

基于 AquaCrop 模型的南疆无膜滴灌棉花灌溉制度优化

王兴鹏^{1,2} 蒋富昌^{1,2} 王洪博^{1,2} 曹 辉^{1,2} 杨莹攀^{1,2} 高 阳³

(1.塔里木大学水利与建筑工程学院,阿拉尔 843300; 2.塔里木大学现代农业工程重点实验室,阿拉尔 843300;
3.中国农业科学院农田灌溉研究所,新乡 453003)

摘要: 为探究 AquaCrop 模型对南疆地区无膜滴灌棉花种植的适用性、寻求最优灌溉制度,以 2018—2019 年田间实测数据对模型进行校验,并利用校准模型分别模拟 2 种不同灌水情景下的棉花冠层覆盖度、生物量及产量的变化规律。结果表明:采用 AquaCrop 模型模拟 2019 年冠层覆盖度的均方根误差(RMSE)、拟合指数(d)、标准均方根误差(NRMSE)及决定系数(R^2)分别为 6.03%、0.12、13.08% 和 0.97,生物量模拟的各参数分别为 810 kg/hm²、0.93、6.41% 和 0.80,产量模拟的各参数分别为 751 kg/hm²、0.84、14.02% 和 0.87,说明 AquaCrop 模型可以较好地模拟南疆地区无膜滴灌棉花的生长与产量。基于 1960—2019 年的气象数据,利用 AquaCrop 模型对无膜滴灌棉花进行情景模拟:灌水周期相同时,无膜滴灌棉花产量随灌溉定额的增加呈先增加、后减小的变化趋势,总灌水量为 7 200 m³/hm²时产量达到最大值(5 398 kg/hm²),水分利用效率(WUE)为 0.75 kg/m³;灌溉定额相同时,无膜滴灌棉花产量随灌水周期的增加而增加,总灌水量为 5 400 m³/hm²、灌水周期为 5 d 时,产量达到最大值(5 315 kg/hm²)、WUE 为 0.98 kg/m³。研究表明,灌水周期 5 d、灌溉定额 540 mm 的灌溉制度可保证无膜滴灌棉花具有较高的产量和水分利用率,可作为无膜滴灌棉花的参考灌溉制度在南疆地区推广应用。

关键词: 棉花; 无膜滴灌; AquaCrop 模型; 产量; 灌溉制度

中图分类号: S562; S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0293-09

OSID:



Irrigation Scheduling Optimization of Drip-irrigated without Plastic Film Cotton in South Xinjiang Based on AquaCrop Model

WANG Xingpeng^{1,2} JIANG Fuchang^{1,2} WANG Hongbo^{1,2} CAO Hui^{1,2} YANG Yingpan^{1,2} GAO Yang³

(1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China

3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

Abstract: To investigate the applicability of the AquaCrop model to drip-irrigated cotton without plastic film in South Xinjiang, and develop the optimal irrigation scheduling, the AquaCrop model was calibrated and validated by using the dataset collected in 2018 and 2019 seasons, then the model was used to simulate canopy cover (CC), plant biomass, and cotton yield under two different irrigation scenarios. The results showed that the root mean square error (RMSE), the fit index (d), the standard root mean square error (NRMSE) and the determination coefficient (R^2) between the simulated and measured values of CC were 6.03%, 0.12, 13.08% and 0.97, and the corresponding values for plant biomass and cotton yield were 810 kg/hm², 0.93, 6.41% and 0.80, and 751 kg/hm², 0.84, 14.02% and 0.87, respectively, indicating that the AquaCrop model could be used as a feasible tool to predict cotton growth and yield response to irrigation under drip irrigation without plastic film in this region. The scenario simulation was carried out by using the AquaCrop model with the meteorological data from 1960 to 2019. The scenario simulation results indicated that under the condition of the same irrigation frequency, the cotton yield was increased first and then decreased with the increase of the irrigation quota, and the maximum yield of 5 398 kg/hm² was obtained with the total irrigation amount of 7 200 m³/hm²,

收稿日期: 2020-07-19 修回日期: 2020-08-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400208)、国家自然科学基金重大项目(51790534)和兵团科技攻关项目(2018AB027)

作者简介: 王兴鹏(1978—),男,教授,博士,主要从事干旱区灌溉排水理论与节水灌溉研究,E-mail: 13999068354@163.com

通信作者: 高阳(1978—),男,研究员,博士,主要从事作物高效用水机理研究,E-mail: gaoyang@caas.cn

and the water use efficiency (WUE) was 0.75 kg/m³. While under the condition of the same irrigation quota, the cotton yield was increased with the increase of irrigation frequency, and the maximum yield of 5 315 kg/hm² was achieved with the irrigation frequency of 5 d and the total irrigation amount of 5 400 m³/hm², and WUE was 0.98 kg/m³. It could be concluded that the high yield and WUE of drip-irrigated cotton without plastic film could be ensured by the irrigation scheduling with the irrigation frequency of 5 d and the total irrigation amount of 5 400 m³/hm², which could be used as a reference irrigation scheduling for application of drip-irrigated cotton without plastic film in South Xinjiang.

Key words: cotton; drip-irrigation without plastic film; AquaCrop model; yield; irrigation scheduling

0 引言

新疆是我国重要的农业产区,其农业用水量占总用水量的比例为全国最高,2017 年农业用水量达到 513.7 亿 m³, 占全疆用水量的 93.2%,南疆农业用水占比则达到 96%^[1]。棉花是新疆地区的主要经济作物之一。地域优势和显著的植棉效益使棉花种植面积不断扩大,从 2002 年的 94 万 hm² 增加到 2017 年的 225.4 万 hm²,15 年间棉花种植面积扩大了 2.4 倍。然而,有限的水资源已成为制约新疆农业可持续发展的主要因素^[2-3]。因此,制定合理的灌溉制度、实现对有限水资源的高效利用,对南疆乃至整个新疆地区的农业发展均具有重要意义^[4]。随着膜下滴灌技术的大面积推广,新疆棉花覆膜率已达到 100%^[5]。在提高新疆地区作物产量和经济效益的同时,膜下滴灌也造成了较为严重的环境污染。南疆棉田土壤残膜量高达 273.36 kg/hm²,土壤残膜积累严重威胁着区域农业的可持续发展^[6-7]。在新疆地区推广无膜种植模式是解决残膜污染问题的可行途径。目前,无膜棉花种植的田间栽培及水肥管理措施等尚不够完善^[8],因此,研究无膜棉花种植的灌溉制度对推广无膜栽培模式及缓解残膜污染均具有重要意义。

