

AquaCrop 模型在华北平原黑龙港流域典型区冬小麦-夏玉米 种植模式上的适用性评价

韩桐¹ 赵悦航¹ 黄晶² 王冲¹ 艾细魁¹ 陈阜¹ 褚庆全^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院/农业部农作制度重点开放实验室,北京 100193;

2. 西南科技大学 生命科学与工程学院,四川 绵阳 611010)

摘要 为评估 AquaCrop 模型在黑龙港流域模拟冬小麦-夏玉米水分利用与作物产量的适用性,根据田间试验数据和 FAO 提供的参数值,对 AquaCrop 模型进行模型非保守性参数的本地化校准和验证。结果表明,AquaCrop 模拟冬小麦冠层覆盖值和实测值的归一化均方根误差(NRMSE)为 15.90%,模拟产量与实测产量之间的 NRMSE 为 4.23%;模拟夏玉米冠层覆盖值和产量值与相应实测值之间的 NRMSE 分别为 11.59%和 11.69%。本研究校准所得参数对黑龙港流域典型站点有较好的适应性,校验后的 AquaCrop 可以用于黑龙港流域冬小麦-夏玉米水分管理、产量潜力等相关研究。

关键词 AquaCrop 模型; 冬小麦; 夏玉米; 冠层覆盖; 产量; 验证; 黑龙港流域

中图分类号 S512.1; S513

文章编号 1007-4333(2019)07-0010-08

文献标志码 A

Applicability evaluation of AquaCrop model for winter wheat & summer maize cropping system in the Heilonggang River Valley

HAN Tong¹, ZHAO Yuehang¹, HUANG Jing², WANG Chong¹,

AI Xikui¹, CHEN Fu¹, CHU Qingquan^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture,

China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 611010, China)

Abstract In order to verify the applicability of AquaCrop model for simulating water use and crop yield of winter wheat-summer maize in the Heilonggang River Valley, both the field test data and parameter values provided by FAO were input into the model to calibrate and verify non-conservative parameters. Results showed that the normalized root mean square error(NRMSE)of winter wheat canopy coverage between simulated value and measurement was 15.90%, the NRMSE between simulated yield and measured yield was 4.23%. For summer maize, the NRMSE of canopy coverage and yield between simulated values and measurements were respectively 11.59% and 11.69% indicating that the parameters obtained by calibration had better adaptability to Wuqiao County. In conclusion, the developed AquaCrop model could be applied to study the relationship between water management and yield of winter wheat-summer maize in the Heilonggang River Valley.

Keywords AquaCrop model; winter wheat; summer maize; canopy cover; yield; validation; Heilonggang River Valley

收稿日期: 2018-10-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300201);国家自然科学基金项目(31871581)

第一作者: 韩桐, 硕士研究生, E-mail: HanTong@cau.edu.cn

通讯作者: 褚庆全, 副教授, 主要从事农作制和作物模型研究, E-mail: cauchu@cau.edu.cn

黑龙港流域位于河北省东部,属华北平原一部分,是我国重要的粮食产区,冬小麦-夏玉米一年两熟为该地区主要种植模式。冬小麦生长季内降水量较少,灌溉是其稳产高产的重要手段。在地表水缺乏的情况下,地下水大量用于灌溉以致严重超采,华北地区尤其是黑龙港地区目前已经成为世界上最大的地下水漏斗区^[1]。因此,发展节水灌溉是实现黑龙港地区农业可持续发展的重要手段之一。分析作物产量与需水量的关系,在此基础上形成“以产定水”的节水灌溉制度,可以协调作物生产和区域水资源短缺之间的矛盾,为黑龙港地区水资源合理利用和可持续发展提供科学依据。

