

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.04.035

基于 AquaCrop 模型的冬小麦咸淡轮灌制度模拟与评价

朱成立¹ 徐雨琳¹ 黄明逸¹ 郑君玉² 张帆¹ 曹磊齐¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225127)

摘要: 为探寻适宜冬小麦的咸水灌溉方法, 针对拔节期、抽穗期和灌浆期开展了不同咸淡轮灌方式(淡淡淡(A0)、咸淡淡(A1)、淡咸淡(A2)、淡淡咸(A3), 咸水矿化度为 10 dS/m)及单次灌水量(40 mm(I1)、60 mm(I2)、80 mm(I3)、100 mm(I4))的田间试验, 利用 AquaCrop 模型对咸淡轮灌下土壤水盐和冬小麦生长生产进行校验, 并通过情景模拟优化了咸淡轮灌方案。结果表明: AquaCrop 模型可以较好地模拟咸淡轮灌下土壤水盐状况及冬小麦生物量和籽粒产量, 率定时土壤含水率、土壤含盐量、冠层覆盖度、累积蒸发蒸腾量、生物量和籽粒产量的均方根误差(RMSE)分别为 1.06%~2.09%、0.03~0.27 dS/m、4.2%~11.0%、14.95~52.17 mm、0.57~0.86 t/hm² 和 0.28 t/hm², 验证时最终生物量和籽粒产量的 RMSE 分别为 0.51 t/hm² 和 0.33 t/hm², 且各指标决定系数(R²)均大于 0.70, 一致性指数(d)均大于 0.75。利用校准后的模型模拟 64 种咸淡轮灌情景下的籽粒产量, 对咸淡轮灌方案进行优化: 咸水含盐量为 2~14 dS/m 时, 抽穗期或灌浆期灌 1 次咸水获得 95% 和 90% 最大产量所需单次灌水量范围分别为 79.3~93.1 mm 和 66.1~79.9 mm、79.6~90.8 mm 和 67.0~78.1 mm, 抽穗期和灌浆期均灌咸水则需单次灌水量为 80.4~102.6 mm 和 67.3~89.5 mm。

关键词: 冬小麦; AquaCrop 模型; 咸淡轮灌; 水盐; 灌溉制度优化

中图分类号: S274; S512 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0330-13 OSID: 

Simulation and Evaluation of Cycle Irrigation with Brackish and Fresh Water for Winter Wheat Based on AquaCrop Model

ZHU Chengli¹ XU Yulin¹ HUANG Mingyi¹ ZHENG Junyu² ZHANG Fan¹ CAO Leiqi¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Jiangsu Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to explore the suitable irrigation method of brackish water for winter wheat, field experiments were carried out with different cycle irrigation methods and four single irrigation quota (40 mm (I1), 60 mm (I2), 80 mm (I3) and 100 mm (I4)) at jointing, heading and filling stages. There were four cycle irrigation treatments, that was, fresh-fresh-fresh, brackish-fresh-fresh, fresh-brackish-fresh and fresh-fresh-brackish, the salt content of brackish water was 10 dS/m. The AquaCrop model was used to calibrate and verify soil water and salt and winter wheat growth and production under salt water cycle irrigation. The salty cycle irrigation scheme was optimized through irrigation scenario simulation. The results showed that the AquaCrop model could simulate the soil water and salt status, the biomass and grain yield of winter wheat under salt water rotation irrigation. The RMSE of soil water, soil salinity, canopy cover, accumulative evapotranspiration, biomass and grain yield were 1.06%~2.09%, 0.03~0.27 dS/m, 4.2%~11.0%, 14.95~52.17 mm, 0.57~0.86 t/hm² and 0.28 t/hm² during calibration, respectively. The RMSE of final biomass and grain yield were 0.51 t/hm² and 0.33 t/hm² when verifying. Respectively, the coefficient of determination (R²) of each index was greater than 0.70, and the consistency index (d) was greater than 0.75. The calibrated model was used to simulate the grain yield under 64 salt water rotation irrigation scenarios, and the salt water rotation irrigation scheme was optimized: when the salt water content was 2~14 dS/m, the range of single irrigation amount needed for 95% and 90% of the maximum yield by one irrigation of salt water at heading stage or filling stage was 79.3~93.1 mm and 66.1~79.9 mm, 79.6~90.8 mm and 67.0~78.1 mm, respectively, when

salt water was irrigated at both heading stage and filling stage, the single irrigation amount was 80.4 ~ 102.6 mm and 67.3 ~ 89.5 mm, respectively.

Key words: winter wheat; AquaCrop model; cycle irrigation with brackish and fresh water; water and salt; system optimization

0 引言

冬小麦适应性广,增产潜力大,是重要的粮食作物之一^[1]。然而我国大部分地区淡水资源供应量与冬小麦生长季需水量不相匹配,微咸水、咸水逐渐成为重要的替代灌溉水资源^[2-3]。咸淡轮灌是目前一种较易实行的咸水利用方式,但若灌溉不当,极易引起水盐联合胁迫,造成作物减产和土壤盐渍化^[4-6]。因此,研究不同灌水量与咸淡轮灌方式下土壤水盐分布规律和作物产量,有利于制定适宜的咸淡轮灌制度,促进咸水安全利用^[7-9]。由于咸水利用对土壤和作物的影响是一个连续的过程^[10],且传统的田间试验受制于人力、物力等因素^[11],试验与作物模型结合成为近年来国内外研究的热点^[12-13]。

联合国粮农组织 (FAO) 研发的 AquaCrop 作物模型以水分驱动,考虑水分、养分和温度胁迫因素,通过冠层覆盖度和收获指数等模拟地上干物质和产量^[14-15],操作界面简洁,模拟结果准确。2012 年引入盐分模块后^[16],KUMAR 等^[17]、MONDAL 等^[18]、HASSANLI 等^[19]分别运用 AquaCrop 模型对咸水灌溉条件下小麦、水稻、玉米的产量进行模拟,

发现模拟效果良好,误差均在可接受范围之内。谭帅^[20]构建了微咸水膜下滴灌条件下的棉花生长模型,并提出研究区中粉砂壤土和砂质壤土下适宜的微咸水灌溉定额。但 MOHAMMADI 等^[21]提出在模拟水盐共同胁迫时模型的准确性不如分别评估水胁迫和盐胁迫,目前 AquaCrop 模型在咸水灌溉制度优化尤其是咸淡轮灌方面的研究还较少^[22]。

本文运用 AquaCrop 模型,研究其在不同灌水定额与咸淡轮灌方式下模拟土壤水盐变化及冬小麦生长生产的适用性,以期为冬小麦咸淡轮灌制度优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年 10 月—2018 年 6 月和 2018 年 10 月—2019 年 6 月在河海大学江宁节水园区 (31°86'N,118°60'E) 避雨大棚内进行。试验区年平均降雨量 1 021.3 mm,年平均蒸发量 900 mm,属亚热带湿润气候。供试土壤为黄棕壤土,土壤的基本物理性质见表 1。园区内自来水作为灌溉淡水,矿化度约为 0.3 dS/m。

表 1 供试土壤基本物理性质
Tab.1 Main physical properties of soil

土层深度/ cm	土壤粒径质量分数/%			容重/ (g·cm ⁻³)	凋萎含水 率/%	田间持水 率/%	饱和含水 率/%	饱和导水率/ (cm·h ⁻¹)
	砂粒	粉粒	粘粒					
0 ~ 60	36.46	38.52	25.02	1.41	23	39	50	2.7
60 ~ 150	27.78	42.51	29.71	1.49	27	44	55	1.0

1.2 试验设计

试验以苏麦 10 号为研究对象,分别于 2017 年 10 月 23 日—2018 年 6 月 11 日和 2018 年 10 月 24 日—2019 年 6 月 12 日进行冬小麦的测坑试验,两年生育期均为 232 d。试验田单个测坑面积为 250 cm × 200 cm,各测坑间通过水泥混凝土墙体隔开,在播前灌足量底墒水(淡水)以保证正常出苗。本试验考虑不同灌水量及咸淡轮灌方式两个主效应因素。充分灌溉处理为每当深度 60 cm 处的土壤含水率接近田间持水率的 70% 时灌水至 100%,每次灌水量 80 mm (I3),设置其他非充分、充分灌溉水平,每次灌水 40 mm (I1)、60 mm (I2)、100 mm (I4)。使用 10 dS/m 咸水与淡水在冬小麦 3 个不同生育期

进行轮灌,淡水为园区内自来水,咸水由 NaCl 配置而成,3 种轮灌方式为咸淡淡 (A1)、淡咸淡 (A2)、淡淡咸 (A3),并设一组全生育期淡水灌溉 (A0) 对照试验。第 1 年 3 次灌水时间在 157 d (拔节水)、179 d (抽穗水)、196 d (灌浆水),第 2 年灌水时间分别在 166、188、208 d。对上述灌水量与咸淡轮灌方式采用排列组合设计,共 16 组处理。冬小麦播种量为 300 kg/hm²,播前对 0 ~ 20 cm 土层翻耕并施 750 kg/hm² 复合肥 (含氮、磷、钾) 底肥,次年抽穗期均匀喷洒农药防治蚜虫。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤含水率与含盐量

