

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.015

基于GLUE和PEST的CERES-Maize模型调参与验证研究*

宋利兵^{1,2} 陈 上^{1,2} 姚 宁^{1,2} 冯 浩^{2,3} 张体彬³ 何建强^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 作物模型已逐渐成为干旱和半干旱地区优化农田水肥管理和实施节水灌溉的有力决策支持工具。为了探讨 CERES-Maize 模型模拟不同生育期受旱情况下夏玉米的生长发育、产量形成和土壤水分状况的模拟精度,进行了 2013 和 2014 年连续两季夏玉米田间分段受旱试验。试验将夏玉米整个生育期划分为苗期、拔节、抽雄和灌浆 4 个主要生长阶段,采用单个生育期受旱其他生育期灌水的方式,形成 4 个不同的受旱时段水平(D1 ~ D4),又根据夏玉米多年生育期降雨量,设置了 70 和 110 mm 两个灌水水平(I1 和 I2),共形成 8 个处理,每个处理 3 次重复,在遮雨棚内按照裂区试验布设,此外设置 1 个各生育期均灌水 110 mm 的对照处理(CK)。利用两年试验数据,采用 DSSAT-GLUE 和 PEST 两种不同的模型参数估计工具,对 CERES-Maize 模型的遗传参数进行估计,并对该模型的模拟精度和可靠性进行验证,此外还使用交叉验证法对 CERES-Maize 模型的整体模拟精度进行评估。结果表明, GLUE 和 PEST 两种调参工具所得的模型参数均有较好的稳定性和收敛性,但 PEST 调参工具耗时较少,效率较高; CERES-Maize 模型能较好地模拟充分灌水条件下夏玉米的生长发育、产量和土壤水分变化,绝对相对误差(ARE)和相对均方根误差(RRMSE)均在 6% ~ 8% 之间;但是现有 CERES-Maize 模型无法模拟由于不同生育期受旱造成的夏玉米物候期的差异。此外,交叉验证结果发现夏玉米生长前期(特别是拔节期)受旱处理的数据参与模型校正时,模型的总体平均模拟误差较大,精度较低。CERES-Maize 模型模拟前期受旱对玉米籽粒产量的影响时结果不够准确,这可能是由于该模型低估了早期水分胁迫条件下的 LAI 值,进而使得 ET 模拟不准确所造成的。总之, CERES-Maize 模型对生育期前期(特别是拔节期)受旱条件下夏玉米生长发育、产量形成和土壤水分变化的模拟还存在一定的不足,若将 CERES-Maize 模型应用于我国干旱和半干旱地区水分胁迫条件下玉米的生产管理和科学研究,应对模型进行相应的修正。

关键词: 夏玉米 GLUE PEST CERES-Maize 模型 DSSAT 参数验证

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0095-17

Parameter Estimation and Verification of CERES-Maize Model with
GLUE and PEST Methods

Song Libing^{1,2} Chen Shang^{1,2} Yao Ning^{1,2} Feng Hao^{2,3} Zhang Tibin³ He Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Crop model has been becoming a powerful tool for agricultural water and nitrogen management and implementation of water-saving irrigation. This study was to explore the accuracy of CERES-Maize model for its simulations of summer maize growth, development, yield, and soil moisture under different

收稿日期: 2015-08-10 修回日期: 2015-09-21
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102904)、国家自然科学基金资助项目(51209176)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)
作者简介: 宋利兵, 博士生, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: songlibing@nwsuaf.edu.cn
通讯作者: 何建强, 教授, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

scenarios of water stress. Field experiments were conducted under a rainout shelter for summer maize growing under water stresses at different growth stages in two consecutive growth seasons (2013 and 2014). The whole growth season of maize was divided into four stages (seeding, jointing, tasseling, and grain filling). Water stress occurred at every single stage, while irrigations were applied at the other three stages. Thus, there were four different levels of water stress period (D1 ~ D4). Two irrigation levels of 70 mm (I1) and 110 mm (I2) were applied according to the average rainfall during growth season of summer maize in 56 years. Consequently, there were a total of 8 treatments, with 3 replicates for each. The plots followed a split-plot experiment design. An extra control treatment with irrigation at all four stages was arranged nearby. The experimental data were used to calibrate and validate the CERES-Maize model with two parameter estimation tools of GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation) and PEST (Parameter ESTimation). Additionally, an overall evaluation was made with cross validation method for the prediction accuracy of the CERES-Maize model. Results showed that both GLUE and PEST had good stability and convergence for the estimation of genetic parameters of CERES-Maize model. The parameters values separately estimated with GLUE and PEST were very close. However, PEST had higher efficiency since it consumed much less time than the GLUE. CERES-Maize model can precisely simulate the growth, development, yield, and soil moisture of summer maize under full irrigation condition, since the absolute relative error (ARE) and relative root mean squared error (RRMSE) values of model calibration and verification were only between 6% and 8%. Anthesis and maturity dates of summer maize were different when water stresses occurred at different growth stages, but CERES-Maize model failed to simulate such kind of phenology differences caused by water stresses. In cross-validation, model simulation errors became bigger when water stresses occurred at early stages, especially at jointing stage. CERES-Maize model failed to correctly simulate the influences of water stresses at early growth stages on the final grain yield of summer maize, which was probably caused by the underestimation of LAI under such conditions. Lower estimated LAI values then made the simulations of ET incorrect. In general, CERES-Maize model was proved to be limited to simulate the growth, yield, and soil moisture of summer maize when under serious water stresses at early growth stages. It is necessary to modify accordingly the CERES-Maize model if it will be used in the simulation of agro-ecological systems of summer maize in arid and semi-arid areas of China.

Key words: Summer maize GLUE PEST CERES-Maize model DSSAT Parameter verification

引言

玉米是我国最主要的粮食和经济作物之一,据统计2012年我国玉米产量为20 561.41万t,占粮食总产量的34.87%,2013年达21 848.9万t,占粮食总产量的36.30%,超过稻谷,成为我国产量第1位的粮食作物^[1]。近年来,随着社会经济的发展 and 耕地面积的下降,我国粮食生产重点向干旱半干旱地区转移^[2]。玉米是喜温喜水作物,但我国干旱半干旱地区水资源的匮乏以及水土资源在地域上的分布不均衡^[3-4],加之近年来气候多变,降雨时空分布不均,短期干旱频繁发生^[5],极大地影响了该地区玉米的生产。要确保我国玉米生产就要发展节水灌溉,实现有限水资源的合理利用,这就必须对旱区农业生境系统进行深入全面研究。

然而通过传统的田间试验来研究旱区生境系统

玉米耗水规律往往需要设置多年的受旱试验,试验周期长,耗费大量的人力、财力,而且利用田间试验所得结果具有较大的年际间和站点间的差异,试验结果缺乏普适性。近年来田间试验与作物生长模型模拟相结合的研究方式在作物生长管理及水肥优化中逐渐得到了应用和发展^[6-11]。作物生长模型(简称作物模型)是综合作物生理学、生态学、农学、农业气象学和土壤肥料等学科的研究成果,应用系统分析和计算机技术,通过对作物生长发育、光合生产、干物质积累分配和产量形成的生理过程及其与环境 and 栽培技术的动态关系进行定量化分析,来模拟作物生长和产量形成的过程^[6-8]。其中,DSSAT (Decision support system for agrotechnology transfer)是目前使用较为广泛的作物模型系统之一,可模拟逐日作物生长发育过程,计算各影响因子对作物产量的影响,可用于不同的研究对象与目的^[12-13]。

DSSAT 中专门用于玉米的 CERES-Maize 模型^[14]被广泛用于各种类型的农业研究。CERES-Maize 模型可以准确地模拟喷灌条件下的玉米产量和氮素吸收^[11];如在加拿大南部,模拟了玉米产量和土壤氮素动态,得到了精确的模拟值^[15]。He 等^[16-17]也利用 CERES-Maize 模型对美国佛罗里达甜玉米的生长进行模拟,并利用该模型制定了相应的水肥最优管理措施。在国内,CERES-Maize 模型相关研究包括玉米遗传参数的确定及验证^[18-19]、不同播期及灌溉对春玉米产量的影响^[20]、气候变化对农业有效性的评价^[21-22]、作物灌溉需水量的确定^[23]、不同作物生长状况的预测^[24]以及作物参数敏感性分析^[25]等诸多领域。可见,CERE-Maize 模型在世界范围内已成为研究玉米生境系统的有力工具。

研究表明,在水分充足条件下,CERES-Maize 模型可以准确模拟玉米的叶面积指数(Leaf area index, LAI)、产量、生物量以及土壤含水率,但在水分亏缺情况下对 LAI、地上部生物量和产量的模拟则存在系统性的整体低估,即对水分亏缺的量化描述不够精准^[26]。在干旱半干旱地区,模型对水分亏缺条件下玉米的生长发育模拟不够准确^[14],Dejonge 等通过田间试验与模型模拟对比发现,模型虽然对产量模拟较为准确,但在充分灌溉时模型低估了作物蒸散量(Evapotranspiration, ET),在非充分灌溉时模型则高估了 ET,因此提出 CERES-Maize 模型在水分亏缺情况下需要改进的建议^[27]。CERES-Maize 模型能否应用于我国干旱半干旱地区玉米的生产和管理,能否成为研究玉米非充分灌溉以及玉米生境系统有效工具,需要对 CERES-Maize 模型模拟不同水分胁迫条件下玉米生长发育和产量形成的精度进行一次较为系统的总体性评估。

同时,对作物模型进行调参与验证是应用作物模型的必要前提^[28-29],模型调参与验证的方法大体可分为频率论(Frequentist)和贝叶斯(Bayesian)两种。Frequentist 方法是利用一个数据样本进行参数估计,通过一套算法使估计的参数值接近真值,但参数不是随机的,而是固定的一组数值,该方法不考虑参数值的先验信息。Bayesian 方法则是通过 2 种不同的信息进行参数估计,即数据样本和参数的先验信息,该方法的最终结果是一个参数值的后验概率分布^[30]。当模型参数具有特定的生物或物理意义时,Bayesian 方法受到越来越多关注,并且得到了较多的应用。GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation)方法是应用较为普遍的一种 Bayesian 参数校正方法。在 DSSAT 模型中,由 He 等开发了 DSSAT-GLUE 软件包^[31-33]。此外,PEST (Parameter

