

不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证

姚 宁^{1,2}, 周元刚^{1,2}, 宋利兵^{1,2}, 刘 健^{1,2},
李 毅^{1,2}, 吴淑芳^{1,2}, 冯 浩^{2,3}, 何建强^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘 要: 作物模型为人们认识旱区农业生境过程并对其进行调控提供了一种有效的工具。为了探讨小麦生长模拟模型 DSSAT-CERES-Wheat 能否准确模拟水分胁迫条件下旱区冬小麦的生长发育和产量形成过程, 同时确定参数估计和模型验证的最优方案, 该研究进行了连续两季 (2012.10—2013.06 和 2013.10—2014.06) 的冬小麦分段受旱田间试验。试验将冬小麦整个生育期划分为越冬、返青、拔节、抽穗和灌浆 5 个主要生长阶段, 每相邻两个生长阶段连续受旱, 形成 4 个不同的受旱时段水平 (D1—D4), 根据小麦生育期的需水量, 设置灌水定额分别为 40 和 80 mm 2 个水平 (I1 和 I2), 共形成 8 个处理, 每处理 3 次重复, 在遮雨棚内采用裂区试验布置, 此外在旁边设置 1 个各生育期全灌水的对照处理。文中设置了 5 套不同的参数估计和验证方案, 利用 DSSAT-GLUE 参数估计模块得到不同的参数估计结果。通过对比分析冬小麦物候期、单粒质量、生物量、产量、以及土壤水分含量的模拟值和实测值之间的差异, 以确定利用 DSSAT-CERES-Wheat 模型模拟旱区冬小麦生境过程的精度。结果表明, 参数 P1V (最适温度条件下通过春化阶段所需天数) 和 G3 (成熟期非水分胁迫下单株茎穗标准干质量) 具有较强的变异性, 变异系数分别为 19.07% 和 16.34%, 受基因型-环境互作的影响较大, 而其他参数的变异性则较弱, 变异系数均小于 10%; DSSAT-GLUE 参数估计工具具有较好的收敛性, 不同参数估计方案所得的参数值具有一定的一致性; 不同的参数估计方案所得的模型输出结果有较大差异, 其中参数估计方案 1 (利用两季试验中的充分灌溉处理 CK 数据进行参数估计, 其他不同阶段受旱处理数据进行验证) 的模型校正和验证精度最高, 其中模型校正的绝对相对误差 (absolute relative error, ARE) 和相对均方根误差 (relative root mean squared error, RRMSE) 分别为 4.89% 和 5.18%。在冬小麦抽穗期和灌浆期受旱时, DSSAT-CERES-Wheat 模型可以较好地模拟小麦的生长发育过程以及土壤水分的动态变化, 但是在越冬期和返青期受旱时, 模拟结果相对较差, 并且随着受旱时段提前和受旱程度的加重, 模拟精度将变得更低。此外, 该模型无法模拟由不同水分胁迫造成的冬小麦物候期差异, 需要对模型进行相应的改进。交叉验证表明 DSSAT-CERES-Wheat 模型模拟该研究中不同水分胁迫条件下冬小麦生长和产量的总体性误差在 15%~18% 左右。总之, DSSAT-CERES-Wheat 模型在模拟旱区冬小麦生境过程时存在着一定的局限性, 若要更广泛地将该模型应用在中国干旱半干旱地区的冬小麦生产管理和研究, 有必要对冬小麦营养生长期前期水分胁迫响应机制和模拟方法进行进一步的深入研究。

关键词: 模型; 作物; 水分; 冬小麦; DSSAT; CERES-Wheat

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.019

中图分类号: S512.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-12-138-13

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.019 <http://www.tcsae.org>

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 138—150. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.019 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

小麦是中国三大粮食作物之一, 在农业生产和国民经济中都占有重要地位^[1]。随着社会经济的快速发展, 中

国耕地面积不断减少, 使得小麦生产的重点向中国干旱和半干旱地区转移, 然而水资源短缺及分布不均极大地限制了干旱和半干旱地区农业的发展^[2]。因此, 发展节水灌溉, 合理利用水资源是确保中国粮食安全的重要措施, 而要实现有限水资源的合理利用, 就必须对旱区农业生境系统进行综合研究。

作物对水分胁迫的耐受程度是随着作物生长阶段不同而发生变化的, 要在实践中准确实施非充分灌溉等节水灌溉方式, 就要明确作物各个生长阶段对水分胁迫的敏感程度^[3], 而这种研究往往依赖于传统的小区试验研究。中国冬小麦的生育期约为 240 d, 传统的研究方法不仅试验周期长、成本高, 而且取得的成果也缺乏通用性,

收稿日期: 2015-04-17 修订日期: 2015-06-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA102904), 国家自然科学基金 (51209176), 高等学校学科创新引智计划 (No.B12007)。

作者简介: 姚 宁, 男, 甘肃张掖人, 博士生, 研究方向为农业生态系统模拟。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: yaoning@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 何建强, 男, 甘肃天水人, 教授, 研究方向为农业生态系统模拟。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

无法得到充分利用。作物生长模拟模型(简称作物模型)能够综合环境状况和土壤管理措施来预测作物产量,并能分析相关的影响因素,找到最佳的管理措施,大幅度简化和缩短农业生境系统研究的进程,从而为农民和决策者提供技术指导和决策依据^[4]。作物模型一般定义为应用系统分析和计算机技术,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,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等生理过程及其与环境与栽培技术的动态关系进行定量分析和作物生长过程的模拟研究^[5-8]。

主要的小麦生长模型包括 AFRCWHEAT2、CERES-Wheat、Sirius、SUCROS2 和 SWHEAT 模型等^[9-10],其中 CERES-Wheat 模型应用较为广泛,主要应用于灌溉制度制定、水肥耦合和气候变化对农业生产影响方面的研究^[11-15]。在中国, Yang 等^[16]利用 CERES-Wheat 研究了华北平原太行山区的小麦灌溉优化措施,认为 3 月份水分的中度亏缺不至于减少小麦产量,可以通过前一年 11 月份的灌溉来部分补偿 3 月份的水分胁迫。袁静等^[17]利用 CERES-Wheat 模型分析了不同气候情景下的山东临沂地区的小麦产量,认为将小麦播期推迟,采用穗粒数较大的小麦新品种或偏春性小麦品种可以减少未来气候变化对该地区的小麦生产的不利影响。He 等^[12]利用 CERES-Wheat 模型模拟了不同灌水条件下甘肃民勤春小麦的生长和发育过程,并制定了相应的灌溉制度。

以往研究中, CERES-Wheat 模型也被用来模拟水分胁迫条件下的土壤水分变化^[18]和小麦产量^[19-21]。但是,也有研究表明该模型对水分胁迫条件下的小麦生长模拟存在一定的局限性。Travasso 和 Delecolle^[22]研究表明,在一定的水分胁迫范围内, CERES-Wheat 模型可以有效模拟小麦产量,但对生理成熟期和冠层的发育模拟不充分; Toure^[23]发现 CERES-Wheat 模型无法准确预测干旱年份的小麦籽粒产量; Bechir 等^[24]研究发现,在土壤水分短缺的情况下,叶面积指数、地上部生物量和籽粒产量的模拟值均偏低。这种局限性可能是由于该模型无法准确模拟水分胁迫条件下的作物蒸发蒸腾量(evapotranspiration, ET)所造成的,这在同属 CERES 模型系列的 CERES-Maize 模型中已经得到确认。DeJonge 等^[25]利用连续 3a 的充分和非充分灌溉数据,比较 CERES-Maize 模型输出的和实测的产量和蒸发蒸腾量,结果发现 CERES-Maize 模型可以充分模拟产量,但是在充分灌溉时略微低估了蒸发蒸腾量;而非充分灌溉时高估了蒸发蒸腾量,这与非充分灌溉时叶面积减小导致光合作用降低,从而减小蒸发蒸腾量的现象相矛盾。这表明 CERES-Maize 模型中叶面积和蒸发蒸腾量之间的量化关系还有待改进,因为在 CERES-Maize 模型中蒸腾作用的模拟不是直接与能量平衡或气孔导度相结合的。

此外,模型的校正与验证是保证作物模型模拟精度和可靠性的必要前提,不同的模型参数估计方案会获得不同的模型参数值和模型输出结果^[26-27]。然而,模型的校正与验证存在着不同的方法,目前还没有统一的经验

可循。以往研究一般都是将实测数据分为两部分来评价作物模型,即一部分数据用来校准模型,另一部分用来验证模型^[28-30]。例如, Ji 等^[31]把 2009-2012 年足水足肥处理的试验数据分为两部分,用 2009-2010 年度的数据校准模型,2011-2012 年的试验数据用来验证模型。在模型参数校正方法上,一些研究只是采用试错法(trial and error)手动调整几个特定参数,然后比较模拟值和实测值来评价模型^[32],其结果带有很强的主观性。在农业水利工程中一项研究往往有几年的试验数据,每年的试验也有多个不同的处理。一般要求采用不存在水分和养分胁迫处理的数据进行模型的品种参数校正^[33],但这种情况下获得的模型参数来模拟存在水分胁迫条件下的作物生长和产量形成过程,是否能达到满意的精度,其模拟误差到底有多大?现有模型最终能否满足模拟水分胁迫条件下农业生境系统的要求?要回答这些问题,就必须对模型的校正与验证过程进行系统研究,以确定模型参数估计和验证的最佳方案,这样才能保证模型模拟作物在缺水条件下生长发育和产量形成的可靠性。这是能否将 CERES-Wheat 模型广泛应用于干旱和半干旱地区小麦生产管理研究的重要前提。