在每次灌水前后 3 d 及生育期开始和结束时,

对 0 ~ 60 cm 土层进行取样。采用干燥法测量土壤含水率,计算公式为

$$\theta = \frac{\gamma}{\rho_w} \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中 θ ——土壤体积含水率, %

γ ——土壤容重, g/cm³

m_1 ——土壤湿土质量, g

m_0 ——土壤干土质量, g

ρ_w ——水密度, 取 1 g/cm³

土壤含盐量测定采用浸提法, 使用 DDBJ—350 型便携式电导率仪测量土壤饱和浸提液的电导率 (EC)。

1.3.2 冠层覆盖度

在越冬期后每隔 15 ~ 20 d, 每个处理随机选取 10 株冬小麦, 测量叶片最大长度和宽度, 冠层覆盖度 (Canopy cover, CC) 由叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 计算得到, 公式为

$$CC = 1.005(1 - \exp(-0.6LAI))^{1.2} \times 100\% \tag{2}$$

其中 $LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij}B_{ij})}{m}$ (3)

式中 ρ ——种植密度, 株/hm²

m ——测定株数

n ——第 j 株小麦的总叶片数

L ——叶片长度, m

B ——叶片最宽处宽度, m

1.3.3 生物量和产量

在冬小麦越冬期后每隔 15 ~ 20 d, 测量地上部生物量, 每个测坑取 3 株, 从地表处砍断植株, 取地上部分在 105℃ 干燥箱内杀青 0.5 h, 75℃ 下干燥至质量恒定并称量。冬小麦产量由收获时单位面积穗数、穗粒数、千粒质量相乘得到; 记录 1 m² 地块中的有效穗数; 每个测坑取 6 株具有代表性植株, 测量得到每株小麦的穗粒数; 称量收获后的随机 1 000 粒小麦种子质量, 得到千粒质量。

1.3.4 蒸发蒸腾量

冬小麦累积蒸发蒸腾量 (ET) 通过水量平衡法计算, 公式为

$$ET = \Delta W + I + P + S_g - D - R_f \tag{4}$$

式中 ΔW ——播种与取样时土壤含水量差值, mm

I ——灌溉水量, mm

P ——降雨量, mm

S_g ——地下水补给量, mm

D ——深层渗漏量, mm

R_f ——地表径流, mm

由于本试验在避雨大棚内进行, 无降雨补给水

分; 测坑地下 2 m 处有自由排水口, 试验区地下水长期在 2 m 以下, 故并无地下水补给; 本研究灌水上限至 100% 田间持水率, 不考虑深层渗漏量和地表径流。

1.4 AquaCrop 模型数据库构建

基于田间试验数据, 设置 AquaCrop 模型中相应的气象、作物参数、土壤性质、灌溉制度、初始条件等数据库, 并结合水分胁迫和盐分胁迫模块来模拟咸淡轮灌下冬小麦生长过程及产量。

1.4.1 气象数据

试验区冬小麦生育期内逐日气温、日照时间、湿度、风速等气象数据由试验场内便携式气象监测仪 (ASHUR - MWS600 型) 获得, 由于采取了避雨种植试验, 降水数据由灌溉数据代替。参考作物蒸发蒸腾量通过 AquaCrop 模型自带的 ET₀ 计算模块获得。表 2 为两年冬小麦生育期内的逐月气象数据。

1.4.2 作物数据

作物参数中种植方式、种植密度、初始冠层覆盖度和生长生育期等根据田间试验实际情况输入, 基底温度、上限温度等默认参数采用模型推荐值, 归一化水分生产力、参考收获指数、水分胁迫参数、盐分胁迫参数等根据模型手册提供的取值范围采用“试错法”进行修正。使用 2017—2018 年试验观测数据进行模型参数的调试, 使模型模拟值与观测值间误差符合范围, 并运用 2018—2019 年试验数据验证调试后的模型参数。校准后的具体作物参数见表 3。

1.4.3 土壤数据

AquaCrop 模型中土壤数据需要输入土壤层数和深度、质地、饱和含水率、田间持水率、凋萎系数等。本试验包含 2 个土层, 分别为壤土层 (0 ~ 60 cm) 和粘壤土层 (60 ~ 150 cm)。各水力特性指标使用环刀法取样, 利用压力膜仪测得, 具体土壤参数见表 1。

1.4.4 灌溉制度数据

本试验灌水方法选择地面灌—漫灌, 2017—2018 年灌水时间分别为播种后 157、179、196 d, 2018—2019 年灌水时间为播种后 166、188、208 d。每次灌水为 40、60、80、100 mm, 灌咸水时含盐量为 10 dS/m。

1.4.5 初始条件数据

模型运行初始条件包括各土层初始含水率和含盐量。由于播种前各处理均得到了充分淡水灌溉以保证出苗, 因此模型中土壤初始含水率设为田间持水率; 测得初始土壤含盐量为 1 dS/m。

1.5 模型评价指标

本研究利用相对误差 (P_e)、决定系数 (R^2)、均

表 2 2017—2018 年和 2018—2019 年逐月气象数据

Tab. 2 Monthly meteorological data in 2017—2018 and 2018—2019

年份	月份	平均最高 气温/℃	平均最低 气温/℃	平均日照 时间/h	平均相对 湿度/%	平均风速/ (m·s ⁻¹)	参考作物蒸发蒸 腾量/mm	灌溉水量/ mm
2017—2018	10	20.5	10.0	5.4	75.1	1.4	20.3	0
	11	15.5	3.4	4.4	72.7	2.3	60.3	0
	12	8.5	-2.7	5.4	67.2	1.6	50.8	0
	1	2.3	-8.2	5.7	65.2	1.9	37.6	0
	2	6.1	-3.1	5.2	56.1	2.3	36.2	0
	3	13.2	1.6	5.5	60.9	2.7	91.3	40~100
	4	20.2	7.1	7.2	74.1	2.8	124.1	40~100
	5	24.2	14.4	8.1	73.6	2.2	139.6	40~100
2018—2019	6	27.1	19.1	7.1	80.0	2.7	52.6	0
	10	21.0	11.2	4.4	72.3	2.2	16.2	0
	11	13.7	5.3	5.2	69.6	2.1	56.4	0
	12	5.0	-2.6	7.1	70.7	1.8	38.6	0
	1	3.2	-6.7	6.6	45.2	1.9	43.9	0
	2	5.3	-3.3	5.4	70.0	2.4	47.4	0
	3	11.8	1.6	7.8	50.5	2.6	88.5	0
	4	20.1	8.5	8.1	51.7	2.5	117.3	80~200
	5	25.1	15.0	7.5	63.0	2.6	138.3	40~100
	6	27.3	19.8	7.3	74.1	2.5	40.4	0

表 3 咸淡轮灌下的冬小麦作物参数校准

Tab. 3 Calibration of crop parameters under
brackish and fresh water cycle irrigation

	参数	数值
基本作物参数	基底温度 $T_{\text{base}}/^\circ\text{C}$	0
	上限温度 $T_{\text{upper}}/^\circ\text{C}$	26
	初始冠层覆盖度 $CC_0/\%$	4.5
	最大冠层覆盖度 $CC_x/\%$	96
	冠层生长系数 $CGC/(\% \cdot \text{d}^{-1})$	3.2
	冠层退化系数 $CDC/(\% \cdot \text{d}^{-1})$	10.2
	播种到出苗所需有效积温 $T_{\text{emc}}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	171
	播种到开始衰老所需有效积温 $T_{\text{sen}}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	1 407
	播种到成熟所需有效积温 $T_{\text{mat}}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	2 006
	播种到开花所需有效积温 $T_{\text{flo}}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	1 206
	播种到达最大根深所需有效积温 $T_{\text{rmax}}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	1 185
	最大有效根深 Zr_{max}/m	1.2
	作物系数 K_{cTr}	1.1
	归一化干物质水分生产力 $WP^*/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	17
	参考收获指数 $HI_0/\%$	50
水分胁迫参数	水分胁迫对冠层生长影响上限 $P_{\text{exp, upper}}$	0.10
	水分胁迫对冠层生长影响下限 $P_{\text{exp, lower}}$	0.45
	冠层扩张的水分胁迫形状因子 $P_{\text{exp, shp}}$	3.5
	水分胁迫对气孔关闭影响上限 $P_{\text{sto, upper}}$	0.45
	气孔关闭的水分胁迫形状因子 $P_{\text{sto, shp}}$	2.0
	水分胁迫对冠层衰老影响上限 $P_{\text{sen, upper}}$	0.60
	冠层衰老的水分胁迫形状因子 $P_{\text{sen, shp}}$	2.0
盐分胁迫参数	盐分胁迫开始时土壤含盐量 $ECe_{\text{lower}}/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$	3
	作物停止生长时土壤含盐量 $ECe_{\text{upper}}/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})$	14
	冠层变形程度 $CCD/\%$	25
	气孔关闭胁迫参数 $KS_{\text{sto, salt}}/\%$	110