ESTimation)作为一个独立的模型参数估计工具^[34-35]已被嵌套在 Processing MODFLOW、Visual MODFLOW、GMS (Groundwater modeling system) 和 RZWQM2 (Root zone water quality model) 等模型中,并在水分模型的校正方面得到了广泛应用^[36-42],但是在 DSSAT 中还没有人使用过。DSSAT-GLUE 和 PEST 这两种模型参数估计工具所得的结果是否具有 consistency,哪一个效率更高,要回答这些问题,也有必要对这两种模型参数估计方法进行比较和评估。

本研究利用两年度(2013、2014 年)的夏玉米分段受旱试验数据运行 DSSAT-CERES-Maize 模型,分别利用 GLUE 和 PEST 工具对该模型的作物遗传参数进行估计,并对校正后的模型进行验证,目的在于系统评价 CERES-Maize 模型模拟不同干旱胁迫下夏玉米生长发育和产量形成的能力和精度,同时对 2 种不同调参工具的可靠性和效率,从而为 CERES-Maize 模型在我国干旱和半干旱地区更广泛的应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

分别于 2013 年和 2014 年 6—10 月份在陕西杨凌西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室节水灌溉试验站(34°17'N, 108°04'E, 海拔高度 506 m)进行夏玉米田间分段受旱试验。该试验区全年无霜期为 221 d,夏玉米生长季多年平均降雨量为 337 mm,其中丰水年($P \leq 25\%$)降雨量 440 mm,枯水年($P \geq 75\%$)降雨量 280 mm。试验小区播种面积为 8 m²,试验区土壤 1 m 深土层田间持水量和凋萎含水量分别为 0.26、0.122 cm³/cm³,平均容重为 1.31 g/cm³;土壤耕层(0~20 cm)的 pH 值为 8.14,有机碳质量比 8.20 g/kg,全氮质量比 0.62 g/kg。为防止各小区之间的侧渗,各小区之间均有 1.5 m 深的聚乙烯塑料膜隔离层,并且试区上部有活动遮雨棚,用来杜绝自然降雨对试验的影响。

1.2 田间试验设计

试验供试夏玉米品种为“郑单 958”,采用人工开沟点播,沟向为东西方向,株距 30 cm,行距 50 cm,播种深度 5 cm。每个小区播 4 行,每行 13 棵。播种前按 210 kg/hm² N(折合尿素)及 160 kg/hm² P₂O₅施肥量施基肥。2013 年试验于 6 月 12 日播种,6 月 18 日出苗,6 月 28 日定苗,每穴 1 株,10 月 7 日收获;2014 年试验于 6 月 12 日播种,6 月 18 日出苗,6 月 29 日定苗,10 月 10 日收获。

试验考虑灌水量和受旱阶段两个因素。根据夏玉米生育期内 56 a 历史降雨量,试验中灌水量采用

280 mm (枯水年生育期降雨量) 和 440 mm(丰水年生育期降雨量) 2 个水平, 分 4 次均匀灌溉, 则有 2 个灌水定额 70、110 mm (I1、I2)。试验将夏玉米整个生育期划分为出苗、拔节、抽雄和灌浆 4 个主要生长阶段, 单个生长阶段受旱, 则形成 4 个不同受旱情形 (D1 ~ D4)。因此, 本次试验共有 8 个处理 (表 1), 每个处理设置 3 个重复, 在遮雨棚下田间小区按裂区试验布设, 另外在棚下设置 1 个各生育阶段均灌水 110 mm 的处理作为对照处理 (CK)。灌水方式为畦灌, 灌溉时量取每个小区所需的灌水水量, 然后采用人工方式均匀地将量取的水灌入各小区。

表 1 2013、2014 年夏玉米不同生长阶段受旱试验处理
Tab.1 Experimental treatments of influences of water stress at different stages on growth and yield of summer maize in 2013 and 2014

处理	D1	D2	D3	D4	灌溉水平	总灌水量/mm
	苗期 (06-23)	拔节期 (07-21)	抽穗期 (08-11)	灌浆期 (09-02)		
I1D1	0	70	70	70	I1	210
I1D2	70	0	70	70	I1	210
I1D3	70	70	0	70	I1	210
I1D4	70	70	70	0	I1	210
I2D1	0	110	110	110	I2	330
I2D2	110	0	110	110	I2	330
I2D3	110	110	0	110	I2	330
I2D4	110	110	110	0	I2	330
CK	110	110	110	110	I2	440

注: 表中 06-23 表示 6 月 23 日, 为具体的灌水日期, 以此类推。

1.3 试验观测指标及方法

(1) 土壤含水率
土壤含水率采用烘干法测定, 每个小区随机选取一个观测点测量 0 ~ 100 cm 土层含水率, 每 20 cm 一层, 每隔 10 d 测一次。取土后称取鲜土和铝盒质量, 然后在 105℃ 干燥箱中干燥至恒质量, 称取干土和铝盒质量并计算土壤质量含水率, 再将各层质量含水率乘以各层容重转换为体积含水率。

(2) 叶面积
在定苗后, 每个小区正中间标记 1 m² 植株作为最后测产区域, 并且在每个小区标记 2 株植株来测量植株的叶面积, 10 d 左右测量一次, 测量标记植株所有绿叶叶片的长 (从叶领到叶尖的距离) 和宽 (叶片的最宽值), 每片叶子的叶面积及小区叶面积指数 (LAI) [43] 计算式为

$$A=0.75LW$$
$$V_{LAI}=S_{LA}D/10\,000$$

式中 A——单片叶子叶面积, m²
L——叶片叶领到叶尖的长度, m

$$W$$
——叶片最宽处的宽度, m
$$V_{LAI}$$
——叶面积指数
$$S_{LA}$$
——单株玉米总叶面积, m²/株
$$D$$
——种植密度, 株/hm²

0.75 为与叶形有关的叶面积回归系数。
(3) 地上部干物质质量
每 10 d 左右在每个小区测产区以外取 1 株能代表平均长势的植株, 利用干燥法 (105℃ 下杀青 0.5 h, 然后调至 75℃ 干燥至恒质量) 测量生物量, 并根据小区种植密度来估算地上部干物质质量。

(4) 物候期
试验期间分别记录 2 个生长季夏玉米的物候期, 各生育期划分参照 Zadoks 划分法 [44], 若给定小区 50% 以上的植株进入某个生育期, 则认为该小区到达该生育期。

(5) 产量及考种
在所有处理均成熟后一周左右收获, 收获每小区 1 m² 测产区的所有植株, 风干后手动脱粒考种, 测量各个小区测产区的有效穗数、籽粒产量、百粒质量等指标。

1.4 CERES-Maize 模型对水分胁迫的计算

CERES-Maize 是 CERES (Crop environment resource syntheses system) 系列模型中专门用于模拟玉米生长发育和产量形成的模型, 该模型以作物系统模块的形式在 DSSAT-CSM (Cropping system model) 公共平台上运行 [12]。DSSAT 模型包括土壤、气象、作物生长及田间管理等模块, 这些模块既相互通用又具有各自独立的功能, 通过计算土壤、气象、作物品种及田间管理各个因素对作物生长发育的综合影响来模拟玉米的生长发育和产量形成。所需基础数据包括土壤数据、逐日气象数据、作物品种数据及农田管理数据。

在 CERES-Maize 模型中, 土壤水分的模拟是先将土壤分层, 然后根据水量平衡方法 [45] 采用 Ritchie 一维“翻桶式” [12] 来逐层模拟土壤水分运动和根系吸水。作物的根系吸水是通过根长密度、深度、根系分布和实际土壤含水率的函数来计算, 作物蒸散量 ET 是通过潜在蒸发蒸腾量 (Potential evapotranspiration, PET) 和作物系数 (Kc) 来计算, 而潜在蒸发蒸腾的计算有 Priestley-Taylor [46] 和 FAO56 Penman-Monteith [47] 两种方法, 潜在蒸发是叶面积指数和 ET₀ 的函数。CERES-Maize 模型是通过比较潜在蒸腾 (或植物水分需求) 和潜在根系吸水 (或植物可吸收的土壤水) 之间的大小关系来定义作物是否受水分胁迫 [48]。在土壤水分充足的时候, 潜在根系吸水大于潜在蒸腾, 随着根系吸水、土壤蒸发以及水

分向下移动等导致根层土壤水分减少,潜在根系吸水也随之减少,当减少到一定程度会达到一个阈值,就会出现第 1 个水分胁迫因子或膨压因子(Turgor factor, TURFAC)(图 1),该水分胁迫因子主要影响作物的伸展性生长,如节间的伸长和叶片的伸展等,作物的这些伸展性生长过程往往比其他生理过程对水分胁迫更为敏感。当潜在蒸腾等于或超过潜在的根系吸水时,出现主要影响作物生长和生物量形成相关过程的第 2 个胁迫因子(Second water stress factor, SWFAC)(图 1)^[49],对某些作物,干旱胁迫可能会提高发育速率,导致开花、种子形成以及生理成熟天数减少,然而对于其他作物则会降低发育速率。在没有水分胁迫条件下,2 个因子均为 1.0。一旦出现水分胁迫,就会减小到与潜在蒸腾和潜在可吸收土壤水分差额呈正比的一个小于 1 的值(图 1)。在作物生长发育过程模拟中上述胁迫因子是作为直接乘数(变化范围为没有胁迫时的 1 到完全胁迫时的 0)或者作为间接影响作物生长和发育的查找函数来起作用。TURFAC 与 SWFAC 的计算式分别为

$$f_{\text{TURFAC}} = \frac{\theta_{\text{TRWUP}}}{v_{\text{RWUEPI}} w_{\text{EPO}}} \tag{3}$$

$$f_{\text{SWFAC}} = \frac{\theta_{\text{TRWUP}}}{w_{\text{EPO}}} \tag{4}$$

式中 f_{TURFAC} ——第 1 个水分胁迫因子

表 2 试验区初始土壤性质

Tab. 2 Initial soil properties of experimental plots

土层 深度 /cm	粘粒质 量分数 /%	粉粒质 量分数 /%	容重 /(g·cm ⁻³)	凋萎含水率 /(cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率 /(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率 /(cm ³ ·cm ⁻³)	初始含水率		硝态氮质量比		氨态氮质量比	
							/(cm ³ ·cm ⁻³)		/(mg·kg ⁻¹)		/(mg·kg ⁻¹)	
							2013 年	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
0~20	18.36	42.29	1.26	0.15	0.25	0.43	0.180	0.176	20.2	16.2	3.5	2.5
20~40	19.45	43.65	1.35	0.16	0.26	0.45	0.184	0.182	22.0	12	3.3	2.3
40~60	17.4	42.83	1.3	0.16	0.26	0.44	0.182	0.176	14.4	8.4	3.3	2.3
60~80	16.09	41.99	1.32	0.14	0.29	0.35	0.177	0.173	11.7	8.7	3.3	2.3
80~100	16.36	42.35	1.35	0.15	0.24	0.3	0.184	0.167	17.5	7.5	3.4	2.4