近年来,有许多模型被广泛应用于作物需水量的测算以及灌溉制度优化的研究中。如孔菁铨等^[2]利用土壤水分平衡模型 SIMETAW 对北京地区主要大田作物需水量进行模拟,研究发现主要大田作物的需水量和作物系数在全生育期内均呈现“单峰型”曲线;Banerjee 等^[3]利用 CROPWAT 对印度恒河下游平原马铃薯田间蒸散量的研究为该地区在气候变化背景下制定灌溉方案提供了理论依据。此外,利用 DASSAT-CERES 系列、RZWQM2 模型及 APSIM 等模型来探究作物产量、水分利用效率和灌溉水利用效率对各种水分管理措施的响应,从而优化不同作物灌溉制度的研究也较多^[4-7]。但上述模型并不能分析作物产量与需水量的关系,只能间接反映产量对水的响应机制。AquaCrop 是水分驱动的作物生长模型,其设计理念基于作物产量主要由可供应的土壤水分决定,因此更适用于产量和水的响应机制研究^[8]。该模型可通过不同灌溉制度下的不同作物耗水量来模拟作物产量,为作物灌溉管理提供管理决策支持^[9]。AquaCrop 模型在国际上的应用较为成熟和广泛,越来越多研究者将该模型应用到包括北美、中非和印度等地的番茄、土豆、棉花、玉米和水稻等作物的水分灌溉管理中,对改进当地传统灌溉方法,节约水资源发挥了重要作用^[10-11]。AquaCrop 模型在国内的应用则较少,研究内容主要集中在禾谷类作物如小麦和玉米的模型验证和评价上^[12-14]。

AquaCrop 模型中部分参数是不易随地理位置和管理措施等变化而变化的保守性参数,一部分参数则为容易受作物品种、管理措施和生长区域等因素的变化而变化的非保守性参数。AquaCrop 模型针对华北平原黑龙港流域作物模拟校验方面的研究

尚未见报道。本研究旨在田间试验的基础上,通过“试错法”校准 AquaCrop 模型中非保守性参数,进一步验证应用本地化的相关参数得到的模拟结果与实测结果的吻合度,以期评估 AquaCrop 模型对黑龙港流域冬小麦-夏玉米种植模式下水分与产量关系模拟的适应性。

1 材料与方法

1.1 AquaCrop 模型基本原理

由于作物对水分亏缺的反应复杂,因此在评估作物产量等指标对水的响应时一般采取经验性的数学公式。FAO 灌溉与排水第 33 号文件^[12]给出了作物产量对水分响应的转换方程,即

$$\left\{ \frac{Y_x - Y_0}{Y_x} \right\} = K_y \left\{ \frac{ET_x - ET_0}{ET_x} \right\} \quad (1)$$

式中: Y_x 为作物潜在产量, kg/m^2 ; Y_0 为实际产量, kg/m^2 ; ET_x 为作物潜在蒸散量, mm ; ET_0 为实际蒸散量, mm ; K_y 为相对产量损失和相对蒸散减少的比例因子。

AquaCrop 模型对上述方程进行了改进,将作物腾发量分为土壤蒸发(E)和作物蒸腾(T_r)两部分表达,以避免混淆非生产性用水与生产性用水的效应,将最终产量表达为生物量(B)和收获指数(HI)之间的关系,突出水分胁迫对生物量和收获指数的不同影响作用^[8-9]。相关方程如下:

$$Y = B \cdot HI \quad (2)$$

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (3)$$

式中: Y 为最终作物产量, kg/m^2 ; B 为生物量, kg/m^2 ; HI 为收获指数; WP 为生物量水分生产效率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$; T_r 为作物蒸腾量, mm 。

1.2 研究区域概况

实验站位于河北省沧州市吴桥县(116.44°E , 37.62°N),地处华北平原腹地,地势低平,平均海拔 16 m。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,温度适中,日照充足,雨热同期,夏季高温多雨,冬季低温干燥。多年平均气温 12.6°C ,多年平均降雨量为 552.6 mm,多年平均蒸发量为 1 189.8 mm,年积温 $4 862.9^\circ \text{C}$,无霜期 192 d。

1.3 数据来源

1.3.1 气象数据

吴桥县站点气象信息来源于中国气象科学共享服务网,逐日气象数据包括日平均温度、日最高温

度、日最低温度、日降雨量、日照时数、相对湿度和平均风速等指标。

1.3.2 土壤数据

AquaCrop 模型需要的土壤数据涉及土壤剖面和地下水,吴桥县的地下水埋深超过模型所考虑的最大值 30 m,故未考虑。试验区土壤 0~100 cm 土层内土质为壤土,100~120 cm 为粘土层,120 cm 以下基本为砂土,部分土层夹杂少量粘土。各土层砂粒、粉粒和粘粒质量百分比:0~50 cm 分别为 12.1%、82.1% 和 5.8%,50~100 cm 分别为 6.8%、78.5% 和 14.7%,100~150 cm 分别为 1.6%、76.3% 和 22.2%。0~20 cm 土层的基础养分情况为:有机质 14.7 g/kg、全氮 0.96 g/kg、碱解氮 64.2 mg/kg、有效磷(Olsen-P)14.8 mg/kg、速效钾 123.5 mg/kg。