本研究中将利用连续两季(2012.10-2013.06 和 2013.10-2014.06)的冬小麦分段受旱试验数据来运行 CERES-Wheat 模型,并对比分析不同的模型参数估计和验证方案,其目的在于评价 CERES-Wheat 模型模拟干旱胁迫下小麦生长发育和产量形成的可靠性;检验不同的模型校正和验证方案,并优选出模拟干旱胁迫条件下冬小麦生境过程的最佳方案。这将为利用 CERES-Wheat 模型来制定冬小麦非充分灌溉制度提供依据,也为进一步将该模型广泛应用于中国干旱半干旱地区农业生境系统模拟研究提供支持。

1 材料和方法

1.1 田间试验设计

田间冬小麦分段受旱试验在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°17'N, 108°04'E, 海拔 506 m)进行。该地区为关中旱作类型区,属于暖温带季风半湿润气候区,降水年内分布不均,易形成季节性干旱,全年无霜期为 221 d。试验在活动遮雨棚下进行,降雨时遮雨棚关闭,以杜绝降雨对试验的影响。试验小区种植面积为 8 m²,小区之间有埋深 1.5 m 的聚乙烯塑料隔离层,可防止侧渗。冬小麦供试品种为陕西主要种植的‘小偃 22’。播种日期分别为 2012 年和 2013 年的 10 月 15 日,采用条播种植,深度 5 cm,行距 25 cm,播种密度 400 万株/hm²,分别于 2013 年 6 月 2 日和 2014 年 6 月 7 日收获。各处理均施用 140 kg/hm² N 和 50 kg/hm² P₂O₅ 为底肥,其后不进行追肥。灌水方式为畦灌,灌溉时先将自来水注入标定过的量水桶,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小区。具体灌水方案见表 1。

试验因素为灌溉水平和受旱时段。陕西关中地区冬

小麦整个生育期的需水量约为 400~500 mm, 本文选择 400 mm 作为充分灌溉量, 分 5 次均匀灌溉, 即灌水定额为 80 mm (I2), 另外将充分灌溉 50% 的灌水量作为另一个低灌溉水平, 即灌水定额为 40mm (I1); 将冬小麦整个生育期划分为越冬、返青、拔节、抽穗和灌浆 5 个生长阶段, 每相邻两个生长阶段连续受旱, 即越冬+返青时段受旱 (D1)、返青+拔节时段受旱 (D2)、拔节+抽穗时段受旱 (D3) 和抽穗+灌浆时段受旱 (D4) 等 4 个水平, 共 8 个处理 (表 1), 每个处理设置 3 个重复, 共计 24 个小区, 在遮雨棚内按照裂区试验设计布设各小区。另外在遮雨棚内设置正常灌水处理 (CK) 作为对照, 也设置 3 个重复。两年度试验的处理设置相同。由于试验条件限制, 本研究未设置其他的不同受旱情境。

表 1 冬小麦不同生长阶段受旱试验的灌水处理

Table 1 Irrigation treatments in experiments of water stresses at different stages of winter wheat

处理 Treatment	mm					总灌水量 Total Irrigation Water
	越冬期 (12-15) Wintering	返青期 (03-15) Greening	拔节期 (04-15) Jointing	抽穗期 (05-01) Heading	灌浆期 (05-15) Grain filling	
CK	80	80	80	80	80	400
I1D1	0	0	40	40	40	120
I1D2	40	0	0	40	40	120
I1D3	40	40	0	0	40	120
I1D4	40	40	40	0	0	120
I2D1	0	0	80	80	80	240
I2D2	80	0	0	80	80	240
I2D3	80	80	0	0	80	240
I2D4	80	80	80	0	0	240

注: CK、I1、I2、D1、D2、D3、D4 分别为对照处理、40mm 灌水定额、80mm 灌水定额、越冬+返青时段受旱、返青+拔节时段受旱、拔节+抽穗时段受旱、抽穗+灌浆时段受旱。下同。

Note: CK, I1, I2, D1, D2, D3, D4 represent control treatment, irrigation quota of 40mm, irrigation quota of 80mm, drought in wintering and greening growth stages, drought in greening and jointing growth stages, drought in jointing and heading growth stages, drought in heading and grain filling growth stages. The same as below.

1.2 CERES-Wheat 模型的水分胁迫因子

CERES-Wheat 是 DSSAT 模型系列中的子模型之一, 是专为麦类作物开发的^[8]。该模型以模块的形式运行在 DSSAT-CSM (cropping system model) 公共平台上, 并调用气象和土壤数据库以及土壤水分、氮素和碳素平衡模块, 以天为时间步长模拟小麦生长发育、产量形成、氮碳水平衡过程等^[8, 34]。模拟过程涉及光截获和光合作用、营养吸收和根系活动、干物质分配、水分吸收和蒸腾、生长和呼吸、叶面积增长、发育和器官形成、衰老、田间管理措施等。CERES-Wheat 模型运行所需的数据有 4 部分, 分别为气象数据、土壤数据、作物品种数据和田间管理数据。

在 CERES-Wheat 模型中, 土壤水分是根据 Ritchie^[35]提出的水量平衡方法来模拟的。该模型中逐日的土壤水量平衡采用 Ritchie 一维“翻桶式” (tipping bucket) 方法^[36], 它可以模拟每一层土壤的水分流动和根系吸水。潜

在根系吸水是根长密度、深度、根系分布和实际土壤含水量之间的函数, 潜在蒸发蒸腾 (potential evapotranspiration, PET) 用 Priestley-Taylor^[37]或 FAO56 Penman-Monteith^[38]方法计算, 潜在蒸发是叶面积指数和 ET_0 的函数。计算水分胁迫的基本原理就是比较潜在蒸腾 (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^[39]。在水分充足的条件下, 潜在根系吸水大于潜在蒸腾。然而, 由于根系吸水和表面蒸发导致土壤失水, 潜在根系吸水逐渐减少, 在某个阶段达到一个阈值, 即第 1 个水分胁迫或膨压因子 (turgor factor, TURFAC) (公式 1; 图 1), 该水分胁迫因子主要影响作物的伸展性生长 (expansive growth), 如干物质的积累、叶片的伸展等, 这些过程往往比其他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, 出现第 2 个胁迫因子 (second water stress factor, SWFAC) (公式 2; 图 1)^[12], 主要影响作物生长和生物量形成的相关过程。对某些作物, 干旱胁迫可能会提高发育速率和减少开花、种子形成以及生理成熟的天数, 然而对于其它作物则会降低发育速率。在没有水分胁迫条件下, 两个因子均为 1.0。一旦水分胁迫出现, 就会减小到一个小于 1 的值, 这与潜在蒸腾和潜在可吸收土壤水分差额的大小成正比 (图 1)。模型中的两个胁迫因子在作物的生长和发育速率中被作为直接乘数 (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。

$$\text{TURFAC} = \frac{\text{TRWUP}}{\text{RWUEP}_1 \times \text{EP}_0} \quad (1)$$

$$\text{SWFAC} = \frac{\text{TRWUP}}{\text{EP}_0} \quad (2)$$

式中: TURFAC 为第 1 个水分胁迫因子 (或膨压因子); TRWUP 为潜在根系吸水; EP_0 为潜在蒸腾; RWUEP_1 是一个物种特性参数, 目前在所有 DSSAT 作物中均设置为 1.5; SWFAC 为第 2 个水分胁迫因子。

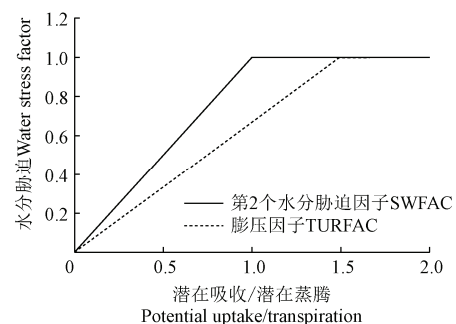


图 1 DSSAT 模型中潜在吸收/潜在蒸腾和水分胁迫因子的关系
Fig.1 Relationship used to calculate water stress factors SWFAC and TURFAC in DSSAT model

1.3 模型输入数据

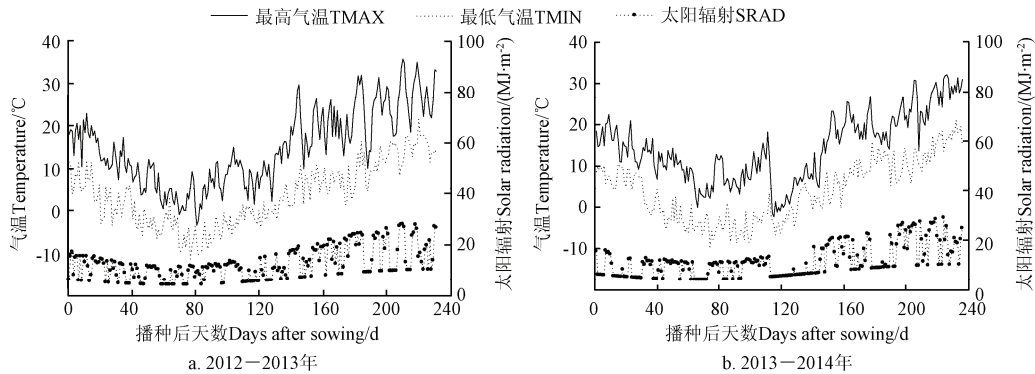
2012—2014 年逐日气象数据由陕西省杨凌国家一般气象站提供, 包括逐日日照时数 (h)、逐日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$) 和降雨量 (mm) (图 2), 由于试验在遮雨棚下进行, 故降雨量均为 0。逐日太阳辐射量根

