

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.024

覆膜和灌水处理下土壤水分动态与玉米生长模拟研究

赵 引 毛晓敏 薄丽媛

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用作物模型模拟作物生长过程和产量,是应对气候变化和人类活动的影响、实现农业节水增产的重要途径。覆膜和节水灌溉技术在我国西北旱区农田应用广泛,本研究基于覆膜增温对气积温的补偿效应以及覆膜和冠层截留对降雨入渗的影响对 AquaCrop 模型进行了改进,使其适用于我国西北旱区覆膜制种玉米的模拟。利用 2017 年石羊河流域制种玉米的实测数据对改进模型进行了率定与验证,并模拟预测了未来气温升高和覆膜比变化情景下作物产量及水分利用效率(WUE)的变化规律。结果表明:改进的 AquaCrop 模型能很好地模拟制种玉米生长发育阶段和冠层覆盖率,各处理冠层覆盖率的模拟值与实测值之间的 R^2 均不小于 0.95, RMSE 为 3.9% ~ 10.1%, NRMSE 为 4.9% ~ 15.3%。而在 1m 土层贮水量的模拟上,各处理 R^2 在 0.60 ~ 0.92 之间, RMSE 在 9.5 ~ 17.1 mm 之间, NRMSE 处于 4.4% ~ 8.9% 之间。改进的 AquaCrop 模型在模拟不覆膜高水 M0W1 和 M0W3 处理的制种玉米干物质累积量、产量上模拟效果较差,其他处理的干物质累积量的 R^2 不小于 0.98, RMSE 为 0.64 ~ 1.66 t/hm², NRMSE 为 9.9% ~ 16.7%, 产量的相对误差(RE)为 -13.3% ~ 4.5%, WUE 则表现为除 M0W1 处理外,其他处理模拟效果较优, RE 为 -23.9% ~ 18.1%。未来气温升高对作物产量及提高水分利用效率产生不利的影响。覆膜条件下, 增温 1.6℃ 和 3.3℃ 分别比在实际温度下减产 12.8% 和 20.7%, WUE 降低 3.0% 和 2.1%。不覆膜条件下减产率分别为 13.9% 和 25.1%, WUE 分别降低 3.8% 和 7.6%。覆膜比例为 50% 时,可在保证产量的同时,提高水分利用效率,达到增产节水的效果。

关键词: 土壤水分; 制种玉米; 覆膜; 灌水量; AquaCrop 模型; 情景预测

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0195-10

Simulation of Soil Moisture Dynamics and Seed-maize Growth under Different Mulching and Irrigation Conditions

ZHAO Yin MAO Xiaomin BO Liyuan

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Crop model is an important tool to simulate crop growth and yield, which can provide a way to cope with the impacts of climate change and human activities, and achieve the target of saving water and increasing yield. Film mulching and water-saving irrigation are widely used in the arid regions of Northwest China. Therefore, the purpose was to modify the crop model AquaCrop based on compensating effect of soil temperature increase on effective air accumulation temperature and impacts of film mulching and canopy interception on rainfall infiltration, so as to make it more suitable for the simulation study of mulched seed-maize in arid areas. The modified model was calibrated and validated based on the experimental data of seed-maize in Shiyang River Basin in 2017. Then it was used to predict the variation of crop yield and water use efficiency (WUE) under the scenarios of future temperature increase and mulching ratio change. Results show that the modified AquaCrop can well predict the growth stages and canopy cover. The values of determination coefficient (R^2) of the simulated and measured canopy covers were not less than 0.95, the values of root mean square error (RMSE) were between 3.9% and 10.1%, and the values of normalized root mean square error (NRMSE) were between 4.9% and 15.3%, indicating that the modified AquaCrop had a good simulation for canopy cover. The modified AquaCrop

收稿日期: 2018-05-06 修回日期: 2018-05-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51679234, 91425302)
作者简介: 赵引(1993—),女,博士生,主要从事水文水资源研究, E-mail: zhaoyin0671@163.com
通信作者: 毛晓敏(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事水文水资源与农业水土工程研究, E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

was validated for simulating soil water storage in 0 ~ 1 m soil depth under different treatments with $0.60 < R^2 < 0.92$, $9.5 \text{ mm} < RMSE < 17.1 \text{ mm}$ and $4.4\% < NRMSE < 8.9\%$, respectively. Under treatments M1W1, M1W3, M1W5 and M0W5, the dry matter accumulation was simulated well with $R^2 \geq 0.98$, $0.64 \text{ t/hm}^2 < RMSE < 1.66 \text{ t/hm}^2$, $9.9\% < NRMSE < 16.7\%$, and the yield was validated with $-13.3\% < RE < 4.5\%$. However, the improved AquaCrop had a poor simulation result for the dry matter accumulation and seed-maize yield under treatments M0W1 and M0W3. The WUE was validated well with $-23.9\% < RE < 18.1\%$ except for the full irrigation without mulching (M0W1). The increase of future temperature negatively affected crop yield and water use efficiency. Under the condition of film mulching, when the temperature was increased by 1.6°C and 3.3°C , the yield was decreased by 12.8% and 20.7%, and the WUE was decreased by 3.0% and 2.1%, respectively. While under the condition of non-mulching, the yield was decreased by 13.9% and 25.1%, and the WUE was decreased by 3.8% and 7.6%, respectively. When the percentage of soil surface cover was 50%, it could guarantee the crop yield and improve the water use efficiency so as to realize the target of enhancing yield and saving water.