CERES-Maize 模型所需气象数据是逐日气象数据,包括太阳辐射量(MJ/m²)、最高气温(℃)、最低气温(℃)和降雨量(mm)。逐日气象数据从距试验田 150 m 处的陕西省杨凌国家一般气象站整理得到,由于试验是遮雨棚下控水试验,因此降雨均为零。太阳辐射根据气象站所测逐日日照时数,通过 Angstron^[50] 经验公式计算,即

$$R_s = R_{\text{max}} \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \tag{5}$$

式中 R_s ——日太阳总辐射量,MJ/(m²·d)

R_{max} ——日天文辐射量,即晴天太阳辐射量,MJ/(m²·d)

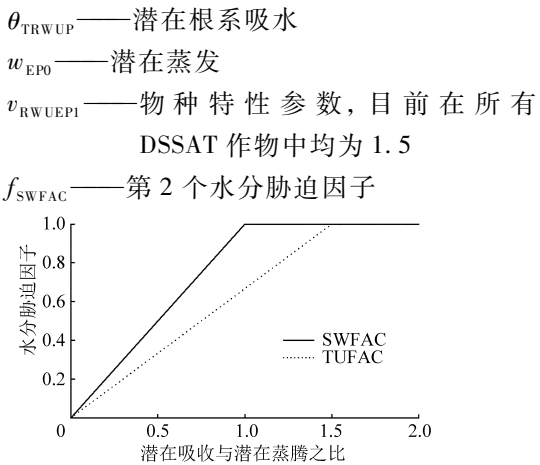


图 1 CERES-Maize 模型中水分潜在吸收与潜在蒸腾之比和水分胁迫因子的关系

Fig. 1 Relationship between SWFAC and TURFAC in CERES-Maize model

1.5 CERES-Maize 模型数据输入

土壤数据为田间实测数据,试验开始前将 1 m 深的土层平均分为 5 层取土,用 TopSizer 激光粒度分析仪进行土壤颗粒分析,用高速离心法测定土样的凋萎含水率、田间持水率、饱和含水率等,用环刀法测定各层土壤容重,种植前还用土钻取土干燥法测定土壤初始含水率。其他土壤性质参数包括土壤名称、颜色、pH 值、反射率以及阳离子交换量等,由中国土壤数据库获得。土壤输入数据具体见表 2。

a_s, b_s ——与大气质量状况有关的经验系数,根据 FAO 推荐,取 $a_s = 0.25, b_s = 0.50$

n ——逐日日照时数,h
 N ——逐日可照时数,即最大时长,h

两季夏玉米生育期内最高、最低气温及日太阳辐射量如图 2 所示。

1.6 作物遗传参数的率定和模型验证

CERES-Maize 模型中可供调试的玉米品种参数有 6 个(表 3)。有研究指出 CERES 系列模型在水氮充足条件下能够精确模拟作物生长发育及产量,而在水氮亏缺条件下则模拟精度不高^[51-53],因此本

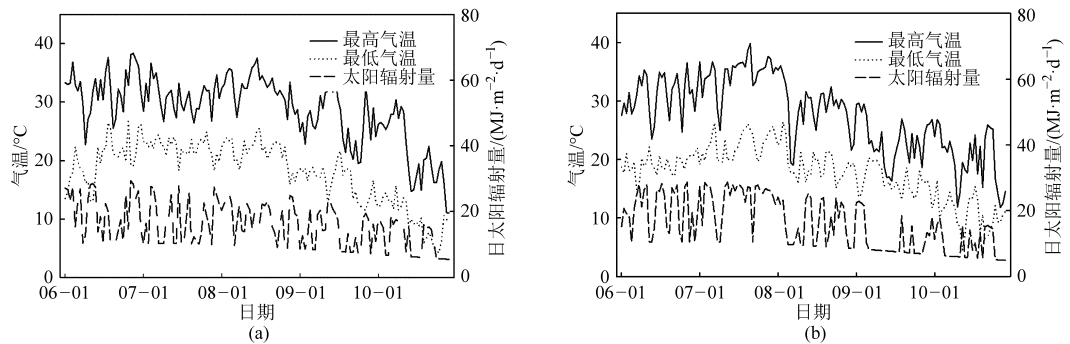


图2 2013和2014年夏玉米生育期内逐日气温及日太阳辐射量

Fig. 2 Daily maximum and minimum temperatures and solar radiation in two growth seasons of 2013 and 2014 of summer maize
(a) 2013年 (b) 2014年

研究选取2013年和2014年CK对照处理(足肥足水)作为参数率定处理,其他所有处理作为模型验证处理。参数率定分别采用DSSAT模型自带GLUE调参程序包和PEST调参程序两种不同的方法,以开花期、成熟期、籽粒产量、粒质量和收获期干物质生物量作为相关输出变量,以观测值和模型模拟值之间的相对误差最小作为目标进行调参。

表3 夏玉米的品种遗传参数及取值范围
Tab.3 Genetic coefficients of summer maize and their value ranges

参数	取值范围
完成非感光幼苗期的积温(基础温度为8℃)P1/(℃·d)	100~400
光周期敏感系数P2	0~4
灌浆特性参数P5/(℃·d)	600~1000
单株最大穗粒数G2/粒	500~1000
最大灌浆速率参数G3/(mg·粒 ⁻¹ ·d ⁻¹)	5~12
完成一片叶生长所需积温PHINT/(℃·d)	30~75

GLUE调参程序包是基于GLUE方法设计的^[31-32,54],该方法计算每个模拟值与对应实测值之间的似然值,再利用贝叶斯公式计算产生模拟值的参数集的似然值,并以此构建模型参数后验分布。GLUE参数估计主要步骤包括:①设置参数先验分布。随机生成参数集。②运行模型。③计算模拟值与实测值之间的似然值。④构建后验分布。为了确保参数估计的准确性和后验分布计算的合理性,GLUE应至少需要运行6000次以上^[55]。在本研究中,先将作物遗传参数设定为缺省值,然后运行GLUE程序20000次,最终得到一组最优的参数组合。

PEST调参工具是利用高斯-马夸特-列文伯格(Gauss-Marquardt-Levenberg)算法来求模型模拟值与实测值差异函数的最小值^[36-56]。PEST参数估计主要步骤包括:首先根据预设值选定初始参数向量,开始运行模型得到模型模拟结果向量。由参数估计

向量、模型模拟结果向量和实测结果向量组成雅可比偏导数矩阵,利用一阶泰勒展开式对矩阵进行数值求解。然后根据由参数范围和迭代次数确定的参数增量向量,不断更新参数向量重复计算直到收敛^[57]。利用PEST调参时,同样先将作物遗传参数设定为缺省值,在DSSAT中运行相关的试验文件得到模型的输出文件,通过PEST命令使需要调试的品种参数与PEST对应,并设置各个参数的取值范围,同时将DSSAT中的观测值和模拟值文件通过PEST命令连接起来,经过约100次迭代得到一组最优参数组合。

此外,为了评估CERES-Maize模型的整体模拟精度,本研究还采用交叉验证方法(Cross validation, CV)对该模型的整体模拟精度进行了评估。交叉验证,有时亦称循环估计,是一种将数据样本切割成较小子集的统计学方法^[58],通过交叉验证法可以对模型在不同模拟情境下总体的模拟精度进行评估^[30],交叉验证方法分为Hold-Out方法、*k*-重交叉验证和留一交叉验证。交叉验证法是将参数估计过程进行多次重复,留一交叉验证过程也意味着参数估计方法不变,改变参数估计所用数据,排除随机因素对结果的影响,解决了以往诸如试错法进行参数估计时的许多弊端^[30],而且留一交叉验证具有泛化误差估计几乎无偏、确保验证过程可被完全重复的优点。本研究采用留一交叉验证方法对CERES-Maize模型的精度做了相应的评估,具体是将试验中的9个处理视作9个样本,将每个样本循环作为检验样本,其他8个样本作为训练样本。这样得到9组结果,用9组结果的平均值来衡量模型的整体性能。例如,先将I1D1处理数据留出作为观测值,设置程序运行所需的一组缺省值,然后利用除I1D1外的其余8个处理数据运行GLUE,选择经过20000次随机搜索(或PEST经过100次迭代)后获得较为可靠的一组参数组合,最后用所得的遗传参数模拟I1D1处理,并比较相应的模拟值和观测值,依次类推。

本研究中模型参数率定与验证均以模拟值和观测值之间绝对相对误差 (Absolute relative error, ARE) 和相对均方根误差 (Relative root mean square error, RRMSE) 来评价,因为它们可以反映模拟值与实测值之间的相对差异程度,同时都属于无量纲统计量,可以进行不同变量之间的比较。二者的值越小表示模拟精度越高。ARE、RRMSE 的计算式分别为

$$n_{\text{ARE}} = \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \times 100\% \tag{6}$$

$$n_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (S_i - O_i)^2} \tag{7}$$

$$n_{\text{RRMSE}} = \frac{n_{\text{RMSE}}}{\bar{O}} \times 100\% \tag{8}$$

式中 n_{ARE} ——绝对相对误差
 S_i ——第 i 个模拟值 k ——数据个数
 O_i ——第 i 个观测值
 n_{RMSE} ——均方根误差
 n_{RRMSE} ——相对均方根误差
 $\bar{O}$ ——观测值的平均值

2 结果与分析

2.1 CERES-Maize 模型遗传参数率定结果比较

利用 GLUE 和 PEST 两种调参方法所得最优参数值见表 4,可以看出两种方法所得 P1、P2 参数值完全相同,其他各参数值也都比较接近,其中 G3 的值差距较大,而 G3 定义为作物最大灌浆速率,对作物产量的影响很大,不同的调参工具调参时对产量

