研究報告

利用未來統計降尺度氣候資料評估臺灣水稻生產潛勢

姚銘輝[1,*]、鍾昀軒[1]、徐永衡[2]
[1]行政院農業委員會農業試驗所農業工程組
[2]科技部國家災害防救科技中心

摘要

本文利用 IPCC AR5 統計降尺度(SDSM) RCP 4.5 及 8.5 兩種氣候情境之未來氣候預測值，輸入本所研發之糧食生產評估系統，結合地理資訊系統，用以評估未來臺灣水稻生產潛勢。氣候預測值分析結果顯示，RCP 4.5 情境下臺灣在未來最高溫度之趨勢，世紀末平均上升 0.91℃，RCP 8.5 則上升 1.75℃。溫度升高縮短水稻生育日數，若不考慮二氧化碳對水稻生長的影響，在基期(1986–2005 年)生育日數低於 120d 之區域僅限於屏東、高雄及臺南等部分區域，世紀末(2081–2100 年)RCP 4.5 延伸至嘉義及雲林，RCP 8.5 則將涵蓋臺中市，東部則延伸至花蓮北端。而水稻產量呈現減產趨勢，在 RCP 8.5 情況下(未來氣候環境最失控的狀態)，於世紀末水稻產量平均改變率約-13%，約減產約 1,100 kg ha^{-1}。若考慮二氧化碳及其與氣溫交感效應對水稻生長的影響，加入二氧化碳後水稻產量是增加的，當二氧化碳濃度設定為 850 ppm，則水稻產量增加 15%。

關鍵詞：水稻、作物模式、地理資訊系統、氣候變遷。

Evaluation of Rice Production Potential in Taiwan Using SDSM Future Climate Data

Ming-Hwi Yao[1,*], Yun-Syuan Jhong[1] and Yung-Heng Hsu[2]

[1] Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng District, Taichung City 41362, Taiwan ROC

[2] National Science and Technology Center for Disaster Reduction, Sindian District, New Taipei City 23143, Taiwan ROC

ABSTRACT

The future rice production potential in Taiwan was assessed by using the predicted values of future climate under the climatic conditions of IPCC AR5 statistical downscaling model (SDSM) RCP 4.5 and 8.5 as inputs into the grain production assessment system developed by Taiwan Agriculture Research Institute, combining with geographic information system. Results of climate prediction analysis showed that, the trend of the highest temperature of Taiwan in the future, under the RCP 4.5 scenario, would increase an average value of 0.91℃ at the end of the century. It will increase1.75℃ in the case of RCP 8.5 scenario. The rising temperature shortens rice growth period. Without the direct effect of CO_2, in the base period (1986-2005), only rice grown in areas of Pingtung, Kaohsiung and Tainan had less than 120 d growing period. At the end of this century (2081-2100), RCP 4.5 scenario would extend to Yunlin and Chiayi, while RCP 8.5 would cover Taichung City and would extend to the northern part of Hualien in the east. The output of rice production showed a reducing trend under the condition of RCP 8.5, the most deleterious status in future climate environment. At such condition, the prospect for rice production at the end of the century would reduce about -13% in average island-wide, approximately 1,100 kg ha^{-1}. Considering that the impact of CO_2 and temperature interaction effect on rice growth, with combined effect increased rice production. When the CO_2 concentration was

*通信作者, mhyao@ tari.gov.tw
投稿日期：2015 年 7 月 17 日
接受日期：2015 年 9 月 30 日
作物、環境與生物資訊 12:142-154 (2015)
Crop, Environment & Bioinformatics 12:142-154(2015)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng District, Taichung City 41362, Taiwan ROC

850 ppm, it would result in an increased rice production of 15%.

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

前言

應用全球氣候模式(Global Circulation Models; GCM)預測的未來氣候情境，對農業生產潛力進行評估在許多國家已有多年的結果。許多結果顯示，由於全球暖化，穀類生產將會向高緯度地區移動(Fischer *et al.* 2002)，高緯度國家除可耕地面積有很大的擴張潛力外，穀類生產的潛力也隨之增加，估計總產量將可增加 6%至 9%；相反的，在所有模擬狀況中，低緯度地區國家的穀類生產力將下降，最嚴重的損失將發生在亞洲的開發中國家，其減產範圍大約是 4%至 10%。全球的穀物輸入國家多位於低緯地區，穀物產量易受全球氣候暖化影響再降低(Fischer *et al.* 2002)，因此預期未來將需進口更多穀物，以滿足其人民的需求，此勢須進一步提高全球對穀物的需求。

農耕過程中氣象環境和作物之間的交感相當複雜，作物生長在不同時間及空間的反應與表現皆有不同之反應，因此針對農業政策、栽培技術及環境因素之評估常需藉助於作物模式。DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)模式是由 CERES 模式系列所發展出來的作物模式，廣泛運用於水稻栽培國家以評估氣候變遷衝擊(Basak2010)。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(Throp *et al.* 2008)，產量預估值之輸出檔案可與地理資訊系統(geographic information system; GIS)之 ArcGIS 連結，自動產生面化之分析結果，可據以評估區域內不同作物之整體生產力。但因 DSSAT 內建 GIS 版本過舊且操作不易，加上系統氣候資料匯入功能不佳，每一筆模擬資料均需人工操作，面對大量氣象資料須耗費極多時間。因此，行政院農委會農業試驗所農業工程組特別開發出「不同氣候情境糧食生產評估系統」，以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，可以有效縮短評估時間(Chen *et al.* 2014)

在政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)第四版評估報告(Fourth Assessment Report; AR4)，GCM 空間解析度大約為 100–500 km，而在第五版評估報告(AR5)的 GCM 空間解析度雖有所提升，但仍在 80–300 km 左右。在 GCM 空間解析度下臺灣僅是數個網格點，無法進一步區分更細部的氣候資訊。而且，在一些氣候模式中，臺灣是被定義為海洋的網格點，未被認定為陸地，同時在低解析度下的臺灣地形也較實際高度要低得許多。這些限制皆可能造成 GCM 模擬結果與臺灣區域細部觀測資料之間的差距，特別是地形對氣溫與降雨都有明顯的作用。由於臺灣區域對未來氣候變遷推估需高解析度細部地區的氣候模擬運用，以評估氣候變遷影響與調適研究方面的需要，因此降尺度方法為區域氣候評估時的必要手段。

