文章编号:1000-7601(2019)03-0072-11

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.09

基于 AquaCrop 模型的夏玉米生长 模拟及灌溉制度优化

陈超飞1,2,柳双环1,2,郭大辛1,2,徐芳平1,2,马孝义1,2

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为评价 AquaCrop 模型在关中地区的适用性并寻求最佳的灌溉制度,对夏玉米在不同灌溉与施氮水平下的生长进行模拟和验证,并利用校验后的模型研究了 3 种不同降雨年型以及 11 种灌溉模式下夏玉米产量和水分利用效率的变化特征。结果表明: AquaCrop 模型可以较好地模拟关中地区不同灌溉与施氮水平下夏玉米产量和生物量,模型模拟的产量与实测值之间的决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、标准均方根误差 (NRMSE)、符合度指数 (d) 和纳什效率系数 (E_{NS}) 分别为 0.919、0.249 $t \cdot hm^{-2}$ 、4.112、0.977 和 0.915;对于地上部生物量,模拟值与实测值的 R^2 、RMSE、NRMSE、d 和 E_{NS} 分别为 0.860、0.977 $t \cdot hm^{-2}$ 、6.407、0.933 和 0.694。利用校验后的模型分析了试验区内 3 种不同降水年型条件下 11 种灌溉模式的夏玉米产量和水分利用效率的变化特征,依据模拟结果及夏玉米生理需水规律,同时为了实现高产和高水分利用效率,得出不同年型的优化灌溉制度为: 若能保证出苗整齐,湿润年可不灌水,此时也能获得较高产量和水分利用效率;平水年推荐在拔节期灌水 60 mm,能节约 50%水资源,亦能保证稳产;干旱年推荐在拔节期和抽雄期各灌水 60 mm,可获得高产和高水分利用效率。

关键词:夏玉米;AquaCrop模型;生长模拟;灌溉优化;关中地区

中图分类号:S274.3 文献标志码:A

Growth simulation and optimization of irrigation scheme for summer maize using AquaCrop model

CHEN Chao-fei^{1,2}, LIU Shuang-huan^{1,2}, GUO Da-xin^{1,2}, XU Fang-ping^{1,2}, MA Xiao-yi^{1,2}
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest

A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to evaluate the suitability of the AquaCrop model in the Guanzhong area and explore the best irrigation scheme, the model was used to simulate and validate the growth of summer maize under different irrigation and nitrogen levels. Then, we used the calibrated model to study the changes of summer maize yield and water use efficiency under 11 kinds of irrigation scenarios under three precipitation types. The results showed that the AquaCrop model well predicted the summer maize grain yield and biomass under different irrigation and nitrogen levels in Guanzhong. The coefficient of determination(R^2), root mean square error(RMSE), normalized root mean square error(NRMSE), consistency(d) and model efficiency(E_{NS}) between the simulated and observed values of yield were 0.919,0.249 t · hm⁻²,4.112,0.977 and 0.915 for all treatments, respectively; As for biomass, R^2 , RMSE, NRMSE, d and E_{NS} between the simulated and observed values were 0.860,0.977 t · hm⁻²,6.407,0.933 and 0.694 for all treatments, respectively. Then using the calibrated model to study the changes of summer maize yield and water use efficiency in 11 kinds of irrigation scenarios under three precipitation types. Based on the simulation results and combined with the physiological water requirement of summer maize, the water requirements during the

收稿日期:2018-06-02

作者简介:陈超飞(1994-),男,河南洛阳人,硕士,研究方向为作物模型模拟研究。E-mail:13140168556@163.com

通信作者:马孝义(1965-),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究。E-mail: xiaoyima@ vip.sina.com

jointing and tasseling stages should be emphasized. Optimized irrigation scheme for different precipitation year are: if we can guarantee good seedling emergence, irrigation is not needed during the wet year; in the normal year, 60 mm can be irrigated during the jointing period; in the dry year, 60 mm of irrigation water should be applied during jointing and tasseling. These schemes will guarantee the stable production and high yield.

Keywords: summer maize; AquaCrop model; growth simulation; irrigation optimization; Guanzhong region

玉米是中国第一大粮食作物。2015年中国玉米种植面积达 3 811.9万 hm²,总产量达 2.246 亿 t^[1]。关中地区是陕西粮食主产区,主要实行冬小麦-夏玉米轮作制^[2]。该区夏季容易出现极端天气,降雨分配不均导致伏旱时有发生^[3],这对夏玉米的生产极为不利,气候变化、水资源短缺和田间管理不当更加剧了生产的不稳定性^[4]。因此,研究夏玉米节水灌溉对保障关中地区粮食稳产高产、提高水资源利用率有重要意义。

田间试验往往耗时耗力,且易受气候变化和病 虫害等环境因素影响,结合作物模型进行农田或区 域尺度的作物生产模拟、预测和评估成为国际上的 研究热点[5]。作物模型克服了传统试验研究对象 单一、试验周期长、时间和空间有限制的缺点,有助 于田间管理决策[6]。相较其他作物模型而言, AguaCrop 模型以良好的适用性、较少的参数和较好 的模拟效果吸引了大批科研工作者的关注和应 用[7]。世界各地学者对该模型适用性展开的大量 研究表明,利用该模型能较好模拟不同水分处理多 种农作物的产量形成机制[8-10]。国内学者应用 AquaCrop 模型对冬小麦[11-12],玉米[13-14],棉花[15], 大豆[16],大葱[17]和西北胡麻[18]等多种作物进行模 型校准和验证,评价了生物量、产量和水分利用效 率等方面的精度和适用性。目前, AquaCrop 模型主 要用于模拟不同作物产量和水分利用效率方面的 研究。国内较缺乏对夏玉米不同水氮组合情境下 的模拟研究,且 AquaCrop 作物模型在关中地区针对 夏玉米模拟的研究更是少见报道。

