

灌排调控下稻田水分侧渗过程规律分析

和玉璞¹ 万家玮¹ 王荣勇² 齐伟¹ 纪仁婧¹ 麦紫君¹

(1. 南京水利科学研究院农村水利研究所, 南京 210017; 2. 齐河县水利局, 齐河 251199)

摘要: 水分侧渗过程是稻田水循环的重要环节。为揭示灌排协同调控对稻田水分侧渗的影响,开展了连续两年的田间试验,通过设置不同的田间灌溉模式(控制灌溉、浅湿灌溉)和沟道排水方式(控制排水、自由排水)组合处理,研究灌排调控对稻田-田埂-沟道区域水分侧渗过程的影响。结果表明:控制灌溉田埂土壤含水率波动较浅湿灌溉更剧烈,控制排水田埂土壤含水率波动较自由排水变小。灌排调控对稻田-田埂-沟道区域水分侧渗有显著影响,控制灌溉处理较浅湿灌溉处理、控制排水处理较自由排水处理均减小了田埂水分侧渗强度峰值和均值,且显著降低了稻田水分侧渗总量,两年试验期稻田侧渗水总量降低63.49%。稻田灌溉处理和沟道排水处理均对稻田水分侧渗产生显著影响,且灌溉处理的影响效应更强。相较于浅湿灌溉处理,控制灌溉处理田埂侧渗水总量占稻田输入水总量比例增加,在实施控制灌溉时,需加强对稻田水分侧渗管理,以确保灌溉效果最大化。灌排调控稻田水分侧渗过程主要发生在田埂深度10~20 cm内,在该深度存在水分侧渗通道,在该深度实施合理的防渗方案可有效减少田间水分损失。研究揭示了灌排调控下稻田-田埂-沟道区域水分侧渗过程及其对土壤水分变化的响应过程,可为农业水资源高效利用和精细化管理提供参考。

关键词: 稻田; 灌排调控; 水分侧渗; 干湿交替

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)02-0463-11

OSID:



Analysis of Lateral Seepage in Paddy Field with Controlled Irrigation and Drainage Regulation

HE Yupu¹ WAN Jiawei¹ WANG Rongyong² QI Wei¹ JI Renjing¹ MAI Zijun¹

(1. Department of Rural Water Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

2. Department of Water Resources Bureau of Qihe County, Qihe 251199, China)

Abstract: The process of lateral seepage constitutes a crucial component of the water cycle in paddy fields. Previous studies have focused on the effects of control regulation field water layer management on lateral seepage in paddy fields. However, less attention has been paid to the lateral seepage of paddy field water under controlled irrigation, and there is a paucity of research findings regarding seepage in paddy fields under coupled controlled drainage. In order to optimize the water management of paddy field, a two-year in-situ field test was conducted, and diverse irrigation and drainage treatments were implemented. The characteristics of lateral seepage in paddy fields subjected to controlled irrigation and drainage regulation were systematically analyzed, and the response mechanism of lateral seepage to such control regulation was revealed. The findings were as follows: compared with free drainage, controlled drainage inhibited the change of soil moisture content in the field bund. Compared with flooding irrigation, the fluctuation of soil moisture content in the field bund under controlled irrigation field bund was more intense. Controlled irrigation and drainage regulation had a direct impact on the characteristics of lateral seepage in the field-bund-canal transition zone, and significantly reduced the total amount of lateral seepage. Controlled irrigation and drainage, as opposed to flooding irrigation and free drainage, respectively reduced the peak and mean values of lateral seepage intensity, and significantly reduced the

收稿日期: 2024-04-25 修回日期: 2024-07-02

基金项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022048)、江苏省水利科技项目(2021052)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y923003)、水利部数字孪生流域重点实验室开放研究基金项目(Z0202042022)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20230126)和贵州省科技项目(黔科合支撑[2022]一般167)

作者简介: 和玉璞(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事农田高效灌溉排水技术与环境效应研究, E-mail: heyupu28@163.com

total amount of lateral seepage in the paddy field, during the two-year experiment period, the controlled irrigation and drainage treatment of the rice fields resulted in a reduction of 63.49% compared with the free irrigation approach. Both paddy field irrigation and drainage treatments exerted a considerable influence on lateral seepage intensity, with irrigation treatments demonstrating a stronger effect. Paddy field irrigation treatment and drainage treatment had a significant effect on the lateral seepage intensity, and the effect of irrigation treatment was stronger. Compared with flooding irrigation, controlled irrigation significantly increased the proportion of water seeping from the paddy field – ridge – channel area. To maximize irrigation effects, it was imperative to strengthen management of water lateral seepage within the fields during controlled irrigation implementation. Lateral seepage in paddy fields subjected to irrigation and drainage regulation primarily occurred in the field bund soil at a depth of 10 ~ 20 cm. Water percolation channels were presented at depths of 10 ~ 20 cm below the ground surface. By implementing effective waterproofing measures at this depth, it can significantly reduce the loss of field moisture. The research revealed the lateral seepage process and its responsiveness to soil moisture changes in the paddy field – bund – canal transition zone under irrigation and drainage regulation. The insights gained aim to serve as a reference for the efficient utilization and meticulous management of agricultural water resources.