1.3.3 作物管理数据

冬小麦于 2013—2014 和 2015—2016 年用于模型校准的灌溉处理^[15]为:底墒水+拔节水+开花水;夏玉米 2013 和 2014 年用于模型校准的灌溉处理为:苗期灌溉。校准时选用灌水较为充分的处理进行模拟,冬小麦选择浇两水处理进行参数调整,底墒水不计入,夏玉米选择浇一水进行参数调整。

1.4 模型校准与验证

1.4.1 评价指标

采用国际上通用的模型验证方法和评价指标对 AquaCrop 模型模拟华北地区麦玉生长发育进程和产量形成进行检验。检验的统计参数^[11]有:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}})(\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}})^2 \sum_{i=1}^n (\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}})^2}} \quad (4)$$

$$R^2 = r^2 \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \text{Sim}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\overline{\text{Obs}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \text{Sim}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{Sim}_i - \overline{\text{Obs}}| + |\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}}|)^2} \quad (8)$$

式中: R^2 为模拟结果与实测结果间的线性回归决定

系数;RMSE 为均方根误差;NRMSE 为归一化均方根误差(又称标准化均方根误差); D 为一致性指标; Obs_i 为实测值, Sim_i 为模拟值; $\overline{\text{Obs}_i}$ 为实测值的平均值, $\overline{\text{Sim}_i}$ 为模拟值的平均值; n 为样本数。

RMSE 越接近 0 表明模型表现越好;NRMSE 值低于 10%,认为模型模拟表现极好;NRMSE 值在 10%~20%,认为模型模拟表现良好;NRMSE 在 20%~30%,认为模型模拟表现一般;如果 NRMSE>30% 则模型模拟效果较差^[16]; D 值越接近 1,模型模拟值和实测值之间的吻合程度越高^[17]。

1.4.2 作物冠层覆盖的计算

与其他模型相比,AquaCrop 模型不用叶面积指数(LAI)表示群体大小,而用群体冠层覆盖(Canopy Cover,CC)来表示,CC 是绿色群体占地面的比例,数值为 0~1。CC 可由叶面积指数推算而来,二者计算公式^[18]分别为:

$$\text{LAI} = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} \times B_{ij})}{m} \quad (9)$$

$$\text{CC} = 1.005(1 - e^{-0.6\text{LAI}})^{1.2} \quad (10)$$

式中:LAI 为叶面积指数; ρ 为研究中所测定作物群体的种植密度; m 为测定的株数; n 为第 j 株玉米的总叶片数;CC 为群体冠层覆盖度。

2 结果与分析

2.1 参数校准结果

参数校准是以田间试验数据为模型驱动,以作物冠层覆盖度和产量为目标函数,运用试差法,不断调整模拟结果,使之与实测数据匹配。参考 FAO 提供的参数初赋值,并在给定的范围内调整,幅度在 5%~10%,调控参数并输出模拟结果,进一步与实测数据比对,不断修改有关参数,直至二者吻合度良好。具体过程为:数据库建立后,以冬小麦和夏玉米的冠层覆盖和产量为基准校正参数。先对作物关键生育期时间进行确认,具体包括播种、出苗、达到最大冠层覆盖、开花、开始衰老和成熟等时间点,后对影响冠层、地上生物量和收获指数的相关参数,如最大有效根深、种植密度、腾发量、参考收获指数及胁迫相关系数等进行调试,直至模拟情况与实际情况相吻合。经过不断修改和调试得出一套适用于冬小麦-夏玉米模型模拟的典型非保守参数(表 1)。

表 1 AquaCrop 模型冬小麦-夏玉米部分模型典型非保守参数

Table 1 The typical non-conservative parameters of AquaCrop model for winter wheat and summer maize