方根误差(RMSE)和一致性指数(d)来评价模型校准和验证的精度。 P_e 和RMSE 越小, R^2 和 d 越接近1,表明模拟值与实测值越接近,模型具有较好的一致性,模拟结果精确。

1.6 情景模拟设计

为进一步探索适宜的咸淡轮灌制度,设计 64 (5×4×3+4)种情景,使用 2017—2018 年气象数据进行模拟,在冬小麦生育期内灌 3 次水,时间分别为 157(拔节期)、179(抽穗期)、196 d(灌浆期)。设置 5 种咸水含盐量(EC 分别为 6、8、10、12、14 dS/m)和 4 种灌水量(I1:40 mm、I2:60 mm、I3:80 mm、I4:100 mm)。由于田间试验结果显示在拔节期灌溉咸水对冬小麦生长产生较大影响,籽粒产量较低,因此针对抽穗期和灌浆期设置 3 种咸淡轮灌方式(灌 1 次咸水:淡咸淡(A2)、淡淡咸(A3);灌 2 次咸水:淡咸咸(A4)),以及生育期全淡水灌溉 A0 对照处理。

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证结果

采用 2017—2018 年冬小麦试验数据进行模型率定,2018—2019 年试验数据进行模型验证。试验共 16 组处理,3 个主要灌水生育期(拔节期、抽穗期、灌浆期)包括 I1~I4 4 种灌水量和 A0~A3 4 种轮灌方式。土壤水盐的测定范围为 0~60 cm 土层,分别在每次灌水前后和生育末期取样测量。

2017—2018 年冬小麦生育期根区土壤含水率

率定结果如图 1 所示,所有处理的土壤含水率模拟值和实测值的相对误差 P_e 为 0.5% ~ 12.6%,决定系数 R^2 为 0.77 ~ 0.99,均方根误差 RMSE 为 1.06% ~ 2.09%,一致性指数 d 为 0.78 ~ 0.99。在相同灌水方式下,充分灌溉的模拟误差小于非充分灌溉,4 种咸淡轮灌模式中,A1 处理下的模拟误差最大。由图 1 可以看出,灌水方式相同时,土壤含水率随着灌水量的增加而明显增大,且在灌水 2 d 后不同灌水量下的土壤含水率差距最大,之后随时间增加而逐渐减小,直至下一次灌水。生育期结束时,A0 方式 4 种灌水量下的土壤含水率基本相同,A1 方式下 I1 处理的土壤含水率略低于其他三者,A2 和 A3 方式规律相同,土壤含水率由大到小都依次为 I4、I3、I2、I1。灌水量相同时,A0 处理的土壤含水率最低,灌咸水后土壤含水率均有所增大,且使用咸水灌溉的时间越早,土壤含水率越高,A1、A2、A3 较 A0 处理土壤含水率最大分别增加了 6.18% ~ 7.62%、2.42% ~ 5.75%、1.85% ~ 6.53%。生育期结束时

I1、I2、I3 灌水量下的土壤含水率由大到小依次为 A1、A2、A3、A0,I4 的最终土壤含水率由大到小依次为 A1、A3、A2、A0。

不同咸淡轮灌方式下的冬小麦根区土壤盐分率定结果如图 2 所示。所有处理土壤含盐量的相对误差范围在 1.0% ~ 17.4%, R^2 、RMSE、 d 的范围分别为 0.73 ~ 0.90、0.03 ~ 0.27 dS/m 和 0.82 ~ 0.93,4 种灌水量下 A1 (咸淡水) 方式的模拟误差均大于其他 3 种灌溉方式。生育期全淡水灌溉 A1 处理在每次灌水后土壤盐分略升高后下降,且灌水量越多下降的幅度越大,I1、I2、I3 处理在整个生育期的土壤含盐量呈上升趋势,但当达到一定灌水量 (如 I4 处理),土壤含盐量整体上呈下降趋势。生育期结束时土壤含盐量由小到大依次为 I4、I3、I2、I1。对于咸淡轮灌,在相同灌溉方式下,灌水量越大,灌咸水后土壤含盐量增量越大,但后期使用淡水灌溉后土壤含盐量又出现下降,且下降幅度随灌水量的增加而增大。生育期结束后 I4 处理的土壤含盐量均

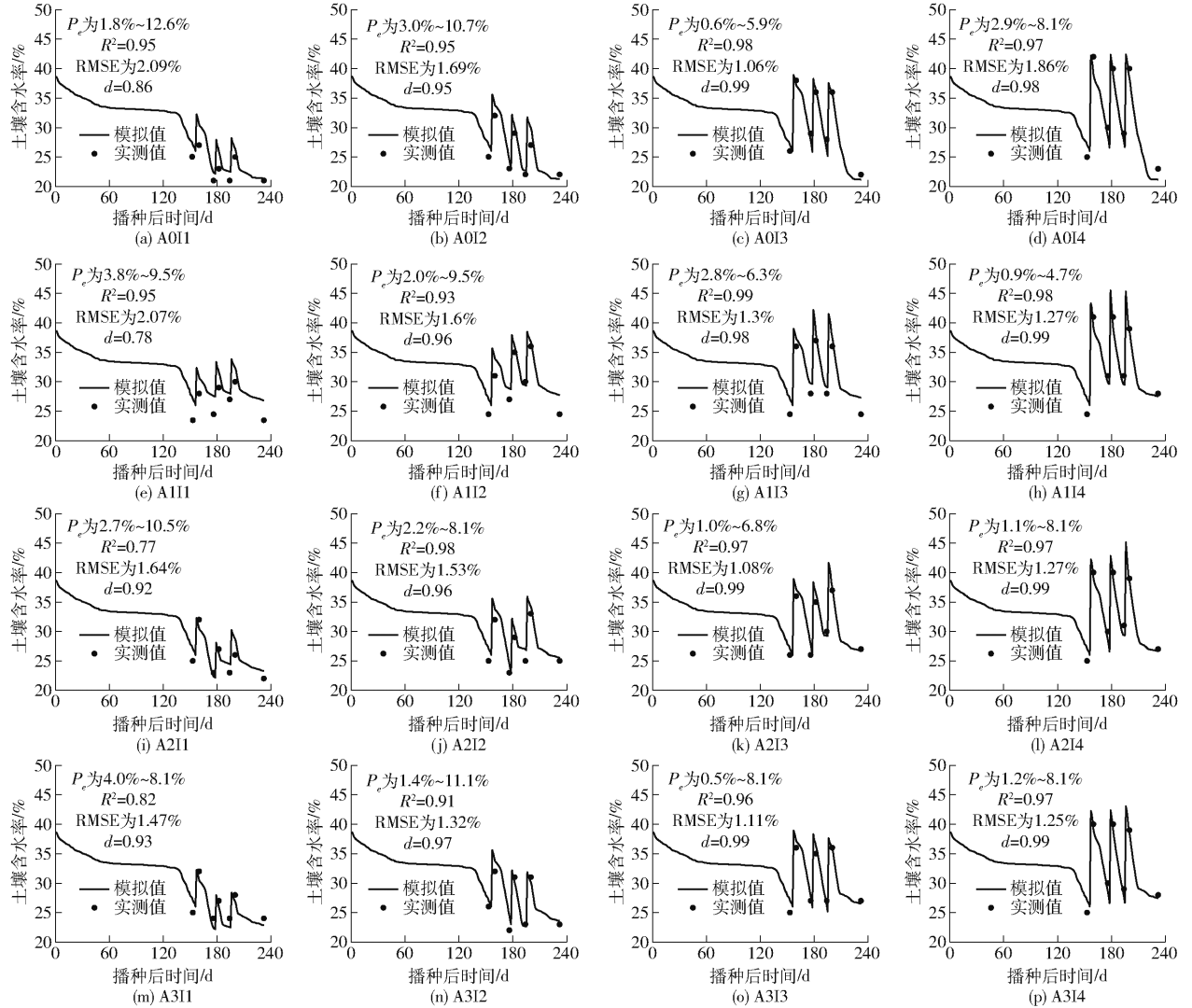


图 1 2017—2018 年 0 ~ 60 cm 根区土壤含水率率定结果

Fig. 1 Soil moisture content calibration results of 0 ~ 60 cm soil root zone in 2017—2018

