_{min} 代表每日最低溫度(°C)； b 為基礎溫度，代表作物停止生長的溫度，而水稻基礎溫度為 9°C(姚銘輝等，2000)。當 $GDD < 0$ 時，視為 0。水稻之生育階段分為幼苗終期、始穗期、葉片停止生長期、穀粒充實期、成熟期等時期。

$$GDD = \sum ((T_{max} + T_{min}) / 2 - b) \dots\dots\dots(1)$$

DSSAT 所需輸入資料主要可分為氣象、土壤、遺傳及管理四個部分。氣象資料根據 DSSAT V4.0 使用手冊所示，氣象資料需求的最低限度為日最高溫、日最低溫、日降雨量、及日輻射量。此外，氣象資料長度必須涵蓋整個生長過程。土壤資料所需有土壤資料描述土壤特性，例如土壤排水量、逕流量、蒸發量、輻射量反射係數、不同土層之含水量、土壤含水量之上下限及土中之氮、磷含量。管理策略所需有種植密度、種植方式(包括播種、移植等)、種植深

度、種植日期、種植地區緯度、灌溉管理方式(包括灌溉方式、灌溉水量及灌溉時間)及施肥管理(包括肥料施用方式、肥料施用及肥料施用時間)。作物之遺傳係數主要決定作物生長期、生長階段生物質量(biomass)累積等，本研究以占全台耕種品種最大宗之台農 67 為代表。DSSAT 模式對作物產量模擬有多次改版，更新版(4.02 版)除加入新作物外，也改變作物模式模擬架構及增加新生長參數。過去臺灣曾利用 DSSAT 3.0 版建立臺農 67 號品種之遺傳參數(姚銘輝等，2000)，因此本研究仍採用已建立之稻種遺傳參數。

2.2 氣象合成模式(WGEN)

童慶斌(2003)以 Pickering *et al.* (1988) 及 Richardson (1983)所發展之氣象合成模式(WGEN)之溫度及降雨合成模式為基礎，產生未來之溫度及雨量資料，其產生方式說明如下。

2.2.1 日溫度模擬

未來氣候條件下日溫度之模擬，由月平均溫度，透過一階馬可夫鏈做模擬(Pickering *et al.*, 1988)，其方程式如式 2。式中 T_i 為第 i 天的溫度； \bar{T}_j 為第 j 月之平均溫度； ρ_j 為第 j 月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階系列相關係數(First order serial correlation coefficient)； N_i 為 0~1 之間的亂數； σ_j 為歷史資料第 j 月份之標準偏差。

$$T_i = \bar{T}_j + \rho_j(T_{i-1} - \bar{T}_j) + N_i\sigma_j\sqrt{1-\rho_j^2} \dots\dots\dots(2)$$

假設每個月的第一天溫度以該月的月平均溫度代替，利用歷史月均溫統計特性，繁衍逐日溫度資料。

2.2.2 日降雨量模擬

日降雨量的模擬，分為兩個部分，降雨事件的判別和推估降雨量值。判別降雨事件以歷史降雨機率為演算依據，統計各月中第 I 日降雨時，第 $I-1$ 日也降雨的機率，表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 I 日降雨時，第 $I-1$ 日不降雨的機率，表示為 $P(W|D)$ 。每月第一天，模擬產生(0,1)間之亂數 RN ，當 RN 小於或等於該月降雨機率

P(W)時，表示此日為降雨日；每月除第一日外，其餘日則利用前一日的降雨情形判定為降雨日或非降雨日，依照歷史資料之 P(W|W)或 P(W|D)的機率，若亂數 RN 小於或等於 P(W|W)或 P(W|D)時，判定該日為降雨日。其第 I 天降雨事件判別式如下：

1. 若第 I-1 天降雨量>0，則當 $RN \leq P(W/W)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。
2. 若第 I-1 天降雨量=0，則當 $RN \leq P(W/D)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。

降雨事件降雨量值之推估，根據洪念民(1996)採用指數分佈(Exponential distribution)可模擬出理想的日降雨量。指數分佈方程式如式 3。式中 P 為日降雨量(cm/day)， \bar{P}_j 為第 j 月雨天之平均降雨量(cm)，N 為介於 0 到 1 之間的隨機亂數。

$$P = \bar{P}_j \times (-\ln(1 - N)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

2.3 推估灌溉需水量模式作物需水量

決定灌溉需水量的主要因素為作物需水量，作物需水量也就是作物蒸發散量。作物蒸發散量(ET_i)可以利用潛能蒸發散量(ET_{0i})及作物係數(K_c)估算如式 4：

$$ET_i = ET_{0i} \times K_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

計算潛能蒸發散量的方法有很多種，為保持計算之一致，本研究中使用 DSSAT 模式之 Ritchie modification of Priestley-Taylor (Priestly and Taylor, 1972; Ritchie, 1972, 1985)計算潛能蒸發散量。

