



基于 AquaCrop 模型的马铃薯灌溉制度优化研究

金建新, 黄建成, 桂林国

(宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘要 通过评价 AquaCrop 模型对马铃薯的生长发育、土壤水分动态变化、产量及水分利用效率的模拟效果,为 AquaCrop 模型在宁夏中部干旱带马铃薯种植的应用提供科学方法和理论依据。试验设置 5 d、7 d、10 d、13 d 和 15 d 共 5 个灌水周期,于 2018 年在宁夏中部干旱带进行田间试验,对马铃薯冠层覆盖度、地上生物量、土壤储水量、产量及其构成指标进行测定。结果表明,AquaCrop 模型可较好地模拟马铃薯冠层覆盖度的变化、地上生物量和土壤储水量,其实测值和模拟值的相对误差(RE)为 0.06%~7.51%、0.95%~13.33% 和 0.15%~4.35%,均方根误差(RMSE)为 1.04%~3.36%、0.092~0.335 t/hm²、1.68~4.1 mm;马铃薯产量实测值和模拟值 RE 为 0.10%~2.22%,RMSE 为 294.45 kg/hm²,腾发量和水分利用效率等指标的模拟也有类似的结果,表现出较好的一致性,但 AquaCrop 模型在灌水量较大或者较小时对各指标的模拟效果较差。总体来看,AquaCrop 模型对各指标的模拟结果均较好,其结果可作为马铃薯适宜生长区域划分及特定条件下产量的预测。

关键词 灌水量; AquaCrop 模型; 马铃薯; 生长; 模拟

中图分类号 S274.1

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)08-1250-09

马铃薯是中国重要的粮食作物,具有适应性广、营养丰富、加工用途多、增产增收潜力大、种植效益高等特点,中国是一个人口大国,虽然粮食生产能力大幅提高,但人均耕地面积逐年减少,粮食危机依然存在,因此,大力发展马铃薯产业对确保粮食安全、促进农民增收、振兴农村区域经济具有重要的战略意义^[1]。近年来,马铃薯种植面积逐年扩大,2017 年已达 0.08 亿 hm²,全国已形成了内蒙、甘肃、宁夏以及东北等几大马铃薯主产区。目前,宁夏大部分马铃薯种植仍然采用地面灌溉的方式,水资源浪费严重,属于资源消耗性农业,严重阻滞该区生态灌区的建设和可持续农业的发展,因此,根据马铃薯生理需水特征进行补充灌溉,优化灌溉制度,不仅能提高灌溉水利用效率,而且能促进马铃薯产业增产增效。AquaCrop 模型可通过对区域土壤、气候、地下水及田间管理等条件对不同作物生长过程和产量进行模拟,其结果可较为准确地反应外界各因子对其作物的生长的影响^[2]。利用该模型对宁夏中部地区不同灌水

周期条件下马铃薯生长进行模拟,对传统灌溉制度进行优化,根据生育期水分敏感情况进行精准灌溉,可在有限供水条件下实现水资源高效配置。目前利用 AquaCrop 对作物生长模拟及灌溉制度优化方面的研究报道较多,邵东国等^[3]利用 AquaCrop 模型对水稻灌溉制度进行优化,提出了节水高产的水分供应模式。滕晓伟等^[4]在明确不同灌溉制度对冬小麦生长影响机制的基础上,提出针对不同水文年份的灌溉应对策略。Tsakmakis 等^[5]利用 AquaCrop 模型模拟不同灌水梯度对马铃薯干物质、腾发量等的变化,发现与实测值较为吻合。这些研究均从不同灌水量角度出发,探索 AquaCrop 模型对土壤水分、作物生长、水分利用等的模拟效果,并用相关指标进行评价,发现在不同区域、不同作物其均有较好的模拟效果。但是国内对 AquaCrop 模型在马铃薯上的应用研究较少,本研究对不同灌水量条件下马铃薯覆盖度、生物量、土壤储水量、产量、腾发量、水分利用效率等进行模拟,并用相对误差(RE)和均方

收稿日期:2019-01-16 **修回日期:**2019-01-22

基金项目:宁夏回族自治区全产业链项目(YES-16-0103);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2018AAC03280);宁夏科技人才托举工程项目。

第一作者:金建新,男,助理研究员,从事旱区农业和节水灌溉研究。E-mail:jinnxnk009@163.com

通信作者:桂林国,男,研究员,主要从事土壤快速培肥和农业节水研究。E-mail:guilinguo2002@163.com

根误差(RMSE)对模拟结果进行评价,为优化马铃薯灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 3 月至 10 月在盐池县冯记沟乡进行,试验地位于宁夏中北部地区,北纬 $37^{\circ}40'43''$,东经 $106^{\circ}51'58''$,为典型的大陆性季风

气候,多年平均气温 22.4°C ,光热资源丰富,全年平均温差 28°C 左右,多年平均降雨量为 254.8 mm ,蒸发量 $2\ 100\text{ mm}$,日照时数 $2\ 286\text{ h}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温为 $2\ 400^{\circ}\text{C}$,无霜期 198 d ,平均海拔 $1\ 450\text{ m}$ 。土壤质地为沙壤土,平均体积质量 1.38 g/cm^3 ,田间持水量为 $29.5\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,试验区土壤基础养分如表 1 所示。