AquaCrop 模型具有输入参数少、适用范围广、界面简单、直观性强和精度高等优点^[9],该模型通

过不同管理措施和灌溉模式下的作物冠层覆盖度和收获指数来模拟作物产量^[10],最终通过计算作物的水分利用效率来评估作物产量对水分的响应,并揭示不同灌溉条件下的作物-水分响应机制^[11]。自 AquaCrop 模型推广应用以来,国内不同地区关于小麦^[12-16]、玉米^[17-18]、水稻^[19]等大宗粮食作物已有较为成熟的研究,且覆膜种植棉花^[20-21]的相关研究也较为完善。由于推广时间较短,关于无膜滴灌棉花种植的 AquaCrop 模拟研究还相对较少。本文基于 AquaCrop 模型对南疆无膜滴灌种植的棉花灌溉制度进行研究,分析不同灌水定额及灌水周期情景对无膜滴灌棉花产量及水分生产效率的影响,进而确定最优灌溉制度,为无膜种植棉花在南疆地区的大面积推广提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4 月—2019 年 10 月在新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市水利局灌溉试验站(40°32′36.90″N,81°17′56.52″E)进行。试验区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,昼夜温差大,常年干旱少雨,光照时间长,地表蒸发强烈。多年平均气温 10.7℃,降雨量 48 mm,年蒸发量约 2 100 mm,全年大于等于 10℃的有效积温约 4 000℃,无霜期 220 d 左右,地下水埋深约为 4 m,土壤物理性质见表 1。

表 1 土壤物理性质
Tab.1 Soil physical properties

土层深度/ cm	凋萎系数/ (g·g ⁻¹)	田间持水率/ (g·g ⁻¹)	饱和含水率/ (g·g ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	黏粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%
0~20	0.10	0.21	0.24	1.60	2.43	41.49	56.08
20~40	0.10	0.24	0.30	1.55	2.56	41.40	56.04
40~60	0.12	0.25	0.33	1.58	2.88	42.83	54.29
60~80	0.13	0.25	0.32	1.59	2.60	41.40	56.00
80~100	0.12	0.24	0.31	1.60	2.60	41.40	56.00

1.2 试验设计

2018—2019 年在试验站的测坑区进行试验,采用单因素完全随机试验进行设计。测坑的长、宽、深分别为 3、2.2、3 m。鉴于目前南疆膜下滴灌棉花灌

水定额为 30 mm,本试验设定膜下滴灌灌水定额的 150%(45 mm)为无膜棉花灌水定额的参考值,2018 年设置 3 个灌水定额,分别为 I2(36 mm)、I3(45 mm)、I4(54 mm),2019 年增设 2 个水分处理,

共计 5 个灌水定额: I1 (27 mm)、I2 (36 mm)、I3 (45 mm)、I4 (54 mm)、I5 (63 mm), 每个处理设置 3 次重复。

供试棉花品种为特早熟品种“中棉 619”。棉花采用宽窄行种植, 宽行间距 66 cm, 窄行间距 10 cm。滴灌带铺设方式为 2 带 6 行, 人工穴播, 播种密度 195 000 株/hm² (图 1)。2018 年播种和收获日期分别为 4 月 22 日和 10 月 27 日, 2019 年为 4 月 25 日和 10 月 25 日。田间管理措施如施肥、打药等均与当地农田管理方式保持一致。

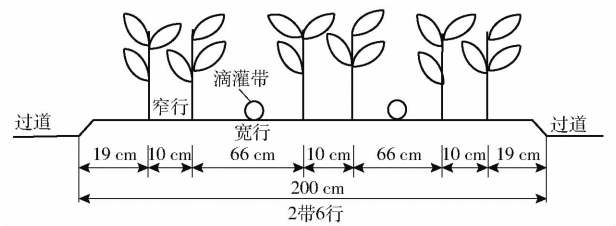


图 1 棉花种植模式及滴灌带示意图

Fig. 1 Schematic of cotton planting pattern and drip irrigation belt

1.3 观测项目和方法

1.3.1 叶面积指数

每个试验小区选取长势均匀且具代表性的 3 株棉花进行标记, 每隔 15 d 用钢尺 (精度 1 mm) 对所有绿叶进行测量, 叶面积指数计算公式^[22]为

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

式中 LAI——叶面积指数

ρ ——棉花植株密度, 株/hm²

m ——标记测定株数

n ——每株棉花叶片数, 片/株

L_{ij} ——最大叶片长度, m

B_{ij} ——最大叶片宽度, m

其中 0.75 为修正系数。

1.3.2 冠层覆盖度

冠层覆盖度 (CC) 是 AquaCrop 模型模拟作物生长过程的重要指标, 计算公式^[23]为

$$CC = 1.005(1 - e^{-0.6LAI})^{1.2} \quad (2)$$

1.3.3 生物量及产量

棉花进入幼苗期以后, 每隔 15 d 对地面上部生物量进行取样, 每试验小区取 3 株长势具有代表性植株, 剪下地下根部于 105℃ 杀青 30 min, 然后 75℃ 干燥至质量恒定, 称量计算生物量; 在棉花吐絮期末, 在每个试验小区内随机抽取具有代表性的 3 个等面积样方, 记录株数、总铃数、吐絮数, 同时称取百铃质量, 计算棉花总产量, 计算公式^[24]为

$$Y = 0.01n_p w p \quad (3)$$

式中 Y ——棉花总产量, kg/hm²

n_p ——单株棉铃数, 个/株

w ——单铃质量, g

1.3.4 作物耗水量

作物耗水量 (ET) 采用水量平衡法计算, 计算公式^[25]为

$$ET = \Delta S + P + I + G - R_0 - D_p \quad (4)$$

式中 ΔS ——100 cm 土层内土壤含水量时段末与时段初之间的变化量, mm

P ——棉花生育期内有效降雨量, mm

I ——灌溉水补给量, mm

G ——地下水补给量, mm

R_0 ——地表径流, mm

D_p ——深层渗漏量, mm

1.3.5 水分利用效率

水分利用效率 (WUE) 是指消耗单位水分产出的生物量或产量, 产量水分利用效率计算公式^[26]为

$$WUE = \frac{Y_1}{ET} \quad (5)$$

式中 Y_1 ——籽棉产量, kg/hm²

1.4 AquaCrop 模型数据库建立与模型评价

AquaCrop 模型输入参数主要包括气象数据、作物生长参数、田间管理及土壤基本参数等。

1.4.1 气象数据

田间气象数据均源于试验站内的 HOBO 型自动气象站, 主要包含降雨量、气温、太阳辐射、风速、相对湿度等, 并根据 FAO 推荐的 Penmen - Monteith 公式计算参考作物腾发量 (ET₀)。2018 年和 2019 年棉花生育期内的降雨量、最高气温、最低气温及 ET₀ 见图 2。

