DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.05.009
文献引用：李思琪，王俊洁，孟明雪，等．三江平原白浆土区雨养玉米AquaCrop模型模拟研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（5）：74-80. LI S Q，WANG J J，MENG M X. AquaCrop modelling rainfed maize development in Baijiang soil of the Sanjiang Plain[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（5）：74-80.

三江平原白浆土区雨养玉米AquaCrop模型模拟研究*

李思琪，王俊洁，孟明雪，王子康，孟子惟，王一帆，蒲　晓**

（首都师范大学资源环境与旅游学院，水资源安全北京实验室，北京　100048）

摘要：本研究评价AquaCrop模型对三江平原白浆土区雨养玉米生长过程模拟和产量估算的适用性，在模型参数率定和校准的基础上与其他气候区研究进行对比。结果表明，AquaCrop模型很好地模拟了三江平原白浆土区雨养玉米农田土壤含水量、雨养玉米生物量和产量。土壤含水量、雨养玉米生物量、雨养玉米产量观测值和模拟值的均方根误差范围分别为0.80%~1.02%、0.372~0.995 t/hm^2、0.563~1.040 t/hm^2，其一致性指数范围分别为0.878 9~0.990 7、0.992 7~0.998 9、0.982 4~0.988 9。不同气候区的玉米AquaCrop模型参数率定存在异同，其中冠层生长指数和冠层蒸腾作物系数的率定值存在明显差异，而归一化水分生产力、冠层衰减系数、最大冠层盖度和收获指数等参数的率定值差异较小。在模型使用时，如遇播种时间明显提前，适当延长最大冠层参数对应时间可有效调整提前播种产生的模拟结果偏差。

关键词：AquaCrop模型；雨养玉米；生物量；产量；三江平原
中国图书号：S513；F322　　**文献标志码**：A

AquaCrop modelling rainfed maize development in Baijiang soil of the Sanjiang Plain*

LI Siqi，WANG Junjie，MENG Mingxue，WANG Zikang，MENG Ziwei，WANG Yifan，PU Xiao**

（Beijing Laboratory of Water Resource Security，College of Resource Environment and Tourism，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：This study evaluates the applicability of the AquaCrop model for simulating the growth process and yield estimation of rainfed maize in the Baijiang soil area of the Sanjiang Plain. The model parameters of this study and other studies with different climates were compared. The results show that the AquaCrop model effectively simulates the soil moisture content，biomass，and yield of rainfed maize in the Baijiang soil area of the Sanjiang Plain. The root mean square error of observed and simulated soil moisture，rainfed maize biomass，and rainfed maize yield range from 0.80%~1.02%，0.372~0.995 t/hm^2，and 0.563~1.04 t/hm^2，respectively，and the consistency index ranging from 0.878 9~

收稿日期：2023-08-29
* 国家自然科学基金重点国际（地区）合作研究与交流项目（42220104004）；国家重点研发计划项目（2017YFC0406002）
** 通信作者：xiao.pu@cnu.edu.cn

0.990 7, 0.992 7~0.998 9, and 0.982 4~0.988 9, respectively. There are similarities and differences in the calibration of AquaCrop model parameters for maize in different climatic regions. There are significant differences in the calibration values of the Canopy growth index and Canopy transpiration crop coefficient, while the calibration values of Normalized water productivity, Canopy decay index, Maximum canopy coverage, Harvest index parameters are relatively small. In case of sowing time ahead of schedule, the duration reaching the maximum canopy cover was suggested to be properly prolonged for reducing simulation bias.

Keywords: AquaCrop model; rainfed maize; biomass; yield; the Sanjiang Plain

CLC: S513; F322 **DC**: A

0 引 言

由于粮食产量问题在区域气候变化的适应性方面受到人们广泛关注[1],而作物生长模型是研究适应性中使用较多的有效方法,可根据气候状况、环境条件、田间管理技术等因素对作物产量进行定量计算与精确模拟[2]。目前应用较广的作物生长模型主要有Ceres-Maize模型[3]、CropSyst模型[4]和Environmental Policy Integrated Climate模型[5]等。这些模型界面相对复杂,所需输入参数较多,使用过程受到一定程度限制。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)在2009年开发了一款作物-生产模型即AquaCrop模型,该模型能够在给定气候、土壤、灌溉和田间管理等资料的条件下模拟作物的生长发育过程[6]。且AquaCrop模型具有界面简单,所需输入参数少、模拟过程相对简单、精度高等特点[7-9],因此,AquaCrop模型在作物模拟研究中得到广泛应用[10-11]。2021年全国玉米产量占粮食总产量的40%[12],玉米的高产、稳产是我国粮食安全的重要保障,因而采用作物生长模型进行不同气候和土壤条件下的玉米生长过程模拟工作很有必要。

