

基于 AquaCrop 模型的水稻多目标灌溉制度优化研究

马超¹, 吴天傲^{1,2,3}, 章伟忠⁴, 李江¹, 缴锡云^{1,2,3*}

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 211100; 2.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3.水科学与水安全协同创新中心, 南京 210098; 4.常熟市水利工程质量监督站, 江苏 苏州 215500)

摘要:【目的】优化现有水稻灌溉制度, 节约灌溉用水量, 减少稻田氮磷流失量以降低面源污染风险。【方法】构建了基于 AquaCrop 模型和 NSGA-II 算法的水稻灌溉制度模拟优化模型, 利用水稻田间试验数据, 开展以产量最大、氮磷流失量最小、灌水次数最少的 3 种目标组合 (产量-氮磷流失量 (Y-TNP)、产量-灌水次数 (Y-N)、产量-氮磷流失量-灌水次数 (Y-TNP-N)) 下的灌溉制度优化模型研究, 提出适应不同生育期降水年型的稳产-控污-提效灌溉制度。【结果】①与常规灌溉相比, Y-TNP 灌溉制度优化水稻产量下降 2.14%, 氮磷流失量减少 23.09%; Y-N 灌溉制度优化水稻产量下降 1.76%, 灌水次数减少 53%; Y-TNP-N 灌溉制度优化水稻产量下降 2.64%, 氮磷流失量减少 22.83%, 灌水次数减少 2 次。②不同典型年以 Y-TNP-N 为目标优化的稳产-控污-提效灌溉制度水稻产量介于 7.74~7.78 t/hm², 同时大幅度减少灌水量进而降低氮磷流失量。【结论】AquaCrop 模型可模拟试验区水稻的生长发育过程, 本文构建的模拟-优化耦合模型可用于优化不同生育期降水年型下稳产-控污-提效的灌溉制度。

关键词: 水稻; 灌溉制度; AquaCrop 模型; NSGA-II 优化算法; 面源污染

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023279

OSID: 

马超, 吴天傲, 章伟忠, 等. 基于 AquaCrop 模型的水稻多目标灌溉制度优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 9-16.
MA Chao, WU Tian'ao, ZHANG Weizhong, et al. Optimization of multi-objective irrigation schedule for rice based on AquaCrop model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 9-16.

0 引言

【研究意义】水稻是我国南方最重要的粮食作物, 有着重要的经济价值与战略价值, 种植面积占耕地总面积的比例较大。水稻田在生育期内大部分时间都保持田面有一定的水深, 渗漏水量较多。同时, 现有的灌溉制度在实际灌溉时通常不能够实现对降水较为充分的利用, 灌溉定额高于水稻的实际需水量^[1], 造成水资源浪费, 同时加剧了农业面源污染风险。作物灌溉制度优化是指将灌溉水量在作物生育期内进行合理的分配, 同时通过调整作物灌水下限以及每次灌水定额, 以实现作物产量最大或用水效益最高等优化目标的过程^[2-3]。优化水稻灌溉制度有利于节约农业水资源、减少农田地表径流量以及渗漏量, 降低农业面源污染风险^[4]。

【研究进展】目前, 已经有部分学者进行水稻灌溉制度优化的研究^[5-13]。其中, 雷彩秀等^[11]基于天气预报与降水情况对灌溉制度进行实时优化, 建立了基于随机降水的水稻灌溉制度优化模型, 给出了保证水稻正常生长的灌溉制度, 优化了灌水定额。Zhai 等^[12]将 AquaCrop 作物生长模型与熵-云模型结合, 建立了基于 3 种典型降水年的水稻灌溉制度优化模型, 对三江平原地区的水稻灌溉方案进行了评价。邵东国等^[13]在分析有机稻的需水特性后, 提出了基于 AquaCrop 模型与熵值法结合的灌溉制度优化方法, 得出了高产、节水的灌溉制度。在上述学者及其他学者的研究中, 大部分以产量或水分生产率作为单一的优化变量, 把降水作为调控灌水量的依据, 进而达到节水增产的目的, 但缺乏对灌水量、产量、氮磷流失、灌水次数的综合考虑。【切入点】AquaCrop 模型目前被广泛应用于作物的生长发育模拟中^[14-17], 适合用来进行水稻的灌溉制度优化研究。本研究从多目标协同优化的方向入手, 在水稻灌溉制度优化模拟中考虑减少稻田的氮磷流失, 同时考虑减轻农业管理负担。

【拟解决的关键问题】本试验建立了基于模拟-优化的灌溉制度优化模型^[3], 采用 2020 年和 2022 年在江苏省南京市进行的水稻试验数据对 AquaCrop 模

收稿日期: 2023-07-31 修回日期: 2023-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700803, BE2019378); 江苏省重点研发计划 (BE2022390); 江苏省研究生科研与实践创新项目 (KYCX21_0537)

作者简介: 马超 (1999-), 男, 河南郑州人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: machao_1030@163.com

通信作者: 缴锡云 (1962-), 男, 河北廊坊人。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xyjiao@hhu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

型进行率定和验证,以 NSGA-II 算法为基础^[18],以产量最大、农田地表径流与深层渗漏中氮磷流失最低与灌水次数最小为目标,对历史气象年份(2020 年)以及不同典型气象年份下(丰水年、平水年、枯水年、特枯年)试验区的水稻进行灌溉制度优化。

