

基于短期天气预报的水稻灌溉风险决策研究

缴锡云^{1,2} 黄雨荷¹ 顾哲¹ 芦梦瑶¹ 孙文渊³ 师绍正¹ 张帆³

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098;

3. 常熟市水利工程质量监督站, 常熟 215500)

摘要: 充分利用降雨是节约灌溉用水的有效途径。为保证水稻产量并提高水稻种植降雨利用率,本研究以水稻耐旱耐淹特性为基础,提出了基于短期天气预报的节水灌溉策略并开展了试验研究。设置节水灌溉策略 I:若灌溉后未来 5 d 在预报降雨情况下均不产生排水则执行灌溉,否则不灌溉,连续 3 d 决策不灌溉时第 4 天强制灌溉;节水灌溉策略 II 决策过程与策略 I 相同但灌溉量减半。采用 2023—2024 年 2 年田间试验数据,对节水灌溉策略和常规灌溉策略进行了定量对比分析,结果表明:提出的节水灌溉策略 I 和节水灌溉策略 II 在不减产情况下,相比常规策略 2 年平均可节约灌溉水 11.385% 和 22.935%,降雨利用率提高 4.71、6.045 个百分点;在灌水频次上,节水灌溉策略 I 2 年均减少灌水 2 次;节水灌溉策略 II 在 2023 年与常规策略相同,但在 2024 年增加 9 次灌水,少量多次的灌水方式显著提高了降雨利用率。因此,提出的基于短期天气预报的节水灌溉策略,通过在水稻耐旱期内适当推迟灌溉以充分利用短期降雨,具有显著的降低灌溉决策减产风险、提高降雨利用率作用,可保证水稻产量和节水减排效益,对我国南方水稻种植的智慧灌溉决策具有重要意义。

关键词: 水稻灌溉; 风险决策; 天气预报; 节水策略; 降雨利用率

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0337-10

OSID:



Risk Decision-making for Rice Irrigation Based on Short-term Weather Forecast

JIAO Xiyun^{1,2} HUANG Yuhe¹ GU Zhe¹ LU Mengyao¹ SUN Wenyuan³ SHI Shaozheng¹ ZHANG Fan³

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

2. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. Changshu Water Conservancy Engineering Quality Supervision Station, Changshu 215500, China)

Abstract: Efficient use of rainfall is an effective strategy for saving irrigation water. To ensure rice yield and enhance rainfall utilization efficiency in rice cultivation, the water-saving irrigation strategies were proposed based on short-term weather forecast, considering the drought and flood tolerance characteristics of rice. Field experiments were then conducted. In strategy I, irrigation was applied only if no drainage was forecasted within five days after irrigation. Otherwise, it was withheld. If there were three consecutive days of decision not to irrigate, then mandatory irrigation would occur on the fourth day. Strategy II followed the same rules but applied only half the irrigation amount. Using field trial data from 2023 to 2024, a quantitative comparative analysis was conducted between water-saving irrigation strategies and conventional irrigation strategies. Results showed that strategy I and strategy II reduced irrigation water use by 11.385% and 22.935% on average compared with the conventional strategy over two years, without reducing yield. Rainfall utilization was increased by 4.71 percentage points and 6.045 percentage points, respectively. In terms of irrigation frequency, strategy I reduced two irrigation events in both years, while strategy II kept the same events as the conventional strategy in 2023, but required nine additional irrigation events in 2024. Strategy II significantly improved rainfall utilization by applying small dose irrigations with more events. In conclusion, the proposed weather forecast-based strategies, which involved delaying irrigation during drought periods to maximize short-term rainfall,

收稿日期: 2025-09-08 修回日期: 2025-10-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201037)、江苏省重点研发计划项目(BE2022390)和国家自然科学基金项目(51909064)

作者简介: 缴锡云(1962—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: xyjiao@hhu.edu.cn

通信作者: 顾哲(1989—),男,副教授,博士,主要从事精准农业灌溉理论与智能装备研究,E-mail: zhegu2018@hhu.edu.cn

significantly reduced the risk of yield loss and improved rainfall utilization. These strategies ensured rice yield, saved water, and reduced emissions, offering significant benefits for smart irrigation decision-making in southern China.

Key words: rice irrigation; risk decision-making; weather forecast; water conservation strategies; rainfall utilization

0 引言

水稻是我国重要的粮食作物,全国78%以上的稻田分布在我国南方湿润区^[1]。近年来,由于全球气候变化加剧,南方间歇性干旱、强降雨等极端天气频发,增加了水稻旱涝灾害风险;伴随而来的大量农田排水还会引发面源污染等问题^[2-3]。为此,优化灌溉策略达到提高降雨利用率、减少灌溉用水量和排水量并实现农田节水减污目标,对于应对气候变化的农田管理具有重要意义。

为提高降雨利用率,降低灌溉用水量,国内外学者从水稻灌溉模式^[4-9]、适配地区降雨特征^[10-13]、考虑短期天气预报^[14-17]等角度开展了研究。郭相等^[4]提出了水稻“蓄水-控灌”概念,基于水稻对于干旱和淹水的响应特征,在保持较低灌水下限的同时提高雨后蓄水上限,以扩大稻田储水库容,充分利用天然降水,从而实现节水、减排和环保效果。邓海龙等^[5]的田间试验结果表明,降低水稻各生育期灌溉水深、适度推迟灌溉时间并提高雨后田间蓄水深度可明显减少灌溉用水量及灌排次数。除蓄雨型灌溉外,间歇灌溉、薄浅湿晒和浅灌中蓄等^[18]节水灌溉模式也被广泛研究与应用,通过减少灌水量并增加灌水频次或增加蓄存雨水的方式提高了降雨利用率。此外,付浩龙等^[10]和华克骥等^[11]基于历史气象数据,采用降雨集中度、集中期和基尼系数等指标分析水稻生育期降雨时空分布特征,并据此制定适应性灌溉策略,提升了降雨综合利用效率。然而基于历史气象数据制定的灌溉策略难以适应实时条件下的气象不确定性。近年来,随着天气预报准确度提高,将短期天气预报纳入灌溉决策是提高降雨利用率的一种有效途径^[19]。文献^[14-16]提出了考虑未来降雨合理推迟或减量灌溉的风险灌溉决策方法并进行了定量分析,结果表明该类方法可显著降低灌水量,具有显著节水潜力。

现有考虑未来降雨的实时灌溉决策大多采用延迟灌溉^[20-22]、将未来预期降雨量从灌溉水中去除^[16]或根据预报降雨等级制定一定规则的灌溉策略^[23-24],但降雨预报的不准确性往往会降低决策效果,造成计划外排水。本研究拟结合短期天气预报,探索利用水稻耐旱时间降低决策风险的实时灌溉策