2.4 主成份分析

主成份分析為多變量統計方法之一，由 Karl Pearson 於 1901 年提出，之後由 Hotelling 於 1933 年加以發展，以少數幾個主成份，使原本大量的變數予以減少，使其變為少數幾個互相獨立的線性組合(主成份)，進而整理得其整體指標(傅粹馨，2002)。

假設有 m 個原始變數，有 n 個觀測樣本，則可構成一個 n × m 的原始數據矩陣 P：

$$P = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

因原始數據的單位不同，為減少因單位不同所產生的計算誤差，必須將數據標準化處理，使其平均值為 0，而變異數為 1。經標準化後，可計算出此相關矩陣之特徵值(Eigen Values) λ_i 及特徵向量(Eigen Vectors)。主成份即為特徵向量對應的新變數(主成份)，而新變數變異數即為特徵值，新變異數解釋變異的比率為該特徵值占總特徵值之百分比。

特徵向量即為主成份負荷(Component Loading)，新變數與舊變數間的相關係數，表示原始變數對新變數的影響力或重要性，其數值若大於 0.75 則代表相關性較高，若在 0.5 至 0.75 之間則代表相關性較普通，而在 0.3 至 0.5 之間則代表相關性較低(Liu *et. al.*, 2003；張傳恩，2009)。主成份負荷的大小用來解釋主成份的意義。如下式：

$$L_{ij} = \frac{\omega_{ij} \sqrt{\lambda_i}}{\delta_j} = r_{y_i, x_j} \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中 L_{ij} 為第 j 個變數在第 i 個主成份的負荷； ω_{ij} 為第 j 個變數在第 i 個主成份的權重； λ_i 為第 i 個主成份的特徵值； δ_j 為第 j 個變數的標準差。主成份之成份選取方法有下列幾項：

- (1) 累積變異百分比：若前 n 項最大特徵值之主成份累積變異量達到全部主成份變異數總和之 80% (或 90%) 以上，則選取前 n 個主成份來代替原有之多個變量。
- (2) 經驗法則(rule of thumb)，以標準化後之資料矩陣進行分析時，可只保留特徵值大於 1.0 以上之主成份，小於 1.0 以下者予以刪除。
- (3) 陡坡測驗(scree test)，將特徵值由大到小排列成彎弓型，則其後半底部近似一直線，依尾端趨勢連接此直線，則切線上方之前面較大特徵值即為選用值。
- (4) 刪除解釋能力過低之主成份，若第 k 個主成份特徵值之解釋能力低於 5%，其對整體貢獻應視為不顯著，可予以刪除。

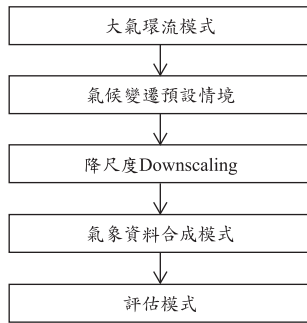


圖 1 一般氣候變遷資料使用流程

三、氣候變遷預設情境

未來可能氣候的推估，過去在氣候變遷相關研究設定未來氣候情境包括假設、空間或時間類比、與物理性大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs)模擬。GCMs 屬於全球尺度分析，其模擬值直接應用於小區域仍有之不確定性，因此需透過降尺度過程以設定適用於小區域未來氣候預設情境。本研究利用台灣氣候變遷推估與資訊平台建置(TCCIP)所提供之降尺度資料進行研究。降尺度資料通常為月份之統計特性，須將統計特性輸入氣象資料合成模式(WGEN)後，以產生模擬之氣象資料，應用於評估模式加以分析得知氣候變遷後之影響。氣候變遷資料使用流程圖，如圖 1。

在未來氣候情境分析方面「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力」報告表示，以溫室氣體排放情境(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)預設情境，亦即預測全球未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展，提出數種可能溫室氣體排放之趨勢。考慮未來不同的社會發展或永續利用目標並考慮全球性及區域性不同發展所產生的影響，分為下列四項情節，A1、A2、B1 及 B2。本研究選用 A1 情境中之 A1B 情境，A1 情境代表快速的經濟成長，全球人口在 21 世紀中時到達顛峰，之後便開始下降，並且擁有有效的科技技術，A1B 則是描述 A1 情境中的能源系統中技術變化不同方向，各種能源之間的平衡(不過分依賴於某種特定能源)。

依據水利署水利規劃試驗所(2007、2008)報告中相關係數分析選出相關性較高的六個模式，分別為 CGCM2_3_2、CM3、ECHAM5_OM、GFDL_CM2_1、CCSM3、HADCM3。考慮利用 GCM 模式模擬熱帶氣旋生成數目、東亞地區氣候模擬及東亞地區梅雨之模擬三部分，魏綺瑪(2009)篩選出七種 GCM 模式分別為 CGCM3_1_T63、CSIRC_MK3_D、ECHAM5_OM、GFDL_CM2_0、GFDL_CM2_1、MIROC3_2。陳亭羽(2012)使用 TCCIP 所提供之資料選出四種模式分別為 CGCM2_3_2、CM3、ECHAM5_OM、GFDL_CM2_1。

