

DSSAT 模式模擬水稻生長之參數最佳化與應用

PARAMETERS OPTIMIZATION AND APPLICATION OF DSSAT MODEL FOR PADDY RICE GROWTH SIMULATION

行政院農業委員會
農田水利署花蓮管理處
工程員

任 菀 翎
Wan-Ling Ren

國立屏東科技大學
土木工程系
教授

葉 一 隆*
Yi-Lung Yeh

摘 要

水稻灌溉可透過不同灌溉期距與灌溉水深來達到節水效果，因灌溉期距之調整會影響灌溉總用水量及水稻產量。本文選用農業委員會農田水利署嘉南管理處(原臺灣嘉南農田水利會)灌溉技術推廣中心之滲漏計試驗區於 2018 年及 2019 年一期作之試驗資料，水稻品種為台南 11 號，探討以 DSSAT 模式來模擬水稻生長之作物品種參數最佳化值，再依評估結果參數分析不同灌溉期距對水稻產量與節水率之影響。

本文使用擴展傅立葉幅度檢驗法(Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test, EFAST)建立試驗區之模式作物品種參數值，利用灰關聯分析來評估坵塊之參數最佳組合，再將作物品種參數進行檢定。由分析結果顯示臺南 11 號品種參數 P1、P2R、P5、P2O、G1、G2、G3 與 G4 分別為 643.1、123.4、531.2、11.26、37.99、0.026、1.501 與 1.065。

對於灌溉期距調整對產量與節水率影響分析，以灌溉期距 3 天之總灌溉水深為基礎，比較灌溉期距為 3 天至 13 天之水稻產量與節水率之影響，由分析結果顯示灌溉期距為 8 天時，其產量可增加 8.47%，節水率達 56.77%。

關鍵詞：水稻、DSSAT 模式、灌溉期距、灰關聯分析、擴展傅立葉幅度檢驗。

* 通訊作者，國立屏東科技大學土木工程系教授

PARAMETERS OPTIMIZATION AND APPLICATION OF DSSAT MODEL FOR PADDY RICE GROWTH SIMULATION

Wan-Ling Ren

Council of Agriculture
Irrigation Agency
Hualien Management Office

Yi-Lung Yeh*

National Pingtung University of
Science and Technology
Department of Civil Engineering

ABSTRACT

Traditional paddy field irrigation mainly uses flood irrigation and achieves water-saving effects through different irrigation intervals and irrigation water depths. The adjustment of irrigation intervals affects irrigation water consumption and rice yield. In this study, 12 blocks of lysimeter obtained from the Irrigation Technology Extension Center of Chia-Nan Management Office, Irrigation Agency, Council of Agriculture (former Taiwan Chia-Nan Irrigation Association) in 2018 and 2019 were selected. The study analyzed the optimized parameter of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model and further assessed the impacts of different irrigation intervals on rice.

The Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (EFAST) method was used to establish the parameter values of the model crop varieties of the 12 plots in the lysimeter test area. The optimal parameter combination of each plot was analyzed using grey relational analysis. The crop variety (Tainan 11) parameters were tested, and the average value was the best. The crop variety parameters P1, P2R, P5, P2O, G1, G2, G3, and G4 were 643.1, 123.4, 531.2, 11.26, 37.99, 0.026, 1.501, 1.065, respectively.

The different irrigation interval water depths were compared with the total irrigation water depth of 3 days, and the optimal rice yield was obtained when the irrigation interval was 8 days. The rice yield rate was increased by 8.47%, with 56.77% savings in water.

Keywords: Paddy field, DSSAT model, Irrigation periods, Grey correlation analysis, Extended Fourier amplitude sensitivity test.

一、前言

臺灣位於熱帶與亞熱帶地區，加上地理與氣候條件特殊，使每年之降雨量可達 2,500 mm，因此讓農作物多樣且豐富。而臺灣水資源利用主要分為農業用水、民生用水、工業用水等三大類，農業用水佔年用水總量的 71.15%，其又分為養殖、畜牧與灌溉等三大類的，並以灌溉用水居多。水稻為台灣主要糧食作物之一，且種植面積最大。而傳統水稻灌溉方式多以漫灌為主，故在灌溉用水中，以水稻栽培之需水量為最大量。甘俊二(1979)提到作物之成長過程中，水稻的耗水量比其他作物高，而在開花期的用水量為最多。因此，在有限的水資源情況下，為顧及農民生計及水資源調配，探討灌溉水量的利用是有必要性的。

水稻栽培之節水技術探討，甘俊二(1988)指出水稻可透過不同灌溉期距與灌溉水深來達到節水效果，而灌溉期距調整會影響灌溉用水量及水稻產量。灌溉期距調整因地而異，如嘉南地區為 7.5 天、桃園地區為 3-4 天、而臺東與花蓮均為 2 天需施灌 1 次。陳清田等(2014)探討水稻生育階段中的分蘖期與開花期，以 80%與 100%之灌溉水量分別在 7、10、13 天之輪灌期距進行節水灌溉處理。透過結果可得知，100%之灌溉水量輔以 7 天輪灌期距之處理時，對於一、二期作之水稻在開花期時的產量影響較小，而節水效能可達 14.0%~7.4%。

常用水稻生長模擬模式有 DSSAT CERES-Rice 與 ORYZA Rice Model，其中 DSSAT 模式之應用綜合性較廣泛，此模式包含許多不同模組，如 CERES (Crop-Environment Resource Synthesis) 和 CROPGRO (Crop Growth) 系列模組等。Ruthie 等針對不同作物開發不同 CERES 穀類作物模擬模組，包含 CERES-Maize、CERES-Wheat、CERES-Rice 等。CERES 模式較常使用於氣候變化對農業之影響評估，而在 DSSAT 模式含有多種作物的決策支持系列，可透過系統設計針對不同品種、播期、密度、施肥量、灌溉水量等多種因子進行長時期之模擬試驗。因此 DSSAT 模式可作為短時間內完成作物栽培模擬之工具，可針對田區栽培試驗提出初步方案。DSSAT 之優點為可提供多種模擬試驗之方法，如作物生理、土壤水肥動態等多方面模擬環境因數對作物生長影響(Jones *et al.*, 2003；王文佳, 2012；劉海龍, 2011；魯向暉等, 2010)。

目前灌溉研究運用 DSSAT 模式較為廣泛，如 He *et al.* (2011)；Ahmad *et al.* (2012)；Amiri *et al.* (2013)；Jeong *et al.* (2014)；Ngwira *et al.* (2014)；Devkota *et al.* (2015)；Dias *et al.* (2015)；Jiang *et al.* (2016)；Anderson

et al. (2018)；Boonwichai *et al.* (2018)；Malik *et al.* (2019)；陳增壽(1996)；秦松林(2013)；魏郁婷(2014)等均利用 DSSAT 模式探討各種作物生長問題，其中 Basak *et al.* (2010) 提到 DSSAT 模式有助於評估氣候變化和方式對不同品種的水稻和其他農作物之影響。而陳亭羽(2012)利用 DSSAT 模式針對桃園地區一期作水稻產量進行模擬，而透過模擬結果可得知在溫度增加情況下，產量有增加的變化，當溫度比現況溫度(25.6 °C)增加超過 3 °C 以上，增產量則會減少，而對作物生長天數而言，氣溫上升，則會降低作物生長天數。