略并进行田间试验验证。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于常熟市辛庄镇常熟市水利技术推广试验站(31°32′47.07″N,120°42′4.27″E),隶属北亚热带南部湿润季风气候区,气候温和,光照充足,雨量充沛,无霜期长。年平均气温为16.6℃,年平均日照时数为2 118.6 h,多年平均降雨量为1 054.0 mm。供试土壤为脱潜型水稻土,土种为乌栅土,种植模式为稻麦轮作。田间试验覆盖2个水稻全生育期,分别在2023年7月3日—11月5日和2024年7月5日—11月12日开展。

1.2 试验设计

1.2.1 试验小区设计

共设置9个试验小区,每个小区规格为9 m × 9 m,种植水稻品种为‘常香粳1813’,集中育苗,根据当地经验插秧。试验共设置3个处理(T0、T1和T2),分别对应3种灌溉策略,详见1.2.2节,各处理设置3次重复。采用随机设计确定各小区的处理类型,各小区处理分布见图1。试验过程中,除灌溉与排水处理不同外,其余施肥、病虫害防治、除草等全部根据当地实践经验进行管理。



图1 各试验小区处理分布

Fig.1 Plot distribution of each treatment

2023年和2024年水稻全生育期分别为126、131 d,灌水方式均为淹灌,2年田间水分控制标准及水稻各生育期时间划分见表1。

1.2.2 节水灌溉策略

根据罗玉峰等^[24]的研究结果,1~5 d降雨预报准确度显著高于预报期6~7 d。基于未来5 d天气预报,提出2种节水灌溉策略,分别为根据水稻耐旱

表 1 水稻淹灌田间水分阈值及生育期时间划分
Tab.1 Field water level threshold and classification of rice growth period

| 项目 | 返青期 | 分蘖前期 | 分蘖后期 | 拔节孕穗期 | 抽穗开花期 | 乳熟期 | 黄熟期 |
|--------------|------------|----------------------|----------------|----------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 起止日期(2023 年) | 7 月 3—12 日 | 7 月 13—31 日 | 8 月 1—18 日 | 8 月 19 日— 9 月 7 日 | 9 月 8— 18 日 | 9 月 19 日— 10 月 8 日 | 10 月 9 日— 11 月 5 日 |
| 起止日期(2024 年) | 7 月 5—14 日 | 7 月 15 日— 8 月 2 日 | 8 月 3— 20 日 | 8 月 21 日— 9 月 9 日 | 9 月 10— 20 日 | 9 月 21 日— 10 月 10 日 | 10 月 11 日— 11 月 12 日 |
| 灌水下限/mm | 20 | 20 | 20 | 30 | 10 | 10 | 自然落干 |
| 灌水上限/mm | 30 | 40 | 50 | 60 | 30 | 30 | 自然落干 |
| 蓄雨上限/mm | 50 | 70 | 80 | 90 | 80 | 60 | 自然落干 |

注：当田间水深降至灌水下限时，按 3 种灌溉策略执行；当田间水深高于灌水下限但低于蓄雨上限时，不灌也不排；当因降雨过大，田间水深超过蓄雨上限时，排水至蓄雨上限。

时间设置 3 d 观测期，合理推迟灌溉以提高降雨利用率的节水灌溉策略 I 和在此基础上通过减量灌溉实现保障产量的同时进一步降低排水风险的节水灌溉策略 II。试验设置 3 个处理 T0、T1 和 T2，分别为常规灌溉策略处理、节水灌溉策略 I 处理和节水灌溉策略 II 处理，每日 24:00 进行灌溉决策，各处理灌溉策略具体如下：常规灌溉策略(T0)：当田间水深降至灌水下限时，不考虑天气预报情况灌溉至灌水上限。节水灌溉策略 I (T1)：当田间水深降至灌水下限时，先假设当天灌溉至灌水上限，同时采用天气预报数据和水量平衡方法计算未来 5 d 是否会产生排水，若任意一天无排水则决策为灌溉至灌水上限；若任意一天有排水则当天决策为不灌溉，若连续 3 d 决策为不灌溉，则第 4 天强制灌溉且灌至灌水上限。上述过程每天进行动态更新。节水灌溉策略 II (T2)：在 T1 的基础上，调整灌水量为灌溉至灌水上限所需水量的 1/2。

节水灌溉策略 I 与节水灌溉策略 II 执行过程如图 2 所示， h_d 为第 d 天 24:00 田间水深，即表示第 d 天最终田间水深，mm； H_{min} 、 H_{max} 、 H_{rmax} 分别为灌水下限、灌水上限和蓄雨上限，mm； K_c 为作物系数； M_d 为第 d 天灌水量，mm。

T1 和 T2 处理中未来 5 d 田间水深计算式为

$$h_i = H_{max} + \sum_{k=1}^i p_k - \sum_{k=1}^i ET_{ck} - \sum_{k=1}^i S_k \quad (1)$$

式中 h_i ——未来第 i 天田间水深，mm
 p_k ——未来第 k 天预报降雨量，mm
 ET_{ck} ——未来第 k 天作物需水量，mm
 S_k ——未来第 k 天稻田渗漏量，mm

当 h_i 超过蓄雨上限时产生排水。

水稻逐日需水量 ET_c 采用单作物系数法计算^[24]，计算式为

$$ET_c = K_c K_s ET_0 \quad (2)$$

式中 K_s ——水分胁迫修正系数
 ET_0 ——参照作物蒸发蒸腾量，mm

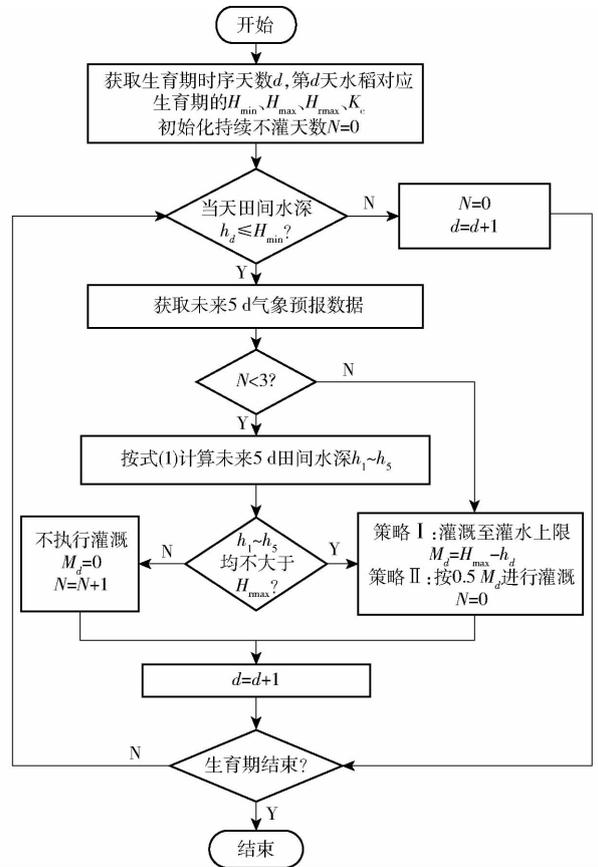


图 2 节水灌溉策略执行过程

Fig. 2 Decision-making flowchart for water-saving irrigation

作物系数 K_c 取经验值，根据作物不同生育期可分为生长初期、生长中期、生长后期，分别取 1.05、1.20、1.00^[25]。

土壤水分胁迫修正系数 K_s 计算式^[26]为

$$K_s = \begin{cases} 1 & (\theta \geq \theta_{thr}) \\ \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{thr} - \theta_{wp}} & (\theta_{wp} \leq \theta < \theta_{thr}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\theta_{thr} = \theta_{fc} - p(\theta_{fc} - \theta_{wp})$ (4)