据 Angstrom^[40]经验公式计算:

$$R_s = R_{max} \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

式中: R_s 为太阳总辐射 (MJ/m^2); R_{max} 为天文辐射, 即

晴天太阳辐射量, MJ/m^2 ; a_s 、 b_s 为经验系数, 与大气质量状况有关, 根据 FAO 推荐, 选择 $a_s=0.25$, $b_s=0.50$; n 为逐日日照时数, h , 可直接由气象站获取; N 为逐日可照时数, 即最大时长, h 。



注: TMAX 为逐日最高气温; TMIN 为逐日最低气温; SRAD 为逐日太阳辐射量。
Note: TMAX represents daily maximum temperature, TMIN represents daily minimum temperature, SRAD represents daily solar radiation.

图 2 冬小麦生育期内逐日气温和太阳辐射量
Fig.2 Daily temperatures and solar radiation of winter wheat.

土壤数据为田间的实测数据。每层的土壤物理特性参数均是在试验前测定的, 土壤颗粒分析是用 TopSizer 激光粒度分析仪测定, 凋萎含水率、田间持水率、饱和含水率等是用高速离心法测定。土壤水分是在小区内选

取植株覆盖的代表性点, 土钻取样, 深度为 1 m, 每隔 20 cm 取样一次, 混合均匀存入铝盒, 在 105℃ 下用烘干法测定。取样频率为拔节期前两周取土样一次, 拔节期以后每周取样一次。模型运行所需土壤数据见表 2。

表 2 试验区初始土壤性质
Table 2 Initial soil properties of experimental plots

土层 Layer/cm	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	凋萎含水率 Wilting point ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持水率 Field capacity ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 Saturated water content ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	初始含水率 Initial water content/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	
							2012—2013 年	2013—2014 年
0~20	18.36	42.29	1.26	0.15	0.25	0.43	0.23	0.20
>20~40	19.45	43.65	1.35	0.16	0.26	0.45	0.24	0.21
>40~60	17.40	42.83	1.30	0.16	0.26	0.44	0.26	0.18
>60~80	16.09	41.99	1.32	0.14	0.29	0.35	0.27	0.18
>80~100	16.36	42.35	1.35	0.15	0.24	0.30	0.29	0.21

出苗后在各个试验小区内随机选取能够代表小区整体长势的 1 m^2 植株样方进行标记, 作为最终产量测定区域, 不允许扰动, 其他周期性采样在样方外进行。在每小区样方外采集 5 株小麦, 取其地上部生物量于 105℃ 下杀青 0.5 h、75℃ 烘至质量恒定, 测其干质量, 采样频率同土壤含水率。待小麦成熟后, 收获样方内地上部生物量, 统计有效穗数, 并取 10 株考察平均穗粒数, 最后所有麦穗经人工脱粒, 在 105℃ 下杀青 0.5 h、75℃ 烘至质量恒定后计算产量, 并用天平量取千粒质量。

1.4 模型校正、验证及交叉验证

本文采用 DSSAT-GLUE 参数调试程序包对冬小麦品种 ‘小偃 22’ 进行参数率定, 主要参数有 P1V、PID、P5、G1、G2、G3 和 PHINT (表 3)。DSSAT-GLUE 参数调试程序包是基于 Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) 方法设计的^[41-43], GLUE 方法对于可能的参数不是简单地否决或者接受, 而是将模拟结果与实测结果进行对比, 根据似然函数值确定参数可信程

度, 在具有较大的模型不确定性和观测不确定性的条件下, 用这种方法进行模型参数估计更为科学^[44]。

表 3 冬小麦的品种遗传参数及取值范围
Table 3 Genetic coefficients of winter wheat and their value ranges

参数 Parameter	描述 Definition	取值范围 Range
P1V	最适温度条件下通过春化阶段所需天数/d	5~65
P1D	光周期参数/%	0~95
P5	籽粒灌浆期积温/ $(\text{C}\cdot\text{d})$	300~800
G1	开花期单位株冠质量的籽粒数/($\text{no}\cdot\text{g}^{-1}$)	15~30
G2	最佳条件下标准籽粒质量/mg	20~65
G3	成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量/g	1~2
PHINT	完成一片叶生长所需积温/ $(\text{C}\cdot\text{d})$	60~100

在 GLUE 程序中, 将似然函数作为品种遗传参数估计的评判标准, 该程序比较每一个模型模拟值与对应观测值之间的差异, 并计算它们之间的似然值, 似然值越大则表示模拟值与观测值之间约接近, 反之亦然。然后计算所有相关模拟值与观测值的总似然值, 并利用贝叶

斯公式计算产生模拟值的参数集的似然值,最后利用参数集的似然值来构建模型参数的后验分布^[42-43]。在 DSSAT-GLUE 程序中通过两轮 GLUE 过程实现作物遗传参数的估计,第一轮估计作物物候期参数,第二轮估计作物生长参数,主要步骤如下:①设置参数的先验分布;②从先验参数分布中随机生成参数集;③利用上述随机生成的参数集运行模型;④计算似然值;⑤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,每轮 GLUE 应至少要运行 3 000 次以上^[45]。

本研究利用冬小麦的物候期(包括开花期和成熟期)、单粒质量、最终生物量和籽粒产量作物模型输出变量和田间观测值来进行参数估计和模型验证。在参数估计时,首先设置程序运行所需的一组缺省值,然后运行 GLUE,经过 20,000 次随机搜索后获得较为可靠的一组参数组合。由于考虑到田间试验的空间和时间变异性以及基因型-环境-管理互作(Genotype×Environment×Management Interaction)的影响,故采取不同的模型参数估计-验证方案(表 4),通过各方案模拟结果的比较,以获取最优的一种方案。

表 4 CERES-Wheat 模型的不同校正-验证方案
Table 4 Different plans for calibration and verification of CERES-Wheat model

方案 Plan	模型校准数据 Data of model calibration	模型验证数据 Data of model validation
1	两年度充分灌溉处理(CK)	其他所有处理
2	2012—2013 年度所有处理	2013—2014 年度所有处理
3	2013—2014 年度所有处理	2012—2013 年度所有处理
4	两年度高水处理(I2D1-I2D4, CK)	两年度低水处理(I1D1-I1D4)
5	两年度低水处理(I1D1-I1D4)	两年度高水处理(I2D1-I2D4, CK)

交叉验证(cross validation, CV),有时亦称循环估计,是一种统计学上将数据样本切割成较小子集的方法^[46-48]。交叉验证可分为 Hold-Out 法、k-重交叉验证法和留一交叉验证法(leave-one-out cross validation)。留一交叉验证算法与其他两种方法相比具有明显的优点,即泛化误差估计几乎无偏,并能排除随机因素的影响,确保验证过程可被完全重复。因此,本文采用留一交叉验证算法来检验最优模型参数估计和验证方案下, CERES-Wheat 模型的模拟精度。本研究中试验处理有 9 个,因此假设有 9 个样本,每个样本包括两年度试验数据,依次将每一个样本作为验证样本,其他 8 个样本作为训练样本。这样得到 9 种分类方式和 9 个测试结果,用这 9 个测试结果的平均值来衡量模型的性能。文中依次将表 1 中的 9 个处理依次留出,其数据作为观测值,剩余处理用来估计参数。例如,先将 IID1 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,然后用除 IID1 的其余 8 个处理数据运行 GLUE,选择经过 20 000 次随机搜索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 IID1 处理,并比较相应的模拟值和观测值,依次类推。

本研究的模型校正和验证过程都以模拟值和实测值之间的相对均方根误差(relative root mean square error,

RRMSE)和绝对相对误差(absolute relative error, ARE)来进行评价,它们能够度量模拟值与实测值的相对差异程度,同时属于无量纲统计量,可以在不同的变量之间进行比较^[43,49]。RRMSE 和 ARE 的值越小则表明模型模拟精度越高。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{ARE} = \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中:RMSE 为均方根误差;RRMSE 为相对均方根误差;ARE 为绝对相对误差; S_i 为第 i 个模拟值; O_i 为第 i 个观测值; \bar{O} 为观测值的平均值, n 为数据个数。

2 结果与分析

2.1 不同校正-验证方案所得模型参数的比较

不同模型参数估计方案所获得的参数估计值如表 5 所示。

表 5 不同模型参数估计方案下所得的冬小麦遗传参数
Table 5 Estimation results of genetic coefficients of winter wheat under different parameter estimation plans

方案 Plan	参数 Parameter						
	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
1	63.71	90.42	632.3	28.85	39.46	1.726	91.81
2	45.27	93.01	609.1	29.64	34.18	1.83	99.46
3	63.33	78.92	598.4	22.82	45.38	1.254	99.05
4	49.64	93.33	568.4	27.34	38.55	1.925	95.8
5	42.32	94.34	570.3	28.86	38.25	1.948	96.02
均值 Mean	52.85	90.00	595.70	27.50	39.16	1.74	96.43
标准差 Standard deviation	10.08	6.36	27.00	2.75	3.82	0.28	3.08
变异系数 Coefficient of variation/%	19.07	7.07	4.53	9.99	9.76	16.34	3.19

注:各参数的具体含义见表 3。

Note: Specific meaning of the parameters are shown in table 3.