迴歸分析是探討變數間之關係中最常用的方法之一，而灰關聯分析可以彌補迴歸分析上之缺點，如變化因素不能過多、需求大量之數據、數據分布必須常態分佈。灰關聯分析(Grey Correlation Analysis, GRA)是 Deng (1989)所提出之一種分析離散序列資料間關係程度之測度方法，楊志維(2004)提到灰關聯度值越大，代表貢獻度越大。林信宏(2008)利用灰關聯分析法評估取水距離、土壤入滲率、調洪效益與水田灌溉面積等 4 種因子，估算區域中最適合休耕水田蓄水之區位。李煜基(2012)以灰關聯分析和加權權重針對人工溼地水質參數進行分析比較；楊峰等(2006)利用灰關聯分析，對 16 個雜交稻苗組合與 2005 年試驗鑑定的 10 種農藝性狀進行綜合評估。

綜合上述說明，傳統水稻灌溉以漫灌為主，並透過不同灌溉期距與灌溉水深來達到節水效果。因灌溉期距之調整會影響灌溉用水量及水稻產量；因此，本研究之目的為使用 DSSAT 模式進行模擬，而模擬數據選用臺灣嘉南農田水利會灌溉技術推廣中心之滲漏試驗田區，於 2018 一期作之試驗數據進行參數最佳化值，且採用 2019 年一期作之試驗數據進行模式驗證。最後評估不同灌溉期距之調整，得知產量之變化結果。

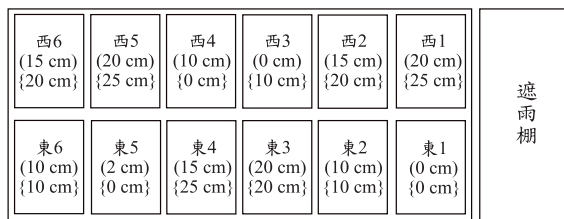
二、資料收集

本文使用之資料取自於 2018 年利用紋溝強化水稻栽種節水效率試驗(臺灣嘉南農田水利會, 2018)與 2019 年水稻田紋溝灌溉之水分控制與節水效率分析(台北市瑠公農田水利會, 2019)計畫之試驗數據，水稻栽培時程為 2018 年與 2019 年之 2 月至 6 月期間之一期作，而水稻品種選用台南 11 號。

2.1 研究區域概述

本文試驗地點位於台南市學甲區之行政院農業委

員會農田水利署嘉南管理處(原臺灣嘉南農田水利會)灌溉技術推廣中心之滲漏計試驗區，其試驗區內設置一級氣象站，用於觀測氣溫、降雨量、蒸發量、風速、風向等資料，以便提供試驗使用。試驗場內設置 12 個 3.0 m × 4.7 m 面積之坵塊田區(如圖 1 所示)，場內之坵塊有不同紋溝寬度配置，而滲漏計試驗區中設有一座遮雨棚，有利於排除在試驗過程中，因降雨造成之試驗誤差。



備註: ()為 2018 年一期作之不同紋溝寬度，{ }為 2019 年一期作之不同紋溝深度。

圖 1 行政院農業委員會農田水利署嘉南管理處灌溉技術推廣中心滲漏計試驗區之試驗配置圖

2.2 氣象資料

氣象資料取自於試驗田區內所設置之一級農業氣象站，而觀測數據包括逐日之最高溫(°C)、最低溫(°C)、降雨量(mm)及太陽輻射量(MJ/m²)。本文採用 2018 年 1 月至 2019 年 8 月之氣象數據。為準確評估水稻生長之整體狀況，在試驗期間使用自動遮雨棚設備，因此，降雨量不納入模擬資料。

2.3 土壤資料

DSSAT 模式所需之土壤資料為黏土、砂土以及礫石之含量(如表 1 所示)，而礫石之含量均為 0，因此，不列入表中顯示(李淞義，2017)。

1 模式輸入之土壤分類及黏土與砂土含量百分比

坵塊	黏土 (%)	砂土 (%)
東 1	7.0	62.0
東 2	6.0	70.0
東 3	5.0	52.0
東 4	7.0	69.0
東 5	7.0	65.0
東 6	8.0	70.0
西 1	8.0	58.0
西 2	9.0	60.0
西 3	6.0	66.0
西 4	8.0	54.0
西 5	8.0	72.0
西 6	7.0	65.0

2.4 肥料資料

DSSAT 模式需要輸入試驗之施灑日期、肥料之氮、磷、鉀使用量(kg/ha)等肥料資料，肥料之含量如表 2 所示。

表 2 模式輸入之肥料施用種類、日期與用量

施肥日期	使用量(kg/ha)		
	氮	磷	鉀
2018 年 3 月 26 日	110	55	55
2018 年 4 月 11 日	110	55	55
2019 年 2 月 25 日	51	77	213
2019 年 3 月 10 日	51	77	213
2019 年 3 月 28 日	85	21	43

2.5 灌溉資料

DSSAT 模式需要輸入試驗之灌溉日期、灌溉水深及灌溉方式等灌溉資料，本文之灌溉方式為漫灌與溝灌，將試驗期間紀錄之灌溉用水量輸入至模式。

三、DSSAT 模式介紹與應用

本文之模式參數最佳化選用 2018 年一期作之試驗數據，而模式驗證則採用 2019 年一期作之試驗數據。將資料收集之試驗數據輸入至模式內，針對作物品種之參數使用擴展傅立葉幅度檢驗法生成 12,000 個參數，並使用 R 語言連結至 DSSAT 模式，使模式進行模擬。再使用灰關聯分析，尋找模式參數之最佳化結果，再將品種參數進行偏態分佈檢定以及參數之 95%信賴區間估計上下限值，最後模擬灌溉期距調整對水稻產量之影響。

3.1 DSSAT 模式介紹

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 模式是在 1986 年美國農業部資助下，夏威夷州立大學主持 IBSNAT 項目，通過對各模式進行標準化處理後，發展為一套綜合計算機系統，而 DSSAT 模式架構(如圖 2 所示)。DSSAT 模式包括 CSM-CERES-Rice 系統模式，此系統模式可模擬水稻從種植或移植到收成之生長和發育過程，並給予當地土壤和天氣條件響應水稻之生理過程。而運行模式所需輸入數據包括試驗場之經緯度、高程、坡度、每日氣象資料(最高溫、最低溫、降雨量、太陽輻射量)、

土壤特性(土壤分層、有機碳含量、有機氮含量、PH 值、鉀含量、磷含量)、作物品種係數(水稻品種)、作物管理方式(種植日期、種植方式、種植空間)及施肥和灌溉之日期與用量(Jintrawet, 1995 ; Ritchie *et al.*, 1998 ; St'astna *et al.*, 2002 ; Sarkar, 2006 ; Amiri *et al.*, 2013 ; Ritchie, 1998 ; Shelia *et al.*, 2018 ; 吳瑞賢等, 2014)。