式中 θ ——土壤体积含水率
 θ_{wp} ——凋萎土壤含水率
 θ_{thr} ——临界土壤含水率

θ_{fc} ——田间持水率

p ——根系层可用水量占总水量比值,水稻取 0.2^[15]

ET_0 由 Hargreaves 公式^[27]计算得到,计算式为

$$ET_0 = \frac{C}{\lambda} R_a (T_{\max} - T_{\min})^E \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + T_{\text{off}} \right) \quad (5)$$

式中 R_a ——大气顶太阳辐射,可根据站点地理纬度和日序数计算得到, MJ/(m²·d)

T_{\max} ——日最高气温,℃

λ ——汽压潜热,取 2.45 MJ/kg

T_{\min} ——日最低气温,℃

其中 C 、 E 、 T_{off} 取 0.002 3、0.5 和 17.8℃^[28]。

1.3 观测指标与方法

(1)气象指标:从中国气象局 (<http://weather.cma.cn>) 获取水稻全生育期逐日未来 5 d 每天逐 3 h 的降雨量、气温等基础预报数据,本研究中的日降雨量是由每日逐 3 h 预报数据累加得到,日最高(低)气温是由每日逐 3 h 气温预报数据中的极大值(极小值)确定。从试验区内布置的自动气象站(Vantage pro 2 型,DAVIS Instruments Corp,美国)自动抓取水稻全生育期逐日实测气象要素,包括最高温度、最低温度、相对湿度、风速、风向、大气压强、降雨量、日照时数。安装高度为 2 m,下垫面为矮草地,场地周边种植水稻。

(2)水情指标:每天 24:00 通过田间水位传感器定时自动抓取田间水位;用安装在灌水口处的水表计量灌水量;通过观测排水前后水位差计算排水量。

(3)降雨利用率(RUE)计算式为^[11]

$$RUE = \frac{R - D}{R} \times 100\% \quad (6)$$

式中 R ——水稻生育期降雨量,mm

D ——水稻生育期排水量,mm

(4)水稻全生育期总灌溉用水量(I_{sum})通过水量平衡法计算,计算式为

$$I_{\text{sum}} = W_{\text{sum}} + D_{\text{sum}} + \Delta H - P_{\text{sum}} \quad (7)$$

其中 $W_{\text{sum}} = ET_{\text{csum}} + S_{\text{sum}} \quad (8)$

$$\Delta H = H_{\text{end}} - H_{\text{ini}} \quad (9)$$

式中 W_{sum} ——全生育期田间总耗水量,mm

P_{sum} ——全生育期总降雨量,mm

D_{sum} ——全生育期总排水量,mm

ΔH ——全生育期始末水位变化量,mm

ET_{csum} ——全生育期作物总需水量,mm

S_{sum} ——全生育期稻田总渗漏量,mm

H_{end} ——全生育期末田间水深,mm

H_{ini} ——初始田间水深,mm

2 结果与分析

2.1 灌溉排水与降雨利用

表 2 为 2023、2024 年田间试验不同灌溉决策处理下水稻全生育期灌溉量和排水量。由表 2 可以看出,在考虑未来降雨的节水灌溉策略下,水稻全生育期灌水量、排水量均显著低于常规灌溉策略且降雨利用率得到明显提升。具体来看,2023 年水稻全生育期,节水灌溉策略 I 和节水灌溉策略 II 分别较常规灌溉策略节水 21 mm(节水率 13.49%)和 53 mm(节水率 34.84%),降雨利用率分别提高 3.12、6.19 个百分点。2024 年两者分别节水 36 mm(节水率 9.28%)和 42 mm(节水率 11.03%),降雨利用率分别提升 6.3、5.9 个百分点。节水灌溉策略 I 2 年均减少 2 次灌水;节水灌溉策略 II 在 2023 年灌水次数与常规灌溉相同,2024 年增加 9 次,但因其节水减排效果更优,在具备自动化灌排条件的灌区仍具应用优势。综上可以得出,提出的基于短期天气预报的灌溉策略具有显著节水减排潜力。

表 2 不同灌溉决策下水稻全生育期灌溉水量和排水量

Tab.2 Irrigation and drainage of rice during whole growth period under different irrigation decisions

| 年份 | 处理 | 降雨量/mm | 排水量/mm | 降雨利用率/% | 灌水量/mm | 灌水次数 | 节水量/mm | 节水率/% |
|------|----|--------|--------|---------|--------|------|--------|-------|
| 2023 | T0 | 659 | 187 | 71.64 | 153 | 6 | | |
| | T1 | 659 | 166 | 74.76 | 132 | 4 | 21 | 13.49 |
| | T2 | 659 | 146 | 77.83 | 100 | 6 | 53 | 34.84 |
| 2024 | T0 | 566 | 268 | 52.65 | 384 | 15 | | |
| | T1 | 566 | 232 | 58.95 | 348 | 13 | 36 | 9.28 |
| | T2 | 566 | 234 | 58.55 | 342 | 24 | 42 | 11.03 |

2.2 水稻全生育期田间水分变化

图 3 为 2023 年和 2024 年不同灌溉决策下水稻全生育期田间水分变化情况。由图 3 可知,2023 年水稻全生育期降雨总量高于 2024 年,且降雨时间分布及单次降雨量都相对均匀,因此整个生育期降雨利用率较高,灌溉用水量明显小于 2024 年。相比之下,2024 年水稻生育期降雨集中于梅雨期及“普拉桑”和“贝碧嘉”台风前后,且期间出现多次极端降雨事件,导致大量农田排水,降低了降雨利用率;而 7 月 14 日至 8 月 11 日近 1 个月干旱少雨,其余时段以降雨量小于 10 mm 的小雨居多,因此 2024 年水稻全生育期降雨利用率较低,且灌溉用水量、排水量、灌水次数均明显高于 2023 年。