比较各方案结果可知,参数 P1V(参数值范围 42.32~63.71)和 G3(参数值范围 1.254~1.948),在不同的方案下表现出较大的变异性,其变异系数(coefficient of variation)值均超过了 10%,即参数 P1V 和 G3 的值随模型参数估计方案的不同而发生较大变化。不同的参数估计方案实质上代表着不同的冬小麦生长情境(不同的灌溉处理、不同的年份),可见 P1V 和 G3 的估计值很大程度上依赖于所处的作物生长情境,即基因型-环境-管理互作会对这 2 个参数的估计值造成较大的影响。因此,如田间灌溉管理条件有较大的变化时,应该对 P1V 和 G3 这 2 个参数重新进行估计。其他参数的变异系数值均低于 10%,其中参数 PHINT 的标准差和变异系数分别为 3.08 和 3.19%,这一方面说明这些参数受基因型-环境-管理互作的影响相对较小,不同的作物生长情境下参数值较一致,另一方面也说明 DSSAT-GLUE 参数估计模块具

有较好的收敛性和可靠性。

2.2 不同方案模型校正和验证结果比较

本研究分别对 5 种模型校正和验证方案对应的开花期、成熟期、单粒质量、生物量和籽粒产量的模拟值和实测值之间的差异进行了对比分析, 据此判断各方案的模拟误差的大小并选择最优的模型校正和验证方案。为了表述简洁, 这里只给出方案 1 的具体比较结果(表 6), 其他方案只给出最终的总体比较结果(表 7)。

方案 1 的模型校正过程中, 开花期和成熟期的模拟值和实测值基本一致, ARE 值仅为 0.52% 和 0.21%。生物量和籽粒产量的模拟精度较高, 相对误差分别为 6.48% 和 4.22%, 但单粒质量模拟精度较低, ARE 大于 10%。方案 1 的模型验证过程中, 尽管开花期和成熟期的 ARE 值仅为 2.09% 和 2.20%, 但同一年度不同受旱处理冬小麦的开花期和成熟期的模拟值都相同, 而各处理实测的开花期和成熟期是不同的, 并且受旱时间越早、受旱程度越严重, 开花期和成熟期就越提前。这是因为现有的

CERES-Wheat 模型主要通过有效积温和光周期来模拟作物的物候期, 而不考虑水分的次级作用, 因此无法准确模拟由干旱胁迫所造成的冬小麦物候期差异。各处理小麦单粒质量、生物量和籽粒产量的模拟结果相对较差, 尤其是抽穗期和灌浆期受旱的处理, 这几个变量的模拟结果均不理想, ARE 均大于 20%。这可能是由于抽穗和灌浆期水分胁迫对小麦千粒质量的有较大影响, 而模型中现有的水分胁迫因子对这一影响的描述还不够充分, 没有准确量化水分胁迫与籽粒灌浆速率之间的关系。与籽粒产量不同, 生物量总体是在返青期受旱时模拟效果最差, 例如 D1 时段(越冬和返青期)受旱时 ARE 均大于 30%, 而 D2 时段(返青和拔节期)受旱时 ARE 均大于 20%。这说明拔节前受旱对模型生物量以及最终产量有很大的影响, 而模型模拟存在较大误差可能是由于模型对小麦生长前期水分胁迫敏感性的描述不够充分, 没能准确量化水分胁迫对小麦幼苗期根系和叶片生长的影响。

表 6 方案 1 条件下 CERES-Wheat 模型的校准和验证结果
Table 6 Results of calibration and verification of CERES-Wheat model with plan 1

年度 Season	处理 Treatment	开花期 Anthesis date (days after planting)			成熟期 Maturity date (days after planting)			单粒质量 Unit kernel weight/g			生物量 Biomass/(kg·hm ⁻²)			籽粒产量 Yield/(kg·hm ⁻²)			
		Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	Sim.	Obs.	ARE	
		模型校正 Model calibration	2012-2013	CK	190	192	1.04	228	228	0.00	0.040	0.036	11.11	16531	18029	8.31	8131
	2013-2014	CK	196	196	0.00	236	235	0.43	0.040	0.047	14.89	16999	16243	4.65	7874	7488	5.15
		均值 Average			0.52			0.21			13.00			6.48			4.22
		I1D1	190	184	3.26	228	222	2.70	0.040	0.034	17.65	5783	11014	47.49	3161	5079	37.76
		I1D2	190	185	2.70	228	223	2.24	0.040	0.032	25.00	7413	11309	34.45	4188	5202	19.49
		I1D3	190	188	1.06	228	224	1.79	0.030	0.027	11.11	8795	12110	27.37	5136	5626	8.71
	2012-2013	I1D4	190	188	1.06	228	225	1.33	0.024	0.027	11.11	9942	11719	15.16	4876	5316	8.28
		I2D1	190	184	3.26	228	223	2.24	0.040	0.037	8.11	5784	12159	52.43	3161	5755	45.07
		I2D2	190	187	1.60	228	224	1.79	0.040	0.035	14.29	7376	13401	44.96	4107	6682	38.54
		I2D3	190	189	0.53	228	225	1.33	0.029	0.028	3.57	9486	13065	27.39	5443	6460	15.74
		I2D4	190	190	0.00	228	226	0.88	0.034	0.028	21.43	13287	12756	4.16	7411	6323	17.21
模型验证 Model validation		I1D1	196	188	4.26	236	229	3.06	0.040	0.043	6.98	2664	6432	58.58	1433	2927	51.04
		I1D2	196	189	3.70	236	229	3.06	0.039	0.043	9.30	7486	9129	18.00	2931	4375	33.01
		I1D3	196	191	2.62	236	229	3.06	0.040	0.044	9.09	8364	10011	16.45	5259	4440	18.45
	2013-2014	I1D4	196	192	2.08	236	230	2.61	0.022	0.044	50.00	8848	9264	4.49	4290	4168	2.93
		I2D1	196	190	3.16	236	230	2.61	0.040	0.046	13.04	2664	7438	64.18	1433	3503	59.09
		I2D2	196	192	2.08	236	231	2.16	0.040	0.046	13.04	10510	12684	17.14	4132	5243	21.19
		I2D3	196	194	1.03	236	231	2.16	0.040	0.048	16.67	11837	12130	2.42	6776	4884	38.74
		I2D4	196	194	1.03	236	231	2.16	0.026	0.045	42.22	12480	11066	12.78	5983	4733	26.41
		均值 Average			2.09			2.20			17.04			27.97			27.60

注: ARE 为绝对相对误差, %; Sim. 和 Obs. 分别为模拟值和观测值。

Note: ARE is absolute relative error, %. Sim. and Obs. represent the simulated and observed values.

类似地, 其他方案模型校正和验证过程中也依次计算上述输出变量的总体平均 ARE 和 RRMSE 值(表 7)。比较各方案可知, 无论模型校正还是验证过程, 方案 1 的总体平均 ARE 和 RRMSE 均最小, 其模型校正过程中 ARE 和 RRMSE 只有 5% 左右, 而模型验证过程中 ARE

和 RRMSE 均大于 15%。这是因为模型验证过程中包含存在水分胁迫的处理, 尤其是幼苗期水分胁迫的处理, 这使得总体平均模拟精度大大降低。这表明使用充分灌溉条件下的处理进行模型校正可以获得相对较高的模拟精度, 但用来模拟水分胁迫条件下小麦生长时会产生一

定的误差。其他方案, 由于模型校正和验证过程中均包含存在不同程度水分胁迫的处理, 因此 ARE 和 RRMSE 值均大于 10%。其中方案 5 的模型校正结果误差最大, 这是因为用于模型校正的处理均为低水处理, 再一次表明 CERES-Wheat 模型模拟水分胁迫条件下的小麦生长的精度较低。方案 3 的模型验证结果误差最大, 这是因为 2012-2013 和 2013-2014 两年度试验中初始土壤水分条件有所不同而造成的。总体而言, 方案 1 可视为最理想的模型校正和验证方案。

表 7 不同模型参数估计-验证方案模拟精度比较

Table 7 Comparison of simulation accuracies of different plans of model calibration and verification

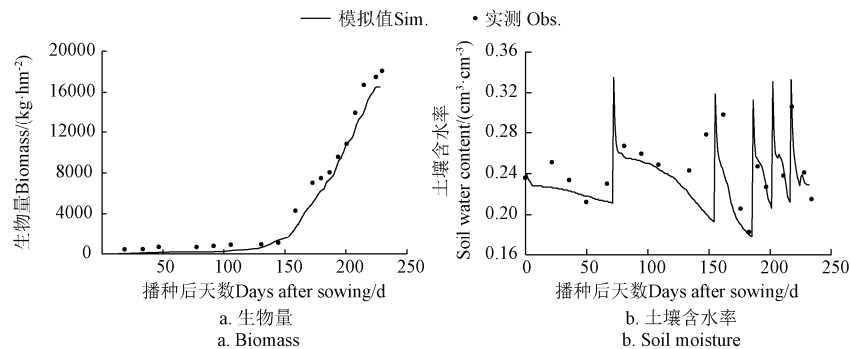
方案 Plan	模型校准 Model calibration		模型验证 Model validation	
	ARE/%	RRMSE/%	ARE/%	RRMSE/%
Plan1	4.89	5.18	15.38	17.88
Plan2	15.12	16.52	17.2	17.89
Plan3	13.33	14.48	20.05	21.77
Plan4	14.88	17.07	16.21	18.92
Plan5	16.23	18.66	15.51	18.16

注: ARE 和 RRMSE 分别为绝对相对误差和相对均方根误差, 下同。
Note: ARE and RRMSE represent the absolute relative error and relative root mean square error, the same as below.