表 1 供试土壤的基础养分

Table 1 Basic nutrients for the tested soil

土层深度/cm Soil depth	碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen	有效磷/(mg/kg) Effective phosphorus	速效钾/(mg/kg) Quick-acting potassium	有机质/(g/kg) Organic matter	pH
0~20	24.9	4.9	77	5.89	8.0
20~50	24.2	1.9	45	3.06	8.3
50~80	26.4	1.8	53	4.67	7.8

1.2 试验设计

马铃薯供试品种为‘宁薯 16 号’,于 5 月 1 日播种,播种前统一进行翻地、施肥。试验以灌水周期为变量,灌水周期分别设置 5 d、7 d、10 d、13 d 和 15 d 共 5 个处理,每次灌水量相同,均为 $225\text{ m}^3/\text{hm}^2$,生育期内降雨时,根据降雨量及降雨时间每个处理进行补灌溉或者推后灌溉,每个处理设置 3 个重复,共计 15 个小区,试验小区南北方向,面积均为 150 m^2 ,随机区组排列,每个小

区之间利用 1.0 m 深塑料薄膜隔开,并且设置 2 行作为保护行。马铃薯起垄种植,垄宽 90 cm ,采用滴灌一垄双行一带布置,行距 40 cm ,株距 25 cm ,播种后统一灌水 $300\text{ m}^3/\text{hm}^2$,当马铃薯苗齐后开始试验处理,利用水表严格控制水量,在马铃薯开花期、块茎生长期和块茎膨大期每个小区随水追施 3.5 kg 高钾型(N 、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 10% 、 5% 、 15%)水溶肥。各处理统计灌溉定额如表 2 所示。

表 2 各处理灌溉定额

Table 2 Irrigation quota for each treatment

灌水参数 Irrigation parameter	处理 1 Treatment 1	处理 2 Treatment 2	处理 3 Treatment 3	处理 4 Treatment 4	处理 5 Treatment 5
灌水周期/d Irrigation cycle	5	7	10	13	15
灌溉定额/(m^3/hm^2) Irrigation quota	5 400	3 825	2 700	2 025	1 800

1.3 指标测定及方法

气象资料:在试验区中心位置安装自动气象站,对降雨、蒸发、风速等每隔 30 min 进行自动记录,参考作物腾发量(ET_0)利用 P-M 公式计算。

覆盖度:在每个小区随机标记 10 株马铃薯,每隔 10 d 采用 LA-S 冠层分析仪测定马铃薯的覆盖度。

地上生物量:每隔 10 d 在每个小区随机挖取 3 株马铃薯,去掉根部,用电子天平测鲜样地上生物量。

产量:马铃薯成熟期后,在每个小区除去边行随机选择 3 行连续挖取 10 株马铃薯,计算小区产量,最后换算成公顷产量,水分利用效率(WUE)用式 $WUE = Y_m/M$ 计算,其中 Y_m 为马铃薯产

量, kg/hm^2 ; M 为马铃薯总灌水量, m^3/hm^2 。

土壤含水率:在小区中间垄马铃薯行间布设土壤剖面水分测定系统,每隔 10 d 于 9:00 测定土壤含水率,降雨后加测,分 4 层对 $0\sim 80\text{ cm}$ 土壤体积含水率进行测定,每层 20 cm 。首次测定时利用烘干法对测定的值进行校正。马铃薯生育期腾发量利用水量平衡法计算^[6]。具体为 $ET = \Delta W + R + I + G + P$,其中 ET 为作物生育期腾发量, mm ; ΔW 为土壤储水量变化量, mm ; R 为生育期内的有效降雨量, mm ; I 为灌水量, mm ; G 为地下水对耕层土壤的补给量, mm ,试验区地下水均在 30 m 以上,不考虑其对耕作层的补给量; P 为测渗补给量, mm ,各小区之间设置隔离层,该部分水量忽略不计。

土壤储水量:土壤储水量根据土壤含水率数

据分层计算,具体如式 $H = \sum_{i=1}^n Q_i H_i \times 10$ 。其中, H 为土壤储水量, mm; Q_i 为第 i 层土壤体积含水率, %; H_i 为第 i 层土壤厚度, cm; n 为测定土壤体积含水率时的层序。

1.4 AquaCrop 模型数据库

AquaCrop 是由联合国粮农组织开发的作物-水生产力模型,主要用于模拟水是作物生产中的关键限制因素时作物对水的产量反应。主要输入参数为气象因子、作物生长周期、灌水情况、田间管理、土壤性质、地下水等,选择模拟周期即可得到作物生物产量和产量等,该模型用胁迫参数来表征土壤水分亏缺对作物生长的影响^[2]。

气象数据:主要包括降雨量、温度、风速、 CO_2 和蒸发等数据,主要从试验基地东侧布置的自动气象站获取,参考作物腾发量 ET_0 的计算根据获取的气象参数利用 P-M 公式计算,具体为 $ET_0 =$

$$\frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{hr} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{。式中,}$$

ET_0 为参考作物腾发量, mm/d; R_n 为作物表面的净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; T_{hr} 为时段平均气温, $^{\circ}\text{C}$; u_2 为 2 m 高出的平均风速, m/s; e_s 为饱和水汽压, kPa; e_a 为实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; γ 为干湿表常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ 。马铃薯生育期降雨量和参考作物腾发量 ET_0 的计算结果如图 1 所示,生育期作物生长长度如图 2 所示。

