

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.035 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.035

赵向东,王振华,张金珠,等.基于AquaCrop模型的伊犁河流域玉米灌溉优化[J].水土保持学报,2025,39(6):394-405.

ZHAO Xiangdong, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Optimization of maize irrigation in Ili River basin based on AquaCrop model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):394-405.

基于AquaCrop模型的伊犁河流域玉米灌溉优化

赵向东^{1,2,3,4}, 王振华^{1,2,3,4}, 张金珠^{1,2,3,4}, 刘健^{1,2,3,4}, 吝海霞^{1,2,3,4}, 靳志锋⁵,
刘茹华^{1,2,3,4}, 高雪慧^{1,2,3,4}, 马占利^{1,2,3,4}, 张浩然^{1,2,3,4}, 叶含春^{1,2,3,4}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子832000; 2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子832000;
3.兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心,新疆石河子832000; 4.农业农村部西北绿洲节水
农业重点实验室,新疆石河子832000; 5.伊犁职业技术学院,新疆伊宁835000)

摘要: [目的] 为明确AquaCrop模型在新疆伊犁地区膜下滴灌玉米生长和生产模拟的适用性,并探究玉米生育期最优灌溉,为农民提供灌溉量决策的参考,提高玉米产量和水分利用效率。[方法] 利用伊犁南岸灌区试验站点2020—2021年膜下滴灌玉米灌溉试验数据对AquaCrop模型进行参数率定和校核,并用校核好的模型揭示3种降水年型(丰水年、平水年、枯水年)和8种灌溉水量(4 000~5 400 m³/hm²)对玉米生长、产量和水分利用效率的影响。[结果] 通过大田试验玉米的冠层覆盖度、生物量、产量、水分利用效率对模型进行校准验证,对比发现模拟值与实测值的一致性较好,能较好实现模拟效果。在模拟中发现,随着灌溉定额的增加,玉米产量呈先增长、后降低,再增长的非线性变化趋势。在相同灌溉条件下,不同降雨年型对作物产量的影响显著。[结论] 基于24种灌溉情景模拟,以节水高产为目标,推荐伊犁河地区玉米丰水年最佳灌溉水量为4 400 m³/hm²,产量和水分利用效率可达14.33 t/hm²和29.73 kg/(hm²·mm),平水年和枯水年条件下最佳灌溉水量均为5 400 m³/hm²,平水年和枯水年的产量和水分利用效率分别为14.375 t/hm²、29.91 kg/(hm²·mm)和13.458 t/hm²、28.96 kg/(hm²·mm)。研究成果为AquaCrop模型在伊犁地区膜下滴灌玉米灌溉模拟的应用提供经验,为伊犁地区膜下滴灌玉米节水增产提供科学指导。

关键词: AquaCrop; 伊犁河流域; 玉米; 膜下滴灌; 灌溉; 节水增产

中图分类号: S274.1; S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0394-12

Optimization of Maize Irrigation in Ili River Basin Based on AquaCrop Model

ZHAO Xiangdong^{1,2,3,4}, WANG Zhenhua^{1,2,3,4}, ZHANG Jinzhu^{1,2,3,4}, LIU Jian^{1,2,3,4}, LIN Haixia^{1,2,3,4},
JIN Zhifeng⁵, LIU Ruhua^{1,2,3,4}, GAO Xuehui^{1,2,3,4}, MA Zhanli^{1,2,3,4}, ZHANG Haoran^{1,2,3,4}, YE Hanchun^{1,2,3,4}

(1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2.Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi University,
Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3.Technology Innovation Center for Agricultural Water and Fertilizer Efficiency
Equipment of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 4.Key Laboratory of
Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
5.Yili Vocational and Technical College, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the applicability of the AquaCrop model for simulating the growth and production of maize under mulched drip irrigation in Xinjiang's Ili region, and to investigate the optimal irrigation during the maize growth period, thereby providing a reference for farmers' irrigation decision-making to enhance maize yield and water use efficiency. [Methods] Using the experimental data of maize under mulched drip irrigation from the experimental plots in the South Bank Irrigation Area of Ili from 2020 to 2021, the AquaCrop model was calibrated and validated. The validated model was then used to analyze the effects of three types of

收稿日期:2025-05-21 修回日期:2025-07-04 录用日期:2025-07-10 网络首发日期(www.cnki.net):2025-09-23
资助项目:第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0500);伊犁哈萨克自治州科技计划项目(YZ2023A17);国家重点研发计划项目(2022YFD1900405)

第一作者:赵向东(1999—),男,硕士研究生,主要从事干旱区节水灌溉。E-mail:1114007635@qq.com

通信作者:叶含春(1966—),男,硕士,教授,主要从事水资源开发利用。E-mail:739301184@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

precipitation years (wet, normal, and dry years) and eight irrigation levels (ranging from 4 000 to 5 400 m³/hm²) on maize growth, yield, and water use efficiency. [**Results**] The model was calibrated and validated using field experimental data of maize canopy cover, aboveground biomass, yield, and water use efficiency. The comparison showed good consistency between simulated and measured values, indicating a satisfactory simulation performance. The simulation showed that with increasing irrigation quota, maize yield exhibited a nonlinear trend of increasing initially, then decreasing, and finally increasing again. Under the same irrigation conditions, crop yield was significantly affected by precipitation year types. [**Conclusion**] Based on simulations of 24 irrigation scenarios and aiming for water saving and high yield, the optimal irrigation amount for maize in the Ili River region is recommended as 4 400 m³/hm² in wet years, which can achieve a yield of 14.33 t/hm² and a water use efficiency of 29.73 kg/(hm²·mm). In both normal and dry years, the optimal irrigation amount is 5 400 m³/hm², with yields and water use efficiencies reaching 14.375 t/hm² and 29.91 kg/(hm²·mm) in normal years, and 13.458 t/hm² and 28.96 kg/(hm²·mm) in dry years, respectively. These findings provide valuable experience for applying the AquaCrop model to simulate drip-irrigated maize in the Ili region and offer scientific guidance for achieving water-saving and high-yield maize production under mulched drip irrigation in this region.

Keywords: AquaCrop; Ili River basin; maize; mulched drip irrigation; irrigation; water saving and yield increasing

Received: 2025-05-21

Revised: 2025-07-04

Accepted: 2025-07-10

Online(www.cnki.net): 2025-09-23

中国作为全球最大粮食生产国,肩负保障粮食供应稳定与合理利用水资源、实现农业可持续发展的使命^[1],新疆伊犁属于典型的温带半干旱区,其日照时间充足,年降水量适中,昼夜温差大,为玉米的光合作用和干物质积累提供了良好的条件。2023年新疆玉米播种面积占粮食总面积的51%,占新疆粮食作物总产量的62%^[2],2024年9月新疆伊犁州的百万亩吨粮田建设已经达到吨粮水平,对推动新疆农业的发展和全国玉米产业的提升具有重大意义^[3]。然而,农业灌溉用水量占总用水量的92%以上,玉米种植过程中存在的灌溉水利用效率低及水资源浪费等问题,严重制约玉米的安全生产和产量提升。因此,构建科学合理的膜下滴灌玉米灌溉制度,对于优化灌溉策略、提高水资源利用效率至关重要。这不仅能够有效缓解水资源紧缺问题,满足粮食生产的需求,还能为农业可持续发展提供有力支撑,更是对粮食安全和生态保护的保障。