于 2016 年和 2017 年 6-10 月在陕西武功县高新农业示范园针对夏玉米设置不同梯度灌水和施氮处理的大田试验。利用试验数据对 AquaCrop 模型进行校验,评价其适用性,最后模拟不同降水年型下不同灌溉策略对夏玉米产量和水分利用效率的影响,以期为模型在关中地区的应用和夏玉米不同典型年的灌溉制度提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验分别于 2016 年和 2017 年 6-10 月在

陕西武功县高新农业示范园(34°21′N,108°03′E)进行,冬小麦-夏玉米轮作是该区主要的粮食种植制度。试验区位于关中平原中西部,地处渭河一、二阶地。该区多年平均降水量 596.8 mm,夏玉米生长季 6-9 月的多年平均降水量为 360.2 mm,有效降水量 316.5 mm;平均气温为 13.3℃,平均日照时数 2 095 h,年辐射总量 480.90 kJ,无霜期 221 d;土壤为典型堘土,0~20 cm 土层容重为 1.32 g·cm⁻³,pH值为8.14,有机质含量 10.20 g·kg⁻¹,全氮含量 0.96 g·kg⁻¹,碱解氮质量分数为 60.3 mg·kg⁻¹,速效磷质量分数为 10.28 mg·kg⁻¹,速效钾质量分数为 128.5 mg·kg⁻¹。

1.2 试验方案设计

2016-2017年田间试验在同一地块进行,设置 水、氮 2 个因素。水分设 4 个水平: IO, 雨养(不灌 水); I1, 低水 30 mm; I2, 适水 60 mm; I3 高水 90 mm。 氮素 4 个水平: NO, 不施氮; N1, 为推荐施氮量 的 67%, 120 kg·hm⁻²; N2, 推荐施氮量, 180 kg· hm⁻²; N3, 推荐施氮量的 133%, 240 kg·hm⁻², 共 16 个处理,3次重复。试验小区为东西走向,宽5.7 m, 长 28 m, 面积 159.6 m²。裂区设计, 水分为主区, 肥 料为副区,小区间由垄隔开,垄宽 0.5 m,高 0.2 m。 灌水方式为畦灌,灌水时间依据旱情决定,2016年 灌水日期为8月13日,2017年灌水日期为7月11 日。供试氮肥为尿素(含 N≥46%),磷肥为过磷酸 钙(含 $P_2O_5 \ge 16\%$), 钾肥为硫酸钾(含 $K_2O \ge$ 50%)。各处理施磷肥(60 kg·hm⁻²)和钾肥(60 kg ·hm⁻²),均作为基肥在播前一次性施入。玉米供 试品种为郑单 958, 行距 65 cm, 株距 30 cm, 密度为 51 300株·hm⁻²。2016年于6月14日播种,10月1 日成熟;2017年于6月15日播种,10月7日成熟。 其他管理措施如杂草控制、病虫害管理等按照一般 大田管理规范进行。

1.3 观测指标及处理

1.3.1 叶面积指数 每隔 10~15 d 测量标记选择 供试植株的所有绿叶叶片的长度(从叶领到叶尖) 及宽度(叶片最宽处),叶面积指数(leaf area index, LAI)采用下式计算[19]:

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

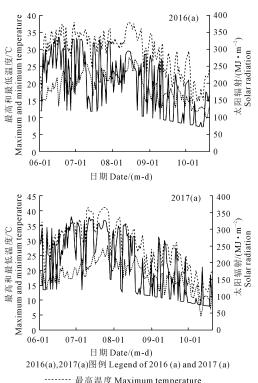
式中, ρ 为种植密度(株・hm⁻²);n 为第j 株玉米的总叶片数;m 为测定株数; L_{ij} 为叶片叶领到叶尖的长度(m); B_{ij} 为叶片最宽处宽度(m);0.75 为与叶形有关的叶面积回归系数。

1.3.2 冠层覆盖度 冠层覆盖度(canopy cover, CC) 是指土壤表面绿色冠层覆盖的面积百分比,由 LAI 计算获得,其计算公式如下^[20]:

 $CC = 1.005 [1 - \exp(-0.6 \times LAI)]^{1.2}$ (2) 1.3.3 土壤含水量 本试验使用德国 IMKO 公司制造的 TRIME – TDR 测定土壤含水量 (soil water content, SWC),测量深度为 1m,间隔为 20 cm。每次播种前和收获后,用土钻取土测量土壤含水量,并校准 TRIME–TDR 仪器。

1.3.4 地上部生物量及产量 玉米进入拔节期后, 每隔 10~15 d 测定地上部生物量(aboveground biomass, B),每小区取 3 株能够代表作物平均长势的植株,剪去地下部分后于 105℃下杀青 0.5 h,75℃烘至恒重,测其干重,乘以种植密度即为地上部生物量。玉米成熟后,选取能够代表作物整体长势的 20 株成熟玉米,果穗风干后经人工脱粒,75℃烘至恒重后测算产量。

1.3.5 水分利用效率 水分利用效率(water use ef-



 ficiency, WUE)是指单位水分消耗获得的生物量或产量,产量水分利用效率 WUE 可按下式计算:

$$WUE = \frac{Y}{10 \times ET} \tag{3}$$

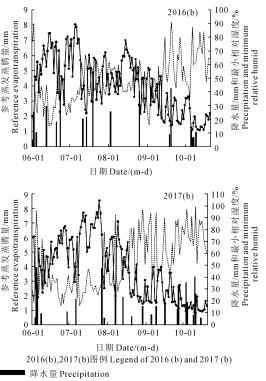
式中,Y为籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$);ET为作物耗水量, (mm),由 AquaCrop 模型模拟计算获得。

1.4 构建 AquaCrop 模型数据库

AquaCrop 模型需要输入的数据包括气象、作物、土壤、田间管理等。

1.4.1 气象数据 武功气象站 1961-2017 年的逐日降水、气温等气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/site/index.html)中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 采用 Penman-Montieth 方程[21]进行计算。2016 年和 2017 年夏玉米生育期内逐日最高和最低气温、太阳辐射、参考蒸发蒸腾量、最小相对湿度及降水量见图 1。