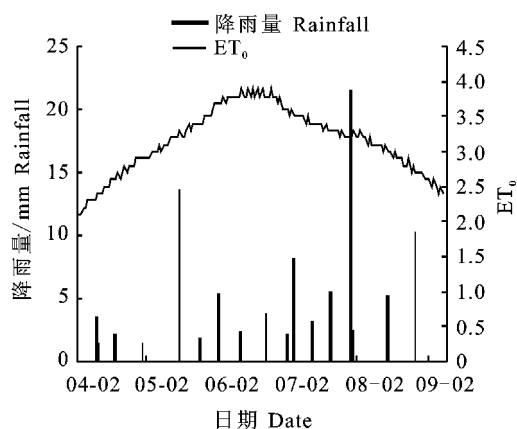


图 1 生育期降雨量和参考作物腾发量

Fig. 1 Rainfall and reference crop evapotranspiration during growing period

作物参数:作物生育期阶段及持续时间、覆盖度变化和根系深度变化,试验过程中对马铃薯每个生育期进行记录,覆盖度通过基于数字图像处

理技术的照相法获取,根系深度通过实际挖取测定,模拟过程中不考虑土壤养分胁迫。

灌溉参数:灌水方式为滴灌,输入灌溉时间和灌水量,其中灌水量以 mm 计算,不考虑土壤盐分胁迫。

土壤及田间管理:在播种前对土壤基础养分(表 1)、土壤质地、土壤物理参数(主要包括体积质量、田间持水量、凋萎系数、饱和含水量)进行测定,模型中选择无地表径流和不受杂草影响。

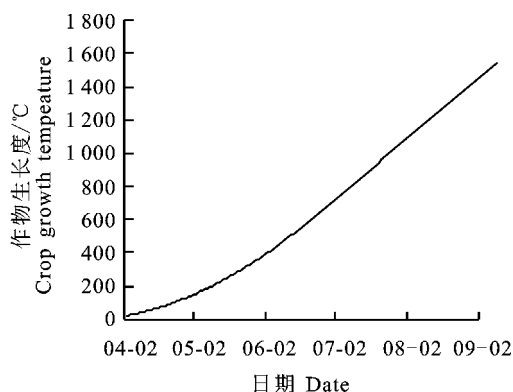


图 2 生育期作物生长度

Fig. 2 Crop growth temperature during growing period

1.5 数据处理及模型评价方法

经严格筛选所取得的数据,利用 origin 8.0 和 excel 2009 进行绘图和拟合,利用 spss 18.0 进行方差分析和显著性检验。模型评价指标采用平均相对误差(RE)和均方根误差(RMSE),具体算式为: $RE = (1 - A)/A \times 100\%$ 和 $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I - A)^2}{n}}$ 。式中, I 为模拟值, A 为实测值, n 为测定数量,两个指标均越小表示模拟效果越好。

2 结果与分析

2.1 马铃薯冠层覆盖度模拟结果

作物覆盖度可以较好地反应作物地上部分随生育期的变化,进而判断作物对环境因子和资源因子的适应程度,因其测定较为方便,可替代叶面积指数作为评价马铃薯地上部分生长情况。苗期马铃薯生长缓慢,叶片较小,各处理地面覆盖度均较小,随着生育期的推进,进入马铃薯花期覆盖度迅速增加,达到最大值后叶片衰退,覆盖度减少,图 3 为不同处理马铃薯覆盖度实测值和模拟值。由图 3 可知,不同处理覆盖度极值和模拟准确度差异较大,处理 1 到处理 5 覆盖度实测最大值分

别为 97.8%、93.1%、92.6%、46.0% 和 16.7%，当灌溉周期超过 10 d，灌水量低于 $2\,700\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时，随着灌水量下降，覆盖度迅速降低，覆盖度最大值处理 1 分别较处理 4 和处理 5 增加 112.61% 和 485.63%，处理 1、处理 2 和处理 3 覆盖度最大值无显著性差异，说明只有保证了一定程度的灌水量，才能促进马铃薯地上部分生长。

处理 1 至处理 5 覆盖度实测值和模拟值 RE 为 2.69%、-0.74%、2.39%、0.06%、7.51%，RMSE 为 3.08%、2.14%、3.36%、2.16%、1.04%，除处理 5 的 RE 较大外，其他处理 RE 和 RMSE 值均较小。可见，AquaCrop 模型对马铃薯覆盖度模拟值精度较高，可用其来模拟马铃薯地上部分动态生长过程。