田间试验受季节限制,且过程易受外界因素干扰,近年来,国内外学者利用作物模型模拟作物对复杂灌溉制度的响应情况。田间试验为作物模型的参数校准和验证提供可靠依据,作物模型通过模拟不同地域、不同气候场景下的作物生长情况,突破田间试验时空局限性,为农业可持续发展提供决策支持。AquaCrop模型凭借参数输入更系统、操作更简便、模拟更准确等特性被广泛用于作物生长研究^[4-5]。唐博文等^[6]利用AquaCrop模型在黑龙江省松嫩平原模拟

不同年型下雨养与灌溉条件下玉米生理生长,冠层覆盖度、生物量的 $R^2 \geq 0.97$, $EF \geq 0.99$,模型模拟精度较高;BOULANGE等^[7]通过调试各非保守参数,结果显示,模拟冠层覆盖度 $RMSE < 11.5\%$, $EF > 0.881$,证明AquaCrop模型在乌兹别克斯坦半干旱田间预测棉花生长的适用性;高爽等^[8]利用AquaCrop模型从降雨匹配度及作物需水的变化特征研究得出,关中地区延迟播种可提高作物需水与降雨匹配的应对措施;TERÁN-CHAVES等^[9]测试AquaCrop模型在南美洲哥伦比亚加勒比干旱地区不同水况(田间持水量20%~80%)下作物的冠层覆盖率、土壤水分和生物量模拟适用性表明,模拟与观测数据显示出良好的一致性。这些结果表明,采用AquaCrop模型能较好进行不同地区不同作物灌溉制度优化模拟,但未见对不同灌溉定额下该模型对伊犁地区玉米生长模拟的适用性评价。

因此,本研究以伊犁南岸灌区膜下滴灌玉米为研究对象,利用2 a田间试验数据校准并验证AquaCrop模型关键参数,评价该模型在伊犁南岸灌区膜下滴灌玉米的适用性,并基于节水增产提出的最优灌溉策略,为伊犁地区玉米可持续生产实践提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2020年4月至2021年9月在新疆西北部伊犁河南岸灌区管理处运行管理站、新疆生产建设

兵团第四师水利局、石河子大学灌溉试验联合基地(43°36'00"N, 80°36'00"E)进行。试验区海拔 818.2 m 属温带半干旱性气候, 常年平均气温 9.3 °C, 无霜期 190 d。试验基地多年平均降水量 265.8 mm,

年蒸发量 1 784.8 mm, 日照时间 2 943 h。试验地土壤质地主要为中壤土和砾质土, 0~100 cm 土层土壤平均体积质量 1.52 g/cm³, 地下水深埋大于 6 m, 试验区土壤基本参数见表 1。

表 1 试验区土壤物理参数

Table 1 Physical parameters of soil in experimental plots

土层深度/cm	土壤质地	体积质量/ (g·cm ⁻³)	饱和体积 含水率/%	田间持水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	凋萎含水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和导水率/ (mm·d ⁻¹)
0~20	黏壤土	1.48	0.441 5	0.29	0.18	798.4
20~40	砂质黏壤土	1.53	0.422 6	0.32	0.17	879.3
40~60	砂壤土	1.55	0.414 3	0.32	0.16	880.6
60~80	砂壤土	1.59	0.400 0	0.33	0.16	892.1
80~100	砂壤土	1.58	0.403 8	0.33	0.16	896.6

1.2 试验设计

以伊犁河流域玉米品种“金谷玉 6 号”为研究对象, 开展灌溉水量和施氮量的双因素田间灌溉试验。2020 年播种日期为 4 月 25 日, 收获日期为 9 月 12 日, 总生育期为 140 d。试验采用一膜一管两行种植模式, 降解膜厚度为 0.01 mm、宽 80 cm, 窄行间距 30 cm, 宽行间距 80 cm。试验采用单翼迷宫式滴灌带, 外径 16 mm, 壁厚 0.3 mm, 滴头间距 350 mm, 滴头流量 1.8 L/h。试验小区面积 72 m²(12 m × 6 m), 设置 3 次重复。播种方式为“干播湿出”, 参考当地农户习惯, 2020 年、2021 年设置灌水定额 W0(4 500 m³/hm²), 施肥 N3(280 kg/hm²; 常规量), 2021 年增设 3 种不同灌溉定额分别为 W1(3 700 m³/hm²)、W2(4 300 m³/hm²)、W3(4 900 m³/hm²), 施肥量设 3 个施氮肥水平处理 N1(200 kg/hm², -10% 氮肥)、N2(240 kg/hm², -5% 氮肥)、N3(280 kg/hm², 常规量), 共计 9 个处理, 每个处理 3 个重复, 灌溉制度见表 2。

表 2 灌溉制度

Table 2 Irrigation schedule

生育期	日期(月-日)	灌溉水平/(m ³ ·hm ⁻²)					
		W0	次数	W1	W2	W3	次数
苗期	05-04—06-04	500	1	410	520	600	1
拔节期	06-05—07-05	1 000	2	410	520	600	1
抽雄期	07-06—07-31	1 500	3	1 235	1 370	1 550	2
灌浆期	08-01—08-25	1 000	2	1 235	1 370	1 550	2
成熟期	08-26—09-05	500	1	410	520	600	1
全生育期		4 500	9	3 700	4 300	4 900	7

1.3 AquaCrop 模型

1.3.1 模型原理 AquaCrop 是由联合国粮食及农业组织自 2009 年起持续开发的作物生长模拟模型, 模型基于日尺度时间步长和过程驱动, 主要用于作物水分生产力的分析与评估^[10-12]。AquaCrop 已被广泛

用于多种 C3、C4 作物研究, 在模拟作物生长和产量时, 综合考虑水分、盐度、养分和温度等多种胁迫因素对作物的影响。

AquaCrop 模型将 ET_c 分为作物蒸腾(T_r)和地表蒸发(E)2 部分。模拟作物蒸腾对作物冠层覆盖度进行修正, 通过蒸腾或蒸发系数建立修正冠层覆盖度(CC*)与 T_r和 E 之间的函数关系, 结合计算出的标准作物水分生产力(W_p*)估算地上生物量(B), 并使用收获指数将 B 转化为 Y^[13], 具体计算公式为:

$$CC^* = 1.72CC - CC^2 + 0.30CC^3 \quad (1)$$

$$T_r = K_s CC^* K_{cT_{r,s}} S_{ET_0} \quad (2)$$

$$B = K_{sb} W_p^* \sum \frac{T_r}{S_{ET_0}} \quad (3)$$

$$Y = f_{HI} S_{HI_0} B \quad (4)$$

式中: CC* 为调整后的实际冠层覆盖度, %; T_r 为作物蒸腾作用; B 为作物的地上生物量, t/hm²; K_s 为由缺水、水过多、土壤盐分等因素造成的水盐胁迫系数; K_{cT_{r,s}} 为土壤水分充足、不受盐分胁迫和冠层完全覆盖条件下的作物最大蒸腾系数; S_{ET₀} 为用彭曼公式计算的参考蒸发蒸腾量, mm; K_{sb} 为温度胁迫应力系数; W_p* 为归一化的水力生产力, g/m²; f_{HI} 为影响产量形成的胁迫调节因子; S_{HI₀} 为无胁迫条件下的最优参考作物收获指数。

1.3.2 AquaCrop 模型数据库构建

1) 气象数据

利用试验区气象站获取 2020—2021 年气象数据, 包括日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、大气压力、2 m 处风速等。每日参考作物蒸散量(ET₀)使用 Penman-Monteith 公式^[14]计算。2020—2021 年生育期内最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})、降水量(P)见图 1 和图 2。