3.2 DSSAT 模式之選用方程式

DSSAT 模式之次要模塊中的計算方程式，本文在模擬時之蒸散量計算方法選用 Priestley-Taylor (1972) 法，其方程式如式(1)所示(Ritchie, 1972; Ritchie, 1985; Jones, 1991; Akumaga *et al.*, 2019)。

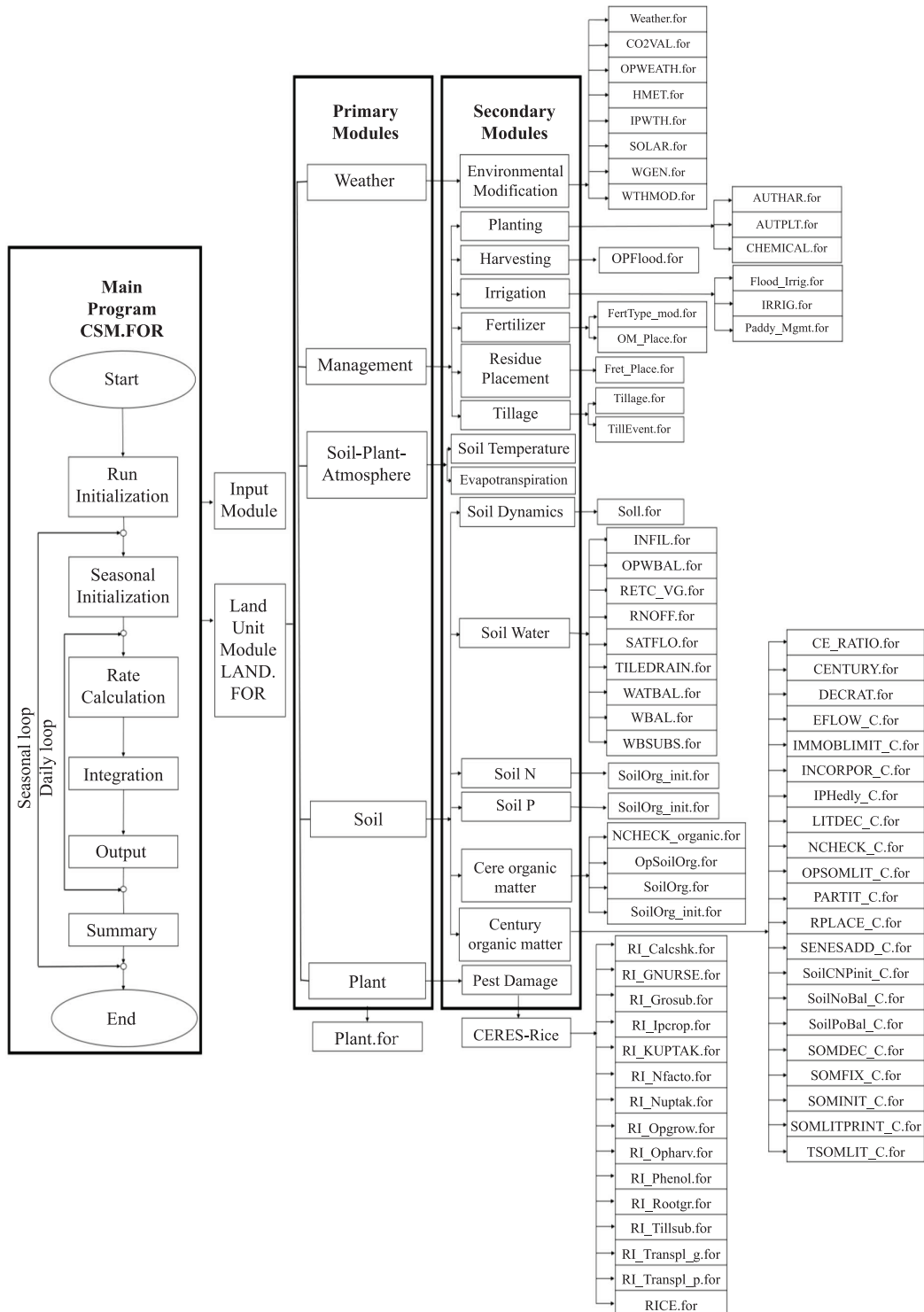


圖 2 DSSAT 模式架構與使用程式圖

$$ET_{pt} = \frac{\alpha \Delta (R_n - G)}{\lambda (\Delta + \gamma)} \dots\dots\dots (1)$$

式中 ET_{pt} 為蒸散量(mm/d)， α 為一常數，等於 1.26， λ 為蒸發潛熱(MJ/kg)， Δ 為蒸氣壓-溫度曲線的斜率(kPa/°C)， R_n 為太陽淨輻射(MJ/m²d)， G 為每日土壤熱通量(MJ/m²d)， γ 為濕度常數(kPa/°C)。

在 DSSAT 模式之 Environmental Modification 模塊中，蒸散量 (PET_{pt}) 與土壤反照率 ($ALBEDO$) 之計算公式如式(2)~式(5)所示 (Akumaga *et al.*, 2019; Ritchie, 1998)。

$$PET_{pt} = 23.923 \times T_{adj} \times SRAD \times (0.000204 - 0.000183 \times ALBEDO) \dots\dots\dots (2) \times (TD + 29)$$

$$ALBEDO = 0.23 - (0.23 - MSALB) e^{-0.75 \times LAI} \dots\dots\dots (3)$$

$$ALBEDO = 0.23 + (LAI - 4) \times 2 / 160 \dots\dots\dots (4)$$

$$TD = 0.6 \times T_{max} + 0.4 \times T_{min} \dots\dots\dots (5)$$

其中式(3)為開花前之計算公式，式(4)為開花後之計算公式。而 $SRAD$ 為太陽輻射量(MJ/m²d)， $MSALB$ 為裸土反照率， LAI 為葉面積指數， TD 為近似白天溫度(°C)， T_{max} 、 T_{min} 分別為每日最高溫及每日最低溫(°C)， T_{adj} 是一個默認值，設為 1.1，其溫度適用範圍值為 5 °C - 35 °C，如大於 35 °C 或低於 5 °C，則需使用式(6)或式(7)修正 (Akumaga *et al.*, 2019)。

1.當 T_{max} 大於 35 °C 時， T_{adj} 的計算公式如式(6)

$$T_{adj} = 1.1 + 0.05 (T_{max} - 35) \dots\dots\dots (6)$$

2.當 T_{max} 低於 5 °C 時， T_{adj} 的計算公式如式(7)

$$T_{adj} = 0.01 e^{0.18(T_{max} + 20)} \dots\dots\dots (7)$$

在 DSSAT 模式之 Management 模塊之 Planting 模組，針對水稻每階段之生育日數，依據生育度數法 (Growing Degree Days, GDD) 計算之，其方程式如式(8)所示 (Hoogenboom *et al.*, 2010)。

$$GDD = \sum \left(\frac{(T_{max} + T_{min})}{2} - b \right) \dots\dots\dots (8)$$