Key words: paddy field; irrigation and drainage regulation; lateral seepage; alternate wetting and drying

0 引言

农业是我国用水大户,2022 年农业用水量为 $3.7813 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占全国用水总量的 63.0%^[1]。水稻是我国主要粮食作物,2022 年播种面积 $2.945 \times 10^7 \text{ hm}^2$,总产量 $2.085 \times 10^8 \text{ t}$ ^[2],稻田灌溉用水占农业用水总量的 65% 以上^[3],具有较大的节水潜力。稻田生态系统水分损失除作物蒸发蒸腾外,绝大部分以渗漏形式流失^[4]。文献[5–7]研究发现,稻田发生侧向渗漏时,呈现稻田水分从田埂内部向周边农田或沟道侧向流动的现象,一般根据水分流动方向将其分为田埂下渗漏与水平渗漏^[8–9]。通过田间原位试验^[8–11]、水量平衡估算^[9,12–14]和模型模拟^[15–17]等方法验证了侧向渗漏是稻田的重要水分散失途径,李胜龙等^[11]通过试验发现稻田水分可以通过田埂区域垂直入渗和跨田埂侧流快速流失。XU 等^[17]利用 Hydrus-2D 模型模拟浅地下水埋深条件下稻田水分侧渗的变化过程,结果表明淹水灌溉稻田水分侧渗量占总渗漏量的 77.6% ~ 88.4%。此外,虽然侧渗在总耗水量中的占比不高,但对稻田污染物排放有着重要影响^[18],耕作层中的养分通过侧渗进入排水沟^[19],在蒸发浓缩作用下,田间水分蒸发后残留的污染物浓度增加,使得在暴雨初期,径流中携带的污染负荷显著增大^[20]。这种现象不仅加剧了稻田排水对周围水体的污染风险,也对水质管理和农田排水系统设计提出了更高要求。

文献[8,21]研究表明控制田间水层可以有效调节稻田水分侧渗强度。虽然已有学者初步研究了田间水层控制对稻田水分侧渗的影响,但在节水灌溉稻

田干湿交替下,稻田土壤出现一定时间的无水层状态^[22],稻田水分侧渗过程将随之改变,其对于干湿循环的响应机制尚不明确。在稻田生态系统中,存在大量土质田埂分割稻田与排水沟道^[23]。马强等^[24]发现田埂存在侧渗通道,农田土壤水分通过侧向迁移形式从田埂进入排水沟。祝惠等^[25]发现稻田和排水沟的水位差会促进稻田水分侧渗过程。明沟控制排水可以有效调节稻田和沟道内的水位差,进而影响田埂的土壤水分变化及侧渗过程,但已有研究较少关注控制排水下稻田水分侧渗,耦合节水灌溉与控制排水处理对稻田水分侧渗的影响效果及作用机制尚未见报道。因此,本研究设置不同灌溉处理和排水处理组合,通过开展 2 年田间原位试验,探讨灌排调控下稻田–田埂–沟道区域水分侧渗过程及其对土壤水分变化的响应过程,研究灌排调控对稻田–田埂–沟道区域水分侧渗过程和总量的影响,以及土壤水分变化和区域水分侧渗变化的响应关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室滁州综合水文试验基地(32°17'N,118°12'E)开展。试验基地属亚热带季风气候区,雨热同季,降雨集中,年平均气温 14.9℃,多年平均降雨量 1 060 mm,年蒸发量 924 mm,日照时数 2 217 h,多年平均无霜期 217 d,当地习惯稻麦轮作。试验基地土壤性质为潜育型黄泥土,耕层土壤容重为 1.64 g/cm^3 ,饱和土壤含水率为 $0.47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,土壤有机质质量比为 16.8 g/kg ,其中全氮质量比 0.5 g/kg ,全磷质量比 0.37 g/kg ,