Key words: soil water; seed-maize; film mulching; irrigation amount; AquaCrop model; scenario prediction

0 引言

作物模型是能对作物的生长、发育、产量形成及其与环境间的动态关系进行定量描述和预测的计算机模拟模型^[1]。我国石羊河流域水资源匮乏,多年平均降雨量低于 200 mm,农业用水占总用水量的 92.57%^[2],这严重制约了该流域作物产量的增加,农业高效用水成为石羊河流域水资源可持续利用的关键。近年来覆膜和节水灌溉技术在石羊河流域作物种植上得到了广泛的应用。国内外已有大量利用作物模型模拟土壤水分状况以及作物生长状况的研究,例如 CERES 模型^[3]、SWAP 模型^[4]、WOFOST 模型^[5-6]、CropSyst 模型^[6]等。AquaCrop 模型是由世界粮农组织(Food and agriculture organization, FAO)研究提出的水分驱动的作物模型。它可以模拟不同的灌溉制度^[7-8]、灌溉方式^[9]、不同作物类型(玉米^[7]、小麦^[10]、棉花^[8]、水稻^[11]、番茄^[12]、马铃薯^[13]和大葱^[14]等)以及覆盖方式^[15-16]等条件下的作物生长发育、水分动态变化和产量等指标,特别适合于受水分限制的干旱区农业需求。覆膜对地温的影响较大,可显著提高地温,明显缩短生育期进程^[17],但 AquaCrop 模型缺乏地温模块,无法从机理上实现地膜覆盖对作物生长发育阶段以及节水增产过程的模拟,这在一定程度上限制了 AquaCrop 模型的应用。刘琦^[16]和刘匡等^[15]分别利用 AquaCrop 模型对覆膜春玉米和冬小麦的生长发育和水分动态变化进行了模拟研究,但模型在覆膜模块只考虑了覆膜对降雨径流和土壤蒸发的影响。而杨宁等^[18]在此基础上考虑覆膜后土壤温度对气温的补偿作用,研究了辽西半干旱区雨养条件下玉米水分利用过程,初步改进了 AquaCrop 模型,为模型的发展提供了新思

路。AquaCrop 模型的研究多集中于参数调整和模型验证,杨宁等^[18]对模型的改进是我国在 AquaCrop 模型应用上的首次突破,其研究还需继续深入。另外,AquaCrop 模型中未考虑覆膜对降雨入渗的影响,仅通过改变地表径流曲线数(C_N)来实现覆膜对降雨径流的影响还不够完善。因此本研究以石羊河流域制种玉米为研究对象,基于覆膜增温对气积温的补偿效应以及覆膜和冠层截留对降雨入渗的影响改进 AquaCrop 模型,调试模型相关参数,利用改进的 AquaCrop 模型对不同覆膜和灌水处理下制种玉米生长发育以及土壤水分动态变化进行模拟研究,并对未来气温变化及覆膜比变化情况下的作物产量及水分利用效率进行模拟预测。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究的实测数据取自 2017 年甘肃省武威市中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站进行的制种玉米试验。试验设置覆膜与水分 2 个因素,覆膜分别为完全覆膜(M1)与不覆膜(M0)2 个水平,水分设置 5 个水平 W1、W2、W3、W4 和 W5,分别为当地传统灌溉定额的 100%、85%、70%、55% 和 40%(当地传统灌溉定额为作物腾发量(ET_c)减去有效降雨量, ET_c 为参考作物腾发量(ET_0)与作物系数(K_c)相乘计算得到, ET_0 利用 Penman - Monteith^[19]公式计算, K_c 参照文献[20]),共 10 个处理。试验分别对不同覆膜和灌水量条件下的土壤水分、温度、作物生长发育阶段、生理指标和产量等进行了监测,试验的具体研究方法、获取实测数据的方法以及作物耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)的计算方法,参考文献[21]的研究。本文仅选取具有

代表性的 M1W1、M1W3、M1W5、M0W1、M0W3 和 M0W5 这 6 个处理对 AquaCrop 模型在石羊河流域制种玉米上的适用性进行模拟分析。

1.2 AquaCrop 模型

1.2.1 AquaCrop 模型原理

AquaCrop 模型通过作物实际耗水量和干物质积累(生物量)、作物产量的相关关系来反映土壤水分对作物生长及产量的影响。为了更准确地评估水分对作物生长发育过程和产量形成的影响程度,模型将作物蒸散发分为棵间蒸发和作物蒸腾两部分,用水分生产效率和累积作物蒸腾量计算地上生物量,最终产量用生物量和收获指数的乘积来表示。模型中用冠层增长系数和冠层衰减系数量化了叶片生长和衰老过程。作物生物量和产量对土壤水分的响应主要通过土壤水分对冠层生长和蒸腾的胁迫参数、对收获指数的胁迫参数等来实现。

1.2.2 模型相关指标的获取

5 cm 土层地温变化可以较为客观地反映覆膜与不覆膜情况下土壤温度的差异^[22]。杨宁等^[18]和肖明等^[23]的研究表明,可以利用 5 cm 土层地温量化覆膜增温对气温的补偿效应,实现 AquaCrop 模型在覆膜模块的改进。齐智娟^[24]对不同深度土层地温和气温进行多元回归分析,建立了地温与气温和土层深度的关系。由于本研究未监测 5 cm 土层地温,拟采用该方法对不同处理下 0、10、20 cm 土层深度处的地温和气温进行回归分析,建立相应的回归方程(表 1)。表中 Y 为地温, X_1 为土层深度, X_2 为气温,可以看出,地温与气温和土层深度的相关性较好, R^2 不小于 0.828。由此可以推算得到 5 cm 土层深度的地温。

表 1 不同处理下地温与气温和土层深度的关系

Tab.1 Relationships of soil temperature with air temperature and soil depth under different treatments

处理	回归方程	R^2
M1W1	$Y=5.874+0.180X_1+0.840X_2-0.014X_1X_2$	0.860
M1W3	$Y=4.982+0.416X_1+0.778X_2-0.020X_1X_2$	0.828
M1W5	$Y=4.045+0.215X_1+0.975X_2-0.018X_1X_2$	0.899
M0W1	$Y=3.761+0.055X_1+0.808X_2-0.006X_1X_2$	0.871
M0W3	$Y=3.455+0.028X_1+0.835X_2-0.005X_1X_2$	0.885
M0W5	$Y=4.848-0.106X_1+0.828X_2-0.001X_1X_2$	0.911

另外,试验监测的指标为叶面积指数,而模型中采用了冠层覆盖率,因此需要进行换算,具体公式为^[25]

$$C=1.005(1-\exp(-0.6LAI))^{1.2}\times 100\%$$

(1)

式中 C ——冠层覆盖率, %
 LAI ——叶面积指数, cm^2/cm^2

1.2.3 覆膜情况下的气积温补偿

依据有效积温效应原理,作物完成某一生育期要求相同的有效积温^[26]为

$$T_{cum}=\sum(T-T_b)$$

(2)

式中 T_{cum} ——有效积温, $^{\circ}\text{C}$
 T ——日均气温或地温, $^{\circ}\text{C}$
 T_b ——作物生育阶段的基点温度, $^{\circ}\text{C}$