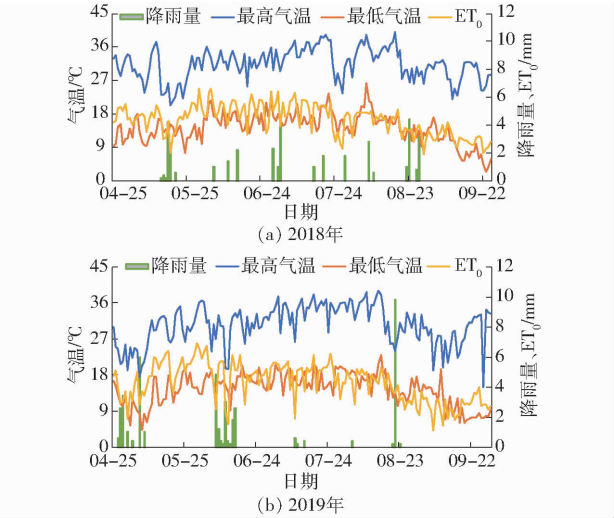


图 2 2018—2019 年棉花生育期内气象数据

Fig. 2 Meteorological data during cotton growing season in 2018 and 2019

1.4.2 土壤参数

AquaCrop 模型的土壤参数主要由凋萎含水率、饱和含水率、田间持水率、土层数及容重等组成。棉花播种前,在田间随机选择 5 个试点进行土壤取样,每隔 20 cm 作为一个分层,测得土壤容重及颗粒含量等参数见表 1,将土壤参数导入模型建立土壤数据文件(SOL)。

1.4.3 作物参数

作物参数文件主要由作物生长、作物蒸散、作物生产及水分、盐分、温度胁迫等组成。作物生长参数中的初始及最大冠层覆盖率、开花、衰老、成熟期等参数都可由田间实际观测所得;作物生产中的水分生产指数、作物收获指数、水分胁迫响应系数、盐分胁迫响应系数、温度胁迫响应系数可基于模型提供的基准参数进行取值范围的确定,同时运用“试错法”进行修正。本试验选用 2018 年各处理的田间试验实测数据对模型参数进行调试,选用 2019 年田间实测数据验证模型。AquaCrop 模型的主要作物参数见表 2。

表 2 AquaCrop 模型作物参数
Tab.2 Crop parameters of AquaCrop model

参数	校正值
基底温度 $T_{\text{base}}/^{\circ}\text{C}$	10
上限温度 $T_{\text{upper}}/^{\circ}\text{C}$	30
作物系数 K_{cTR}	1.1
初始冠层覆盖度 $CC_0/\%$	1
冠层增长系数(CGC)/($\% \cdot \text{d}^{-1}$)	10.3
最大冠层覆盖度(CCX)/%	90
冠层衰减系数(CDC)/($\% \cdot \text{d}^{-1}$)	8
标准水分生产力(WP)/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	19
最大有效根深/m	0.65
参考收获指数(HI0)/%	41
水分胁迫对冠层影响上限 $P_{\text{exp,upper}}$	0.25
水分胁迫对冠层影响下限 $P_{\text{exp,lower}}$	0.55
水分胁迫对气孔导度影响上限 $P_{\text{clo,upper}}$	0.55
水分胁迫对早期冠层衰老影响上限 $P_{\text{sen,upper}}$	0.88
盐分对作物生长影响阈值下限 $EC_{\text{e,lower}}/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$	4
盐分对作物生长影响阈值上限 $EC_{\text{e,upper}}/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$	15

1.4.4 模型评价

为验证 AquaCrop 模型模拟结果与实测结果的拟合度,采用均方根误差(RMSE)、拟合度指数(d)、标准均方根误差(NRMSE)和决定系数(R^2)进行评价。

1.5 不同灌溉情景模拟

为探寻不同灌溉制度(以田间试验为依据,因为 I1 灌水量下产量过低,I5 灌水定额偏大,与节约水资源目的不符,因此在模拟情景中不做分析)对无膜种植棉花产量与水分利用效率的影响,本文以

1960—2019 年共计 60 年的气象数据为基础,并依据 2018—2019 年田间试验及当地灌溉制度,制定 2 种不同灌溉模拟情景(表 3):①灌溉定额分别为 360、450、540 mm,设置不同灌水周期 5、7、10 d,根据灌溉定额调整每次的灌水定额,共计 9 个模拟方案。②固定单次灌水定额分别为 36、45、54 mm,设置不同灌水周期 5、7、10 d,共 9 个模拟方案。对不同灌溉情景下产量、生物量、水分利用效率及耗水量进行分析。

表 3 模拟情景方案
Tab.3 Simulation scenarios

模拟情景	模拟方案	灌溉定额/mm	灌水周期/d	模拟情景	模拟方案	灌水定额/mm	灌水周期/d
模拟情景 1	P1	360	5	模拟情景 2	P10	36	5
	P2	360	7		P11	36	7
	P3	360	10		P12	36	10
	P4	450	5		P13	45	5
	P5	450	7		P14	45	7
	P6	450	10		P15	45	10
	P7	540	5		P16	54	5
	P8	540	7		P17	54	7
	P9	540	10		P18	54	10

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型校正与验证

采用 2018 年试验中各处理的冠层覆盖度、产量和地上部生物量对 AquaCrop 模型进行校正(表 4),在 I2 灌溉水平下生物量拟合度最高, RMSE、 d 、NRMSE 和 R^2 分别为 457 kg/hm²、0.99、5.78% 和 0.93; I4 处理的冠层覆盖度拟合度最好, RMSE、 d 、NRMSE 和 R^2 分别为 4.12%、0.99、7.13% 和 0.60;产量则在 I3 灌溉水平下拟合度最好, RMSE、 d 和 NRMSE 分别为

表 4 AquaCrop 模型校正评价指标
Tab.4 Calibration of AquaCrop model

评价指标	模拟指标	处理		
		I2	I3	I4
RMSE	生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	457	992	1 923
	冠层覆盖度/%	9.65	7.39	4.12
	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	678	134	648
d	生物量	0.99	0.98	0.96
	冠层覆盖度	0.96	0.98	0.99
	产量	0.38	0.43	0.11
NRMSE	生物量/%	5.78	13.18	21.65
	冠层覆盖度/%	19.86	13.59	7.13
	产量/%	13.43	2.23	9.60
R^2	生物量	0.93	0.92	0.89
	冠层覆盖度	0.75	0.83	0.60
	产量	0.71	0.71	0.71

