

AquaCrop 作物模型在黄土塬区夏玉米 生产中的适用性评价

倪 玲¹, 冯 浩^{1,2}, 任小川³, 郝志鹏⁴

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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. 陕西省咸阳市乾县农村经济经营管理站, 陕西 咸阳 712100; 4. 莱阳市水利局, 山东 莱阳 265200)

摘 要: 为评价 AquaCrop 作物模型在黄土塬区的适用性, 基于 Hsiao 等人推荐的玉米参数对模型参数进行调整及验证。在陕西长武地区模拟 2003、2004、2005、2007、2008、2010 年玉米生育期内生物量、蒸发蒸腾量的变化过程及收获时产量、地上部生物量, 将模拟值与收集到的实测值进行对比、分析。结果表明, 这 6 年模拟产量与实测产量间的校正决定系数 (Adj. R^2) 为 0.9270, 相对误差在 -2.479 至 11.182 之间; 模拟地上部生物量与实测地上部生物量间的 Adj. R^2 为 0.7842, 模型对产量的模拟效果优于对生物量的模拟; 2005 年和 2008 年模拟蒸散量与实测蒸散量间的 Adj. R^2 分别为 0.6229 和 0.7973。模拟效果较好, 对黄土塬区夏玉米水分优化管理模拟有重要意义。

关键词: AquaCrop 模型; 夏玉米; 产量; 生物量; 蒸散量; 作物生产力

中图分类号: S3-3; S513 **文献标志码:** A

Applicable evaluation of crop model AquaCrop for summer maize production in Loess Plateau Region

NI Ling¹, FENG Hao^{1,2}, REN Xiao-chuan³, HAO Zhi-peng⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Agricultural economy management station of Qian County, Xianyang, Shaanxi 712100, China;

4. Water Conservancy Bureau of Laiyang City, Laiyang, Shandong 265200, China)

Abstract: In order to evaluate its applicability of crop model AquaCrop in Loess Plateau Region, the model parameters were revised and validated based on the summer maize parameters recommended by Hsiao et al. The biomass in the maize growing season, the change procedure of evapotranspiration, harvest yield and aboveground biomass in 2003, 2004, 2005, 2007, 2008 and 2010 in Changwu Region of the Shaanxi Province have been simulated, and carried out the comparison and analysis for the simulated with measured data. The results were showed that: In the six years, the adjusted determination coefficient Adj. R^2 for simulated yield data and measured yield data was 0.9270, the relative error was between -2.479 to 11.182. The Adj. R^2 for simulated and measured aboveground biomass was 0.7842. In this model, the effect of simulating yield was better than the aboveground biomass. In 2005 and 2008, the Adj. R^2 for simulated and measured evapotranspiration were 0.6229 and 0.7973, respectively. Therefore, this model has a good simulation effect and important significance for the next optimal water management of summer maize in Loess Plateau Region.

Keywords: AquaCrop model; summer maize; yield; biomass; evapotranspiration; crop productivity

作物的生产力水平是评价一个地区粮食生产能力及未来发展前景的重要指标^[1-2]。采用田间试验的方法研究一个地区作物的生产力水平不仅需要消耗大量的时间和财力, 而且面临诸如气候变化、病虫害等不确定性因素的影响, 同时, 田间试验因地域限

制, 其研究结果很难全面地代表一个地区的生产力水平。作物模型可有效避免不确定性因素对研究作物生产力和产量潜能的影响, 同时不受时间和地域等因素的限制^[3]。AquaCrop 作物模型是由 FAO 组织主持研发的一款以水分为驱动的作物生长模型,

收稿日期: 2015-03-21

基金项目: 国家 863 计划课题“作物生境过程模拟与动态优化决策技术”(2013AA102904)

作者简介: 倪 玲 (1989—), 女, 青海循化人, 硕士研究生, 主要研究方向为作物模型。E-mail: 2007nl_summer@163.com。

通信作者: 冯 浩 (1970—), 男, 陕西延安人, 研究员, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

该模型很好地解决了多数作物模型存在的运行过程复杂、透明度不足和输入数据要求详细等问题,实现了以较少数据作物生长模拟、作物蒸腾和土壤蒸发的分离、生产力预测、优化灌溉制度等多种目标^[4-5],直观性较强,应用对象范围较广,是一个真正面向用户、简洁实用的模型。Steduto^[6]和 Raes 等人^[7]对模型运行的机理、运行结构和运算法则等内容做了详细介绍。目前,AquaCrop 作物模型已经在不同地区和不同作物间进行了校准和验证,均取得了较好的效果^[8-11]。但未见 AquaCrop 作物模型在黄土塬区的校准和验证的报道。