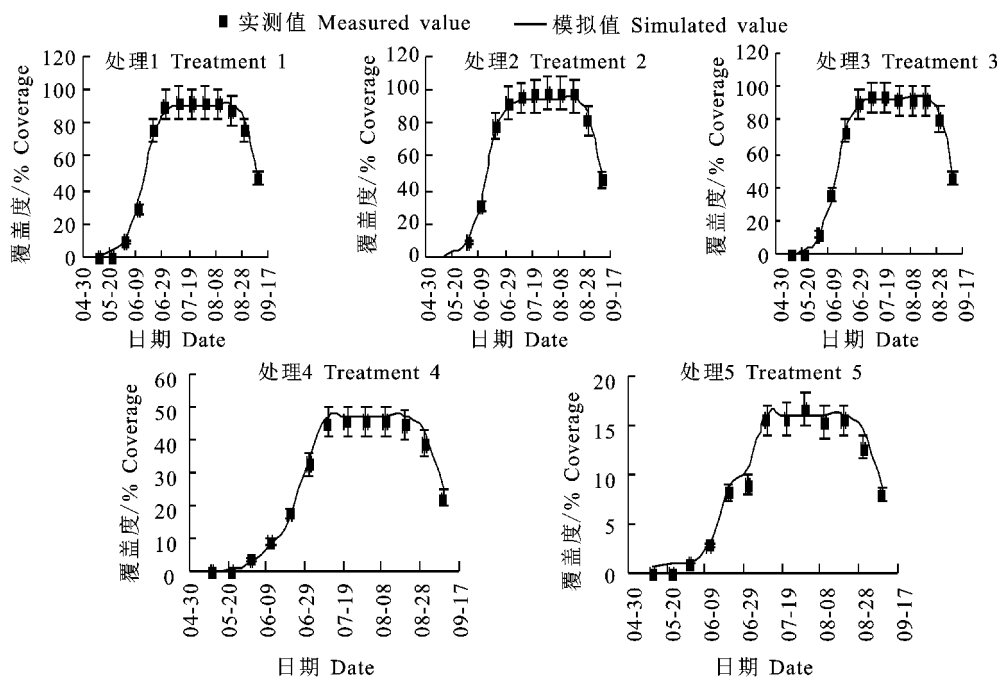


图 3 不同处理马铃薯覆盖度变化

Fig. 3 Changes of potato coverage under different treatments

2.2 马铃薯生物量模拟结果

由图 4 可知，随着生育期的推进，各处理马铃薯生物量逐渐积累，最后达到峰值，但是不同灌水量处理下马铃薯生物量累计速率及累积量差异较大，和覆盖度趋势类似，随着灌水量的增加而增加，8 月 30 日马铃薯成熟期测得的生物量处理 5 较处理 4、处理 3、处理 2 和处理 1 分别大 3.94%、8.52%、56.72% 和 84.26%。马铃薯生物量模拟值和实测值趋势一致，但是在苗期、开花期和成熟期模拟值均较实测值大，可能是因为马铃薯生长过程中受环境因子抑制所产生了生长胁迫，但在块茎增长期水肥等供应充足时出现生长补偿效应，因此实测值又大于模拟值。处理 1 的 RE 为 1.62%~12.78%，RMSE 为 $0.335\text{ t}/\text{hm}^2$ ，处理 2 的 RE 为 1.35%~7.69%，RMSE 为 $0.195\text{ t}/\text{hm}^2$ ，处理 3 的 RE 为 0.95%~9.41%，RMSE 为 $0.23\text{ t}/\text{hm}^2$ ，处理 4 的 RE 为 1.18%~13.33%，RMSE 为 $0.185\text{ t}/\text{hm}^2$ ，处理 5 的 RE 为

2.02%~10.18%，RMSE 为 $0.092\text{ t}/\text{hm}^2$ ，可以看出各处理模拟值和实测的 RE 和 RMSE 均较小，RE 值最大值均在 10% 左右，RMSE 最大值小于 $0.335\text{ t}/\text{hm}^2$ ，说明 AquaCrop 模型在模拟马铃薯生物量变化上精度较高，可准确预测其生长变化。

2.3 土壤储水量模拟结果

土壤储水量主要受土壤蒸发、作物蒸腾、灌溉和降雨等因素影响，不同处理马铃薯全生育期 100 cm 土层内平均储水量变化如图 5 所示。土壤储水量和灌水量具有显著的正相关关系，灌溉周期为 5 d 的处理 1 马铃薯全生育期其土壤储水量整体较大，其变幅也较小，土壤储水量实测值基本维持在 343.64~358.1 mm，离散系数(Cv)仅为 3.1%，处理 2 和处理 3 土壤储水量也较为稳定，Cv 分别为 2.2% 和 2.8%，但处理 4 和处理 5 土壤储水量为中等变异性，Cv 分别为 15.9% 和 14.7%，随着灌水和生育期突变较大。土壤储水

量模拟值和实测值变化趋势基本一致,处理1的 RE 为 0.5%~1.34%, RMSE 为 2.67 mm, 处理3的 RE 为 0.41%~2.24%, RMSE 为 4.1 mm, 处理