东北地区是我国重点玉米生产基地之一,该区域玉米播种面积约占粮食作物总面积的1/2[13]。三江平原地区是位于中国东北部的主要农业区之一,属于典型的半湿润冷温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨[14]。其中AquaCrop模型已被证实适用于温带大陆气候[15-16]、热带季风气候[17]、温带湿润气候[18]、暖温带半湿润气候[19-20]和地中海亚热带气候[21],但在中高纬地区,水资源相对较多但分布不均且积温相对较少等环境条件下的适用性研究有待系统开展,特别是AquaCrop模型对三江平原白浆土区雨养玉米生物量和产量生成和积累过程的模拟有待进行。

AquaCrop模型在使用前进行校准的关键参数包括冠层蒸腾参数、根系参数、生产力参数、水分胁迫、肥力和温度胁迫参数等[22]。由于气候区域的不同,玉米AquaCrop模型率定参数之间存在一定差异。例如:对属于温带大陆性气候的塞尔维亚里姆斯基·桑切维地区旱地玉米AquaCrop模型适用性分析发现,归一化水分生产力参数(normalized water productivity, WP)校准值与其他研究区域有明显不同[16];对属于热带季风气候的印度新德里地区玉米AquaCrop模型适用性研究表明,冠层生长指数(canopy growth index, CGC)值明显高于其他研究区域[17];然而半湿润冷温带大陆性季风气候下玉米AquaCrop模型适用性及参数率定情况尚不可知。因此,本研究以三江平原白浆土区雨养玉米为研究对象,使用5 a的连续观测数据,揭示AquaCrop模型模拟雨养玉米生长过程的适用性,并通过与其他气候区案例对比分析关键参数,最终为半湿润冷温带大陆性季风气候白浆土区雨养玉米生长模拟应用提供参考。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省三江平原东北部的八五九农场(47°18′~47°50′N,133°50′~134°33′E),面积为1 353 km^2,平均海拔为87 m,其所在的三江平原属于典型的半湿润冷温带大陆性季风气候,夏季降水较少[23]。年平均气温为2.24 ℃,年平均降水量为553.32 mm,年平均无霜期为136.8 d[14]。

实验农田位于农场中部,土壤类型为中国土壤分类中的白浆土,土壤中有机碳为25.1 g/kg,全氮为2.4 g/kg,阳离子交换量为21.9 cmol(+)/kg,密度为1.55 g/cm^3[24]。实验农田已连续种植玉米超过50年。自2010年,开始种植玉米杂交种德米亚3号。采用

深松(35~40 cm)、凿沟(16~18 cm)的传统耕作方式。种植密度为67 500株/hm^2。合成肥料包括磷酸二铵、尿素和硫酸钾。氮、磷、钾施用量分别为180、100、100 kg/hm^2,质量配比为1.8∶1.0∶(0.5~1.2)。除草剂为96%S-异丙甲草胺1.2~1.8 L/hm^2,38%阿特拉津约6.75 kg/hm^2。杀虫剂为5%氰戊菊酯0.6~0.9 L/hm^2。杀菌剂为80%多菌灵,每次1.2~1.9 kg/hm^2,共使用3次。玉米种子在5月中下旬根据气温条件进行机械播种。玉米植株的生理成熟期通常在10月初。

2 数据方法

2.1 AquaCrop模型参数输入与数据

AquaCrop模型所需输入的数据包括气象数据、作物特性数据、土壤特性数据、田间管理数据等。模型中提供了涵盖多种作物种类的默认保守参数数据[25],包括玉米部分参数需根据实际状况进行调整和校准[3]。

(1)气象数据。AquaCrop模型模拟的气象数据通过Zeno® 3200自动农业气象数据采集系统获取,该系统于2010年安装在距离实验农田20 m处。使用雨量计记录降水量,频次为5 min;通过辅助探头和传感器对最高气温和最低气温、相对湿度、2 m高的风速和太阳辐射进行监测[3]。