1.4.2 土壤数据 模型输入的土壤数据包括土层深度及层数、土壤质地、容重、各土层的凋萎含水量、田间持水量和饱和含水量等参数。试验区土壤为典型墙土,用土钻分别在0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm 5 个深度取土,风干过 2 mm 筛后采用英产 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定土壤质地。各土层容重采用环刀法测定,采用离心



一 参考蒸发蒸腾量 Reference evapotranspiration
 → 最小相对湿度 Minimum relative humid

图 1 2016-2017 年武功县夏玉米生育期气象数据

法测定土壤水分特征曲线,用 RETC 软件拟合得到 凋萎含水量、田间持水量和饱和含水量,输入 AquaCrop 模型建立土壤数据库文件,详细土壤参数 如表 1 所示。

1.4.3 作物参数据 作物参数中的植株密度和物候期等参数根据试验记录直接输入模型。归一化水分生产力、参考收获指数,冠层增长衰减系数和水分胁迫响应系数等重要参数根据模型手册和文献提供的取值范围采用"试错法"进行修正,部分默认参数如基底温度、上限温度等采用模型手册上的推荐值。参照 Vanuytrecht 等[22]介绍的校准顺序:第一步,校准冠层覆盖度;第二步,校准地上部生物量;第三步,校准产量。利用 2017 年田间试验数据进行模型调试,使模型模拟结果与实测结果相符合,经过校准,得到'郑单 958'的品种参数,部分参数详见表 2。

AquaCrop 模型没有明确考虑养分的循环与平衡,而是采用半定量的评估方法来描述养分胁迫对生物量的影响^[23]。模型引入相对于最大地上部生物量的比例系数 B_{rel} ,公式如下:

$$B_{\rm rel} = \frac{B_{\rm stress}}{B_{\rm ref}} \times 100\% \tag{4}$$

式中, B_{stress} 为无肥料胁迫和水分胁迫条件下得到的地上部生物量($\mathbf{t} \cdot \mathbf{hm}^{-2}$); B_{ref} 为有肥料胁迫但无水分胁迫条件下得到的地上部生物量($\mathbf{t} \cdot \mathbf{hm}^{-2}$); B_{ref} 的范围为0% ~ 100%,0% 表示有养分胁迫时作物生长失败,100% 表示没有养分胁迫, B_{stress} 和 B_{ref} 参照当地生产现状、前人研究成果^[24-26] 以及本次试验数据确定。模型内嵌自动校准程序,使用 4 个胁迫参数来表现肥料胁迫的响应:冠层扩张($Ks_{\text{exp},f}$),最大冠层覆盖度(Ks_{Ccx}),生物量水分生产力(Ks_{WP}) 和冠层衰减(f_{CDecling}) [27]。通过校准,结果如表 3。

表 1 试验区土壤数据

Table 1 The soil properties in test area

土壤深度 Soil depth /cm	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%	土壤质地 Soil texture	饱和含水量 Saturation/%	田间持水量 Field capacity/%	凋萎含水量 Wilting point/%	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)
0~20	32.11	41.56	26.33	土壤 Silt	43.5	30.6	16.2	1.32
20~40	30.75	41.68	27.57	粘壤土 Clay silt	43.9	31.7	17.3	1.58
40~60	30.36	41.23	28.41	粘壤土 Clay silt	44.0	31.9	17.3	1.62
60~80	30.95	40.00	29.05	粘壤土 Clay silt	44.0	32.2	17.9	1.61
80~100	28.92	41.85	29.23	粘壤土 Clay silt	44.3	32.5	17.9	1.57

表 2 AquaCrop 模型玉米校准参数

Table 2 The calibrated parameter of maize in AquaCrop model

	Table 2 The camplated parameter of maize in requisitop model		
符号 Symbol	描述 Description	取值 Value	单位 Unit
$T_{ m base}$	基底温度 Base temperature	8.0	${\mathcal C}$
$T_{ m upper}$	上限温度 Upper temperature	30	$^{\circ}\!\mathrm{C}$
$K_{ m cb}$	作物系数 Crop coefficient	1.05	-
CGC	冠层增长系数 Canopy growth coefficient	0.0084	(°C ⋅ d) ⁻¹
CC_x	最大冠层覆盖度 Maximum canopy cover	94	%
CDC	冠层衰减系数 Canopy decline coefficient	0.0070	(°C ⋅ d) ⁻¹
$T_{ m eme}$	播种到出苗所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to emergence	98	$^{\mathrm{c}}\cdot\mathrm{d}$
$T_{ m flo}$	播种到开花所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to start of flowering	1001	$^{\circ}$ d
$T_{ m sen}$	播种到开始衰老所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to start of senescence	1368	$^{\mathrm{c}}\cdot\mathrm{d}$
$T_{ m mat}$	播种到成熟所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to maturity	1781	$^{\circ}$. d
$T_{\rm L-flo}$	开花期有效积温 Effective cumulative temp. of the flowering stage	227	$^{\mathrm{c}}\cdot\mathrm{d}$
WP *	标准水分生产力 Water productivity normalized for ${\it ET}_0$ and ${\it CO}_2$	31.0	$g \cdot m^{-2}$
HI_0	参考收获指数 Reference harvest index	41	%
$P_{ m exp,upper}$	水分胁迫对冠层生长影响上限 SWDT for canopy expansion - upper threshold	0.12	-
$P_{\rm exp,lower}$	水分胁迫对冠层生长影响下限 SWDT for canopy expansion - lower threshold	0.58	-
$P_{ m exp,shp}$	冠层扩张的水分胁迫形状因子 Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion	2.7	-

1.5 模型评价指标

在本研究中,采用以下统计指标来评价模型校准和验证的精度:决定系数 R^2 ,均方根误差 RMSE,标准均方根误差 NRMSE,一致性指数 d 和纳什效率系数 E_{NS} 。

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (S_{i} - \overline{S}) (O_{i} - \overline{O})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (S_{i} - \overline{S})^{2} \sum_{i=1}^{n} (O_{i} - \overline{O})^{2}}$$
 (5)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}$$
 (6)