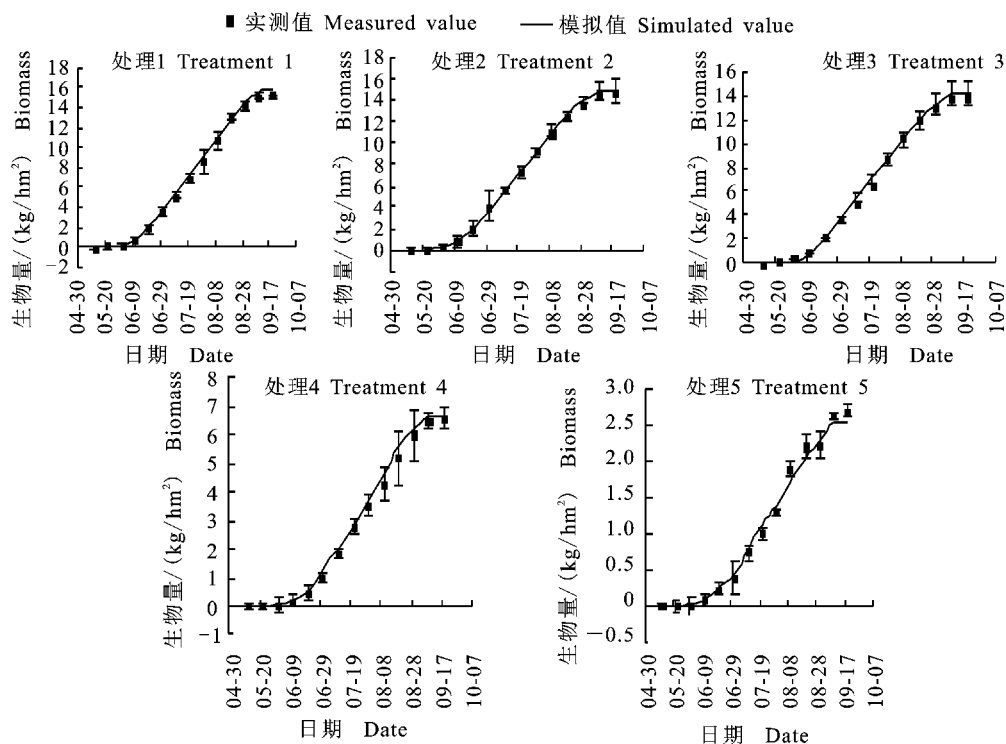


图 4 不同处理马铃薯生物量变化

Fig. 4 Changes of potato biomass under different treatments

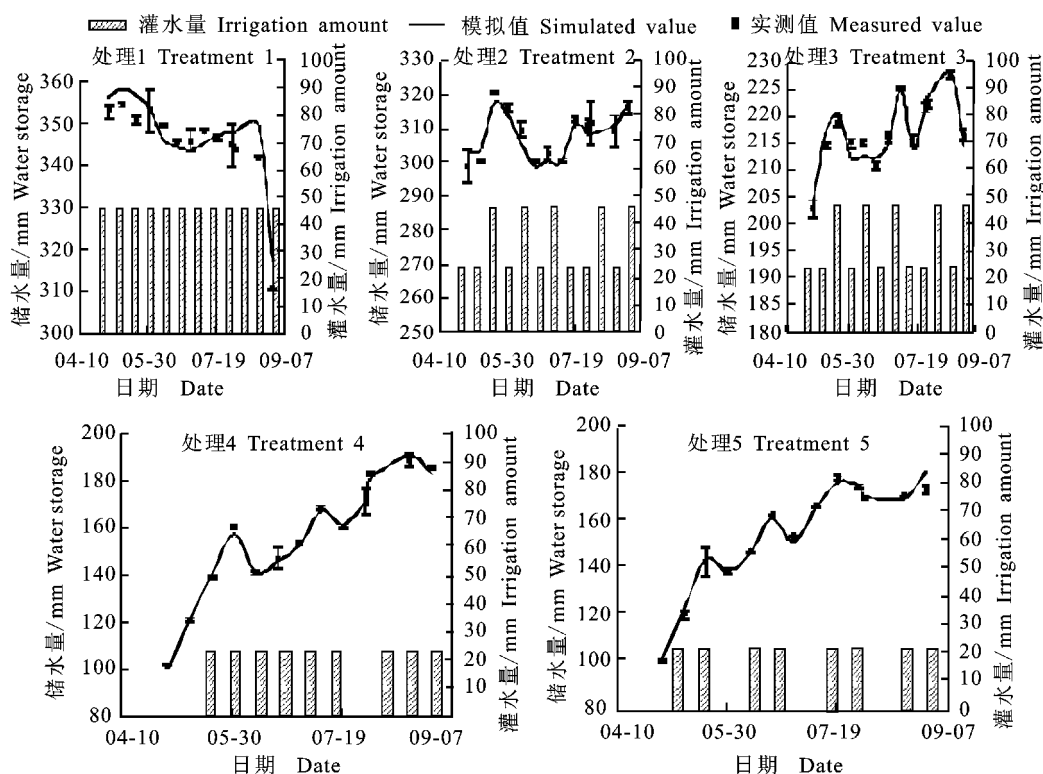


图 5 不同处理土壤储水量变化

Fig. 5 Variation of soil water storage in different treatments

RMSE 为 1.71 mm,处理 4 的 RE 为 0.64%~1.97%,RMSE 为 1.68 mm,处理 5 的 RE 为 0.15%~4.35%,RMSE 为 2.42 mm,其中处理 1 的 RMSE 最大,且表现为前期和后期模拟值高于实测值,中期反之,可能是模型对深层渗漏考虑较少,频繁的灌水和水分散失导致模拟值偏差较大,整体来看 AquaCrop 模型在模拟马铃薯生育期土壤储水量上具有一定的精度,可用于模拟不同气候、土壤、水肥条件下马铃薯种植的土壤水分动态变化。

2.4 马铃薯产量及水分利用效率模拟结果

表 3 可以看出,马铃薯产量、腾发量和灌水量正相关关系,随着灌水量的增加,马铃薯产量、腾发量均增加,各处理差异达到显著水平($P < 0.05$),平均实测产量最高为处理 1,达到 48 816.3 kg/hm²,较处理 2、处理 3、处理 4、处理