氣候變遷是氣候狀態的平均值或變異特性發生持續性的改變，通常達數十年或更長(IPCC 2012)，當氣候發生改變極有可能影響作物產量，而氣候變遷情境可提供對於未來氣候變化之推估。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，利用未來推估氣候資料以作物模式進行產量模擬，為評估農業生產力常見的方法之一(Tao *et al.* 2009, Osborne *et al.* 2013)。我國對於未來穀物的預測資訊相當缺乏，尤其甚少利用完整未來氣候推估資料利用於農業生產力評估，本文使用「臺灣氣候變遷推估與資訊平臺建置計畫」(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform，簡稱 TCCIP)所產製之氣候變遷統計降尺度資料為基礎，透過「不同氣候情境

糧食生產評估系統」系統介面直接執行 DSSAT 模式模擬功能，藉由多模式與多情境之設定，推估未來氣候變遷下臺灣地區水稻第一期作產量，建立評估流程及方法。並將分析各時間及空間尺度之可能變化趨勢，同時探討二氧化碳濃度差異對水稻生長及產量的影響，以了解不同的氣候變遷情境對農業生產過程中造成的衝擊，期以作為因應氣候變遷農耕制度調整策略之基礎。

材料與方法

一、未來氣候情境

未來氣候變遷推估主要是依據全球氣候模式，以不同的未來發展情境所做的變遷推估模擬。在 IPCC 第四次評估報告(AR4)中，情境模擬是以人為溫室氣體(CO_2)排放量，當作氣候變遷溫度上升的基準，以未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展趨勢為最主要之考量變數，將情境區分為 A1、A2、B1 及 B2 四大類(IPCC 2007)。而在 2013 年 IPCC 第五次評估報告(AR5)中，情境模擬則是以輻射量作為氣候變遷之基準，用以估計各溫室氣體隨時間的代表性變動。其中，以「代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathways; RCPs)」(途徑所指的是濃度的變化歷程)定義 4 組未來變遷的情境，分別為 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 以及 RCP 8.5 等情境(IPCC 2013b, TCCIP 2014)。本研究為了解未來環境是在暖化較穩定的情況發展下，而挑選 RCP 4.5 情境，此情境為一個穩定之情境，經採用減少排放溫室氣體之技術和政策性決策下，在 2100 年前總輻射驅力已經達到一個平衡不再大幅增加或減少的穩定狀態；另外，為探討未來最失控之環境，即隨著時間增加大氣中溫室氣體濃度量，不對溫室氣體排放量進行削減，因而挑選 RCP 8.5 情境進行評估與探討。

二、統計降尺度未來氣候資料

統計降尺度原理，是以統計方法分析全球氣候模式低解析模式資料與高解析度觀測資料兩者間的關係，藉以修正模式誤差並提高資料的解析度。由於可以只針對有興趣的氣候變數目標進行分析，並不需要完整的全球氣候模式資料，因此可以涵蓋資料庫中所有不同全球氣候模式的推估結果，有效保留原有推估的可能性機率分布範圍。但統計降尺度的技術仍存在缺點，並非所有氣候變數都有長期的高解析度觀測資料，可以進行上述的分析。TCCIP 團隊所使用之統計降尺度方法為誤差校正空間分解法(bias correction and spatial disaggregation) (Wood *et al.* 2002, Wood *et al.* 2004, Maurer 2007)，採取兩階段降尺度步驟。先將全球氣候模式(解析度約 300km)降尺度至解析度 25 km × 25 km，再降尺度到解析度 5 km × 5 km，以避免誤差修正過度而產生平滑效應。除了空間的降尺度技術外，在其他許多研究領域的應用上也常需要精確到日尺度的氣候資料，因此學界常藉由天氣衍生器 (weather generators; WGs) 的隨機技術 (Richardson 1981)合成生產日資料。WGs 的概念是利用一地區氣象觀測值的統計特性，合成該地區無限長度的時間序列之氣象資料，目前已有許多學者將 WGs 應用在氣候變遷的衝擊評估研究 (Kilsby *et al.* 2007, Semenov and Barrow 1997, Wilks 1992)。

在利用統計降尺度技術產製降尺度資料後，可得到小區域之月改變率氣候資料，本研究使用英國洛桑實驗室 (Rothamsted Research)所開發的 LARS-WG 天氣衍生器 (Semenov and Stratonovtich 2010)來產製逐日的天氣時間序列氣象資料。WGs 可以衍生與基期資料統計特性一致的長期天氣時間序列，本研究衍生 AR4 基期資料為 1980-1999 年，而 AR5 基期資料為 1986-2005 年。未來情境氣候則是以基期與未來氣候變遷下之改變率資料，產生未來統計資料以衍生未來逐日資料，所有資料產製 100 組以供 DSSAT 模式評估水稻生產衝擊。

三、DSSAT 模式基本資料

本研究所用 DSSAT 4.5 版作物模式為綜合性模式，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日射量(MJ m^{-2})、最高溫度(℃)、最低溫度(℃)及降雨量(mm)。水稻栽培方式依照目前慣行方式進行，行株距 15 cm × 30 cm，單位面積株數為 22 pl m^{-2}，模擬以單一期作為主，不考慮前期作的影響。施用氮肥量為 113 kg N ha^{-1}，模擬過程中設定為無肥料逆境及水分逆境。土壤特性是依據農委會農業試驗所農場之土壤調查資料，選取坋質黏土為水稻田土壤質地。DSSAT 模式對作物產量模擬有多次改版，更新版除加入新作物外，也改變作物模式模擬架構及增加新生長參數。過去曾利用 DSSAT 3.0 版建立「臺農 67 號」水稻品種之遺傳參數(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。

四、糧食生產評估系統分析流程

本研究使用之「不同氣候情境糧食生產評估系統」，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 GIS 技術進行面化，並將面化之圖資屬性資料存入資料庫。糧食評估系統介面，直接執行 DSSAT 4.5 版模式模擬功能。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。模擬後產量值可由 5 km × 5 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。