全钾质量比 16.56 g/kg,pH 值为 6.75。

1.2 试验设计

在稻田及沟道分别采用不同灌溉排水调控技术,共设置 4 个处理:浅湿灌溉^[26] + 明沟自由排水 (Flooding irrigation + free drainage, FI + FD)、浅湿灌溉 + 明沟控制排水 (Flooding irrigation + controlled drainage, FI + CD)、控制灌溉^[27] + 明沟自由排水 (Controlled irrigation + free drainage, CI + FD) 和控制灌溉 + 明沟控制排水 (Controlled irrigation + controlled drainage, CI + CD)。明沟控制排水处理在沟道保持与稻田田面高程一致的水位,根据选取区域稻田排水沟实际情况,设置沟道水深 40 cm;明沟自由排水处理在沟道保持一定的生态水位,设置沟道水深 10 cm。

试验在 2020 年与 2021 年稻季开展,分别为 2020 年 8 月 15 日—9 月 20 日和 2021 年 7 月 19 日—9 月 17 日,2020、2021 年试验期内均施肥 3 次。各处理稻田施肥处理均采用农户习惯施肥,各处理水稻品种保持一致。2020 年,插秧当日施用基肥 (复合肥),7 月 2 日施用尿素,8 月 14 日施用尿素,施肥量 (折合纯氮) 为 39.375、103.5、103.5 kg/hm²,合计 246.375 kg/hm²。2021 年,插秧当日施用基肥 (复合肥),7 月 19 日施用尿素,8 月 6 日施用尿素,施肥量 (折合纯氮) 分别为 39.375、103.5、103.5 kg/hm²,合计 246.375 kg/hm²。

1.3 试验布置

试验选取典型稻田-田埂-沟道区域分别布设三面铁框 (图 1),在田间管理、田埂尺寸、土壤质地和沟道规格等条件相近的情况下开展田间原位试验。经现场勘探,选取典型稻田-田埂-沟道区域进行处理,每个处理布置 3 个重复试验,田埂平均宽度

70 cm,距田面平均高度 10 cm。

首先清理稻田-田埂-沟道过渡区地表作物残茬和杂草,长期耕作稻田的耕作厚度一般为 15 ~ 20 cm^[28],随后会出现犁底层,其具有较强的阻断水分运移能力。试验田块深度 30 cm 往下土壤容重大幅提高,表明该深度处存在一定厚度的犁底层,因此在稻田侧将 150 cm × 100 cm × 40 cm 的三面铁框垂直打入土壤 30 cm,且夯实铁框两侧田表土壤,与犁底层共同组成相对封闭的边界,可有效隔绝小区与周边大田的水分交换,减少对试验结果的影响。在横向上,铁框 60 cm 在稻田侧,40 cm 在田埂内。根据各排水处理下沟道控制水深的不同,在控制排水沟道侧将 150 cm × 40 cm × 60 cm 的三面铁框垂直打入沟道土壤 10 cm,在自由排水沟道侧将 150 cm × 40 cm × 30 cm 的三面铁框垂直打入沟道土壤 10 cm,在横向上,均为铁框 10 cm 在田埂内,30 cm 在沟道内。在沟道侧铁框外布设一条土埂,将原有排水沟改道并与铁框隔离,便于后续试验观测操作。

各排水处理下,在沟道侧铁框布设溢流口和马氏瓶,通过自动溢流与定水头补水的组合控制,保持沟道水深设定值。控制排水沟道和自由排水沟道铁框外侧的溢流口分别距离沟底 40 cm 和 10 cm,连接导管至翻斗计,用于自动测量并记录沟道侧铁框的溢流量。在沟道侧铁框外侧布设马氏瓶对沟道进行补水,根据对应沟道的控制水深调节马氏瓶,使沟道水深保持在设定值,补水量通过布设在马氏瓶内的水位计自动记录。在沟道铁框内分别布设有底、无底的测筒,通过对比分析测筒内水位得到沟道内水面蒸发量及垂向渗漏量。结合降雨量监测,通过沟道水量平衡分析获得稻田与沟道的侧向水分交换量,即为稻田侧渗水量。沟道水量平衡计算公式为

$$h_2 = h_1 + P + L_s + h_m - S_d - E - h_o \tag{1}$$

式中 h_1 ——观测时段初沟道侧铁框内水深,cm
 h_2 ——观测时段末沟道侧铁框内水深,cm
 L_s ——观测时段内稻田水分侧渗量,mm
 S_d ——观测时段内沟道垂向渗漏量,mm
 E ——观测时段内沟道水面蒸发量,mm
 h_o ——观测时段内沟道超出控制水深的溢流量,mm
 P ——观测时段内天然降雨量,mm
 h_m ——观测时段内马氏瓶向沟道侧铁框的补水量,mm