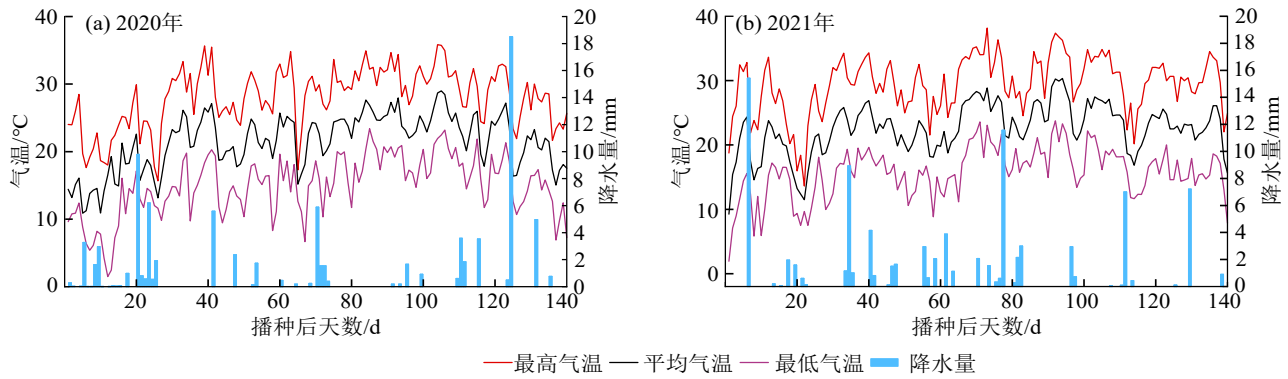


图 1 玉米生育期内温度和降水量

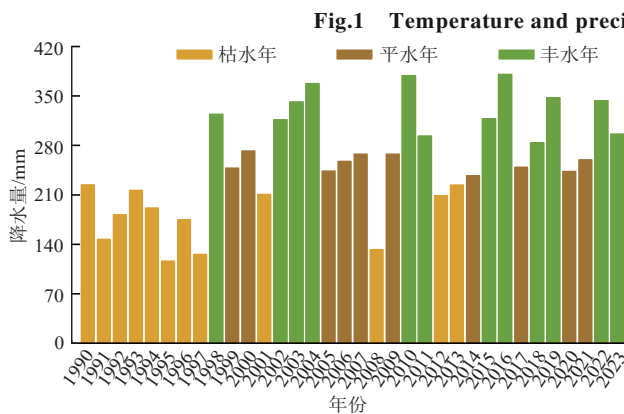


图 2 1990—2023年玉米生育期年降水分布

Fig.2 Annual precipitation distribution during maize growth period from 1990 to 2023

2)作物数据

在各试验小区内,随机选取 5 株具代表性的玉米。于苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期及成熟期,分别测定其株高、茎粗、叶面积与干物质量。将玉米的茎、叶分离,称量各部分组织器官的鲜质量。将样品置于 105 °C 下杀青 30 min,在 75 °C 下烘干至恒重,最后称量各器官的干物质量。叶面积指数、冠层覆盖度^[10]计算方法为:

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n L_{ij} W_{ij}}{m} \quad (5)$$

$$CC = 1.005(1 - e^{-0.6LAI})^{1.2} \quad (6)$$

式中:LAI为叶面积指数; ρ 为植物密度; m 为植物数量; n 为每株植物的叶数; L_{ij} 为叶长,cm²; W_{ij} 为叶宽,cm²。

玉米生理成熟后进行田间取样,随机在各试验小区连续选取 15 株玉米,测定植株的穗长、穗粒数、收获穗数、千粒质量,计算出各处理玉米产量。

3)水分利用效率

水分利用效率是指单位水分消耗获得的生物量或产量,产量水分利用效率作为判断作物是否高效用水的一项重要指标,对研究灌溉制度是否合理具有重要意义^[15]。计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (7)$$

式中:Y为作物产量,kg/hm²;ET为作物耗水量,mm。

1.3.3 模型校准验证 AquaCrop模型使用前,需进行校准验证,确保模拟精度。本研究在使用前通过调整非保守参数来提升模拟精度,并评估其在本试验中的可行性。非保守参数的校准基于 2020 年和 2021 年大田试验中 W0 处理数据校准,选择 2021 年的 W1、W2、W3 处理数据对模型进行验证。

为了检验 AquaCrop 模型的准确性,评价指标选取均方根误差(RMSE)、决定系数(R²)、一致性系数(d)、Nash效率系数(NSE)来评价模型性能。计算方法为:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right)^2 \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中: x_i 为样本实测值; y_i 为样本模拟值; n 为实测样本值; \bar{x} 为实测值的平均值; \bar{y} 为模拟值的平均值。

1.4 灌溉优化情景设置

为探索不同降雨年型、灌溉对玉米产量和水分利用效率的影响,基于优化适线法拟合 Pearson-III 型曲线^[16]将试验站 1990—2023 年逐日降水量降雨频率划分为 0~25%、25%~75% 和 75%~100%,对应丰水年、平水年和枯水年。划分数据表明,2016 年为典

型丰水年($P=25\%$),降雨量 380.41 mm,2006 年为典型平水年($P=50\%$),降雨量 257.43 mm,1995 年为典型枯水年($P=75\%$),降雨量 116.14 mm。参考当地种植习惯,模拟玉米播种日期设置在 4 月 25 日,模拟周期为 140 d。根据《新疆维吾尔自治区农业用水定额》通知,灌溉定额设置在 4 000~5 400 m^3/hm^2 ,以

200 m^3/hm^2 为调整步长,共 8 个灌溉水平,分别标记为 G1~G8。

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型参数校验结果

根据 2021 年 W1、W2、W3 处理的实测数据验证后的伊犁河流域玉米“金谷玉 6 号”参数见表 3。

表 3 AquaCrop 模型本地化的玉米校准参数

Table 3 Calibration parameters of maize for AquaCrop model localization

模型板块	作物参数定义	单位	初始值	校准参数值
作物物候参数	基础温度	$^{\circ}\text{C}$	8	8
	上限温度	$^{\circ}\text{C}$	30	30
	作物系数		1.05	1.14
	播种距成熟	d	132	140
	出苗率 90% 时单株作物覆盖面积	cm^2	6.5	8
	冠层增长系数	$^{\circ}\text{C}/\text{d}$	0.163 12	0.127 75
	初始冠层覆盖度	%		0.8
	最大冠层覆盖度	%	0.96	0.93
	冠层衰减系数	$^{\circ}\text{C}/\text{d}$	0.116 91	0.058 7
	描述根区扩展的形状因子		13	14
	最小有效生根深度	m	0.3	0.3
最大有效生根深度	m	2.3	2.25	
土壤水分胁迫	水分胁迫对冠层生长影响上限		0.14	0.15
	水分胁迫对冠层生长影响下限		0.72	0.45
	冠层扩张的水分胁迫形状因子		2.9	1.2
生物量与产量形成参数	标准水分生产力	g/cm^3	33.7	35
	参考收获指数	%	48	40

2.2 玉米生长特性

2.2.1 冠层覆盖度 玉米冠层覆盖度随播种后天数的变化趋势见图 3、图 4。整个生育期各处理的冠层覆盖度呈现早期迅速上升,后期逐渐平缓下降趋势。2 a 的 W0 处理实测值与模拟值趋势相同,反映了模型校准效果较好,2021 年生育期 W3 处理的冠