1 材料与方法

1.1 试验概况

盆栽试验和小区试验分别于 2020 年和 2022 年在河海大学节水园区内(31°54'57"N, 118°46'37"E)开展,该地区位于江苏省南京市江宁区,地处长江流域,属亚热带季风气候区,雨量充沛,光热充足,试验土壤质地为粉砂壤土。盆栽试验选用直径 50 cm,高 75 cm 的塑料圆桶,桶身不透水。在桶壁靠近底部的位置开口,安装出水阀,模拟稻田正常渗漏。每盆移栽秧苗 5 穴,每穴 3 株,植株与桶壁保持 12 cm 距离,以减少边缘效应。小区试验采用浅水勤灌的方式开展,返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期的田间水层下限、上限和最大蓄水深度参照技术规范确定,分别为 10-30-80 mm、10-30-100 mm、10-30-150 mm、10-30-150 mm、10-30-100 mm,并在生育期内测定叶面积指数及生物量等。通过试验获得了该地区水稻在现有灌溉管理模式下的生物量和产量数据,以及在常规施用化肥及农药条件下农田径流和渗漏水量中的总氮(TN)和总磷(TP)质量浓度。

1.2 AquaCrop 模型简介

AquaCrop 模型是由联合国粮农组织开发的一款作物-水生产模型,能够在给定气候、土壤、灌溉、田间管理等资料的条件模拟作物的生长发育过程,用较少的输入参数获得较理想的模拟效果。特别是在水分胁迫情况下,模型能够较好地模拟作物对水分不足的反应。模型产量计算式为:

$$Y=HI \cdot B, \quad (1)$$

$$B=WP^* \cdot \sum T_r, \quad (2)$$

式中: WP^* 为归一化水分生产参数即作物生育期内单位面积上的产量与植株蒸腾量之比($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{mm})$); T_r 为每日植株蒸腾量(mm); B 为地上生物量(t/hm^2); HI 为收获指数; Y 为作物产量(t/hm^2)。

模型参数输入模块主要包括作物、气候、管理、土壤和模拟 5 个部分。作物文件包括农作物的主要特征参数。主要农作物的作物参数经联合国粮农组织校准后,作为模型的默认值,选择作物类型后将从数据库下载作物参数。气候文件包括模拟期每天的最高气温和最低气温、参考腾发量(ET_0)、降水量以及年平均 CO_2 摩尔分数。植株蒸腾量是影响作物水分生产参数的关键因素, CO_2 摩尔分数通过影响作物光合作用

速率从而影响干物质量。管理文件主要包括灌溉文件和田间管理文件 2 个部分。灌溉文件包含灌水时间、灌水方式以及灌水量等信息;田间管理文件包含杂草管理、土壤施肥选择以及是否设置田埂等信息。土壤文件包括土壤剖面类型、土壤理化特性和地下水状况等信息。模拟模块包含初始状况、项目状况等文件。

1.3 NSGA-II 优化求解算法

本研究采用改进非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行优化求解。NSGA-II 算法是在 NSGA 算法基础上提出的,是目前最流行的多目标遗传算法之一。与其他多目标优化算法相比,其创新点是:(i)快速非支配排序过程;(ii)快速拥挤距离估计过程;(iii)简单的拥挤比较算子。NSGA-II 算法使用无参数方法,遵循精英策略,能够简单而有效地处理约束问题;同时,使用拥挤比较法代替共享函数法,在一定程度上降低了计算难度。

NSGA-II 算法计算流程如下:首先,随机产生数量为 N 的初始种群,经由非支配排序后通过遗传算法交叉变异后得到第 1 代子代种群;接着,从第 2 代开始,将父代种群与子代种群合并,通过快速非支配排序以及拥挤度计算,选取合适个体组成新的父代种群;然后根据遗传算法产生新的子代种群,循环上述步骤,直至达到给定迭代次数。

1.4 灌溉制度优化模型

本试验对水稻灌溉制度进行优化的目标为:①作物产量最大,②农田地表径流与渗漏中总氮和总磷流失最少,③灌水次数最少。优化变量为:灌水下限及灌水定额;约束条件为:每次灌水的灌水下限和灌水量。优化目标和约束条件为:

$$\text{优化目标} \begin{cases} \max Y \\ \min N \\ \min(RTN+DTN+RTP+DTP) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{约束条件} \begin{cases} h > 0 \\ I_{\min} < I_i < I_{\max}, (i \leq n) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: Y 为作物产量(t/hm^2); N 为灌水次数(次); RTN 、 DTN 分别为径流和渗漏中的总氮量(kg/hm^2), RTP 、 DTP 分别为径流和渗漏中的总磷量(kg/hm^2),通过不同生育期径流与渗漏量分别乘总氮、总磷质量浓度求得^[11]; h 为灌水下限(mm); I_i 为每次的灌水量(mm); I_{\min} 、 I_{\max} 分别为每次灌水量的最小、最大约束,最小灌水量为 0,最大灌水量取灌水上限与灌水下限的差值(mm)。

灌溉制度优化流程见图 1。首先,随机生成初始灌溉制度,调用经率定与验证后的 AquaCrop 模型模拟出产量代入目标函数,生成初始解,随后进行遗传迭代,最终得到帕累托(Pareto)非劣解集,根据得到的灌溉制度 Pareto 非劣解集对应的水稻生育期灌

溉定额，取单位灌水量产量最大化（产量与灌水量比值最大）的 Pareto 解为当前优化目标下的最优灌溉制度。本文在考虑计算精度问题后，采用 50 个个体进行迭代 200 代后得到优化结果。

1.5 模型率定与验证

2020 年和 2022 年水稻生育期内逐日气象如图 2 所示。以 2020 年实测气候、冠层覆盖度、地上生物量和产量数据为依据，对 AquaCrop 模型中的参数进行率定^[14]，并用 2022 年的实测数据对模型进行验证。2020 年与 2022 年实测水稻冠层覆盖度、地上生物量和产量数据见表 1。