(2)作物特性数据。通过作物的蒸散量(ET_0)计算器使用FAO Penman-Monteith方法进行ET_0估计[26]。为更好地匹配观测值和模拟值,对模型中与玉米冠层发育、作物蒸腾和生产力系数有关的作物参数进行小幅调整。CGC和冠层衰减指数(canopy decay index,CDC)分别控制冠层增长速率和衰减速率,分别设为12.5%/d和15.0%/d。作物全冠层蒸腾系数的调整值为1.15。将最大冠层盖度(maximum canopy coverage,CC_{max})从默认值95%调整为86%。将参考收获指数(harvest index,HI_0)设定为50%。与土壤水分胁迫有关的其他保守作物参数值从文献中获得,包括冠层扩张土壤水分耗竭阈值、气孔控制土壤水分耗竭阈值、冠层衰老土壤水分耗竭因子阈值以及相应的形状因子[27]。根据AquaCrop模型提供的水文条件下行作物调整指南,将曲线数(number of curve,CN)设定为70。

(3)土壤特性数据。Zeno®3200数据采集系统的土壤水分传感器(s1099,范围:0~100%,精度:±3%),埋深分别为7.5、22.5、45.0和75.0 cm,每个深度安装2个土壤水分传感器,测量频次为每5 min 1次,最终计算0~15、15~30、30~60、60~90 cm 4层的土壤体积含水量的平均值。研究区地下水深度为25~106 m[28],因而地下水影响可以忽略不计。土壤粒径测量运用粒度分析仪(Nicomp 380,PSS,美国)测量。土壤密度使用环刀法测量[24]。基于土壤密度和粒径分布数据,通过Van Genuchten方程估计土壤水力特性(饱和导水率、饱和含水率)。选取0.5 m×0.5 m土地样方,加过量(200 mm)水,用塑料防水布覆盖该区域以防止蒸发,3 d后测量土壤水分含量作为田间持水量。利用压力膜测定仪分别测定吸力为−1.5 MPa时各土层的永久萎蔫点。

(4)田间管理数据。由田间调查得到作物生长阶段发展的数据:种植密度为67 500株/hm^2,初始冠层盖度为0.34%。每隔7 d测定玉米生物量和籽粒产量,在每一次采样中,随机选择3株玉米植株,然后将其分成谷物和其他部分,65 ºC烘干至恒定质量后,分别测定产量和生物量。

所需参数为冷温带大陆性季风气候数据,包括土壤剖面总含水量、有效根区土壤含水量、日累计生物量和日累计粮食产量等,校准值见表1。

2.2 模型校准与验证

将玉米生长期降水量适中的2011和2014年的观测数据用于AquaCrop模型校准。在观测值和模拟值之间获得最接近的匹配时,确定最终校准参数值。再使用2012、2013和2015年数据对模型进行验证。

对于AquaCrop模型的校准和验证过程,选用均方根误差(root mean square error,RMSE)和一致性指数(d)当作模型模拟评价指标,计算并评价模型在模拟土壤含水量、生物量和产量的效果。RMSE表示观测值和模拟值之间的误差方差,d来表示观测值和模拟值之间的吻合程度,计算公式为:

$$E_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2},$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\left|S_i - \bar{O}\right| + \left|O_i - \bar{O}\right|)^2},$$

式中:i是观测次数;S_i和O_i分别是模拟值和观测值;$\bar{O}$是O_i的平均值,其与S_i和O_i是同一单位。当d值接近0时,表明模型具有良好的模拟效果;d值接近1,表明观测结果与模拟结果吻合良好。

3　结果分析

3.1　土壤含水量模拟

根据2011和2014年的观测数据,利用表1中给出的参数值,对AquaCrop模型进行了模型校准,模型模拟了90 cm以上土壤剖面的土壤含水量。模拟的土壤含水量与观测值具有可比性。2011年RMSE和*d*值分别为0.89%和0.990 7,2014年分别为0.80%和0.878 9(图2)。利用2012、2013和2015年实验数据,以及校准过程得出的参数进行验证。随玉米播种后时长(day after sowing,Das)变化的土壤含水量(0~90 cm)验证结果和统计指标如图2所示。模拟的土壤含水量与观测的土壤含水量变化趋势基本一致,RMSE和*d*值分别为0.85%~1.02%和0.915 8~0.973 7。