田埂水分侧渗强度为单位长度田埂日侧渗水量,单位为 mm/(m·d)。

根据本试验排水处理,在沟道设置固定水深,故

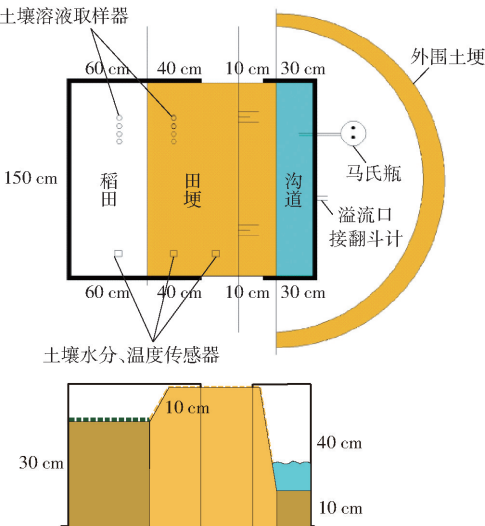


图1 稻田-田埂-沟道区域试验布置示意图
Fig.1 Test layout diagram of paddy field - ridge - gutter area

h_1 、 h_2 在观测时段内保持一致。进一步推导可得

$$L_s = S_d + E + h_o - P - h_m \tag{2}$$

1.4 数据收集

在控制灌溉稻田深度 10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm 各布置 1 个 TDR 波导棒,稻田出现无水层状态时,利用 Trease 系统 (Soil Moisture) 于每天 08:00 观测不同土层土壤含水率,观测深度根据各个生育阶段的土壤含水率来确定。浅湿灌溉稻田每天 08:00 通过竖尺在固定观测点观测并记录水层读数。依据观测的各小区稻田水层深度或土壤含水率,对照灌溉处理要求,按照灌水上下限进行灌溉。在田埂及邻近的控制灌溉稻田不同深度 (5、15、25、45 cm) 埋设土壤含水率探头 (TEROS12 型),连接 ZL6 型六通道数据采集器连续监测田埂及控制灌溉稻田不同深度土壤含水率,实现稻田、田埂不同深度土壤含水率的长期原位监测。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 整理和计算数据,图表采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2021 绘制,应用 SPSS Statistics 25 对数据进行 t 检验,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 灌排调控稻田-田埂-沟道区域含水率变化特征

不同灌排调控处理下,田埂各深度土壤含水率变化过程较为一致,均呈现浅层土壤含水率波动剧烈,深层土壤含水率较为稳定的状态(图 2)。由于田埂浅层土壤受耕作活动影响,与较深层土壤理化性质(有机质含量、土壤容重等)存在差异,导致田埂土壤水分运动特征不同^[29]。文献[8,16,30]研究表明,田埂表层土壤含水率受灌水、降雨影响不断波动,一定程度上会抑制田间水分通过田埂下渗,本试验土壤含水率动态监测结果显示田埂深层土壤(40 ~ 50 cm)含水率总体保持稳定,与已有研究相符合。