有效积温/(°C · d) Growing degree days							
作物 Crop	播种—出苗 From sowing to emergence	播种—开花 From sowing to flowering	播种—冠层衰老 From sowing to canopy senescence	播种—最大冠层覆盖 From sowing to maximum canopy coverage	播种—最大根深 From sowing to maximum rooting depth	播种—成熟 From sowing to maturity	经济产量 Economic yield
冬小麦 Winter wheat	157	1 315	1 315	1 047	1 130	2 142	787
夏玉米 Summer maize	84	1 188	1 596	1 020	1 116	1 944	720

作物 Crop	有效积温/(°C · d) Growing degree days	初始冠层覆盖指数/% Initial canopy coverage index	最大冠层覆盖/% Maximum canopy cover	参考收获指数/% Reference harvest index	最小有效根深/m Minimum effective rooting depth	最大有效根深/m Maximum effective rooting depth
冬小麦 Winter wheat	授粉 Pollination 209	4.05	96	48	0.3	1.5
夏玉米 Summer maize	216	0.47	95	48	0.4	1.5

2.2 AquaCrop 模型对冬小麦和夏玉米冠层动态的模拟验证

2.2.1 冬小麦

模型对作物冠层动态的模拟可以分为 2 个阶

段;第一阶段是冠层形成生长阶段,第二个阶段是冠层衰老阶段。利用 2015—2016 年的田间试验进行模型校正处理,冬小麦冠层覆盖度(CC)的模拟结果及拟合度分析如图 1 所示,返青期和拔节期,模拟结

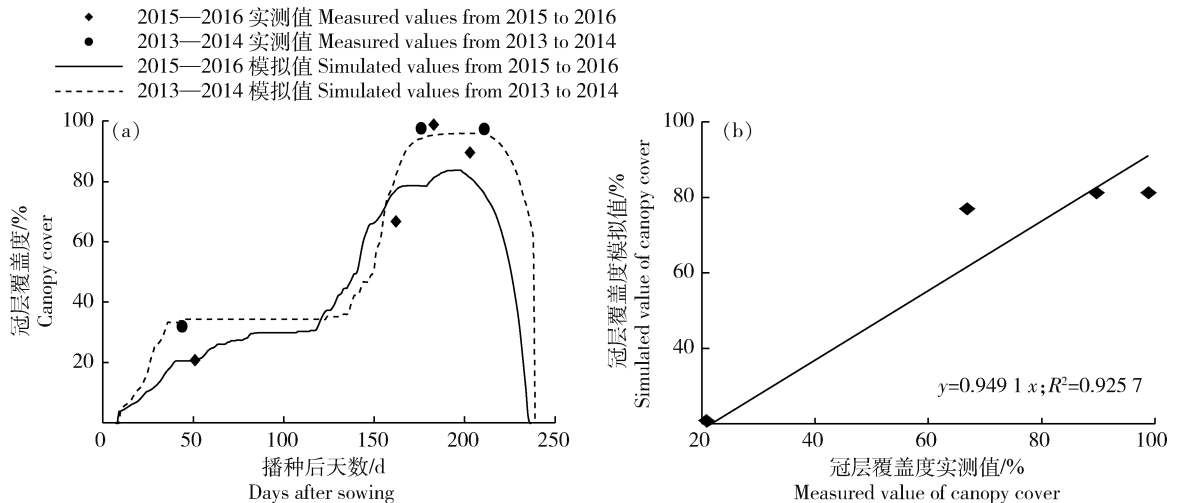


图 1 2013—2014 和 2015—2016 年冬小麦冠层覆盖度模拟值与实测值比较 (a) 及拟合度分析 (b)

Fig. 1 Comparison (a) and lined relationship (b) of observed and simulated CC during the winter wheat season from 2013 to 2014 and from 2015 to 2016

果与田间实测数据较为接近;抽穗期,2015—2016年模拟值与实测值偏离稍大,2013—2014年吻合度高。2015—2016年模拟值和实测值之间的回归系数 b 为0.9212,决定系数 R^2 为0.87;2013—2014年两者之间的回归系数 b 为0.98,决定系数 R^2 为0.99。综合2年的数据分析,两者之间的回归系数 b 为0.9491,决定系数 R^2 为0.9257。校正处理和验证处理的模拟结果与实测结果均表明冬小麦生育期冠层生长的模拟值与实测值之间有较强的相关性。