134 kg/hm²、0.43 和 2.23%，*R*² 为 0.71。总体结果表明，AquaCrop 模型的模拟值与田间实测结果拟合度较高，可以用所验证的模型参数来模拟无膜滴灌棉花的生长发育过程。

AquaCrop 模型经过参数校正后，利用 2019 年不同处理的冠层覆盖度和地上部生物量数据对模型进行验证（图 3 ~ 5）。由图 3 可知，播种后 50 d 内的冠层覆盖度维持在较低水平，随后棉花

冠层覆盖度进入快速增长阶段，与地上部生物量的增长趋势基本一致；冠层覆盖度在播种后约 90 d 时达到最大值后并保持稳定，比生物量早 40 d 达到最大值。I1 和 I2 处理的实测冠层覆盖度比模拟值偏低，而 I3、I4 和 I5 的模拟结果则与之相反。

由图 4 可知，生物量模拟值与实测值增减趋势基本一致，棉花地上部生物量自播种后开始缓慢积

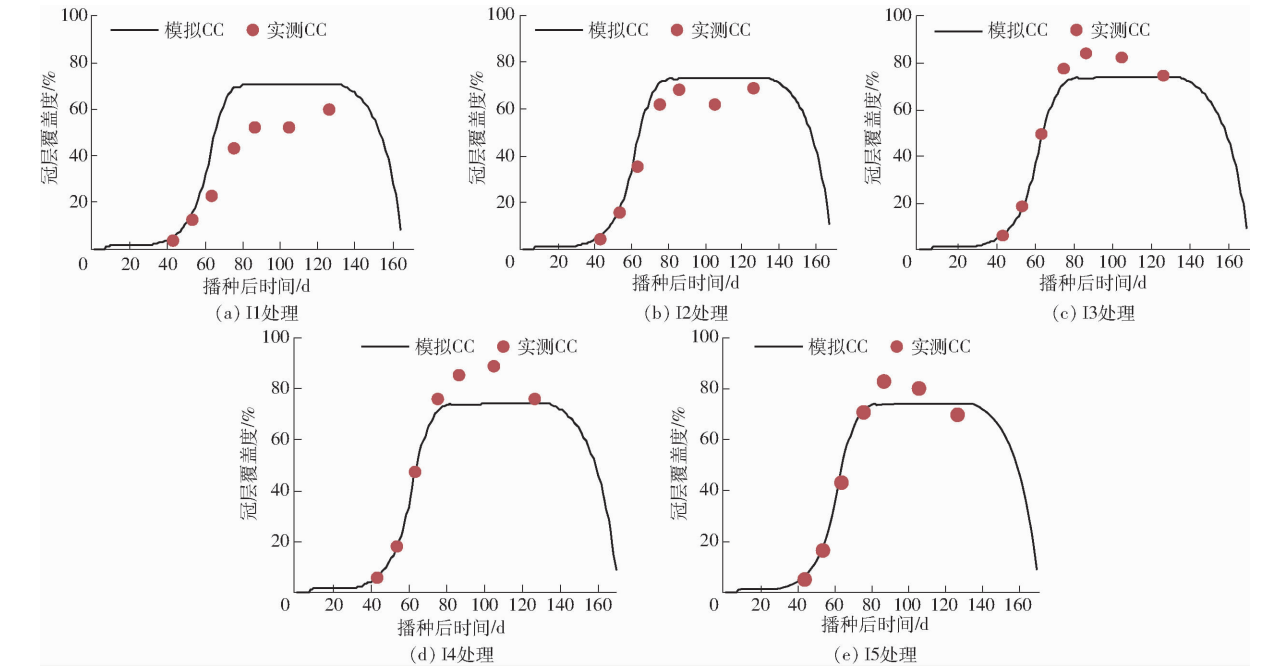


图 3 不同处理冠层覆盖度实测值和模拟值

Fig. 3 Measured and simulated values of canopy coverage in different treatments

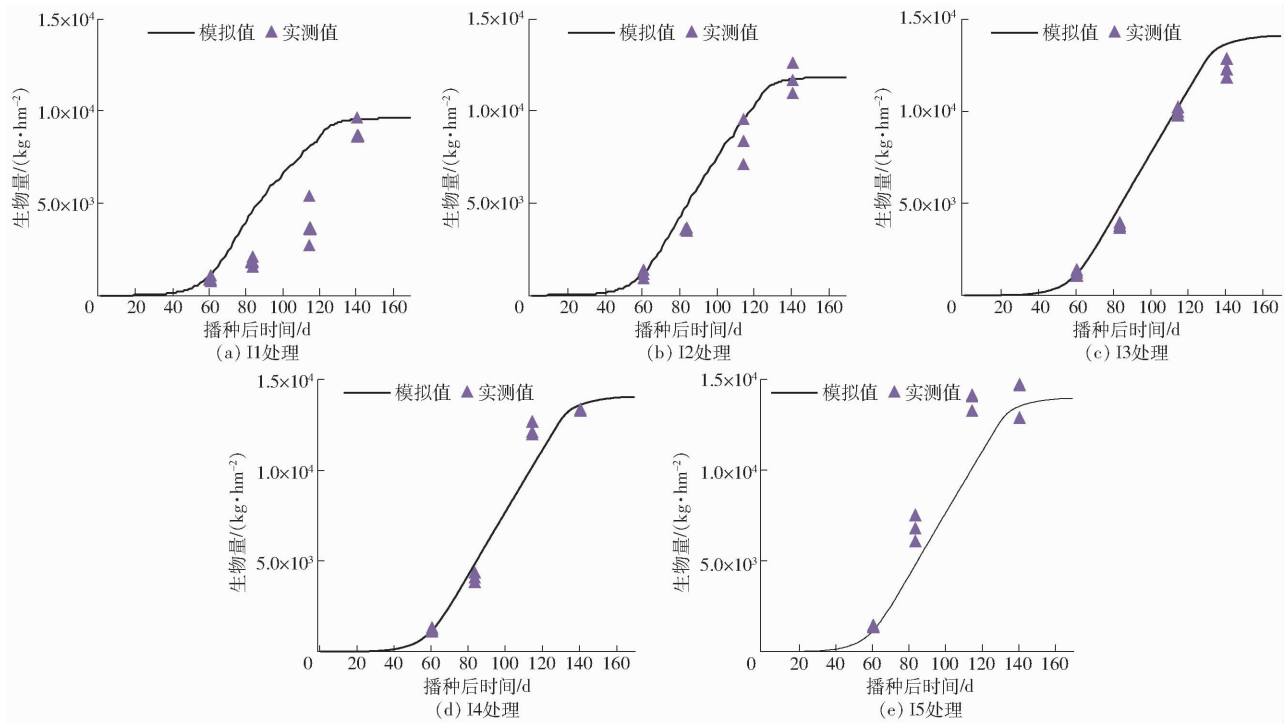


图 4 不同处理生物量实测值和模拟值

Fig. 4 Measured and simulated values of biomass in different treatments

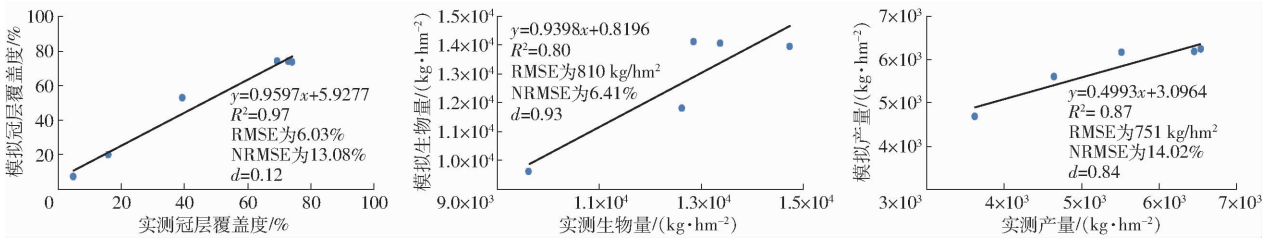


图5 2019年不同灌水定额下地上部生物量及产量实测值与模拟值之间的关系

Fig.5 Relationships between measured and simulated values of above-ground biomass and yield of cotton under different irrigation quotas in 2019

累,约60 d后进入快速生长期,植株地上部生物量生长速率增加,在播种后约130 d,地上部生物量积累达到最大值并趋于稳定。地上部生物量在一定范围内与灌水定额呈正相关。

由图5可知,2019年冠层覆盖度RMSE、d、NRMSE和 R^2 分别为6.03%、0.12、13.08%和0.97,产量及生物量的RMSE、d、NRMSE、 R^2 分别为751 kg/hm²、0.84、14.02%、0.87和810 kg/hm²、0.93、6.41%、0.80,其中 R^2 均不小于0.80,表明实测值与模拟值比较接近,模拟效果可信度较高。

表5为2019年不同处理地面冠层覆盖度、生物量和产量的模拟结果。2019年地上部生物量模拟值与实测值在I2灌溉水平下的拟合度最好, R^2 为0.99,而I1的拟合度最差, R^2 为0.88;冠层覆盖度在I3灌溉条件下的拟合度最好, R^2 为0.98,而在I1的拟合度最差, R^2 为0.91;各处理的产量实测值与模拟值的 R^2 为0.87。地上部生物量、冠层覆盖度和产量总体拟合度较好,表明AquaCrop模型能较好地模拟无膜滴灌棉花在南疆地区的生长特性。

表6 固定灌溉定额下不同灌水频率(模拟情景1)模拟结果

Tab.6 Different irrigation frequency under fixed irrigation quota (Simulation scenario 1)

模拟方案	灌溉定额/ mm	灌水周期/ d	灌水次数	产量/ (kg·hm ⁻²)	生物量/ (kg·hm ⁻²)	总灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	ET/mm