本研究參考上述之研究並對各模式進行數據分析，如圖 2 所示，分析結果可知系集模式之雨量與基期之雨量較為接近，雨量差異量在 2% 內，表示基期與系集模式氣象資料主要差異為溫度，溫度差可達 0.6℃。系集模式與 CM3 模式之間溫度差在 0.2℃ 內，說明系集模式與 CM3 模式氣象資料主要差異為雨量差異，而 MK3_0 模式與系集模式及 CM3 模式之溫度差為 0.3℃，雨量差異分別為 15% 及 30%。

選擇了 CNRM_CM3、CSIRO_MK3_0 及系集平均三種 GCM 模式情境資料(A1B)之降尺度資料為模擬資料，將三種模擬資料命名為情境一、情境二及情境三，進行基期(1985~1999)資料與近未來(2020~2039)的比較，整理出溫度及雨量之變化情形，如表 1 與表 2 所示。本研究採用最臨近桃園農改場站址(緯度：24.95，經度 121.03)之網格點(緯度：24.88，經度 121.13)，GCM 模式中系集模式、CM3 模式、MK3_0 模式所對應之 A1B 情境的雨量比值及溫度差值。

假設研究區域氣候變遷等同於 GCM 最臨近網格點之預測，考量方式可由式 7 與 8 表示，式中 m 為 1~12 月； CT_m 為修正後第 m 月之日均溫； CP_m 為修正後第 m 月之雨天平均雨量； T_m 和 P_m 為歷史資料第 m 月日均溫與雨天之平均雨量； T_m 為 GCM 模式情境之溫度差值； RP_m 為 GCM 模式情境之雨量比值。利用式 7 及式 8 計算修正後之結果帶入氣象合成模式，繁衍未來之平均溫度及降雨量之資料。

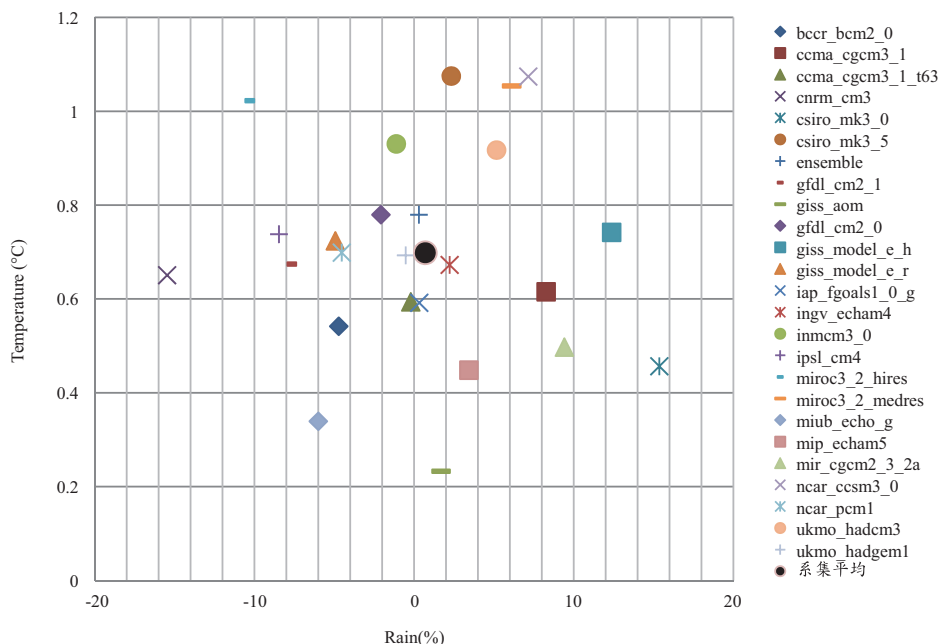


圖 2 情境模式分佈圖

表 1 GCM 模式所輸出之溫度情境降尺度資料

單位：°C

月份	模式		
	CNRM_CM3	CSIRO_MK3_0	系集平均
1	0.79	1.12	0.93
2	0.40	0.94	0.82
3	0.32	0.85	0.75
4	0.31	0.45	0.68
5	0.73	0.19	0.74
6	0.90	0.38	0.65
7	1.00	0.40	0.68
8	0.84	0.26	0.69
9	0.37	0.57	0.71
10	0.31	0.43	0.62
11	0.66	0.73	0.77
12	0.33	0.89	0.90