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，所以在時間解析度上氣象資料需為完整一年的逐日資料。而 TCCIP 團隊產製之降尺度資料能提供 DSSAT 作物模式所需氣象資料，包括日最高溫、日最低溫、日降雨量及日射量等四個氣象因子，並且空間解析度需 5 km × 5 km 高解析度的氣候資訊且轉製成農試所之網格數，將臺灣地區劃分為 1,568 個 5 km × 5 km 的網格點。在 DSSAT 模式計算水稻產量時，將網格氣象資料輸入 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。本研究所設定之水稻品種為「臺農 67 號」，模擬過程中設定為無肥料、水分、病蟲害等環境逆境，因此模擬所得為無環境逆境狀態下之水稻產量，以探討水稻產量與氣象因子(溫度、日射量)之關係。

結果

IPCC AR5 之情境模擬則是以輻射量作為氣候變遷之基準，RCP 4.5 是透過共識以減少溫室氣體排放，在 2100 年前達到平衡；RCP 8.5 則是未有效控制溫室氣體排放下之氣候情境。由 Fig. 1 結果顯示全臺逐月平均值，在 RCP 4.5 及 RCP 8.5 之 4 個期程(基期、世紀初、中及末)的最高溫度與最低溫度之逐月平均值變化趨勢表現一致，相較於基期，未來氣溫有增加之趨勢。對最高溫度而言，臺灣在 RCP 4.5 情境下，世紀末平均上升 0.91℃，RCP 8.5 則上升 1.75℃；最低溫度而言，在 RCP 4.5 情境下，世紀末平均上升 0.91℃，RCP 8.5 則上升 1.77℃。另就全臺最高溫度之空間差異分析(Fig. 2)，未來在 RCP 4.5 及 RCP 8.5 情境下之平均高溫變化，紅色為超過 30℃區域，在基線以高雄及屏東為主要發生區域，隨著全球增溫，紅色區域向北延伸，RCP 8.5 已延伸至大臺中地區，同時在東部臺東部分區域也有較大面積超過 30℃區域。

日射量在農業生產或模擬作物生長模式的研究中，是不可或缺的氣象資料，但 IPCC 並不提供日射量的推估資料，主要原因是日射量受雲層及大氣環境影響，變因極大，針對未來氣候推估意義不大。另就國內現行的日射量資料在觀測點數及地域分佈並不足夠，能提供日射量資料之測站僅 67 個，必須以估計方式來彌補資料的欠缺，由過去臺灣各地日射量資料分析，日較溫(平均最高溫減平均最低溫)和日射量間具有相關性(Yao *et al.* 2002)。因此 TCCIP 團隊利用日較溫資料反衍日射量以解決模式所需氣象參數問題。但由 IPCC AR5 所反衍未來氣候資料，基期之日較溫平均約為 7.99℃ (100 年平均)，RCP4.5 情境下之世紀初、中及末之日較溫平均分別約為 7.99、7.96 及 8.00℃ (100 年平均)，RCP8.5 情境下之世紀初、中及末之日較溫平均分別約為 7.97、7.98 及 7.98℃ (100

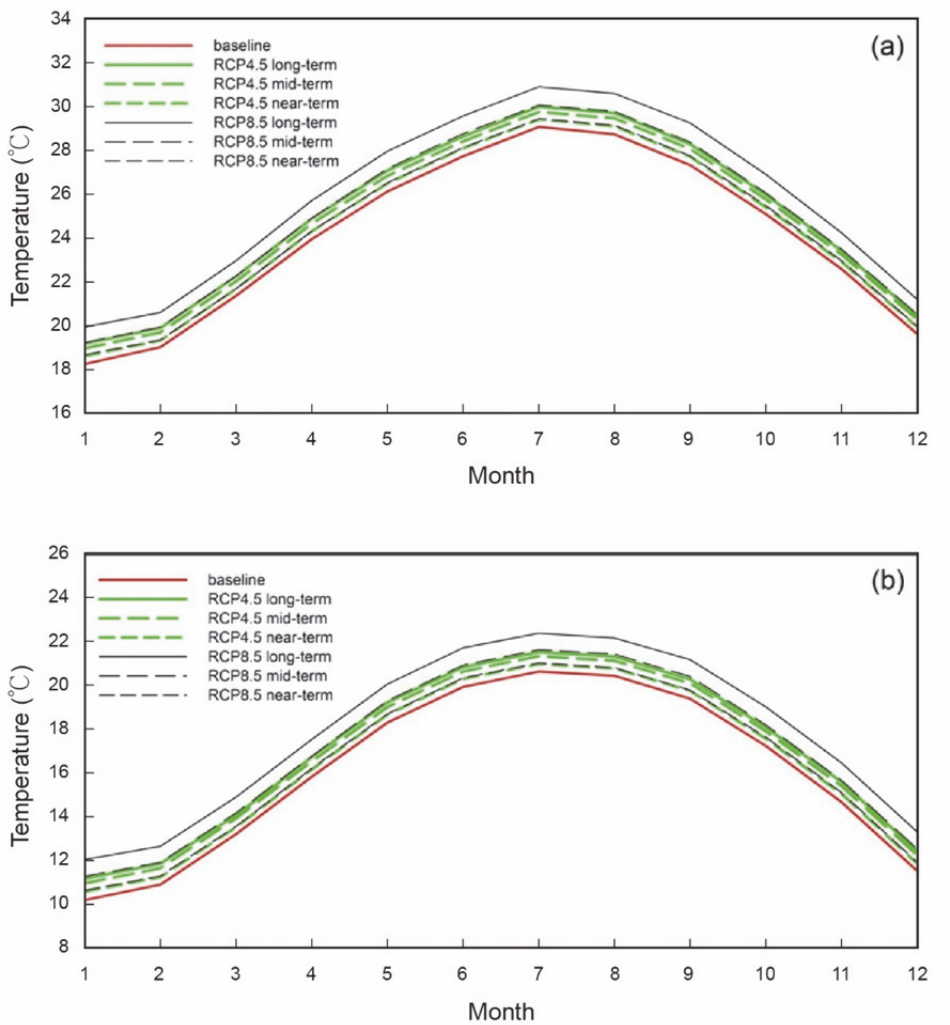


Fig. 1. (A)Change of monthly maximum temperature in the baseline (1986–2005), near-term (2016–2035), mid-term (2046–2065), and the long-term (2081–2100)under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.(B) Change of monthly minimum temperature in the baseline (1986–2005),near-term (2016–2035), mid-term (2046–2065), and the long-term (2081–2100)under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