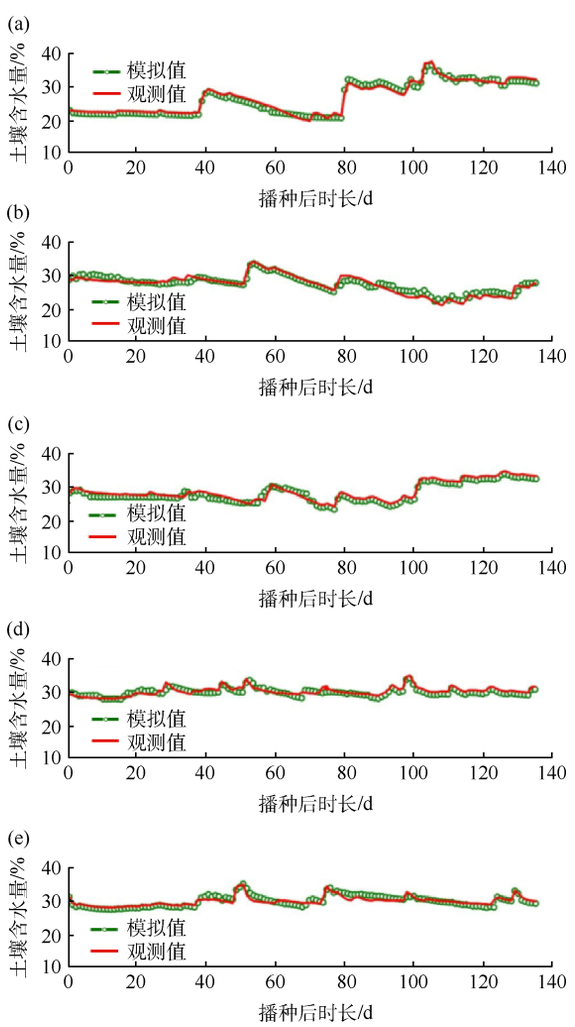


图1　2011—2015年雨养玉米生长季土壤含水量观测值和模拟值比较

(a)2011年;(b)2012年;(c)2013年;(d)2014年;(e)2015年

3.2　雨养玉米生物量和产量模拟

模型校准时模拟的生物量和产量与观测数据基本一致,2011年生物量和产量的RMSE和*d*值分别为0.579、0.565 t/hm^{2}和0.997 3、0.987 7;2014年生物量和产量的RMSE和*d*值分别为0.677、1.040 t/hm^{2}和0.998 1、0.982 4(图3)。

使用2013和2015年观测数据进行模型验证,生物量和产量的模拟值与观测值吻合较好,RMSE值为0.563~0.995 t/hm^2,*d*值为0.988 9~0.996 5。但2012年的生物量RMSE和*d*值分别为2.668 t/hm^{2}和0.954 1,生物量模拟值偏高,表明统一的参数设置在2012年可能出现较大偏差而导致模拟效果欠佳。

注意到2012年播种日期为5月12日,比其他4年提前约15 d。播期变化较大,很可能会导致玉米早期生长环境发生变化,如温度、光照、降雨量等。在实测数据中,三江平原5、6月份温差明显,使得2012年玉米生长期前15 d的气温比其他4年低5 ℃左右。温度是决定光合作用大小的重要因素,长期低温不利于玉米干物质积累。2012年玉米生物量模拟值偏高可能是由于播种期提前所致。玉米播种初期温度较低,玉米生长缓慢,延长了成熟所需时间。在延长了参数最大冠层对应的时间后发现,生物量的RMSE和*d*值变为0.372 t/hm^{2}和0.988 9,吻合效果得到了较大提升(图2(f))。

3.3　AquaCrop模型模拟关键参数分析

通过本研究和已有研究结果的对比发现,玉米生长AquaCrop模型模拟的参数设置在不同气候条件下存在明显差异。冷温带大陆性季风气候(以本研究区为例)的CGC校准值明显高于温带大陆性气候(以塞尔维亚里姆斯基·桑切维为例)[16],明显低于热带季风气候(以印度新德里为例)[17]。温度可能是制约玉米冠层生长的关键因子。温带大陆性气候地区玉米生长季平均气温约为17 ℃[16],热带季风气候地区平均气温约为30 ℃[17],而本研究区平均气温约25 ℃。高温会增加玉米冠层的生长速度,导致热带季风气候地区的CGC高于本研究和温带大陆性气候研究区。本研究区的冠层蒸腾作物系数(canopy transpiration crop coefficient,CTR)校准值明显高于温带大陆性气候地区[16],略高于地中海气候地区(以葡萄牙里巴特茹为例)[21],与热带季风气候区持平[17]。温差可能会改变玉米叶片的内压和外压,从而影响蒸腾效应,可能导致了CTR