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2} \times 100/\overline{O}$$
 (7)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|S_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|)^2}$$
 (8)

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2}$$
 (9)

式中, S_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值;n为实测值的个数; \overline{S} 和 \overline{O} 分别为模拟值和实测值的均值。 R^2 ,d与 E_{NS} 均越接近于1表明模型预测能力越好。RMSE的值越小表明模拟误差越小。NRMSE < 10%,表明模拟效果极好;10% < NRMSE < 20%,表明模拟效果分;20% < NRMSE < 30%,表明模拟效果一般;NRMSE > 30%,表明模拟效果差。

表 3 土壤肥料胁迫参数校准表

Table 3 The calibrated parameters of soil fertilizer stress

作物 Crop	校准地点 Calibration location	校准参数 Calibration parameter	校准结果 Result of calibration
		相对生物量 Relative biomass/%	75
		肥料胁迫下的 CC_x CC_x under soil fertility stress/%	85
夏玉米	武功县	冠层衰减程度 Canopy decline	Small
Summer maize	Wugong county	CGC 減少 CGC reduction/%	5
maize	county	CC_x 减少 CC_x reduction/%	10
		平均冠层减少 Average canopy decline/(%·d ⁻¹)	0.04
		WP * 減少 WP * reduction/%	41

1.6 不同降水年型灌溉情景模拟

利用 Pearson—III型分布模型对 1961-2017 年夏玉米生育期降水量进行分析,得到湿润年 1990 年、平水年 1989 年和干旱年 1999 年降水量分别为377.5、283.1 mm 和 207.3 mm。选择苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期 4 个关键生育期制定模拟灌溉方案,土壤初始含水量设置为田间持水量;肥料胁迫设置为100%,即无肥料胁迫;灌溉模拟情景设置为雨养(P0)、灌 1 水(P1~P4)和灌 2 水(P5~P10),灌水定额分别为 60 mm 和 120 mm,按全排列共 11种处理,各灌溉方案见表 4。

2 结果与分析

2.1 模型校准结果

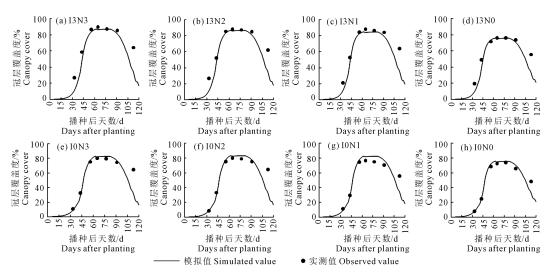
利用 2017 年的试验数据进行校准,试验共有 4 个水分处理,限于篇幅,主要分析充分灌水处理 I3 与雨养处理 I0。不同施氮水平下夏玉米冠层覆盖度校准结果如图 2,地上部生物量校准结果如图 3, 土壤含水量校准结果如图 4。

2017 年各处理的冠层覆盖度和地上部生物量的校准误差统计指标见表 5。所有处理下冠层覆盖度的 R^2 、RMSE 和 E_{NS} 分别为 0.868、11.83%、0.743,表明 AquaCrop 模型能够较为准确地模拟出不同水氮组合情景下冠层覆盖度的动态变化过程。所有处理地上部生物量的 R^2 、RMSE 和 E_{NS} 分别为 0.975、0.970 $t \cdot hm^{-2}$ 、0.968,表明 AquaCrop 模型能够准确地模拟出不同水氮组合情景地上生物量的动态变化过程。所有处理下土壤含水量的 R^2 、RMSE 和 E_{NS} 分别为 0.743、20.1 mm、0.490,表明 AquaCrop 模型能够较为准确地模拟出不同水氮组合情景下土壤含水量的动态变化过程。

表 4 模拟灌溉方案/mm

Table 4 Scenarios of irrigation scheme

灌水方案	2	生育期 Growth period							
Irrigation scheme	苗期 Emergence	拔节 Jointing	抽雄 Tasseling	灌浆 Filling	Irrigation amount				
Р0	0	0	0	0	0				
P1	60	0	0	0	60				
P2	0	60	0	0	60				
Р3	0	0	60	0	60				
P4	0	0	0	60	60				
P5	60	60	0	0	120				
P6	60	0	60	0	120				
P7	60	0	0	60	120				
P8	0	60	60	0	120				
Р9	0	60	0	60	120				
P10	0	0	60	60	120				



注:N0,N1,N2,N3:0%,67%,100%和 133%的推荐施氮量;10,I1,12,I3:雨养,亏水,适水,充分灌水。下同。Note: N0, N1, N2, N3: Application of 0%, 67%, 100% and 133% of the recommended nitrogen rate; 10, I1, I2, I3:Rainfed, deficit, suitable and adequate irrigation. The same below.

图 2 充分灌水与雨养条件下夏玉米冠层覆盖度校准结果

Fig.2 Calibration results of summer maize canopy cover under full irrigation and rainfed conditions.

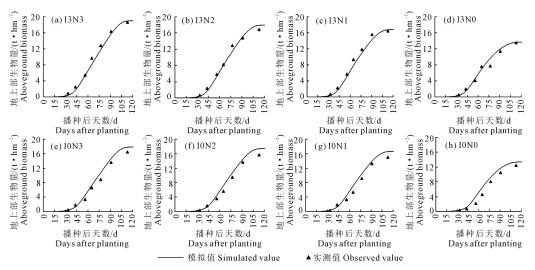


图 3 充分灌水与雨养条件下夏玉米地上部生物量动态模拟

Fig.3 Calibration results of summer maize aboveground biomass under full irrigation and rainfed conditions

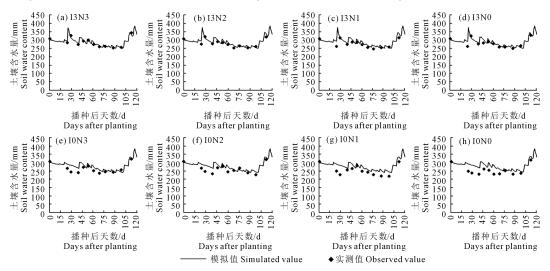


图 4 充分灌水与雨养条件下夏玉米土壤含水量校准结果

Fig.4 Calibration results of summer maize soil water content under full irrigation and rainfed conditions