覆膜玉米比不覆膜玉米生育期提前,主要是因为覆膜玉米的地积温补偿了相同时间内玉米有效气积温的不足^[18],补偿系数可表示为^[23]

$$K=-\frac{T_{cum-a-M1}-T_{cum-a-M0}}{T_{cum-s-M1}-T_{cum-s-M0-M1}}$$

(3)

式中 K ——玉米增温补偿系数
 $T_{cum-a-M1}$ ——覆膜玉米有效气积温, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{cum-a-M0}$ ——不覆膜玉米有效气积温, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{cum-s-M1}$ ——覆膜玉米 5 cm 土层有效地积温, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{cum-s-M0-M1}$ ——与覆膜同期不覆膜玉米 5 cm 土层有效地积温, $^{\circ}\text{C}$

覆膜地温增加对气温的补偿值^[26]为

$$\Delta T=\frac{K(T_{s-M1}-T_{s-M0})(T_{a-M0}-T_b)}{T_{s-M0}-T_b}$$

(4)

$$T_{a-M1}=T_{a-M0}+\Delta T$$

(5)

式中 ΔT ——覆膜地温增加对气温的补偿值, $^{\circ}\text{C}$
 T_{s-M1} ——覆膜玉米 5 cm 土层日均地温, $^{\circ}\text{C}$
 T_{s-M0} ——不覆膜玉米 5 cm 土层日均地温, $^{\circ}\text{C}$
 T_{a-M1} ——覆膜玉米日均气温, $^{\circ}\text{C}$
 T_{a-M0} ——不覆膜玉米日均气温, $^{\circ}\text{C}$

由此计算出播种-出苗和出苗-抽穗期的补偿系数,如表 2 所示。因此, T_{a-M1} 可作为地膜覆盖气温的参数输入到 AquaCrop 模型。

表 2 覆膜玉米气积温补偿系数

Tab.2 Compensation coefficient for accumulated air temperature of mulched maize

	M1W1	M1W3	M1W5
播种-出苗	1.955	3.055	3.176
出苗-抽穗	0.511	1.743	0.643

1.2.4 覆膜情况下的降雨入渗

由于试验中采用了膜下滴灌的方式,覆膜对灌溉入渗影响较小。然而覆膜对降雨入渗有明显影响,这在 AquaCrop 模型中未给予充分考虑,仅通过改变 C_A 来实现覆膜对降雨径流的影响还不够完善。赵引等^[21]通过对农田水量平衡的监测和分析发现,由于冠层截留等因素的影响,不覆膜条件下降雨入渗百分比也低于 100%。因此,本文利用赵引等^[21]

得出的覆膜和不覆膜条件下典型单次降雨的降雨入渗百分比,计算得到各次降雨入渗量作为气象数据中的降雨输入值。

1.2.5 AquaCrop 模型主要修正参数

选取具有代表性的 M1W1、M1W3、M1W5、M0W1、M0W3、M0W5 处理对改进的 AquaCrop 模型在模拟石羊河流域制种玉米的土壤水分动态以及作物生长及产量的适用性进行分析。考虑到充分灌溉和严重亏水灌溉以及覆膜与不覆膜处理情况,随机选取了 M1W1、M1W5 和 M0W5 处理对改进的 AquaCrop 模型进行率定,以 M0W1、M0W3 和 M1W3 处理验证模型。模型输入数据包括:气象数据、作物参数数据、田间管理数据、土壤参数、模型运行初始条件和用于模拟效果评价的田间试验监测数据。在参数调整过程中,依据参数默认值和实际情况校正模型中的参数,部分参数值如表 3 和表 4 所示。

表 3 AquaCrop 模型作物参数

Tab.3 Main crop parameters in AquaCrop model	
参数	数值
初始冠层覆盖率/%	0.65
播种-出苗 GDD/(℃·d)	85
播种-最大冠层覆盖率 GDD/(℃·d)	700
播种-最大根深 GDD/(℃·d)	1 249
播种-冠层衰老 GDD/(℃·d)	1 267
播种-成熟 GDD/(℃·d)	1 668
播种-开花 GDD/(℃·d)	816
经济产量持续时间 GDD/(℃·d)	630
授粉期持续时间 GDD/(℃·d)	213
最大根深/m	1.00
蒸腾系数	130
标准化水分利用效率/(g·m ⁻²)	21
参考收获指数/%	33

表 4 AquaCrop 模型部分管理与土壤参数

Tab.4 Main management and soil parameters in AquaCrop model		
参数	不覆膜	覆膜
管理参数	地表覆盖类型	塑料地膜
	地表覆盖度/%	0 70
土壤参数	C _N	65 85
	土壤表层 0.04 m 的蒸发量/mm	7 2

1.3 AquaCrop 模型的验证与评价方法

通过比较覆膜与灌水处理下制种玉米生长发育阶段、冠层覆盖率、生物量和土壤贮水量、产量和 WUE 等参数的模拟值和实测值,来评价模型模拟的效果。验证指标为相对误差 (RE)、均方根误差 (RMSE)、标准均方根误差 (NRMSE) 和决定系数 (R²)。

$$R_E = \frac{S_i - M_i}{M_i} \times 100\%$$

(6)

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}$$

(7)

$$N_{RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}}{\overline{M}}$$

(8)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M})(S_i - \overline{S}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \overline{S})^2}$$

(9)

式中 M ——观测值 S ——模拟值
 $\overline{M}$ ——观测值的平均值
 $\overline{S}$ ——模拟值的平均值
 n ——观测值的个数

RE 越小表示模拟精度越高;RMSE 越小表明模拟精度越高;NRMSE 值越接近 0,表示模拟精度越高,当 NRMSE 小于 10%,模拟效果很好;当 NRMSE 处于 10% ~ 20% 之间,表明模拟效果好;当 NRMSE 处于 20% ~ 30% 之间,表明模拟效果合理;当 NRMSE 大于 30%,表明模拟效果差^[27]。R²越接近于 1,表明模型的解释程度越高。