2.2.2 夏玉米

夏玉米冠层覆盖的模拟结果如图2(a),冠层覆盖实测值基本分布在模型模拟值曲线附近,两者吻合度较高,变化趋势一致。苗期至拔节期玉米营养

生长旺盛,叶面积指数迅速增大,冠层覆盖度(CC)也随之升高;到达抽穗期以后,玉米叶片几乎全部伸展开来,营养生长达到最大值后停止,冠层覆盖度(CC)达到最大值;维持一段时间后,叶片开始逐渐变黄、衰老和脱落,叶面积指数减小,冠层覆盖度(CC)也随之降低。对实测值和模拟值进行了拟合度分析(图2(b)),2014年模拟值和实测值之间的回归系数 $b=0.9453$,决定系数 $R^2=0.8917$;2013年模拟值与实测值之间的回归系数 $b=0.9667$,决定系数 $R^2=0.9188$;综合2年的数据分析,夏玉米冠层覆盖实测值和模拟值之间的回归系数 $b=0.9591$,决定系数 $R^2=0.9076$ 。以上结果表明夏玉米生育期冠层生长的模拟值与实测值之间有较强的相关性。

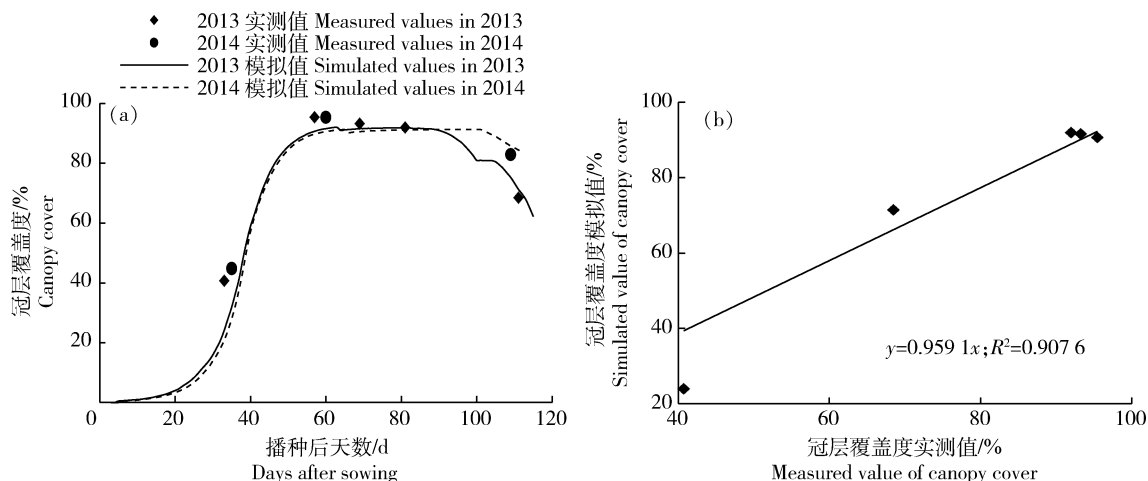


图2 2013和2014年夏玉米冠层覆盖度模拟值与实测值比较(a)及拟合度分析(b)

Fig. 2 Comparison (a) and lined relationship (b) of observed CC and simulated CC during the summer maize season of 2013 and 2014

2.3 AquaCrop模型对冬小麦和夏玉米产量的模拟验证

总体来看(表2),模型对冬小麦和夏玉米产量模拟的误差可以控制在10%以内,平均误差4.066%,但由于可供验证的大田数据少及实测产量年际变幅大等原因,导致相对误差变化幅度大,且夏

玉米模拟误差要高于冬小麦。从模拟结果可以发现AquaCrop模型产量模拟结果一般会大于产量实测值,这是因为该模型只考虑产量对水分的响应关系,但在实际田间环境中,病虫害、温度和光照等因素都会限制作物产量。