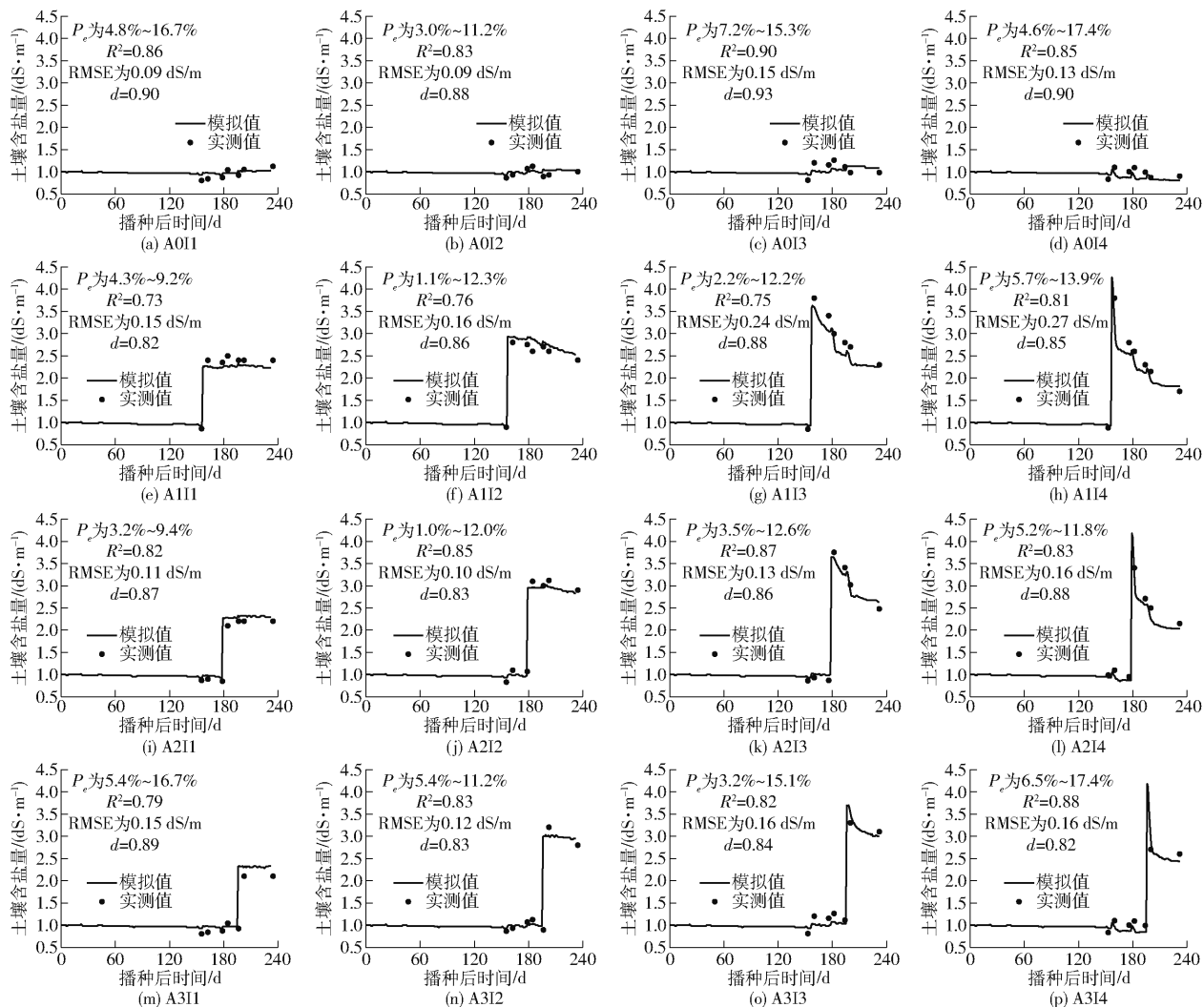


图2 2017—2018年0~60 cm根区土壤含盐量率定结果

Fig. 2 Soil salinity calibration results of 0 ~ 60 cm soil root zone in 2017—2018

为最低,其次为 I3 和 I1,I2 处理由于咸水灌溉量大而淡水水量不足,导致最终土壤盐分最高。灌水量相同时,咸水灌溉的时间越靠前,后期得到淡水灌溉的次数就越多,土壤盐分下降幅度越大,生育期结束后土壤的 EC 越低。A1、A2 和 A3 处理最终土壤含盐量分别为 1.82 ~ 2.53 dS/m、2.03 ~ 2.83 dS/m 和 2.33 ~ 3 dS/m。

冬小麦生长过程如图 3、4 所示。图 3 为模型对于冠层覆盖度 CC 的模拟结果,出苗后冠层缓慢生长发育,在播种约 60 d 后进入越冬期,冠层生长停滞,返青期后快速生长,约在 180 d 达到最大冠层覆盖度。AquaCrop 模型在冠层覆盖度率定时的相对误差 P_e 为 2.9% ~ 52.1%,所有处理中较大的误差主要是由于在灌咸水后和缺水状态下模型高估了冬小麦生育期中后阶段的冠层覆盖度。所有处理冠层覆盖度模拟值与实测值的 R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.71 ~ 0.89、4.20% ~ 11.00% 和 0.76 ~ 0.93。16 种处理冬小麦能达到的最大冠层覆盖度均随着所受水盐胁迫的加剧

而减小。在相同灌水方式下,充分灌溉 I3 与过量灌溉 I4 处理所能达到的最大冠层覆盖度 CCx 相近,非充分灌溉 I2 处理的 CCx 小于以上两者,I1 处理的 CCx 最小,且灌水量越小,冠层覆盖度下降程度越大。相同灌水量下,A1 处理在拔节期使用咸水灌溉,冠层受到的影响最大,灌咸水后冬小麦的冠层覆盖度明显小于其他处理。4 种灌水方式下的冠层覆盖度由小到大依次为 A1、A2、A3、A0 处理,最大冠层覆盖度分别达到 84.5% ~ 87.6%、86.4% ~ 91.5%、86.9% ~ 93.2% 和 86.9% ~ 93.3%。

图 4 为冬小麦生物量累积过程率定结果,生物量在播种后缓慢增长,至越冬期一直维持在较低水平,返青期后出现大幅增长。冬小麦生物量的模拟值与实测值变化趋势基本一致,所有处理相对误差 P_e 为 1.1% ~ 40.8%, R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.75 ~ 0.90、0.57 ~ 0.86 t/hm²、0.81 ~ 0.94。