层覆盖度高于 W1、W2,但苗期模拟值的冠层覆盖度均小于实测值。于 7 月抽雄期缓慢增长达至最大值,同时期 W1 较 W2、W3 相比,灌水量较少,增长平缓趋势更为明显,说明灌水量与冠层覆盖度呈正相关。无论哪种灌溉情景下,模拟值与实测值生长趋势均一致。

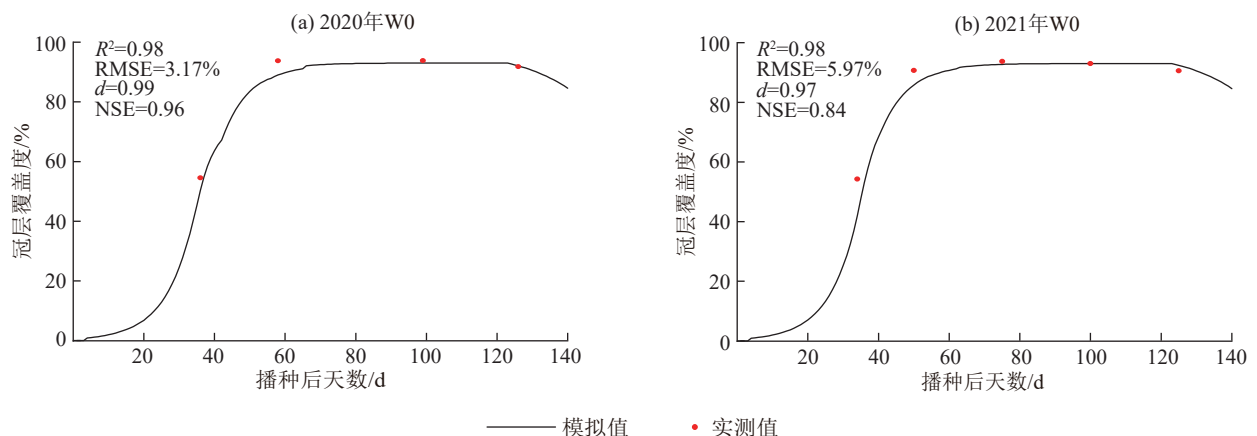


图 3 玉米冠层覆盖度模拟值与实测值率定

Fig.3 Calibration of simulated and measured maize canopy cover

AquaCrop 模型模拟 2020 年、2021 年校准的冠层覆盖度模拟值与实际值的模拟指标 R^2 为 0.98, 均方

根误差 RMSE 分别为 3.17%、5.97%, Willmott 一致性指数 d 分别为 0.99、0.97 与 Nash 效率系数 NSE 分

别为 0.96、0.84。2021 年验证处理的模拟指标范围： R^2 为 0.91~0.97，均方根误差 RMSE 为 4.97%~12.57%，Willmott 一致性指数 d 为 0.95~0.98，Nash