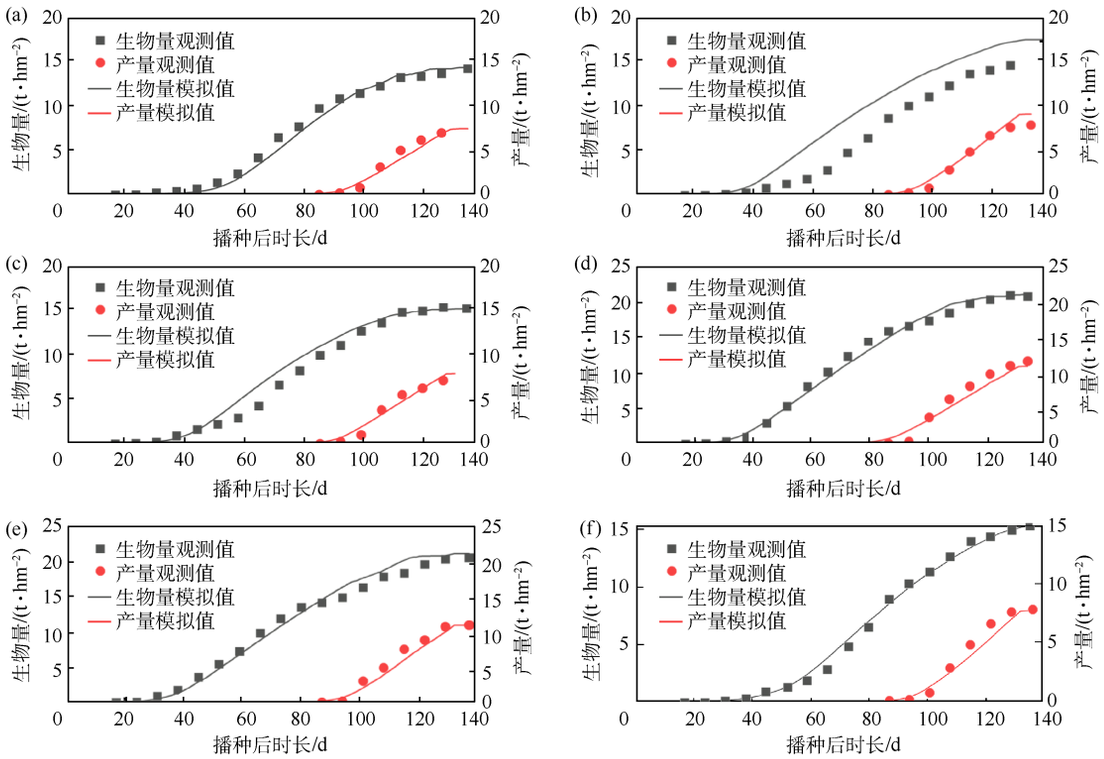


图2　2011—2015年雨养玉米生物量、产量模拟值与观测值比较

(a)2011年;(b)2012年;(c)2013年;(d)2014年;(e)2015年;(f)2012年偏差校正后

校准值的差异。热带季风气候区的玉米生长季日温差约为15 ℃[17],与本研究区相近,而温带大陆性气候区温差约为10 ℃[16],地中海气候区温差约为25 ℃[21],因而这些地区的K_{CTR}校准值按照从大到小的顺序为:地中海气候区、本研究区与热带季风区、温带大陆性气候区。在作物产量和水分胁迫方面,不同气候区的模型参数赋值差异较小。WP的校准值为33.7 g/m^2,符合AquaCrop模型推荐的C_4作物范围,CDC、CC_{max}、HI_0数值也相近[16,17,21]。AquaCrop通过调节冠层扩张、气孔关闭、冠层衰老和收获指数来模拟作物水分胁迫[19,22,29]。在热带季风区,气孔关闭的土壤水分耗竭上限和形状因子相对较小[17],这表明在热带季风气候区的半干旱环境中,作物对水分胁迫比本研究区更敏感。