2 结果与讨论

2.1 制种玉米生长发育阶段的模拟

表 5 和表 6 分别为制种玉米生长发育阶段的实测值和模拟值。本研究在覆膜条件改进的 AquaCrop 模型模拟得到的制种玉米生长发育阶段如表 6 所示,实际记录的制种玉米生长发育阶段如表 5 所示。AquaCrop 模型中对生长发育阶段的划分与实际监测无法一一对应,但经分析可知,改进后的模型模拟值与实测值是相符的。其中改进的 AquaCrop 模型中 9 月 8 日制种玉米成熟,这与实际完全一致。而模拟得到的出苗期为 5 月 5 日,比实际出苗期推迟 2 d,模拟的达到最大冠层覆盖率的时间为 7 月 15 日,实际虽未记录该时期,但 7 月 16 日开始进入抽穗期,基本已达到冠层最大覆盖率,因此模拟的达到冠层覆盖率的时间与实际相符。改进的 AquaCrop 模型模拟得到的冠层开始衰老的时间为 8 月 6 日,而实际记录 8 月 1 日进入灌浆期,灌浆期制种玉米叶片开始干枯脱落,冠层覆盖率减小,冠层衰老,这与模拟值也是相符的。由此可见,改进的 AquaCrop 模型能够很好地模拟覆膜制种玉米生长发育阶段。

表 5 覆膜制种玉米生长发育阶段实测值

Tab.5 Measured values of seed-maize growth stages under film mulching conditions						
处理	播种期	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
覆膜(M1)	4月24日—5月2日	5月3日—6月10日	6月11日—7月15日	7月16日—7月31日	8月1日—8月21日	8月22日—9月8日

表 6 覆膜制种玉米生长发育阶段模拟值

Tab.6 Simulated values of seed-maize growth stages under film mulching conditions					
模型	播种	出苗	达到最大冠层覆盖率	冠层开始衰老	成熟
改进 AquaCrop	4月24日	5月5日	7月15日	8月6日	9月8日
未改进 AquaCrop	4月24日	5月11日	7月23日	8月14日	9月18日

另外,表6也列出了 AquaCrop 模型在未改进的情况下模拟得到的覆膜制种玉米生长发育阶段。覆膜后地温增加,作物生育期提前,而原 AquaCrop 模型本身未考虑覆膜地温的影响,模拟得到的生长发育阶段与实际相比偏差较大。其中模拟得到的制种玉米成熟期较实际推迟了 10 d,苗期推迟了 8 d。达到最大冠层覆盖率的时间较实际进入抽穗期晚 7 d,冠层衰老的时间较实际进入灌浆期的时间晚 13 d。可见,原模型模拟的制种玉米生长发育阶段比实际推迟 7~13 d,模拟效果较差。

2.2 冠层覆盖率的率定与验证

图1为制种玉米冠层覆盖率模拟值与实测值的比较结果。从图中可以看出,覆膜玉米与不覆膜玉米在生育期内冠层覆盖率模拟值与实测值的变化趋势基本一致。苗期和拔节期冠层覆盖率迅速上升,抽穗期叶片全部展开,达最大冠层覆盖率,进入灌浆期叶片脱落,冠层覆盖率逐渐下降。整体来说,各处理决定系数 R^2 均不小于 0.95, RMSE 为 3.9%~

10.1%, NRMSE 为 4.9%~15.3%。还可以看出,覆膜玉米模拟效果较不覆膜玉米优,覆膜条件下高灌水较低灌水拟合效果优,而不覆膜则相反。这与以往的研究结果类似,刘匡等^[15]在小麦上的研究表明,覆膜条件下, R^2 达 0.86 以上, NRMSE 在 2.9%~3.4% 范围内,不覆膜 R^2 大于 0.88, NRMSE 为 3.7%~11.9%。THEODOREC 等^[25]和 GREAVES 等^[7]研究了不同灌水条件下 AquaCrop 模型的模拟效果, R^2 均在 0.90 以上, RMSE 分别在 4.76%~13.59% 和 6.41%~14.96% 之间。但杨宁等^[18]的研究结果为 R^2 大于 0.90, RMSE 为 13%~39%, AMIRI^[11]在不同水肥处理下的模拟结果表明, R^2 为 0.66~0.98, NRMSE 在 9%~45% 之间,模拟效果相对较差。本研究各处理模拟结果均在合理的误差范围内, AquaCrop 模型能很好地模拟制种玉米冠层覆盖率。

2.3 干物质累积量的率定与验证

图2为制种玉米干物质累积量的模拟情况。总

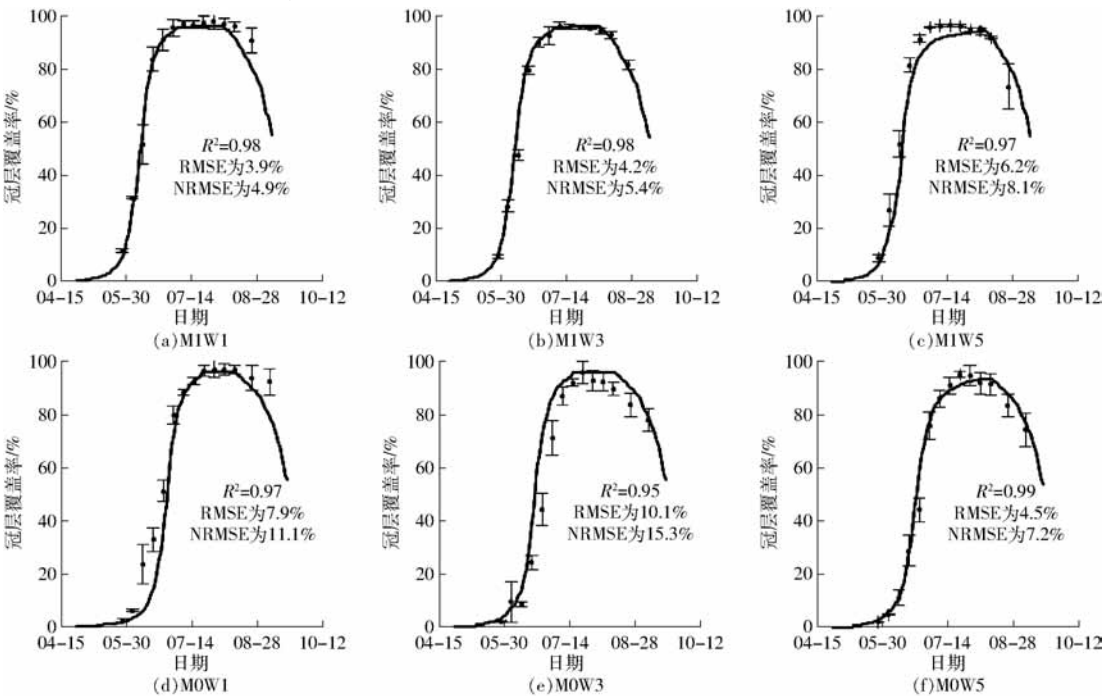


图 1 覆膜与不覆膜处理下制种玉米冠层覆盖率的模拟结果

Fig.1 Simulation results of seed-maize canopy cover under film mulching and non-mulching conditions