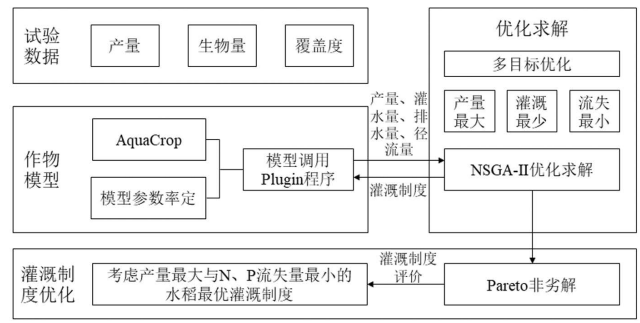


图 1 灌溉制度优化流程图

Fig.1 Irrigation scheduling optimization flowchart

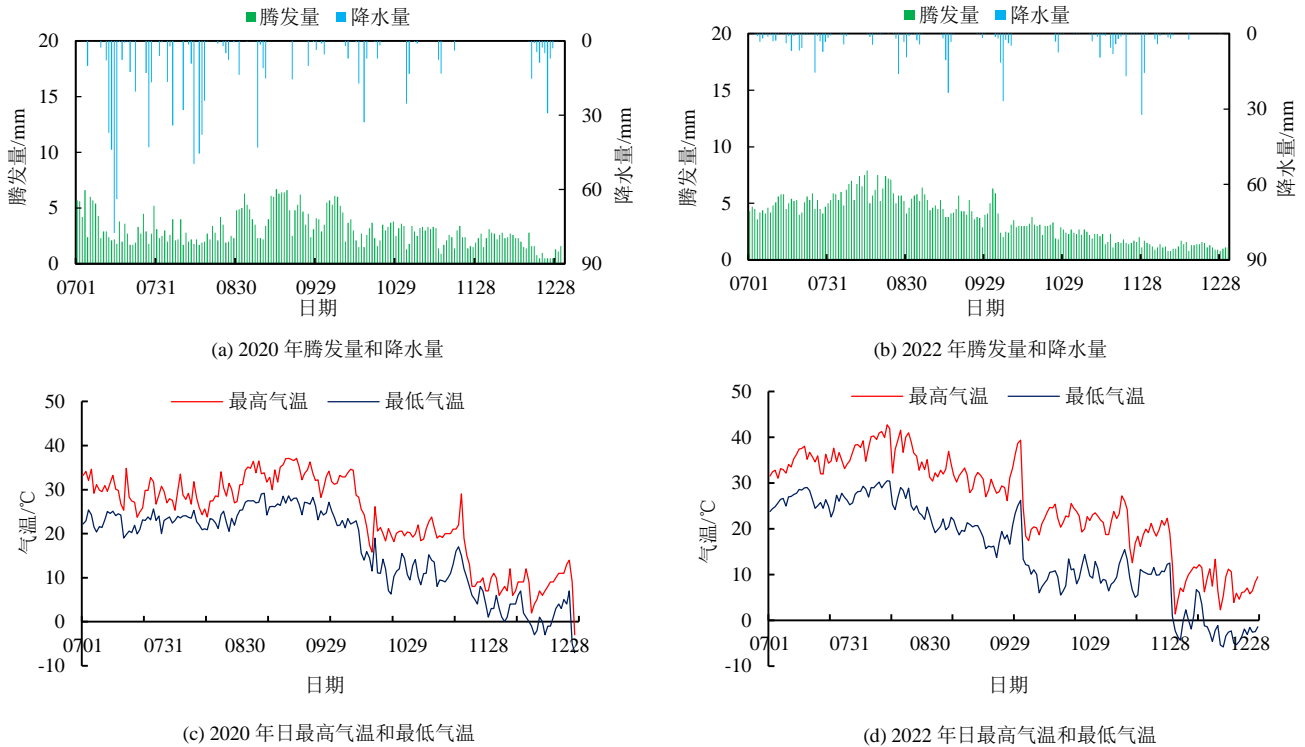


图 2 2020 年与 2022 年水稻生育期逐日气象要素

Fig.2 Daily meteorological elements of rice growth period in 2020 and 2022

表 1 2020 年与 2022 年水稻各项指标实测数据

Tab.1 Measured data of various rice indicators in 2020 and 2022

年份	指标	移栽后时间/d				
		34	41	47	80	125
2020 年	冠层覆盖度/%	26.80±2.86	57.21±2.74	72.53±2.31	86.60±3.77	77.6±2.78
	地上生物量/(t hm ⁻²)	1.26±0.45	1.59±0.34	2.67±0.54	11.04±1.32	16.94±0.88
	产量/(t hm ⁻²)	/	/	/	/	7.99±0.31
2022 年	冠层覆盖度/%	48.52±3.26	86.27±2.11	89.34±4.32	83.61±4.60	76.90±3.29
	地上生物量/(t hm ⁻²)	1.59±0.54	7.17±0.82	9.80±1.61	14.62±1.02	16.19±0.63
	产量/(t hm ⁻²)	/	/	/	/	7.10±0.17

采用归一化均方根误差 (NRMSE)、一致性指数 (d) 和决定性系数 (R²) 评价模型校准和拟合的精度。NRMSE 值越小，同时 d 值和 R² 值越接近 1 表明模型拟合度越好。

采用试错法调整模型参数，调整后的模型参数值见表 2。

模型模拟值与实测值对比见图 3。冠层覆盖度的

模拟值与实测值变化一致，总体上呈先增加后不变的趋势；生物量的模拟值与实测值变化一致，在生育期内总体呈上升趋势。率定与验证结果的 NRMSE 值均<10%，d 值与 R² 值均>0.85，说明模型能够很好的模拟研究区水稻生长发育情况，并可以用于研究区水稻生育期内不同灌溉条件下的水稻发育状况模拟。