图 3a~3c 为 2023 年不同灌溉决策下水稻田田间水分变化情况。由图 3a 可知,常规灌溉决策在田间

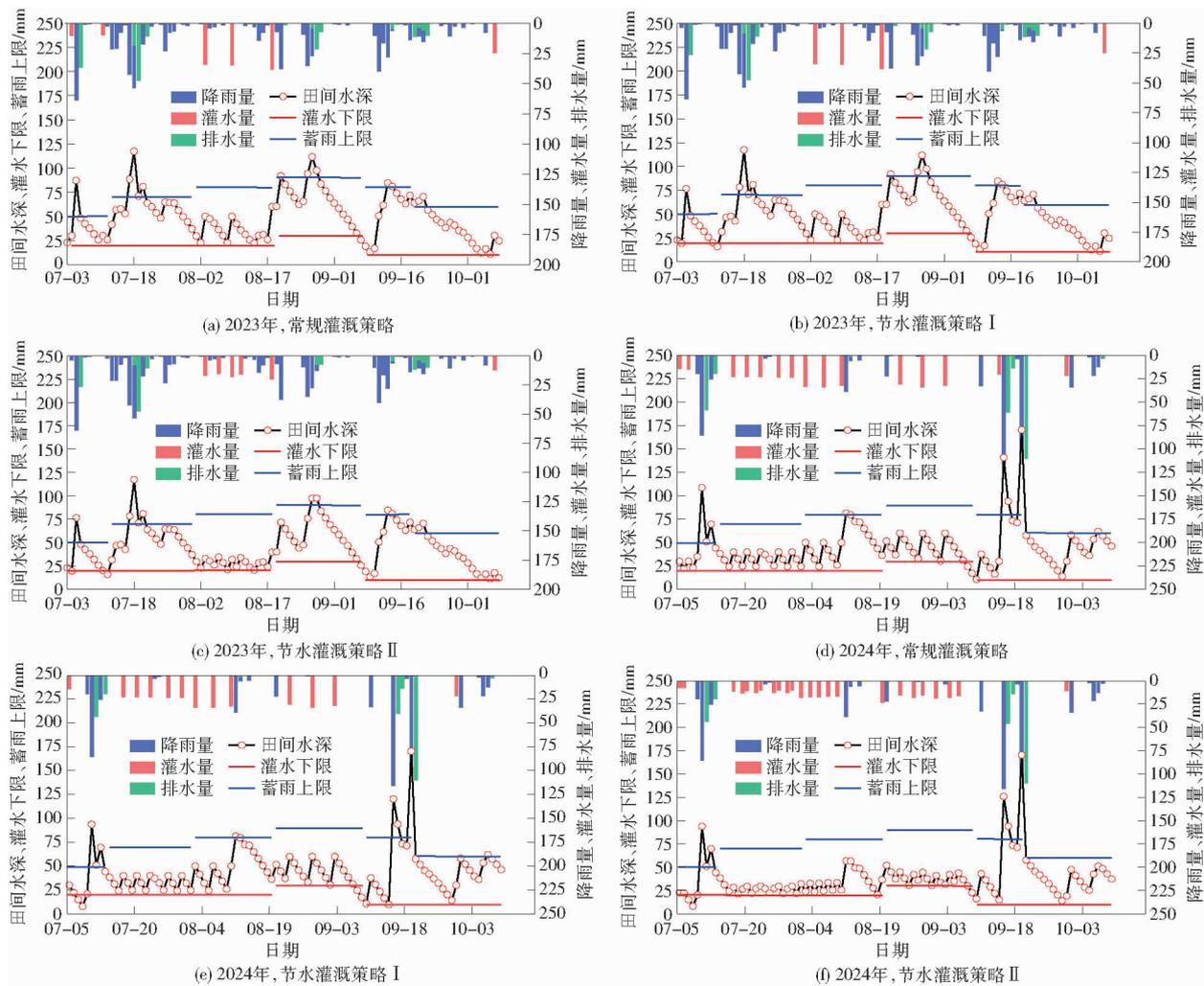


图 3 不同灌溉策略下水稻生育期间田间水分变化过程

Fig. 3 Field water change process at different irrigation and drainage strategies

水深到达灌水下限时共实施灌溉 6 次, 分别发生在 7 月 4 日、7 月 11 日、8 月 3 日、8 月 9 日、8 月 18 日及 10 月 7 日。而 7 月 5 日(灌后次日)、7 月 17 日、7 月 18 日及 8 月 20 日均出现大雨及以上等级降雨, 导致 3 次灌后短期内排水, 造成水资源浪费, 降低了降雨利用率。相比之下, 基于短期天气预报的节水灌溉策略可有效降低灌后排水风险, 并通过设置强制灌溉机制保证降雨预报实际不发生时也能满足作物需水。如图 3b、3c 所示, 在 7 月 4 日田间水深到达灌水下限时, 节水灌溉策略 I 与策略 II 均决策不灌, 次日即出现 63.8 mm 暴雨, 显著提升了降雨利用率, 降低了排水量。同样在 7 月 11 日田间水深低于灌水下限时, 策略 I、II 决策为不灌, 7 月 12 日未迎来降雨, 田间水深持续偏低, 决策仍为不灌, 7 月 13 日发生降雨, 有效补充了田间水分, 相比常规策略增加利用降雨量 10 mm, 减少灌水量 10 mm。此外, 针对天气预报可能存在的少报或漏报(即预报无雨或小雨而实际为较大降雨), 节水策略 II 更具优势。策略 II 在策略 I 基础上将单次灌水量减

半, 进一步降低因预报偏差导致的排水风险。例如, 在 8 月 18 日田间水深低于灌水下限时, 策略 I、II 均触发灌溉, 但策略 II 的减量灌溉有效避免了 8 月 21 日和 27 日排水, 并减少了 28 日排水量, 节水减排效果更为显著。然而, 由于单次灌水量降低, 策略 II 灌溉频次并未减少, 共灌溉 6 次, 与常规灌溉策略相同; 而策略 I 则将灌溉次数降至 4 次, 较常规模式减少 2 次。

图 3d ~ 3f 为 2024 年不同灌溉决策下水稻田田间水分变化情况。2024 年稻季降雨较少, 主要集中在 7 月中旬及 9 月中旬, 于 7 月 11 日、9 月 16 日及 9 月 20 日出现 3 次极端降雨, 造成大量排水, 降低了整体降雨利用率。在分蘖期及拔节孕穗期干旱少雨, 主要依赖灌溉满足作物水分需求, 增加了总体灌溉次数, 常规灌溉策略共实施灌水 15 次, 节水灌溉策略 I 和策略 II 分别灌水 13 次和 24 次。在 7 月 8 日, 田间水深低于灌水下限, 常规灌溉决策直接灌溉至灌水上限, 而节水灌溉策略考虑未来 5 d 的天气预测, 策略 I 及策略 II 决策结果为不灌溉, 7 月 9 日