不同排水处理对田埂各深度土壤水分动态变化

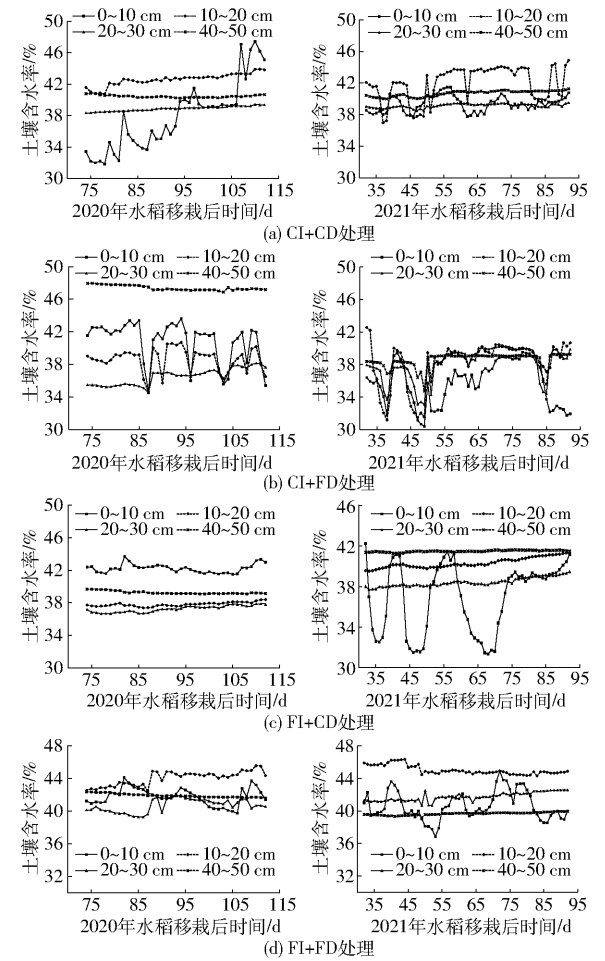


图2 各处理田埂土壤含水率动态变化曲线

Fig.2 Dynamic changes of soil moisture content in different treatments

过程的影响存在显著差异(表 1)。相同灌溉处理下,控制排水田埂 10 ~ 50 cm 土壤含水率变幅小于自由排水,0 ~ 10 cm 反之。CI + CD 处理田埂 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 和 40 ~ 50 cm 深度土壤含水率平均变幅分别为 9.66%、5.54%、1.05% 和 0.95%,CI + FD 处理分别为 9.41%、12.00%、4.04% 和 2.52%;FI + CD 处理分别为 6.54%、1.44%、1.49% 和 0.49%,FI + FD 处理分别为 6.24%、2.58%、2.31% 和 0.76%。

表 1 各处理试验期田埂不同深度土壤平均含水率

Tab.1 Average moisture content of soil at different depths of ridge during each treatment test period									%
处理	2020 年				2021 年				
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	40 ~ 50 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	40 ~ 50 cm	
CI + CD	37.88	42.61	38.90	40.47	39.37	41.96	39.13	41.27	
CI + FD	33.87	35.77	33.64	37.77	35.78	38.22	38.17	38.55	
FI + CD	42.22	37.82	37.26	39.27	36.89	40.34	38.44	41.63	
FI + FD	41.79	44.04	40.70	41.92	40.63	45.03	41.76	39.66	

2.2 稻田-田埂-沟道区域水分侧渗特征

2.2.1 稻田-田埂-沟道区域水分侧渗变化过程

灌排调控显著影响了稻田-田埂-沟道区域的水

分侧渗过程,CI + CD 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值较 FI + FD 明显降低(图 3)。2020 年和 2021 年试验期内,由于稻田干湿循环过程影响,CI + CD

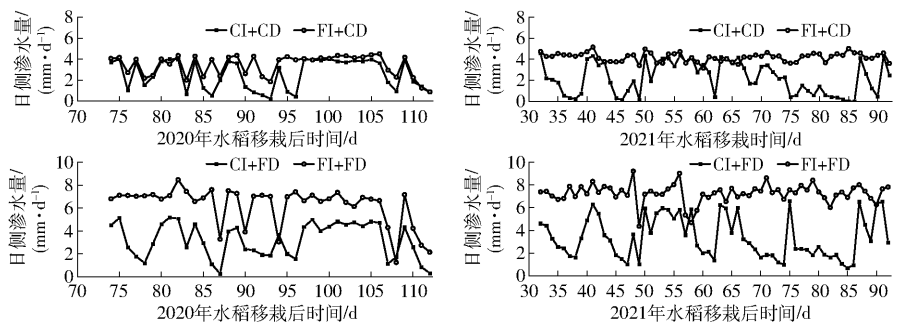


图3 各处理田埂侧渗量动态变化曲线
Fig. 3 Dynamics of lateral seepage in ridge of each treatment

处理稻田水分侧渗强度波动明显,水分侧渗强度均值分别为 2.58、2.22 mm/(m·d),分别较 FI + FD 处理均值 6.23、7.26 mm/(m·d) 降低 58.59% 和 69.42%。

控制排水较自由排水能够降低稻田水分侧渗强度峰值和均值(图 3)。2020—2021 年试验期间,CI + CD 处理比 CI + FD 处理的田埂水分侧渗强度峰值和均值分别降低 30.44% 和 28.49%;FI + CD 处理比 FI + FD 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值分别降低 44.21% 和 43.15%。可见,在相同灌溉处理条件下,采用控制排水可以显著降低稻田水分侧渗强度峰值和均值。在 CI + CD 处理中,田埂各深度土壤含水率均高于 CI + FD 处理,这导致 CI + CD 处理中田埂土壤水势较高,从而抑制稻田水分通过田埂向排水沟迁移。在 FI + CD 处理中,田埂内各深度土壤含水率相对 CI + CD 处理较高,这是因为浅湿灌溉稻田覆盖水层,稻田含水率较高,稻田水分持续性通过田埂向排水沟迁移,而自由排水沟道水面高程低于田间水位,水势差增大^[31],稻田内水分进入田埂后沿田埂 0~30 cm 垂直下渗作用明显,重力势较强^[32],对田埂侧渗过程有促进作用,因此 FI + FD 处理侧渗水量更大,这导致 FI + FD 处理中田埂内各深度土壤含水率偏高,祝惠等^[25]在三江平原进行的田埂侧渗研究同样认为稻田与排水沟的水位差会促进侧渗过程。