如图 5(a) 所示,所有试验处理下夏玉米产量的 R^2 、RMSE、NRMSE、d 和 E_{NS} 分别为 0.879、 $0.297 t · hm^{-2}$ 、4.390、0.959 和 0.812。如图 5(b) 所示,最终生物量的 R^2 、RMSE、NRMSE、d 和 E_{NS} 分别为 0.873、 $1.108 t · hm^{-2}$ 、6.977、0.904 和 0.502。各处理的相对误差见表 6,产量的相对误差最小为 0.60%,对应处理为 13N2,最大为 7.63%,对应处理为 11N3;最终生物量的相对误差最小为 1.27%,对应处理为 11N0,最大为 11.04%,对应处理为 10N2。

2.2 模型验证结果

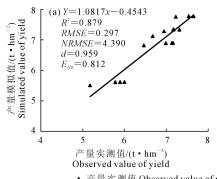
采用 2016 年的试验数据进行模型验证,土壤含

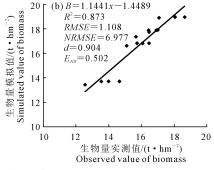
水量的验证结果如图 6 所示,误差统计见表 7,所有试验处理下土壤含水量的 R^2 、RMSE、 E_{NS} 分别为 0.691、15.7 mm 和 0.671。如图 7(a)所示,所有试验处理下夏玉米产量的 R^2 、RMSE、NRMSE、d 和 E_{NS} 分别为 0.919、0.249 t·hm⁻²、4.112、0.977 和 0.915。如图 7(b),最终生物量的 R^2 、RMSE、NRMSE、d 和 E_{NS} 分别为 0.860、0.977 t·hm⁻²、6.407、0.933 和 0.694。各处理的相对误差见表 8,产量的相对误差最小为 1.51%,对应处理为 I3N0,最大为 6.65%,对应处理为 I3N1;最终生物量的相对误差最小为1.24%,对应处理为 I3N1;最终生物量的相对误差最小为1.24%,对应处理为 I3N2,最大为 12.05%,对应处理为 I0N3。

表 5 2017 年不同施氮及灌溉水平下冠层覆盖度、地上部生物量和土壤含水量校准误差统计

Table 5 Calibration error statistics of canopy coverage, biomass and soil water content under different nitrogen and irrigation levels in 2017

		冠层覆	盖度 Canopy o	overage		生物量 Biomass		土壤含	水量 Soil water	content
处理 Treatment		决定系数 R ²	均方根误差 RMSE/%	纳什系数 E _{NS}	· 决定系数 R ²	女 均方根误差 RMSE/(t・hm ⁻²	纳什系数) <i>E_{NS}</i>	决定系数 R ²	均方根误差 RMSE/mm	纳什系数 E _{NS}
	10	0.82	12.93	0.735	0.991	1.056	0.964	0.730	20.7	0.388
NO	I1	0.848	12.34	0.715	0.997	0.907	0.975	0.815	15.6	0.676
N3	I2	0.923	15.31	0.405	0.976	1.225	0.964	0.904	11.3	0.844
I3	I3	0.916	14.26	0.551	0.993	0.847	0.982	0.944	8.5	0.909
10	0.826	12.66	0.755	0.993	1.024	0.965	0.719	22.5	0.832	
NO	I1	0.880	11.46	0.742	0.987	0.948	0.970	0.763	21.0	0.270
N2	I2	0.882	12.85	0.678	0.986	0.905	0.973	0.816	18.4	0.607
	I3	0.927	12.72	0.667	0.989	0.770	0.982	0.838	12.0	0.723
	10	0.895	9.96	0.826	0.987	1.084	0.958	0.738	29.3	0.026
3.7.4	I1	0.867	10.80	0.786	0.998	0.597	0.988	0.785	21.4	0.178
N1	I2	0.912	11.20	0.780	0.996	0.697	0.982	0.718	20.2	0.481
	I3	0.904	12.68	0.704	0.991	0.854	0.978	0.816	15.5	0.553
	10	0.945	6.39	0.928	0.981	1.235	0.925	0.658	31.4	-0.274
NO	I1	0.899	9.28	0.776	0.963	1.377	0.917	0.652	26.6	-0.331
N0	I2	0.864	11.47	0.713	0.976	0.774	0.974	0.747	16.5	0.609
	I3	0.929	10.23	0.721	0.972	0.880	0.960	0.783	15.1	0.644
整体(Overall	0.868	11.83	0.743	0.975	0.970	0.968	0.743	20.1	0.490





▲ 产量实测值 Observed value of yield ◆ 生物量实测值 Observed value of biomass

图 5 2017 年所有灌溉施氮处理下产量(a)和最终生物量(b)校准结果

Fig.5 Calibration results of yield (a) and final biomass (b) under all different nitrogen and irrigation levels in 2017

表 6 2017 年所有灌溉施氮处理下产量、最终生物量校准结果

Table 6 Calibration results of yield and final biomass under all different nitrogen and irrigation levels in 2017

hh	THI .	产	r量 Yield/(t・hm-	²)	生物	刃量 Biomass/(t・hi	m^{-2})	
处理 Treatment		观测值	模拟值	相对误差	观测值	模拟值	相对误差	
		Observed value	Simulated value	Relative error/%	Observed value	Simulated value	Relative error/%	
	10	6.943	7.298	5.11	16.454	17.769	7.99	
N3	I1	7.224	7.775	7.63	17.064	18.940	10.99	
No	I2	7.533	7.796	3.49	18.043	18.997	5.29	
	13	7.649	7.795	1.91	18.630	18.994	1.95	
	10	6.672	7.137	6.97	15.650	17.377	11.04	
370	I1	7.171	7.364	2.69	16.994	17.940	5.57	
N2	12	7.165	7.354	2.64	16.423	17.920	9.12	
	13	7.309	7.353	0.60	16.899	17.919	6.04	
	10	6.463	6.832	5.71	15.087	16.636	10.27	
NI 1	I1	6.986	6.908	1.12	16.058	16.830	4.81	
N1	12	7.132	6.915	3.04	15.718	16.852	7.21	
	13	7.158	6.914	3.41	16.451	16.850	2.43	
	10	5.177	5.516	6.55	12.539	13.436	7.15	
NO	I1	5.781	5.623	2.73	13.531	13.703	1.27	
N0	12	5.998	5.625	6.22	14.639	13.712	6.33	
	13	5.895	5.626	4.56	13.973	13.713	1.86	