误差的权重不同可能导致了 G3 的结果差距较大。总体而言,两种参数校正方法估计玉米品种参数时表现出较好的一致性。此外,计时结果显示在调参过程中 GLUE 运行 20 000 次需要 3 ~ 4 h,而 PEST 迭代 100 次耗时 2 ~ 3 min,显然,从耗时角度而言 PEST 调参工具调参效率更高。

表 4 利用 GLUE 和 PEST 方法估计的夏玉米遗传参数
Tab. 4 Estimated genetic coefficients of summer maize with GLUE and PEST

参数	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
初始值	245.4	0.446	661.1	844.6	10.62	61.56
GLUE	227.8	0.11	662.8	813.8	9.089	65.76
PEST	227.8	0.11	657.6	800.8	7.41	66.38

比较 CK 处理(水氮充足)相应输出变量的观测值和模拟值(表 5),可以看出 GLUE 方法对应的结果中 ARE 均小于 14%,ARE 和 RRMSE 均值为 6.85% 和 7.20%,模拟精度较高,而 PEST 结果中 ARE 除 2013 年产量 20.21% 外都小于 13%,ARE 和 RRMSE 均值分别为 6.40% 和 8.02%,整体模拟精度较高。开花期的模拟结果 ARE 和 RRMSE 都小于 5%,成熟期的模拟完全一致,生物量的模拟误差在 10% 以内,可见模型在物候期和生物量模拟方面较为精确,但单粒质量的模拟结果略差,ARE 和 RRMSE 均大于 10%,这也导致籽粒产量的模拟值偏大,ARE 和 RRMSE 在 15% 左右。总之,两种调参工具所得两套参数具有一致性,均可作为参数率定结果使用。

表 5 利用 GLUE 和 PEST 对 CERES-Maize 模型进行调参和验证的结果

Tab. 5 Results of calibration and verification of CERES-Maize model with GLUE and PEST

方法	年份	开花期				成熟期				单粒质量				生物量				籽粒产量				均值	
		Sim.	Obs.	ARE	RRMSE	Sim.	Obs.	ARE	RRMSE	Sim.	Obs.	ARE	RRMSE	Sim.	Obs.	ARE	RRMSE	Sim.	Obs.	ARE	RRMSE	ARE	RRMSE
		/d	/d	/%	/%	/d	/d	/%	/%	/g	/g	/%	/%	/(kg·hm ⁻²)	/(kg·hm ⁻²)	/%	/%	/(kg·hm ⁻²)	/(kg·hm ⁻²)	/%	/%	/%	/%
GLUE	2013	57	60	5.26	4.36	99	99	0	0	0.302	0.282	6.69	10.41	14 231	14 900	4.7	9 750	8 533	12.48	11.33	6.85	7.20	
	2014	60	58	3.33		107	107	0		0.261	0.297	13.87		12 391	14 126	14.0		7 078	7 659				8.21
PEST	2013	57	60	5.26	4.36	99	99	0	0	0.302	0.264	12.72	10.50	14 231	14 523	2.05	9 750	7 780	20.21	16.57	6.40	8.02	
	2014	60	58	3.33		107	107	0		0.261	0.278	6.32		12 391	13 997	12.96		7 078	7 157				1.12

注: Sim. 和 Obs. 分别为模拟值和观测值。

为进一步检验参数率定结果的准确性,比较了两年试验夏玉米生育期内 CK 处理生物量和叶面积指数(LAI)模拟值和观测值随时间的变化(图 3)。图中 R_g^2 和 R_p^2 中的下标 g、p 分别代表 GLUE 模拟结果和 PEST 模拟结果。可以看出以 PEST 估计的参数运行 CERES-Wheat 模型得到的模拟结果与 GLUE 模拟结果基本相同,说明两种调参方法所得结果具有较好的一致性。图中地上部生物量和 LAI 模拟值与观测值变化趋势基本一致,尤其生物量的模拟更

为准确,观测点大多在模拟曲线上。LAI 模拟值后期整体偏低,说明 CERES-Wheat 模型在模拟后期叶面积衰减时候会低估叶面积,在美国中西部和巴西的相关研究中也发现过类似情况,他们发现 CERES-Wheat 模型在生育期前期和开花到收获期均低估了叶面积指数^[59-61]。

此外,本研究还比较了两种参数率定方法下,CK 处理土壤含水率的模拟结果。由于玉米根系主要分布在土壤表面以下 80 cm 土层内,其中 0 ~

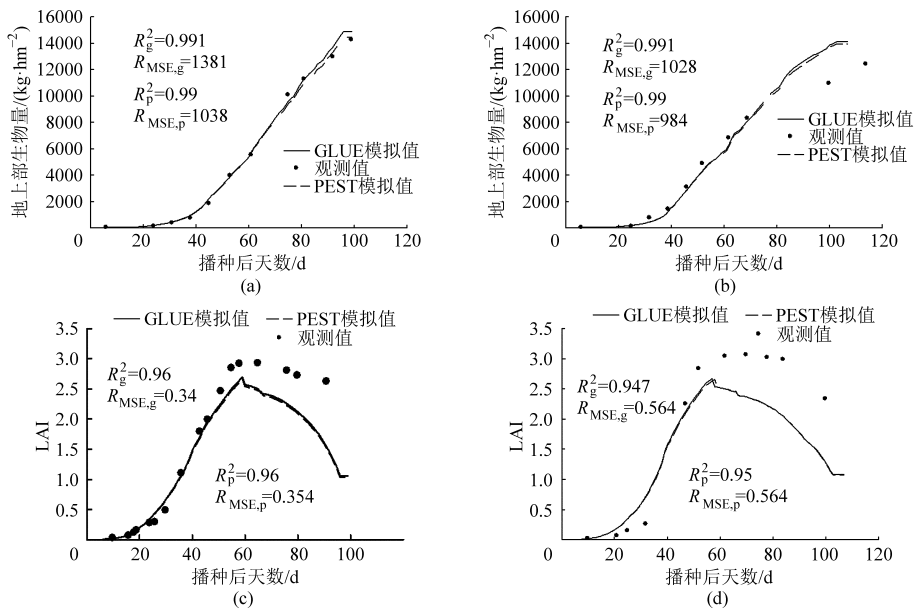


图 3 2013 和 2014 年充分灌溉条件下夏玉米生物量和叶面积指数变化曲线

Fig. 3 Simulation of dynamic changes of biomass and LAI of summer maize growth under sufficient irrigation condition in 2013 and 2014

(a) 2013 年生物量 (b) 2014 年生物量 (c) 2013 年叶面积指数 (d) 2014 年叶面积指数

40 cm 土层根量多,根长密度大^[41]。为了表述简洁,本文只选取 20~40 cm 土层的土壤水分结果进行分析。可以看出利用 GLUE 和 PEST 调参结果模拟土壤含水率变化时,模拟结果完全相同(图 4),这是因为影响土壤含水率动态变化的主要是土壤的物理特性,尤其是土壤的持水特性参数,而作物遗传参数主

要影响作物的生长,对土壤含水率的影响是间接性的。这一结果也再次表明两者调参的一致性。模型对 CK 处理土壤含水率的模拟值与观测值趋势比较吻合,观测点大多落在模拟曲线上,因此率定所得的遗传参数同样可以较准确地模拟土壤含水率的动态变化。

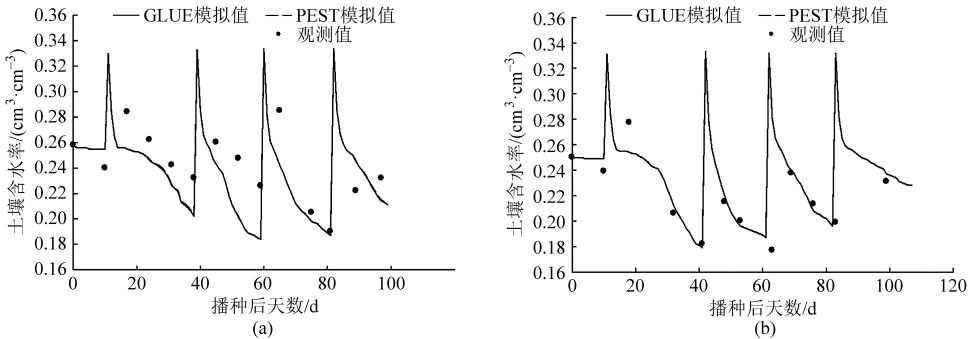


图 4 2013 和 2014 年充分灌溉条件下夏玉米土壤含水率动态变化曲线

Fig. 4 Simulation of dynamic changes of soil moisture of summer maize growth under sufficient irrigation condition in 2013 and 2014

(a) 2013 年 (b) 2014 年

2.2 CERES-Maize 模型验证

2.2.1 对物候期、产量和生物量模拟的验证

利用 GLUE 和 PEST 两种方法所得的两套参数,对不同生育期受旱各处理进行模拟,并与实测结果相比较,所得各处理模拟值和观测值的比较结果见表 6。可知两套参数模拟的整体 ARE 和 RRMSE 均值都小于 20%,对物候期的模拟结果较为一致,ARE 和 RRMSE 分别为 3.72% 和 5.74%,精度较高;对籽粒产量和生物量的模拟结果 ARE 和

RRMSE 都在 15%~25% 之间,模拟结果中等;但是两套参数对于单粒质量的模拟结果 ARE 和 RRMSE 在 19%~31% 之间,模拟结果较差。说明水分胁迫对单粒质量的影响较大,而现有模型中关于水分胁迫对单粒质量影响的描述不够充分,导致有水分胁迫时对单粒质量的模拟较差。

本研究进一步详细分析了模型验证时不同处理的具体模拟结果。由于 GLUE 和 PEST 所得的两套参数的模拟结果非常接近,为了表述简洁,这

表 6 利用 GLUE 和 PEST 估计的两套作物遗传参数对 CERES-Maize 模型进行验证的平均结果

Tab.6 Average results of verification of CERES-Maize model with genetic coefficients estimated with GLUE and PEST methods

%

方法	物候期		单粒质量		生物量		籽粒产量		均值	
	ARE	RRMSE	ARE	RRMSE	ARE	RRMSE	ARE	RRMSE	ARE	RRMSE
GLUE	3. 72	5. 74	28. 51	30. 82	18. 52	21. 91	19. 35	24. 92	14. 76	17. 45
PEST	3. 72	5. 74	19. 54	23. 12	15. 06	18. 42	15. 81	20. 39	11. 57	14. 30