2 结果与分析

2.1 双目标灌溉制度优化结果

本研究采用模拟-优化模型，以产量最大分别联合农田地表径流与深层渗漏中氮磷流失最低或灌水次数最小为优化目标，对 2020 年南京的水稻灌溉制度进行优化求解，选择得到的 Pareto 非劣解前沿上的较优点，得到其对应的灌溉制度，再取产量与灌溉定额的比值最大的解为当前优化目标下的最优灌溉制度。

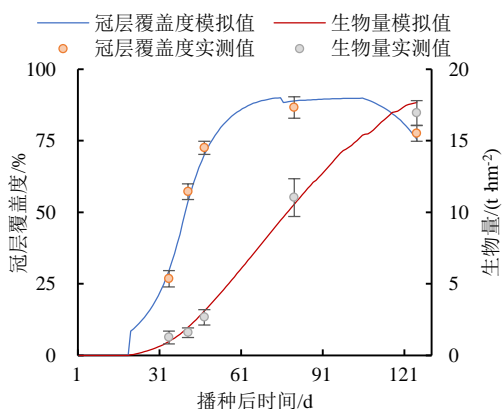
由图 4 (a) 可知，随着作物产量增加，*TNP* (总氮磷流失) 呈指数趋势增加。产量较低时，增加单位产量造成的 *TNP* 较少，而在产量基本达到最大值 (模型中作物的潜在最大产量) 时，增加单位产量造成的 *TNP* 显著增加，即在水稻生育期内需要更多的水肥。但用较多的氮磷流失量换取微小产量增加不符合农业可持续发展的要求，因此需要舍弃部分产量来换取较低的氮磷流失量，以在稳产保量的前提下减少农业面源污染风险。图 4 (b) 为以产量最大与灌水次数最小为优化目标的 Pareto 非劣解图。由图 4 (b) 可知，随着作物产量需求的增加，灌水次数 (*N*) 也基

本呈增加趋势，作物产量与灌水次数整体呈指数相关。灌水次数关系到田间工作强度，在保证产量的情况下尽可能以较少的灌水次数为宜。故当产量达到 8 t/hm^2 左右时，增加灌水次数获得的产量并不显著，而工作量却显著增加，这种灌水方法显然不合理。

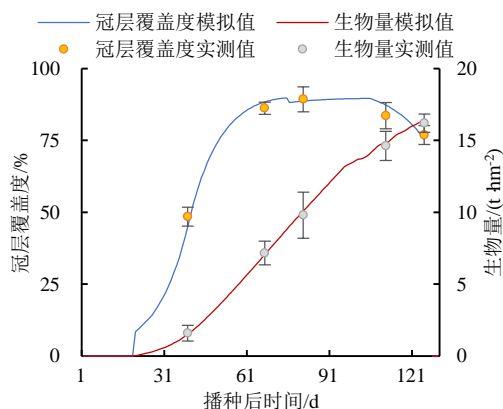
表 2 模型参数率定值

Tab.2 Model parameter calibration

指标	参数	单位	系统默认值	参数率定值
温度阈值	最低生长温度 T_{base}	°C	8	10
	最高生长温度 T_{up}	°C	30	40
冠层生长指标	冠层生长系数 CGC	/	0.006-0.008	0.089
	达到最大覆盖度的时间	d	60	65
	冠层衰减系数 CDC	/	0.005	0.070
扬花期参数	从移栽到成熟的时间	d	110	125
	扬花期持续时间	d	10	8
根系生长参数	最小有效根系深度 Z_n	m	0.30	0.20
	最大有效根系深度 Z_x	m	0.60	0.50
作物蒸腾参数	最大作物系数 $K_{C_{Tx}}$	/	1.10	1.15
生物量、产量形成参数	水生产力 WP^*	g/m^2	19	16
	收获指数 HI_0	%	35-50	45



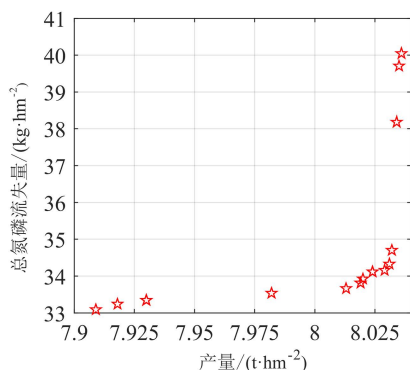
(a) 2020 年实测数据与模拟数据对比图 (模型校准)



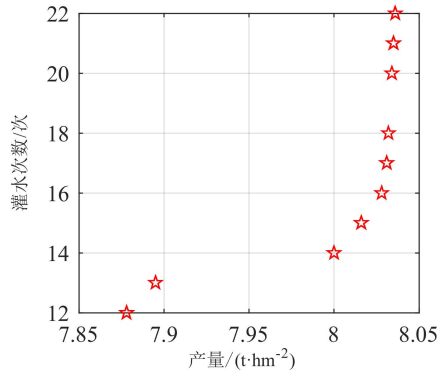
(b) 2022 年实测数据与模拟数据对比图 (模型验证)

图 3 冠层覆盖度和生物量模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and measured values of canopy coverage and biomass