田间水深持续偏低,2种策略决策结果仍为不灌,而在7月10日、7月11日迎来连续2d降雨,及时补充了田间水分,减少了一次灌水以及降雨后的排水量,提高了降雨利用率。同样在9月15日田间水深低于灌水下限时,节水灌溉策略I及策略II决策结果均为不灌,次日迎来115.9mm降雨,节约灌溉用水约20mm。由于单次灌水量减半,节水灌溉策略II灌水次数相较于常规灌溉策略增加9次,但由于其节水效果显著,仍具有应用优势。

总体来看,提出的节水灌溉策略在节水、减排及提高降雨利用率方面效果显著,且能有效应对天气预报不确定性带来的决策风险,保证作物产量。通过设置强制灌溉机制以应对天气预报连续空报可能导致的受旱风险,保障作物水分安全。同时,针对天气预报少报或漏报情形,节水灌溉策略II通过减量灌溉,提高田间调蓄能力,从而在预报无雨或小雨但实际出现较大降雨时,降低排水风险。由于单次灌水量减少,节水灌溉策略II灌水频次可能会有所增加,但因其节水减排效果更优,在具备自动化灌排条件的灌区仍具应用优势。

2.3 灌溉决策风险

为应对天气预报不准确导致的作物受旱风险,设置了强制灌溉机制以保障产量。若连续3d预报未来5d内有强降雨,可连续3d推迟灌溉;但考虑到作物耐旱能力有限,第4天将强制进行灌溉以确保水分供应。然而,这种做法仍可能面临强制灌溉后遇雨需排水的风险。以表3、4的2种情况为例,分别模拟了在天气预报准确(情景1)和不准确(情景2)2种情况下因强制灌溉后遇雨而需排水的情景。假设在第 d 天田间水深达到灌水下限(20mm),在第 d 天至第 $d+5$ 天每天24:00获取未来5d的预报降雨量及当天实际降雨量,见表3。以水稻返青期为例,灌水下限、灌水上限及蓄雨上限分别为20、30、50mm,日耗水量取田间日均消耗量7.5mm,包含作物蒸发蒸腾量及深层渗漏量。

表3 模拟情景1实际和预报降雨量

| 日期 | 预报降雨量 | | | | | 实际降雨量 |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------|
| | day1 | day2 | day3 | day4 | day5 | |
| 第 d 天 | 0 | 0 | 11.5 | 85.5 | 5.8 | |
| 第 $d+1$ 天 | 0 | 11.5 | 85.5 | 5.8 | 25.4 | 0 |
| 第 $d+2$ 天 | 11.5 | 85.5 | 5.8 | 0 | 0 | 0 |
| 第 $d+3$ 天 | 85.5 | 5.8 | 0 | 0 | 0 | 11.5 |
| 第 $d+4$ 天 | 5.8 | 25.4 | 0 | 0 | 0 | 85.5 |
| 第 $d+5$ 天 | 25.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.8 |

表4 模拟情景2实际和预报降雨量

| 日期 | 预报降雨量 | | | | | 实际降雨量 |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------|
| | day1 | day2 | day3 | day4 | day5 | |
| 第 d 天 | 0 | 45.5 | 38.5 | 11.2 | 0 | |
| 第 $d+1$ 天 | 45.5 | 38.5 | 11.2 | 0 | 0 | 0 |
| 第 $d+2$ 天 | 38.5 | 11.2 | 0 | 0 | 0 | 10.0 |
| 第 $d+3$ 天 | 11.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 第 $d+4$ 天 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44.5 |
| 第 $d+5$ 天 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

在情景1中,第 d 天田间水深达到灌水下限(20mm),但预报显示未来第4天有85.5mm降雨。假设灌至灌水上限(30mm),则未来第4天会产生排水,因此决策为不灌溉。而随后在第 $d+1$ 天,田间水深持续降低,但预报未来第3天仍有85.5mm降雨,继续维持不灌溉。第 $d+2$ 天,田间水深进一步降低,预报未来第2天仍有85.5mm降雨,决策仍为不灌溉。第 $d+3$ 天,尽管预报未来第1天有85.5mm降雨,但考虑到作物耐旱能力,强制灌溉至灌水上限(30mm)。而第 $d+4$ 天实际降雨量为85.5mm,与预报一致,导致灌后排水。这种情况下,虽然预报准确,但由于强制灌溉的存在,仍面临灌后需排水的风险。图4a~4c为情景1中不同灌溉策略下的田间水分变化过程,由图4a~4c可看出,节水灌溉策略I和节水灌溉策略II虽在强制灌溉后遇强降雨而引发排水,但相较于常规策略均可减少一次灌水,且节水灌溉策略I可节水4mm,节水灌溉策略II由于减量灌溉可节水14.5mm。

在情景2中,第 d 天田间水深达到灌水下限(20mm),但预报显示未来第2天和第3天分别有45.5mm和38.5mm降雨,若灌至灌水上限(30mm),则未来5d内会产生排水,因此决策为不灌溉;第 $d+1$ 天,田间水深持续降低,但预报未来第1天和第2天仍有较大降雨,继续维持不灌溉;第 $d+2$ 天实际只发生较小降雨,田间水深仍低于灌水下限,但预报未来第1天仍有38.5mm降雨,决策仍为不灌溉;第 $d+3$ 天考虑到作物耐旱能力有限,强制灌溉至灌水上限(30mm)。而在第 $d+4$ 天实际降雨44.5mm,远超预报值,导致灌后产生排水。图4d~4f为情景2不同灌溉策略下的田间水分变化过程,结果显示,相较于常规灌溉策略,节水灌溉策略I和策略II均可减少1次灌水;其中,节水灌溉策略I与常规灌溉策略的灌水量相同,而节水灌溉策略II可实现节水量11.25mm。