出 GL 里只给 UE 所得参数具体验证结果(表 7)。可以看出对于所有处理,开花期模拟值和观测值的 ARE 在 1. 61% ~ 13. 43% 之间,平均为 5. 34%;成熟期模拟值与观测值的 ARE 在 0 ~ 6. 6% 之间,平均为 2. 1%,总体而言 CERES-Maize 模型对夏玉米物候期的模拟较为精准,但同一年度不同处理的开花期与成熟期的模拟值均相同,而各个处理实测值存在差异,前期受旱处理的开花期会推迟,后期受旱处理的成熟期会提前。这是因为在

CERES-Maize 模型中计算物候期时没有考虑水分胁迫的影响,因此无法反映由于干旱胁迫导致的物候期差异。单粒质量模拟值与观测值之间的 ARE 均值为 28. 51%,模拟程度较低,尤其是营养生长阶段受旱的处理(D1、D2),模拟结果均偏高,ARE 普遍大于 20%,表明 CERES-Maize 对于营养生长阶段受干旱胁迫对果实发育的后续效应模拟不够充分,没有准确量化营养阶段受旱与单粒质量之间的关系。

表 7 利用 GLUE 方法率定的作物遗传参数对 CERES-Maize 模型模拟不同处理进行验证的结果

Tab.7 Results of verification of CERES-Maize model for different treatments with genetic coefficients estimated with GLUE method

年份	处理	开花期			成熟期			单粒质量			生物量			籽粒产量		
		Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE
		/d	/d	/%	/d	/d	/%	/g	/g	/%	/ (kg·hm ⁻²)	/ (kg·hm ⁻²)	/%	/ (kg·hm ⁻²)	/ (kg·hm ⁻²)	/%
2013	I1D1	60	64	6.25	99	106	6.60	0.258	0.198	30.61	5 914	6 191	4.47	3 792	3 748	1.17
	I1D2	60	57	5.26	99	99	0.00	0.280	0.207	35.65	9 003	6 898	30.52	5 394	2 929	84.16
	I1D3	60	59	1.69	99	100	1.00	0.199	0.261	23.45	9 500	7 027	35.19	4 167	4 909	15.12
	I1D4	60	58	3.45	99	97	2.06	0.202	0.230	12.00	12 189	9 034	34.92	6 119	4 571	33.87
	I2D1	60	59	1.69	99	101	1.98	0.276	0.236	16.95	9 585	10 580	9.40	5 892	5 745	2.56
	I2D2	60	58	3.45	99	100	1.00	0.281	0.241	16.93	13 206	9 871	33.79	7 561	5 341	41.57
	I2D3	60	57	5.26	99	99	0.00	0.181	0.261	30.54	11 088	10 781	2.85	5 215	6 088	14.34
	I2D4	60	58	3.45	99	97	2.06	0.219	0.239	8.20	12 708	11 749	8.16	6 634	5 847	13.46
2014	I1D1	58	67	13.43	107	114	6.14	0.272	0.178	53.03	5 040	5 146	2.06	3 130	2 790	12.19
	I1D2	58	66	12.12	107	111	3.60	0.335	0.194	73.14	6 069	5 145	17.96	2 984	3 062	2.55
	I1D3	58	61	4.92	107	109	1.83	0.203	0.23	11.61	8 233	5 986	37.54	3 365	3 717	9.47
	I1D4	58	60	3.33	107	107	0.00	0.248	0.214	16.26	8 243	5 896	39.81	3 751	3 067	22.30
	I2D1	58	63	7.94	107	111	3.60	0.280	0.182	53.90	6 282	6 091	3.14	3 810	3 751	1.57
	I2D2	58	62	6.45	107	110	2.73	0.335	0.239	40.54	7 394	9 615	23.10	3 410	4 680	27.14
	I2D3	58	60	3.33	107	108	0.93	0.206	0.259	20.42	11 622	10 510	10.58	5 273	5 084	3.72
	I2D4	58	60	3.33	107	107	0.00	0.272	0.241	12.99	10 673	10 382	2.80	5 488	4 413	24.36
平均		5.34			2.10			28.51			18.52			19.35		

最终生物量的模拟值与观测值之间的 ARE 均值为 18. 52%,总体模拟精度一般,但高水(I2)处理中,除了拔节期受旱(I2D2)处理,其他处理 ARE 均小于 10%,模拟精度较高,而拔节期受旱处理(I2D2)生物量模拟值与观测值的 ARE 均大于 20%,这是因为拔节期是玉米营养生长最旺盛的时期,在此期间生物量迅速积累,在此期间受旱会明显抑制生物量积累速率,而模型对于拔节期受旱对最终生物量影响的量化描述的不够充分,所以模拟精

度较低;同时对于低水(I1)的各处理,最终生物量模拟值与观测值之间的 ARE 在 2. 06% ~ 39. 81% 之间,模拟精度不高且变异性较大,说明模型对于低水情况下玉米的生长发育模拟不够准确。

籽粒产量模拟值与观测值之间的 ARE 平均为 19. 35%,但拔节期受旱(D2)和灌浆期受旱(D4)处理模拟精度较差,ARE 普遍大于 20%,其他处理 ARE 在 1. 17% ~ 15. 12% 之间。这进一步说明模型对拔节期受旱(D2)情况下作物的

生长发育模拟不充分导致产量模拟有较大的误差,同时对在灌浆期受旱处理(D4)的产量也有较大误差,说明模型对灌浆期受旱下的玉米产量的量化不够精确。

2.2.2 对生物量和 LAI 的验证

为了表述简洁,在验证 CERES-Maize 模型动态生理指标时,也只考虑了利用 GLUE 方法所获得参数进行模型验证的结果。各处理地上部生物量模拟值和观测值动态变化过程比较见图 5,可以看出模型对不同时期受旱情况下玉米地上部生物量的模拟精度不同,各模拟值与观测值的趋势基本一致,但模拟值整体偏高,说明模型低估了受旱对

干物质积累的抑制作用。且低水水平 I1(图 5a、5c、5e、5g)的模拟精度要比高水水平 I2(图 5b、5d、5f、5h)差,模拟精度最差的是拔节期受旱处理 D2(图 5c、5d),这也进一步说明模型对拔节期受旱后玉米干物质积累的量化描述不够充分和准确。

各处理 LAI 模拟值与观测值动态变化过程比较(图 6),可以看出模拟值与观测值整体趋势一致,同时营养生长阶段受旱处理(D1、D2)的 LAI 模拟较差(图 6a~6d),再次说明模拟对营养阶段受旱后玉米生长发育的模拟不够充分,随着受旱时段的靠后模拟精度有所提高。LAI 模拟精度较差,可能是引起

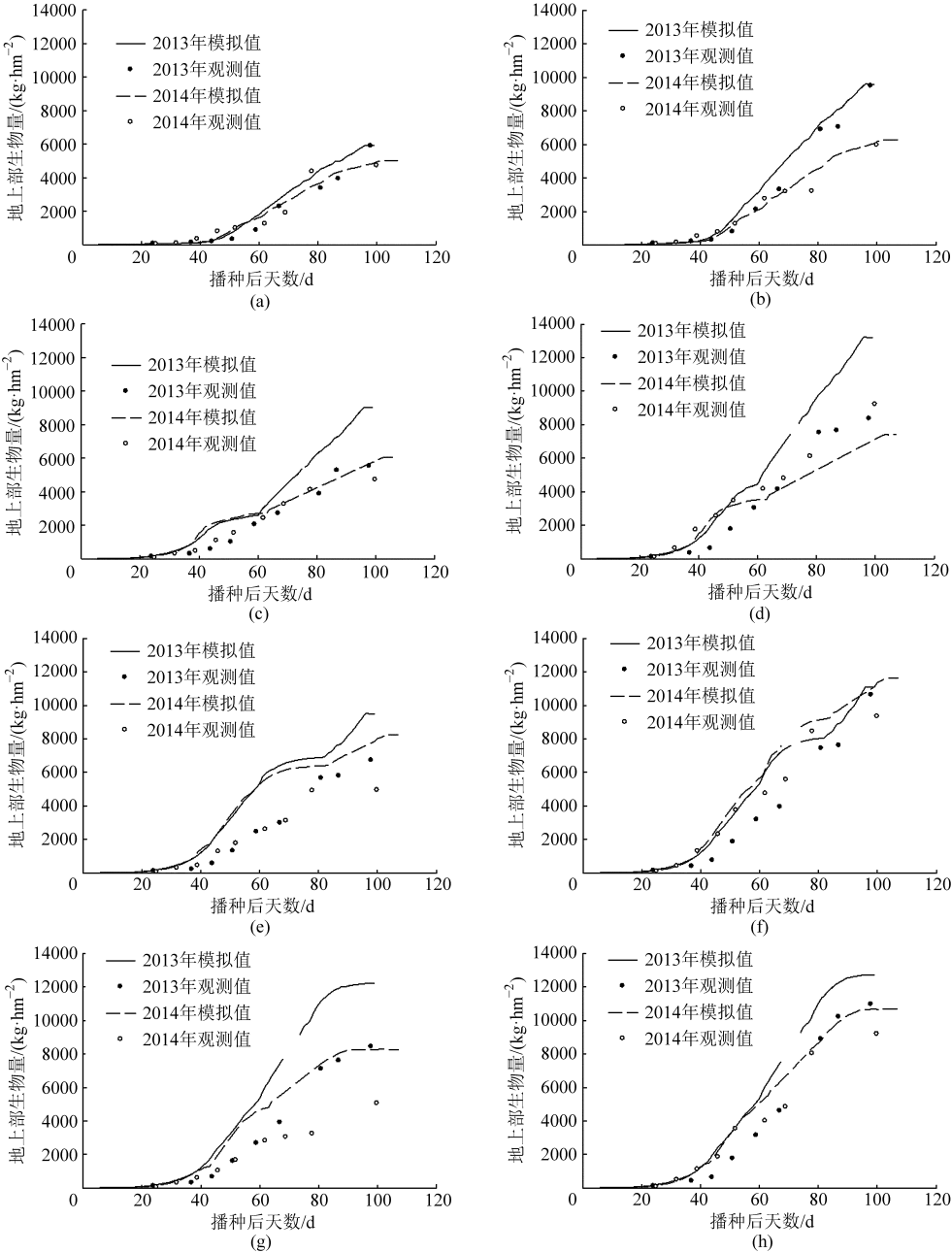


图 5 2013 和 2014 年不同阶段受旱条件下夏玉米地上部生物量模拟结果验证

Fig. 5 Verification of biomass of summer maize in different water stress conditions in 2013 and 2014