2.3 方案 1 下动态变量模拟结果比较

为了进一步研讨为什么不同模型校正-验证方案的模拟精度会有较大差异, 本研究对各方案一些重要的动态变量模拟结果进行了比较。由于方案 1 的模拟精度较高, 因此仅以方案 1 为例, 利用该方案模型校正过程所得的遗传参数以及 2012-2013 年度的相关数据来运行 CERES-Wheat 模型, 并对冬小麦生物量和土壤水分的动态变化过程进行比较分析(图 3-5)。由于小麦根系主要分布在土壤表面以下 80 cm 土层, 其中 0~40 cm 土层根量多, 根长密度大^[50]。因此为了表述简洁, 本研究只选取 20~40 cm 土层的土壤水分进行分析。

在充分灌水条件下, 冬小麦生物量和土壤水分的动态模拟结果均是最好的(图 3), 生物量模拟值和观测值之间的 R^2 和 RMSE 分别为 0.98 和 1144 kg/hm², 20~40 cm 土层土壤水分模拟值和观测值之间的 R^2 和 RMSE 分别为 0.42 和 0.03 cm³/cm³, 生物量的模拟精度高于土壤水分(图 3a); 但土壤水分模拟的总体趋势基本正确, 大多数观测值与模拟值相吻合(图 3b)。因此, CERES-Wheat 模型可以较好地模拟水分充足条件下冬小麦生物量和土壤水分的动态变化过程。



注: Sim.和 Obs.分别为模拟值和观测值, 下同。
Note: Sim. And Obs. represent the simulated and observed values, the same below.

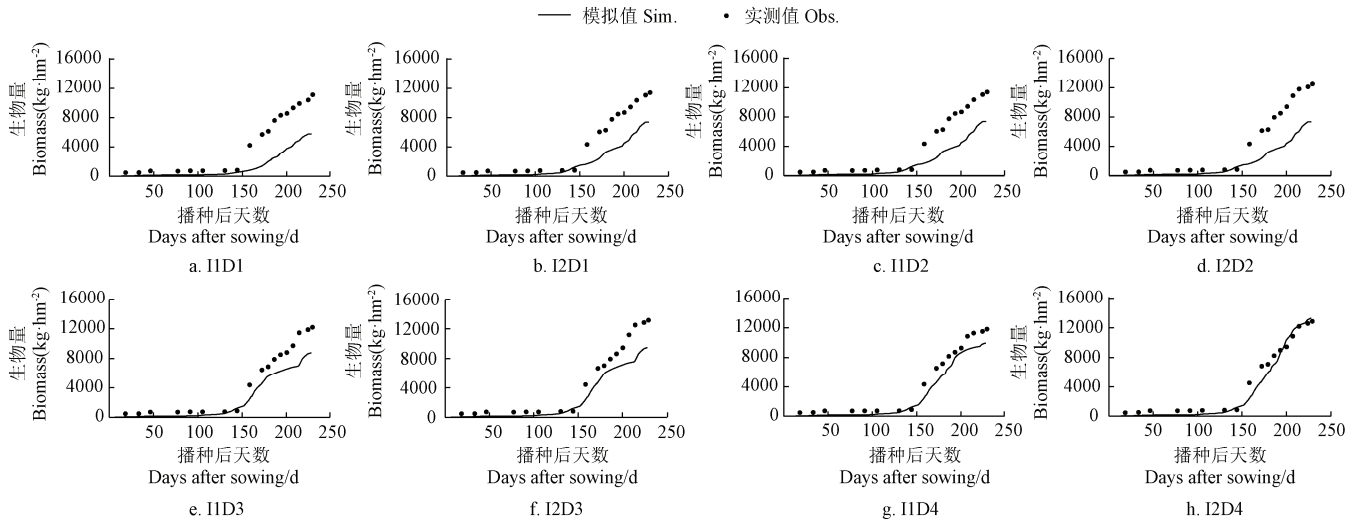
图 3 2012-2013 年度充分灌溉条件下冬小麦生物量和 20~40 cm 土层土壤水分的动态变化过程模拟

Fig.3 Dynamic changes of biomass and soil moisture (20-40 cm) for winter wheat growth under sufficient irrigation in 2012-2013 season

然而在不同时段受旱时, 模型对生物量和土壤水分的动态模拟有很大的不同(图 4 和 5)。由图 4 可以看出, 无论低灌溉水平(I1)还是高灌溉水平(I2), 如果小麦生育前期受旱(D1 和 D2 时段), 则拔节后生物量的模拟均出现较大的误差, 模拟值远低于观测值(图 4a~4d)。这说明 CERES-Wheat 模型高估了返青期水分胁迫对冬小麦生长的抑制作用。随着受旱时间的推迟, 模型对生物量的模拟效果逐渐改善, 如果在抽穗期和灌浆期受旱时(D4), 模拟值与观测值基本能够吻合结果(图 4g~4h), 表明 CERES-Wheat 模型能够准确模拟生长阶段后期水分胁迫对冬小麦生长的影响。

土壤水分(20~40 cm 土层)的动态模拟结果表明土

壤水分胁迫程度越严重, 则土壤水分的模拟误差越大, 灌溉水平 I1 下的土壤水分模拟(图 5a, 5c, 5e, 5g)精度均低于灌溉水平 I2(图 5b, 5d, 5f, 5h)。在同一种灌溉水平 I1 下, 若水分胁迫发生在小麦生长早期, 则土壤水分模拟值低于观测值, 即模型低估了此阶段的土壤水分含量, 或者高估了水分胁迫程度, 这可能是造成生物量模拟误差较大的重要原因之一(图 4a~4d)。但随着水分胁迫发生时间向后推移, 土壤水分的模拟精度逐步提高, 在抽穗期和灌浆期受旱时(D4)土壤水分观测值与模拟值趋势基本吻合, 大多数观测值均落在模拟值曲线上(图 5g), 进一步表明 CERES-Wheat 模型能够准确模拟生长阶段后期水分胁迫对冬小麦生境系统内土壤水分的影响。



注: I1、I2、D1、D2、D3、D4 分别为 40mm 灌水定额、80mm 灌水定额、越冬+返青时段受旱、返青+拔节时段受旱、拔节+抽穗时段受旱、抽穗+灌浆时段受旱。下同。

Note: I1, I2, D1, D2, D3, D4 represent irrigation quota of 40mm, irrigation quota of 80mm, drought in wintering and greening growth stages, drought in greening and jointing growth stages, drought in jointing and heading growth stages, drought in heading and grain filling growth stages. The same as below.

图 4 2012 - 2013 年度不同阶段受旱条件下冬小麦生物量的动态模拟

Fig.4 Dynamic changes of biomass for winter wheat in different conditions of water stresses in 2012 - 2013 season

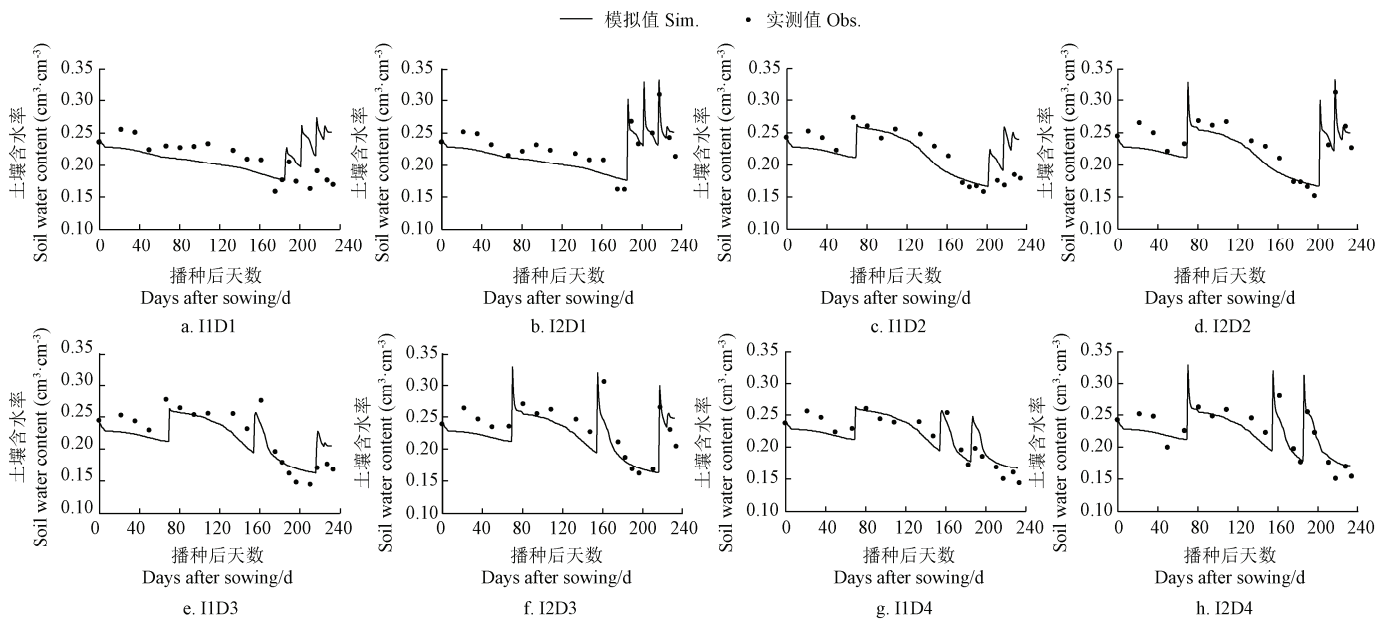


图 5 2012 - 2013 年分段受旱条件下冬小麦土壤水分的动态模拟 (20~40 cm)