(a) 产量与氮磷流失量双目标优化



(b) 产量与灌水次数双目标优化

图 4 双目标优化 Pareto 非劣解图

Fig.4 Bi-objective optimization Pareto non-inferior solution graph

2.2 基于稳产-控污-提效多目标的灌溉制度优化结果

图 5 是以产量、总氮磷流失量和灌水次数为优化

目标，经 NSGA-II 算法优化计算得到的 Pareto 非劣解散点图，解集分布在三维坐标空间内，每个点分布位

置代表了其主要优化目标。兼顾产量、氮磷流失量和灌水次数的灌溉制度解集中, 产量与氮磷流失量、灌水次数成正比, 氮磷流失量与灌水次数在此优化框架下也成正比。在产量需求超过 7.9 t/hm^2 时, 所需额外付出的氮磷流失量与灌水次数都大幅度增加。

以单位产量所需的灌溉定额最少(产量与灌溉定额的比值最大)为依据对优化出的灌溉制度结果进行筛选, 得到当前条件下最优的水稻各生育期的灌水下限及灌水量(表 3)。与常规灌溉 CK 相比, 3 种灌溉制度优化方案的灌水下限普遍提高, 灌水量显著减小。这表明模型调整了水稻各生育期生长所需的最低水层, 甚至在一定程度上的缺水胁迫不会影响水稻的产量, 或者只产生较少的产量亏损。

表 3 常规灌溉及各优化目标下水稻灌溉制度对比

Tab.3 Comparison of rice irrigation schedule under conventional irrigation and various optimization goals

生育期	常规灌溉 CK		Y-TNP-N		Y-TNP		Y-N	
	灌水下限/mm	灌水量/mm	灌水下限/mm	灌水量/mm	灌水下限/mm	灌水量/mm	灌水下限/mm	灌水量/mm
返青期	10	20	12	13	10	11	6	12
分蘖期	20	30	25	12	25	16	25	22
拔节期	20	40	27	23	29	12	26	23
抽穗期	20	30	19	11	22	14	20	14
乳熟期	20	30	26	19	25	11	23	22
黄熟期								

自然落干

试验区水稻在 4 种灌溉制度下整个生育期内的灌水量、地表径流和渗漏损失水量以及各生育期占比见图 6。由图 6 可知, 由于 AquaCrop 模型的水稻模块不能模拟水稻泡田期的灌水定额, 模型在初始条件设置中规定土壤处于饱和状态, 因此各灌溉制度在返青期的渗漏损失量较大。CK 分蘖期灌水量最大为 190 mm, 其次分别为拔节期 80 mm、乳熟期 60 mm、抽穗期 30 mm。结合降水情况, 返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期径流损失量分别为 32.7、4.7、2.5、0、1.8 mm, 渗漏损失量分别为 292.5、97、45、28.6、43.3 mm。除返青期受初始条件影响外, 地表径流量和渗漏损失量集中在分蘖期和拔节期。Y-TNP 灌溉制度下, 各生育期灌水量显著减少, 返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期灌水量分别为 11、80、

72、14、44 mm; 分蘖期、乳熟期径流损失量分别较 CK 减少了 70.21% 和 50%, 但由于分蘖期灌水量减少导致拔节期灌水提前, 使遭遇降水后径流损失量由 2.5 mm 增加到 3.5 mm。渗漏损失量在全生育期内有效降低, 各生育期渗漏损失量较 CK 分别减少了 3.04%、61.13%、100%、20.63%、61.20%。Y-N 灌溉制度在各生育期的灌水量均高于 Y-TNP 灌溉制度, 但较 CK 仍显著减少。Y-N 灌溉制度的径流损失量在分蘖期、乳熟期较 CK 减少了 72.34%、72.22%, 渗漏损失量在分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期分别减少了 61.03%、94.66%、4.89%、60.50%。Y-TNP-N 灌溉制度下各生育期灌水定额更为均衡, 其径流损失量和渗漏损失量均介于 Y-TNP 灌溉制度与 Y-N 灌溉制度之间, 较 CK 显著降低。

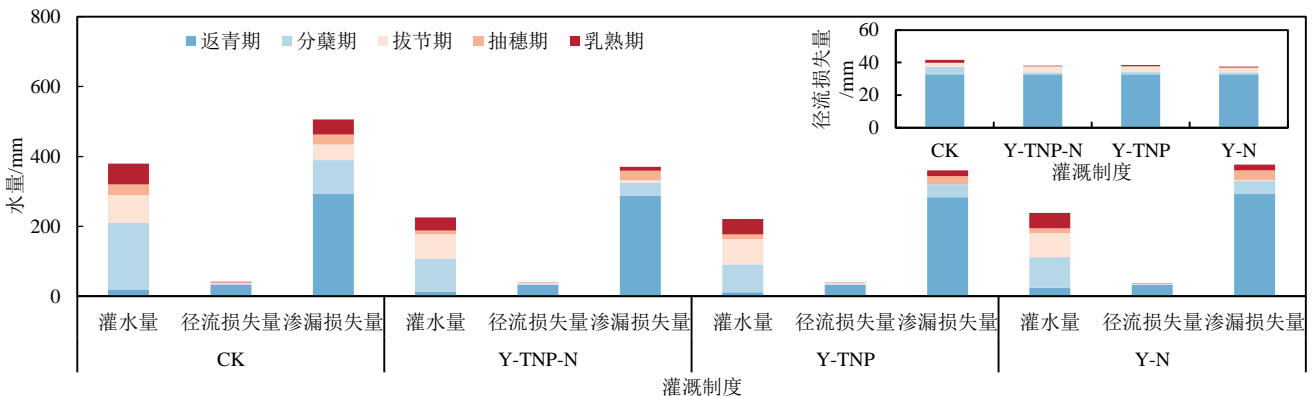


图 6 各灌溉制度下水稻各生育期灌水量、径流损失量与渗漏损失水量

Fig.6 Irrigation water volume, runoff and drainage loss of rice at different growth stages under different irrigation schedule