长武塬区地处黄土半干旱地区,降雨较少且年际变化大,年内降雨分配极不均匀,日均蒸发量大,水资源缺乏,水分是限制当地作物生产力的重要因素^[12]。因此,准确地估计当地作物的生产力水平对制定合理的农业管理策略、提高水分利用效率具有重要意义。本研究根据 Hsiao 等^[9]推荐的玉米参数对模型参数进行调试,利用收集到的不同年份夏玉米试验资料对 AquaCrop 模型参数进行校准,并验证模型在该地区的适用性,以期为模型在当地的應用和夏玉米水分优化管理模拟提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验区概况

长武站位于黄土高原中南部,东经 107°40′,北纬 35°12′,海拔 1 200 m。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 580 mm,平均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水位 50~80 m。土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土质均匀疏松,通透性好。地貌属典型的高原沟壑区,农业生产属典型的旱作雨养农业区。

1.2 数据收集

本研究数据主要来源于中国农业出版社出版的《中国生态系统定位观测与研究数据集—农田生态系统卷—陕西长武站》一书,部分数据由中国科学院长武黄土高原农业生态试验站提供。共收集到 2003—2008 及 2010 年的夏玉米生育期基本试验数据(气象数据、土壤基本参数、夏玉米生育期内模型所需试验数据)。表 1 为收集到的夏玉米物候期数据。用冠层覆盖率(CC)代替原始模型中的叶面积指数(LAI)^[9]进行转换:

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2} \quad (1)$$

表 1 夏玉米基本数据
Table 1 The basic date of summer maize

项目 Item	年份 Year					
	2003	2004	2005	2007	2008	2010
品种 Cultivar	中丹金穗 Zhongdanjinsui	中丹金穗 Zhongdanjinsui	中丹金穗 Zhongdanjinsui	沈丹 10 Shendan10	沈丹 10 Shendan10	沈丹 10 Shendan10
耕作措施 Tillage measure	常规 Conventional	常规 Conventional	覆膜 Mulching	常规 Conventional	常规 Conventional	常规 Conventional
株数/(株·m ⁻²) Number/(plant·m ⁻²)	6	5	5	4	4	6
播种日期(月-日) Sowing date(m-d)	04-20	04-16	04-22	04-22	04-22	04-22
出苗日期(月-日) Emergence date(m-d)	05-06	04-22	04-29	05-05	05-02	05-06
成熟日期(月-日) Maturity date(m-d)	09-18	09-03	08-25	09-17	09-05	09-07
收获日期(月-日) Harvest date(m-d)	09-23	09-06	08-30	09-18	09-07	09-11
生育期/d Period of duration	157	144	131	150	139	141
产量/(t·hm ⁻²) Yield	11.600	10.090	10.714	7.653	7.867	7.442
全生育期降雨量/mm Rainfall in whole growth period	660.3	319.1	254.9	409.2	312.5	504.0
全生育期 ET ₀ /mm ET ₀ in whole growth period	609.8	598.3	566.8	622.6	580.8	514.9

1.3 模型输入参数

1.3.1 气象数据 AquaCrop 模型所需气象数据包括日均最低和最高温度,日均降雨量,日均参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)以及大气 CO_2 浓度^[6,7], ET_0 利用

FAO 提供的 ET_0 计算器获得,大气 CO_2 浓度采用模型推荐的默认值。不同年份下夏玉米生育期日均降雨量见图 1,全生育期内累计降雨量及累计 ET_0 见表 1。