Fig.5 Dynamic changes of soil moisture for winter wheat in different drought conditions in 2012 - 2013(depth: 20~40 cm)

2.4 基于留一交叉验证法的模型预测精度分析

在同一灌溉水平 (I1 或 I2) 下, 模型校正的 ARE 和 RRMSE 值基本呈现随方案序号 *i* 的增大而增大的趋势 (表 8), 这是因为早期受旱处理依次参与参数估计过程, 致使模型校正精度降低; 而验证过程中, 模型验证的 ARE 和 RRMSE 值基本随序号 *i* 的增大而减小 (表 8), 这是因为晚期受旱处理依次参与模型的验证过程, 致使模型验证精度提高。这进一步证明 CERES-Wheat 模型对冬小麦生长阶段后期水分胁迫的模拟优于前期水分胁迫, 且受旱胁迫越严重、受旱时段越早, 模型的

模拟误差越大。当利用足肥足水的 CK 处理来进行模型验证, 其他处理进行模型校正时, 此时的模型验证误差最小, ARE 和 RRMSE 值分别为 6.31% 和 7.91%, 均低于 10%。这进一步表明 CERES-Wheat 模型可以较为准确地模拟水分充足条件下的冬小麦生长和产量形成。总体而言, 利用基于留一交叉验证法的模型校正的平均 ARE 和 RRMSE 分别为 15.91% 和 18.03%, 模型验证的平均 ARE 和 RRMSE 分别为 15.24% 和 16.54%, 即 CERES-Wheat 模型在本研究中的总体平均模拟误差应在 15%~18% 左右。

表 8 基于留一交叉验证法法的 CERES-Wheat 模型预测精度分析
Table 8 Prediction accuracies of CERES-Wheat model based on leave-one-out cross validation method

方案 Plan	模型校准 Model calibration				模型验证 Model validation			
	参数估计数据				参数估计数据			
	Data of parameter estimation				Data of parameter estimation			
		ARE/%	RRMSE/%		ARE/%	RRMSE/%		
1	I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	14.01	16.51	I1D1	25.75	25.45		
2	I1D1, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	15.34	17.66	I1D2	15.98	16.46		
3	I1D1, I1D2, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	16.01	18.07	I1D3	10.43	12.44		
4	I1D1, I1D2, I1D3, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4, CK	19.70	21.09	I1D4	11.42	15.60		
5	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D2, I2D3, I2D4, CK	14.21	16.49	I2D1	25.81	25.49		
6	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D3, I2D4, CK	15.16	17.20	I2D2	17.60	19.06		
7	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D4, CK	16.06	18.13	I2D3	12.84	14.91		
8	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, CK	15.91	17.80	I2D4	11.02	11.53		
9	I1D1, I1D2, I1D3, I1D4, I2D1, I2D2, I2D3, I2D4	16.75	19.33	CK	6.31	7.91		
Average		15.91	18.03		15.24	16.54		

3 讨论

3.1 不同模型校正-验证方案的比较

不同的作物品种具有不同的品种特征参数,在模型运行过程中,品种参数的选取直接影响到模型模拟的效果,因而作物品种参数的确定对作物模型的应用起着重要作用^[51]。一般情况下,作物品种参数是无法直接获取的,需要采用简洁逆推的方式进行估计,常用的参数估计方法有“试错法”、“遗传算法”、“模拟退火算法”、“generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE)”法等^[41,52-54]。其中 GLUE 方法已经被做成 DSSAT 模型内置参数估计工具,可供用户直接使用^[43,55]。

本研究使用的 DSSAT-GLUE 来估计分段受旱条件下冬小麦的遗传参数,共采用了 5 种不同的模型校正-验证方案(表 4),它们实质上代表着不同的冬小麦生长水分环境,共获得 5 组不同的冬小麦遗传参数值。通过所估计参数值的对比分析,发现参数 P1V 和 G3 随着方案的不同,表现出较大的变异性(CV>15%),这表明校正的参数随冬小麦生境系统水分胁迫状况的不同而不同,受基因型-环境互作(genotype×environment interaction)的影响较大。参数 P1V 代表的是最适温度条件下通过春化阶段所需天数(表 3),而小麦的春化过程除了需要一定时间的低温外,还需要适量的水分、充足的氧气和作为呼吸底物的营养物质。试验表明,将已萌动的小麦种子失水干燥,当其含水率低于 40%时,用低温处理种子也不能使其通过春化^[56]。参数 G3 代表的是成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量,那么存在水分胁迫时,其数值自然就会有较大的不同。因此,在参数校正时可以进行两轮参数估计和验证,即第一轮可先利用足肥足水的处理估计参数,然后将 P1V 和 G3 这 2 个参数固定于估计值,最后第二轮再利用其他处理的数据来重新估计其他参数,并对模型进行相应的验证。同时,其它参数表现出较强的一致性,5 种不同模型校正方案下,其变异系数均小于 10%,这说明这些参数受基因型-环境互作的影响相对较小,同时也能看出 DSSAT-GLUE 调参工具具有很好的收敛性和可靠性。

通过对比不同模型校正-验证方案对应的输出变量模型模拟值和田间观测值之间的差异,方案 1(即利用两年度充分灌溉处理 CK 的数据来估计模型参数,用其他处理的数据来进行模型验证)所获得模型模拟精度是最高的,这也进一步证明了 Boote^[33]推荐的利用足水足肥处理数据进行模型校正方法的正确性,其他方案的模拟精度则相对较差。因此,如果在旱区使用 CERES-Wheat 模型,建议采用充分灌溉或者水分亏缺发生在作物生长后期的处理来进行模型校正,而尽量避免使用水分胁迫较为严重的处理。

3.2 CERES-Wheat 模型模拟受旱条件下冬小麦生境过程的适用性评价

本研究的结果表明, CERES-Wheat 模型可以模拟正常充分灌水条件下小麦的生长发育和产量形成过程,并具有较高的模拟精度,这与以往研究结果类似^[14,57-59]。但在不同生长阶段受旱时,小麦的物候期、单粒质量、成熟时生物量和籽粒产量的模拟精度会随着冬小麦受旱阶段的不同而不同(表 6)。如果水分胁迫发生在生长阶段前期,如在 D1 和 D2 时段受旱,则模型模拟精度较低,模型对物候期和单粒质量估计过高,但同时低估了成熟时生物量和籽粒产量。进一步比较方案 1 下各处理的动态变量,包括生物量和 20~40 cm 土壤水分含量,可以发现如果土壤水分胁迫发生在冬小麦生产前期,则模型同时低估了营养生长阶段的生物量和土壤水分含量(图 5),而模拟的土壤水分含量较低则意味着高估了水分胁迫的程度,这可能是生物量被低估的原因之一。如果土壤水分胁迫发生在冬小麦生长后期,如在 D3 和 D4 时段受旱,则模型模拟精度相对较高,但还是存在一定的误差。例如,2013—2014 年度 D4 时段(抽穗和灌浆)受旱时,两个灌溉水平 I1 和 I2 下,模型均严重低估了小麦的单粒质量(ARE>40%)。这可能是由于模型计算的水分胁迫指数过高,对小麦灌溉过程的影响过大引起的。总体而言, CERES-Wheat 模型对冬小麦生长后期发生的水分胁迫模拟优于前期发生的水分胁迫。

造成这种模拟误差的原因可能是多样的。Nouna 等^[60]分析了在水分胁迫下 CERES-Wheat 模型模拟精度较低

可能原因。首先, 他们认为模型对整个生育期的叶面积指数模拟可能不够充分; 其次, 模型计算的水分胁迫指数并没有考虑到试验的具体情况; 上述两种原因的共同作用可能引起了上述的模拟误差。Dejonge 等^[61]认为要改进 CERES 模型模拟水分胁迫条件下的作物生长过程, 应从提高蒸发蒸腾量 ET 的模拟精度入手, 因为模型水分胁迫指数的计算是直接和 ET 值相关的。在没有水分胁迫条件下, 模型中的 ET 都是用参考蒸散量 ET_0 和一个静态作物系数来计算的, 但在水分胁迫条件下的 ET 计算则研究较少。因此他们提出在计算 ET 时应该采用一个动态的作物系数, 这可以提高模型对 ET 的估计, 从而提高模拟精度。