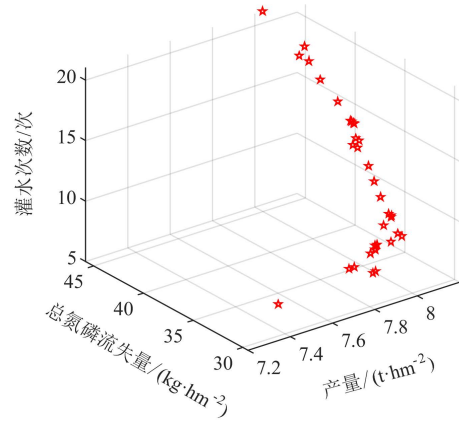


图 5 三目标优化 Pareto 非劣解图

Fig.5 Tri-objective optimization Pareto non-inferior solution graph

图 7 为 4 种灌溉制度下水稻全生育期产量、氮磷流失量、灌水次数与灌溉定额。其中, CK 水稻产量最高, 可以达到 7.99 t/hm^2 , 但需进行 13 次灌水并伴随 37.5 kg/hm^2 的氮磷流失量; Y-TNP 灌溉制度下水稻氮磷流失量最小为 28.85 kg/hm^2 , 较 CK 显著降低 23.09%; Y-TNP 灌溉制度下水稻产量为 7.78 t/hm^2 , 较 CK 降低 2.14%, 灌水次数保持不变; Y-N 灌溉制度下水稻灌溉次数最少, 其产量为 7.81 t/hm^2 , 同时

氮磷流失量减少到 31.49 kg/hm^2 ; Y-TNP-N 灌溉制度下水稻的灌水次数和氮磷流失减量得到了更好的优化, 生育期仅需灌水 11 次 (较 CK 减少 2 次), 氮磷流失量为 28.94 kg/hm^2 (较 CK 减少 22.83%), 尽管产量为 4 种灌溉制度下最少的 7.74 t/hm^2 , 但仍在 CK 产量损失 3% 以内。综上可知, 3 种优化灌溉制度较传统灌溉制度都可以保持产量损失在可以接受范围内, 并有效减少氮磷流失量。

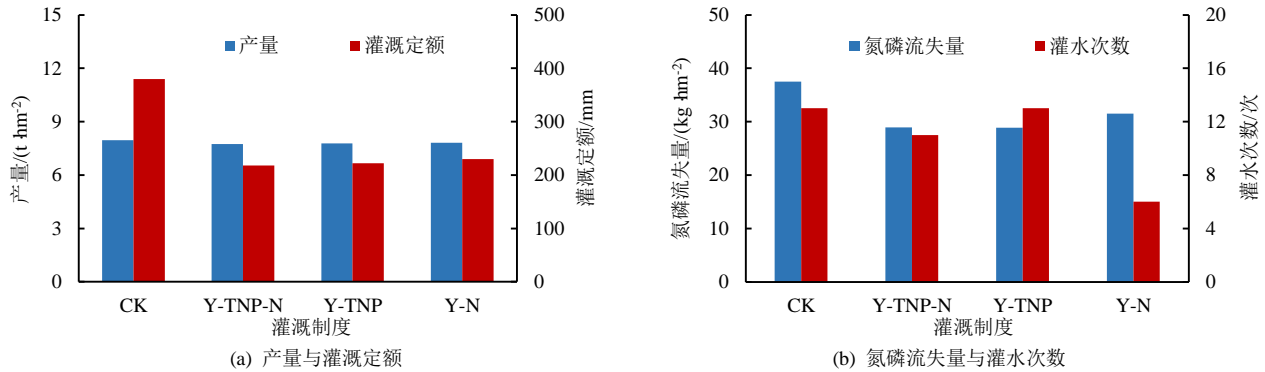


图 7 各灌溉制度下水稻产量、氮磷流失量、灌水次数与灌溉定额

Fig.7 Rice yield, nitrogen and phosphorus loss, irrigation frequency, and irrigation quota under different irrigation schedule

2.3 典型气象年份灌溉制度优化结果

充分利用水稻生育期内天然降水可以有效节约灌水量。对 1981—2020 年南京地区水稻生育期内的降水量进行排频, 得到了降水频率为 25% (丰水年)、

50% (平水年)、75% (枯水年) 与 90% (特枯年) 的典型年分别为 2014、1999、1997、2019 年。利用上述基于稳产-控污-提效多目标协同的水稻灌溉制度优化框架, 对典型年水稻灌溉制度进行优化求解 (表 4)。

表 4 典型气象年型下水稻多目标优化灌溉制度

Tab.4 Multi-objective optimization of irrigation schedule for rice in typical meteorological years

生育期	丰水年 (25%)		平水年 (50%)		枯水年 (75%)		特枯年 (90%)	
	灌水下限/mm	灌水定额/mm	灌水下限/mm	灌水定额/mm	灌水下限/mm	灌水定额/mm	灌水下限/mm	灌水定额/mm
返青期	8	12	8	13	10	15	13	15
分蘖期	26	11	29	15	20	16	25	22
拔节期	20	12	24	22	21	22	29	17
抽穗期	27	19	29	11	29	15	25	20
乳熟期	23	24	29	13	28	20	26	21
黄熟期	自然落干							

从表 5 可以看出, 丰水年、平水年、枯水年和特枯年的水稻灌溉制度存在差异, 除泡田期外, 丰水年生育期仅需灌水 139 mm, 灌水次数最少为 5 次, 但由于降水量较大, 因此带来的氮磷流失量也较大。平水年、枯水年、特枯年生育期灌溉定额分别为 252、308、392 mm, 灌水次数也相应增多, 但氮磷流失量较丰水年有明显减少。综上可知, 本文建立的水稻多目标灌溉制度优化模型可以在稳定水稻产量的前提下, 尽可能的降低农业面源污染风险并减轻农业管理负担。