控制灌溉较浅湿灌溉能够降低稻田水分侧渗强度峰值和均值(图 3)。2020—2021 年试验期间,CD + CI 处理比 CD + FI 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值分别降低 11.43% 和 39.49%;FD + CI 处理比 FD + FI 处理侧渗强度峰值和均值分别降低 43.97% 和 51.90%。可见,在相同的排水处理条件下,控制灌溉稻田水分侧渗强度均低于浅湿灌溉。

2.2.2 稻田-田埂-沟道区域水分侧渗总量

对 4 种处理的稻田水分侧渗强度均值进行多因素方差分析,可知灌溉处理和排水处理对稻田-田埂-沟道区域水分侧渗强度均值的影响均显著($p <$

0.05),且灌溉处理的影响大于排水处理(表 2)。灌排调控显著减少了稻田-田埂-沟道区域的侧渗水量(表 3)。2020 年试验期内,CI + CD 处理稻田侧渗水量比 FI + FD 处理降低 58.57%;2021 年试验期内,CI + CD 处理稻田侧渗水量比 FI + FD 处理降低 68.40%;两年平均降幅为 63.49%。

表 2 灌排调控稻田-田埂-沟道区域侧渗量均值主效应分析
Tab.2 Main effect analysis of mean lateral seepage intensity in paddy field - ridge - channel area

源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>	偏 Eta 平方
灌溉处理	1	18.253	159.348	$1.456\ 17 \times 10^{-6}$	0.952
排水处理	1	11.175	97.553	$9.309\ 91 \times 10^{-6}$	0.924

表 3 各处理稻田-田埂-沟道区域侧渗水量
Tab.3 Lateral seepage in paddy field - ridge - channel area of each treatment

处理	2020 年	2021 年
CI + CD	150.99 ^d	203.39 ^d
CI + FD	187.68 ^c	307.72 ^c
FI + CD	201.19 ^b	384.26 ^b
FI + FD	364.44 ^a	643.73 ^a

注:同列数字后不同小写字母表示各处理间差异显著($p <$ 0.05)。

控制排水处理的稻田侧渗水量小于自由排水处理。2020—2021 年试验期内,CI + CD 处理稻田侧渗水量比 CI + FD 处理降低 26.73%;FI + CD 处理稻田侧渗水量比 FI + FD 处理降低 42.55%。控制灌溉处理稻田侧渗水量小于浅湿灌溉处理。2020—2021 年试验期内,CD + CI 处理稻田侧渗水量比 CD + FI 处理降低 36.01%;FD + CI 处理稻田侧渗水量比 FD + FI 处理降低 50.35%。

2020 年和 2021 年侧渗水量差异是由于试验时长和降雨不同造成的,2021 年试验期时长变长,各处理间稻田侧渗水量差异较 2020 年有所增加;2020 年试验期降雨次数较多,各处理间水分输入量差异小于 2021 年。2020 年和 2021 年试验期内,CI + CD 处理、CI + FD 处理、FI + CD 处理和 FI + FD

处理稻田侧渗水量总量占稻田水分输入总量(包括灌水和降雨)比例分别为 32.27%、41.21%、23.32%和 28.91%。CI+CD 处理和 CI+FD 处理稻田侧渗水量均小于 FI+CD 处理和 FI+FD 处理,同时,CI+CD 处理和 CI+FD 处理稻田侧渗水量总量占稻田水分输入总量比例均大于 FI+CD 处理和 FI+FD 处理。

2.3 灌排调控稻田水分侧渗对田埂土壤水分的响应过程

选取田埂深度 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土壤体积含水率,绘制得水分侧渗强度与田埂土壤含水率日变化图(图 4)。试验期内控制灌溉处理下的稻田-田埂-沟道区域侧渗水量日变化与田埂 0~20 cm 土壤水分变化有较好的同步性。

2.3.1 完整干湿循环过程中田埂水分侧渗强度与深度 0~20 cm 土壤含水率关系

田埂水分侧渗强度和深度 10~20 cm 土壤含水率有极显著正相关关系($p < 0.01$),但和深度 0~10 cm 土壤含水率没有显著关系。由于 2021 年干湿循环过程更加明显,田埂深度 10~20 cm 土壤含水率波动和稻田侧渗水量的变化趋势更加明显,故采用 2021 年干湿循环过程中田埂水分侧渗强度和深度 0~20 cm 土壤含水率数据进行回归分析(图 5)。本试验发现控制灌溉处理田埂水分主要通过田埂 10~20 cm 土壤进入沟道,灌水或较大降雨当日,水分侧渗强度出现峰值,随即田埂 10~