3.4　AquaCrop模型模拟效果评价

AquaCrop模型对三江平原白浆土区雨养玉米土壤含水量的模拟效果较好,RMSE值为0.80%~1.02%。本研究中土壤含水量模拟值的RMSE值明显低于美国宾夕法尼亚州旱作玉米模拟时的1.50%~9.80%[30]。本研究不同年份的土壤含水率模拟值与观测值具有良好吻合度,但会出现高估和低估情况(图2),这可能是由于模拟作物生长时高估或低估了蒸腾作用的影响[31]。除2012年外,玉米生物量和产量模拟的RMSE和d值分别为0.563~1.040 t/hm^{2}和0.982 4~0.998 1,模拟效果良好。2012年的模拟存在偏差,对玉米生物量的模拟明显高于实际值,但调整参数后,模拟效果得到了较大提升。总体而言,AquaCrop模型可以较好地模拟三江平原地区土壤含水量、雨养玉米生物量和产量。

AquaCrop模型已被证明适用于大陆温带气候、热带季风气候等各种气候。但研究区位于中国东北三江平原,属于典型的半湿润冷温带大陆性季风气候,在该气候带下探索AquaCrop模型适用性的研究较为少见。但本研究在进行AquaCrop模型率定时,所选取的校准参数是在参考相关文献中其他研究人员对参数的选择的基础上进行综合筛选的,因此在校准参数的完整性上可能存在一些遗漏之处。其次本研究利用玉米生长期降水量适中的2011和2014年的观测数据用于AquaCrop模型校准,因此在模型的模拟上存在数据偏老的问题,未来应及时更新校准所需数据,同时增加所选参数的完整性从而加强校准的科学性。

表1 不同气候区的AquaCrop模型参数校准值

参数	单位	冷温带大陆性季风气候	温带大陆性气候[16]	热带季风气候[17]	地中海气候[21]
冠层生长系数(CGC)	%/d	12.5	10.0	19.9	—
冠层衰减系数(CDC)	%/d	15.0	—	14.5	—
最大冠层盖度(CC_{max})	%	86	90	—	96
冠层蒸腾作物系数(K_{CTR})	—	1.15	1.01	1.15	1.18
归一化水分生产力(WP)	g/m^2	33.7	33.0	33.7	33.7
收获指数(HI_0)	—	50			49
冠层生长土壤水分损耗阈值上限	—	0.14	—	0.14	0.14
冠层生长土壤水分损耗阈值下限	—	0.72	—	0.72	0.72
冠层生长影响系数的曲线形状	—	2.9	—	2.9	2.9
气孔闭合引起土壤水分损耗阈值的上限	—	0.69	—	0.5	0.69
气孔闭合影响系数的曲线形状	—	6.0	—	1.8	6.0
冠层衰老引起的土壤水分消耗阈值的上限	—	0.69	—	0.19	—
冠层衰老影响系数的曲线形状	—	2.7	—	1.3	—
作物生长发育基本温度	℃	8	10	8	8
作物生长发育最高温度	℃	30	—	30	30

注:—为无数据。

4 结 论

本文评价了AquaCrop模型在三江平原白浆土区雨养玉米生长过程模拟和产量估算的适用性,并在模型参数率定和校准的基础上与其他气候区研究进行对比,主要结论如下:

(1)AquaCrop模型能较好模拟三江平原白浆土区雨养玉米土壤含水量、雨养玉米生物量和产量。土壤含水量、雨养玉米生物量、产量的观测值和模拟值的RMSE范围分别为0.80%~1.02%、0.372~0.995 t/hm^2、0.563~1.040 t/hm^2;d值范围分别为0.878 9~0.990 7、0.992 7~0.998 9、0.982 4~0.988 9。AquaCrop模型在三江平原地区半湿润冷温带大陆性季风气候下对雨养玉米生长具有较好的模拟效果。

(2)本研究其他气候区研究设置的模型参数数值对比发现,CGC和K_{CTR}差异较大,在不同气候区应用AquaCrop模型调参时需重点关注,而WP、CDC、CC_{max}、HI_0等参数数据的差异较小。播种时间对AquaCrop模型模拟影响较大,若出现播种提前的情况,可适当延长参数最大冠层对应时间,使模型模拟效果得到较好提升。

参 考 文 献

[1] 彭珂珊.粮食安全:世纪挑战与应对:为我国粮食总产量(2004—2015年)实现“12连增”而作[J].首都师范大学学报(自然科学版),2016,37(4):55-64.

[2] CAVERO J, FARRE I, DEBAEKE P, et al. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4):679-690.