表 2 GCM 模式所輸出之雨量情境降尺度資料

單位：%

月份	模式		
	CNRM_CM3	CSIRO_MK3_0	系集平均
1	14.67	21.66	-0.24
2	-9.82	67.08	-0.14
3	-30.82	38.08	-6.75
4	-6.18	9.44	-4.77
5	-23.00	-1.46	1.24
6	-10.02	-15.46	1.18
7	-7.32	46.16	10.60
8	3.60	8.36	2.78
9	-3.17	7.50	5.18
10	-31.76	1.37	-5.02
11	0.27	0.38	-6.22
12	-10.99	22.71	1.82

$$CT_m = T_m + \Delta T_m \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$CP_m = P_m \times RP_m \quad \dots\dots\dots(8)$$

四、結果與討論

目前對於氣候變遷於農作物產量的影響，大

多使用作物生長模式做模擬及探討，本研究使用 DSSAT 模式模擬氣候變遷下，桃園地區稻米一期作之未來情況下產量及灌溉需水量結果。

4.1 未來產量推估

本研究針對桃園地區稻米一期作產量進行

模擬。氣象資料是使用桃園站所量測到之日雨量及日平均溫度。以該測站之 1985-1999 年歷史日雨量與日平均溫度資料，藉由氣象資料合成模式，建立 100 年之日雨量與日平均溫度資料(100 組全年日降雨與日溫度資料)，以該資料推估該氣候條件下之日最高溫、日最低溫以及日射量，進而配合 DSSAT 作物生長模式求得其產量，並以此作為評估不同氣候變遷情境下之比較基準。

在氣候變遷情境部份，本研究使用 TCCIP 所提供之 3 個 GCMs (CGCM2_3_2、GFDL-CM2-1、ECHAM5)之輸出模擬值的降尺度後(25 公里×25 公里)之資料，其資料為 A1B、A2、B1 三種等溫室氣體排放情境的氣候變遷條件下，降雨量變化比值與溫度變化差值，進而改變氣象合成模式參數，求得近未來(2020-2039 年)及遠未來(2080-2099 年)趨勢下 100 年之日雨量與日平均溫度之資料，再利用前節敘述之方法推得該氣候變遷情境下之日最高溫、日最低溫及日射量，進而配合 DSSAT 作物生長模式評估其產量，探討於未來氣候情境下，相較於基期(1980-1999 年)氣候條件對水稻產量造成的影響。

4.1.1 DSSAT 模式之檢定及驗證

為確認 DSSAT 模式可以反應桃園地區稻作產值，本研究以農委會所提供桃園地區 2008 年稻米第一期作之作物實際產值，作為 DSSAT 作物模式之檢定資料，並以 2007 年稻米第一期作之作物實際產值做為驗證資料。DSSAT 模式計算稻作產量時，需輸入之氣象資料為日最高溫、日最低溫、日射量及日降雨量，本研究所設定之作物品種為臺農 67 號，灌溉方式假設為最佳狀態，即為無缺水逆境，模擬所得為無缺水狀態下之產量。結果顯示，當施用氮肥總量為 113 公斤/公頃時，與農糧署(2005)農糧統計數據進行比對可得最佳模擬值，使用 2007 年歷史資料輸入進行驗證，顯示實際值與模擬值誤差皆在百分之五內，如表 3 所示。

4.1.2 產量模擬結果分析

利用 DSSAT 作物模式，模擬不考慮二氧化碳影響下(二氧化碳濃度設定為 360 ppm)，模擬基期及未來不同之氣候條件(A1B 情境中之系集

表 3 DSSAT 作物模式之檢定及驗證

產量單位：公斤/公頃

年份	實際產量 (農糧署)	模擬產量 (DSSAT)	誤差百分比
2007	5288	5441	3.77%
2008	5416	5620	2.89%

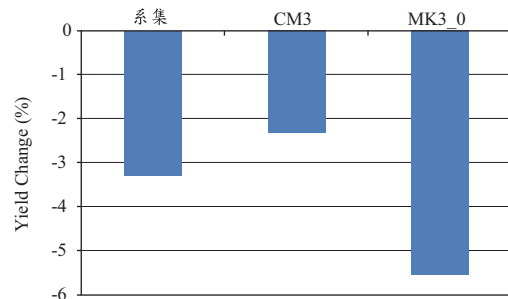


圖 3 各模式之產率變化圖

模式、CM3 模式、MK3_0 模式)之一期稻作產量，由於氣象資料會影響一期稻作產量，其產量變化率如圖 3 所示，在不同模式模擬情況下，未來一期稻作產量皆有下降之趨勢，其產量改變率介於 -2.3%至 -5.6%之間。此結果與姚銘輝(2009)研究中說明溫度上升產量下降之結論相同。

4.2 主成份分析

本研究利用氣象合成模式對基期之氣象資料及情境模式之氣象資料進行資料繁衍，繁衍出各 100 組之氣象資料，並模擬在 100 組氣象資料下之一期稻作之生長情形，選出多項影響產量之參數，並進一步進行分析研究。產量參數分別為開花前之累積日輻射量、開花前之累積作物生長需水量、開花前之累積生育度數、開花前之生長天數、開花後之累積日輻射量、開花後之累積作物生長需水量、開花後之累積生育度數及開花後之生長天數，共 8 項參數。