P1	360	5	20	4 074 ^c	10 133 ^c	3 600	1.13 ^{ab}	415.01 ^f
P2	360	7	15	4 077 ^b	10 121 ^b	3 600	1.13 ^{ab}	404.68 ^c
P3	360	10	10	4 182 ^a	10 361 ^a	3 600	1.16 ^c	395.79 ^a
P4	450	5	20	4 942 ^c	12 140 ^c	4 500	1.1 ^{ab}	469.99 ^g
P5	450	7	15	4 844 ^b	11 865 ^b	4 500	1.08 ^b	449.02 ^d
P6	450	10	10	4 943 ^a	11 879 ^a	4 500	1.10 ^c	438.36 ^b
P7	540	5	20	5 315 ^c	12 957 ^c	5 400	0.98 ^a	488.70 ^g
P8	540	7	15	5 274 ^b	12 846 ^b	5 400	0.98 ^{ab}	479.63 ^e
P9	540	10	10	5 073 ^{ab}	12 349 ^{ab}	5 400	0.94 ^c	454.47 ^d

注:同列不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$),下同。

灌溉定额为360 mm时,棉花产量随着灌水频率的降低而增加;当灌溉定额为450、540 mm时,产量随灌水频率的降低呈现降低趋势,且差异性显著。当灌水周期为5 d,灌溉定额为540、360 mm时,棉花产量分别达到最大(5 315 kg/hm²)和最小(4 074 kg/hm²);水

表5 AquaCrop模型验证结果

Tab.5 AquaCrop model verification results

评价 指标	模拟指标	处理				
		I1	I2	I3	I4	I5
RMSE	生物量/(kg·hm ⁻²)	672	845	1 810	670	923
	冠层覆盖度/%	16.99	8.86	5.35	6.45	7.01
	产量/(kg·hm ⁻²)	1 621	1 228	709	708	565
d	生物量	0.50	0.07	0.35	0.04	0.20
	冠层覆盖度	0.89	0.98	0.99	0.99	0.98
	产量	0.29	0.22	0.42	0.38	0.42
NRMSE	生物量/%	7.35	7.72	14.65	5.01	6.68
	冠层覆盖度/%	49.58	20.27	10.04	12.10	13.96
	产量/%	52.13	27.90	12.76	10.29	8.74
R^2	生物量	0.88	0.99	0.99	0.95	0.95
	冠层覆盖度	0.91	0.96	0.98	0.97	0.95
	产量	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

2.2 不同灌溉情景模拟结果

模型校准后,在模型基本参数不变的情况下,导入1960—2019年气象数据模拟不同灌溉情景下的产量及生物量,并取多年平均值。固定灌溉定额下不同灌水频率的9种方案进行模拟得出(表6):当

分利用效率在灌水频率为10 d,灌溉定额为360、540 mm时分别达到最大(1.16 kg/m³)和最小(0.94 kg/m³);且较高的灌溉定额和灌水周期可显著提高棉花耗水量。

固定灌水定额不同灌水周期的9种方案进行模

拟得出(表7):灌水定额为 36 mm 时,棉花产量、生物量与灌水周期呈正相关,灌水定额为 45、54 mm 时,棉花产量及生物量随灌水周期的增加呈先增加后降低的趋势,且当灌水定额为 45、54 mm,灌水周期为 5、7 d 时棉花产量、生物量均显著优于灌水周期为 10 d 时;水分利用效率随灌水周期的增加而降