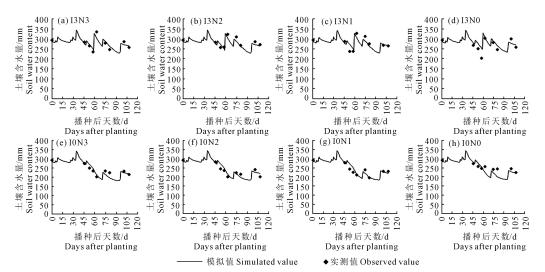


图 6 充分灌水与雨养条件下夏玉米土壤含水量验证结果

Fig.6 Validation results of summer maize soil water content under adequate irrigation and rainfed conditions

表 7 2016 年不同施氮及灌溉水平下 土壤含水量验证误差统计

Table 7 Validation error statistics of soil water content under different nitrogen and irrigation level since 2016

different nitrogen and irrigation level since 2016									
处3	Ħ	土壤含水量 Soil water content							
Treatr		决定系数	均方根误差/mm	纳什系数					
Heati	пени	R^2	RMSE	E_{NS}					
	10	0.761	14.9	0.693					
N3	I1	0.720	15.1	0.446					
113	I2	0.780	13.9	0.729					
	13	0.870	14.8	0.728					
	10	0.773	15.2	0.758					
MO	I1	0.763	15.1	0.478					
N2	I2	0.665	12.8	0.568					
	I3	0.781	12.9	0.622					
	IO	0.750	15.3	0.714					
NI 1	I1	0.778	13.9	0.343					
N1	I2	0.766	13.6	0.620					
	I3	0.742	17.8	0.632					
	IO	0.623	21.6	-0.343					
NO	I1	0.615	15.5	0.434					
N0	I2	0.773	13.2	0.651					
	13	0.720	22.4	0.445					

15.7

0.671

0.691

整体 Overall

2.3 不同降水年型灌溉模拟结果

利用校准后的模型对 3 种不同降水年型进行不同灌溉方案的模拟,夏玉米产量与水分利用效率的模拟结果如图 8、表 9 所示。不同灌溉方案下,湿润年产量在 $7.899 \sim 7.998 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,平水年产量在 $7.349 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。湿润年由于降水量丰沛,雨养和灌溉条件下的水分利用效率基本不变,其模拟值为 $2.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 $2.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;平水年水分利用效率模拟值为 $2.50 \sim 2.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;干旱年水分利用效率模拟值为 $0.86 \sim 2.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3 讨论

3.1 AquaCrop 模型的适用性

本研究利用 AquaCrop 模型对关中地区夏玉米 栽培进行校准和验证,夏玉米产量和地上部生物量 的模拟值与实测值一致性高,模拟误差在可接受范

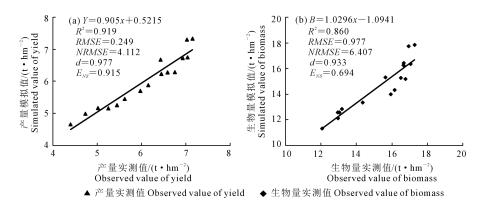


图 7 2016 年不同灌溉施氮处理下产量(a)和最终生物量(b)验证结果

Fig.7 Validation results of yield (a) and final biomass (b) under all different nitrogen and irrigation levels in 2016

表 8 2016 年不同灌溉施氮产量、最终生物量验证结果

Table 8 Validation results of yield and final biomass under all different nitrogen and irrigation levels in 2016

H	TIII	产	r量 Yield/(t・hm-	2)	生物	切量 Biomass/(t・hi	m^{-2})
处理 Treatment		观测值 Observed value	模拟值 Simulated value	相对误差 Relative error/%	观测值 Observed value	模拟值 Simulated value	相对误差 Relative error/%
	10	5.969	5.714	4.27	15.921	14.002	12.05
MO	I1	6.426	6.688	4.08	16.636	16.280	2.14
N3 I2	7.021	7.314	4.17	16.925	17.764	4.96	
	13	7.146	7.344	2.77	17.264	17.866	3.49
	10	5.617	5.461	2.78	14.345	13.355	6.90
I1	I1	6.443	6.243	3.10	16.750	15.196	9.28
N2	I2	6.924	6.740	2.66	17.041	16.372	3.93
	13	7.034	6.760	3.90	16.652	16.446	1.24
	10	5.443	5.269	3.20	13.177	12.846	2.51
NI 1	I1	6.148	5.893	4.15	16.142	14.333	11.21
N1	I2	6.583	6.292	4.42	16.490	15.284	7.31
	13	6.748	6.299	6.65	15.623	15.325	1.91
	10	4.396	4.669	6.21	12.063	11.320	6.16
MO	I1	4.731	4.999	5.66	12.956	12.122	6.44
N0	I2	5.015	5.176	3.21	12.942	12.581	2.79
	13	5.248	5.169	1.51	13.035	12.581	3.48

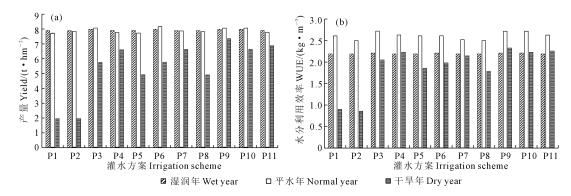


图 8 不同降水年型不同灌溉方案的产量(a)和水分利用效率(b)模拟结果

Fig. 8 Simulated yield (a) and WUE (b) in different irrigation schemes under wet, normal and dry year