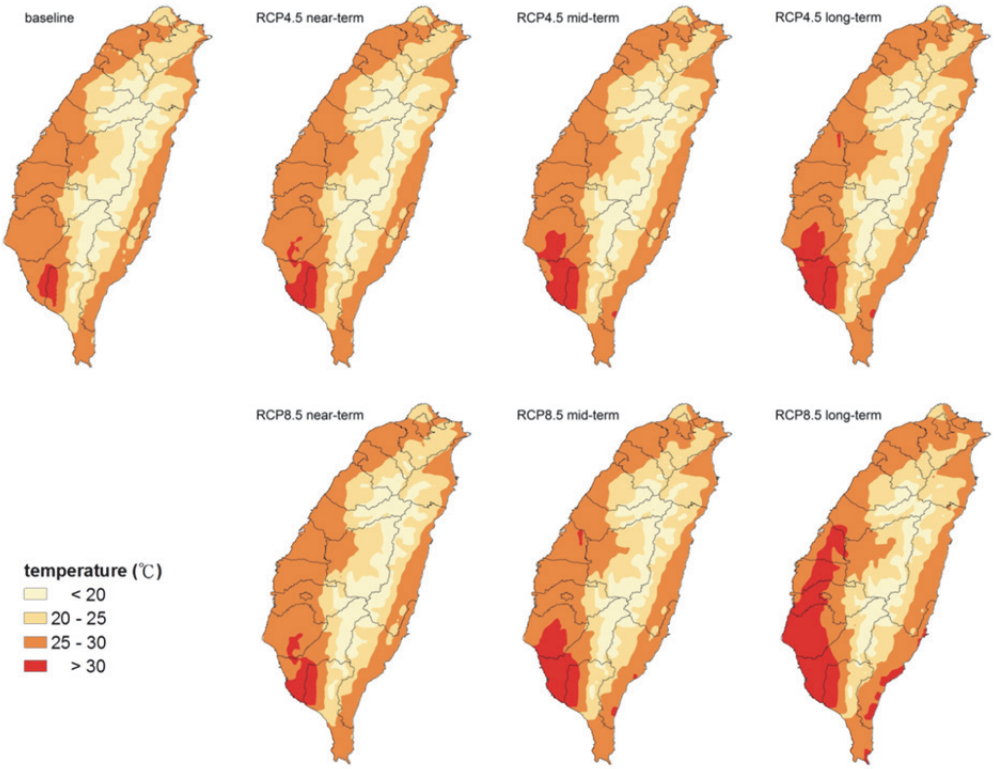


Fig. 2. Maps of maximum temperature in the baseline (1986–2005), near-term (2016–2035), mid-term (2046–2065), and the long-term (2081–2100) under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario in Taiwan.

年平均)。顯然，就氣候推估資料，最高溫及最低溫的逐月變化是等距上升。由 Fig. 3 顯示，兩種情境之世紀末與基期的日射量資料逐月平均值變化趨勢一致且數值差異不大，其空間分布情況亦有相同之趨勢。由於 TCCIP 產製的統計降尺度資料中，所推估之日較溫並沒有明顯差異，而造成繁衍出來的日射量資料，在基期與世紀初、中及末之結果數值相近。

DSSAT 模式評估作物產量所需參數為日最高溫、日最低溫、日射量及雨量，在未來氣候資料能提供作物模式所需參數，由於設定無水分逆境及未來日較溫差異不大，所以能影響水稻生產之氣象參數僅為溫度。Fig. 4 為設定海拔 500 m 以下之水稻可種植區域，在 RCP 4.5 及 RCP 8.5 下，基期與世紀末時全臺水稻區生育日數空間分布呈現，由生育日數低於 120 天(淡綠色部分)，基期僅限於屏東、高雄及臺南等部分區域，RCP 4.5 延伸至嘉義及雲林，RCP 8.5 則將涵蓋臺中市，東部則延伸至花蓮北端。

模式由於未設定肥料及水分逆境，以探討氣象因子對產量影響，所以模擬產量會較實際產量為高，本文將產量超過 10,000 kg ha^{-1} (深綠色)訂為高產區。分析 AR5 統計降尺度資料兩個情境下在基期及世紀末之水稻一期作產量差異(Fig. 5)，隨者溫室氣體排放的控制，RCP 8.5 將因增溫速率大而影響水稻產量，中南部及花東地區是水稻主要產區，雲林、嘉義及臺南區域為最大生產區，在未來高產範圍明顯減少。而花東地區，RCP 4.5 情境下花蓮富里及臺東池上有高產區，但至 RCP 8.5 則消失。在 RCP 8.5 世紀末的情境下，高產區僅剩屏東縣來義鄉、臺中市石岡

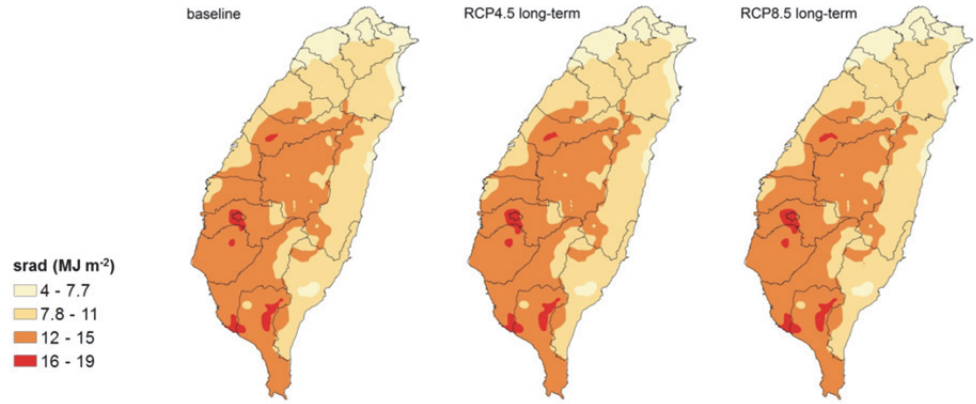


Fig. 3. Maps of solar radiation (SRAD) in the baseline (1986–2005) and the long-term (2081–2100) under the RCP4.5 and RCP8.5 scenario in Taiwan.