(a) I1D1 处理 (b) I2D1 处理 (c) I1D2 处理 (d) I2D2 处理 (e) I1D3 处理 (f) I2D3 处理 (g) I1D4 处理 (h) I2D4 处理

最后生物量、产量等变量模拟精度较低的根本原因。各处理的 LAI 均是生育前期模拟较好,生育后期出现较大偏差,在生育后期随着玉米逐渐成熟,叶片开

始干枯甚至脱落,叶面积下降,模型预测的生育期后期叶面积减小过快,导致模拟值与观测值得偏差较大。

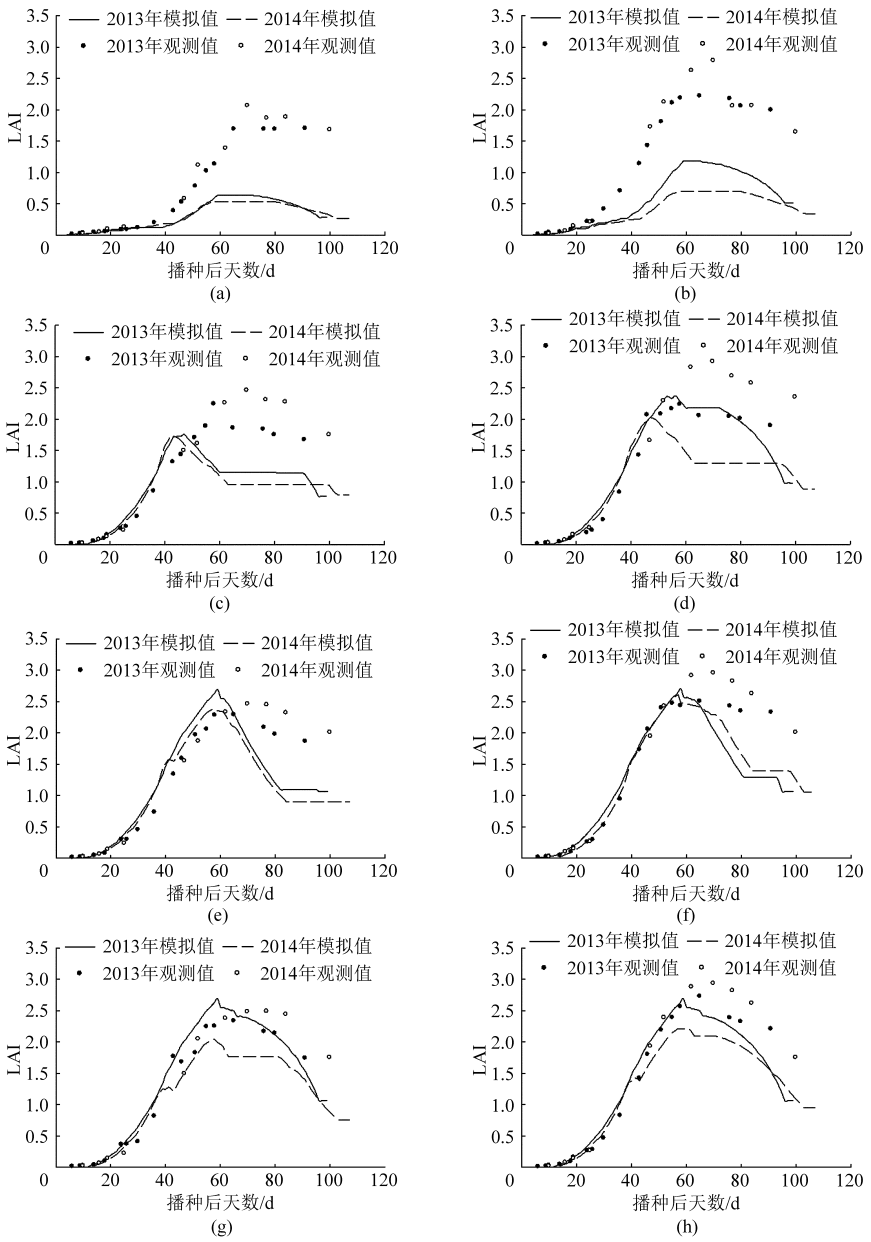


图 6 2013 和 2014 年不同阶段受旱条件下夏玉米叶面积指数模拟结果验证

Fig. 6 Verification of leaf area index of summer maize under different water stresses conditions in 2013 and 2014
(a) I1D1 处理 (b) I2D1 处理 (c) I1D2 处理 (d) I2D2 处理 (e) I1D3 处理 (f) I2D3 处理 (g) I1D4 处理 (h) I2D4 处理

2.2.3 对土壤水分模拟的验证

在验证 CERES-Maize 模型模拟土壤水分动态变化时,也只考虑了利用 GLUE 方法所获得参数进行模型验证的结果。此外,为了表述简洁,只选20~40 cm 土层动态模拟结果(图 7)。由图 7 可知各处理土壤含水率模拟值变化趋势与观测值一致,各处理大部分观测值都在模拟曲线上,说明对土壤水分的模拟较好。低水水平 I1 各处理模拟精度(图 7a、7c、7e、7g)低于高水水平 I2(图 7b、7d、7f、7h),在同一灌水水平下,后期受旱处理的土壤水分模拟精度

要高于前期受旱处理。总体而言,模型遗传参数对土壤水分变化的影响是间接性的,重要性弱于土壤物理参数。

2.3 基于交叉验证的模型预测精度分析

由交叉验证(CV)的结果(表 8)可知,将本研究中 9 个处理作为 9 个样本采用留一验证法对 CERES-Maize 模型模拟精度进行评价时,若采用 GLUE 调参工具,模型校正结果中模拟值和观测值的平均 RAE 和 RRMSE 分别为 12.05% 和 14.76%,验证结果为 13.45% 和 15.12%;而利用 PEST 调参

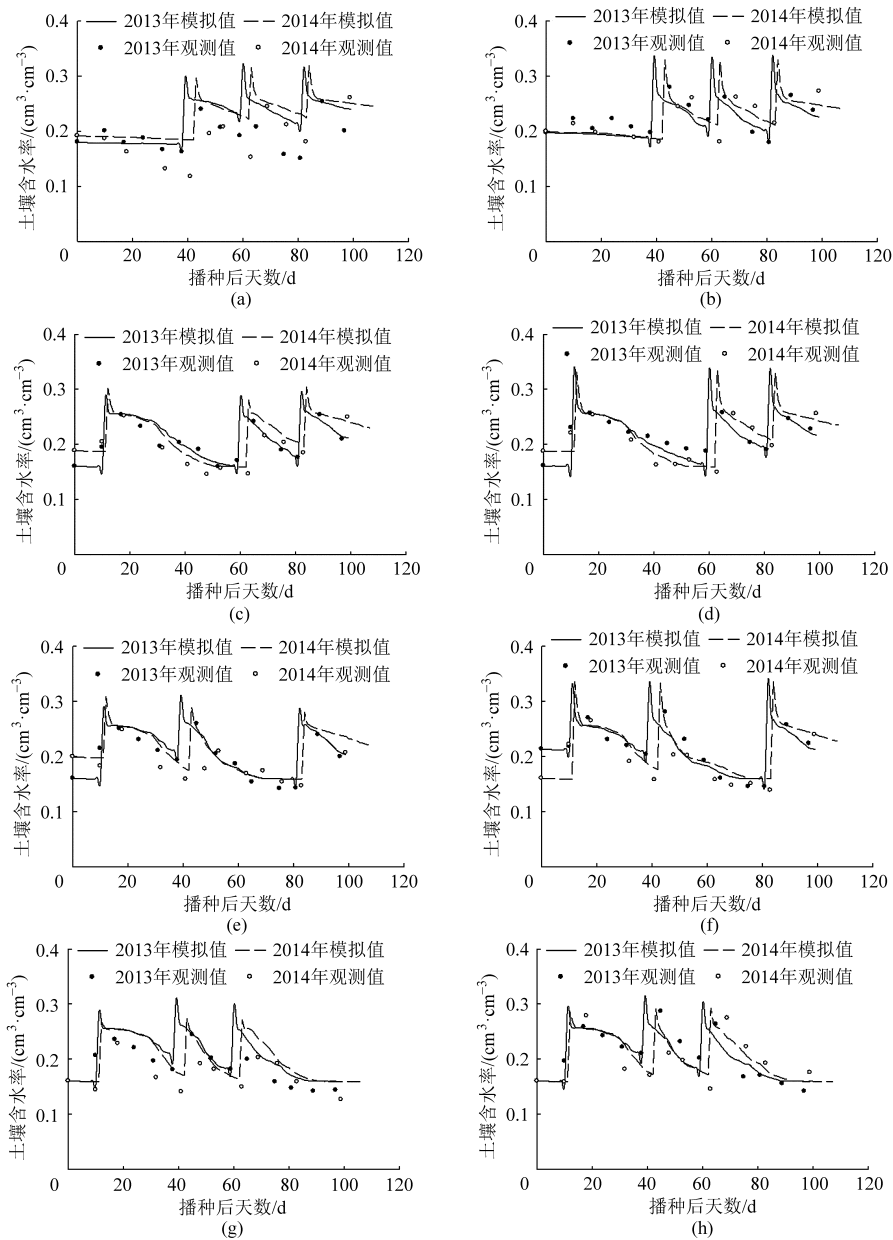


图 7 2013 和 2014 年不同阶段受旱条件下夏玉米土壤含水率(20 ~ 40 cm)模拟结果验证

Fig. 7 Verification of soil moisture at 20 ~ 40 cm of summer maize growth under different water stresses conditions in 2013 and 2014

(a) I1D1 处理 (b) I2D1 处理 (c) I1D2 处理 (d) I2D2 处理 (e) I1D3 处理 (f) I2D3 处理 (g) I1D4 处理 (h) I2D4 处理

工具时,模型校正结果分别为 11.75% 和 14.23%,验证结果为 12.33% 和 14.18%。可见模型校准和验证结果模拟值和观测值之间 ARE 和 RRMSE 均小于 15%,表明 GLUE 和 PEST 对 CERES-Maize 模型的玉米参数调试具有很好的一致性,同时表明 CERES-Maize 模型对本研究中各处理的预测精度处于较为合理的水平。将用不同阶段受旱处理模型校正的结果(表 8)与仅用灌水充足的 CK 处理进行模型校正的结果(表 5)对比,可以看出受旱处理参与模型校正时模型模拟值与观测值之间 ARE 和 RRMSE 在 11% ~ 15% 之间,而仅用 CK 处理的结果在 10% 以下,可见 CERES-Maize 模型模拟不同阶段