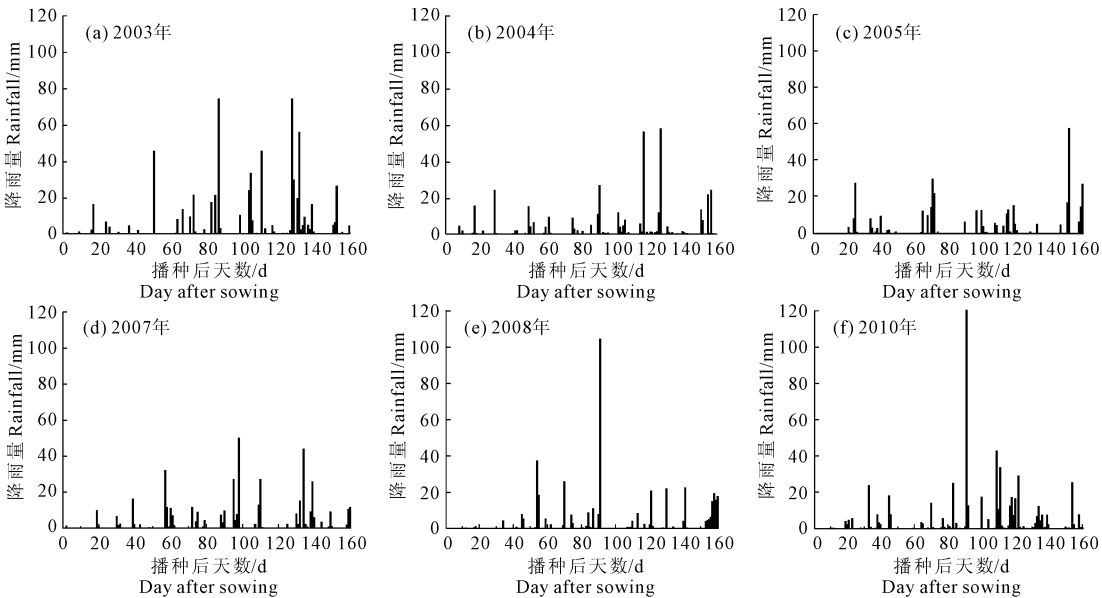


图 1 夏玉米生育期降雨量分布

Fig.1 The rainfall distribution in whole growth period of summer maize

1.3.2 土壤参数 试验站地带性土壤为黑垆土,亚类为粘化黑垆土,肥力水平中等。模型所需的土壤参数包括土壤质地、土壤容重、土层厚度、永久性凋萎点、田间持水量、饱和含水量,如表 2 所示。

表 2 土壤初始参数

Table 2 The soil initial parameters

土层厚度 Depth /cm	土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	永久性凋萎点 Wilting point /%	田间持水量 Field capacity /%	饱和含水量 Saturated water content /%
40	1.33	10.02	28.14	49.76
60	1.34	10.22	28.40	49.30
80	1.25	7.32	26.84	52.96
120	1.31	6.22	26.81	50.47

1.3.3 作物参数 模型所需的作物参数主要包括 90% 出苗阶段作物的初始冠层覆盖率、种植密度、最大冠层覆盖率,从播种开始分别到 90% 出苗、最大冠层覆盖率、开花、最大根长、作物衰老、作物成熟所需的时间、开花周期以及最大根长等基本数据。初始冠层覆盖率以及最大冠层覆盖率根据种植密度进行校正。为方便用户尽快地使用模型,模型提供了作物参数的取值范围和部分默认参数。Hsiao 等^[9]对玉米作物的默认参数做了详细的介绍, Lee Kheng Heng 等^[13]对这部分默认参数进行了验证,得到了很

好的验证结果。

1.4 模型可靠性分析

由 AquaCrop 模型得到对不同年份下夏玉米生育期内不同时间段的生物量模拟值,进一步以统计参数均方根误差 (RMSE),符合度指数 (d)^[14],残差聚类集系数 (CRM)^[2] 进行分析。统计参数含义和取值范围见表 4。

2 模型的验证

2.1 模拟效果验证分析

为验证模型的模拟效果,以收集到的夏玉米田间试验为基础,根据不同年份的气象条件、田间管理方式和不同的土壤水分、养分条件,生成不同的控制文件,分别运行,得到不同年份夏玉米的模拟结果。产量、生物量的模拟值与实测值之间的线性回归关系如图 2 所示,不同年份蒸散量模拟值与实测值间的线性回归关系如图 3 所示。

图 2 显示,模型模拟产量与实测产量间的校正决定系数 Adj. R^2 为 0.9270,模拟生物量与实测生物量的 Adj. R^2 为 0.7842,表明模型对产量、生物量的模拟均具有比较好的拟合优度。模型对产量的模拟效果优于对生物量的模拟。