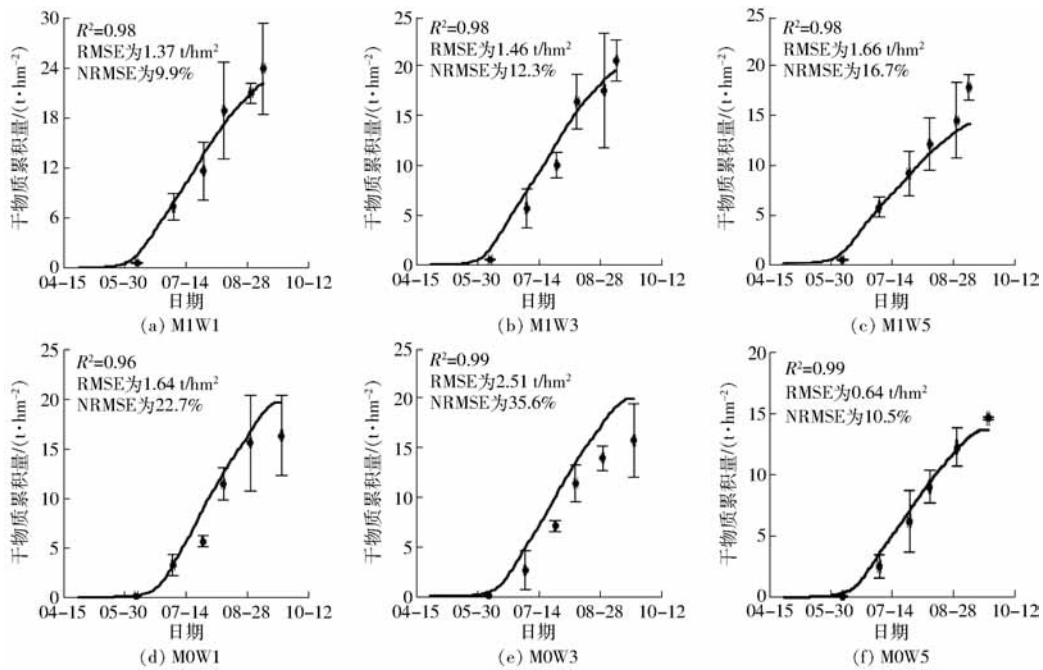


图2 覆膜与不覆膜处理下制种玉米干物质累积量的模拟结果

Fig.2 Simulation results of seed-maize dry matter accumulation under film mulching and non-mulching conditions

体来说,覆膜玉米干物质累积量较不覆膜玉米高,且灌水量越多,干物质累积量越多。干物质累积量模拟值大于实测值,这是因为模型无法考虑重茬、病虫害等因素的影响,难以将实际情况中各种不确定条件计算在内。AquaCrop 模型较高地估计了制种玉米干物质累积量,这与许多研究者的结论一致^[15,25]。干物质累积量模拟结果的决定系数 R^2 均不小于 0.96,覆膜条件下,W1、W3 和 W5 灌水处理的 RMSE 分别为 1.37、1.46、1.66 t/hm²,NRMSE 分别为 9.9%、12.3%和 16.7%。而不覆膜条件下,W1、W3 和 W5 灌水处理的 RMSE 分别为 1.64、2.51、0.64 t/hm²,NRMSE 分别为 22.7%、35.6%和 10.5%。可见,覆膜条件下,高水分处理较低水分处理模拟效果优,这与 MALIK 等^[28]和 GREAVES 等^[7]的研究结果一致。在

灌水量较充分的 W1 和 W3 处理下,覆膜较不覆膜拟合效果优,而在严重亏水的 W5 处理下,覆膜较不覆膜模拟效果较差。而刘匡等^[15]的研究结果表明,覆膜与不覆膜对干物质累积量的模拟效果基本没有差异,这是因为在模拟覆膜与不覆膜时根据记录的物候期设定了两套参数值,主观性较强。而本研究对不覆膜的模拟忽略了不同水分处理引起的土壤温度的变化,高水分处理土壤温度较低水分处理温度低,而模型中 3 个水分处理采用了相同的温度,导致 M0W1 和 M0W3 模拟效果相对较差。