低,耗水量则与之相反,且在灌水定额为 36 mm、灌水周期为 10 d 时达到最大(1.16 kg/m³)。当灌水定额为 36 mm、灌水周期为 5 d 时产量达到最大值(5 398 kg/hm²),灌水定额为 45 mm、灌水周期为 7 d 时生物量达到最大值(13 028 kg/hm²),灌水定额为 36 mm、灌水周期为 10 d 时产量和生物量达到最小

表 7 固定灌水定额下不同灌水周期(模拟情景 2)模拟结果
Tab. 7 Different irrigation frequency under fixed irrigation quota (Simulation scenario 2)

模拟方案	灌水定额/ mm	灌水周期/ d	灌水次数	产量/ (kg·hm ⁻²)	生物量/ (kg·hm ⁻²)	总灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	ET/mm
P10	36	5	20	5 398 ^a	13 146 ^a	7 200	0.75 ^d	500.77 ^a
P11	36	7	15	5 274 ^{ab}	12 896 ^{ab}	5 400	0.98 ^c	480.50 ^b
P12	36	10	10	4 182 ^d	10 361 ^d	3 600	1.16 ^a	395.79 ^c
P13	45	5	20	5 294 ^{ab}	12 923 ^{ab}	9 000	0.59 ^f	493.36 ^{ab}
P14	45	7	15	5 353 ^{ab}	13 028 ^a	6 750	0.79 ^d	477.99 ^b
P15	45	10	10	4 943 ^c	11 846 ^c	4 500	1.10 ^b	438.36 ^d
P16	54	5	20	5 200 ^{abc}	12 681 ^{ab}	10 800	0.48 ^g	486.92 ^{ab}
P17	54	7	15	5 293 ^{ab}	12 881 ^{ab}	8 100	0.65 ^e	483.23 ^b
P18	54	10	10	5 073 ^{bc}	12 349 ^{bc}	5 400	0.94 ^c	454.47 ^c

值,分别为 4 182、10 361 kg/hm²。

由图 6 可知,当总灌水量低于 4 500 m³/hm²,灌水周期为 5 d 时棉花产量较高;总灌水量介于 4 500 ~ 7 200 m³/hm²,灌水周期为 7 d 时棉花产量较高;当总灌水量超过 7 200 m³/hm²,无膜滴灌棉花产量在灌水周期为 5 d 和 7 d 时均随总灌水量的增加而降低,且灌水周期 7 d 时较 5 d 时无膜滴灌棉花产量下降速率明显。综合以上两种灌溉模拟情景,不考虑田间工作量及水资源时,以灌水周期为 5 d、总灌水量为 7 200 m³/hm²(P10)时方案最优;当以提高经济效益和节约水资源为目的,灌水周期为 5 d、总灌水量为 5 400 m³/hm²(P7)时方案最优。

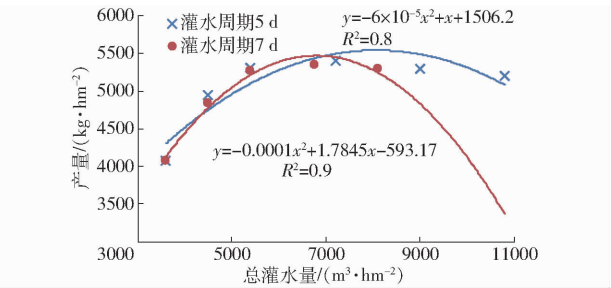


图 6 不同灌水周期下总灌水量与棉花产量的关系曲线
Fig. 6 Relationship between irrigation quotas and cotton yield under different treatments of irrigation frequency

3 讨论

3.1 AquaCrop 模型的适用性

田间试验得出的结论虽然精确可靠,但受地域和气象等因素的影响比较大,在大面积推广应用实

践中有较大局限性^[8]。本文利用 AquaCrop 模型研究新疆地区棉花生长和产量,通过 2 年田间实测数据对模型参数进行校正和验证,模拟得出棉花冠层覆盖度、产量及地上部生物量与实测值拟合度较高,冠层覆盖度 RMSE、d、NRMSE 和 R² 分别为 6.03%、0.12、13.08% 和 0.97;产量的 RMSE、d 和 NRMSE 分别为 751 kg/hm²、0.84 和 14.02%;生物量的 RMSE、d 和 NRMSE 分别为 810 kg/hm²、0.93 和 6.41%,且 R² 不小于 0.80。TAN 等^[20] 利用 AquaCrop 模型模拟覆膜滴灌条件下棉花产量的 R² 为 0.69, RMSE 为 438 kg/hm², d 为 0.82, 生物量 R² 为 0.88, RMSE 为 2 915 kg/hm², d 为 0.90。DIMITRIOS 等^[27] 模拟不同气候条件下棉花产量的 RMSE 为 0.17 t/hm², d 为 0.94, 生物量 RMSE 为 0.49 t/hm², d 为 0.93。上述研究结果与本研究的结果较为接近,表明 AquaCrop 模型能较为准确地模拟不同田间管理条件下棉花产量及生物量。

3.2 不同灌溉情景制度优化

南疆地区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,常年干旱少雨,地表蒸发强烈,因此无膜滴灌棉花受灌溉制度的影响非常明显^[28]。通过 AquaCrop 模型优化灌溉制度主要与灌水周期和灌水定额等有关。本文通过固定灌溉定额改变灌水周期的 9 种方案模拟得出:棉花产量随灌溉定额及灌水周期的增加总体呈现上升趋势,灌溉定额为 540 mm、灌水周期为 5 d(P7)产量最高,这与王洪博等^[29]发现的无膜滴灌棉花产量随灌水定额的增加而显著提高,石岩

等^[30]提出的膜下滴灌棉花产量随灌水定额的增加而增加的研究结果相一致,表明棉花在达到最大灌溉定额之前,适宜增加灌溉定额有助于棉花增产。通过固定灌水定额改变灌水周期的9种方案模拟得出:灌水定额为36 mm、灌水周期5 d(P10)时,60年平均产量优于其他处理,这与杨九刚等^[31]高频灌溉时小灌水定额棉花产量较高的结论一致。模拟情景1中灌溉定额360 mm、灌水周期5 d(P1)产量及生物量低于灌水周期10 d(P3),造成P1产量低于P3产量的原因可能是由于总灌溉定额较低,灌水周期过大导致单次灌水定额较小,灌水湿润深度达不到棉花深层主根区,造成水分胁迫进而导致棉花减产。