表 5 典型气象年型下灌溉制度优化结果

Tab.5 Optimization results of irrigation schedule under typical meteorological years

指标	丰水年 (25%)	平水年 (50%)	枯水年 (75%)	特枯年 (90%)
灌溉定额/mm	139	252	308	392
产量/(t hm ⁻²)	7.81	7.78	7.77	7.74
灌水次数/次	5	10	16	17
氮磷流失量/(kg hm ⁻²)	24.77	18.37	12.71	14.81

3 讨论

水稻灌溉制度优化与以往干旱/半干旱区作物灌溉制度优化研究不同。干旱/半干旱区种植粮食作物以小麦、玉米为主, 降水较少, 作物产量通常对灌水量十分敏感, 二者具有显著的正相关关系; 而水稻通常种植在湿热多雨的南方地区, 以江苏中晚稻为例, 水稻生育期降水较多, 其中耗水量较大的泡田期和分蘖期与梅雨季重合, 在有效利用降水的条件下, 水稻产量与灌水量的正相关系数降低, 且氮磷流失量随灌水量增多而显著增加^[19-20]。反馈在模型-优化过程中, 水稻产量与降水量的拮抗作用较小, 仅考虑节约灌水量的优化研究 Pareto 非劣解相对集中, 优化效果不理想。

AquaCrop 模型模拟作物生长发育过程的适用性问题已有较多学者进行了研究^[21-24]。邵东国等^[13]在对有机稻的灌溉制度优化中得出模型模拟的 *NRMSE* 值

和 R^2 值分别为 0.15 和 0.98, 本研究的 $NRMSE$ 值均 $<10\%$, R^2 值均 >0.9 。水稻灌水量的增产效应也是众多学者研究的热点问题。Zhai 等^[12]对东北地区水稻的研究表明, 不同降水年型下每 100 mm 补充灌溉量的增产介于 1 440~2 032 kg/hm²; 邵东国等^[13]对有机稻的研究表明, 每 100 mm 补充灌溉量可增加产量 950~3 000 kg/hm², 且枯水年的增产潜力最大。本研究在特枯年 (90%)、枯水年 (75%) 得出的结果与上述研究相同, 增产潜力较大; 但就丰水年 (25%) 和平水年 (50%) 而言, 灌溉的增产效应并不显著, 且较少灌溉就可以使产量到达理论上的高产, 继续增加灌水量对产量影响较小。地区差异也是重要的影响因素, Zhai 等^[12]研究在东北进行, 灌水量是制约水稻产量的主要因素, 所以灌水的增产效应显著; 同时, 邵东国等^[13]的研究指出, 有机稻需水量远高于普通稻, 这也是其灌水增产效益显著的可能原因。

在以往的研究中, 使用作物模型与优化算法结合进行水稻灌溉制度优化的研究较少, 大部分研究还是通过灌溉试验的方式或者基于短期天气预报进行优化, 效率较低, 无法实现多个优化目标同时求解, 难以寻找到最优的灌溉制度。借助计算机编程实现迭代寻优能够很好的解决这个问题, 在较短时间内筛选出满足优化目标的灌溉制度。本文以 AquaCrop 模型与 NSAG-II 算法相结合, 为后续水稻灌溉制度优化提供了新思路。

4 结 论

1) AquaCrop 模型能够较好的反应研究区水稻生长发育情况, 并可以应用于研究区水稻生育期内不同灌溉条件下的水稻生长状况模拟中。

2) 2020 年在优化灌溉制度下, 生育期仅需灌水 11 次, 氮磷流失量为 28.94 kg/hm², 同时, 与常规灌溉相比, 产量亏损在 3% 以内。

3) 本文所构建的模型能够应用于南京市不同降水典型年的水稻灌溉制度优化研究中, 在稳产的前提下, 尽可能节约灌水量, 减少农业面源污染风险, 并减轻农业管理负担。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 罗玉峰, 张亚东, 韩冰, 等. 江苏省水稻灌溉需水量空间分布规律研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 27-30, 75.
- [2] 尚松浩. 作物非充分灌溉制度的模拟优化方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(9): 1 179-1 183.
- [3] 王怀博, 田军仓, 宋露露, 等. 作物优化灌溉制度理论与方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2014(6): 21-25.
- [4] PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(3): 333-342.
- [5] CHEN M T, LINKER R, WU C L, et al. Multi-objective optimization of rice irrigation modes using ACOP-Rice model and historical meteorological data[J]. Agricultural Water Management, 2022, 272: 107 823.
- [6] 何进宇. 膜下滴灌水稻水-肥-盐-产量规律及优化灌溉制度研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [7] HE Jinyu. Study on water-fertilizer-salt-yield regularity and optimal irrigation schedule of rice by drip irrigation under plastic film[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.
- [8] KHEYBARI S, SALEHPOUR R. The optimization of the paddy field irrigation scheduling using mathematical programming[J]. Water Supply, 2015, 15(5): 1 048-1 060.
- [9] 俞建河, 吴永林, 丁长荣, 等. 皖东江淮丘陵区不同水文年水稻优化灌溉制度的研究[J]. 节水灌溉, 2017(1): 94-97.
- [10] YU Jianhe, WU Yonglin, DING Changrong, et al. A study on optimal irrigation schedule of paddy in different hydrological years in the hilly areas of Eastern Anhui Province[J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 94-97.
- [11] 刘广明, 杨劲松, 姜艳, 等. 基于控制灌溉理论的水稻优化灌溉制度研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 29-33.
- [12] LIU Guangming, YANG Jinsong, JIANG Yan, et al. Optimized rice irrigation schedule based on controlling irrigation theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 29-33.
- [13] 杨娜, 付强, 李荣东, 等. 连续蚁群算法在水稻灌溉制度优化中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 134-138.
- [14] YANG Na, FU Qiang, LI Rongdong, et al. Application of ant colony algorithm based continuous space in optimizing irrigation regime of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S1): 134-138.
- [15] 雷彩秀, 熊卫红, 姜忠, 等. 基于随机降雨的水稻优化灌溉制度[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 66-72.
- [16] LEI Caixiu, XIONG Weihong, JIANG Zhong, et al. Optimizing irrigation schedule for rice based on stochastically generated precipitation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 66-72.
- [17] ZHAI Biying, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: Study of the Longtougiao irrigation district[J]. Water, 2019, 11(9): 1 799.
- [18] 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.
- [19] SHAO Dongguo, LE Zhihua, XU Baoli, 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.
- [20] 潘海福, 戴飞, 史瑞杰, 等. 基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 78-86.
- [21] PAN Haifu, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Soil moisture modeling of corn full-film double ridge ditch sowing based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 78-86.
- [22] 宋健, 李江, 杨奇鹤, 等. 基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1 284-1 295.
- [23] SONG Jian, LI Jiang, YANG Qihe, et al. Multi-objective optimization