5 分别高 0.84%、19.9%、51.8%和 126.33%,产量模拟值也具有相同的规律,模拟结果的 RE 为 0.1%~2.22%,RMSE 为 294.45 kg/hm²,灌水定额最小的处理 5 的 RE 为 2.22%,说明在土壤水分发生胁迫时,作物生长情况较为复杂,其模拟精度往往较低。腾发量包括土壤蒸发和作物蒸腾两部分,随着马铃薯长势变化,两者比例发生变化,但整体来看随着灌水量的增加腾发量也增加,处理 1、处理 2、处理 3 差异不显著,模拟结果变化趋势和实测值相同,其 RE 为 1.42%~4.9%,RMSE 为 9.71 mm。水分利用效率实测值和模拟值在马铃薯全生育均表现为先增加后减小的趋势,模拟结果 RE 为 2.19%~8.35%,RMSE 为 0.77 kg/m³。因此,整体来看,AquaCrop 模型对马铃薯产量和 WUE 的模拟结果较好,能反应其全生育期变化过程。

表 3 不同处理马铃薯产量、腾发量及水分利用效率实测值和模拟值

Table 3 Measured and simulated values of potato yield and composition indicators for different treatments

处理 Treatment	产量/(kg/hm ²) Yield				腾发量/mm Evapotranspiration				水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency			
	实测	Measured	模拟	Simulated	实测	Measured	模拟	Simulated	实测	Measured	模拟	Simulated
1	48 816.3	Aa	48 765.3	Aa	393.8	Cc	399.4	Aa	9.04	Ee	10.26	Ee
2	48 411.45	Ab	48 689.4	Bb	398.4	Aa	392.4	Bb	12.66	Cc	13.47	Cc
3	40 713.9	Bc	40 988.7	Cc	394.9	Bb	382.5	Cc	15.08	Bb	16.15	Aa
4	32 157.45	Cd	31 938.6	Dd	289.8	Dd	275.6	Dd	15.88	Aa	15.52	Bb
5	21 568.50	De	21 088.65	Ee	255.1	Ee	262.1	Ee	11.98	Dd	10.98	Dd

注:大写字母表示 0.01 显著水平,小写字母表示 0.05 显著水平。

Note: Uppercase show significant difference at 0.01 level, lowercase show significant difference at 0.05 level.

3 讨论

本研究表明 AquaCrop 模型对模拟马铃薯生长、产量及土壤储水量具有较好的精度,模拟马铃薯覆盖度、生物量、产量、腾发量、水分利用效率及土壤储水量等参数和实测值具有相同的变化趋势,并且 RE 和 RMSE 参数均较小,该模型可作为试验区域马铃薯种植生产的指导,也可对垄作马铃薯生产力进行简单的预测和初步的评估。

3.1 AquaCrop 模型参数的设定

AquaCrop 模型在模拟作物生长过程中需要输入气象、土壤、作物、田间管理等参数,该参数的准确设定对科学模拟作物生长过程具有重要的作用,AquaCrop 模型参数库有一些典型作物的生长参数,但是在不同区域、生态条件、品种、田间管理等条件下,作物生长参数会发生较大的变异,因

此,要根据试验地生产实际和气候条件对模型中各参数进行调整。模拟过程中不考虑土壤肥力、盐分和杂草的胁迫作用,马铃薯为稀植作物,其水分生产力定为 18 g/cm²,参考收获指数为 78%,马铃薯种植为起垄种植,改变了作物行间的通风和光照状况,AquaCrop 模型在滴灌条件下未考虑垄作种植,在模拟过程中忽略了垄作的增温效应,导致模拟结果较实测偏低,因此,根据垄作较平作温度增加值的实测值,在作物生长度计算中提高一定的增量,以消除垄作所带来的误差。刘匣等^[7]在冬小麦覆膜模拟中也采用了相同的处理方法,以消除 AquaCrop 模型未考虑覆膜所造成的地温增加所带来的误差。

3.2 AquaCrop 模型对冠层覆盖度和生物量的模拟和验证

本研究结果表明 AquaCrop 模型可较好模拟

不同灌水量条件下马铃薯覆盖度变化,各处理平均相对误差 RE 为 0.06%~7.51%,均方根误差 RMSE 为 1.04%~3.36%,这与以往研究具有相同的结果,李晶等^[8]对东北冬小麦冠层生长进行模拟,结果显示在正常年份实测值和模拟值具有较高的准确性,决定系数介于 0.726~0.995,柴顺喜等^[9]在北疆滴灌春小麦生产中也进行验证,得到冠层覆盖度模拟值和实测值均方根差为 6.84%,但是研究发现在极端条件下对作物生长状况的模拟偏差较大。作物地上生物量是评价作物地上部分对环境因子适应能力的重要指标,也是判断作物光合同化物在生长和生殖之间优化转移的重要依据,在不同的灌溉制度下,马铃薯地上生物量累计速率和累计量存在显著差异,灌溉周期为 5 d 和 15 d 在成熟期相差 84.26%,而 AquaCrop 模型在灌水量较为适宜时,模拟结果较为准确,灌水量过大或者过小,其模拟值和实测值的 RE 和 RMSE 值均较大,柴顺喜等^[9]设置 4 种灌溉定额后对春小麦地上部干生物量进行模拟,模拟值与观测值之间的 R^2 与 RMSE 分别为 94%和 0.92 t/hm²,具有较好的模拟效果。本试验表明,AquaCrop 模型对马铃薯冠层覆盖度和地上生物量的模拟各项指标达到了较为理想的效果,但是在马铃薯水分亏缺时,模型往往不能较好地模拟其生长过程,可能是由于模拟没有考虑到作物对水分亏缺的适应能力及后期复水补偿效应,同时,在作物衰老阶段(图处理 1 和处理 5),模型没有考虑作物生长过程的复杂性,导致对冠层覆盖度的模拟精度较低。另外,由于不同地区气候条件变化较大,而模型中气象条件对作物生长的影响权重较大,因此在利用 AquaCrop 模型对作物生长进行模拟的时候,需注重对气象因子的矫正。