受旱处理玉米生长发育及产量的误差大于充分灌水处理。此外,在前期受旱的处理(D1、D2)参与模型校准(表 8 中编号 3、4、7、8),校正结果 ARE 和 RRMSE 相比其他校正结果相对较高,而模型验证则相对较低,特别是在拔节期受旱的处理表现更为突出。例如,在 GLUE 调参过程中,当前期受旱处理(D1、D2)同时参与模型参数估计时(表 8 中编号 4),模型模拟值和观测值之间的 RRMSE 为 15.60%,大于拔节期受旱处理(D2)不参与参数估计时的 RRMSE(表 8 中编号 2,13.27%)。这进一步表明模型对前期受旱特别是拔节期受旱各处理的模拟结果较差。

表 8 利用 CERES-Maize 模型模拟不同水分胁迫条件下夏玉米生长时的交叉验证结果

Tab. 8 Results of cross validation for CERES-Maize model for simulations of different treatments of summer maize under different water stress condition

%

编号	模型校准				验证数据					
	参数估计数据	GLUE		PEST		模型验证	GLUE		PEST	
		ARE	RRMSE	ARE	RRMSE		ARE	RRMSE	ARE	RRMSE
1	I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	11.32	14.60	11.52	13.76	I1D1	17.27	18.97	13.55	13.91
2	I1D1, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	10.89	13.27	10.96	13.34	I1D2	17.40	20.70	20.63	23.94
3	I1D1, I1D2, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	11.82	14.48	10.98	13.57	I1D3	15.78	18.30	14.91	17.35
4	I1D1, I1D2, I1D3, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	12.61	15.60	13.46	15.25	I1D4	12.43	12.63	13.65	14.76
5	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D2, I2D3, I2D4, CK	12.31	15.39	11.67	14.41	I2D1	13.16	15.09	9.69	12.50
6	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D3, I2D4, CK	12.54	14.76	11.86	14.13	I2D2	13.45	13.63	14.92	15.97
7	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D4, CK	12.28	15.02	11.55	14.58	I2D3	11.11	12.85	10.16	11.90
8	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, CK	12.73	15.39	12.24	14.93	I2D4	5.19	6.18	4.27	5.16
9	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4	11.98	14.35	11.53	14.11	CK	15.27	17.76	9.17	12.12
平均		12.05	14.76	11.75	14.23		13.45	15.12	12.33	14.18

3 讨论

CERES-Maize 模型中不同玉米品种的参数,决定了其生长发育和产量形成过程,品种参数的正确与否直接影响到模型模拟结果。本文采用 GLUE 和 PEST 两种模型参数率定工具,以两年田间试验中足水对照处理(CK)对夏玉米的遗传参数进行了估计,结果发现两种方法所得两套参数的数值本身非常相近,而且 2 套参数对物候期、最终生物量、单粒质量和产量的模拟值与观测值 ARE 和 RRMSE 均在 6% ~ 8% 之间,模拟精度较好;对于生物量、LAI 和土壤含水率随时间的动态变化模拟误差也较小,说明 GLUE 和 PEST 两种方法估计 CERES-Maize 模型遗传参数时具有较好的收敛性和一致性,均可用于模型遗传参数的估计。但是 GLUE 运行 20 000 次得到一组最优参数约需要 3 ~ 4 h,而 PEST 迭代 100 次得到类似结果需要 2 ~ 3 min,调参效率显然更高。但 PEST 使用中发现参数初始值对结果的影响很大,这是因为如果参数初始值距离真值较远时,PEST 在计算过程中容易陷入局部最优解中,因此建议在利用 PEST 调参之前,应合理设置参数初始值。

通过对 CERES-Maize 模型率定与验证过程中模拟值与观测值的对比分析可知该模型可以较好地模拟灌水充足条件下的玉米生长发育和产量形成,其中对物候期、最终籽粒产量、单粒质量、最终地上部生物量的模拟值和观测值之间的平均 ARE 和 RRMSE 在 6% ~ 8% 之间。对地上部生物量及 LAI 随时间变化的模拟趋势与实测趋势也基本吻合, R^2 在 0.929 ~ 0.982 之间。同时模型对足水处理土壤水分变化的模拟也较为准确,这再次证明了 Boote^[52] 建议的利用足水足肥处理数据进行模型校

正方法的正确性。

在模型的验证过程中,各处理模拟值与观测值之间平均 ARE 和 RRMSE 为 14.76% 和 17.45%,模拟精度中等,没有模拟足水处理时的精度高。各处理物候期的模拟值与观测值之间 ARE 在 0 ~ 13.43% 之间,模拟精度较高。同一年各处理的物候期模拟一致,但田间试验中不同的受旱情境会导致各处理物候期出现差异,营养阶段受旱(D1、D2)会推迟夏玉米生育期,生殖生长阶段受旱(D3、D4)会缩短夏玉米物候期,而模型中无法模拟出这种差异。这主要是因为 CERES-Maize 模型在模拟玉米物候期时主要考虑的是温度和光周期等环境因子的影响,并没有考虑水分胁迫对物候期的影响作用^[62]。此外,CERES 模型在模拟作物物候期时用的都是冠层表面的温度,也就是空气温度,并没有考虑冠层内部的实际温度^[63],这也可能是导致模型无法模拟物候期差异的另一个原因。

夏玉米的生长发育、产量指标因受旱发生阶段的不同而不同,但 CERES-Maize 模型模拟 LAI 的动态变化过程时,模拟结果整体偏低,特别是在营养阶段发生干旱(D1、D2)时模拟值与观测值差距较大,随着受旱时段向生育期后期移动,模拟误差逐渐减小,这说明模型对营养阶段受旱条件下植株的生长发育模拟不够准确。LAI 的模拟结果整体偏低很可能是造成随后各生理指标模拟误差的根本原因。在模拟粒质量、地上部生物量时,模拟结果整体偏高,导致最终产量模拟值也整体偏高,特别是在生育前期受旱的各处理(D1、D2)中,模拟误差较大,说明 CERES-Maize 模型没有准确量化玉米生育前期(D1、D2)受旱与粒质量、生物量及产量之间的关系,或者说模型低估了前期受旱(D1、D2)后对粒质量、

生物量及产量的影响。模型对玉米营养阶段受旱各处理(D1、D2)土壤水分的模拟也有一定的误差,尤其是低灌溉水平下,误差较大。综上所述,CERES-Maize 模型基本可以模拟不同阶段受旱条件下夏玉米的生长发育及产量,但也存在一定的误差,特别是模拟生育前期受旱(D1、D2)各处理时误差较大,应谨慎分析模拟结果。

交叉验证结果发现无论 GLUE 或 PEST 方法,CERES-Maize 模型模拟值和观测值之间 ARE 和 RRMSE 平均都在 15% 以下,两种方法具有较好的一致性。当利用 CERES-Maize 模型模拟本研究中设置的不同水分胁迫下夏玉米生长过程时,模型模拟的总体平均 ARE 和 RRMSE 值在 11% ~ 15% 之间,这比试验中 CK 处理的模拟精度要低,而且当有前期受旱处理(D1、D2)特别是拔节期受旱处理(D2)参与模型参数校准过程时,模型预测精度会降低,说明 CERES-Maize 模型对前期(特别是拔节期)受旱夏玉米生长发育和产量形成的模拟误差较大。

导致作物模型模拟精度较低的原因是多种多样的,首先作物模型是依据作物生长机理和经验而构建的,而作物的生长过程是作物品种-环境-管理互作的结果,即作物生长过程是生长机理在一定农艺措施下的表达^[27],因此作物模型在模拟不同条件下作物生长本身就会有不同的精度;其次,在水分胁迫条件下 CERES-Maize 模型对玉米 LAI 的模拟精度较低^[59, 61, 64-65],特别是生育期后期,植株生长由营养生长转为生殖生长,模型将现有的可利用有机质向生殖部位转移,因而有少量的供营养部位利用,导致对 LAI 的低估,且模拟精度具有较大的年际变化,因此受旱条件下玉米 LAI 模拟不够准确可能是导致生长发育各指标模拟不准确的根本原因;再次,CERES-Maize 模型对于水分胁迫情况下作物的蒸发蒸腾量模拟有一定局限性,还需完善模型对于水分胁迫情况下的蒸发蒸腾量 ET 建模^[66],例如 Dejonge 等^[67]从提高 ET 的模拟精度入手改进了 CERES 模型模拟水分胁迫条件下的作物生长过程,从而提高模拟精度,因此受旱情况下玉米 ET 模拟不够准确也可能是导致玉米生长发育和产量模拟精度不高的

另一个重要原因;最后,还有研究指出 CERES-Maize 模型对水分胁迫效果的模拟和作物生长的实际结果不符,导致作物生长发育等的模拟误差较大^[26,59],这也可能是 CERES-Maize 模型模拟受旱条件下夏玉米生长发育不够准确的原因。因此,建议在今后研究中应在模拟叶面积指数、ET 以及量化早期水分胁迫对作物生长发育的影响等方面对 CERES-Maize 模型进行相应的修正,以提高该模型对受旱条件下夏玉米的生长发育、产量形成和土壤含水率的模拟精度。

4 结 束 语

本研究利用 2013 和 2014 两年的田间试验数据,通过 GLUE 和 PEST 两种不同的参数率定工具,对 CERES-Maize 模型的遗传参数进行了估计,并对校正后的模型进行了验证,此外还通过交叉验证对 CERES-Maize 模型模拟本研究中不同阶段受旱处理的整体模型预测精度进行了评估。结果发现 GLUE 和 PEST 两种调参工具均具有很好的稳定性和收敛性,所得的最优参数组合也具有一定的一致性。利用灌水充足的 CK 处理进行模型校准和验证时,ARE 和 RRMSE 均较小,模型模拟具有很好的精度,但当前期受旱处理参与模型校准时,模型预测精度均较低,这证明 CERES-Maize 模型能够准确模拟水分充足条件下的夏玉米生长发育、产量形成及土壤水分状况。在生育期后期受旱时,CERES-Maize 模型也有较高的模拟精度,但是苗期和拔节期(特别是拔节期)受旱时,模型的模拟精度较低,可见受旱时段和受旱程度对 CERES-Maize 模型的模拟精度有很大的影响,受旱时段的提前和受旱程度的加重,均会导致模型模拟的精度降低。此外,CERES-Maize 模型无法模拟因不同生育期干旱胁迫所导致的夏玉米物候期的差异。因此,CERES-Maize 模型模拟非充分灌溉条件下夏玉米生长发育和产量形成还有一定的局限性,建议应在 CERES-Maize 模型中加入适当的水分胁迫因子来正确量化前期水分胁迫对作物后期生长发育和产量形成的影响机制,从而提高 CERES-Maize 模型在干旱和半干旱地区的整体模拟精度。

参 考 文 献

1 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.