综上所述,强制灌溉机制虽能保障水稻产量,但未考虑未来天气状况的灌水仍存在灌后排水风

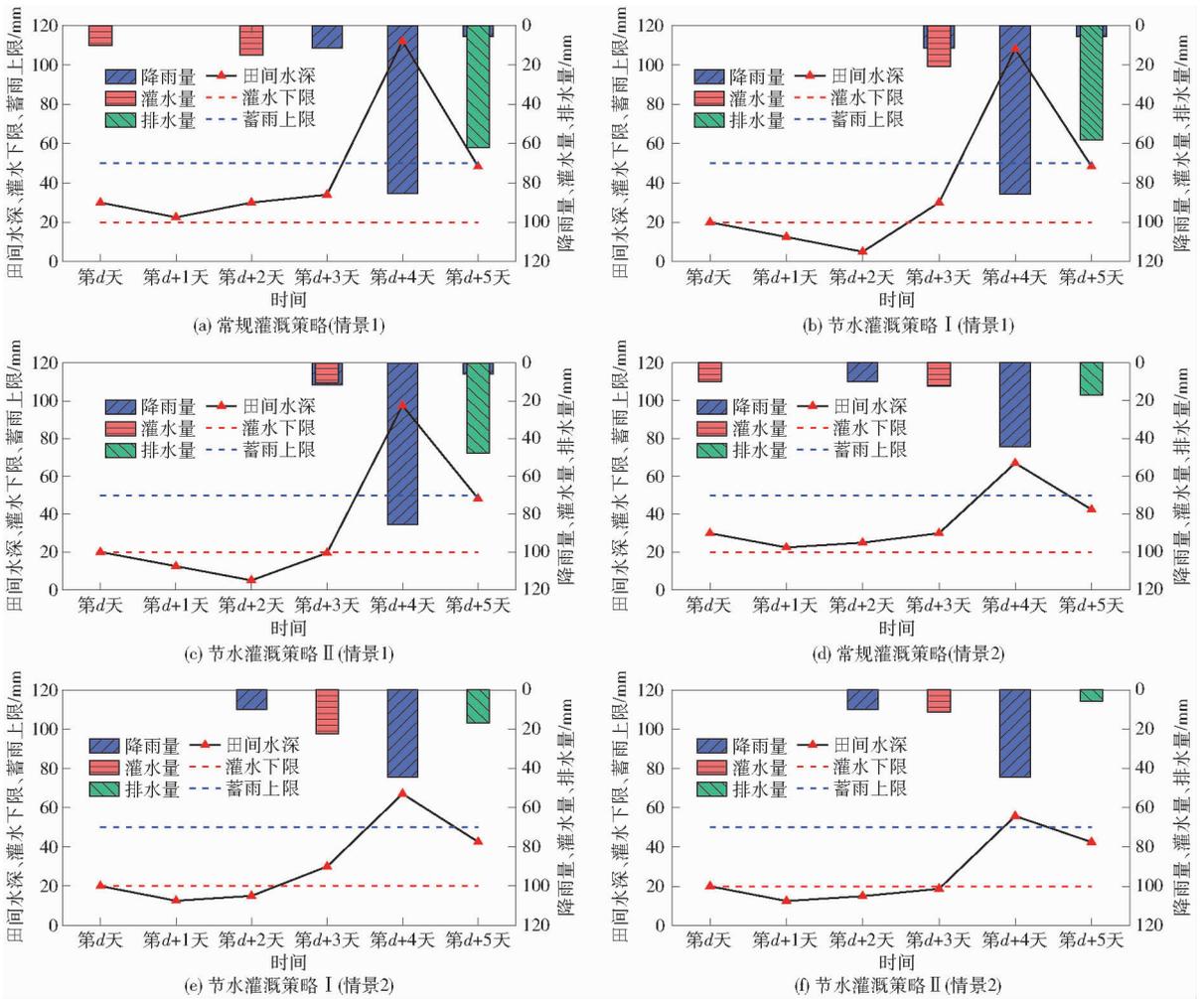


图 4 2 种情景中不同灌溉策略下的田间水分变化过程

Fig. 4 Field water change process under different irrigation and drainage strategies in two scenarios

险。通过模拟 2 种因强制灌溉后遇雨而引发排水的情景发现,节水灌溉策略 I 和节水灌溉策略 II 均能减少 1 次灌水。此外,节水灌溉策略 II 通过优化灌溉量显著提升了节水效果。即使在强制灌溉后遇强降雨,这些策略仍表现出良好的节水效果和应用优势,相较于常规策略更高效,具有较高推广价值。

2.4 稻田节水机制

为进一步揭示节水灌溉策略 I 与策略 II 在减少灌溉用水条件下维持产量的内在机制,基于水量平衡原理对农田水量供给和消耗各组成部分的变化进行系统剖析,2023 年和 2024 年不同灌溉决策下,水稻全生育期农田水量供给和消耗情况如表 5 所示。

式(7)表明,在降雨量保持一定的情况下,水稻全生育期灌溉用水量主要受田间耗水量、排水量及全生育期始末田间水层深度差的共同影响。由表 5 可知,2023 年与 2024 年试验结果一致显示,相较于常规灌溉处理(T0),节水灌溉处理 T1(策略 I)和 T2(策略 II)灌溉用水量与排水量均呈逐级递减趋

表 5 不同灌溉决策下水稻全生育期农田水量供给和消耗

Tab.5 Water supply and consumption in paddy fields under different irrigation decisions throughout entire

| | | growth period | | | | mm |
|------|----|---------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 年份 | 处理 | I_{sum} | P_{sum} | W_{sum} | D_{sum} | ΔH |
| 2023 | T0 | 153 | 659 | 623 | 187 | 2 |
| | T1 | 132 | 659 | 623 | 166 | 2 |
| | T2 | 100 | 659 | 623 | 146 | -10 |
| 2024 | T0 | 384 | 566 | 658 | 268 | 24 |
| | T1 | 348 | 566 | 658 | 232 | 24 |
| | T2 | 342 | 566 | 658 | 234 | 16 |

势,而各处理间田间耗水量并无差异。各处理下稳定的田间耗水量表明,水稻在全生育期的水分供给充足,保证了产量。节水灌溉处理下降低的灌水量等于减少的排水量和生育阶段末期降低的田间水位之和,表明在提出的节水灌溉策略下,通过延迟灌溉提高降雨利用率,减少了农田排水,同时,通过减少单次灌水量可增加降雨利用空间,进一步减少排水和生育末期水位,达到节水目的,这与 GU 等^[29]的研究结论一致。

T0 与 T1 处理全生育期始末田间水层深度差 ΔH 基本一致而与 T2 处理有所偏差,其原因在于:T1 处理在每次触发灌溉时,均将田面水层补灌至与 T0 相同的灌水上限,因此,与 T0 在同一天进行灌溉或排水操作后均能消除二者的田间水位差异;相比之下,T2 处理实行单次灌水量减半措施,虽与 T0 在同一天进行排水操作后可消除二者的水层偏差,但后续灌水行为又引入新的差异。T0、T1 与 T2 处理在 2023 年及 2024 年生育期结束的最后一次灌水均发生在同一天,因此在田间初始水深相同的情况下,T0 与 T1 处理下的生育期末田间水深一致而与 T2 处理有所差异。

3 讨论

提出的基于短期天气预报的节水灌溉策略,在保障水稻产量的前提下显著提升了水资源利用效率。节水灌溉策略 I 和策略 II 在 2023—2024 年 2 年试验期间年平均节水 11.385% 和 22.935%,年平均降雨利用率分别提高 4.71、6.045 个百分点。由此表明,将天气预报纳入灌溉决策具有显著的节水及提高降雨利用率效果,与曹静静等^[14](考虑未来降雨情景下,早稻和晚稻灌溉分别节水 38.3% 和 6.7%)、聂倩文等^[15](基于短期天气预报的风险灌溉可节水 7.8%~16.7%)、李攀等^[16](高/低风险决策模式下的田间节水率分别为 16.1% 和 26.9%) 的研究结论一致。然而,上述研究中的灌溉决策策略均伴随一定程度的减产风险,而本研究通过设置 3 d 观测期合理推迟灌溉,实现了节水与稳产的协同优化。