蒸发蒸腾量(ET)反映作物耗水过程,根据式(4),本试验冬小麦的 ET 由土壤含水量变化值和灌水量

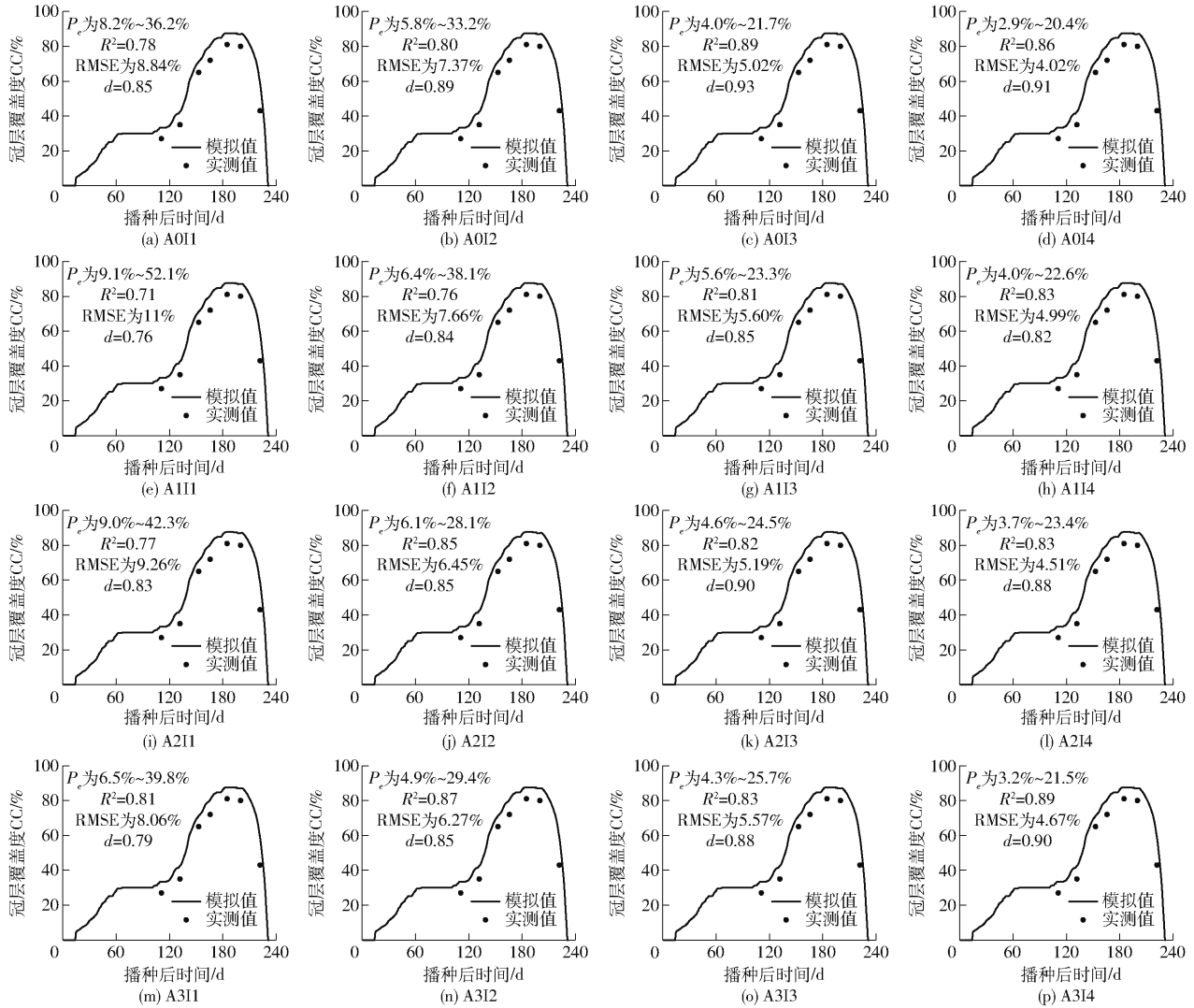


图 3 2017—2018 年冬小麦冠层覆盖度率定结果

Fig. 3 Calibration results of winter wheat canopy cover in 2017—2018

两部分组成,2017—2018 年冬小麦生育期的 ET 累积模拟值与实测值如图 5 所示。冬小麦的蒸发蒸腾量在出苗至越冬期较小,返青后进入需水关键期,ET 增长幅度显著变大,由 3 次灌溉水量补给作物的水分消耗。所有处理累积 ET 的相对误差为 0.1% ~ 48.3%, R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.96 ~ 0.99、14.95 ~ 52.17 mm、0.83 ~ 0.99。当灌水量不足时,模型对于 ET 的模拟误差较大,且随着所受水分胁迫的增加而增大;在充分灌溉条件下模拟精度较好。

图 6 为冬小麦最终生物量与籽粒产量的模型率定与验证结果,相对误差统计如表 4 所示。最终生物量率定时的相对误差为 1.21% ~ 8.93%,所有处理最终生物量模拟值与实测值的 R^2 、RMSE、 d 分别为 0.93、0.40 t/hm²、0.98;验证时相对误差为 2.13% ~ 6.95%,所有处理的 R^2 、RMSE、 d 分别为 0.88、0.51 t/hm²、0.97,A1 灌溉方式下最终生物量的模拟误差最大。籽粒产量率定时的相对误差为 1.99% ~ 10.18%,所有处理模拟值与实测值间的

R^2 、RMSE、 d 分别为 0.95、0.28 t/hm²、0.97;验证时相对误差为 1.07% ~ 9.09%,所有处理产量实测值与模拟值的 R^2 、RMSE、 d 分别为 0.93、0.33 t/hm²、0.95,与最终生物量相同,相对误差最大也出现在 A1 咸淡轮灌方式。可见 AquaCrop 模型整体上可以较好地模拟咸淡轮灌下冬小麦最终生物量和籽粒产量。在相同灌水方式下,冬小麦产量随灌水量的增加而增大,但当达到充分灌溉后,产量并不再继续增加,甚至可能因过量灌溉而减产。当灌水量相同时,全淡水灌溉方式下产量最高,A2 和 A3 方式下冬小麦因受到盐分胁迫产量有所下降,A1 在拔节期使用咸水灌溉对产量的影响最大。

2.2 情景模拟结果

利用校准后的 AquaCrop 模型对设计的 64 种咸淡轮灌情景进行模拟,图 7 为冬小麦籽粒产量对灌水量和咸水含盐量的响应规律。可以看出,在淡咸淡、淡淡咸、淡咸咸 3 种轮灌方式下,籽粒产量均随灌水量的增加而增加,达到充分灌溉后趋于稳定;对

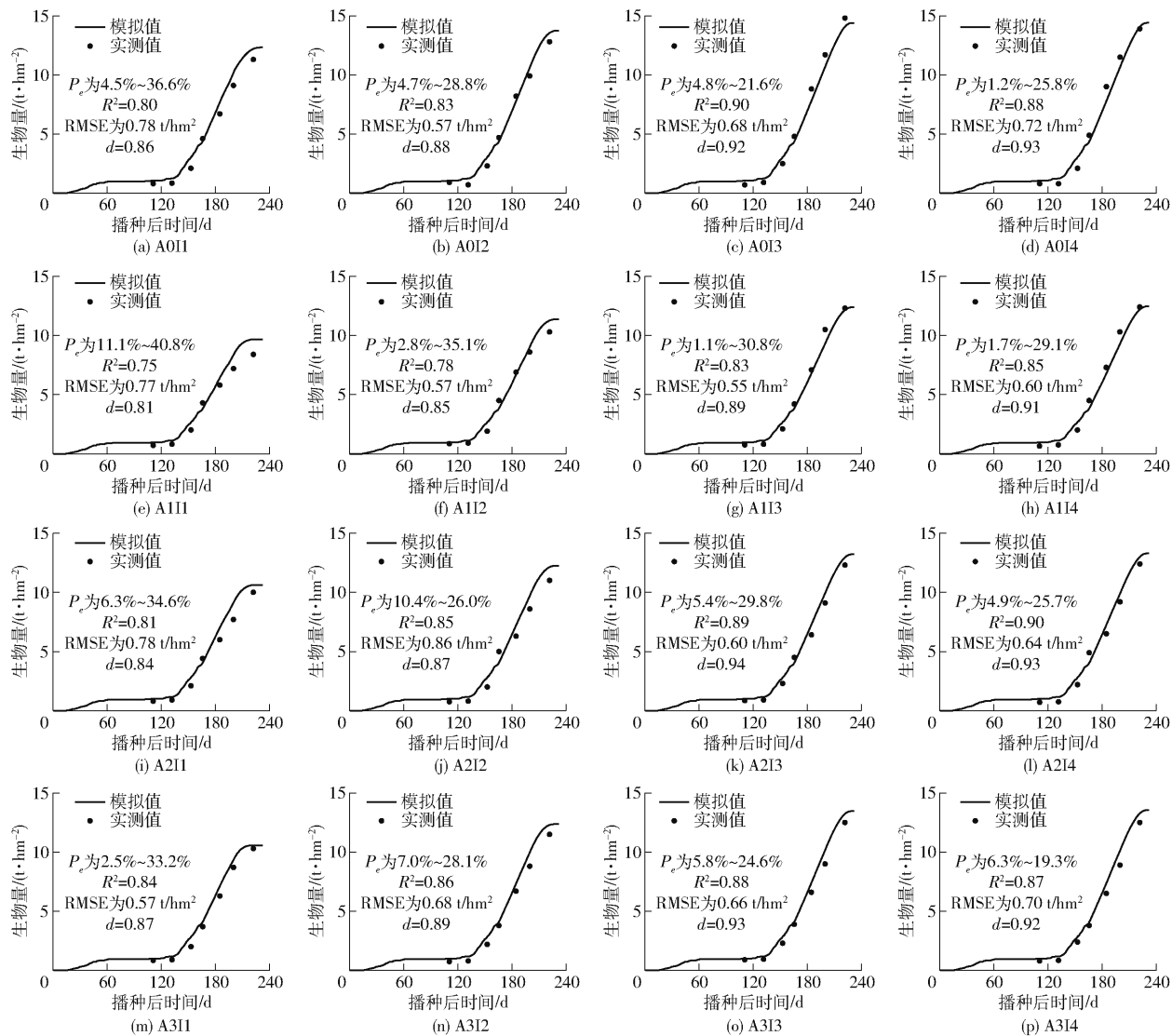


图4 2017—2018年冬小麦生物量率定结果

Fig.4 Calibration results of winter wheat biomass in 2017—2018

于咸水含盐量,产量与其两者之间呈明显的负相关。因此,将灌水量和咸水含盐量相结合,对籽粒产量进行二元回归分析,得到淡咸淡(A2)、淡淡咸(A3)、淡咸咸(A4)3种轮灌方式下产量与灌水量和咸水含盐量两个因素的回归方程为

$$Y_1=4.657+0.027x-0.031y \quad (5)$$

$$Y_2=4.558+0.028x-0.026y \quad (6)$$

$$Y_3=4.665+0.027x-0.050y \quad (7)$$

式中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 ——淡咸淡、淡淡咸、淡咸咸方式下的籽粒产量, t/hm^2

x ——单次灌水量, mm

y ——咸水含盐量, dS/m

根据回归方程(5)~(7)计算,使用全淡水灌溉时,为获得95%、90%、85%、80%最大产量所需单次灌水量不能小于77、64、51、38 mm。引入咸水灌溉后,随着咸水含盐量的增加必须要增大灌水量,才能保持籽粒产量不下降,且所需灌水量与咸水含盐