此外, 适度的水分胁迫对幼苗期小麦的根系生长有一定促进作用, 可以增加根冠比, 但重度水分胁迫会抑制根系的生长, 导致根系活力下降^[62-63]。由于试验在越冬期和返青期连续受旱, 水分胁迫程度严重, 极大阻碍了小麦根系的正常生长。但模型的水分胁迫因子是从根系吸水的角度来计算的, 并没有考虑幼苗期轻度水分胁迫对小麦根系的促进作用, 也没有考虑受旱程度较重时对小麦根系的抑制作用。因此, 如果能在该模型中添加一个额外的水分胁迫因子, 来描述小麦幼苗期水分胁迫和根系生长之间的关系, 模型模拟前期水分胁迫下小麦生长的精度可能会有所提高。

开花期和成熟期的模拟结果相对较好, 相对误差均小于 5%, 但是模型模拟的开花期和成熟期都是一样的, 无法反应不同水分胁迫条件对冬小麦物候期的影响。这主要是因为 CERES-Wheat 模型在模拟冬小麦物候期时主要考虑的是温度和光周期等环境因子的影响, 但没有考虑水分胁迫的次级作用^[64]。此外, Travasso 和 Delecolle^[22]还认为 CERES-Wheat 模型在模拟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。因此, CERES-Wheat 模型在模拟分段受旱条件下的冬小麦物候期时还存在一定的缺陷。

交叉验证法需要将参数估计的过程进行多次重复, 这意味着参数估计的方法不变, 只是改变了估计数据, 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^[65]。在本研究中, 利用两年度 9 个不同的冬小麦水分胁迫处理, 通过留一交叉验证法对 CERES-Wheat 模型的预测精度进行了分析, 结果再次表明, 当水分胁迫严重的处理参与模型校正过程时, 模型模拟精度就会随之降低, 即水分胁迫发生在生长前期时, 该模型模拟小麦的生长和产量的精度较低, 这与 Thorp 等^[32]的研究基本一致。基于交叉验证法的计算结果, 可知当利用 CERES-Wheat 模型模拟本研究中设置的不同水分胁迫下冬小麦生长过程时, 模型模拟的总体平均 ARE 和 RRMSE 值在 15%~18% 左右, 这比以往足肥足水试验的模拟精度要低^[66]。总之, 如果试验中小麦生长前期存在严重的水分胁迫, 那么 CERES-Wheat 模型模拟就可能有一定的误差, 应谨慎分析模型模拟结果。

综上所述, CERES-Wheat 模型在模拟水分胁迫条件下的冬小麦还存在一定的局限性, 在下一步研究中, 将

对模型的物候期估算方法进行改进, 引入水分胁迫的次级影响, 另外在苗期也加入水分胁迫因子, 以增强其在干旱和半干旱地区的适用性。

4 结 论

本研究利用 2012—2013 和 2013—2014 两年度的遮雨棚下进行的冬小麦田间试验数据, 通过 5 种不同的方案校准和验证了 CERES-Wheat 模型, 根据研究结果可得出以下主要结论:

1) 遗传参数 PIV (最适温度条件下通过春化阶段所需天数) 和 G3 (成熟期非水分胁迫下单株茎穗标准干质量) 的估计值具有较大的变异性, 受基因型-环境互作的影响较大, 因此如果将模型应用于水分环境变化较大的模拟情境时, 这两个参数应重新进行估计, 否则会引起较大的模型模拟误差。DSSAT-GLUE 调参工具表现出很好的收敛性和可靠性。

2) 利用充分灌水处理数据进行模型校准和验证时, 所得的 ARE 和 RRMSE 均最小, 模型模拟具有较高的精度, 而其他方案的模拟精度均较低。若冬小麦在拔节期后受旱时, CERES-Wheat 模型可以较好地模拟小麦的生长发育过程和土壤水分的动态变化, 但越冬期和返青期受旱时, 模型的模拟精度较差。受旱时段和受旱程度对模型的模拟精度都有很大的影响, 随着受旱时段提前和受旱程度的加重, 模拟的精度将越低。总体而言, CERES-Wheat 模型对冬小麦生长后期发生的水分胁迫模拟优于前期发生的水分胁迫。

3) 模型无法准确模拟由于水分胁迫所造成的冬小麦物候期的变化, 这是因为现有的 CERES 系列模型在模拟物候期时一般只考虑温度和光周期这两个环境因子, 而忽略了水分因子的次级影响。

4) 根据留一交叉验证法的计算结果, 利用 CERES-Wheat 模型模拟本研究中所设置的不同水分亏缺条件下冬小麦的生长过程, 其模拟总体平均误差约在 15%~18%, 低于水分和肥料充足时的冬小麦生长过程模拟精度。

总之, CERES-Wheat 模型模拟水分胁迫条件下的小麦生长发育和产量形成过程还存在一定的缺陷, 为了提高 CERES-Wheat 模型在干旱和半干旱地区的模拟精度, 就必须对该模型进行相应改进。应进一步通过试验研究, 来深入理解并量化幼苗期水分胁迫对冬小麦生长发育, 尤其是根系的影响, 设定合理的水分胁迫因子来描述其中的影响机制。同时, 还应该将水分胁迫对冬小麦物候期的影响考虑在内, 制定新的物候期估计算法。

[参 考 文 献]

- [1] 孙晓辉. 小麦高产创建问题及技术对策[J]. 中国农业信息, 2015(1): 33.
- [2] 雷廷武, 邵明安, 杨培岭. 我国干旱半干旱地区农业可持续发展战略探讨[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 1-5.
Lei Tingwu, Shao Mingan, Yang Peiling. On the strategies of sustainable agricultural development in the arid and semi-arid areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(4): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24—27.
Cai Huanjie, Kang Shaozhong, Zhang Zhenhua, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(3): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘海龙, 诸叶平, 李世娟, 等. DSSAT 作物系统模型的发展与应用[J]. 农业网络信息, 2012(11): 5—12.
Liu Hailong, Zhu Yeping, Li Shijuan, et al. Development and application of DSSAT cropping system model[J]. Agriculture Network Information, 2012(11): 5—12. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 750—758. (in Chinese with English abstract)
- [6] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307—312.
Luo Yi, Guo Wei. Development and problems of crop models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 307—312. (in Chinese with English abstract)
- [7] 曹宏鑫, 赵锁芳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520—3528.
Cao Hongxin, Zhao Suolao, Ge Daokuo, et al. Discussion on development of crop models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3520—3528. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
- [9] Jamieson P, Porter J, Goudriaan J, et al. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought[J]. Field Crops Research, 1998, 55(1): 23—44.
- [10] Porter J, Jamieson P, Wilson D. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth[J]. Field Crops Research, 1993, 33(1): 131—157.
- [11] Bannayan M, Mansoori H, Rezaei E E. Estimating climate change, CO₂ and technology development effects on wheat yield in northeast Iran[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(3): 395—405.
- [12] He Jianqiang, Cai Huanjie, Bai Jiangping. 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.
- [13] Dettori M, Cesaraccio C, Motroni A, et al. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy[J]. Field Crops Research, 2011, 120(1): 179—188.
- [14] Thorp K R, Hunsaker D J, French A N, et al. Evaluation of the CSM-CROPSIM-CERES-Wheat model as a tool for crop water management[J]. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2010, 53(1): 87.
- [15] Palosuo T, Kersebaum K C, Angulo C, et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(3): 103—114
- [16] Yang Yonghui, Watanabe M, Zhang Xiying, et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1): 25—44.
- [17] 袁静, 许吟隆. 基于 CERES 模型的临沂小麦生产的适应措施研究[J]. 中国农业气象, 2008, 29(3): 251—255.
Yuan Jing, Xu Yinlong. Study on adaptation measures of wheat production in Linyi of Shandong province based on CERES crop model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(3): 251—255. (in Chinese with English abstract)
- [18] Eitzinger J, Trnka M, Hösch J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions[J]. Ecological Modelling, 2004, 171(3): 223—246.
- [19] Ouda S, El-Marsafawy S, El-Kholy M, et al. Simulating the effect of water stress and different sowing dates on wheat production in South Delta[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2005, 1(3): 268—276.
- [20] Biernath C, Gayler S, Bittner S, et al. Evaluating the ability of four crop models to predict different environmental impacts on spring wheat grown in open-top chambers[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(2): 71—82.
- [21] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Evaluating strategies for improved water use in spring wheat with CERES[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(3): 249—258.
- [22] 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.
- [23] Toure A, Major D, Lindwall C. Comparison of five wheat simulation models in southern Alberta[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(1): 61—68.
- [24] 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.
- [25] 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 (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2011, 54(2): 481—492.
- [26] 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.
- [27] Tremblay M, Wallach D. Comparison of parameter estimation methods for crop models[J]. Agronomie, 2004, 24(6/7): 351—365.
- [28] Bakhsh A, Kanwar R, Jaynes D, et al. Simulating effects of variable nitrogen application rates on corn yields and NO₃-N losses in subsurface drain water[J]. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2001, 44(2): 269—276.
- [29] Mavromatis T. Pre-season prediction of regional rainfed wheat yield in Northern Greece with CERES-Wheat[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(3/4): 653—665.
- [30] Bakhsh A, Bashir I, Farid H U, et al. Using CERES-Wheat model to simulate grain yield production function for faisalabad, pakistan, conditions[J]. Experimental Agriculture, 2013, 49(3): 461—475.
- [31] Ji Jianmei, Cai Huanjie, He Jianqiang, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144(0): 1—10.
- [32] Thorp K R, Batchelor W D, Paz J O, et al. Using cross-validation to evaluate CERES-Maize yield simulations within a decision support system for precision agriculture[J]. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2007, 50(4): 1467.
- [33] Boote, K J. Concepts for Calibrating Crop Growth Models //