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，而水稻基礎溫度設為 9 °C。

在 DSSAT 模式之 Soil Water 模塊，土壤參數之單位換算係從體積分數轉換為毫米水，其轉換項目包含凋萎點、田間含水量、土壤飽和度，其換算公式分別如式(9)、式(10)及式(11)所示；垂直排水之計算公式如式(12)；土壤水平衡之計算公式如式(13)所列 (Porter *et al.*, 1999)。

$$WP = DP \times WPp \times 10.0 \dots\dots\dots (9)$$

$$FC = DP \times FCp \times 10.0 \dots\dots\dots (10)$$

$$ST = DP \times STp \times 10.0 \dots\dots\dots (11)$$

式中 WP 為凋萎點(mm)， DP 為土壤剖面深度(cm)， WPp 為以凋萎點為基準的土壤含水量(cm³/cm³)， FC 為田間含水量(mm)， FCp 為以田間含水量為基準之土壤含水量(cm³/cm³)， ST 為土壤含水量(mm)， STp 為土壤含水量飽和度(cm³/cm³)。

$$DRN = (SWC - FC) \times DRNp \dots\dots\dots (12)$$

式中 DRN 為垂直排水量(mm)， SWC 為土壤含水量(mm)， $DRNp$ 為日排水率(1/day)。

$$SWC^* = SWC + (INF - ESa - EPa - DRN) \dots\dots\dots (13)$$

式中 SWC^* 為土壤含水量更新值(mm)， INF 為入滲量(mm)， ESa 為實際日土壤蒸發量(mm)， EPa 為植物的蒸散量(mm)。

在 DSSAT 模式之 Plant 模塊採用 CEREC-Rice 模式計算物質生產量，此模式一般採用經驗式來建立每日光合同化量與光合有效輻射關係，潛在乾物質生產量為截獲的光合有效輻射的指數函數關係，而實際乾物質產量為潛在乾物質生產量乘以修正係數，修正係數為 $\min(PRFT, SWDF1)$ ，其中 $PRFT$ ， $SWDF1$ 分別為溫度引發光合作用的降低值及水分虧缺因子。模式中所使用作物品種之參數包含有關發育性狀之參數有基礎營養生長期(P1)；光週期敏感係數(P2R)；穀粒充實至生理成熟(P5)；開花臨界日長(P2O)以及與產量性狀有關之參數為潛在小穗數係數(G1)；單粒重(G2)；分蘗係數(G3)及溫度耐受係數(G4) (黃啟銘, 2015)。DSSAT CERES-Rice 模式的 8 個作物遺傳參數可用於描述特定基因之發育及產量性狀，而參數設定範圍參照 DSSAT 模式使用手冊彙整如表 3 所示 (Singh *et al.*, 2014)。

表 3 DSSAT 模式之水稻品種參數範圍設置

類型	中文名稱	符號	通常範圍值
發育方面	基礎營養生長期	P1	210-900 GDD (°C)
	開花臨界日長	P2O	10-14 hours
	光週期敏感係數	P2R	5-250 GDD
	穀粒充實至生理成熟	P5	300-900 GDD (°C)
產量性狀	潛在小穗數係數	G1	30-100
	單粒重	G2	0.022-0.030 (g)
	分蘗係數	G3	0.3-2.0
	溫度耐受係數	G4	0.7-1.5

3.3 均勻分佈函數與擴展傅立葉幅度檢驗法

本文使用 Simlab 之參數生成方法(European Commission-IPSC, 2004)來生成水稻品種參數, 均勻分佈函數(Uniform Distribution)之密度函數如式(14)所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Weight}_i}{\text{RightVal}_i - \text{LeftVal}_i} \dots\dots\dots(14)$$

式中 n 為區間數(Number of Intervals), RightVal 和 LeftVal 是第 i 個子區間的上下限極值, 因此對每個 i 而言, (RightVal-LeftVal) > 0; Weight_i 為第 i 個子區間的權重, 而所有權重之和等於 1。

參數的敏感性分析主要是探討參數的變異數(Variance)對模式輸出結果變異的貢獻率(Saltelli et al., 2000), 參數敏感性分析方法主要分為局部敏感性分析和全域敏感性分析。局部敏感性僅分析單參數的改變對模式輸出結果的影響, 全域敏感性能夠分析整個參數空間對模式分析結果的影響。全局敏感性分析方法有多種, 例如 Morris 法(Morris, 1991)、回歸法(Venables and Ripley, 1994)、Sobol 法(Sobol, 1993)與擴展傅立葉幅度檢驗法(Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test, EFAST)法(Saltelli et al., 1999)等。本文採用 EFAST 來分析, EFAST 是結合 Sobol 法與傅立葉幅度檢驗法(Fourier Amplitude Sensitivity Test, FAST) 之優點, 基於變異數分解的一種全局敏感性分析方法。該方法通過搜索函數對模式的每個參數引入一個共同獨立參數 s 的函數, 並給每個輸入參數定義一個整數頻率, 最後使模型成為獨立參數 s 的週期函數, 對模式的輸出結果進行傅立葉分析, 獲得傅立葉級數的頻譜曲線, 通過該頻譜曲線分別得到由每個參數與其他參數的相互作用所引起模式結果的變異數(宋明丹等, 2014)。

EFAST 法是透過分配一個高頻率 ω_h 給有興趣的因子 h, 並將一組低頻率值分配給 h 以外的其他因子集 Z_{-h} , 如設定 $\omega_h = 2M_{\max(\omega \sim h)}$, 而 $\max(\omega \sim h)$ 表示 Z_{-h} 因子集中之最高頻率值。並且須確保包含 Z_h 集的 M 階交互作用所產生之頻率不干擾其他 Z_{-h} 集的 M 階非線性作用所產生之頻率。故 EFAST 對參數全敏感性指標分析公式如式(15)所示 (Saltelli et al., 1999; Lauret et al., 2006; 孫飛飛等, 2014)。

$$ST_h = \frac{\sum_{\omega=M_{\max(\omega \sim h)+1}}^{(N-1)/2} (A_{\omega}^2 + B_{\omega}^2)}{\sum_{\omega=1}^{(N-1)/2} (A_{\omega}^2 + B_{\omega}^2)} \dots\dots\dots(15)$$

式中 ST_h 為評估模式之總敏感性指標(Total Sensitivity Index), $\omega = M_{\max(\omega \sim h)} + 1$ 為非 h 因子頻率最大值與干擾因子組成之計算數, N 為模擬計算次數, 當最高頻率 ω_h 給定時, $N = 2M_{\omega_h} + 1$ 。 A_{ω} 和 B_{ω} 為頻率 ω 的傅立葉係數, M 為干擾因子(Interference Factor), 一般取 4 或 6。

Confalonieri et al. (2010)指出模式參數運行次數之最佳結果為 11,363 次, 因此, 本文採用 EFAST 的參數最佳化法生成 12,000 個參數, 並假設參數是均勻分佈, 使用 R 語言連結至 DSSAT 模式, 使模式進行 12,000 次模擬。