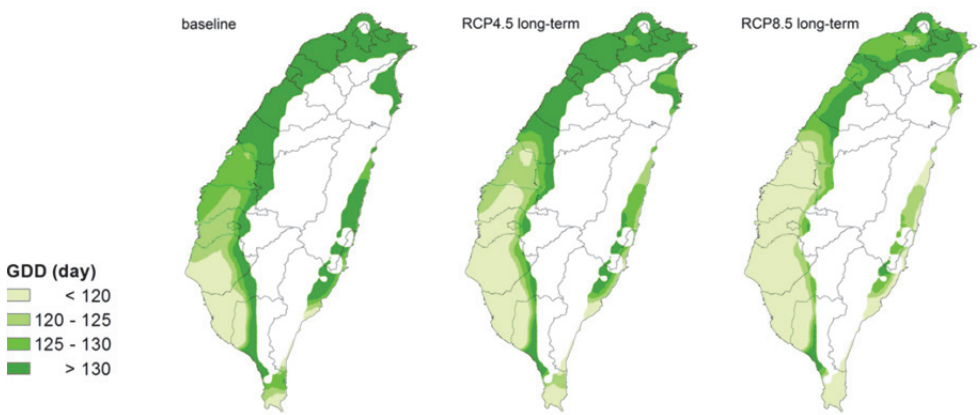


Fig. 4. Maps of growing degree days (GDD) for rice during the 1st cropping seasons in the baseline (1986–2005) and the long-term (2081–2100) under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenario in Taiwan.

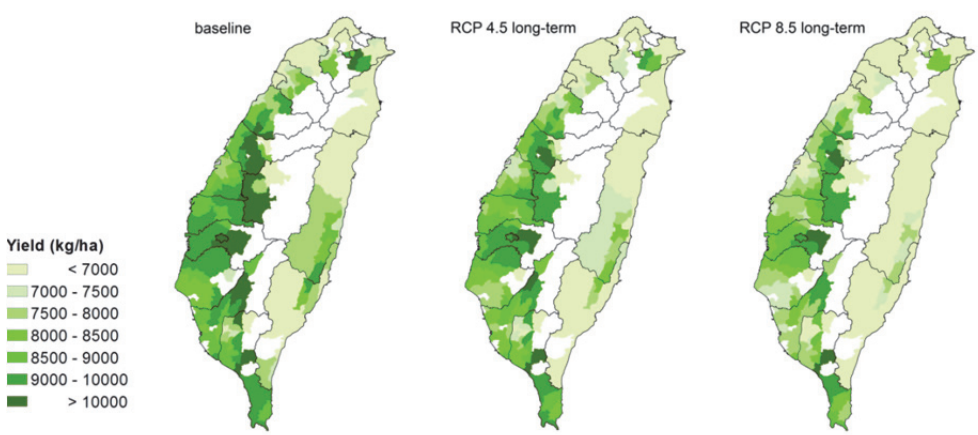


Fig. 5. Maps of rice yield in the 1st cropping seasons in the baseline (1986-2005) and the long-term (2081–2100) under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenario in Taiwan.

區、屏東縣春日鄉及嘉義市東區等較高。另以全臺平均而言，結果顯示未來臺灣地區水稻產量呈現減產的趨勢。在 RCP 4.5 情境下，基期(1986–2005 年)第一期作水稻生育日數約 133 d，單位面積產量平均 8,353 ± 1,584 kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀初(2016–2035 年)水稻生育日數約 130 d，單位面積產量平均 8,142 ± 1,582kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀中(2046–2065 年)水稻生育日數約 128 d，單位面積產量平均 7,905 ± 1,584 kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀末(2081–2100 年)水稻生育日數約 126 d，單位面積產量平均 7,798 ± 1,585 kg ha^{-1} (100 年平均)。在 RCP 8.5 情境下，基期(1986–2005 年)第一期作水稻生育日數約 133 d，單位面積產量平均 8,353 ± 1,584 kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀初(2016–2035 年)水稻生育日數約 130 d，單位面積產量平均 8,114 ± 1,587 kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀中(2046–2065 年)水稻生育日數約 126 d，單位面積產量平均 7,748 ± 1,585 kg ha^{-1} (100 年平均)；世紀末(2081–2100 年)水稻生育日數約 121 d，單位面積產量平均 7,297 ± 1,583 kg ha^{-1} (100 年平均)。

Fig. 6 為全臺水稻一期作在不同情境及期程下之平均值變化。由水稻產量改變率之盒鬚圖呈現得知，相較於基期水稻產量，RCP 4.5 及 RCP 8.5 在世紀初減少約 3%，RCP 4.5 情境之世紀中及世紀末水稻產量變動較小，具有較小的 IQR (interquartile range)，兩個期程約在 4–8%之間。RCP 8.5 在世紀中變化與 RCP 4.5 世紀末相近，但到世紀末差異就相當明顯，約減產 12–16%。

Fig. 5 (全臺水稻產量空間分佈)及 Fig. 6 (全臺水稻總產量盒鬚圖)之分析結果是以不考慮二氧化碳濃度為前提(以模式預設值 360 ppm)，然而氣候變遷的氣象特徵即為溫度及大氣中二氧化碳增加，二氧化碳增加對作物生長及產量是相當複雜。本文依據 IPCC 對未來二氧化碳濃度的預測，加入作物模式作進行產量評估，濃度設定在世紀初、中及末，RCP 4.5 分別為 424,499 及 534 ppm；RCP 8.5 則為 434,576 及 850 ppm。Fig. 7 為考慮二氧化碳之水稻一期作水稻產量改變率盒鬚圖，由資料顯示，加入二氧化碳後水稻產量是增加，RCP 4.5 及 RCP 8.5 在世紀初和基期相近，隨設定二氧化碳濃度大幅增加，水稻