- G. Hoogenboom, P.W. Wilkens and G.Y. Tsuji (Editors), DSSAT Version 3. A Decision Support system for Agrotechnology Transfer. Vol. 4[M]. Honolulu: University of Hawaii, 1999: 179–200.
- [34] Jiang Zhiwei, Wu Xueping, Hua Luo, et al. Long-term quantitative simulation and evaluation of potential productivity of winter wheat in Mengjin, Luoyang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 984–991.
- [35] Ritchie J T. Soil Water Balance and Plant Water Stress[M] // Tsuji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K (Editors), Understanding Options for Agricultural Production. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1998: 41–54.
- [36] Ritchie J T. A User-Orientated Model of the Soil Water Balance in Wheat. In: W. Day and R.K. Atkin (Editors), Wheat Growth and Modelling[M]. NATO ASI Science. Springer US, 1985, pp. 293–305.
- [37] 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.
- [38] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAQ Irrigation and Drainage Paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [39] 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. (Editors). 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.
- [40] 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.
- [41] Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279–298.
- [42] 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 (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2009, 52(6): 1907–1921.
- [43] 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.
- [44] 邓义祥, 郑丙辉, 苏一兵, 等. 似然度函数对 GLUE 方法的影响[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 44–48.
Deng Yixiang, Zheng Binghui, Su Yibing, et al. Effects of likelihood functions on the results of GLUE method[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(2): 44–48. (in Chinese with English abstract)
- [45] He J. Best Management Practice Development With the CERES-Maize Model for Sweet Corn Production in North Florida[D]. University of Florida, 2008.
- [46] Efron B, Tibshirani R J. An introduction to the bootstrap[M]. CRC press, 1994.
- [47] Efron B, Gong G. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation[J]. The American Statistician, 1983, 37(1): 36–48.
- [48] Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995, 14(2): 1137–1145.
- [49] Xiong W, Holman I, Conway D, et al. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies[J]. Ecological Modelling, 2008, 213(3): 365–380.
- [50] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布, 产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27–32.
Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 27–32. (in Chinese with English abstract)
- [51] 张艳红, 马永良, 廖树华. CERES-maize 模拟模型中品种参数优化方法研究[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(4): 24–29.
Zhang Yanhong, Ma Yongliang, Liao Shuhua. Method of optimizing maize variety parameters in the CERES-Maize simulation model[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(4): 24–29. (in Chinese with English abstract)
- [52] Dai Chunni, Yao Meng, Xie Zhujie, et al. Parameter optimization for growth model of greenhouse crop using genetic algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(1): 13–19.
- [53] Ferreyra R A. A faster algorithm for crop model parameterization by inverse modeling: simulated annealing with data reuse[J]. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2004, 47(5): 1793–1801.
- [54] 金之庆, 石春林. 江淮平原小麦渍害预警系统(WWWS)[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1458–1465.
Jin Zhiqing, Shi Chunling. An early warning system to predict waterlogging injuries for winter wheat in the Yangtze-Huai Plain (WWWS)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(10): 1458–1465. (in Chinese with English abstract)
- [55] 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 (Editors). Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 2011: 365–394.
- [56] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 334–335.
- [57] Dettori M, Cesaraccio C, Motroni A, et al. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy[J]. Field Crops Research, 2011, 120(1): 179–188.
- [58] Langensiepen M, Hanus H, Schoop P, et al. Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions[J]. Agricultural Systems, 2008, 97(1/2): 34–47.
- [59] Pecetti L, Hollington P. Application of the CERES-Wheat simulation model to durum wheat in two diverse Mediterranean environments[J]. European Journal of Agronomy, 1997, 6(1): 125–139.
- [60] Nouna B B, Katerji N, Mastrorilli M. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modelling of leaf area and water stress functions[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 115–123.
- [61] 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(0): 92–103.
- [62] 梁银丽, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J]. 西北植物学报, 1995, 15(1): 21–25.

- Liang Yinli, Chen Peiyuan. Effects of water stress and nitrogen nutrition on root and seedling growth and water use efficiency of wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1995, 15(1): 21–25. (in Chinese with English abstract)
- [63] 孙存华, 白嵩, 白宝璋, 等. 水分胁迫对小麦幼苗根系生长和生理状态的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2004, 25(5): 485–489.
- Sun Cunhua, Bai Song, Bai Baozhang, et al. Effect of water stress on root growth and physiological characters of wheat seedlings[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2004, 25(5): 485–489. (in Chinese with English abstract)
- [64] McMaster G S, White J W, Weiss A, et al. Simulating Crop Phenological Responses to Water Deficits. In: L.R. Ahuja, V.R. Reddy, S.A. Saseendran and Q. Yu (Editors), *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*[M]. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA, 2008: 277–300.
- [65] Wallach, D. Evaluating crop models[M]//Wallach D, Makowski D, Jones J W (Editors). *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier B.V., 2006: 11–53.
- [66] Singh A K, Tripathy R, Chopra U K. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 776–786.

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

Yao Ning^{1,2}, Zhou Yuangang^{1,2}, Song Libing^{1,2}, Liu Jian^{1,2}, Li Yi^{1,2}, Wu Shufang^{1,2}, Feng Hao^{2,3}, He Jianqiang^{1,2*}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

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

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

Abstract: Crop growth simulation models are useful tools to help us understand and regulate the agro-ecological systems in arid areas. In this study, the CERES-Wheat, a wheat growth simulation model in the DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer) software, was investigated for its ability to simulate the growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid areas and to find the optimal plan for the estimation of genetic parameters and the model verification. Field experiments were conducted under a rainout shelter for winter wheat growing under water stresses at different growth stages in 2 growth seasons (from October 2012 to June 2013 and from October 2013 to June 2014). The whole growth season of wheat was divided into 5 growing stages (wintering, greening, jointing, heading and grain filling). Water stress occurred every 2 continuous stages while irrigations were applied at other stages, which resulted in 4 different levels of water stress period (D1–D4). Two irrigation levels of 40 mm (I1) and 80 mm (I2) were applied. There were a total of 8 treatments, with 3 replicates for each, and the split-plot experiment was designed. An extra control treatment with irrigation in all 5 stages was arranged near. The experimental data were used to run the model. A total of 5 different plans for model calibration and verification were designed and the DSSAT-GLUE, a program package for parameter estimation in DSSAT, was used to estimate the relevant genetic coefficients. Then the 5 plans were compared for the discrepancies between corresponding simulated and observed values of phenological phase, single grain weight, biomass, yield and soil moisture so as to determine the accuracy of CERES-Wheat model to simulate the agro-ecological processes of winter wheat farming system in arid areas. The results showed that 2 genetic coefficients P1V (days required to complete vernalization at optimum vernalizing temperature) and G3 (standard dry weight of a single tiller without stress at maturity) varied remarkably under different scenarios of water stress. The coefficients of variation were 19.07% and 16.34%, respectively. It suggested that the values of these 2 parameters were influenced heavily by genotype-environment interactions. The rest of parameters were relatively independent of water stress scenarios since the coefficients of variation were all less than 10%. The DSSAT-GLUE package was proved to have good convergence since the estimated values of most genetic coefficients converged into narrow ranges. For output variables, the different plans of model calibration and verification showed great discrepancy. Plan 1 (model calibration used the data from the CK treatments with sufficient irrigation and model verification used the data from the rest of treatments in the 2 growth seasons) was proved to be the optimal one since its absolute relative error (ARE) and relative root mean squared error (RRMSE) for model calibration were the lowest, only 4.89% and 5.18%, respectively. When water stresses occurred during the heading and grain-filling stages, CERES-Wheat model was able to correctly simulate the dynamic changes in growth and development of wheat as well as the soil moisture content. However, when water stresses occurred during the wintering and greening stages, there were relatively large simulation errors. When water stress occurred earlier and severer, the simulation accuracy was lower. In addition, CERES-Wheat model could not correctly simulate the phenological discrepancies caused by different water stress scenarios because current algorithm for phenology estimation was only based on temperature and photoperiod but neglecting the secondary effects by water stress. Thus an improvement on current phenology algorithm of winter wheat was needed. The results of leave-one-out cross validation showed that the overall error was about 15%–18% for CERES-Wheat model to simulate winter wheat growth and yield under different scenarios of water stress designed in this study. In general, there were some limitations for CERES-Wheat model to simulate winter wheat growth under arid conditions. It was necessary to research into the mechanism and simulation method of winter growth responding to water stresses in early vegetative stage, if CERES-Wheat was expected to be applied more widely in the management and research of winter wheat production in arid and semi-arid areas in China.

Key words: models; crops; moisture; winter wheat; DSSAT; CERES-Wheat