表2 冬小麦、夏玉米产量模拟结果

Table 2 The simulated yields of winter wheat and summer maize

作物 Crop	年份 Year	产量实测值/(t/hm ²) Measured value of yield	产量模拟值/(t/hm ²) Simulated value of yield	相对误差/% Relative error
冬小麦 Winter wheat	2013—2014	9.447	9.867	4.441
	2015—2016	8.471	8.405	0.778
夏玉米 Summer maize	2013	9.716	10.627	9.378
	2014	11.034	10.849	1.677

2.4 AquaCrop 模型对冬小麦和夏玉米模拟的适应性评价

AquaCrop 模型经过校准后,对冬小麦和夏玉米的冠层覆盖和产量模拟总体效果(表 3)较为理想,决定系数 R^2 在 0.87~0.97,且夏玉米高于冬小麦;标准化均方根误差在 4.23~15.90,表现良好,说明模拟结果可信度高; D 值,除夏玉米产量为 0.82

外,其余皆 >0.90 ,说明模拟值与实际值吻合度好。比较冬小麦和夏玉米,冬小麦决定系数 R^2 小于夏玉米,分析原因可能是华北地区降雨集中在夏玉米生长季内,冬小麦季降雨少且分布不均匀,AquaCrop 是水分驱动模型,更适应水分供应充足条件下的模拟,因此夏玉米 R^2 较高。总体来看,模型对冬小麦和夏玉米的冠层发育和产量的模拟结果表现良好。

表 3 吴桥冬小麦-夏玉米模型模拟产量、冠层模拟结果评价

Table 3 Model evaluation of simulating winter wheat and summer maize grain Canopy cover and yields in Wuqiao

指标 Item	冬小麦 Winter wheat		夏玉米 Summer maize	
	冠层覆盖 Canopy cover	产量 Yield	冠层覆盖 Canopy cover	产量 Yield
	R^2	0.87	0.88	0.97
RMSE/%	10.98	0.32	8.88	1.09
N-RMSE/%	15.90	4.23	11.59	11.69
D -value	0.96	0.97	0.91	0.82

3 讨论

模型的本地化校准和验证是模型应用的基础,是影响模型模拟精度的首要条件。AquaCrop 模型作为辅助农田灌溉决策的有效工具,在世界范围内得到广泛应用,但由于该模型针对特定作物的部分保守参数需要进行本地化校准后才能用于实际生产中的模拟研究,所以先对 AquaCrop 模型进行参数本地化校准与验证是进行应用的前提^[19-20]。目前,AquaCrop 模型的应用多是针对小麦或玉米等作物中单一类型的研究^[21-22],本研究的对象则是黑龙港流域的主要粮食种植模式—麦玉两熟,研究结果证明 AquaCrop 模型能够用于多作物的种植模式。

虽然本研究结果表明 AquaCrop 模型在黑龙港流域典型站点吴桥县有较好的适应性,但模拟值与实测值之间仍有差距,造成这种差距的原因可能是模型本身所模拟的条件除了水分限制以外皆为理想条件,与试验田的条件之间存在差距;对参数进行敏感性分析,可以校准对输出变量影响大的参数,有效地简化模型,提高模型校准精度,减少数据处理工作量,节约时间^[18]。本研究在调参之前,没有做参数的敏感性分析,这也是造成模拟误差的一个原因;保

守参数本身在吴桥县的适用性可能也受到限制;此外,模型对土壤水分的反应敏感^[25],对于干旱年份雨养条件的冬小麦产量模拟精度相对水分充足的年份更低,极度缺水条件下的模拟精度有待提高。

AquaCrop 模型适用的作物较多,但在国内的应用方面还主要局限在冬小麦和夏玉米上^[12-15,17-18],在其他作物上的应用还有待开发和研究。目前该模型主要应用于单点尺度,更大范围、更大空间的应用存在一些障碍,其在更大范围上的适用性也有待验证。空间可视化模块的研究为模型在区域尺度上的时空分析提供新思路,例如 Lorite 等^[23]于 2013 年在西班牙南部气候变化对小麦产量影响分析的研究中,开发的 AquaData 和 AquaGIS 2 个模块不仅使大范围的多点模拟成为可能,而且使研究时间减少了 99% 以上。模型进一步发展还需要解决的一大难点是优化模型的操作流程,提高模型运行和使用的效率,从而扩大模型的应用范围,为更多站点和区域的灌溉优化和水分限制产量潜力模拟提供服务,对于这一问题,Foster 等^[24]在 2017 年基于 AquaCrop 开发的开源模型 AquaCrop-OpenSource (AquaCrop-OS)可在多种编程语言和操作系统中运行,并具有并行化模拟能力,可大大减