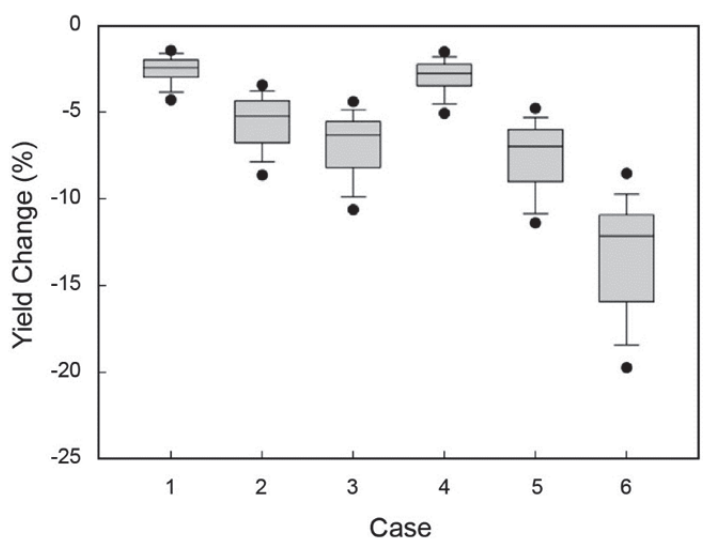


Fig. 6. Without effects of increased atmospheric CO_2 levels, boxplot of yield changes in the near-term (2016–2035), mid-term (2046–2065), and the long-term (2081–2100) with respect to baseline (1986–2005) in the RCP 4.5 scenario at cases 1–3 and in the RCP 8.5 at cases 4–6, respectively.

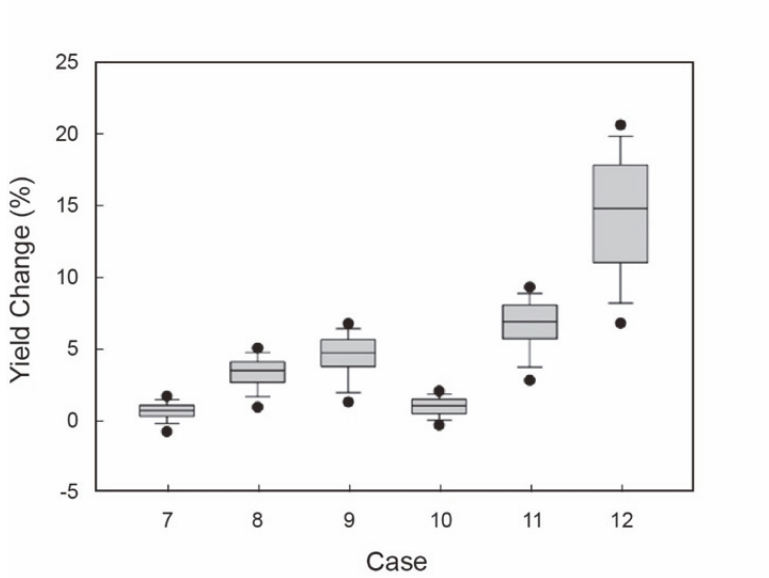


Fig. 7. With effects of increased atmospheric CO_2 levels, boxplot of yield changes in the near-term (2016–2035), mid-term (2046–2065), and the long-term (2081–2100) with respect to baseline (1986–2005) in the RCP 4.5 scenario at cases 7-8 and in the RCP 8.5 at cases 10–12, respectively.

也明顯增產；當二氧化碳濃度設定為 850 ppm，水稻產量增加 15%。就此分析案例中，未來氣候變遷下，水稻產量受二氧化碳肥料效應(carbon dioxide fertilization effect)較增溫明顯。

討論

對於未來氣候演進的評估，雖然氣候本身具有很高的變異性，使得預測上存在極大不確定性，但目前的科學界對於二氧化碳(CO_2)濃度及氣溫的持續增加具有共識，差別僅在上升速率的估算幅度。由於研究中使用未來氣候資料包括大氣環流模式的模擬資料，每一種模式有其特定參數及設定條件，但以全球尺度作預測，將全球化分為 1920 個網格，每一網格交叉點有一預測值，對於未來預測值也不盡相同。因此，本研究中是用 ensamble 方式處理模擬資料，由於 GCM 每一網格面積約為臺灣面積 2–3 倍，因此需由大氣學門利用降尺度技術網格化至 5 km × 5 km 網格才能符合農業使用。依據 IPCC 預測在 21 世紀末期，如果未積極有效的減緩溫室氣體排放(相當於 RCP 8.5 情境)，全球平均溫度將升高 2.6–4.8℃，而 CO_2 濃度將達到 667–901 ppm (IPCC 2013a)。本研究中，世紀末全臺平均最高溫度升高 1.75℃，平均最低溫度升高 1.77℃，兩者增加幅度相同，同時較全球平均值為低。事實上，依據預測結果，全球各地增溫幅度會因地區而有不同，由於臺灣四周皆臨海，鄰近 GCM 網格點可能為海面資料，海陸對於增溫速度不同，或許是臺灣增溫偏低的原因，但此部分仍需再探討。臺灣地形及氣候型態勢相當複雜，但就未來氣候趨勢仍符合全球趨勢，即由南部地區逐漸增溫，由 Fig. 2 結果可知，RCP 8.5 世紀末全臺主要農作物生產區(由臺中至屏東)之平均最高溫皆超過 30℃，將嚴重影響作物生育適溫條件，也直接影響產量。

對作物模式參數需求而言，日射量是重要參數，同時對於作物生長影響極大。Jong *et al.* (1982)研究指出夏威夷所種植玉米的產量可由日射量解釋 78.5%的變異量，仍說明了日射量變化是作物生理反應的主要變異來源。本研究模擬結果顯示，日射量在未來情