量呈线性相关。咸水含盐量为2~14 dS/m 时,A2、A3、A4方式下获得95%最大产量时所需单次灌水量分别为79.3~93.1 mm、79.6~90.8 mm、80.4~102.6 mm;获得90%最大产量的单次灌水量为66.1~79.9 mm、67.0~78.1 mm、67.3~89.5 mm;85%最大产量所需单次灌水量为53.0~66.8 mm、54.3~65.5 mm、54.1~76.4 mm;80%最大产量所需单次灌水量为39.9~53.7 mm、41.6~52.8 mm、41~63.2 mm。

3 讨论

3.1 AquaCrop 模型适用性

本研究利用冬小麦2017—2018年和2018—2019年两年试验数据进行AquaCrop模型的率定及验证,来探究AquaCrop模型在咸淡轮灌制度下模拟土壤水盐和冬小麦生长生产的适用性。上文中校准后的作物参数均在AquaCrop模型参考手册提供范

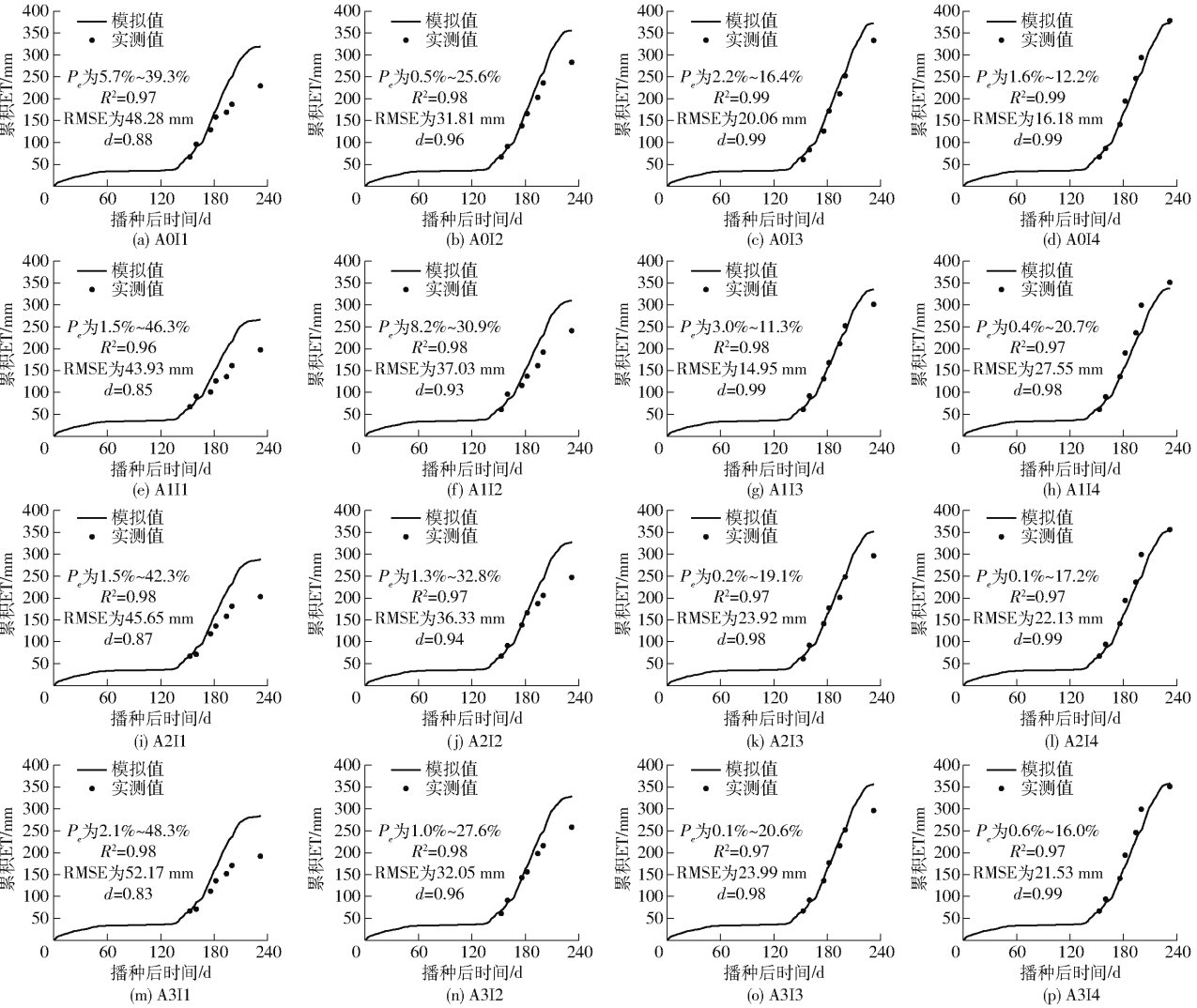


图5 2017—2018年累积蒸发蒸腾量率定结果

Fig. 5 Calibration results of accumulative evapotranspiration in 2017—2018

围内。柴顺喜等^[23]对北疆滴灌春小麦的 AquaCrop 模型进行参数本地化校准,得到影响冠层生长的土壤水分损耗阈值上下限为 0.10 和 0.45,这与本试验校准后的水分胁迫参数一致。KUMAR 等^[17]得到小麦在咸水灌溉条件下盐胁迫开始和作物停止生长时的土壤含盐量分别为 5、18 dS/m, HASSANLI 等^[19]研究小麦咸水灌溉时相应盐分胁迫参数分别为 2、10 dS/m,与本试验校准后的盐分参数接近,不同之处可能由于作物受到的水分胁迫不同而对土壤盐分产生不同程度的影响。

根据本文模拟结果,在土壤水盐方面,模型模拟值与实测值有较好的一致性,能够较准确地模拟出灌水前后土壤含水率和含盐量的变化趋势,且误差在可接受范围之内,这与国内外的研究成果基本吻合。GOOSHEH 等^[24]使用 AquaCrop 模型对多年小麦有效根区的水盐状况进行模拟,发现模拟结果下的水盐平衡条件与试验一致。彭致功等^[25]评价了 AquaCrop 模型在华北典型区的适用性,结果表明在

小麦返青期后模型校验时的土壤含水率模拟值与观测值之间的 RMSE、平均绝对误差 (MAE) 分别小于 2.35%、1.94%, R^2 均大于 0.7,模拟值能反映土壤含水率的动态变化过程。谭帅^[20]在研究微咸水膜下滴灌时的 AquaCrop 土壤盐分模拟中发现,当灌水量相对较小(低于 80% 充分灌溉)时土壤盐分的模拟准确度较高,过量灌溉时模型会低估土壤盐分含量,与本研究模型率定时土壤盐分的变化规律相似,这可能是由于模型仅用简单的经验公式计算溶质运移,未充分考虑影响土壤盐分变化的多种外界条件^[19]。牛君仿等^[26]在咸水安全利用方面的研究结果显示,咸淡轮灌模式利用的关键在于保持作物根层水盐平衡,作物收获后一次大的漫灌可有效减少土壤中盐分的累积。本文模拟根区盐分变化时发现,在大灌溉定额下土壤出现明显洗盐现象,而且冬小麦收获后经历夏季大雨量淋洗,可有效降低土壤含盐量,因此长期应用咸淡轮灌模式对土壤水盐的变化影响较小,是咸水安全可靠利用的一种有效