4.2.1 基期之主成份分析

本研究為確認使用變數進行主成份分析的適當性，會藉由 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)及 Bartlett 球型檢定(表 4)來進行判斷，其中 KMO 取樣適切性需大於 0.5，才能證明使用原始變數

表 4 基期 KMO 及 Bartlett 檢定

KMO 及 Bartlett 檢定		
Kaiser-Meyer-Olkin 取樣適切性量數		0.506
Bartlett 球型檢定	顯著性	0.000

表 5 基期主成份分析之特徵值及解釋變異量

主成份	特徵值	解釋變異量 (%)	累積解釋變異量 (%)
1	2.60	32.40	32.40
2	2.01	26.22	58.62
3	1.27	15.91	74.53
4	0.92	11.50	86.03
5	0.60	7.41	93.44
6	0.40	5.02	98.46
7	0.11	1.42	99.88
8	0.01	0.12	100.00

是有意義的，而且結果得知本研究之值為 0.506 大於 0.5。而 Bartlett 球型檢定結果得知顯著性為 0.000 小於 0.05，此結果為顯著的。檢視完 KMO 及 Bartlett 檢定確認變數合適後，便可將計算相關係數矩陣的特徵值及解釋變異量(表 5)，最後得到主成份負荷矩陣(表 6)，由表 6 得知結果有 8 個主成份，但為達到維度簡化之目的，本研究採用特徵值大於一之特徵值，進行主成份之選取，本研究選取特徵值之方法為選用特徵值大於一之主成份，而選取三項主成份，可解釋變異量達 74.53%。

由表 5 與表 6 得知，第一主成份可解釋變異量為 32.40%，其中與開花前之累積生育度數、開花前之生長天數、開花後之生長天數及開花後之累積生育度數有較大的相關性，由上述結果可知在桃園地區影響產量的主要成份為以上四種，其中開花後的累積生育度數及生長天數較開花前的累積生育度數與生長天數高，故第一主成份開花後之溫度成份。第二主成份可解釋變異量為 26.22%，其中與開花前之累積生育度數、開花前之生長天數及開花後之累積作物需水量有較高的相關性，上述參數說明第二主成份可命名為開花前之溫度成份。

表 6 基期主成份負荷矩陣

產量變數	主成份		
	1	2	3
SRAD_B	-0.45	0.33	-0.54
WATER_B	0.20	0.16	0.80
TEMP_B	-0.62	0.74	0.18
DAY_B	-0.62	0.71	0.23
SRAD_A	0.48	0.70	-0.13
WATER_A	0.15	-0.14	0.47
TEMP_A	0.80	0.51	-0.10
DAY_A	0.81	0.36	-0.11

表 7 系集模式 KMO 及 Bartlett 檢定

KMO 及 Bartlett 檢定		
Kaiser-Meyer-Olkin 取樣適切性量數		0.535
Bartlett 球型檢定	顯著性	0.000

第三主成份可解釋變異量為 15.91%，其中與開花前之累積作物生長需水量及開花前之累積日輻射量佔有較高的相關性，結果可以說明當日輻射量愈高，作物生長需水量便愈高，因此第三主成份可命名為日輻射量成份。依照主成份分析結果可得知，影響稻作產量的成份主要為開花後之溫度成份、開花前之溫度成份及日輻射量成份。

4.2.2 系集模式之主成份分析

系集模式結果之主成份分析亦藉由 KMO 及 Bartlett 球型檢定(表 7)來進行判斷，其值為 0.535 大於 0.5。而 Bartlett 球型檢定結果得知顯著性為 0.000 小於 0.05，此結果為顯著的。檢視完 KMO 及 Bartlett 檢定確認變數合適後，便可將計算相關係數矩陣的特徵值及解釋變異量(表 8)，最後得到主成份負荷矩陣(表 9)，由表 8 得知結果有 8 個主成份，但為達到維度簡化之目的，本研究採用特徵值大於一之特徵值，進行主成份之選取，本研究選取特徵值之方法為選用特徵值大於一之主成份，而選取四項主成份，可解釋變異量達 96.93%。

由表 8 及表 9 得知，第一主成份可解釋變異量達 39.90%，其中與開花前之累積日輻射量、開

表 8 系集模式之主成份分析之特徵值及解釋變異量

主成份	特徵值	解釋變異量 (%)	累積解釋變異量 (%)
1	3.19	39.90	39.90
2	2.05	25.65	65.55
3	1.46	18.31	83.86
4	1.05	13.07	96.93
5	0.19	2.36	99.29
6	0.03	0.39	99.68
7	0.02	0.26	99.94
8	0.01	0.06	100.00