3.4 灰關聯度分析與皮爾遜偏態係數

本文使用灰色關聯分析模式參數最佳化之結果, 李煜基(2012)指出灰關聯分析是一種影響測度的模式。灰關聯度分析係利用平均法計算, 方程式如式(16)所示。因此, 灰關聯度越靠近於 1, 結果代表越佳。

$$\gamma(x_0, x_1) = \frac{1}{n \sum \gamma(x_0(k), x_1(k))} \dots\dots\dots(16)$$

式中 $x_0(k)$ 為實測序列, $x_1(k)$ 為計算序列, $x_0(k)$ 與 $x_1(k)$ 分別為序列 x_0 與 x_1 在第 k 點的數據。

本文依 DSSAT 模式所求得 12 個坵塊之參數最佳值作為樣本數。首先, 將品種參數進行分佈檢定, 再將參數進行區間估計。本文使用皮爾遜偏態係數(Pearson Coefficient of Skewness)進行參數偏態分佈檢定, 其方程式如式(17)所示 (黃文隆, 1991), 將樣本數輸入至 SPSS Statistics 17.0 進行分析。最後使用樣本平均數及標準差計算 95%信賴區間之上下限估計, 分別如式(18)、式(19)及式(20)所示(黃學亮, 2006)。

$$S_k = \frac{3(\bar{x} - m_e)}{s} \dots\dots\dots(17)$$

式中 S_k 為皮爾遜偏態係數， \bar{x} 為樣本平均數， m_e 為中位數， s 為標準差。

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \dots\dots\dots(18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - \mu)^2} \dots\dots\dots(19)$$

$$\bar{X} - 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(20)$$

式中 \bar{X} 為樣本平均數， σ 為標準差， n 為樣本個數， x 為樣本數據， μ 為樣本平均數。

3.5 灌溉期距調整

本文使用 DSSAT 模式進行水稻生長模擬，以推估其產量。本文選用 2018 年一期作試驗資料為依據，灌溉方法為乾溼交替法，灌溉期距以 3 天為基礎後逐日增加灌溉期距至 13 天，因外，以分蘖初期開始調整灌溉期距，期距調整各分別為 3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13 天，一共 11 種情境。水稻在不同生長階段之每次灌溉水深皆不同，本文設定成活期每次灌溉水深為 25 mm、分蘖初期為 30 mm、分蘖盛期為 40

mm、抽穗前期為 50 mm、抽穗後期為 60 mm、乳熟期為 30 mm、完熟期為 30 mm，在分蘖盛期之期間，需要曬田不灌溉。

四、結果分析與討論

4.1 模式參數最佳化

參數最佳化係以 EFAST 法生成數據，使用 R 語言連結至 DSSAT 模式，最後利用灰關聯度來判斷輸出結果之優劣。而灰關聯度最高之參數組合則代表該區塊之參數最佳組合，模擬結果如表 4 所示，則東 1、東 2、東 3、東 4、東 5、東 6、西 1、西 2、西 3、西 4、西 5、西 6 之灰關聯度，各分別為 0.977、0.988、0.964、0.990、0.985、0.981、0.987、0.984、0.972、0.973、0.962、0.993。上述之灰關聯度結果均達 0.95 以上，表示分析結果為良好。

本文使用 SPSS 進行參數偏態分佈檢定，計算中位數、平均值、標準差、偏態係數及分佈型態。再使用 12 組參數最佳值計算 95 %信賴區間上下限範圍，結果顯示如表 5 所示，而參數分析結果為偏態分佈如圖 3 所示。由表 5 及圖 3 顯示模式計算所得之作物

表 4 DSSAT 模式模擬之作物品種參數最佳化結果

分區	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4	灰關聯度
東 1	551.9	227.0	492.2	11.79	30.77	0.025	1.769	1.048	0.977
東 2	857.5	75.5	490.6	10.11	30.84	0.028	1.242	0.919	0.988
東 3	538.4	70.3	418.4	11.39	36.10	0.029	1.805	1.383	0.964
東 4	701.6	237.3	655.5	11.54	36.64	0.023	1.088	0.866	0.990
東 5	854.8	71.5	473.8	10.27	32.81	0.027	0.632	0.858	0.985
東 6	835.1	130.4	606.1	11.49	30.25	0.028	1.511	0.855	0.981
西 1	832.0	59.8	434.9	12.82	39.71	0.028	1.739	1.246	0.987
西 2	554.9	222.4	688.1	11.29	34.05	0.025	1.642	1.081	0.984
西 3	303.8	180.0	672.6	10.26	44.42	0.028	1.839	1.318	0.972
西 4	835.1	8.1	405.8	12.48	30.35	0.021	1.295	1.316	0.973
西 5	330.6	14.4	381.2	11.35	76.44	0.020	1.910	1.089	0.962
西 6	521.2	183.8	655.0	10.31	33.55	0.026	1.537	0.801	0.993

表 5 DSSAT 模式所模擬作物品種參數結果之區間分佈及偏態分佈

參數名稱	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
中位數	628.3	103.0	491.4	11.37	33.80	0.027	1.590	1.065
平均值	643.1	123.4	531.2	11.26	37.99	0.026	1.501	1.065
標準差	204.1	83.9	115.9	0.88	12.83	0.003	0.376	0.209
95 %上限	758.6	170.8	596.7	11.76	45.26	0.027	1.714	1.183
95 %下限	527.6	75.9	465.6	10.76	30.73	0.024	1.288	0.947
偏態係數	-0.430	0.089	0.206	0.237	2.846	-0.891	-1.188	0.271
偏態分佈	左偏	右偏	右偏	右偏	右偏	左偏	左偏	右偏