少模拟时间。随着这些辅助模块的发展,模型的适用性和应用范围将得到更快的发展。

4 结 论

1)根据吴桥县实验站实际情况建立了一套 AquaCrop 运行所需要的包括气象、土壤和作物管理数据在内的模型数据库,在采用 FAO 提供的部分保守参数的基础上,结合试验数据和吴桥县的实际情况,对 AquaCrop 模型进行驱动,通过“试错法”获得适用于黑龙港流域典型站点吴桥县冬小麦-夏玉米种植模式的 AquaCrop 模型模拟所需要的一系列非保守性参数。

2)冬小麦冠层覆盖度模拟值与实测值之间以及模拟产量与实测产量之间的协同指数 D 值分别为 0.96 和 0.97;夏玉米冠层覆盖模拟值与实测值以及模拟产量与实测产量间的 D 值分别为 0.91 和 0.82,表明 AquaCrop 模型对冬小麦、夏玉米的冠层覆盖和产量模拟的效果较好,该模型在黑龙港流域典型站点河北省吴桥县有良好的适应性,可进一步将 AquaCrop 模型用于华北平原区域尺度的冬小麦-夏玉米种植模式灌溉制度优化和产量潜力等研究。

参考文献 References

[1] 李云开. 华北平原粮食作物灌溉消耗地下水及能效的特征[D]. 北京:中国科学院大学,2013
Li Y K. Characteristics of groundwater consumption and energy efficiency for grain crop irrigation in North China Plain [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2013 (in Chinese)

[2] 孔管铎,张海林,陈阜,宋振伟. 基于 Simetaw 模型的北京地区主要作物需水量估算[J]. 中国农业大学学报,2009,14(5): 109-115
Kong Q X,Zhang H L,Chen F,Song Z W. Estimation of main crop water requirement in Beijing based on SIMETAW model [J]. *Journal of China Agricultural University*,2009,14(5): 109-115 (in Chinese)

[3] Banerjee S,Chatterjee S,Sarkar S,Jena S. Projecting future crop evapotranspiration and irrigation requirement of potato in Lower Gangetic Plains of India using the CROPWAT 8.0 model[J]. *Potato Research*,2016,59(4):1-15

[4] Chen C,Wang E,Yu Q. Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*,2008,97(8):1175-1184

[5] Attia A,Rajan N,Xue Q,Nair S,Ibrahim A,Hays D. Application of DSSAT-CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains[J]. *Agricultural Water Management*,(2015-12-07)DOI:10.1016/j.agwat.2015.11.002

[6] Kadaja J,Saue T. Potential effects of different irrigation and drainage regimes on yield and water productivity of two potato varieties under estonian temperate climate[J]. *Agricultural Water Management*,(2015-06-18) DOI: 10.1016/j.agwat.2015.11.011

[7] Li Z,Sun Z. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the corn belt of northeast China[J]. *European Journal of Agronomy*,(2015-07-19)DOI: 10.1016/j.eja.2015.12.015

[8] 朱秀芳,李宜展,潘耀忠,史培军. AquaCrop 作物模型研究和应用进展[J]. 中国农学通报,2014,30(8):270-278
Zhu X F,Li Y Z,Pan Y Z,Shi P J. A review on the research and application of AquaCrop model[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2014,30(8):270-278 (in Chinese)

[9] 王连喜,吴建生,李琪,顾嘉熠,薛红喜. AquaCrop 作物模型应用研究进展[J]. 地球科学进展,2015,30(10):1100-1106
Wang L X,Wu J S,Li Q,Gu J Y,Xue H X. A review on the research and application of AquaCrop model[J]. *Advances in Earth Science*,2015,30(10):1100-1106 (in Chinese)

[10] Linker R,Ioslovich I,Sylaios G,Plauborg F,Battilani A. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato [J]. *Agricultural Water Management*,(2015-02-02)DOI:10.1016/j.agwat.2015.09.011