表 9 系集模式之主成份負荷矩陣

產量變數	主成份			
	1	2	3	4
SRAD_B	0.81	-0.26	0.30	0.41
WATER_B	0.69	-0.41	0.19	0.56
TEMP_B	0.82	0.16	0.33	-0.43
DAY_B	0.79	0.19	0.32	-0.48
SRAD_A	0.27	0.90	-0.18	0.27
WATER_A	0.38	0.84	-0.34	0.18
TEMP_A	-0.49	0.43	0.67	0.22
DAY_A	-0.54	0.27	0.73	0.04

花前之累積生育度數及開花前之生長天數有著較大相關性，由此可知情境系集模式影響產量之主要成份為此三者，其中開花前之累積日輻射量、開花前之累積生育度數略高於花前之生長天數，因此第一主成份可命名為開花前之溫度成份。第二主成份可解釋變異量為 25.65%，與開花後之累積日輻射量及開花後之累積作物生長需水量相關性較高，由前段相關係數矩陣可知累積日輻射量與累積作物生長需水量有較高相關性，作物生長需水量受日輻射量影響，所以第二主成份可命名為開花後之日輻射量成份。

第三主成份可解是變異量為 18.31%，其中與開花後之生長天數及開花後之累積生育度數有較高相關性，故第三主成份可命名為開花後之溫度成份。第四主成份可解釋變異量為 13.07%，以開花前之累積作物生長需水量及開花前之生長天數現較高相關性，而第四主成份可命名為開

表 10 CM3 模式之 KMO 及 Bartlett 檢定

KMO 及 Bartlett 檢定		
Kaiser-Meyer-Olkin 取樣適切性量數		0.508
Bartlett 球型檢定	顯著性	0.000

表 11 CM3 模式主成份分析之特徵值及解釋變異量

主成份	特徵值	解釋變異量 (%)	累積解釋變異量 (%)
1	3.23	40.42	40.42
2	2.11	26.42	66.84
3	1.38	17.26	84.10
4	1.09	13.57	97.67
5	0.15	1.81	99.48
6	0.03	0.37	99.85
7	0.008	0.10	99.95
8	0.004	0.05	100.00

表 12 CM3 模式主成份負荷矩陣

產量變數	主成份			
	1	2	3	4
SRAD_B	0.87	0.08	0.11	0.46
WATER_B	0.76	-0.01	-0.03	0.65
TEMP_B	0.84	0.21	0.35	-0.35
DAY_B	0.81	0.21	0.36	-0.41
SRAD_A	-0.01	0.79	-0.55	0.14
WATER_A	0.26	0.76	-0.45	-0.28
TEMP_A	-0.47	0.76	0.38	0.20
DAY_A	-0.52	0.48	0.69	0.16

花前需水量成份。依照上述主成份分析結果可得知，氣候變遷情境中之系集情境模式產量變數的主要成分分別為開花前之溫度成份、輻射量成份、開花後之溫度成份及開花前需水量成份。

4.2.3 CM3 模式之主成份分析

CM3 模式結果之主成份分析由 KMO 及 Bartlett 球型檢定(表 10)來進行判斷，其值為 0.508 大於 0.5。而 Bartlett 球型檢定結果得知顯著性為 0.000 小於 0.05，此結果為顯著的。檢視完 KMO 及 Bartlett 檢定確認變數合適後，便可將計算相關係數矩陣的特徵值及解釋變異量(表 11)，最後得到主成份負荷矩陣(表 12)，由表 11

得知結果有 8 個主成份，但為達到維度簡化之目的，本研究採用特徵值大於一之特徵值，進行主成份之選取，本研究選取特徵值之方法為選用特徵值大於一之主成份，而選取三項主成份，可解釋變異量達 84.10%。

由表 11 及表 12 得知，第一主成份可解釋變異量達 40.42%，其中與開花前之累積日輻射量、開花前之累積生育度數及開花前之生長天數有較高的相關性，由此可知情境 CM3 模式影響產量之主要成份為此三者，其中開花前之累積生育度數略高於花前之累積日輻射量及開花前之生長天數，因此第一主成份可命名為開花前之溫度成份。

第二主成份可解釋變異量為 26.42%，其中與開花後之累積日輻射量、開花後之作物生長需水量及開花後之累積生育度數有較高的相關性，其中開花後之累積日輻射量略高於另外兩項，因此第二主成份可命名為開花後之日輻射量成份。陽光輻射量，對於作物產量生成而言扮演重要角色，因日輻射量所佔影響因素最大。第三主成份可解釋變異量為 17.26%，其中與開花後之生長天數之相關性最高，而第三主成份命名為生長天數成份。第四主成份可解釋變異量為 13.57%，以開花前之作物生長需水量有較高的相關性，因此第四主成份可命名為作物需水量成份。上述主成份分析為使用氣候變遷情境模式中 CM3 模式分析，在氣候變遷影響下，作物產量變數之主成份結構，其結果可得知，影響作物產量的成份主要有：開花前之日輻射量成份、開花後之日輻射量成份、生長天數成份、作物需水量成份。