模拟情景1中,无膜滴灌棉花生育期耗水量随灌溉定额及灌水周期的增加总体呈上升趋势,这与王小兵^[32]的研究基本一致。模拟情景2中,随灌水定额和灌水周期的改变,棉花生育期耗水量随灌溉定额的增加呈先增加后降低趋势,造成此现象的原因可能是由于灌水量过大抑制棉花植株呼吸进而影响作物蒸腾,导致耗水量有轻微下降趋势。

3.3 南疆地区无膜滴灌棉花适宜灌溉制度推荐

目前南疆地区膜下滴灌棉花的适宜灌溉定额为400 mm^[33-35]左右,平均产量为6 057 kg/hm²^[36],显著高于无膜滴灌棉花产量。模拟情景1中灌溉定额为540 mm时,模拟得出60年无膜滴灌棉花平均产量均优于灌溉定额为360 mm和450 mm处理,且在灌水周期为5 d时(P7)产量达到最高(5 315 kg/hm²),水分利用效率为0.98 kg/m³。模拟情景2中灌水定

额为36 mm,灌水周期为5 d时(P10)产量最高为5 398 kg/hm²,但方案P11产量较P10无显著性差异,水分利用效率则提高30.67%,用水量节约33.33%。因此,当固定灌水定额时,灌水周期为7 d(P11)整体上优于其他模拟方案。针对南疆地区水资源紧缺的实际情况,综合考虑无膜滴灌棉花经济效益和水分生产率之间的关系,种植无膜棉花建议采用灌溉定额为540 mm、灌水周期为5 d(P7)。方案P7较膜下滴灌棉花灌溉定额提高35%,产量降低13.96%,表明种植无膜棉花的经济效益较覆膜种植仍有一定差距,但无膜种植棉花的推广是为了解决残膜污染问题,不能仅以经济效益来衡量。

4 结论

(1) AquaCrop模型能较好地模拟新疆地区无膜滴灌种植棉花的产量、生物量及冠层覆盖度的动态变化过程。

(2) 在无膜滴灌棉花种植条件下,适当增加灌溉定额有助于提高产量,但最大灌水量不宜超过7 200 m³/hm²,否则可能造成水分胁迫,进而影响棉花产量;当灌溉定额相同时,为提高棉花籽棉产量可适当提高灌水周期,且当灌水周期为5 d时最佳,可根据不同田间管理措施稍加调整。

(3) 根据南疆地区水资源紧缺的现状,建议无膜滴灌棉花种植采用灌溉定额为540 mm、灌水周期为5 d(P7)的灌溉制度,在保证无膜滴灌棉花种植水分生产率的同时使经济效益最大化。

参 考 文 献

- [1] 谢蕾,李江,彭亮.新时期治水理念下新疆水利规划编制对策研究[J].人民黄河,2019,41(9):73-76,82. XIE Lei, LI Jiang, PENG Liang. Countermeasures and suggestions for water conservancy planning in Xinjiang under the concept of water control in the new period[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 73-76, 82. (in Chinese)
- [2] 王兴鹏.冬春灌对南疆土壤盐动态和棉花生长的影响研究[D].北京:中国农业科学院,2018. WANG Xingpeng. Effects of winter-spring irrigation on soil water-salt dynamics and cotton growth [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [3] 陈凯文,俞双恩,李倩倩,等.不同水文年型下水稻节水灌溉技术方案模拟与评价[J/OL].农业机械学报,2019,50(12):268-277. CHEN Kaiwen, YU Shuang'en, LI Qianqian, et al. Simulation and evaluation of technical schemes for water-saving irrigation of rice in different hydrological years[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 268-277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191231&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.031. (in Chinese)
- [4] 邵光成,王志宇,王小军,等.基于DSSAT模型的冬小麦最优灌溉制度研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):289-297. SHAO Guangcheng, WANG Zhiyu, WANG Xiaojun, et al. Optimal irrigation schedule based on DSSAT model for winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 289-297. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191033&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.033. (in Chinese)
- [5] 王亮,林涛,严昌荣,等.地膜残留量对新疆棉田蒸散及棵间蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):120-128. WANG Liang, LIN Tao, YAN Changrong, et al. Effects of residual plastic film on evapotranspiration and evaporation between trees in cotton fields in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 120-128. (in Chinese)
- [6] 邹小阳,牛文全,刘晶晶,等.残膜对土壤和作物的潜在风险研究进展[J].灌溉排水报,2017,36(7):47-54. ZOU Xiaoyang, NIU Wenquan, LIU Jingjing, et al. Potential risks of plastic film residuals on soils and crops: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 47-54. (in Chinese)

[7] 刘超吉, 侯书林, 甄健民, 等. 南疆棉田残膜污染现状及防治途径[J]. 农业工程, 2018, 8(3): 45–51.
LIU Chaoji, HOU Shulin, ZHEN Jianmin, et al. Status quo and control measures for plastic mulch pollution of cotton field in South Xinjiang [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(3): 45–51. (in Chinese)

[8] 喻树迅. 无膜棉对中国棉花产业转型升级的意义[J]. 农学学报, 2019, 9(3): 1–5.
YU Shuxun. The significance of filmless cotton to promote the transformation and upgrading of China's cotton industry [J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(3): 1–5. (in Chinese)

[9] LEE K H, MARGA G V, PATRICIA M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model [J]. Environmental Modelling & Softwar, 2014, 62: 351–360.

[10] 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.
ZHANG Tao, SUN Wei, ZHANG Fengwei, et al. Simulation of AquaCrop model and management practice optimization for dryland maize production under whole plastic-film mulching on double ridges [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 918–926. (in Chinese)

[11] 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 Shijun, ZHANG Linlin, CHEN Zhijun, et al. Advances in AquaCrop model research and application [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(17): 3286–3299. (in Chinese)

[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.
TENG Xiaowei, DONG Yansheng, SHEN Jiaxiao, et al. Winter wheat irrigation simulation in arid area based on AquaCrop model [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(20): 4100–4110. (in Chinese)

[13] 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 Huimin, XU Xin'gang, FENG Haikuan, et al. Water use efficiency of winter wheat based on AquaCrop model in Beijing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(23): 4507–4519. (in Chinese)

[14] 张铁楠, 付驰, 李晶, 等. 基于寒地春小麦 AquaCrop 与 WOFOST 模型适应性验证分析[J]. 作物杂志, 2013(3): 121–126.
ZHANG Tienan, FU Chi, LI Jing, et al. The adaptability test analysis of AquaCrop and WOFOST model based on the cold spring wheat [J]. Crops, 2013(3): 121–126. (in Chinese)

[15] ANDARZIAN B, BANNA Y M, STEDUTON 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.