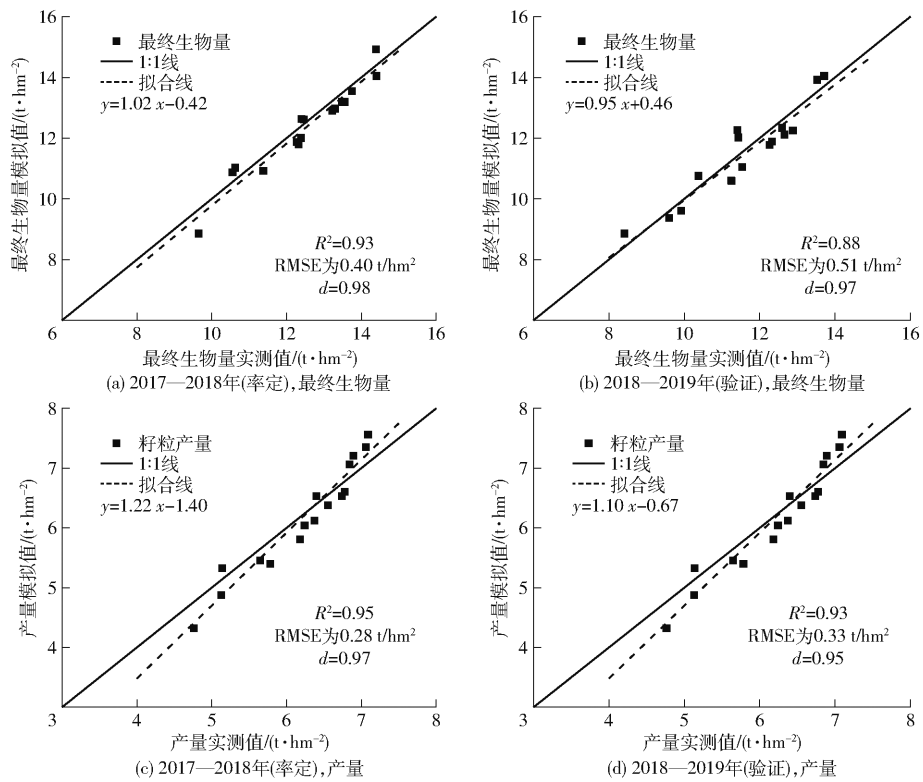


图 6 最终生物量、籽粒产量率定和验证结果

Fig. 6 Calibration and verification results of final biomass and grain yield

表 4 最终生物量、籽粒产量校验误差

Tab.4 Error results of final biomass and grain yield calibration and verification

处理	最终生物量						籽粒产量					
	率定(2017—2018 年)			验证(2018—2019 年)			率定(2017—2018 年)			验证(2018—2019 年)		
	模型模	田间观	P_e /%	模型模	田间观	P_e /%	模型模	田间观	P_e /%	模型模	田间观	P_e /%
	拟值/ (t·hm ⁻²)	测值/ (t·hm ⁻²)		拟值/ (t·hm ⁻²)	测值/ (t·hm ⁻²)		拟值/ (t·hm ⁻²)	测值/ (t·hm ⁻²)		拟值/ (t·hm ⁻²)	测值/ (t·hm ⁻²)	
A0I1	12.327	11.798	4.48	11.242	10.612	5.94	5.648	5.456	3.52	5.151	4.956	3.93
A0I2	13.744	13.552	1.42	12.884	12.246	5.21	6.552	6.379	2.71	6.142	5.879	4.47
A0I3	14.395	14.926	3.56	13.528	13.917	2.79	7.059	7.352	3.99	6.634	6.853	3.20
A0I4	14.403	14.048	2.53	13.713	14.045	2.36	7.090	7.561	6.23	6.749	6.976	3.25
A1I1	9.647	8.856	8.93	8.416	8.856	4.97	4.763	4.323	10.18	4.155	4.238	1.96
A1I2	11.379	10.923	4.17	10.377	10.754	3.50	5.783	5.396	7.17	5.274	4.896	7.72
A1I3	12.396	12.625	1.81	11.411	12.263	6.95	6.374	6.124	4.08	5.867	5.624	4.32
A1I4	12.459	12.611	1.21	11.442	12.019	4.80	6.398	6.528	1.99	5.876	5.628	4.41
A2I1	10.631	11.023	3.56	9.603	9.374	2.44	5.128	4.879	5.10	4.632	4.449	4.11
A2I2	12.267	11.873	3.32	11.261	10.586	6.37	6.181	5.807	6.44	5.674	5.907	3.94
A2I3	13.221	12.904	2.46	12.268	11.778	4.16	6.739	6.532	3.17	6.253	6.524	4.15
A2I4	13.297	12.969	2.53	12.326	11.889	3.67	6.776	6.605	2.59	6.281	6.349	1.07
A3I1	10.557	10.874	2.92	9.916	9.607	3.22	5.138	5.326	3.53	4.826	4.424	9.09
A3I2	12.384	12.004	3.17	11.539	11.049	4.43	6.242	6.042	3.31	5.816	5.542	4.94
A3I3	13.479	13.192	2.18	12.658	12.114	4.49	6.844	7.064	3.11	6.427	6.195	3.74
A3I4	13.556	13.189	2.78	12.601	12.338	2.13	6.892	7.208	4.38	6.406	6.209	3.17

方式。

在模拟冬小麦的生长生产方面,本研究整体上高估了冬小麦的冠层覆盖度,可能是因为模型偏重考虑了在水盐胁迫下土壤含水量的增加对小麦生长的促进作用,而忽略了土壤盐分对小麦拔节期后生

长的影响。AquaCrop 模型中作物蒸发蒸腾量(ET)采用基于冠层覆盖度(CC)的经验方法,在模拟时误差主要存在于非充分灌溉的处理,这可能是因为灌水量不足情况下模型高估了冬小麦的 CC,导致 ET 比实测值偏高^[27]。对于地上干物质质量及产量,

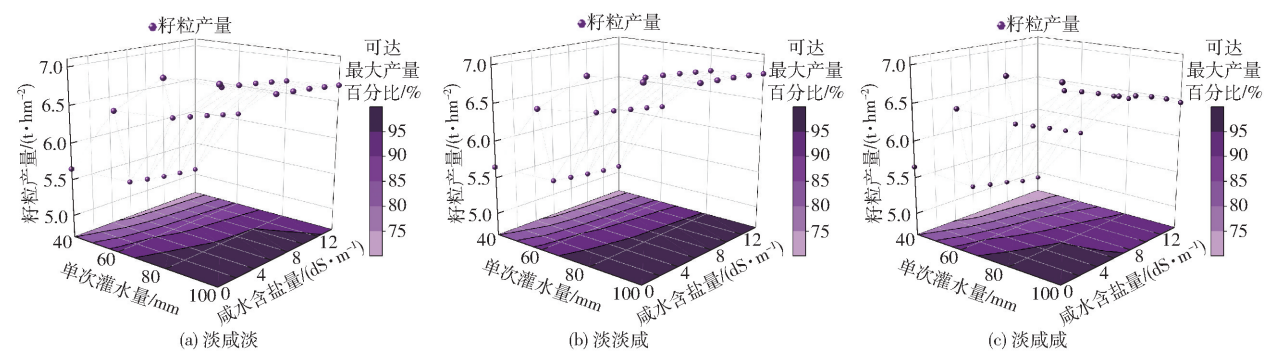


图7 不同灌溉制度下籽粒产量模拟结果

Fig.7 Grain yield simulation results under different irrigation schedules

两者的模拟值与实测值间的误差表现一致,均在亏缺灌溉下误差较大,且灌水量越小,模拟值与实测值间的差距越大,充分灌溉处理时模拟效果较好。这与 HENG 等^[28]的研究结果相似,AquaCrop 模型能够较为精确地模拟没有水分胁迫或轻微胁迫条件下的产量,但在严重水分胁迫条件下模拟精度变差。

以上结果表明 AquaCrop 模型在模拟咸淡轮灌下土壤水盐和冬小麦生长生产方面具有良好的适用性,能够较准确地模拟土壤含水率的变化和预估冬小麦的生长生产,但对于不同生育期受到水盐胁迫在冠层覆盖度方面的影响还需改进。

3.2 适宜咸淡轮灌方案确定

冬小麦在不同生育期受到水分与盐分胁迫,对产量产生不同程度的影响。杨林林等^[29]研究得到在返青拔节期灌水的效果优于灌浆期,翟亚明等^[30]发现在抽穗期前灌溉微咸水受矿化度的影响较为明显。研究皆表明拔节期是对水盐胁迫最敏感的时期,本试验结果也证明了在拔节期灌溉咸水对冬小麦生长和产量有较大影响,同时非充分灌溉更会加大减产幅度^[31]。进入生育中后期,植株发育成熟,生长变缓,耐盐耐旱性有所增强,抽穗期决定着穗粒数、成穗率等,灌浆期是籽粒形成重要阶段^[32-33]。因此,应尽量减少在返青拔节期使用咸水灌溉,本研究在情景模拟时设置淡咸淡、淡淡咸、淡咸咸3种咸淡轮灌方式,结合不同灌水量,推求3种轮灌方案目标产量下适宜的咸水灌溉量。

根据 HANSEOK 等^[34]对各类作物响应灌溉水含盐量的关系研究,小麦收获90%最大产量时对应的灌溉水含盐量为4.9 dS/m,本研究在充分灌溉条件下获得90%最大产量时A2、A3和A4方式的咸水含盐量阈值分别为14.1、16.0、8.8 dS/m,可见咸淡轮灌相较咸水直接灌溉可利用含盐量更高的咸水,是一种高效、可靠的咸水灌溉方式^[35]。情景模拟结果显示,咸水含盐量与收获相同籽粒产量所需的灌水量呈线性相关,在不减产情况下,灌溉水含盐