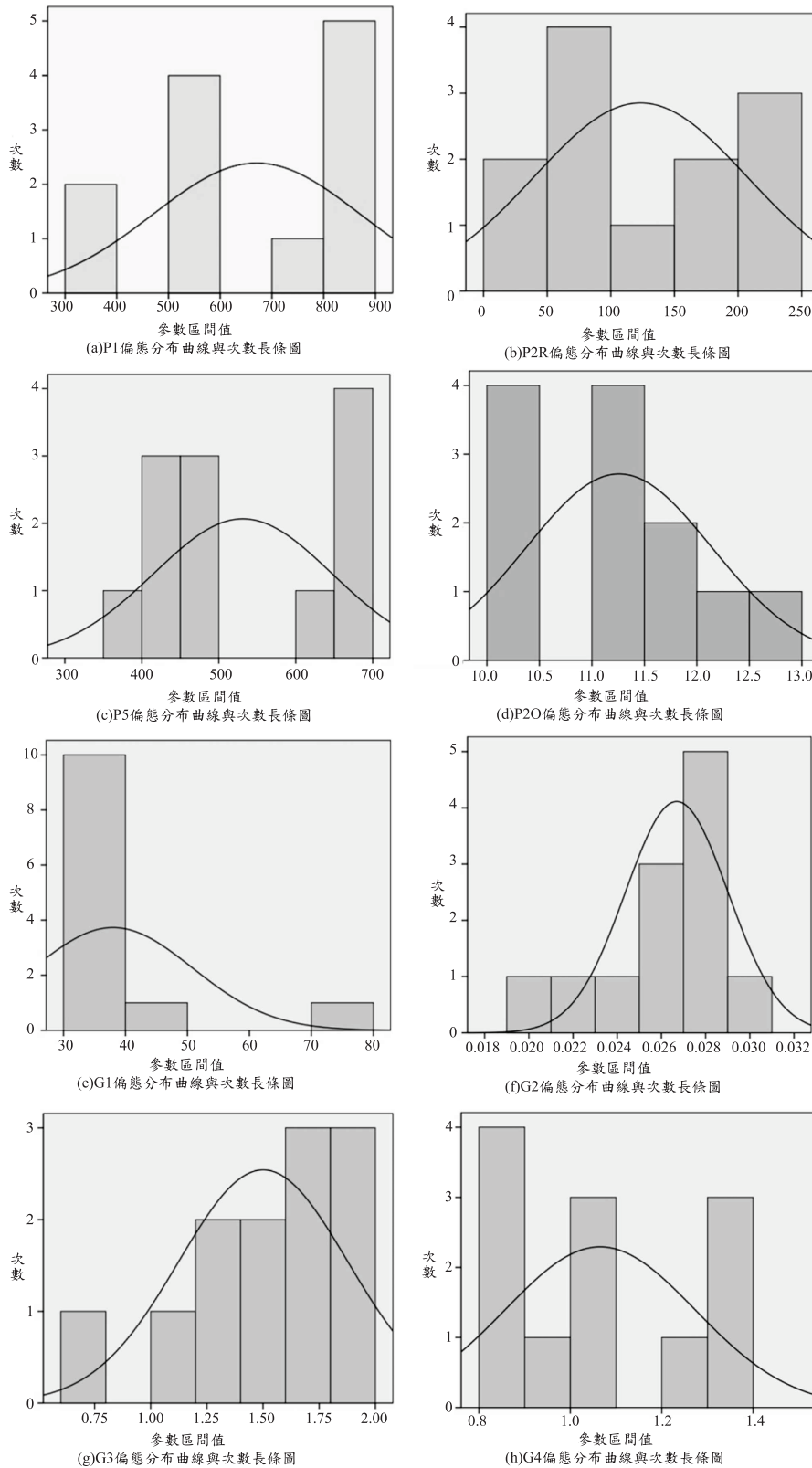


圖 3 DSSAT 模式模擬作物品種參數之偏態分布檢定結果

種參數中，P1、G2、G3 等 3 個參數呈現左偏，P2R、P5、P2O、G1、G4 等 5 個參數呈現右偏。

本文利用品種參數之中位數及平均值所求得產量

進行迴歸分析，從結果可得知，在 2018 及 2019 年之平均值參數組合之 R^2 為最佳，其 R^2 值分別為 0.2108 及 0.5717，如圖 4 所示。最後，臺南 11 號作物品種參

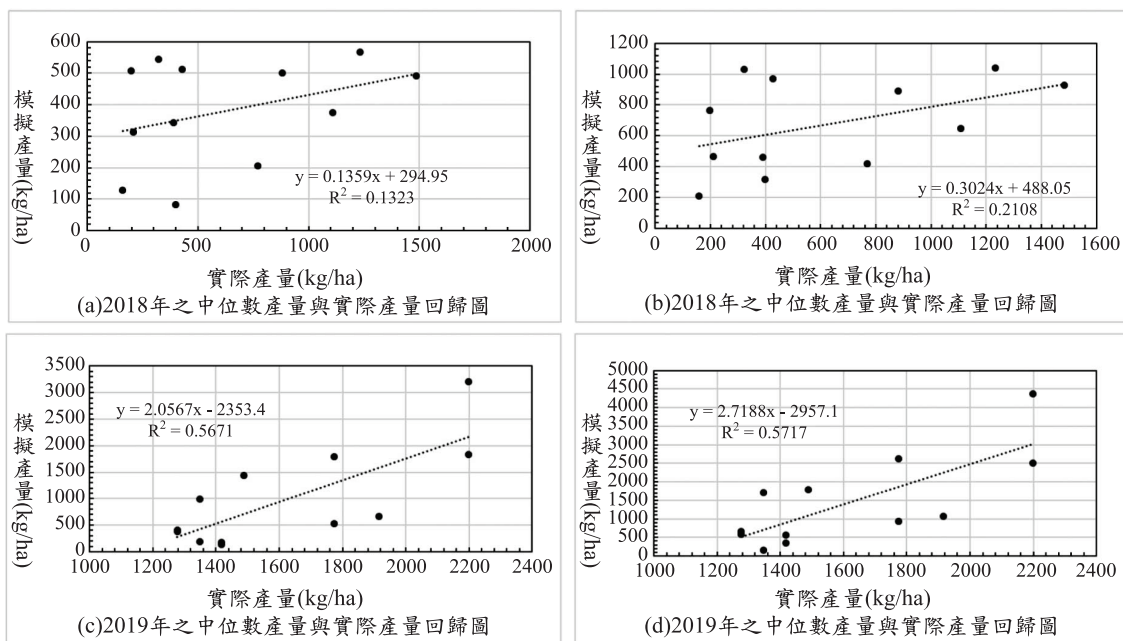


圖 4 模式內之參數取中位數或平均值與實際產量之迴歸圖

表 6 臺南 11 號作物品種參數之模式分析結果

參數名稱	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
參數值	643.1	123.4	531.2	11.26	37.99	0.026	1.501	1.065

數 P1、P2R、P5、P2O、G1、G2、G3、G4 之結果分別為 643.1、123.4、531.2、11.26、37.99、0.026、1.501、1.065，如表 6 所示。

4.2 灌溉期距調整對產量影響

將作物品種參數最佳值、氣象、肥料及土壤等作為 DSSAT 模式輸入資料，而水稻各生長階段之灌溉水量以每次灌溉水深所需量計算，並於分蘖期開始以 3 天灌溉期距為基準，再進行不同灌溉期距調整，計算結果顯示如表 7 所示。不同灌溉期距進行產量模擬，計算結果分別為 1,527、1,838、1,923、1,967、1,939、2,085、1,923、1,519、1,579、837、891 kg/ha。將上列之產量與灌溉期距為 3 天之產量比較結果顯示，各灌溉期距之產量增加率分別為 0.00%、1.83%、-1.06%、2.12%、2.50%、8.47%、7.80%、-5.00%、0.10%、-26.37%、-33.11%，而灌溉總用水深分別為 1,515、1,175、995、805、755、655、585、545、535、475、455 mm，如圖 5 所示。最後，不同灌溉期距之灌溉總用水深與灌溉期距 3 天之灌溉總用水深比較顯示，節水百分比分別為 0.00%、22.44%、34.32%、46.86%、50.17%、56.77%、61.39%、64.03%、64.69%、

68.65%、69.97%。

此外，將信賴區間 95% 上下限之品種作物參數輸入模式，再搭配不同灌溉期距進行模擬，其產量模擬結果顯示於圖 6。從 95% 上、下限之模擬結果顯示，產量模擬分別以 7 天與 6 天之灌溉期距為最佳。