2.4 1 m 土层贮水量的率定与验证

图3 为制种玉米 1 m 土层贮水量的模拟情况。1 m 土层贮水量模拟值与实测值的变化趋势基本吻合,在灌溉或者降雨之后,贮水量增加,随后缓慢减

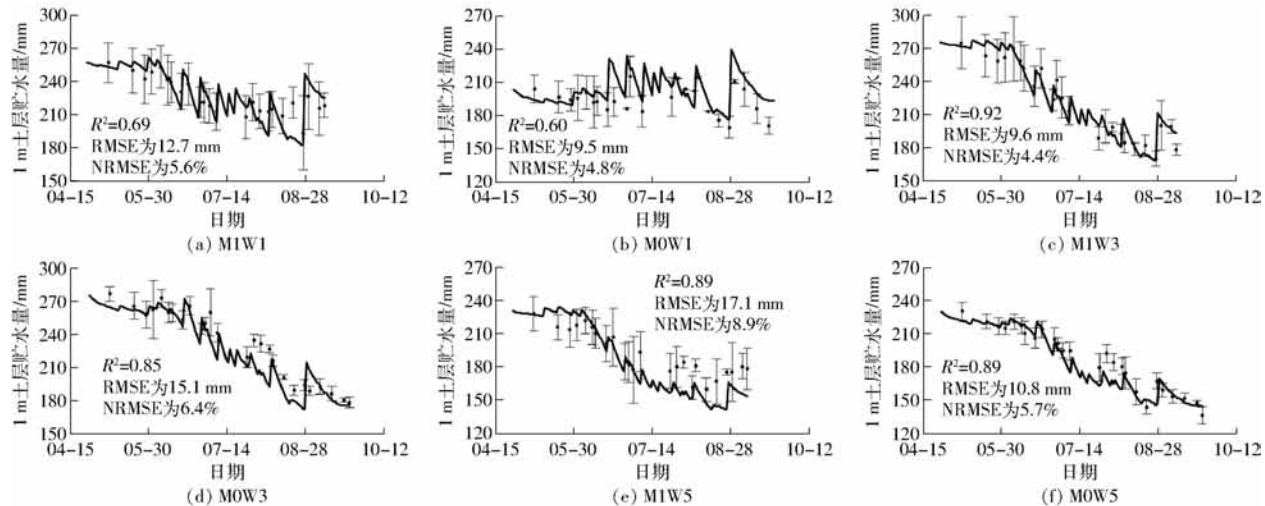


图3 覆膜与不覆膜处理下制种玉米 1 m 土层贮水量的模拟结果

Fig.3 Simulation results of soil water storage in 0 ~ 1 m depth under film mulching and non-mulching conditions

少。各处理 R^2 在 0.60 ~ 0.92 之间, RMSE 在 9.5 ~ 17.1 mm 之间, NRMSE 处于 4.4% ~ 8.9% 之间, 说明 AquaCrop 在模拟制种玉米 1 m 土层贮水量上拟合度较高。刘匣等^[15]的研究结果为 R^2 为 0.77 ~ 0.94, NRMSE 在 2.8% ~ 5.5% 之间, 表明 AquaCrop 模型在覆膜与不覆膜情况下的模拟效果均较好, ANDARZIAN 等^[29]认为充分灌溉与非充分灌溉条件下模型均能准确地模拟土壤贮水量, 结果为 R^2 大于 0.86, NRMSE 为 4% 左右, 这与本研究结果相似。

2.5 制种玉米产量和水分利用效率的率定与验证

从表 7 可看出, 相同覆膜条件下, 制种玉米产量

和 ET 的模拟值和实测值均随灌水量的增加而增加, 其中不覆膜条件下, 实际 M0W1 和 M0W3 产量较 M0W5 低, 这是因为试验收获时当地制种玉米的生育期(参照覆膜情况)已结束, 但 M0W1 和 M0W3 由于未覆膜而生育期延长, 并未达到完全成熟(M0W5 达到成熟与其亏水导致生育期提前有关), 因此未成熟测产可能导致产量偏低, 且模拟值和实测值均表现为 M0W3 处理的产量高于 M0W1 处理。制种玉米实际的水分利用效率(WUE)随灌水量的增加而降低, 而各灌水处理下 WUE 的模拟值差别不大, 且覆膜玉米 WUE 显著高于不覆膜($P < 0.05$)。

表 7 制种玉米产量与 WUE 的模拟值与实测值
Tab.7 Simulated and measured values for seed-maize yield and WUE

处理	产量			ET			WUE		
	实测值/ (t·hm ⁻²)	模拟值/ (t·hm ⁻²)	RE/%	实测值/ mm	模拟值/ mm	RE/%	实测值/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	模拟值/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	RE/%
M1W1	7.19 ^a	7.52	4.5	428.1 ^b	423.4	-1.1	16.79 ^{bc}	17.75	5.7
M1W3	6.83 ^{ab}	6.72	-1.7	345.8 ^d	375.2	8.5	19.76 ^{ab}	17.90	-9.4
M1W5	5.68 ^{bcd}	4.92	-13.3	245.0 ^f	279.1	13.9	23.17 ^a	17.64	-23.9
M0W1	4.97 ^d	6.67	34.1	445.2 ^a	413.8	-7.1	11.17 ^d	16.11	44.3
M0W3	5.13 ^{cd}	6.79	32.3	362.6 ^e	406.2	12.0	14.15 ^{cd}	16.72	18.1
M0W5	5.33 ^{cd}	4.79	-10.3	269.1 ^e	299.3	11.2	19.82 ^{ab}	15.99	-19.3

注: 表中同一列数字后的不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

整体上来看, 各处理下制种玉米 ET 的模拟效果较优, RE 为 -7.1% ~ 13.9%。除 M0W1 和 M0W3 处理外, 制种玉米产量模拟效果较优, RE 为 -13.3% ~ 4.5%。WUE 则表现为除 M0W1 处理外, 其他处理模拟效果较好, RE 为 -23.9% ~ 18.1%。DARKO 等^[12]的研究表明, 高水处理产量相对误差较低水处理小, 这与本研究在覆膜情况下的结果一致。而 GREAVES 等^[7]认为, 在不同水分处理下产量的相对误差均较小, 在 10% 以内。AquaCrop 模型可以模拟制种玉米产量、ET 和 WUE, 但由于测量数据的质量、数据处理方法、灌溉条件、作物生长环境和耕作条件等的不同, 实测值与模拟值的大小关系不能得到一致的结论^[15]。

3 情景预测与分析

未来气候变化为西北地区的粮食生产既带来了机遇, 也带来了挑战。未来全球气候变暖已成为不争的事实, 对灌溉农业十分不利^[30]。本文以 M1W1 和 M0W1 的模拟结果为基础, 利用率定后的 AquaCrop 模型预测大气温度和地膜覆盖率的变化对作物生长、产量和 WUE 的影响。

3.1 温度变化情景下的影响

政府间气候变化委员会(IPCC)提出的 SPES 排

放情景中的 A2 情景显示, 在我国西北地区 2011—2040 年增温幅度达 1.6℃, 2041—2070 年将达 3.3℃^[30]。根据表 1 所示的回归方程计算出温度变化情况下覆膜与不覆膜 5 cm 土层地温, 根据式(4)计算地膜增温对气温的补偿值, 进而得到 AquaCrop 模型的气温输入参数。温度升高, 光合作用减弱, 呼吸作用增强, 呼吸消耗明显增多, 干物质积累量明显下降。在生育后期高温使玉米植株过早衰亡, 提前结束生育进程而进入成熟期, 使灌浆时间缩短, 也会使干物质积累量和产量下降^[31]。如图 4 所示, 覆膜条件下, 当温度为当前实际温度时, 制种玉米产量为 7.52 t/hm², 温度增加 1.6℃和 3.3℃时, 产量分别为 6.55 t/hm²和 5.96 t/hm²。而在不覆膜条件下, 当温度为当前实际温度时, 制种玉米产量为 6.67 t/hm², 温度增加 1.6℃和 3.3℃时, 产量分别为 5.74 t/hm²和 4.99 t/hm²。可见, 覆膜条件下增温 1.6℃和 3.3℃分别比在实际温度下减产 0.97、1.56 t/hm², 减产率为 12.8% 和 20.7%。不覆膜条件下增温 1.6℃和 3.3℃分别比在实际温度下减产 0.93、1.68 t/hm², 减产率分别为 13.9% 和 25.1%, 干物质积累量也有类似的结论, 说明覆膜与不覆膜制种玉米的产量和干物质积累量均随着未来气温的升高而减少, 这与许多研究的结论类似^[32-35], 尚宗波^[32]认