效率系数 NSE 为 0.78~0.96，模型对伊犁地区玉米冠层覆盖度的模拟与实测值误差较为合理，该模型适用于模拟伊犁地区玉米冠层变化。

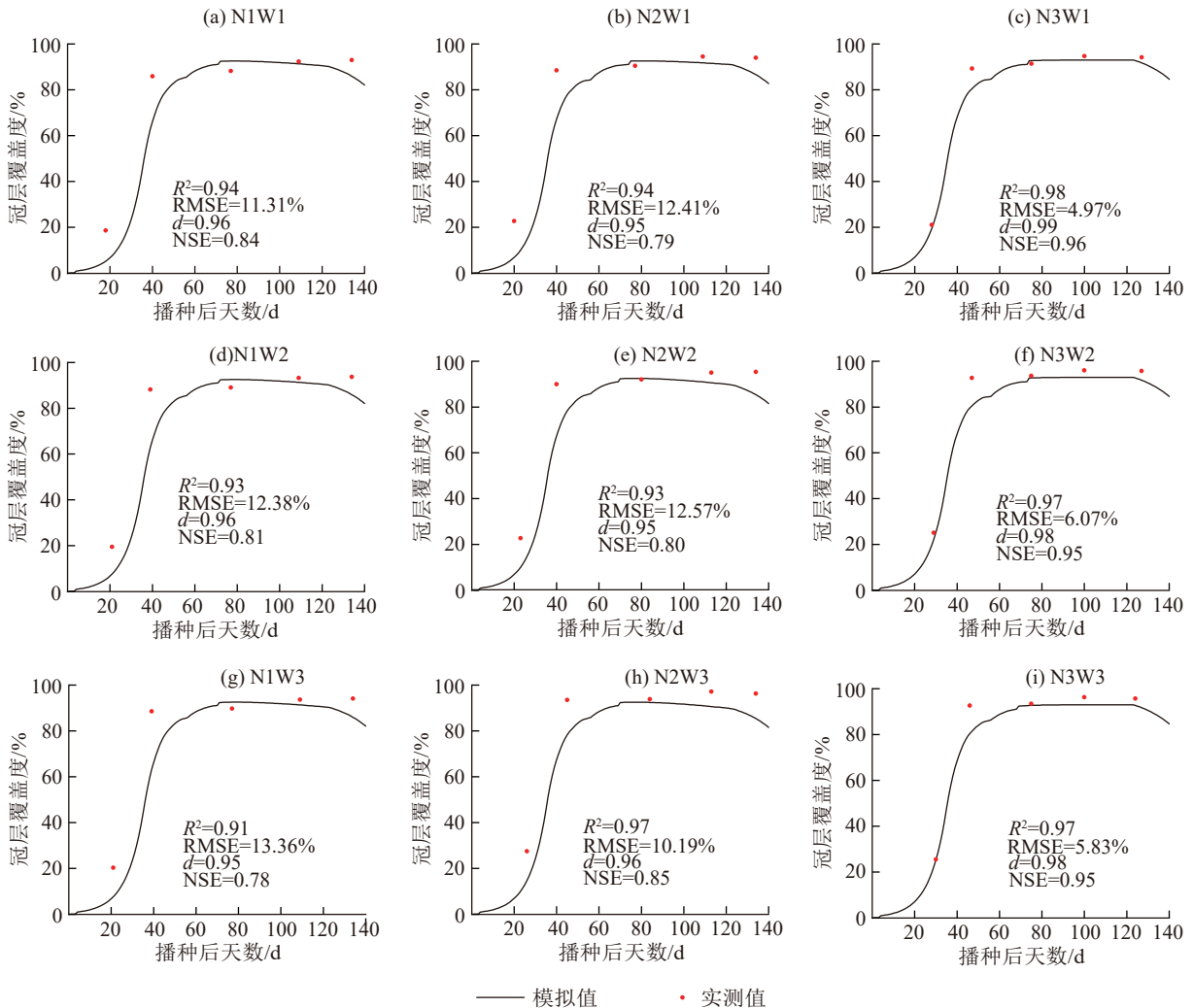


图 4 2021 年玉米冠层覆盖度模拟值与实测值验证

Fig.4 Validation of simulated and measured maize canopy cover in 2021

2.2.2 地上生物量 地上生物量随播种后天数的变化趋势见图 5 和图 6。在整个模拟阶段，在玉米播种后 60~110 d 内，模型模拟生物量均高于实测值，但在

苗期及成熟期模拟效果较好。在整个模拟过程中，W3 处理精度较 W0、W1、W2 处理效果好，同时 N1、N2 处理下模拟精度低于 N3。

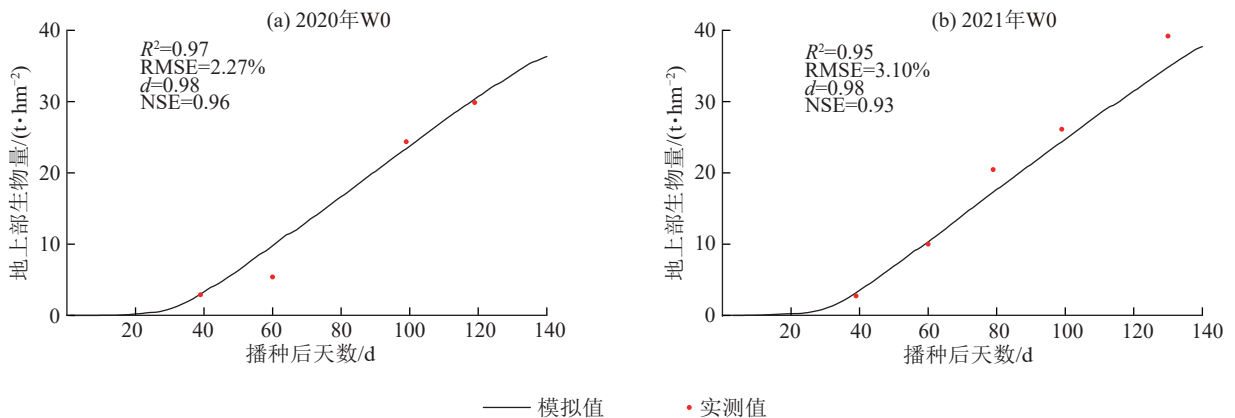


图 5 2020 年和 2021 年玉米地上生物量模拟值与实测值率定

Fig.5 Calibration of simulated and measured maize aboveground biomass in 2020 and 2021

AquaCrop 模型模拟 2020 年和 2021 年的生物量模拟值与实际值的模拟指标 R^2 为 0.97、0.95, 均方根误差 RMSE 分别为 2.27%、3.10%, Willmott 一致性指数 d 分别为 0.98、0.98 与 Nash 效率系数 NSE 分别为 0.96、0.93。2021 年验证处理的模拟结果表明, R^2 在 0.85~0.94、均方根误差 RMSE 在

3.26~4.43%, Willmott 一致性指数 d 分别为 0.95~0.98, Nash 效率系数 NSE 分别为 0.84~0.92, 结果表明, 不同灌溉下生物量增长不同, 但趋势大体一致。模型在伊犁地区玉米的模拟与实测值均在合理误差内, 该模型可适用于模拟伊犁地上生物量变化。

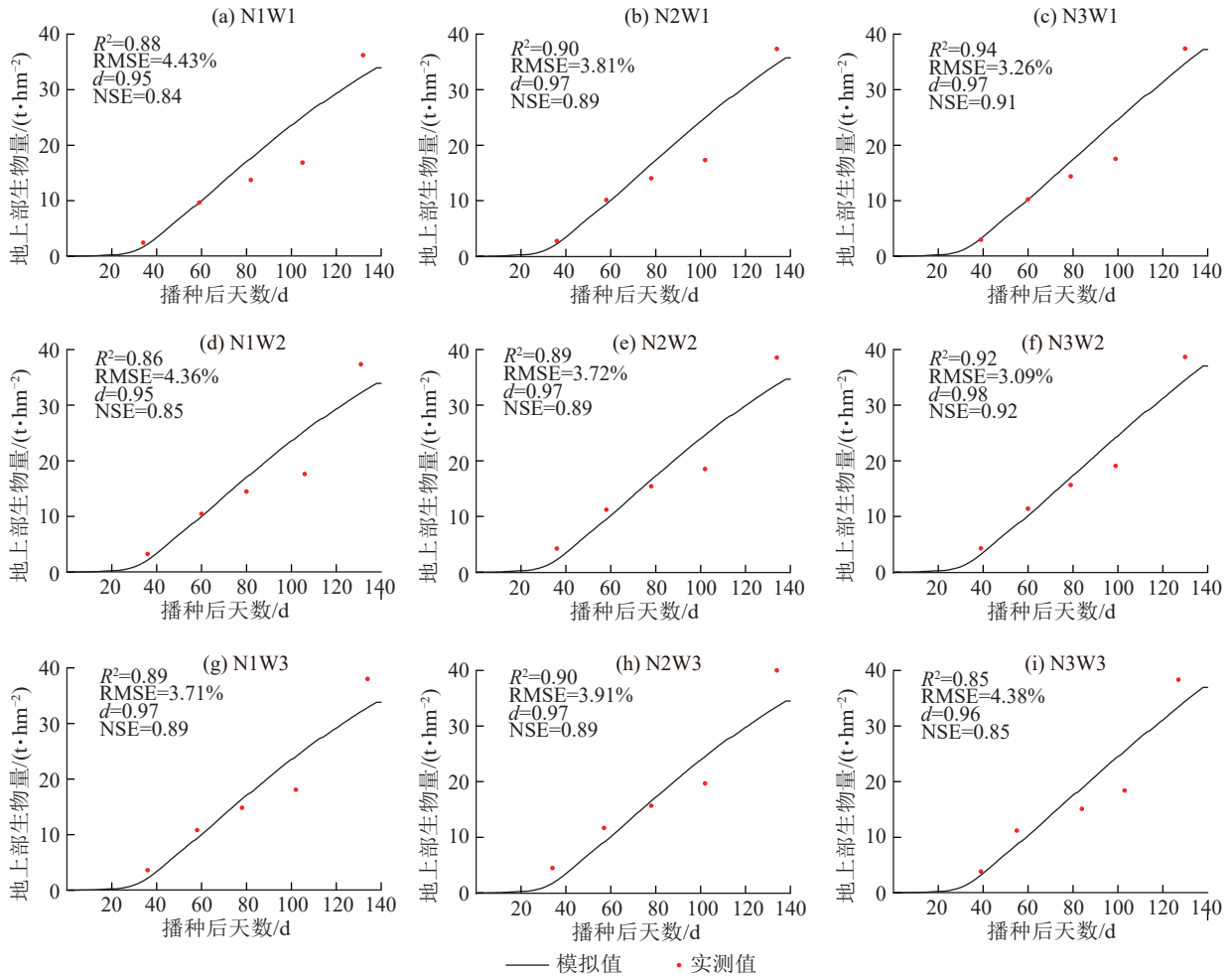


图 6 2021 年玉米地上生物量模拟值与实测值验证

Fig.6 Validation of simulated and measured maize aboveground biomass in 2021

2.3 产量与作物水分利用效率

校准处理的玉米产量模拟的相对误差值见表 4。为验证处理的产量相对误差为 1.42%~9.57%, 且产量随灌溉增加而增长, 随施肥量的增长产量趋势先增加后降低, 在 W3N2 处理产量最大, 为 14.589 t/hm², 在 W1N1 处理产量最小, 为 12.044 t/hm²。在 W1 处理下, 相较于 N3 水平, N1 和 N2 水平下分别增加 5.05% 和 0.42%, 在 W2 处理下, 相较于 N3 水平, N1 和 N2 水平下分别增加 8.46% 和 1.08%, 在 W3 处理下, 相较于 N3 水平, N1 和 N2 水平下分别增加 7.9% 和 4.78%。可见, 随着灌溉定额的增长, 产量增长速率逐渐降低, 且模拟值与实测值相对误差为 10%。2021 年, 相同施氮水平下, W1 较 W2 实测增产 8.54%~12.81%, 模拟增产 11.31%~18.67%。W2