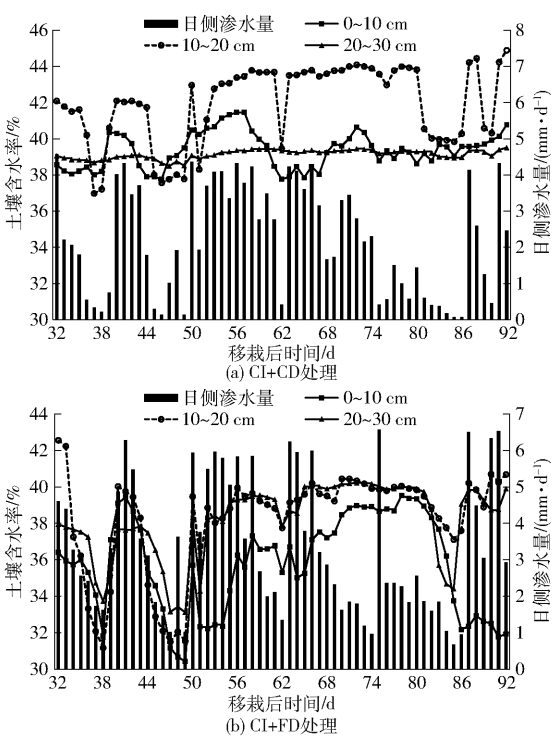


图 4 2021 年控制灌溉处理侧渗水量和田埂含水率日变化

Fig. 4 Lateral seepage and ridge moisture content daily changes of CI treatment in 2021

20 cm 土壤含水率上升,无水分输入后水分侧渗强度下降,田埂 10~20 cm 土壤含水率伴随其回落。

选取典型时段 2021 年 7 月 30 日—8 月 2 日(移栽 43~46 d)进行分析(表 4)。7 月 30 日为降

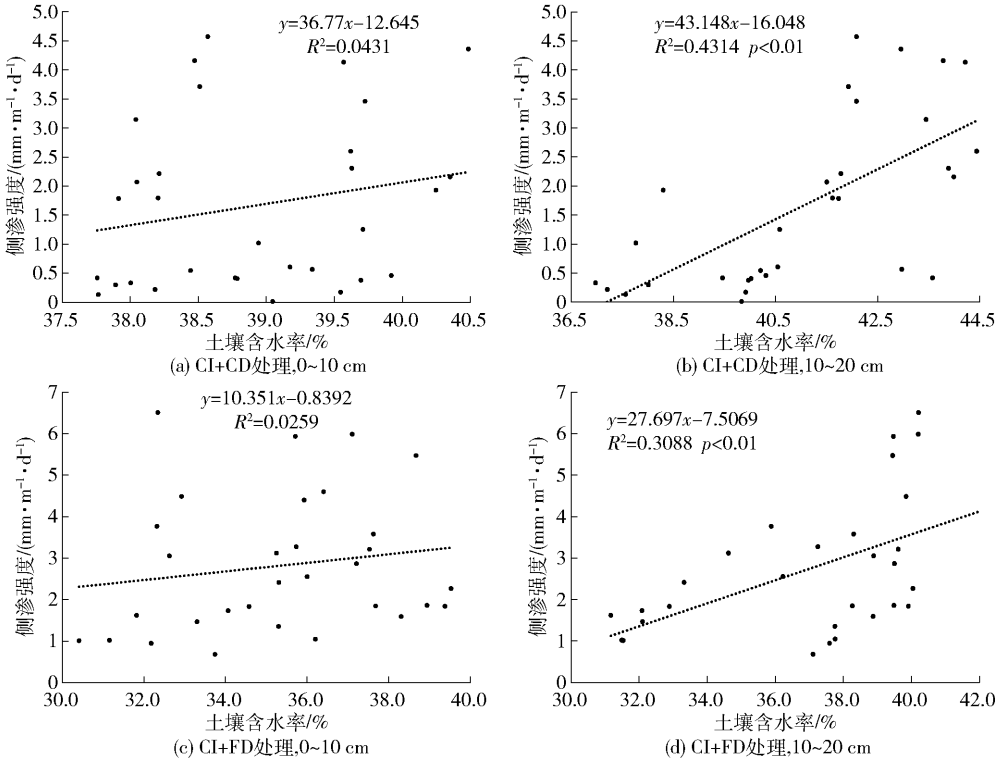


图 5 各处理干湿循环过程中田埂水分侧渗强度与深度 0~20 cm 土壤含水率关系

Fig. 5 Relationships between lateral seepage intensity of ridge and soil moisture content of 0~20 cm depth of each treatment