4.2.4 MK3_0 模式之主成份分析

MK3_0 模式結果之主成份分析由 KMO 及 Bartlett 球型檢定(表 13)來進行判斷，其值為 0.562 大於 0.5。而 Bartlett 球型檢定結果得知顯著性為 0.000 小於 0.05，此結果為顯著的。檢視完 KMO 及 Bartlett 檢定確認變數合適後，便可將計算相關係數矩陣的特徵值及解釋變異量(表 14)，最後得到主成份負荷矩陣(表 15)，由表 14 得知結果有 8 個主成份，但為達到維度簡化之目的，本研究採用特徵值大於一之特徵值，進行主成份之選

表 13 MK3_0 模式之 KMO 及 Bartlett 檢定

KMO 及 Bartlett 檢定		
Kaiser-Meyer-Olkin 取樣適切性量數		0.562
Bartlett 球型檢定	顯著性	0.000

表 14 MK3_0 模式主成份分析之特徵值及解釋變異量

主成份	特徵值	解釋變異量 (%)	累積解釋變異量 (%)
1	3.07	38.33	38.33
2	2.29	28.68	67.01
3	1.44	17.96	84.97
4	1.12	13.98	98.95
5	0.05	0.59	99.54
6	0.02	0.22	99.76
7	0.01	0.14	99.90
8	0.008	0.10	100.00

表 15 MK3_0 模式主成份負荷矩陣

產量變數	主成份			
	1	2	3	4
SRAD_B	0.84	-0.01	0.26	0.45
WATER_B	0.75	-0.09	0.18	0.62
TEMP_B	0.83	0.09	0.28	-0.48
DAY_B	0.80	0.10	0.21	-0.54
SRAD_A	0.25	0.86	-0.43	0.07
WATER_A	0.32	0.73	-0.59	0.03
TEMP_A	-0.33	0.81	0.47	0.05
DAY_A	-0.45	0.58	0.67	0.05

取，本研究選取特徵值之方法為選用特徵值大於一之主成份，而選取四項主成份，可解釋變異量達 98.95%。

由表 14 及表 15 得知，第一主成份可解釋變異量達 38.33%，其中與開花前之累積日輻射量、開花前之累積生育度數及開花前之生長天數有較大的相關性，由此可知情境 MK3_0 模式影響產量之主要成份為此三者，其中開花前之累積日輻射量及花前之累積生育度數略高於開花前之生長天數，因此第一主成份可命名為開花前之日

輻射量成份。第二主成份可解釋變異量為 28.68%，其中與開花後之累積日輻射量、開花後之作物生長需水量及開花後之累積生育度數有較高的相關性，其中開花後之累積日輻射量略高於另外兩項，因此第二主成份可命名為開花後之日輻射量成份。陽光輻射量，對於作物產量生成而言扮演重要角色，因日輻射量所佔影響因素最大。

第三主成份可解釋變異量為 17.96%，其中與開花後之生長天數之相關性最高，而第三主成份命名為生長天數成份。第四主成份可解釋變異量為 13.98%，以開花前之作物生長需水量有較高的相關性，因此第四主成份可命名為作物需水量成份。上述主成份分析為使用氣候變遷情境模式中 MK3_0 模式分析，在氣候變遷影響下，作物產量變數之主成份結構，其結果可得知，影響作物產量的成份主要有：開花前之日輻射量成份、開花後之日輻射量成份、生長天數成份、作物需水量成份。

五、結論與建議

本研究利用氣候變遷情境模式及 DSSAT 作物模式，模擬基期與未來不同情境模式下之氣象資料及產量。因作物產量有多種不同之變數，本研究利用多變量統計分析中之主成份分析法，分析各種產量變數是否會受氣候變遷影響，改變其產量變數。

5.1 結論

1. 利用 DSSAT 作物模式模擬桃園地區一期稻作產量，模擬結果顯示在溫度增加情形下，單看溫度增加對產量改變率(產率)之影響，可發現溫度與產率有些微震盪，但以整體趨勢而言溫度上升產量減少。
2. 對基期及三項情境模擬模式進行主成份分析，分析結果可以發現基期得到了三項主成份，總解釋變異量達 74.53%，結果尚佳。第一主成份為開花後之溫度成份、其次依序為開花前之溫度成份及日輻射量成份。由此可知影響基期產量之主要成份為第一主成份：開花後

之溫度。

3. 情境模式中之系集模式、CM3 模式及 MK3_0 模式分析結果分別得到了四項主成份，總解釋變異量達 96.93~98.9%之間，結果良好，此三種模式之前二項主成份均與開花前之溫度或日輻射量成份，第三及第四主成份則分別為生長天數成份及開花前之作物生長需水量成份。
4. 綜合以上幾點，可以得知溫度及日輻射量成份對作物產量影響較生長天數及需水量成份為大，而在基期條件與情境模式影響產量的主要因子由稻作開花後之溫度轉變為稻作開花前之溫度，顯示氣候變遷確實影響作物生長因子。