由图 3 所示,2005 年和 2008 年模拟蒸散量与实

测蒸散量间的 $\text{Adj. } R^2$ 分别为 0.6229 和 0.7973。表 4 中,除 2005 年模拟产量与实测产量间的相对误差为 11.182%外,其它年份下模拟产量与实测产量的相对误差均小于 5%。这主要是因为 2005 年长武地区气候干旱,夏玉米种植前累积降雨量只有 50 mm,旱情严重,为保证玉米的正常生长,采用覆膜种植。

尽管 AquaCrop 模型中设置有调节覆盖率的参数,但在覆盖条件下模型推荐参数的适用性,模型模拟效果尚不可知。本研究中,模型在设置覆盖的情况下,模拟蒸散量与实测蒸散量间的 $\text{Adj. } R^2$ 低于未覆膜条件下的,同时模拟产量值明显高于实测产量值,其原因需在今后进一步进行研究。

表 3 模型部分春玉米典型参数
Table 3 Parts of parameters of spring maize in AquaCrop model

模型参数 Crop parameter	数值 Value	单位或含义 Unit or meaning
基础温度 Base temperature	8.0	℃
最高临界温度 Maximal critical temperature	30.0	℃
出苗率达 90%时单株作物的冠层覆盖面积(CC ₀) Canopy area cover by single crop when the seedling emergence rate at 90%	6.5	cm ²
作物生长期间的冠层覆盖增长率(CGC) Canopy cover increasing rate in crop growing stage	1.3	%·d ⁻¹
冠层覆盖率达 100%时作物蒸腾系数 Crop transpiration coefficient when the canopy cover rate at 100%	1.03	相对于参考作物蒸发蒸腾量 Relative to the reference ET_0
由于叶片衰老导致的逐日冠层覆盖衰减 Daily canopy cover decline as a result of leaves ageing	0.3	%
作物衰老期的冠层覆盖衰减率(CDC) Canopy cover decline rate in crop senescence stage	1.06	%·d ⁻¹ (GDD)
标准化水分生产效率 Standard water production efficiency	33.7	g·m ⁻²
气孔导度阈值上限 Upper threshold for stomatal conductance	0.69	超过此值时气孔开始关闭 Stomatal began to close if more than this value
参考作物收获指数 Reference crop harvest index	48	%,通常情况下作物的收获指数 The crop harvest index in normal circumstances
从 90%出苗到作物开始开花所需积温 Required accumulated temperature from 90% seedling emergence to flowering	800	℃,如果是早熟作物品种所需积温小于此值 If the accumulated temperature of early-maturing crops is less than this value
开花期所需积温 Required accumulated temperature for flowering period	190	℃

表 4 统计参数含义及取值范围
Table 4 The meanings and range of values for some statistical parameters

参数名 Parameter names	参数定义 Parameter definition	计算公式 Design formulas	取值范围 Value range	最佳值 The best value	注释 Annotation
$RMSE$	均方根误差 Root mean square error	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - S_i)^2}{N}}$	≥ 0	0	$RMSE$ 值越小,表明模拟效果越好 The smaller the value, the simulation effect is better
d	符合度 指数 Synergy index	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{O}_i + O_i - \bar{O}_i)^2}$	≤ 1	1	d 值越接近 1,表明总体模拟效果越好 Value is close to 1, overall simulation shows that the better the results
CRM	残差聚集系数 Residual accumulation coefficient	$\frac{(\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N S_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$	≤ 1	0	$CRM < 0$, 表明模型模拟值偏高; $CRM > 0$, 表明模型模拟值偏低 $CRM < 0$, simulation values on the high side. $CRM > 0$, simulation value is low

注:表中 S_i 为模拟值, O_i 为实测值, N 为实测次数, $\bar{O}_i$ 实测平均值。
Note: In this table, S_i is the Simulated value. O_i is the measured values. N is the numbers of measurement. $\bar{O}_i$ is the average value.