3.3 AquaCrop 模型对土壤储水量的模拟和验证

AquaCrop 模型是以水分为主要模拟因子的模型,其对作物产量、生物量等的模拟均建立在土壤水分动态模拟的基础上,本研究结果表明,AquaCrop 模型可以准确地模拟不同处理各时期土壤储水量动态变化,其模拟值和实测值的 RE 为 0.15%~4.35%,RMSE 为 1.68~4.1 mm,模拟精度高于刘匡等^[7]在大葱和小麦等上的模拟结果,各处理的模拟结果在马铃薯生长中期较实测值大,但是在前期和后期反之,Hsiao 等^[10]、Farahani 等^[11]等在棉花上的研究结果为模拟值较实

测值整体偏大,但 Igbal^[12]和 Mkhabela 等^[13]对小麦全生育期贮水量进行模拟发现其小于实测值,Mebane 等^[14]对玉米全生育期的贮水量模拟值也小于实测值,这可能与土壤保水性、土壤质地和灌溉方式等因素有关,也可能和 AquaCrop 模型不能考虑土壤结构的变化有关,在相同水分条件下模拟结果不一致,该问题目前还没有统一的结论。该模型在模拟土壤储水量变化时,不能考虑土壤结构的变异性,造成相同的土壤水分数据在模型中有很多的不确定性,也缺乏对田面微地形变化的考虑,本研究中通过改变模型中曲线 CN 来反映马铃薯起垄种植条件。

3.4 AquaCrop 模型对马铃薯产量和水分利用效率的模拟和验证

马铃薯能形成较多的地下块茎产量,收获指数较大,如外界因子变化较为剧烈时,AquaCrop 模型不能很好地预测马铃薯产量,本文中灌水周期最大的处理 5 其模拟值和实测值为 2.22%,为各处理中最大值,其余各处理基本均能较好地模拟在不同水分条件下马铃薯的产量变化,这与以往在不同作物上取得的结果一致。如高博^[15]利用 AquaCrop 模型探索了气候变化条件下小麦产量的变化,对小麦产量变化进行预测,并用近 50 a 数据进行验证。周英霞等^[16]对陕西气候变化条件下不同地区冬小麦产量进行模拟预测,成功指导不同气候区种植功能划分和冬小麦区域适应性评价。目前国内 AquaCrop 模型对作物生长和产量等过程的模拟主要应用于小麦、棉花、水稻等作物的研究^[17-18],对马铃薯等块茎作物的研究报道较少,但国外在这方面已有诸多报道,Razzaghi 等^[18]在不同灌溉制度下对马铃薯产量和水分利用效率进行模拟研究,发现产量模拟值在充分灌溉和 70%定额条件下较实测值小,但在 50%定额条件下反之,但总体来说,AquaCrop 模型能较好地模拟马铃薯产量和水分利用情况。可见,AquaCrop 模型在模拟不同地区不同作物生长过程和产量、水分利用等方面具有较好的准确度,能够结合区域气候、土壤、地下水、作物、地表覆盖等进行预测和模拟,但是在气候条件变化较为剧烈的时段,或反复水分亏缺和复水过程中,模拟精度较低,不能很好地反应实际作物复水补偿生长过程,因此,在借助 AquaCrop 模型进行预测时,需要对各参数,特别是气象参数进行准确矫正和调整。

总之,虽然 AquaCrop 模型在处理 1 和处理 5 上对各指标的模拟效果较其他处理低,特别是土壤水分亏缺严重的处理 5 其模拟精度较低,这可能是由于马铃薯在受水胁迫和复水补偿后,地面部分生长变异性较大,模型没充分考虑到该变化过程,但是总体来看,AquaCrop 模型对各指标的模拟结果均较好,其结果可作为马铃薯适宜生长区域划分、特定条件下产量预测等。

4 结 论

AquaCrop 模型对各处理马铃薯冠层覆盖度实测值和模拟值的相对误差为 0.06%~7.51%,均方根误差 RMSE 为 1.04%~3.36%,对灌水周期最短的处理 1 和灌水周期最长的处理 5 模拟结果较差,两者的平均 RE 分别为 2.69% 和 7.51%。生物量的模拟结果在各处理中处理 1 效果最差,模拟值和实测值 RE 最大值为 12.78%,RMSE 为 0.335 t/hm²,其余各处理对生物量的模拟均较好,可准确反映在不同灌水条件下马铃薯地上部分的生长变化。

对土壤储水量的模拟结果和覆盖度和生物量类似,各处理均能较好地模拟其变化过程,其中处理 1 效果最差,两者的 RMSE 最大,为 4.1 mm。对产量和腾发量的模拟灌水量较大处理效果较好,处理 4 和处理 5 精度低于其他处理,RE 分别达到 11.38% 和 8.99%。

参考文献 Reference:

- [1] 庞昭进,郭安强,杨建忠,等. 关于马铃薯主食化的思考[J]. 河北农业科学,2017,21(5):91-93.
PANG ZH J, GUO A Q, YANG J ZH, *et al.* Thinking about potato as staple food grain in China[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(5):91-93.
- [2] 孙仕军,张琳琳,陈志君,等. AquaCrop 作物模型应用研究进展[J]. 中国农业科学,2017,50(17):3286-3299.
SUN SH J, ZHANG L L, CHEN ZH J, *et al.* Advances in AquaCrop model research and application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17):3286-3299.
- [3] 邵东国,乐志华,徐保利,等. 基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化[J]. 农业工程学报,2018,34(19):114-122.
SHAO D G, YUE ZH H, XU B L, *et al.* Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(19): 114-122.
- [4] 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.
TENG X W, DONG Y SH, SHENG J X, *et al.* Winter wheat irrigation simulation in arid area based on AquaCrop model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(20):4100-

- 4110.
- [5] TSAKMAKIS I D, KOKKOS N P, GIKAS, G D, *et al.* Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:419-432.
- [6] CHOUDHURY B U, ANIL KUMAR SINGH, PRADHAN S. Estimation of crop coefficients of dry-seeded irrigated rice-wheat rotation on raised beds by field water balance method in the Indo-Gangetic plains, India[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 123:20-31.
- [7] 刘 匣,丁奠元,张浩杰. 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 X, DING D Y, ZHANG H J. 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.
- [8] 李 晶,付 驰,张铁楠,等. 基于 AquaCrop 模型的东北春麦区小麦冠层生长模拟研究[J]. 水土保持研究,2013,20(6):106-110.
LI J, FU CH, ZHANG T N, *et al.* Study on AquaCrop simulation study on wheat canopy growth in northeast spring wheat region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6):106-110.
- [9] 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.
CHAI SH X, CHEN R, LI J, *et al.* Calibration and verification of AquaCrop model in spring wheat production in drip irrigation in northern Xinjiang [J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Science*, 2017, 45(8):215-219.
- [10] HSIAO T C, LEE H, 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.
- [11] 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.
- [12] IGBAL M A, SHEN Y, STRICEVIC R, *et al.* 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(2): 61-72.
- [13] MKHABELA M S, BULLOCK P R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain and soil moisture simulation in western Canada [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(7):16-24.
- [14] MEBANE V J, DAY R L, HAMLETT J M, *et al.* Validating the FAO AquaCrop model for rain-fed maize in Pennsylvania[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(2): 419-427.
- [15] 高 博,尹晓荣,张 涛. 基于 AquaCrop 模型的小地区气候变化对小麦产量的影响[J]. 湖北农业科学,2017,56(15):2956-2859.
GAO B, YIN X R, ZHANG T. Effect of climate change in

- small regions on wheat yield based on AquaCrop model [J]. *Journal of Hubei Agricultural Science*, 2017, 56(15):2956-2859.
- [16] 周英霞,王全九,张继红,等. 基于 AquaCrop 模型的气候变化对陕西省冬小麦产量影响模拟分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):357-364.
- ZHOU Y X, WANG Q J, ZHANG J H, *et al.* Simulation analysis of the influence of climate change on winter wheat yield in Shaanxi province based on AquaCrop model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 357-364.
- [17] 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.
- XING H M, XU X G, FENG H K, *et al.* Water use efficiency of winter wheat in Beijing based on AquaCrop model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23): 4507-4519.
- [18] RAZZAGHI F, ZHOU ZH J, ANDERSEN M N, *et al.* Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 113-123.

Optimization of Potato Irrigation System Based on AquaCrop Model

JIN Jianxin, HUANG Jiancheng and GUI Linguo

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry, Yinchuan 750002, China)

Abstract The objective of this paper is to provide scientific methods and theoretical basis for the application of the AquaCrop model in potato planting in the arid zones of central Ningxia province through evaluating this model's simulated effect on potato growth, dynamic variation of soil moisture, yield and water use efficiency. Five irrigation cycles (5 d, 7 d, 10 d, 13 d and 15 d) were set up in this experimentation. And a field experiment was conducted in the arid zones of central Ningxia province in 2018 for measuring potato canopy coverage, overground biomass, soil water storage, yield and other composition indexes. The AquaCrop model well simulated the change of potato canopy coverage. And the relative error (RE) between the measured and simulated values was from 0.06% to 7.51%, and root-mean-square error (RMSE) was 1.04% to 3.36%. This model also better simulated the overground biomass and soil water storage. RE between measured and simulated values of overground biomass was 0.95% to 13.33%, and the RMSE was 0.092 t/hm² to 0.335 t/hm². RE between measured and simulated values of soil water storage was between 0.15% and 4.35%, and its RMSE was 1.68 mm to 4.1 mm. RE between measured and simulated values of potato yield was 0.10% to 2.22%, and the RMSE was 294.45 kg/hm². Besides, the simulation results of other composition indexes were similar to above and showed good consistency. However, the simulation effect of the AquaCrop model is poor on each index when the irrigation volume larger or smaller. Overall, the simulation results of the AquaCrop model showed good effect on each index, and the results can be used to select the suitable growth areas and yield prediction of potato under the specific conditions.

Key words Irrigation amount; AquaCrop model; Potato; Growth; Simulation

Received 2019-01-16

Returned 2019-01-22

Foundation item Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science Whole Industry China Project (No. YES-16-0103); Natural Science Foundation of Ningxia (No. 2018AAC03280); Ningxia Science and Technology Talents Lifting Project.

First author JIN Jianxin, male, research assistant. Research area: arid farming and water saving irrigation. E-mail: jinnxnk009@163.com

Corresponding author GUI Linguo, male, researcher. Research area: soil rapid fertilization and agricultural water saving. E-mail: guilinguo2002@163.com