5.2 建議

1. 本研究針對 DSSAT 推估產量之主要控制變數進行主成份分析，分析結果顯示影響變數由預設的八項變數，縮減為主要四項變數，往後之研究可針對主要四項變數進行分析探討。
2. 在未來氣候變遷影響下，除可進行溫度與作物基因之研究外，雖然作物生長需水量成份在產量影響相對次序較後，但水田用水兼具環境三生功能，其所附加的效益可另予研究。

參考文獻

1. 台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫 (TCCIP) 網頁，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/NCDR/main/index.aspx>，2013。
2. 行政院農業委員會，「台灣統計年報」，2008。
3. 行政院農業委員會農糧署，「作物施肥手冊」，2005。
4. 周玫君，「氣候變遷及乾旱灌溉用水移用對水稻潛能產量影響」，國立台灣大學生物環境系統工程學系，碩士論文，2004。
5. 洪念民，「氣候變遷對大安溪水資源營運之影響」，國立台灣大學農業工程學系，碩士論文，1996。
6. 姚銘輝、陳守泓，「氣候變遷下水稻生長及產量之衝擊評估」，作物、環境與生物資訊，6：141~156，2009。

7. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞、蔡金川，「DSSAT 模式在預測水稻產量及氣候變遷衝擊評估之適用性探討」，*中華農業研究*，49(4)：16~28，2000。
8. 許東鳴，「淡水河流域水文時空變異分析」，國立中央大學水文與海洋科學研究所，碩士論文，2009。
9. 張傳恩，「應用多變量統計分析評估鴛鴦湖水質」，國立聯合大學土木與防災工程研究所，碩士論文，2009。
10. 陳亭羽，「氣候變遷對桃園地區水稻產量及灌溉需水量之影響」，國立中央大學土木工程學系，碩士論文，2012。
11. 傅粹馨，「主成份分析和共同因素分析相關議題之探究」，*教育與社會研究*第三期：107~132，2002。
12. 童慶斌，「氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建制—氣候、水文、生態部分(二)」，行政院環境保護署報告書，2003。
13. 楊純明，「全球暖化之水稻節水灌溉栽培技術與策略」，*全球暖化對台灣稻米產業之影響研究報告*，2007。
14. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)」，2007。
15. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)」，2008。
16. 魏綺瑪，「利用統計降尺度法推估石門水庫集水區未來情境降水研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2009。
17. 蘇宗振，「氣候變遷下台灣糧食生產因應對策」，*農政與農情*，200：37~40，2009。
18. Babu, K. N., Omana P. K. and Mohan M., "Water and sediment quality of Ashtamudi estuary, a Ramsar site, southwest coast of India – a statistical appraisal," *Environmental Monitoring and Assessment*, 165(1-4), 307-319, 2009.
19. IPCC, "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The AR4 Synthesis Report," 2007.
20. Jansen, D. M., "Potential rice yields in future weather conditions in different parts of Asia," *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 38(4): 661-680, 1990.
21. Koklu, R., Sengorur, B. and Topal, B., "Water quality assessment using multivariate statistical methods – a case study: Melen River System," *Water Resources Management*, 24(5): 959-978, 2009.
22. Liu, C. W., Lin, K. H. and Kuo, Y. M., "Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan," *The Science of the Total Environment* 313: 77-89, 2003.
23. Mall, R. K. and Aggarwal, P. K., "Climate Change and Rice Yields in Diverse Agro-Environments of India. I. Evaluation of Impact Assessment Models," *Climate Change* 52: 315-330, 2002.
24. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. and Hanson C.E. (eds), "Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
25. Pickering, N. B., Stedinger, J. R. and Haith, D. A., "Weather input for nonpoint source pollution models," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(4): 674-690, 1988.
26. Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J., "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters," *Mon. Weather Rev.*, 100: 81-82, 1972.
27. Richardson, C. W., Foster, G. R. and Wright, D. A., "Estimation of erosion index from daily rainfall amount," *Transactions of the ASABE*, 26(1): 153-156, 1983.
28. Ritchie, J. T., "A user-oriented model of the soil water balance in wheat," *Wheat Growth and*

- Modeling, Plenum Publishing Corporation, USA, 293-305, 1985.
29. Ritchie, J. T., "Model of predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover," *Water Resources Research*, 8(5): 1204-1213, 1972.
30. Tsvetsinskaya, E. A., Mearns, L. O., Mavromatis, T., Gao, W., Mcdaniel, L. and Downton, M. W., "The Effect of Spatial Scale of Climate Change Scenarios on Simulated Maize, Winner Wheat, and Rice Production in the Southeastern United States," *Climate Change* 60: 37-71, 2003.

收稿日期：民國 102 年 8 月 27 日

修正日期：民國 103 年 1 月 24 日

接受日期：民國 103 年 4 月 26 日