此外,灌溉策略 II 在相同决策逻辑下将灌溉量减半,通过“少量多次”方式进一步优化了水管理,尽管该策略在 2 年试验期间灌水次数均多于策略 I,但由于有效利用了有效降雨、减少了排水损失,最终平均节水率为 22.935%。这表明通过减少

单次灌水量,可提高灌溉时机的精准性,最大限度地避免灌溉水与降雨叠加导致的排水损失,从而显著提升了降雨利用率。这一结果与陈梦婷等^[30]提出的高频低量灌溉可增强降水利用效率的观点相吻合,尤其适用于降水分布不均的作物生长季。

值得强调的是,尽管强制灌溉机制的设置可有效缓解因天气预报不确定性可能导致的水分胁迫风险,但仍存在灌后遭遇强降雨而引发排水的可能。但在为期 2 年的试验期间,此类不利情景并未实际发生。进一步的情景模拟分析也表明,即便存在强制灌溉后遇雨的不利情景,本研究提出的 2 种节水灌溉策略在减少灌水次数或降低灌水量方面仍优于常规灌溉,展现出更强的适应性与应用优势。

本试验为期 2 年,尚不足以全面评估气候变化背景下 2 种策略的长期稳定性。未来可延长试验周期,或结合气候模型进行情景模拟。此外,本研究未量化排水中氮磷等污染物的排放情况,后续可整合水质监测,评估 2 种策略在面源污染防治方面的综合效益。

4 结论

(1)与常规灌溉策略相比,提出的节水灌溉策略 I 和节水灌溉策略 II 不仅能够实现显著的节水减排及提高降雨利用率目标,且能有效应对天气预报不确定性带来的决策风险,保证作物产量。

(2)2 年试验结果表明,在不减产前提下,节水灌溉策略 I 和节水灌溉策略 II 相较于常规灌溉策略,年平均节水 11.385% 和 22.935%,年平均降雨利用率提高 4.71、6.045 个百分点。

(3)在灌水频次上,2 年试验期间节水灌溉策略 I 均减少灌水 2 次;节水灌溉策略 II 在 2023 年与常规策略相同,但在 2024 年增加 9 次灌水,少量多次的灌水方式显著提高了降雨利用率,在具备自动化灌溉条件区域,该策略仍展现出良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 肖梦华,俞双恩,章云龙. 控制排水条件下淹水稻田面及地下水氮浓度变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 180-186. XIAO Menghua, YU Shuang'en, ZHANG Yunlong. Changes of nitrogen concentration for surface and groundwater in flooding paddy field under controlled drainage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 180-186. (in Chinese)
- [3] SHAO G, CUI J, YU S, et al. Impacts of controlled irrigation and drainage on the yield and physiological attributes of rice[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 156-165.
- [4] 郭相平,袁静,郭枫,等. 水稻蓄水-控灌技术初探[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 70-73. GUO Xiangping, YUAN Jing, GUO Feng, et al. Preliminary study on water-catching and controlled irrigation technology of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 70-73. (in Chinese)
- [5] 邓海龙,谢亨旺,刘方平,等. 江西省水稻蓄雨间歇灌溉模式初探[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 116-123. DENG Hailong, XIE Hengwang, LIU Fangping, et al. Preliminary research on rain storage and intermittent irrigation mode of Jiangxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 116-123. (in Chinese)
- [6] 李茉,徐敏,王璐晨,等. 基于数据融合的高时空分辨率作物蒸散发反演与高效精细化灌溉决策[J]. 农业机械学报,

- 2025, 56(8): 62–73.
- LI Mo, XU Min, WANG Luchen, et al. Data fusion-based high spatiotemporal resolution retrieval of crop evapotranspiration and efficient refined irrigation decision-making for irrigation areas [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(8): 62–73. (in Chinese)
- [7] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 128–136. YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(7): 128–136. (in Chinese)
- [8] 余双, 崔远来, 王力, 等. 水稻间歇灌溉对土壤肥力的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(1): 46–53. YU Shuang, CUI Yuanlai, WANG Li, et al. Effects of intermittent irrigation on rice paddy soil fertility[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(1): 46–53. (in Chinese)
- [9] 刘路广, 谭君位, 吴瑕, 等. 鄂北地区水稻适宜节水模式与节水潜力[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 169–177. LIU Luguang, TAN Junwei, WU Xia, et al. Reasonable irrigation mode and water-saving potential for rice in Northern Hubei Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(4): 169–177. (in Chinese)
- [10] 付浩龙, 刘凤丽, 李亚龙, 等. 降水集中度分析及其在水稻灌溉决策中的应用——以湖北省漳河灌区为例[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(4): 35–40. FU Haolong, LIU Fengli, LI Yalong, et al. Rice irrigation decision-making based on precipitation concentration: a case study of Zhanghe Irrigation District in Hubei Province[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(4): 35–40. (in Chinese)
- [11] 华克骥, 黄剑平. 江西省鄱阳湖平原水稻生育期降雨对灌溉需水及降雨利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2025(5): 95–103. HUA Keji, HUANG Jianping. Effects of rainfall during the rice growing season on irrigation water demand and rainfall utilization in the Poyang Lake Plain of Jiangxi Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2025(5): 95–103. (in Chinese)
- [12] 李娜, 罗强, 董苇, 等. 四湖流域水稻耗水与降雨匹配度及水稻旱涝易损特征分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 79–91. LI Na, LUO Qiang, DONG Wei, et al. Matching degree of precipitation and rice water consumption and analysis of drought and waterlogging vulnerable characteristics of rice in Sihuan Basin, Hubei of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(24): 79–91. (in Chinese)
- [13] LUO W, CHEN M, KANG Y, et al. Analysis of crop water requirements and irrigation demands for rice: implications for increasing effective rainfall[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107285.
- [14] 曹静静, 罗玉峰, 崔远来, 等. 考虑未来降水的南方水稻灌溉风险决策节水效果分析[J]. *节水灌溉*, 2016(8): 144–148. CAO Jingjing, LUO Yufeng, CUI Yuanlai, et al. Assessment of water-savings through risk-based irrigation decision-making for rice in South China with consideration of future rainfall[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(8): 144–148. (in Chinese)
- [15] 聂倩文, 罗玉峰, 刘方平, 等. 考虑未来降雨的风险灌溉决策评价[J]. *排灌机械工程学学报*, 2017, 35(3): 256–262. NIE Qianwen, LUO Yufeng, LIU Fangping, et al. Assessment of risk-based irrigation decision-making with consideration of future rainfall[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(3): 256–262. (in Chinese)
- [16] 李攀, 吴天傲, 孙文渊, 等. 基于天气预报的风险灌溉对水稻生长的影响与知识图谱实现[J]. *节水灌溉*, 2025(4): 8–15. LI Pan, WU Tianao, SUN Wenyuan, et al. Effect of risk irrigation on rice growth based on weather forecast and realization of knowledge map[J]. *Water Saving Irrigation*, 2025(4): 8–15. (in Chinese)
- [17] CHEN M, CUI Y, WANG X, et al. A reinforcement learning approach to irrigation decision-making for rice using weather forecasts[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106838.
- [18] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 等. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. *节水灌溉*, 2021(8): 19–24. MA Shihao, YANG Cheng, WANG Guibing, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 19–24. (in Chinese)
- [19] CAO J, TAN J, CUI Y, et al. Irrigation scheduling of paddy rice using short-term weather forecast data[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 714–723.
- [20] 张星星, 朱成立, 彭世彰, 等. 降水预报准确度分析及其在提高降水利用率中的作用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 230–233. ZHANG Xingxing, ZHU Chengli, PENG Shizhang, et al. Accuracy analysis of rainfall forecast and its application to improvement of utilization rate of rainfall[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2014, 42(3): 230–233. (in Chinese)
- [21] 程瑞苹, 林恩, 徐阳, 等. 内蒙古水稻生育期降雨预报准确度评价及节水灌溉策略分析[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(3): 44–51. CHENG Ruiping, LIN En, XU Yang, et al. Assessing rainfall forecast accuracy and optimizing water-saving irrigation strategies for rice production in Inner Mongolia[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(3): 44–51. (in Chinese)
- [22] 李秀梅, 赵伟霞, 李久生, 等. 降水预报准确率对变量灌溉水分管理的影响[J]. *排灌机械工程学学报*, 2018, 36(10): 985–989. LI Xiumei, ZHAO Weixia, LI Jiusheng, et al. Effect of rainfall forecast accuracy on water management under variable rate irrigation system[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(10): 985–989. (in Chinese)
- [23] CABELGUENNE M, DEBAEKE P, PUECH J, et al. Real time irrigation management using the EPIC – PHASE model and weather forecasts[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 32(3): 227–238.
- [24] 罗玉峰, 马震, 吕辛未, 等. 南方水稻生育期降雨预报准确度评价及节水灌溉策略分析[J]. *排灌机械工程学学报*, 2016,