[11] Tsakmakis I D,Zoidou M,Gikas G D,Sylaios G K. Impact of irrigation technologies and strategies on cotton water footprint using AquaCrop and CROPWAT models [J]. *Environmental Processes*,(2018-02-22)DOI:10.1007/s40710-018-0289-4

[12] Doorenbos J,Kassam A H. *Yield Response to Water* [M]. Rome:FAO,1979

[13] 滕晓伟,董燕生,沈家晓,孟鲁闽,冯海宽. AquaCrop 模型对旱区冬小麦抗旱灌溉的模拟研究[J]. 中国农业科学,2015,48(20):4100-4110
Teng X W,Dong Y S,Shen J X,Meng L M,Feng H K. Winter wheat irrigation simulation in arid area based on AquaCrop model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2015,48(20):4100-4110 (in Chinese)

[14] 倪玲. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦灌溉制度研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015
Ni L. Irrigation management for winter wheat based on AquaCrop model [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University,2015 (in Chinese)

[15] 杨萌. 黑龙港地区冬小麦-夏玉米干旱综合技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2015
Yang M. comprehensive Technology of drought for winter wheat-summer maize in Heilongjiang district [D]. Beijing:

China Agricultural University, 2015 (in Chinese)

- [16] Iqbal M A, Shen Y J, Stricevic R J, Sun H Y, Amiri E, Penas A, Rio S D. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 135 (1): 61-72
- [17] 刘建刚. 黄淮海农作区冬小麦-夏玉米产量差及其限制因素解析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
- Liu J G. Yield gap of winter wheat and summer maize and limiting factors in Huang-Huai-Hai farming region [D]. Beijing: Chian Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [18] 邢会敏, 徐新刚, 冯海宽, 李振海, 杨福芹, 杨贵军, 贺鹏, 陈召霞. 基于 AquaCrop 模型的北京地区冬小麦水分利用效率[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4507-4519
- Xin H M, Xu X G, Feng H K, Li Z H, Yang F Q, Yang G J, He P, Chen Z X. Water use efficiency of winter wheat based on AquaCrop model in Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23): 4507-4519 (in Chinese)
- [19] Greaves G, Wang Y M. Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment[J]. *Water*, 2016, 8(12): 557
- [20] Battilani A, Letterio T, Chiari G. Aquacrop model calibration and validation for processing tomato crop in a sub-humid climate[C]. *Acta Horticulturae*. Sirmione: 13th International Symposium on Processing Tomato, 2015
- [21] 付驰, 李双双, 李晶, 王泳超, 芦玉双, 许为政, 魏湜. 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
- Fu C, Li S S, Li J, Wang Y C, Lu Y S, Xu W Z, Wei S. Calibration and validation of AquaCrop model in spring wheat region of Songnen Plain [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(5): 99-102 (in Chinese)
- [22] 杨宁, 孙占祥, 张立桢, 郑家明, 冯良山, 李开宇, 张哲, 冯晨. 基于改进 AquaCrop 模型的覆膜栽培玉米水分利用过程模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 122-132
- Yang N, Sun Z X, Zhang L Z, Zheng J M, Feng L S, Li K Y, Zhang Z, Feng C. Simulation of water use process by film mulched cultivated maize based on improved AquaCrop model and its verification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 122-132 (in Chinese)
- [23] Lorite I J, Garcia-Vila M, Santos C, Ruiz-Ramos M, Fereres E. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, 96(6): 227-237
- [24] Foster T, Brozović N, Butler A P, Neale C M U, Raes D, Steduto P, Fereres E, Hsiao T. AquaCrop-OS: an open source version of FAO's crop water productivity model [J]. *Agricultural Water Management*, (2016-08-03) DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.015
- [25] Liu X, Ding D Y, Zhang H J, Chu X S, Yu K, Feng H. Evaluation analysis of AquaCrop model in modeling winter wheat growing development and soil moisture under plastic mulching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(10): 1838-1851
- [26] Walker S, Bello Z A, Mabhaudhi T, Zuma-Netshikhwi G, Beletse Y G, Modi A T. Calibration of Aquacrop model to predict water requirements of traditional African vegetables [C]. In: *Acta Horticulturae*. Skukuza: 2nd All Africa Horticulture Congress, 2013

责任编辑: 吕晓梅