围内,且能准确模拟土壤含水量的变化趋势,与国内外的研究成果基本吻合。如倪玲等^[6]评价了AquaCrop模型在黄土塬区的适用性,结果显示夏玉米模拟产量与实测产量间的决定系数 R^2 为 0.927,相对误差在-2.479%~11.182%之间;模拟地上部生物量与实测地上部生物量间的 R^2 为 0.784,模型对产量的模拟效果优于对生物量的模拟,也与本研究结果相似。Abedinpour等^[27]模拟了不同水氮组合

情景下的玉米产量、生物量及水分生产力的变化特征,其中产量 R^2 为 0.96,RMSE 为 0.1 $t \cdot hm^{-2}$, E_{NS} 为 0.98;生物量的 R^2 为 0.9 , RMSE 为 0.75 $t \cdot hm^{-2}$, E_{NS} 为 0.95。 Ran 等 [141] 模拟不同亏缺条件下制种玉米冠层覆盖度的模拟值与实测值的 R^2 为 0.818 , RMSE 为 12.9% , E_{NS} 为 0.811;生物量 R^2 为 0.929 , RMSE 为 1.972 $t \cdot hm^{-2}$, E_{NS} 为 0.903;土壤含水量 R^2 为 0.736, RMSE 为 33.1% , E_{NS} 为 0.364。 这些都表明 AquaCrop

+ ^	不同降水年型不同灌溉方案的产量与水分利用效率模拟结果
= ()	人员终水生剂 人员怨鸿古女的产量与水分利田效率相划先虫

Table 0	Simulated '	viold and	W/HF in	different	irrigation	cahamac	under	wat	normal	and	dry	voor
rabie 9	Simulated	yieia ana	WUL III	amerent	irrigation	scnemes	unaer	wet,	normai	ana	ary	year

灌溉方案	7	左量 Yield/(t・hm⁻²)	水分利用效率 WUE/(kg・m ⁻³)				
Irrigation scheme	湿润年 Wet year	平水年 Normal year	干旱年 Dry year	湿润年 Wet year	平水年 Normal year	干旱年 Dry year		
P0	7.902	7.724	1.985	2.19	2.61	0.90		
P1	7.899	7.837	1.984	2.19	2.50	0.86		
P2	7.998	8.066	5.749	2.21	2.72	2.05		
P3	7.903	7.770	6.618	2.19	2.63	2.23		
P4	7.902	7.724	4.926	2.19	2.61	1.86		
P5	7.998	8.170	5.765	2.21	2.61	1.98		
P6	7.901	7.878	6.629	2.19	2.52	2.15		
P7	7.899	7.837	4.911	2.19	2.50	1.79		
P8	7.998	8.064	7.349	2.21	2.72	2.33		
P9	7.998	8.066	6.637	2.21	2.72	2.23		
P10	7.903	7.770	6.888	2.19	2.63	2.26		

模型可以准确模拟出不同田间管理条件下玉米产量和地上部生物量,说明 AquaCrop 模型可以为关中地区夏玉米田间灌溉和决策提供指导。

与此同时,本文也反映出模型存在一定不足,模型轻微高估了雨养 10 条件下的冠层覆盖度和地上部生物量(如图 2(e)~2(h)与图 3(e)~3(h)),即水分胁迫越严重,模型的模拟误差越大,这与李玥等[18]研究胡麻的结果类似;模型整体高估了土壤含水量,尤其是 2017 年的所有处理(如图 4(a)~4(h)),这与 Ran等[14]的研究结果相似;同时模型低估了衰落期的冠层覆盖度,这是由于 2017 年玉米生育后期降水量过多,日照时数较少,延缓了玉米的衰老,这可能是模型对于衰老期的水分胁迫响应过于敏感[19],模拟的衰老速度过快造成。因此模型对于不同生育期的水分胁迫响应仍需改进[14]。

3.2 针对不同降水年型灌溉方案的制定

不同生育期受旱会对夏玉米的生长发育及产 量造成不同程度的影响[28]。生长初期地上部生长 缓慢,比较耐旱,一般无需灌水,但若长时间遭遇伏 旱,则容易造成弱苗,最终导致大幅减产。玉米进 入拔节期后,植株生长旺盛,此时缺水会引起营养 体生长不良,明显制约夏玉米株高和叶面积的增长 及干物质的积累[29]。抽雄期受旱会导致穗粒数减 少,灌浆期则明显减少百粒重,均会造成减产[19]。 因此,本研究按照夏玉米的生育期实际划分情况, 分别统计3种降水年型在苗期、拔节期、抽雄期和灌 浆期的有效降水量。湿润年4个生育期有效降水量 分别为 206.8、57.6、86.9 mm 和 26.2 mm, 各生育期 无明显水分胁迫:平水年4个生育期有效降水量分 别为 105.7、14.4、131 mm 和 32 mm, 拔节期出现水 分胁迫:干旱年4个生育期有效降水量分别为 129.7、6.5、22.9 mm 和 48.2 mm, 拔节期和抽雄期出 现水分胁迫。

不同降水年型灌溉模拟结果显示: 雨养条件下,湿润年产量最高,但水分利用效率低于平水年,

这是由于湿润年的降水在各生育期分布相对较均匀,各生育期未发生明显的水分胁迫,所以产量最高;湿润年的耗水量为363 mm,大于平水年297.2 mm,而产量相差不大,因此导致水分利用效率较低。

灌 1 水情况下,湿润年和平水年均在拔节期灌水 60 mm 时产量达到最大,分别为 7.998 t·hm⁻²和 8.066 t·hm⁻²,对应的水分利用效率也最大,分别为 2.21 kg·m⁻³和 2.72 kg·m⁻³,这是因为平水年在拔节期出现水分胁迫,此时灌水可以提高产量与水分利用效率。对于干旱年,抽雄期灌水 60 mm 产量最大,为 6.618 t·hm⁻²,对应水分利用效率为 2.23 kg·m⁻³;拔节期灌水 60 mm 的产量略低,为 5.749 t·hm⁻²,对应水分利用效率为 2.05 kg·m⁻³。这是因为干旱年在拔节期和抽雄期缺水严重,在这 2 个生育期灌水均可提高产量,模型模拟结果显示抽雄水获得的产量要高于拔节水,表明模型对于营养生长阶段的水分胁迫响应较为敏感。