34(5): 430–435, 442.

LUO Yufeng, MA Zhen, LÜ Xinwei, et al. Accuracy assessment of rainfall forecast and analysis on water-saving irrigation strategies during rice growing seasons in South China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(5): 430–435,442. (in Chinese)

- [25] ALLEN R G. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998.
- [26] LUO Y, KHAN S, CUI Y, et al. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2009, 7: 1–9.
- [27] HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53–63.
- [28] 陶国通, 王景雷, 南纪琴, 等. 基于温度的作物需水量估算方法[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2019–2025.
TAO Guotong, WANG Jinglei, NAN Jiqin, et al. Calculation method for crop water requirement based on air temperature[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2019–2025. (in Chinese)
- [29] GU Z, QI Z, MA L, et al. Development of an irrigation scheduling software based on model predicted crop water stress[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 208–221.
- [30] 陈梦婷, 杨琳, 吴光星, 等. 考虑降雨有效利用的水稻灌溉模式的优化[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 832–837.
CHEN Mengting, YANG Lin, WU Guangxing, et al. Optimization of paddy rice irrigation schedule considering effective utilization of rainfall[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(8): 832–837. (in Chinese)

(上接第 336 页)

- [11] 王立洪, 张斌, 万英. 新疆南疆农业灌溉对生态与环境的影响[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 30–33.
WANG Lihong, ZHANG Bin, WAN Ying. Effect of agricultural irrigation on the ecological environment in Southern Xinjiang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 30–33. (in Chinese)
- [12] 杨柳. 陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
YANG Liu. Ecological environment problems analysis and regulation study in the development of Jinghui canal irrigation district in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
LIU Tao. The control techniques of water-nutrient-salt and plant root in a saline-alkali wasteland of Ningxia Irrigation Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [14] 程良, 张红玲, 张娜, 等. 宁夏引黄灌区水资源开发利用存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2023(12): 122–126.
CHENG Liang, ZHANG Hongling, ZHANG Na, et al. Problems and countermeasures of water resources development and utilization in Ningxia's Yellow River irrigation area[J]. Agricultural Science-technology and Information, 2023(12): 122–126. (in Chinese)
- [15] 靳晓辉, 樊玉苗, 段浩, 等. 银川平原地下水位对黄河流域水量统一调度的时空响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 45–51.
JIN Xiaohui, FAN Yumiao, DUAN Hao, et al. Temporal and spatial response of groundwater depth in Yinchuan Plain to the integrated water regulation of the Yellow River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(4): 45–51. (in Chinese)
- [16] 陈探, 赵爽, 张大鹏. 1990—2021年新疆典型湖泊水量变化遥感估算[J]. 应用生态学报, 2024, 35(11): 3141–3148.
CHEN Tan, ZHAO Shuang, ZHANG Dapeng. Remote sensing estimation of water volume changes of typical lakes in Xinjiang from 1990—2021[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(11): 3141–3148. (in Chinese)
- [17] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏回族自治区水资源综合调查评价[R]. 2019.
- [18] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏水资源公报[R]. 2017—2023.
- [19] 宁夏回族自治区遥感调查院. 宁夏银北-卫宁地区盐渍地土地调查项目成果报告[R]. 2022.
- [20] 杨贵羽, 彭致功, 王浩, 等. 灌区水土资源均衡配置与健康评价[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [21] LI Shuoyang, YANG Guiyu, WANG Hao, et al. A spatial-temporal optimal allocation method of irrigation water resources considering groundwater level[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 1080.
- [22] 宁夏回族自治区. 农业灌溉用水定额[Z]. 2023.
- [23] 谢新民, 赵文骏, 裴源生, 等. 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [24] 阮本清, 韩宇平, 蒋任飞, 等. 生态脆弱地区适宜节水强度研究[J]. 水利学报, 2009, 39(7): 809–814.
RUAN Benqing, HAN Yuping, JIANG Renfei, et al. Appropriate water saving extent for ecological vulnerable area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 39(7): 809–814. (in Chinese)
- [25] 孙宪春, 金晓媚, 万力, 等. 地下水对银川平原植被生长的影响[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 321–324.
SUN Xianchun, JIN Xiaomei, WAN Li, et al. Effect of groundwater on vegetation growth in Yinchuan plain[J]. Geoscience, 2008, 22(2): 321–324. (in Chinese)
- [26] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016–2020.
- [27] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏水利统计公报[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 2020.