为,未来气温变化使玉米减产率在 5% ~30% 波动,温度增加 4.5℃ 时,玉米产量降低 29.9%。本研究结果表明,WUE 也随着温度的升高而降低,覆膜条

件下,增温 1.6℃ 和 3.3℃ 的 WUE 分别比实际温度降低 3.0% 和 2.1%,而不覆膜条件下,则分别降低 3.8% 和 7.6%。未来气温升高对作物产量及提高

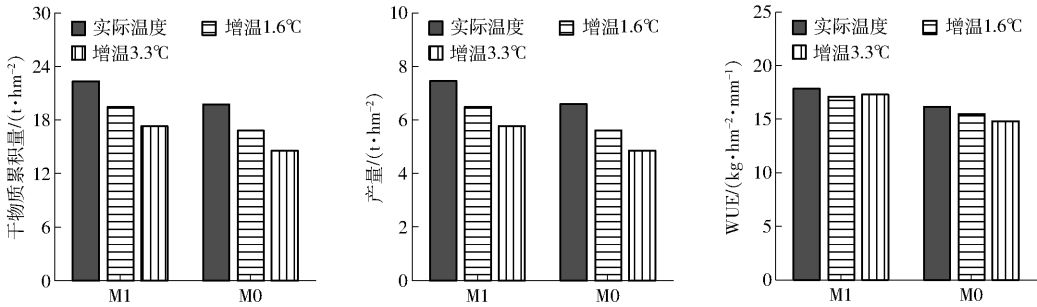


图4 温度变化情景下制种玉米干物质累积量、产量和 WUE 的模拟值

Fig.4 Simulated values of dry matter accumulation, yield and WUE for scenarios with temperature change

水分利用效率产生不利的影响。

3.2 覆膜比变化情景下的影响

不同覆膜比情景下,地膜增温对气温的补偿值和降雨入渗百分比按覆膜比对其呈线性影响近似计算。为了给当地生产实践提供依据,分别以 M1W1 和 M0W1 的模拟结果为基础,模拟覆膜比为 50% 和 20% 情况下作物产量及水分利用效率的变化。

图 5 中 M1、M0 分别表示以 M1W1、M0W1 为基础得到不同覆膜比情况下的作物产量和水分利用效

率。在覆膜和不覆膜条件下,干物质累积量和产量均随着覆膜比的减小而增加,WUE 随着覆膜比的减小而减小。覆膜条件下覆膜比为 50% 和 20% 分别比实际覆膜(覆膜比 70%)增产 0.8% 和 2.7%,WUE 分别降低 1.7% 和 3.2%。不覆膜条件下,覆膜比为 50% 和 20% 分别比实际覆膜(覆膜比 0)减产 1.9% 和 0.9%,WUE 分别提高 4.7% 和 1.8%。因此,覆膜比例为 50% 时,可在保证产量的同时,提高水分利用效率,达到增产节水的效果。

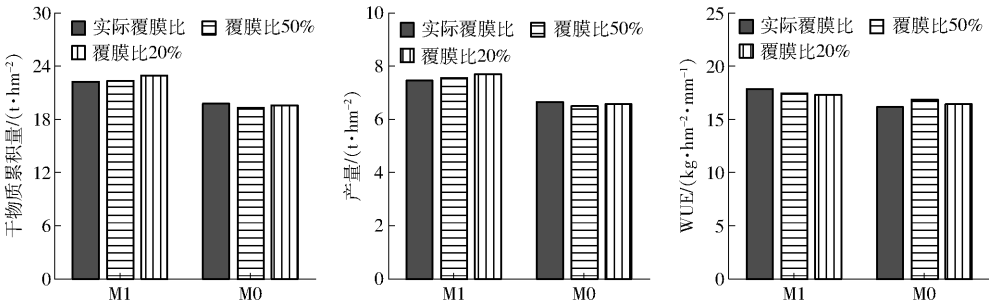


图5 覆膜比变化情景下制种玉米干物质累积量、产量和 WUE 的模拟值

Fig.5 Simulated values of seed-maize dry matter accumulation, yield and WUE for scenarios with different mulching ratios

4 结论

(1)改进的 AquaCrop 模型可以模拟石羊河流域制种玉米生长发育阶段、冠层覆盖率、干物质累积量、1 m 土层贮水量、产量和 WUE,利用 AquaCrop 模型可为当地作物地膜覆盖的生产力做初步的预测和评估。

(2)未来气温升高对作物产量及提高水分利用

效率产生不利的影响。覆膜条件下,增温 1.6℃ 和 3.3℃ 分别比在实际温度下减产 12.8% 和 20.7%,WUE 降低 3.0% 和 2.1%。不覆膜条件下减产率分别为 13.9% 和 25.1%,WUE 分别降低 3.8% 和 7.6%。覆膜比变化情景下的模拟预测结果表明,覆膜比为 50% 时,可在保证产量的同时,提高水分利用效率,达到增产节水的效果。

参 考 文 献

1 SINCLAIR T R, SELIGMAN N. Criteria for publishing papers on crop modeling[J]. Field Crops Research, 2000, 68(3): 165 – 172.

2 马黎华, 康绍忠, 栗晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 125 – 130.

MA Lihua, KANG Shaozhong, SU Xiaoling. Study on evolution and its driving forces of water utilization structure of Shiyang River Basin in Northwest Arid Areas[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2008, 26(1): 125 – 130. (in Chinese)

3 马雯雯. 改进 CERES – Rice 模型模拟覆膜旱作水稻生长[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.