境及期程並無變化。主要原因為未來 GCM 之任一種模式皆無日射量預測資料。因雲量是決定太陽輻射到達近地面的重要因素，但雲量本身難以量化及自動連續記錄，變化量極大，作長期氣候預測其意義不大，因此需由其他氣象參數作推估。過去對於日射量估算及缺值時有許多研究(McCaskill 1990, De Jong and Stewart 1993, Chen *et al.* 1994)，一般以日較溫(平均最高溫減平均最低溫)、日照時數及降雨日數之原始數據作推估，但 GCM 模式並無日照時數及降雨日數資料。因此，本研究產製日射量資料系由 Yao *et al.* (2002) 建立之日較溫與日射量回歸公式，但因 ensamble 方式所推估之平均最高溫及平均最低溫幾乎是等距增溫，因此在不同情境及期程所用日射量資料與基期是相近。

水稻是我國最主要糧食作物，水稻產量也是農業生產及糧食安全重要指標。氣候變遷造成溫度變化與降雨型態之改變，而氣候發生改變則會影響水稻栽培環境，進而對水稻產量與品質造成影響。氣象因素與作物生長發育息息相關，尤其以氣溫、日射量以及降雨等三項因子最廣為探討。氣溫是調節營養生長速率及發育階段之主要氣象變數，同時也影響作物呼吸率及蒸發散量。太陽輻射提供葉片光合作用所需能量，左右植株碳水化合物分配和生質量累積。降雨雖未直接影響作物生育，但因水分乃作物生長要素，降雨不足造成的乾旱或過多形成的水患亦將控制生育表現。臺灣地區栽培之水稻品種約有 90%以上為粳稻，而高溫多濕及低光照的栽培環境並不利於粳稻生長，因此氣候暖化將可能對臺灣地區糧食生產造成影響(Lur and Liu 2006, Chuang and Lur 2013)。但就未來氣候變遷下水稻生長評估，在未來氣候資料受限下僅能以溫度作評估，雖然水稻每一生育階段有適溫範圍，但會造成生長逆境的氣象條件難以用平均之統計降尺度呈現。因此，溫度對於水稻影響在於對生育階段的轉換，日積溫(daily accumulation degree)決定水稻營養生長及生殖生長轉換，增溫將加速生長期的轉換，就 RCP 4.5 及 8.5 在世紀末全臺水稻一期作生育日數變化，升溫將造成生育日數縮短，中南部少於 120 天之區域大幅增加，而北部高於 130 d 之區域在 RCP 8.5 明顯減少。

生育日數縮短造成光合作用積存(sink)不足，影響產量的減少。有關於氣候變遷下對於農作物產量的影響也有許多評估，但皆屬於地域性估算結果，因每一地區對於增溫會有不同反應。Wang*et al.* (2011) 利用 DSSAT-CSM 作物模式評估基期(1961–1990 年)到近世紀(2040–2069 年)氣候變遷下加拿大南部地區小麥產量之變化，統計降尺度資料使用 IPCC AR4 提供的 A1B、A2 以及 B1 等三種氣候變遷情境，並配合作物模式模擬小麥產量。其結果顯示，各氣候變遷情境下加拿大南部地區種植小麥，其生質量皆有增加之趨勢。另外，Wu *et al.*(2012)利用 DSSAT 模式模擬氣候變遷下臺灣桃園地區第一期作水稻產量，使用 TCCIP 所提供之統計降尺度資料(AR4)，藉由氣象合成模式對基期(1985–1999 年)與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，並配合 DSSAT 作物模式模擬水稻產量。其結果顯示，於未來不同之氣候條件(A1B 情境中之 CNRM_CM3、CSIRO_MK3_0 及 Ensemble 等 GCM 模式)第一期作水稻產量皆有減產之趨勢。本文以全臺為尺度及最新氣候資料(AR5)評估結果，基本上皆呈減產趨勢，影響最大為 RCP 8.5 世紀末將減產約 13%。

本文 Fig. 6 強調評估結果是在不考慮二氧化碳濃度變化下的水稻產量變化，但氣候變遷的成因是大氣中二氧化碳濃度上升，就作物生長而言，提高二氧化碳濃度有助於葉片行光合作用，尤其是水稻屬於 C3 型固碳循環，二氧化碳肥料效應將更為明顯(Mulholland *et al.* 1998)。但就近年科學研究結果，在學理上提高二氧化碳濃度對"農作物"有益，但並不見得能增加產量，因二氧化

碳增高將導致氣溫升高，病蟲害增加、及雜草競爭結果，對糧食生產或許是減產而非增產(Reidsma *et al*. 2010)。Fig. 7 為依據 Meinshausen *et al*. (2010)提供不同情境及期程下二氧化碳濃度，輸入作物模式進行估算，經與 Fig. 6 相同評估流程下水稻產量變化的比較則有不同結果，在所有情境及期程下皆呈增產。Yao and Chen (2009)利用 DSSAT 模式進行氣候敏感度分析，結果顯示增溫對於水稻減產效應大於提高 CO_2 濃度之增產效應。但就本研究結果，增溫減產效應與增加二氧化碳增產效應兩者對水稻產量影響的幅度差異不大。

結論

未來氣候變遷存在著快速改變且難以精確預測，同時有些與農業密切相關之氣象因素(日射量及降水)在未來仍很難有一致性之趨勢，更遑論精確定量數據。而作物與氣象因素之間的交感效應，雖然經許多研究建立數學模式及具有生物特性之作物模式，但作物本身的反應並非線性，每一種作物(甚至於品種或品系)有其遺傳特性及生理反應。當將單株尺度放大到一塊田區時，雜草競爭、病蟲害問題及災害發生，到全國尺度的產量預估則需考慮糧食供應平衡問題，水資源提供及可耕地利用等問題。氣候變遷下國內農作物生產潛力的評估，對於未來糧食安全及農業永續經營是重要資訊，雖然作全國性精準產量評估目前仍存在著相當大的難度，需投入更多作物(單株及大面積田區尺度)-氣象交感之基礎研究。同時，模式驗證是評估的基礎，這需要更多及更精準之田間實際調查數據作為修正模式參數依據。本文研究是結合大氣學門之未來氣候模擬資料，輸入已驗證之糧食生產評估系統，由作物模式(DSSAT)透過面化分析技術，評估水稻在未來不同氣候情境及期程下水稻產量，主要是評估方法及流程的建立。另就評估結果，氣溫逐漸上升將造成水稻生育日數縮短，使產量下降，且在未來可能之環境最失控的狀態(RCP 8.5)，於世紀末(2081–2100 年)水稻產量改變率平均約減少 13%。針對未來調適策略，農耕制度改變或新品種育成則需要長時間投入，因此利用作物模式進行作物對氣候變化反應的評估，有助於提前找出未來可能發生問題的解決方案，以期對未來水稻產區之產量空間分布作更精確的評估，作為氣候變遷下水稻生產調適之參考。