表 7 灌溉期距天數、產量、灌溉總用水深及節水百分比之結果

灌溉期距 (days)	產量 (kg/ha)	產量增減率 (%)	灌溉總用水深 (mm)	節水率 (%)
3	1039	—	1515	—
4	1058	1.83%	1175	22.44
5	1028	-1.06%	995	34.32
6	1061	2.12%	805	46.86
7	1065	2.50%	755	50.17
8	1127	8.47%	655	56.77
9	1120	7.80%	585	61.39
10	987	-5.00%	545	64.03
11	1040	0.10%	535	64.69
12	765	-26.37%	475	68.65
13	695	-33.11%	455	69.97

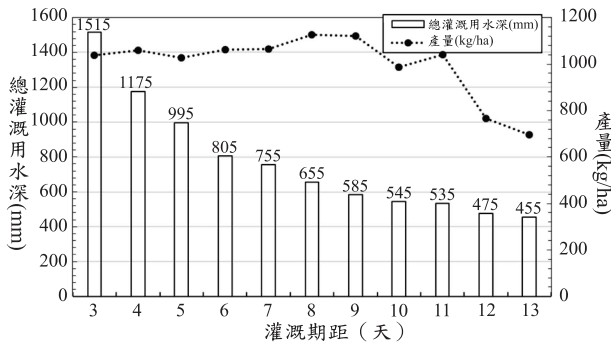


圖 5 總灌溉用水深、灌溉期距與產量關係圖

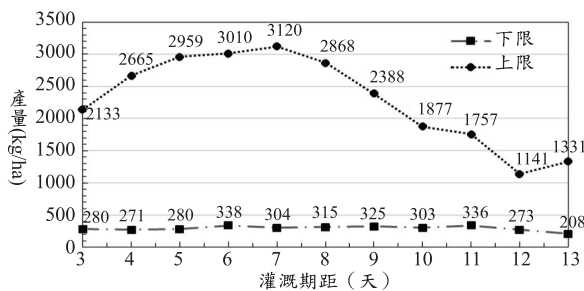


圖 6 信賴區間 95% 上下限對產量及灌溉期距之關係圖

五、結論

本文利用 EFAST 方法建立滲漏計試驗區坵塊之作物品種參數值，進一步利用灰關聯分析坵塊之最佳參數組合，最後將作物品種參數進行檢定。結果顯示平均值之參數為最佳。因此，臺南 11 號品種參數 P1、P2R、P5、P2O、G1、G2、G3、G4 分別為 643.1、123.4、531.2、11.26、37.99、0.026、1.501 與 1.065。

由灌溉期距調整對產量影響之模擬結果顯示，灌溉期距為 8 天之產量最佳，相較於 3 天灌溉期距之產量可增加約 8.47%，亦可節水約 56.77%。

由本研所得知之 DSSAT 模式模擬臺南 11 號水稻生長參數，未來應用可基於得知之臺南 11 號水稻品種參數進行以下研究：(1)在面臨極端枯水時而採取減量供水灌溉，利用模式模擬可推估減量比例對水稻產量變化，以決定供灌減量比例。(2)可針對大區域之不同土壤質地與氣候等地理資訊空間變數，模擬對臺南 11 號水稻產量在大區域之分布影響，亦可作為大區域灌溉配水之依據。(3)可利用本模式探討臺南 11 號水稻栽培過程之肥料使用，以模擬養分管理決策對水稻生產之影響，使施肥決策更綜合化與系統化。(4)可利用 DSSAT 模式模擬臺南 11 號水稻在微氣候環境變化下，氣溫環境對水稻產量之影響評估。

參考文獻

1. Akumaga U., D. Alderman P., "Comparison of Penman-Monteith and Priestley-Taylor evapotranspiration methods for crop modeling in Oklahoma," *Agronomy Journal*, 1171-1180, 2019.
2. Anderson, R., Keshwan, D., Guru, A., Yang, H., Irmak, S., Subbiah, J., "An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models," *Environmental Modeling & Software*, 108: 40-50, 2018.
3. Amiri E., Rezaei M., Bannayan M., Soufizadeh S., "Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition," *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44: 1814-1830, 2013.
4. Ahmad, S., Ahmad, A., Soler, C. M. T., Ali, H., Muhammad, Z. U. H., Anothai, J., Hussain, A., Hoogenboom, G., Hasanuzzaman, M., "Application of the CSM-SERES-Rice model for evaluation of plant density and nitrogen management of fine transplanted rice for an irrigated semiarid environment," *Precision Agriculture*, 13: 200-218, 2012.
5. Basak, J.K., Ali, M.A., Islam, Md.N., Alam, Md.J.M., "Assessment of the effect of climate change on boro rice production in Bangladesh using DSSAT model," *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 38: 95-108, 2010.
6. Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M., Weesakula, S., Dattab, A., "Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand," *Journal of Cleaner Production*, 198: 1157-1164, 2018.
7. Confalonieri, R., Bellocchi, G., Bregaglio, S., Donatelli, M., Acutis, M., "Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM," *Ecological Modelling*, 201: 1897-1906, 2010.
8. Devkota, K.P., Hoogenboom, G., Boote, K.J., Singh, U., Lamers, J.P.A., Devkota, M., Vlek, P.L.G., "Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice-wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia," *Agricultural and Forest Meteorology*, 266-280, 2015.
9. Deng, J. L., "Introduction to grey system," *Journal of Grey System*, 1: 1-24, 1989.