- MA Wenwen. Rice growth simulation under film mulching in dryland through improving CERES – Rice model[D]. Beijing:China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 4 郭思怡. 基于 SWAP 模型的稻田节水增产灌溉模式研究[J]. 安徽农业科学, 2015(3): 92 – 94.
- GUO Siyi. Water saving and yield increasing irrigation mode in paddy field based on SWAP model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015(3): 92 – 94. (in Chinese)
- 5 黄健熙,贾世灵,马鸿元,等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222 – 228.
- HUANG Jianxi, JIA Shiling, MA Hongyuan, et al. Dynamic simulation of growth process of winter wheat in main production areas of China based on WOFOST model [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 222 – 228. (in Chinese)
- 6 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, 2014, 101(3): 509 – 521.
- 7 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 – 575.
- 8 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.
- 9 杜文勇,何雄奎,SHAMAILA Z,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.
- DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 174 – 178. (in Chinese)
- 10 JIN X L, FENG H K, ZHU X K, et al. Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain[J]. Plos One, 2014, 9(1): e86938.
- 11 AMIRI E. Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2016, 80(3): 396 – 406.
- 12 DARKO R O, YUAN S Q, YAN H F, et al. Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(3): 104 – 110.
- 13 MONOOYO F, CAMARGO D, ORTEGA J F, et al. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164(Part2): 267 – 280.
- 14 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.
- LI Zizhong, XU Yang, LU Xianju, et al. Evaluation of the AquaCrop model for simulating biomass for Chinese green onion and soil water storage[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(4): 59 – 66. (in Chinese)
- 15 刘匣,丁奠元,张浩杰,等. 覆膜条件下对 AquaCrop 模型冬小麦生长动态和土壤水分模拟效果的评价分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(10): 1838 – 1851.
- LIU Xia, DING Dianyuan, ZHANG Haojie, et al. 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. (in Chinese)
- 16 刘琦. 利用 AquaCrop 模型模拟覆膜春玉米耗水和产量[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.
- LIU Qi. Simulation water use and yield of piastic film muched spring maize with AquaCrop model[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- 17 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 88 – 94.
- WANG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 88 – 94. (in Chinese)
- 18 杨宁,孙占祥,张立桢,等. 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(增刊1): 122 – 132.
- YANG Ning, SUN Zhanxiang, ZHANG Lizhen, et al. Simulation of water use process by film mulched cultivated maize based on improved AquaCrop model and its verification [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 122 – 132. (in Chinese)
- 19 ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation & Drainage Paper 56, 1998.
- 20 姜雪连. 西北旱区制种玉米父本母本耗水特性及蒸发蒸腾量估算方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
- JIANG Xuelian. Characteristics of water consumption of female and male parents and evaportranspiration modeling of maize for seed production in an arid region of northwest China[D]. Beijing:China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 21 赵引,毛晓敏,段萌. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 275 – 284. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180832&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.032.
- ZHAO Yin, MAO Xiaomin, DUAN Meng. Effects of film mulching and irrigation amount on farmland water-heat dynamics and growth of seed-maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 275 – 284. (in Chinese)

- 22 员学锋. 保墒灌溉的节水增产机理及其效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
YUAN Xuefeng. Study on the mechanism of water-saving, increasing production and its effect under moisture conserving irrigation [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2006. (in Chinese)
- 23 肖明, 钟俊平, 赵黎. 棉田土壤温度与气温的关系及膜地增温效应对有效气积温的补偿作用的研究[J]. 新疆农业大学学报, 1998, 21(4): 257–261.
XIAO Ming, ZHONG Junping, ZHAO Li. Studies on the correlation between cotton soil temperature and air temperature, and the compensating action of soil temperature increase in the mulched cotton field on effective air accumulation temperature [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 1998, 21(4): 257–261. (in Chinese)
- 24 齐智娟. 河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D]. 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.
QI Zhijuan. Soil water, heat and salt transport and simulation under mulched drip irrigation for corn of saline soil in Hetao Irrigation District[D]. Yangling: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2016. (in Chinese)
- 25 THEODORE H, LEE H, PASQUALE S, 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.
- 26 ZHANG L, WERF W V D, CAO W, et al. Development and validation of SUCROS – Cotton: a potential crop growth simulation model for cotton[J]. NJAS—Wageningen Journal of Life Sciences, 2009, 56(1): 59–83.
- 27 JAMIESON P D, PORER J R, WILSON D R. A test of computer simulation model ARC – WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. Field Crops Research, 1991, 27(4): 337–350.
- 28 MALIK A, SHAKIR A S, AIMAL M, et al. Assessment of AquaCrop model in simulating sugar beet canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan [J]. Water Resources Management, 2017, 31(13): 4275–4292.
- 29 ANDARZIAN B, BANNAYAN M, STEDUO P, et al. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 1–8.
- 30 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 469.
- 31 陈朝辉, 王安乐, 王娟娟, 等. 高温对玉米生产的危害及防御措施[J]. 作物杂志, 2008(4): 90–92.
CHEN Chaohui, WANG Anle, WANG Jiaojuan, et al. Influence of high temperature on growth and development of maize[J]. Crops, 2008(4): 90–92. (in Chinese)
- 32 尚宗波. 全球气候变化对沈阳地区春玉米生长的可能影响[J]. 植物学报, 2000, 42(3): 300–305.
SHANG Zongbo. The potential impacts of global climate change on spring maize growth in Shenyang[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(3): 300–305. (in Chinese)
- 33 李晶, 付驰, 李双双, 等. 东北春小麦区 AquaCrop 模型模拟验证及春小麦生产力初步估测[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 69–72.
LI Jing, FU Chi, LI Shuangshuang, et al. The simulation for northeast spring wheat productivity based on the AquaCrop model and modeling verification[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 69–72. (in Chinese)
- 34 SODDU A. Climate variability and durum wheat adaptation using the AquaCrop model in southern Sardinia[C]//Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil – Plant – Atmosphere System: Applications and Challenges, 2013.
- 35 金之庆, 葛道阔, 郑喜莲, 等. 评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响[J]. 作物学报, 1996, 22(5): 513–524.
JIN Zhiqing, GE Daokuo, ZHENG Xilian, et al. Assessing the potential impacts of global climate change on maize production in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(5): 513–524. (in Chinese)