较 W3 处理实测增产 -3.08%~3.42%, 模拟增产 -9.33%~3.49%, 可见模拟值与实测值之间仍存在差异。由图 7 可知, 模拟与实测产量皮尔逊相关系数为 0.804, 说明二者正相关性较强, 均方根误差为 1.05, 产量模拟精度较高, 拟合效果整体较好。

由表 4 可知, 校准试验水分利用效率相对误差为 7.63% 和 5.16%。验证试验中水分利用效率实测值为 32.04~35.59 kg/(hm²·mm), 模拟值为 28.42~30.89 kg/(hm²·mm), 相对误差为 5.57%~17.99%, 在产量最大(W3N2: 14.589 t/hm²)时, 水分利用效率同样达到最高, 各处理的水分利用效率模拟值与实测值存在差异, 模拟水分利用效率结果显示, 随着灌溉水的增多, 反而会造成水资源浪费, 降低水分利用效率。

表 4 各处理玉米产量与水分利用效率模型验证
Table 4 Model validation of maize yield and water use efficiency under different treatments

年份	处理	产量/(t·hm ⁻²)			水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)		
		实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%
2020	2020W0N3	14.396	14.990	4.13	33.15	30.62	7.63
	2021W0N3	14.497	15.309	5.60	32.55	30.87	5.16
	W1N1	12.044	11.396	5.38	32.04	30.14	6.00
	W1N2	12.653	11.948	5.57	32.65	30.62	6.22
	W1N3	12.706	12.887	1.42	32.71	30.89	5.57
2021	W2N1	13.073	13.304	1.76	33.07	28.42	14.06
	W2N2	14.180	13.299	6.22	34.18	29.87	12.61
	W2N3	14.332	15.293	6.70	34.34	30.56	11.01
	W3N1	13.520	13.768	1.83	33.52	28.72	14.33
	W3N2	14.589	13.339	8.58	35.59	30.16	15.25
	W3N3	13.892	15.222	9.57	34.89	28.60	17.99

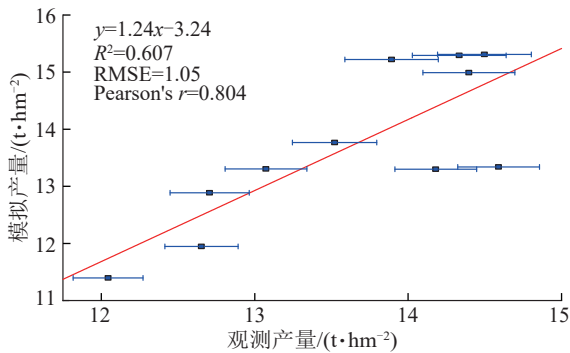


图 7 2020 年和 2021 年玉米产量的实测值与模拟值

Fig.7 Measured and simulated maize yields in 2020 and 2021

2.4 典型气象年份下不同灌溉方案下模拟结果

通过划分典型年型,2016 为丰水年、2006 为平水年和 1995 为枯水年,各类降水年型下灌溉定额为 4 000~5 400 m³/hm²,以 200 m³/hm²为梯度,G1~G8 共 24 种情景模拟的产量、生物量和水分利用效率见表 5。丰水年型,相较于 G1 处理,G2~G8 处理产量、地上部生物量、水分利用率分别增加 -0.008~0.698 t/hm²、-0.073~0.198 t/hm²和 -0.42~1.27 kg/(hm²·mm);平水年型,相较于 G1 处理,G2~G8 处理产量、地上部生物量、水分利用率分别增加 0.643~1.361 t/hm²、1.168~1.556 t/hm²和 -0.37~1.40 kg/(hm²·mm);枯水年型,相较于 G1 处理,G2~G8 处理产量、地上部生物量、水分利用率分别增加 0.964~2.036 t/hm²、3.536~4.48 t/hm²和 0.56~1.36 kg/(hm²·mm)。

丰水年型下各灌溉处理的玉米产量略高于平水年与枯水年,且各年型下产量均随着灌溉水量的增加而增长。丰水年产量为 13.652~14.35 t/hm²,水分利用效率为 28.04~29.73 kg/(hm²·mm),平水年年产量为 13.014~14.375 t/hm²,水分利用效率为 28.14~29.91 kg/(hm²·mm),枯水年产量为 11.422~13.458 t/hm²,水分利用效率为 27.60~28.96 kg/(hm²·mm)。

在提高作物产量的同时提升水分利用效率,是选择合理灌溉的重要依据。对比分析图 8 中各灌溉方案,寻找最优灌溉。丰水年 G8 处理相对 G4 处理产量增幅较小,为 0.12%,但灌水量较 G4 增加 800 m³/hm²,水分利用效率平均下降 0.075%,综合考虑丰水年最佳灌溉方案 G4:4 600 m³/hm²。平水年在 G8 处理达到最优,产量与水分利用效率均为最大,分别为 14.375 t/hm²和 29.91 kg/(hm²·mm),灌溉方案为 G8:5 400 m³/hm²。枯水年在方案 G8 达到最优,此时产量和水分利用效率在 G8 处理下最大,分别为 13.458 t/hm²和 28.96 kg/(hm²·mm)。

3 讨论

3.1 AquaCrop 模型的适用性评价

AquaCrop 是典型的水驱动模型,从本文数据可知模型在水分重度胁迫情况下模拟效果一般,各处理的模型精度在不同处理中随着灌溉量的增长呈上升趋势,与倪玲等^[17]研究结果一致。在不同水肥条件处理下,无论是冠层覆盖度、地上生物量还是产量其模拟效果均在可接受范围内。模拟冠层覆盖度显示,在苗期开始由于受灌溉施肥因素影响,根系迅速发育。在拔节期由于叶片数量和面积持续增加,冠层覆盖度从 8% 增长至 85% 增长达到最快^[18]。2021 年 N3 处理下的冠层覆盖度模拟 R²>0.97、RMSE<6.07%,这是在无肥力胁迫的状况下模型模拟作物生长状况良好,与 WANG 等^[19]研究结果一致。但 N1、N2 处理模拟的 RMSE 指标在 10.19%~13.36% 拟合度较低,是因为覆盖度是根据叶面积指数和经验公式计算得的,未考虑片重叠程度对冠层覆盖度的影响^[20]。由图 5、图 6 可知,玉米在生长初期地上部生物量生长较缓慢,说明初期比较耐旱,但若水分胁迫过于严重则会造成弱苗,

导致减产^[21]。灌水量、施肥量与生物量呈正相关,且随着灌溉定额的增长,模拟效果越好。但模型模拟地上最大生物量值小于实测值,可能模型低估实际环境条件对玉米生长的影响^[22]。各评价误差在合理范围内,说明该模型对模拟伊犁地区玉米生物量有较好的适用性。通过对比变化趋势发现,AquaCrop模型模拟过程中水量变化对产量较为敏感,与邢会敏等^[23]研究结果一致,适量增加灌水可以更好地提

高作物产量增长^[24]。ZHU等^[25]使用4 a玉米田间试验对AquaCrop模型进行校准验证后,在静态策略与动态策略下,冠层覆盖度的 $R^2 > 0.88$, $RMSE < 5.2$,生物量与产量的 $R^2 > 0.71$, $d > 0.94$,模型在预测产量和生物量方面表现优异。因此表明AquaCrop模型能较为准确地模拟伊犁地区不同灌溉定额下的玉米生长,可为当地玉米产量的预测和灌溉制度优化提供参考^[26]。