灌 2 水情况下,苗期和拔节期各灌水 60 mm,即方案 P5,此时湿润年和平水年的产量最大,分别为7.998、8.170 t·hm⁻²,且灌水日期越延后产量越低,但如果存在拔节期灌水的组合,如方案 P8 和 P9,产量均较其他生育期的灌水组合大。干旱年在拔节期和抽雄期各灌水 60 mm 时(方案 P8)产量最大,为7.349 t·hm⁻²,且水分利用效率也达到最大,为2.33 kg·m⁻³,这些模拟结果都表明在玉米拔节期或抽雄期灌水可提高夏玉米产量,与前人研究成果极为吻合^[28],基本说明了不同灌溉时间和灌溉次数对夏玉米产量的影响。

湿润年灌水后的产量和水分利用效率增加幅度较小,如方案 P2 的产量较雨养条件下的产量仅提高 1.2%,水分利用效率提高不足 1%,因此若能保证出苗整齐,湿润年不灌水也能够获得较高产量和水分利用效率,同时也达到节约水资源的目的。平水年虽然方案 P5 可获得最高产量 8.170 t·hm⁻²,但相较方案 P2 的增幅较小,为 1.3%,且水分利用效

率低于 P2,增加灌水量并没有显著提升产量,反而会降低水分利用效率,造成水资源浪费,因此平水年可在拔节期灌水 60 mm,推荐灌溉方案 P2,可节约 50%的灌溉水资源,产量同样能维持在较高水平。干旱年采用灌溉方案 P8 能够获得最高的产量和水分利用效率,相较于方案 P3,产量和水分利用效率增幅分别为 11%和 4.5%,考虑到干旱年整体降水较少,推荐灌溉方案 P8,即在拔节期和抽雄期各灌水 60 mm,可实现水资源充分利用和作物高产。

4 结 论

AquaCrop 模型可以较好地模拟关中地区不同水氮条件下夏玉米冠层覆盖度、生物量、产量和土壤含水率。通过不同降水年型不同灌溉方案的模拟,依据模拟结果及夏玉米生理需水规律,同时为了实现高产和高水分利用效率,得出不同年型的优化灌溉制度为:若能保证出苗整齐,湿润年可不灌水,同样能够获得较高产量和水分利用效率,同时也达到节约水资源的目的;平水年推荐在拔节期灌水 60 mm,能节约 50%水资源,亦能保证稳产;干旱年推荐在拔节期和抽雄期各灌水 60 mm,可获得高产和高水分利用效率。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [2] 姚德龙,高繁,李志军,等.杨凌地区冬小麦-夏玉米水分供需适配性 分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):115-120,163.
- [3] 吴普特,赵西宁.气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):1-6.
- [4] 朱秀芳,李宜展,潘耀忠,等. AquaCrop 作物模型研究和应用进展 [J].中国农学通报,2014,30(8):270-278.
- [5] 王文佳,冯浩,宋献方.基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬 小麦灌溉制度研究[J].于旱地区农业研究,2013,31(4):1-10+37.
- [6] 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.
- [7] 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):448-459.
- [8] Tavakoli A R, Moghadam M M, Sepaskhah A R. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran [J]. Agricultural Water Management, 2015, 161 (4):136-146.
- [9] Maniruzzaman M, Talukder M S U, Khan M H, et al. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159; 331-340
- [10] Linker R, Ioslovich I, Sylaios G, et al. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: a simulation study with cotton, potato and tomato [J]. Agricultural Water Management, 2015, 163: 236-243.
- [11] 邢会敏,徐新刚,冯海宽,等.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.
- [12] 滕晓伟,董燕生,沈家晓,等.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.
- [13] 张涛,孙伟,张锋伟,等.旱地全膜双垄沟玉米生产的 AquaCrop 模型模拟及管理措施优化[J].应用生态学报,2017,28(3):918-926.
- [14] Ran H, Kang S, Li F, et al. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 438-450.
- [15] Tan S, Wang Q, Zhang J, et al. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 196;99-113.
- [16] Paredes P, Wei Z, Liu Y, et al. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015,152:57-71.
- [17] 李子忠,徐洋,卢宪菊,等.AquaCrop 模型在大葱生物量和土壤贮水量模拟中的应用和验证[J].中国农业大学学报,2011,16(4):59-66.
- [18] 李玥,牛俊义,郭丽琢,等. AquaCrop 模型在西北胡麻生物量及产量模拟中的应用和验证[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 93-103.
- [19] 宋利兵,姚宁,冯浩,等.不同生育阶段受旱对旱区夏玉米生长发育和产量的影响[J].玉米科学,2016,24(1):63-73.
- [20] 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]. Agronmy Journal, 2009, 101(3), 448-459.
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [C] // FAO Irrigation and Drainage paper 56 [J]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998; 19-24.
- [22] 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.
- [23] Van Gaelen H,Tsegay A,Delbecque N,et al. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure [J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 153 (7):1218-1233.
- [24] 马志超,张明学,周仓军,等,关中西部玉米氮磷钾养分丰缺指标及 经济最佳施肥量研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015,43(11):145-151
- [25] 杨宪龙,路永莉,同延安,等.陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量[J].生态学报,2014,34(21):6115-6123.
- [26] 张明,同延安,郭俊炜,等.陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39 (4):152-158,164.
- [27] 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(3):55-66.
- [28] 姜鹏,李曼华,薛晓萍,等.不同时期干旱对玉米生长发育及产量的 影响[J].中国农学通报,2013,29(36):232-235.
- [29] 张玉书,米娜,陈鹏狮,等.土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J].中国农学通报,2012,28(3):1-7.