10. Dias, M.P.N.M., Navaratne, C.M., Weerasinghe, K.D.N., Hettiarachchi, R.H.A.N., "Application of DSSAT crop simulation model to identify the changes of rice growth and yield in Nilwala river basin for midcenturies under changing climatic conditions," *Procedia Food Science*, 6: 159-163, 2015.
11. European Commission, and IPSC, "SimLab 2.2-Reference Manual, Ispra," Italy, 2004.
12. Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Batchelor, D.W., Anthony, L.H., "Decision support system for agrotechnology transfer, (DSSAT) version 4.5," Honolulu: University of Hawaii, CD-ROM, 2010.
13. He, J., Dukes, M.D., Hochmuth, G.J., Jones, J.W., Graham, W.D., "Evaluation of sweet corn yield and nitrogen leaching with ceres-maize considering input parameter uncertainties," *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54: 1257-1268, 2011.
14. Jintrawet, A., "A decision support system for rapid assessment of lowland rice-based cropping alternatives in Thailand," *Agricultural System*, 47: 245-258, 1995.
15. Jeong, H., Jang, T., Seong, C., Park, S., "Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater," *Agricultural Water Management*, 141: 1-9, 2014.
16. Jiang, Y.W., Zhang, L.H., Zhang, B.Q., He, C.S., Jin, X., Baia, X., "Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China," *Agricultural Water Management*, 177: 37-45, 2016.
17. Jones J.W., Hoogenboom, G., Porter C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L. A., Wilkens, P.W., Singh, U., Giasman, A.J., Ritchie, J.T., "The DSSAT cropping system model," *European journal of agronomy*, 18: 235-265, 2003.
18. Jones J.W., Ritchie, J.T., Crop growth models In: Hoffman, G.J, Howell, T.A., Solomon, K.H. (Eds.), "Management of farm irrigation systems," American Society for Agricultural Engineering, 63-89, 1991.
19. Lauret, P., Fock, E., Mara, T.A., "A node pruning algorithm based on a Fourier amplitude sensitivity test method," *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17(2): 273-293, 2006.
20. Malik, W., Isla, R., Dechmi, F., "DSSAT-CERES-maize modelling to improve irrigation and nitrogen management practices under Mediterranean conditions," *Agricultural Water Management*, 213: 298-308, 2019.
21. Morris, M.D., "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments," *Technometrics*, 33(2): 161-174, 1991.
22. Porter C.H., Braga, R., Jones J.W., "An approach for modular crop model development," Agricultural and Biological Engineering Department Research Report, 1-13, 1999.
23. Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters," *Monthly Weather Review*, 100: 81-92, 1972.
24. Ritchie, J.T., "Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover," *Water Resources Research*, 8: 1204-1213, 1972.
25. Ritchie, J.T., "Soil water balance and plant water stress," Understanding Options for Agricultural Production, 41-54, 1998.
26. Ritchie, J.T., Otter, S., "Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. In: ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl. Tech. Info. Serv., Springfield, Missouri, 159-175, 1985.
27. Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C., Bowen, W.T., "Cereal growth, development and yield," Understanding Options for Agricultural Production, 79-98, 1998.
28. Ritchie, J.T., "Soil Water Balance and Plant Water Stress," Understanding Options for Agricultural Production. Dordrecht, 41-54, 1998.
29. Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., "Sensitivity Analysis," New York: Wiley, 58-66, 2000.
30. Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K.P.S., "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output," *Technometrics*, 41(1): 39-56, 1999.
31. Sarkar, R., Kar, S., "Evaluation of management strategies for sustainable rice-wheat cropping system, using DSSAT seasonal analysis," *Journal of Agricultural Sciences*, 144: 421-434, 2006.
32. Shelia, V., Šimůnek, J., Boote, K., Hoogenboom, G., "Coupling DSSAT and HYDRUS-1D for simulations of soil water dynamics in the soil-plant-atmosphere system," *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(2): 232-245, 2018.
33. Singh, U., Ritchie, J.T., Godwin, D.C., A user's guide to CERES rice - V2.10, 92-97, 2014.
34. Sobol, I.M., "Sensitivity estimates for nonlinear

- mathematical models,” *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1(4): 407-414, 1993.
35. St’astna, M., Trnka, M., Kren, J., Dubrovsky, M., Zalud, Z., “Evaluation of the CERES models in different production regions of the Czech Republic,” *Rostlina Vyroba*, 48: 125-132, 2002.
 36. Venables, W.N., Ripley, B.D., “Modern applied statistics with S-Plus,” New York: Springer, 57-66, 1994.
 37. 王文佳、馮浩，「國外主要作物模型研究進展與存在問題」，*節水灌溉*，第 8 期，第 63-68,73 頁，2012。
 38. 台北市瑠公農田水利會，「水稻田紋溝灌溉之水分控制與節水效率分析」，台北市瑠公農田水利會委託之專題研究成果報告，109 頁，2019。
 39. 甘俊二，「灌溉系統配水技術之分析與討論」，國立台灣大學農業工程學系，1979。
 40. 甘俊二、施嘉昌、徐玉標、曹以松，*灌溉排水原理*，中央圖書出版社，1988。
 41. 宋明丹、馮浩、李正鵬、高建恩「基于 Morris 和 EFAST 的 CERES-Wheat 模型敏感性分析」，*農業機械學報*，第 45 卷第 10 期，第 124-131 頁，2014。
 42. 李煜基，「灰色關聯理論應用新海橋人工地多指標水質分析」，國立屏東科技大學土木工程系碩士論文，屏東，64 頁，2012。
 43. 李泓義，「水稻紋溝灌溉之溝寬對灌溉效益分析」，國立屏東科技大學土木工程系碩士論文，屏東，63 頁，2017。
 44. 吳瑞賢、李明旭、方紀棠，「應用主成份分析評估氣候變遷對作物產量因子之影響」，*農業工程學報*，第 60 卷第 3 期，第 68-81 頁，2014。
 45. 林信宏，「應用灰關聯分析於休耕水田蓄水區為評估」，國立屏東科技大學土木工程系碩士論文，屏東，100 頁，2008。
 46. 孫飛飛、許欽、任立良、林長清、童瑞，「水文模型參數敏感性分析概述」，*中國農村水利水電*，第 3 期，第 92-95 頁，2014。
 47. 秦松林，「DSSAT 作物模式與統計時間序列應用於預測臺灣氣候變化對水稻產量影響之比較」，國立臺灣大學生物資源暨農學院農藝所生物統計組碩士論文，臺北，162 頁，2013。
 48. 黃啟銘，「CERES-Rice 作物模擬軟體之作物生長參數的敏感度分析與產量區間預測」，國立台灣大學生物資源暨農學院農藝研究所生物統計組碩士論文，臺北，80 頁，2015。
 49. 黃文隆，*統計學(理論與實務)*，蒼海出版社，台中，1991。
 50. 黃學亮，*基礎統計學*，五南圖書出版股份有限公司，台北，2006。
 51. 經濟部水利署，「台灣地區民國 106 年各標的用水統計年報」，*水文歷年年報*，2017。
 52. 楊志維、許明晃、黃文達、楊智旭、蔡養正、楊棋明、張新軒，「水稻營養生長期農藝性狀與衛星遙測植生指數 NDVI 之灰關聯分析」，*作物、環境與生物資訊*，第 1 卷第 3 期，第 199-206 頁，2004。
 53. 楊峰、熊旭朗，「灰色關聯度分析法在超級雜交稻苗頭組品比試驗中的應用」，*湖南農業科學*，第 5 期，2006。
 54. 臺灣嘉南農田水利會，「利用紋溝強化水稻栽種節水效率試驗」，臺灣嘉南農田水利會委託之專題研究成果報告，75 頁，2018。
 55. 魯向暉、穆興民、Vinay Nangc、隋艷艷、姚宇卿、王飛、高鵬，「DSSAT 模型對豫西冬小麥保護性耕作效應模擬效果驗證」，*乾旱地區農業研究*，第 28 卷第 3 期，第 64-70 頁，2010。
 56. 陳清田、張煜權、洪振東，「灌溉管理操作對水稻產量與節水效能影響之研究」，*農業工程學報*，第 60 卷第 1 期，第 81-90 頁，2014。
 57. 陳增壽，「作物模式應用在灌溉管理之研究」，*農業工程學報*，第 42 卷，第 1 期，第 74-82 頁，1996。
 58. 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，桃園，128 頁，2012。
 59. 劉海龍、諸葉平、李世娟、楊靖一、白由路，「DSSAT 作物系統模型的發展與應用」，*農業網絡信息*，第 11 期，第 5-12 頁，2011。
 60. 魏郁婷，「氣候變遷下稻作生長期之變化與產量模擬」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，桃園，97 頁，2014。

收稿日期：民國 110 年 05 月 31 日
修改日期：民國 110 年 07 月 03 日
接受日期：民國 110 年 08 月 11 日