[3] MKHABELA M S, BULLOCK P R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in western canada [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:16-24.

[4] STÖCKLE C O, DONATELLI M, NELSON R. Cropsyst: a cropping systems simulation model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18 (3/4): 289-307.

[5] KO J, PICCINNI G, STEGLICH E. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9):1323-1331.

[6] HENG L K, HSIAO T, EVETT S, et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):488-498.

[7] LI W, SONG R, AWAIS M, et al. Global sensitivity analysis of crop parameters based on AquaCrop model [J]. Water Resources Management, 2024, 38 (6): 2039-2058.

[8] NASROLAHI A H, AHMADEE M, RUSTUM R. Sensitivity analysis of AquaCrop model for winter wheat in different water supply conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2024, 150 (2): 04024002.

[9] ZHOU D, WANG H, WANG X X, et al. Evaluation of

AquaCrop's ability to simulate water stress based on 2-year case study of maize crop [J]. Agronomy-Basel, 2024,14(2):354.

[10] AMIRI E, BAHRANI A, IRMAK S, et al. Evaluation of irrigation scheduling and yield response for wheat cultivars using the AquaCrop model in an arid climate [J]. Water Supply, 2022, 22(1):602-614.

[11] BALVANSHI A, TIWARI H L. Quantitative estimation of the impact of climate change on crop evapotranspiration and yield in central region of India [J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2021, 46(10):696-700.

[12] 王明华. 2021年全国粮食产量再创新高 [J]. 中国统计,2021(12):79.

[13] 谢冬颖,郑雪松. 气候特征对伊春地区玉米产量的影响 [J]. 黑龙江气象,2017,34(2):16-19.

[14] PU X, CHENG H, SHAN Y, et al. Factor controlling soil organic carbon and total nitrogen dynamics under long-term conventional cultivation in seasonally frozen soils [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2012, 62(8):749-764.

[15] 柴顺喜,陈锐,李杰,等. AquaCrop模型在北疆滴灌春小麦生产中的校准及验证 [J]. 江苏农业科学,2017,45(8):215-219.

[16] STRICEVIC R, COSIC M, DJUROVIC N, et al. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10):1615-1621.

[17] ABEDINPOUR M, SARANGI A, RAJPUT T B S, et al. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:55-66.

[18] MEBANE V J, DAY R L, HAMLETT J M, et al. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in pennsylvania [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(2):419-427.

[19] DING D, XU Z, CHEN F, et al. Optimization simulation of AquaCrop based on the compensatory effect under palstic mulching [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6):113-125.

[20] NI L, FENG H, REN X, et al. Applicable evaluation of crop model AquaCrop for summer maize production in loess plateau region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6):40-45.

[21] PAREDES P, DE MELO-ABREU J P, ALVES I, et al. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization [J]. Agricultural Water Management, 2014, 144:81-97.

[22] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):426-437.

[23] 王一帆,蒲晓,王子康,等. 半湿润冷温气候下白浆土区雨养玉米AquaCrop模型模拟敏感性分析 [J]. 江苏农业科学,2023,51(22):206-212.

[24] PU X, CHENG H G, SHAN Y S, et al. Factor controlling soil organic carbon and total nitrogen dynamics under long-term conventional cultivation in seasonally frozen soils [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2012, 62(8):749-764.

[25] VANUYTRECHT E, RAES D, STEDUTO P, et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62:351-360.

[26] 倪玲,冯浩,任小川,等. AquaCrop作物模型在黄土塬区夏玉米生产中的适用性评价 [J]. 干旱地区农业研究,2015,33(6):40-45.

[27] HSIAO T C, HENG L, STEDUTO P, et al. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water III parameterization [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):448-459.

[28] PU X, CHENG H, TYSKLIND M, et al. Responses of soil carbon and nitrogen to successive land use conversion in seasonally frozen zones [J]. Plant and Soil, 2015, 387(1):117-130.

[29] 付驰,李双双,李晶,等. AquaCrop作物模型在松嫩平原春麦区的校正和验证 [J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):99-102.

[30] MEBANE V J, DAY R L, HAMLETT J M, et al. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in pennsylvania [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(2):419-427.

[31] 董文俊,刘健峰,丁奠元,等. 旱作覆膜玉米生长和水分利用对气候变化的响应 [J]. 干旱地区农业研究,2020,38(1):1-12+21.

(责任编辑:李拓宇)