- and its application on irrigation scheduling based on AquaCrop and NSGA-II[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1 284-1 295.
- [16] 朱成立, 徐雨琳, 黄明逸, 等. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦咸淡轮灌制度模拟与评价[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 330-342.
- ZHU Chengli, XU Yulin, HUANG Mingyi, et al. Simulation and evaluation of cycle irrigation with brackish and fresh water for winter wheat based on AquaCrop model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 330-342.
- [17] GIMÉNEZ L, PAREDES P, PEREIRA L S. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models[J]. *Water*, 2017, 9(6): 393.
- [18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [19] 李江, 缴锡云, 靳淞云, 等. 加气灌溉与秸秆还田对水稻氮磷损失的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 42-51.
- LI Jiang, JIAO Xiyun, JIN Songyun, et al. Effects of aerated irrigation and straw returning on paddy nitrogen and phosphorus losses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(23): 42-51.
- [20] 潘艳川, 李江, 缴锡云, 等. 加气对水稻泡田期田面水质的影响[J]. *节水灌溉*, 2020(7): 96-100.
- PAN Yanchuan, LI Jiang, JIAO Xiyun, et al. Effect of aeration on the surface water quality of paddy field under flooded condition[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(7): 96-100.
- [21] 李晶, 付驰, 李双双, 等. 东北春小麦区 AquaCrop 模型模拟验证及春小麦生产力初步估测[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(2): 69-72.
- LI Jing, FU Chi, LI Shuangshuang, et al. The simulation for Northeast spring wheat productivity based on the AquaCrop model and modeling verification[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(2): 69-72.
- [22] XU Junzeng, BAI Wenhuan, LI Yawei, et al. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in Eastern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 289-297.
- [23] 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): 3 286-3 299.
- SUN Shijun, ZHANG Linlin, CHEN Zhijun, et al. Advances in AquaCrop model research and application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3 286-3 299.
- [24] BANDYOPADHYAY S, BHATTACHARYA R. Solving multi-objective parallel machine scheduling problem by a modified NSGA-II[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(10/11): 6 718-6 729.

Optimization of multi-objective irrigation schedule for rice based on AquaCrop model

MA Chao¹, WU Tian'ao^{1,2,3}, ZHANG Weizhong⁴, LI Jiang¹, JIAO Xiyun^{1,2,3*}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210098, China;

4. Changshu Water Conservancy Project Quality Supervision Station, Suzhou 215500, China)

Abstract: 【Objective】In order to optimize the irrigation schedule for rice, conserve irrigation water, reduce nitrogen and phosphorus loss in paddy fields, and minimize the risk of non-point source pollution. **【Method】**A simulation and optimization model for rice irrigation system based on AquaCrop model and NSGA-II algorithm was developed. Field experimental data of rice were used to compare and study the optimization of irrigation systems with three objective combinations: maximizing yield, minimizing nitrogen and phosphorus loss, and minimizing irrigation frequency (Yield-Total Nitrogen and Phosphorus loss (Y-TNP), Yield-Irrigation frequency (Y-N), and Yield-Total Nitrogen and Phosphorus loss-Irrigation frequency (Y-TNP-N)). Yield stable-pollution reducing-efficiency improving irrigation systems that adapt to different precipitation patterns during different growth stages of rice were proposed. **【Result】**The results showed that: ① Compared with conventional irrigation, Y-TNP optimization resulted in a 2.14% decrease in yield and a 23.09% reduction in nitrogen and phosphorus loss; Y-N optimization could achieve a 1.76% decrease in yield and an approximately 53% decrease in irrigation frequency; Y-TNP-N optimization performed a 2.64% decrease in yield, a 22.83% reduction in nitrogen and phosphorus loss and a decrease of 2 in irrigation frequency. ② The yield stable-pollution reducing-efficiency improving irrigation system optimized with the Y-TNP-N objective achieved a stable yield of 7.74-7.78 t/hm² under different typical years, significantly reducing irrigation amount and nitrogen and phosphorus loss. **【Conclusion】**The AquaCrop model can be applied to simulate the growth and development process of rice in the experimental area. The simulation-optimization coupled model proposed in this study can be used to optimize irrigation systems with the goal of stable yield-reducing pollution-improving efficiency under different precipitation patterns during different growth periods.

Key words: rice; irrigation schedule; AquaCrop model; NSGA-II optimization algorithm; non-point source pollution

责任编辑: 白芳芳