量越高所需的灌溉水量越大。在咸水含盐量较低时,淡咸淡、淡淡咸、淡咸咸3种轮灌方式收获相同籽粒产量所需的灌水量差异不显著;当咸水含盐量增加至14 dS/m,3种轮灌方式下所需的灌水量差异显著增大,淡咸咸灌溉方式下要获得95%最大产量所需单次灌水量达102.66 mm,淡咸淡与淡淡咸方式所需灌水量分别为93.1、90.8 mm。当灌一次咸水时,在灌浆期灌咸水较抽穗期对产量的影响较小;使用两次咸水灌溉时,则需增大灌水量,以达到对土壤盐分的淋洗效果,这与陈素英等^[36]的研究结果基本一致。

综上,本研究验证了 AquaCrop 模型在咸淡轮灌制度下的适应性,可以运用此模型来探寻干旱半干旱地区咸水安全高效利用的方式。通过情景模拟确定了不同咸淡轮灌方式及咸水含盐量下适宜的灌水量,可以在干旱半干旱地区水资源匮乏情况下确保一定的产量,对冬小麦咸淡轮灌方案的优化具有重要指导价值。但本研究在避雨条件下进行,对于不同降雨条件下使用 AquaCrop 模型进行冬小麦咸淡轮灌制度的优化仍需研究;且本试验只有两年田间数据,还需进行多年试验以探索咸淡轮灌制度对土壤水盐及冬小麦的长期影响。

4 结论

- (1) AquaCrop 模型可以较准确地模拟咸淡轮灌制度下土壤水盐变化和冬小麦生长生产过程,但在水盐胁迫严重情况下对于生育后期冠层覆盖度的模拟精度有待提高。
- (2) 在返青拔节期灌溉咸水对冬小麦生长生产的影响最大,咸水灌溉时间宜选择生育中后期。情景模拟结果显示,随着咸水含盐量的增加,必须增大灌水量才可维持籽粒产量。
- (3) 籽粒产量归一化后,得到优化的咸淡轮灌方案:咸水含盐量为2~14 dS/m,收获95%最大产量时淡咸淡、淡淡咸、淡咸咸轮灌方式下单次灌水量

分别为 79.3 ~ 93.1 mm、79.6 ~ 90.8 mm、80.4 ~ 102.6 mm;收获 90% 最大产量时 3 种咸淡轮灌方式下单次灌水量分别为 66.1 ~ 79.9 mm、67.0 ~ 78.1 mm 和 67.3 ~ 89.5 mm。

参 考 文 献

- [1] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):289–297. (in Chinese)
- [2] SHARMA B R, MINHAS P S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1): 136–151.
- [3] RASOULI F, POUYA A K, SIMUNEK J. Modeling the effects of saline water use in wheat-cultivated lands using the UNSATCHEM model[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5):1009–1024.
- [4] 朱成立,吕雯,黄明逸,等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(1):226–234.
ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226–234. (in Chinese)
- [5] HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, SHENG Zhuping, et al. Effect on soil properties and maize growth by alternate irrigation with brackish water[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2):485–493.
- [6] 黄明逸,张展羽,徐辉,等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(1):238–247.
HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, XU Hui, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):238–247. (in Chinese)
- [7] 袁成福,冯绍元,季泉毅,等. 石羊河流域制种玉米咸淡水轮灌模式的 SWAP 模型模拟[J]. 干旱地区农业研究,2019, 37(4):1–9.
YUAN Chengfu, FENG Shaoyuan, JI Quanyi, et al. SWAP simulation of rotational irrigation models with saline and fresh water for seed maize in Shiyang River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4):1–9. (in Chinese)
- [8] 吴忠东,王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报,2007, 23(11):71–76.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11):71–76. (in Chinese)
- [9] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(10): 220–228,201.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):220–228,201. (in Chinese)
- [10] 袁成福. 石羊河流域咸水灌溉下土壤水盐动态及春玉米产量模拟[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):239–244.
YUAN Chengfu. Simulation of soil water-salt dynamic and spring maize yield under saline water irrigation in Shiyang River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(2):239–244. (in Chinese)
- [11] 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):1841–1854.
LIU Xia, DING Dianyu, 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):1841–1854. (in Chinese)
- [12] 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 Chao-fei, LIU Shuanghuan, GUO Daxin, 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. (in Chinese)
- [13] ANDARZIAN B, BANNAYAN M, STEDUTO 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.
- [14] 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)
- [15] 王兴鹏,蒋富昌,王洪博,等. 基于 AquaCrop 模型的南疆无膜滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 农业机械学报,2021,52(4): 293–301,335.
WANG Xingpeng, JIANG Fuchang, WANG Hongbo, et al. Optimizing irrigation scheduling of drip-irrigated cotton in South Xinjiang based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):293–301,335. (in Chinese)

- [16] VANUYTRECHT E, RAES D, STEDUTO P, et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2014, 62: 351–360.
- [17] KUMAR P, SARANGI A, SINGH D, et al. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigation saline regimes[J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63(4): 474–487.
- [18] MONDAL M, SALEH A, AKANDA M, et al. Simulating yield response of rice to salinity stress with the AquaCrop model[J]. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 2015, 17(6): 1118–1126.
- [19] HASSANLI M, EBRAHIMIAN H, MOHAMMADI E, et al. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 91–99.
- [20] 谭帅. 微咸水膜下滴灌土壤盐调控与棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
TAN Shuai. Study on soil water and salt regulation and cotton growth characteristics under film-mulched drip irrigation with brackish water[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] MOHAMMADI M, GHAHRAMAN B, DAVARY K, et al. Nested validation of Aquacrop model for simulation of winter wheat grain yield, soil moisture and salinity profiles under simultaneous salinity and water stress[J]. *Irrigation and Drainage*, 2016, 65(1): 112–128.
- [22] KUMAR M, SARANGI A, SINGH D, et al. Modelling the grain yield of wheat in irrigated saline environment with foliar potassium fertilization[J]. *Agricultural Research*, 2018, 7(3): 321–337.
- [23] 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 Shunxi, CHEN Rui, LI Jie, et al. Calibration and verification of AquaCrop model in drip-irrigation spring wheat production in Northern Xinjiang[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(8): 215–219. (in Chinese)
- [24] GOOSHEH M, PAZIRA E, GHOLAMI A, et al. Improving irrigation scheduling of wheat to increase water productivity in shallow groundwater conditions using AquaCrop[J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(5): 738–754.
- [25] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 238–246.
PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 238–246. (in Chinese)
- [26] 牛君仿, 冯俊霞, 路杨, 等. 咸水安全利用农田调控技术措施研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(8): 1005–1015.
NIU Junfang, FENG Junxia, LU Yang, et al. Advances in agricultural practices for attenuating salt stress under saline water irrigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(8): 1005–1015. (in Chinese)
- [27] 冉辉. 西北旱区制种玉米生长与产量对土壤水氮的响应及模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
RAN Hui. Response mechanism of hybrid maize seed production to water and nitrogen and crop modeling in arid Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [28] HENG L, HSIAO T, EVETT S, et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 488–498.
- [29] 杨林林, 高阳, 申孝军, 等. 播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9): 1–6.
YANG Linlin, GAO Yang, SHEN Xiaojun, et al. Effects of irrigation before sowing and at different growth stages on growth and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 1–6. (in Chinese)
- [30] 翟亚明, 程秀华, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对冬小麦生长及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(11): 1–7.
ZHAI Yaming, CHENG Xiuhua, HUANG Mingyi, et al. Effects of alternate irrigation with fresh and brackish water on winter wheat growth and yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(11): 1–7. (in Chinese)
- [31] 马莉, 宋佃星, 王全九. 荒漠绿洲区不同灌溉定额对春小麦光合特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 90–94.
MA Li, SONG Dianxing, WANG Quanjiu. Effects of different irrigation quotas on photosynthetic characteristics and yield of spring wheat in desert oasis[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 90–94. (in Chinese)
- [32] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(9): 33–37, 42.
GONG Yutian, SUN Shuhong, YAN Hongwei. Study on the impact of saline water with different materialization degree on growth characteristics and yield of winter wheat[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(9): 33–37, 42. (in Chinese)
- [33] 吴忠东, 王全九. 微咸水非充分灌溉对土壤水盐分布与冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 36–42.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effects of deficit irrigation with brackish water on soil water-salt distribution and winter wheat yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 36–42. (in Chinese)
- [34] HANSEOK J, HAKKWAN K, TAEIL J. Irrigation water quality standards for indirect wastewater reuse in agriculture: a contribution toward sustainable wastewater reuse in South Korea[J]. *Water*, 2016, 8(4): 169.
- [35] SOOTHAR R, ZHANG W Y, LIU B H, et al. Sustaining yield of winter wheat under alternate irrigation using saline water at different growth stages: a case study in the North China Plain[J]. *Sustainability*, 2019, 11(17): 1–16.
- [36] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3): 579–585.
CHEN Suying, ZHANG Xiyin, SHAO Liwei, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 579–585. (in Chinese)