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)及國科會計畫(NSC-101-2625-M-002) (NSC 102-2621-M-492-001)支持，特表謝忱。

引用文獻

Basak JK, MA Ali, MN Islam, MA Rashid (2010) Assessment of the effect of climate change on boro rice production in Bangladesh using DSSAT model. **J. Civil Eng.** 38:95-108.

Chen CL, CF Lin, TS Liu (1994) Estimate and analysis of solar radiations in Taiwan. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 43:77-92.

Chen CJ, MH Yao, HP Chen, FC Liao (2014) Establishing an evaluation system for food production: A case study on rice production. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 63:84-90.

Chuang FM, HS Lur (2013) Impacts of high temperature on rice yield and quality: from physiological Level to field environment. (in Chinese with English abstract) **Crop Environ. Bioinform.**10:75-83.

DeJong R, DW Stewart (1993) Estimating global solar radiation from common meteorological observation in western Canada. Can. **J. Plant Sci.** 73:509-518.

Fischer G, M Shah, H van Velthuizen (2002) Climate Change and Agricultural Vulnerability. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria. p.160.

IPCC (2007) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change (AR4). IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2012) Summary for Policymakers. *In:* Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. p.1-19. *In*: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB, V Barros, TF Stocker, D Qin, DJ Dokken, KL Ebi, MD Mastrandrea, KJ Mach, GK Plattner, SK Allen, M Tignor, PM Midgley (Eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC (2013a) IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change (AR5). IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2013b) Summary for Policymakers. *In:* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker TF, D Qin, GK Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex, PM Midgley (Eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jong SK, JL Brewbaker, CH Lee(1982) Effects of solar radiation on the performance of maize in41 successive monthly plantings in Hawaii. **Crop Sci.** 22:13-18.

Kilsby CG, PD Jones, A Burton, AC Ford, HJ Fowler, C Harpham, P James, A Smith, RL Wilby (2007) A daily weather generator for use in climate change studies. **Environ. Model. Softw.** 22:1705-1719.

Lur HS, YH Liu (2006) Environmental Challenge and Strategy for Quality Rice Culture in Taiwan. (in Chinese with English abstract) **Crop Environ. Bioinform.**4:297-306.

Maurer EP (2007) Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California under two emissions scenarios. **Clim. Change.** 82:309-325.

McCaskill MR (1990) Prediction of solar radiation from rain-day information using regionally stable coefficients. **Agric. For. Meteorol.** 51:247-255.

Meinshausen M, SJ Smith, KCalvin, JS Daniel, MLT Kainuma, J-F Lamarque, K Matsumoto, SA Montzka, SCB Raper, K Riahi, A Thomson, GJM Velders, DPP van Vuuren (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Clim. Change.** 109:213–241.

Mulholland BJ, J Craigon, CR Black, JJ Colls, J Atherton, G Landon (1998) Effects of elevated CO_2 and O_3 on the rate and duration of grain growth and harvest index in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). **Glob. Change Biol.** 4:627-635.

Osborne T, G Rose, T Wheeler (2013) Variation in the global-scale impacts of climate change on crop productivity due to climate model uncertainly and adaptation. **Agric. For. Meteorol.** 170:183-194.

Reidsma P, F Ewert, AO Lansink, R Leemans (2010) Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. **Europ. J. Agron.**32:91-102.

Richardson CW (1981) Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. **Water Resour. Research** 17:182-190.

Semenov MA, EM Barrow (1997) Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. **Clim. Change.** 35:397-414.

Semenov MA, P Stratonovitch (2010) The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change. **Clim. Res.** 41:1-14.

Tao F, M Yokozawa, Z Zhang (2009) Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimi-zation, and uncertainties analysis. **Agric. For. Meteorol.** 149:831-850.

Throp KR, KC Dejonge, AL Kaleita, WD Batchelor, JO Paz (2008) Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. **Comput. Electr. Agric.** 64:276-285.

WangH, Y He, B Qian, B McConkey, H Cutforth, T McCaig, G McLeod, R Zentner, C Campbell, R DePauw, R Lemke, K Brandt1, T Liu, X Qin, G Hoogenboom, JWhite, T Hunt(2011) Impact of climate change on wheat production for ethanol in Southern Saskatchewan Canada. **World Renew. Energy Congress–Sweden** 57:644-651.

Wilks DS (1992) Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. **Clim. Change.** 22:67-84.

Wood AW, EP Maurer, A Kumar, DP Lettenmaier (2002) Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **J. Geophys. Res. Atmos.**107:1-15.

Wood AW, LR Leung, V Sridhar, DP Lettenmaier (2004) Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. **Clim. Change.** 62:189-216.

Wu RS, MH Li, JT Fang (2014)Assessment of climate change impact on crop yields in northern Taiwan using principal component analysis. (in Chinese with English abstract) **Agric. Eng.** 60:68-81.

Yao MH, HS Lur, C Chu, JC Tsai (2000) The applicability of DSSAT model to predict the production of rice and to evaluate the impact of climate change. (in Chinese with English abstract)**J. Taiwan Agric. Res.** 49:16-28.

Yao MH, SH Chen (2009) The impact evaluation of climate change on the growth and yield of rice. (in Chinese with English abstract)**Crop Environ. Bioinform.** 6:141-156.

Yao MH, S Chen, KS Chi, JC Tsai (2002) Estimating solar radiation from daily temperature data. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Res. China** 54:73-83.

－編輯：楊純明