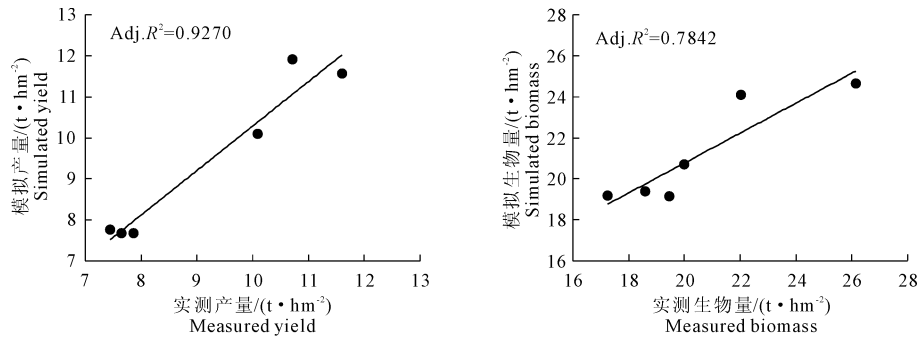


图 2 不同年份产量、生物量模拟值与实测值

Fig.2 The simulated and measured values of yield and biomass in different years

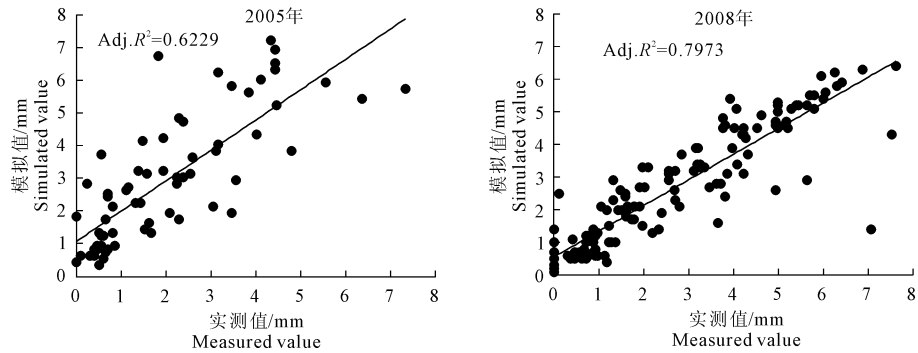


图 3 不同年份作物蒸散量模拟值与实测值

Fig.3 The simulated and measured values of crop ET in different years

2.2 模拟结果精度分析

结合不同年份夏玉米生育期内模拟生物量和实测生物量图 4 和统计分析结果表 5 可见,模拟生物量与实测生物量发展趋势一致,对于度量模拟值与实测值相对差异的均方根误差 $RMSE$ 除 2005 年达到 $2.2574\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 外,其它年份均小于 $1.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