表 5 不同灌溉方案下玉米产量、地上生物量与水分利用效率模拟值

Table 5 Simulated maize yield, aboveground biomass, and water use efficiency under different irrigation schemes

类型	处理	灌溉定额/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	产量/($t \cdot hm^{-2}$)	地上部生物量/($t \cdot hm^{-2}$)	水分利用效率/($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)
丰水年	G1	4 000	13.652	32.950	28.46
	G2	4 200	13.644	32.932	29.21
	G3	4 400	14.321	32.976	29.43
	G4	4 600	14.333	32.954	29.73
	G5	4 800	13.667	32.943	28.04
	G6	5 000	14.291	32.877	28.12
	G7	5 200	14.334	32.934	28.63
	G8	5 400	14.350	33.148	29.57
平水年	G1	4 000	13.014	31.434	28.51
	G2	4 200	13.661	32.665	29.43
	G3	4 400	14.313	32.633	29.64
	G4	4 600	14.326	32.662	29.81
	G5	4 800	13.657	32.656	28.14
	G6	5 000	14.299	32.602	29.21
	G7	5 200	14.323	32.656	29.76
	G8	5 400	14.375	32.990	29.91
枯水年	G1	4 000	11.422	25.900	27.60
	G2	4 200	12.386	29.490	28.32
	G3	4 400	12.724	30.380	28.73
	G4	4 600	13.321	30.372	28.94
	G5	4 800	12.692	29.436	28.16
	G6	5 000	13.306	30.337	28.28
	G7	5 200	13.311	30.349	28.81
	G8	5 400	13.458	30.354	28.96

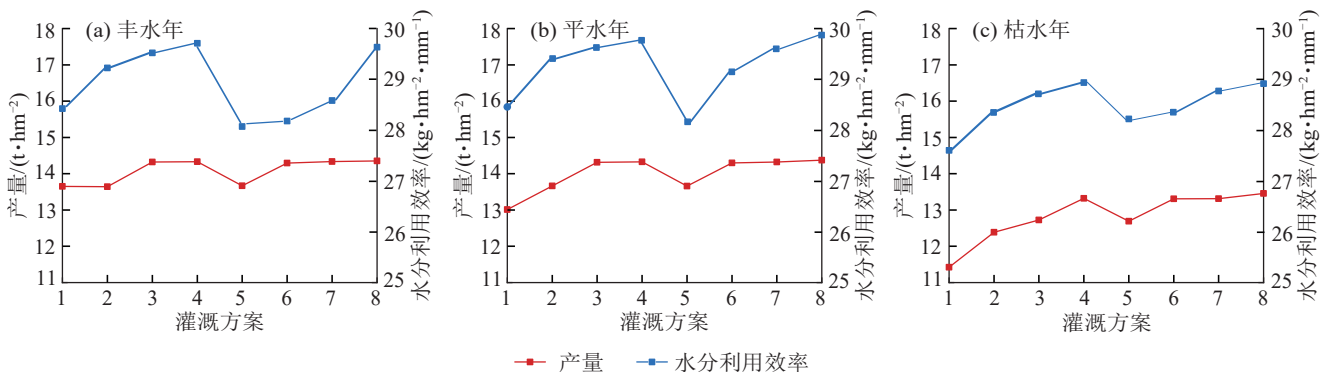


图 8 不同灌水方案下玉米产量和水分利用效率的变化

Fig.8 Variations in maize yield and water use efficiency under different irrigation schemes

3.2 伊犁滴灌玉米最佳灌溉定额确定

玉米生长需要充足的水分,适量降雨能为玉米

提供必要的水分,满足其蒸腾作用和光合作用的需求,促进根系发育和植株生长,因此,玉米在不同生

育期受旱会对其发育及产量造成不同影响^[27]。根据模拟不同年型下玉米生长显示,随着灌溉量的增长,丰水年作物的产量及生物量增长低于平水年及枯水年,作物灌溉制度优化的目标是为了提升作物产量、提高水分利用效率并找出“少水多产”的最佳模式。聂卫波等^[28]用AquaCrop模型针对模拟陕西沟灌玉米生育期“何时灌”和“灌多少”的问题,试验模拟冠层覆盖度、地上部生物量、根系区域土壤水量的 R^2 均 $>0.86\%$,给出丰水年和平水年均需要1次灌溉,干旱年需2次灌溉,单次灌水量均为55 mm。在作物发育过程中的不敏感时期适当增加水分胁迫可以提高水分利用效率,若生长早期水分亏缺严重,则会导致作物根系衰退,进一步影响后期发育,因此适当时机的水分胁迫对节约用水是有益的^[29]。

模拟结果显示,枯水年与其他年份产量、生物量相差较大也可能是由于模型在水分胁迫下模拟不准确^[30],但水分利用效率低于平水年、枯水年,是由于丰水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,所以产量和生物量最高^[31],同时因丰水年的耗水量大于平水年、枯水年,导致水分利用效率较低^[32]。在不同年型下,随着灌溉量的增加,产量呈增长趋势,尤其是在枯水年,增长更为显著,与ZHAI等^[33]研究结果相似,合理控制灌溉量可以有效提高产量。ZHU等^[25]在研究中指出新疆玉米最佳灌溉定额在5 400 mm,与本研究结论一致。在模拟过程中,产量和水分利用效率随着灌溉量的增加而下降,由于在作物生育期阶段,灌溉量会影响作物养分吸收,产量和水分利用效率随着灌溉量的增加呈先增后减趋势^[34]。本研究通过优化灌溉,理论上可以在节约研究区的灌溉用水的同时保持玉米产量,对提高伊犁玉米的水分利用效率有益,但需进行田间试验进行验证本研究得到的最优灌溉。

4 结论

1) 通过对AquaCrop模型的本地化校验发现,模型对新疆伊犁地区玉米生长指标:冠层覆盖度、生物量、产量等具有较好的模拟效果,模拟值与实测值变化趋势一致,校准冠层覆盖度和地上生物量 R^2 可达到0.95以上, d 可达到0.97以上,验证处理的冠层覆盖度和地上生物量 R^2 可达到0.85以上, d 可达到0.95以上,模拟产量与实测产量间的相对误差在5%左右,表明模型在伊犁地区模拟产量有较好的

适用性。

2) 基于验证后的模型模拟3个水文年(丰水年、平水年、枯水年)下不同灌溉量的玉米产量、生物量、水分利用效率。生长指标呈现随着灌水量的增长先减再增的趋势。丰水年、平水年和枯水年适宜灌水量为G4:4 400 m³/hm²,G8:5 400 m³/hm²,G8:5 400 m³/hm²。

3) 在不同典型年型条件下优化的灌溉量,为新疆伊犁玉米种植提供参考。而实际种植时,需经田间试验验证,根据政府农业政策及当地气候变化动态调整,实现该地区作物灌溉可持续发展的科学指导。

参考文献:

- [1] 薛歆,蔡甲冰,于颖多,等.冬小麦生育期地下水补给量表征及水位阈值试验研究[J].农业工程学报,2024,40(20):101-111.
XUE X, CAI J B, YU Y D, et al. Quantifying groundwater contributions and threshold in the growth stages for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(20): 101-111.
- [2] 王泉玉,何进,卢彩云,等.前后双驱双转向玉米播种机器人底盘设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(4):10-20.
WANG Q Y, HE J, LU C Y, et al. Design and experiment of the maize sowing robot chassis with front and rear dual drive and dual steering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4): 10-20.
- [3] 韩莎莎,苏敏,杜磊.百万亩玉米吨粮田的建成[J].伊犁日报(汉),2024-12-19(002).
HAN S S, SU M, DU L. Building of a million-acre maize field with a yield of one ton per mu[J]. Ili Daily (Chinese Edition), 2024-12-19(002).
- [4] SINGH S P, MAHAPATRA B S, PRAMANICK B, et al. Effect of irrigation levels, planting methods and mulching on nutrient uptake, yield, quality, water and fertilizer productivity of field mustard (*Brassica Rapa L.*) under sandy loam soil[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: e106539.
- [5] WU H, YUE Q, GUO P, et al. Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: e107599.
- [6] 唐博文,孟凡香,孟波,等.基于AquaCrop模型的玉米产量与水分利用效率模拟[J].南水北调与水利科技(中英

- 文), 2024, 22(6):1224-1238.
- TANG B W, MENG F X, MENG B, et al. Simulation of maize yield and water use efficiency based on the AquaCrop model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2024, 22(6):1224-1238.
- [7] BOULANGE J, NIZAMOV S, NURBEKOV A, et al. Calibration and validation of the AquaCrop model for simulating cotton growth under a semi-arid climate in Uzbekistan [J]. Agricultural Water Management, 2025, 310:e109360.
- [8] 高爽, 丁一民, 朱磊, 等. 基于 AquaCrop 模型的玉米需水和降水匹配度变化特征研究[J]. 节水灌溉, 2023(6): 51-59.
- GAO S, DING Y M, ZHU L, et al. Research on the matching degree of maize water demand and precipitation based on AquaCrop model[J]. Water Saving Irrigation, 2023(6):51-59.
- [9] TERÁN-CHAVES C A, MOJICA-RODRÍGUEZ J E, VEGA-AMANTE A, et al. Simulation of crop productivity for Guinea grass (*megathyrsus maximus*) using AquaCrop under different water regimes[J]. Water, 2023, 15(5):e863.
- [10] HSIAO T C, HENG L E, 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] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop: The FAOCrop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):438-447.
- [12] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):426-437.
- [13] FENG D R, LI G Y, WANG D, et al. Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 261:e107372.
- [14] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 5 [J]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, 56:26-40.
- [15] LIU P, ZHA T S, JIA X, et al. Divergent responses of canopy and ecosystem water use efficiency to environmental conditions over a decade in a shrubland ecosystem dominated by *Artemisia ordosica* [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 368:e110551.
- [16] 杨晶, 段萌, 张宝忠, 等. 基于轮作模式的大兴区麦玉灌溉制度优化[J]. 节水灌溉, 2022(8):108-113.
- YANG J, DUAN M, ZHANG B Z, et al. Optimization of wheat and maize irrigation system based on crop rotation mode in Daxing district [J]. Water Saving Irrigation, 2022(8):108-113.
- [17] 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.
- NI L, FENG H, REN X C, et al. Applicable evaluation of crop model AquaCrop for summer maize production in Loess Plateau region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6):40-45.
- [18] 汪思佳, 王春霞, 张景瑞, 等. 减氮条件下基于 AquaCrop 模型的北疆膜下滴灌棉花水氮制度优化[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):314-324.
- WANG S J, WANG C X, ZHANG J R, et al. Optimization of water and nitrogen regime based on AquaCrop model for drip irrigation cotton under nitrogen reduction conditions in northern Xinjiang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):314-324.
- [19] WANG H D, CHENG M H, LIAO Z Q, et al. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes [J]. Agricultural Water Management, 2023, 276:e108076.
- [20] 宋喜山, 曹红霞, 何子建, 等. Aquacrop 模型在北疆棉花生育期灌溉洗盐制度优化中的适用性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20):111-122.
- SONG X S, CAO H X, HE Z J, et al. Applicability of the Aquacrop model in optimization of irrigation and salt leaching schedule during the reproductive period of cotton in northern Xinjiang of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(20): 111-122.
- [21] 段艳军, 陈志民, 贾银锁. 高温和干旱胁迫对玉米影响及响应机制研究进展 [J]. 热带农业科学, 2025, 45(3): 159-163.
- DUAN Y J, CHEN Z M, JIA Y S. Research progress on the effects of high temperature and drought stress on maize growth and the response mechanism [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2025, 45(3):159-163.
- [22] XU P W, WANG P C, LIU H, et al. Evaluation and application of AquaCrop in simulation of alternate irrigation with brackish and fresh water for cotton under mulch drip irrigation in southern Xinjiang [J]. Industrial Crops and Products, 2025, 225:e120548.
- [23] 邢会敏, 相诗尧, 徐新刚, 等. 基于 EFAST 方法的 AquaCrop 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 中国农业

- 科学,2017,50(1):64-76.
- XING H M, XIANG S Y, XU X G, et al. Global sensitivity analysis of AquaCrop crop model parameters based on EFAST method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(1):64-76.
- [24] 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):e557.
- [25] ZHU H Y, ZHENG B Y, NIE W B, et al. Optimization of maize irrigation strategy in Xinjiang, China by AquaCrop based on a four-year study [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 297:e108816.
- [26] 张萌,田军仓. AquaCrop模型对不同灌溉定额下盐碱地青贮玉米生长模拟及适用性评价[J]. *节水灌溉*, 2024(11):10-17.
- ZHANG M, TIAN J C. Effects of different irrigation quotas on the growth of silage maize in saline-alkali land and evaluation of the applicability of AquaCrop model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(11):10-17.
- [27] 吕晓,战莘晔,高莉莉,等. 锦州市不同程度干旱对玉米生长育和产量的影响[J]. *农业工程*, 2022, 12(6):147-151.
- LV X, ZHAN S Y, GAO L L, et al. Effects of different degrees of drought on maize growth and yield in Jinzhou City[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(6):147-151.
- [28] 聂卫波,马云鹏,冯正江,等. 基于 AquaCrop 和 WinSRFR 组合的夏玉米沟灌方案优化[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(18):51-61.
- NIE W B, MA Y P, FENG Z J, et al. Optimization of furrow irrigation programs of summer maize by using the AquaCrop model and WinSRFR software [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(18):51-61.
- [29] ZHANG G Q, LIU C W, XIAO C H, et al. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211:137-146.
- [30] AMIRI E, BAHRANI A, IRMAK S, et al. Evaluation of irrigation scheduling and yield response for wheat cultivars using the AquaCrop model in an arid climate [J]. *Water Supply*, 2022, 22(1):602-614.
- [31] 陈超飞,柳双环,郭大辛,等. 基于 AquaCrop 模型的夏玉米生长模拟及灌溉制度优化[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3):72-82.
- CHEN C F, LIU S H, GUO D X, et al. Growth simulation and optimization of irrigation scheme for summer maize using AquaCrop model [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3):72-82.
- [32] ZHANG Y H, YIN J D, GUO Z H, et al. Simulation of soil water balance and crop productivity of long-term continuous maize cropping under high planting density in rain-fed agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 312:e108740.
- [33] ZHAI B Y, FU Q, LI T X, et al. Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: Study of the longtougiao irrigation district[J]. *Water*, 2019, 11(9):e1799.
- [34] 邹海洋,张富仓,张雨新,等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21):145-55.
- ZOU H Y, ZHANG F C, ZHANG Y X, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):145-155.