2 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002(9): 27-31.
Shan Lun, Deng Xiping, Kang Shaozhong. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9):27-31. (in Chinese)

3 雷廷武, 邵明安, 杨培岭. 我国干旱半干旱地区农业持续发展战略探讨[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 1-5.
Lei Tingwu, Shao Ming'an, Yang Peiling. On the strategies of sustainable agricultural development in the arid and semi-arid areas

- of China[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(4): 1–5. (in Chinese)
- 4 宋树友, 包玉英, 孙学权. 旱地农业工程的理论与实践[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- 5 宋连春, 张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143–148.
Song Lianchun, Zhang Cunjie. Changing features of precipitation over nothwest China during the 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2):143–148. (in Chinese)
- 6 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 750–758.
Lin Zhonghui, Mo Xingguo, Xiang Yueqin. Research advances on crop growth models[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 750–758. (in Chinese)
- 7 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5):529–535.
Wang Yali, He Liyuan. A review on the research and application of crop simulation model[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005, 24(5):529–535. (in Chinese)
- 8 潘学标. 荷兰作物模型的发展与应用[J]. 世界农业, 1998, 9(233): 17–19.
- 9 刘布春, 王石立. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 193–203.
- 10 高亮之. 农业模型学基础[M]. 天马图书有限公司, 2004.
- 11 Asadi M E, Clemente R S. Simulation of maize yield and N uptake under tropical conditions with the CERES-Maize model[J]. Tropical Agriculture, 2001, 78(4): 211–217.
- 12 Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 235–265.
- 13 Hoogenboom G, Jones J, Wilkens P, et al. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) Version 4.5[M]. University of Hawaii, 2010.
- 14 Jones C A, Kiniry J R, Dyke P. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development[M]. Texas: Texas A&M University Press, 1986.
- 15 Huffman E, Yang J, Gameda S, et al. Using simulation and budget models to scale-up nitrogen leaching from field to region in Canada[J]. The Scientific World Journal, 2001, 1:699–706.
- 16 He J, Dukes M, Hochmuth G, et al. Evaluation of sweet corn yield and nitrogen leaching with CERES-Maize considering input parameter uncertainties[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(4): 1257–1268.
- 17 He J, Dukes M D, Hochmuth G J, et al. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES-Maize model[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109:61–70.
- 18 刘玉兰, 陈晓光, 肖云清, 等. CERES-Maize 模型中遗传参数确定方法的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 127–129.
Liu Yulan, Chen Xiaoguang, Xiao Yuqing, et al. Study on establishing maize variety parameters in the CERES-Maize simulation model[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(6): 127–129. (in Chinese)
- 19 范铭丰, 武伟, 刘洪斌. 基于 CERES-Maize 模型的玉米遗传参数优化及验证[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3087–3089.
Fan Mingfeng, Wu Wei, Liu Hongbin. Optimization and validation of genetic parameters of maize based on CERES-Maize model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(6): 3087–3089. (in Chinese)
- 20 戴明宏, 赵久然, 王璞. 基于 CERES-Maize 模型春玉米水分优化管理决策[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 187–192.
Dai Minghong, Zhao Jiuran, Wang Pu. Decision for optimized water management based on CERES-Maize crop model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 187–192. (in Chinese)
- 21 Jin Z Q, Zhu D W. Impacts of changes in climate and its variability on food production in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(9): 1588–1597.
- 22 Xiong W, Holman I, Lin E, et al. Climate change, water availability and future cereal production in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 135(1): 58–69.
- 23 Yang Y, Yang Y, Moiwo J P, et al. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1711–1721.
- 24 Guo R, Lin Z, Mo X, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1185–1194.
- 25 姜志伟, 陈仲新, 周清波, 等. CERES-Wheat 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 236–242.
Jiang Zhiwei, Chen Zhongxin, Zhou Qingbo, et al. Global sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters[J]. CSAE, 2011, 27(1): 236–242. (in Chinese)
- 26 Nouna B B, Katerji N, Mastrorilli M. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(4): 309–322.
- 27 Dejonge K, Andales A, Ascough J, et al. Modeling of full and limited irrigation scenarios for corn in a semiarid environment[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 481–492.
- 28 Makowski D, Wallach D, Tremblay M. Using a Bayesian approach to parameter estimation; comparison of the GLUE and MCMC methods[J]. Agronomie, 2002, 22(2): 191–203.

- 29 Tremblay M, Wallach D. Comparison of parameter estimation methods for crop models[J]. *Agronomie*, 2004, 24(6-7): 351-365.
- 30 Brun F, Wallach D, Makowski D, et al. Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- 31 He J, Dukes M, Jones J, et al. Applying GLUE for estimating CERES-Maize genetic and soil parameters for sweet corn production[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(6): 1907-1921.
- 32 He J, Jones J W, Graham W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method[J]. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 256-264.
- 33 Jones J W, He J, Boote K J, et al. Estimating DSSAT cropping system cultivar-specific parameters using Bayesian techniques [M]// Ahuja L R, Ma L. *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research*, W I, US: American Society of Agronomy, 2011:365-394.
- 34 Doherty J, Brebber L, Whyte P. PEST: model-independent parameter estimation [R]. Corinda, Australia: Watermark Computing, 1994.
- 35 Doherty J E, Hunt R J. Approaches to highly parameterized inversion: a guide to using PEST for groundwater-model calibration [R]. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2010.
- 36 Goegebeur M, Pauwels V R. Improvement of the PEST parameter estimation algorithm through extended Kalman filtering[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3): 436-451.
- 37 Bahremand A, de Smedt F. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(12): 2869-2880.
- 38 董艳辉, 李国敏, 徐海珍. 应用 PEST 及 GIS 的北山区地下水流动模型校正[C]//第二届废物地下处置学术研讨会论文集, 2008:51-58.
- 39 Al-Abed N, Whiteley H. Calibration of the hydrological simulation program fortran (HSPF) model using automatic calibration and geographical information systems[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(16): 3169-3188.
- 40 Govender M, Everson C. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 683-692.
- 41 Wang X, Melesse A. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(4): 1359-1376.
- 42 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于 PEST 的 RZWQM2 模型参数优化与验证[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11):146-153. Sun Mei, Zhang Xiaolin, Feng Shaoyuan, et al. Parameter optimization and validation for RZWQM₂ model using PEST method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11):146-153. (in Chinese)
- 43 Mckee G W. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn[J]. *Agronomy Journal*, 1964, 56(2): 240-241.
- 44 Zadoks J C, Chang T T, Konzak C F. A decimal code for the growth stages of cereals[J]. *Weed Research*, 1974, 14(6): 415-421.
- 45 Ritchie J T. Soil water balance and plant water stress[M]//Tsuji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K. *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1998: 41-54.
- 46 Priestley C, Taylor R. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92.
- 47 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[J]. Rome: FAO, 1998.
- 48 Saseendran S A, Ahuja L R, Ma L, et al. Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models[M]// Ahuja L R, Reddy V R, Saseendran S A, et al. *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*. Advances in Agricultural Systems Modeling. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2008: 1-38.
- 49 He J, Cai H, Bai J. Irrigation scheduling based on CERES-Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128:19-31.
- 50 Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 50(210): 121-126.
- 51 Timsina J, Humphreys E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: a review [J]. *Agricultural Systems*, 2006, 90(1): 5-31.
- 52 Boote K. Concepts for calibrating crop growth models[M]//Hoogenboom G, Wilkens P W, Tsuji G Y, *DSSAT v3*, 1999, 4:179-200.
- 53 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138-150.
- Yao Ning, Zhou Yuangang, Song Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT-CERES-Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 138-150. (in Chinese)
- 54 Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction[M]//Beven E Moore. *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*, Chichester: John Wiley & Sons, 1991: 227-246.

55 He J. Best management practice development with the CERES-Maize model for sweet corn production in North Florida [D]. Gainesville, FL: University of Florida, 2008.

56 Dougherty J. PEST-Model-independent parameter estimation, User Manual [R]. Watermark Numerical Computing, 2004,

57 王礼恒, 董艳辉, 李国敏, 等. 基于 PEST 的地下水数值模拟参数优化的应用 [J]. 工程勘察, 2014 (3): 38 – 42.
Wang Liheng, Dong Yanhui, Li Guomin, et al. Application of groundwater numerical simulation for parameter optimization based on PEST [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014 (3): 38 – 42. (in Chinese)

58 Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection [C] // Proceedings of the IJCAI, 1995, 14 (2): 1137 – 1145.

59 Hodges T, Botner D, Sakamoto C, et al. Using the CERES-Maize model to estimate production for the US Cornbelt [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 40 (4): 293 – 303.

60 Carberry P, Muchow R, Mccown R. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment [J]. Field Crops Research, 1989, 20 (4): 297 – 315.

61 Liu W, Botner D, Sakamoto C. Application of CERES-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 45 (3): 299 – 312.

62 McMaster G S, White J W, Weiss A, et al. Simulating crop phenological responses to water deficits [M] // Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes, 2008: 277 – 300.

63 Travasso M I, Delécolle R. Adaptation of the CERES-wheat model for large area yield estimation in Argentina [J]. European Journal of Agronomy, 1995, 4 (3): 347 – 353.

64 Wu Y, Sakamoto C, Botner D. On the application of the CERES-maize model to the North China Plain [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 49 (1): 9 – 22.

65 Birch C, Carberry P, Muchow R, et al. Development and evaluation of a sorghum model based on CERES-Maize in a semi-arid tropical environment [J]. Field Crops Research, 1990, 24 (1): 87 – 104.

66 Ahuja L. Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes [M]. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 2008.

67 Dejonge K, Ascough J, Andales A, et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 92 – 103.