[16] ANJUM I M, YANJUN S, RUZICA S, 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: 61–72.

[17] 徐昆, 朱秀芳, 刘莹, 等. 采用 AquaCrop 作物生长模型研究中国玉米干旱脆弱性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 154–161.
XU Kun, ZHU Xiufang, LIU Ying, et al. Vulnerability of drought disaster of maize in China based on AquaCrop model [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 154–161. (in Chinese)

[18] 刘琦, 龚道枝, 郝卫平, 等. 利用 AquaCrop 模型模拟旱作覆膜春玉米耗水和产量[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 54–61.
LIU Qi, GONG Daozhi, HAO Weiping, et al. Simulating water use and yield of film mulched maize with AquaCrop model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 54–61. (in Chinese)

[19] 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 Dongguo, LE Zhihua, XU Baoli, et al. Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 114–122. (in Chinese)

[20] 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.

[21] LI F, DONG Y, YONG Z. Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model [J]. Water Resour Manage, 2019, 33: 39–55.

[22] 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 108–113.
WANG Jian, CAI Huanjie, CHEN Feng, et al. Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 108–113. (in Chinese)

[23] KATERJI N, CAMPI P, MASTRORILLI M. Productivity evapo-transpiration and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress condition in the Mediterranean [J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 14–26.

[24] 王峰, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 120–127.
WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effect of different irrigation scheduling on salt distribution and leaching in cotton field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 120–127. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131220&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 12. 020. (in Chinese)

[25] 樊凯, 高阳, 王兴鹏, 等. 根据气象信息指导南疆棉花膜下滴灌的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 83–90.
FAN Kai, GAO Yang, WANG Xingpeng, et al. Study on cotton drip irrigation under film mulching in southern Xinjiang based on meteorological information [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 83–90. (in Chinese)

csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2020s169&flag = 1&journal_id = jcsam. Doi:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. S1. 069. (in Chinese)

[20] 田海清,张晶,张珏,等. 基于粒子群算法优化光谱指数的甜菜叶片氮含量估测研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):168-178.
TIAN Haiqing, ZHANG Jing, ZHANG Jue, et al. Estimation of sugar beet leaf nitrogen content based on spectral parameters optimized by particle swarm optimization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):168-178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190318&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 03. 018 (in Chinese)

[21] 敖永才,师奕兵,张伟. 自适应惯性权重的改进粒子群算法[J]. 电子科技大学学报,2014,43(6):874-880.
AO Yongcai, SHI Yibing, ZHANG Wei. Improved particle swarm optimization with adaptive inertia weight[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6):874-880. (in Chinese)

[22] 冯康,张永光,张亚超,等. 混沌粒子群神经网络在变形预测中的应用研究[J]. 北京测绘,2018,32(11):1276-1280.
FENG Kang, ZHANG Yongguang, ZHANG Yachao, et al. The application of chaos particle swarm neural network in deformation prediction[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018, 32(11):1276-1280. (in Chinese)

[23] 董旭良,王建华. 一种求解多目标优化问题的粒子群算法的研究[J]. 电子设计工程,2013,21(3):36-39.
DONG Xuliang, WANG Jianhua. A study of particle swarm algorithm for multi-objective optimization problem[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(3):36-39. (in Chinese)

[24] 龙达鑫. 接口回调实现安卓列表控件适配器和 Fragment 的通信[J]. 信息技术与信息化,2019(3):85-88.
LONG Daxin. Implementation of communication between Android list widget adapter and Fragment by interface callback [J]. Information Technology and Informatization, 2019(3):85-88. (in Chinese)

[25] 买合布别木·黑力力,沙尔山别克·阿不地力大,依力亚尔·艾合买提江,等. 郊区养鸡户鸡舍空气部分有害气体的检测[J]. 新疆畜牧业,2018,33(2):24-26.

~~~~~

(上接第 301 页)

[26] ALI M, TALUKDER M. Increasing water productivity in crop production—a synthesis[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(11):1201-1213.

[27] DIMITRIOS V, ANDERAS K, GARIFALIA E, et al. Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147:116-128.

[28] 马晓燕,王志鑫,郝康伟,等. 极端干旱区果园人工生草对土壤理化性质的影响[J]. 果树学报,2020,37(8):1184-1195.

[29] 王洪博,曹辉,高阳,等. 南疆无膜滴灌棉花灌溉制度对土壤水分和产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(5):26-34.  
WANG Hongbo, CAO Hui, GAO Yang, et al. The effects of drip-irrigation scheduling without mulching on soil moisture, yield and quality of cotton in Southern Xinjiang [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5):26-34. ( in Chinese)

[30] 石岩,张金霞,董平国,等. 干旱缺水区膜下滴灌棉花节水机理及灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(2):77-85,100.  
SHI Yan, ZHANG Jinxia, DONG Pingguo, et al. The study on water saving mechanism and irrigation program with cotton drip irrigation under plastic film in drought and water shortage area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2):77-85, 100. ( in Chinese)

[31] 杨九刚,何继武,马英杰,等. 灌水频率和灌溉定额对膜下滴灌棉花生长及产量的影响[J]. 节水灌溉,2011(3):29-32,38.  
YANG Jiugang, HE Jiwu, MA Yingjie, et al. Effects of irrigation frequency and quota on cotton growth and yield with drip irrigation under plastic film[J]. Water Saving Irrigation, 2011(3):29-32, 38. ( in Chinese)

[32] 王小兵. 膜下高频滴灌棉花耗水量与灌溉制度研究[D]. 石河子:石河子大学,2008.

[33] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉制度的试验研究[J]. 水利学报,2002,33(11):119-123.  
CAI Huanjie, SHAO Guangcheng, ZHANG Zhenhua. Water demand and irrigation scheduling of drip irrigation for cotton under plastic mulch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(11):119-123. ( in Chinese)

[34] 刘新永,田长彦,马英杰,等. 南疆膜下滴灌棉花耗水规律以及灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(1):108-112.  
LIU Xinyong, TIAN Changyan, MA Yingjie, et al. Water consumption characteristics and scheduling of drip irrigation under plastic film for cotton in South Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1):108-112. ( in Chinese)

[35] 王峰,孙景生,刘祖贵,等. 灌溉制度对机采棉生长、产量及品质的影响[J]. 棉花学报,2014,26(1):41-48.  
WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of irrigation scheduling on growth, yield and fiber quality of cotton under mechanical harvest cropping model[J]. Cotton Science, 2014, 26(1):41-48. ( in Chinese)

[36] 宁松瑞,左强,石建初,等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报,2013,29(22):90-99.  
NING Songrui, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):90-99. ( in Chinese)