对于反映模型整体模拟能力的符合度指数 d ,最大值、最小值分别为 0.9992 和 0.9714,说明模型对于夏玉米全生育期内生物量的模拟具有较好的效果。

可以看出,2010 年残差聚集系数 CRM 小于 0 外,其它年份的残差聚集系数均大于 0,表明模型对于生物量的整体模拟值偏低。

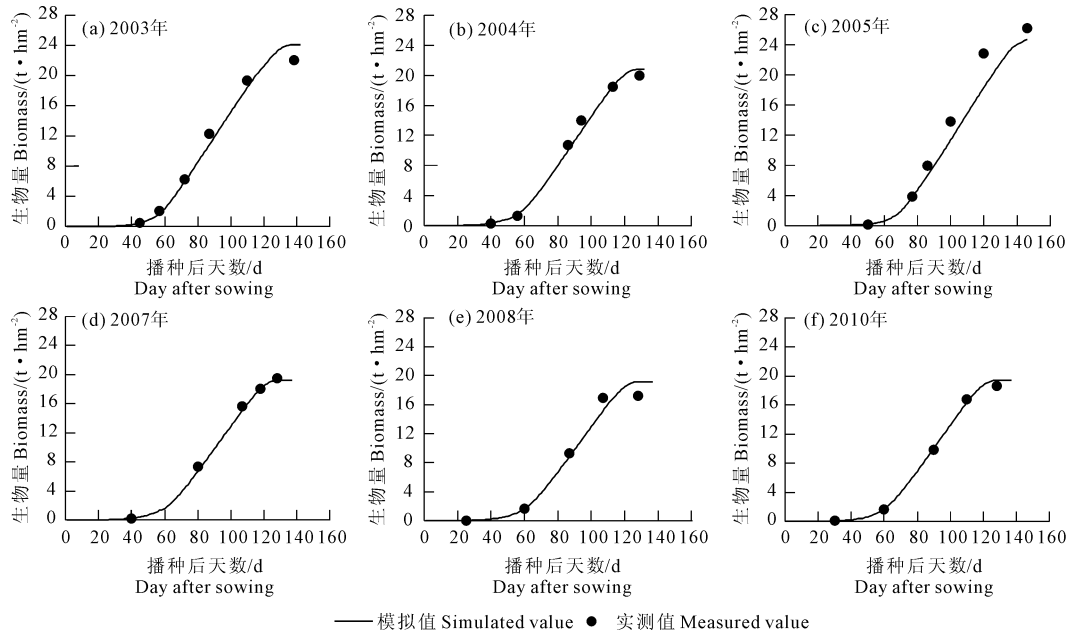


图 4 不同年份模拟生物量值与实测值

Fig.4 The simulated and measured biomass in different years

表 5 模型初步模拟结果精度分析

Table 5 The accuracy analysis for the preliminary simulated results by AquaCrop model

年份 Year	耕作措施 Tillage measures	均方根误差 $RMSE/(t \cdot hm^{-2})$	符合度指数 d	残差聚集系数 CRM
2003	常规 Conventional	1.1231	0.9955	0.0190
2004	常规 Conventional	0.7565	0.9976	0.0168
2005	覆膜 Mulching	2.2574	0.9714	0.1324
2007	常规 Conventional	0.4168	0.9973	0.0251
2008	常规 Conventional	1.1865	0.9893	0.0078
2010	常规 Conventional	0.4212	0.9992	-0.0151

3 结论与讨论

作物模型在研究作物生产力时将“作物—土壤—气候—管理”作为一个整体进行考虑,即可节约大量的人力和物力,又具有更广的覆盖范围和更强的通用性^[2]。长武旱塬地区常年缺水,水资源的缺乏严重制约当地农业的发展,以水分为驱动的作物模型可以准确地模拟干旱半干旱地区作物的生产力水平和产量潜势,对于改变管理模式、提高水分的利用效率、促进当地农业发展将发挥重大的作用。本研究表明,AquaCrop 模型在长武塬区对于夏玉米经济产量、地上部生物量和生育期内蒸散量、生物量都具有足够的模拟精度。经过参数修正和校准后的 AquaCrop 模型可用于长武旱塬地区夏玉米生产力的模拟、优化农艺措施等。但是,由于缺少覆膜处理下的夏玉米多年试验数据,对于覆膜处理下模型的应用还需进一步研究。同时报道显示,作为一款以水分为驱动的作物模型,其对于土壤水分和蒸散量的模拟均有很好的效果^[9,15-17]。本研究只对 2005 年和 2008 年的蒸散量进行了模拟,未对土壤水分进行模拟分析,因此,需要收集和测定大量精确细致的数据对模型进行进一步的验证。另外,本研究未考虑耕作制度和土壤肥力对作物生产力的作用,但实践表明,作物生产力的形成受这两个因素的影响很大,因此,需进一步研究不同耕作制度和不同施肥水平下,模型在该地区作物生产力模拟中的模拟效果。

参 考 文 献:

[1] 李 军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J].自然资源学报,2001,16(2):161-165.

[2] 王宗明,张 柏,宋开山,等.CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J].农业工程学报,2005,21(5):47-50.

[3] 李忠武,蔡强国,唐政洪,等.作物生产力模型及其应用研究[J].应用生态学报,2002,13(9):1174-1178.

[4] Timsina J, Godwin D, Humphreys E, et al. Evaluation of options for

increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT - CSM - CERES - Wheat model[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(9):1099-1110.

[5] 王宗明,梁银丽.应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J].自然资源学报,2002,17(4):481-487.

[6] 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.

[7] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):438-447.

[8] Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, et al. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran[J]. Agricultural Water Management, 2011,100(1):1-8.

[9] Hsiao T C, Heng L, Steduto P, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):448-459.

[10] Garc I A - Vila M, Fereres E, Mateos L, et al. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):477-487.

[11] 杜文勇,何雄奎,Shamaila,等.冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J].农业机械学报,2011,42(4):174-178.

[12] 山 仑.节水农业的研究与实施[J].中国科学院院刊,1996,11(6):430-435.

[13] Lee K H, Theodore H, Steve E, et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):488-498.

[14] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance [J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 1982,63:1309-1313.

[15] Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, et al. Assessment of aquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):509-521.

[16] Farahani H J, Izzi G, Oweis T Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):469-476.

[17] Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop[J]. Agronomy Journal, 2009,101:499-508.