雨次日,此前已连续降雨4 d,田面存在积水。7月30日CI+CD处理侧渗水量为3.71 mm/d,CI+FD处理侧渗水量为3.58 mm/d,随后日侧渗水量由于无水分输入开始下降,至8月2日,CI+CD处理稻田侧渗水量降至0.13 mm/d,CI+FD处理稻田侧渗水量降至1.47 mm/d。田埂土壤水分在经

历降雨后迅速增加,同时表土蒸发强度迅速增强^[33-34],随即在重力作用下开始向深层运移^[35],其形成的入渗通量面随之不断下移^[36],土壤水势分布从聚合型变为单一入渗型^[37],降雨停止一段时间后,由于无水分输入,田埂表层土壤含水率不断下降。

表4 无水分输入典型时段控制灌溉处理侧渗水量和田埂土壤含水率日变化

Tab.4 Lateral seepage and ridge moisture content daily change during typical periods of no moisture input of CI treatment

日期	移栽后时间/d	CI+CD处理				CI+FD处理			
		土壤含水率/%			侧渗水量/ (mm·d ⁻¹)	土壤含水率/%			侧渗水量/ (mm·d ⁻¹)
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	
7月30日	43	38.51	41.93	39.10	3.71	37.62	38.30	37.82	3.58
7月31日	44	37.91	41.74	38.95	1.79	35.25	34.62	37.47	3.12
8月1日	45	37.89	38.01	38.89	0.30	34.58	32.89	36.53	1.83
8月2日	46	37.77	37.56	38.64	0.13	33.30	32.10	35.35	1.47

2.3.2 微弱降雨影响下田埂水分侧渗强度与深度0~20 cm土壤含水率关系

田埂表层土壤水分对降雨较为敏感^[38],微弱降雨时,田埂0~20 cm土壤含水率小幅上升,稻田水分侧渗强度一般在灌水当日达到峰值,随后逐日下降,此时微弱降雨量不足以使田

埂水分侧渗强度出现明显上升,因此呈现侧渗水量下降的情形。此外,微弱降雨当日田埂水分侧渗强度较低,不会出现峰值,或仍处于下降趋势中。2021年试验期内微弱降雨当日田埂水分侧渗强度与田埂0~20 cm土壤含水率如图6所示。

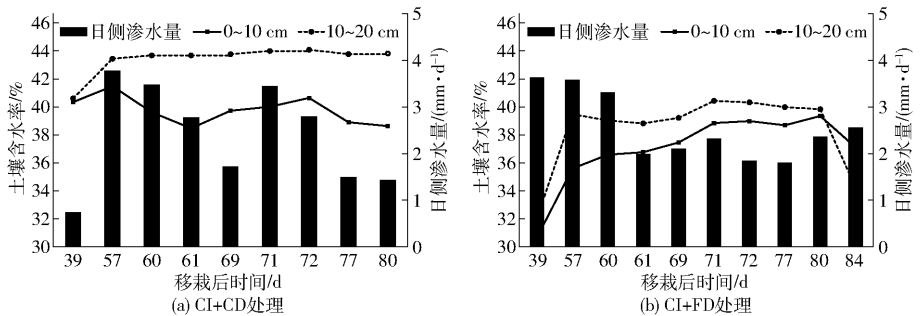


图6 微弱降雨时田埂水分侧渗强度与深度0~20 cm土壤含水率

Fig.6 Lateral seepage intensity of ridge and soil moisture content of 0~20 cm during weak rainfall

选取典型时段2020年8月29日—9月1日(移栽90~93 d)进行分析(表5)。8月29日为灌水次日,时段内CI+CD处理和CI+FD处理均未再发生灌水,侧渗水量迅速下降,CI+CD处理从1.35 mm/d降至0.23 mm/d,CI+FD处理从2.42 mm/d降至1.85 mm/d。但由于8月30日和9

月1日降雨量分别为2.42、0.59 mm,且田埂浅层土壤对降雨较为敏感,所以出现了田埂侧渗水量逐日降低但田埂0~20 cm土壤含水率有所上升的现象,其中CI+CD处理和CI+FD处理在8月30日和9月1日田埂0~20 cm土壤含水率均出现了小幅度上升。

表5 微弱降雨影响下典型时段控制灌溉处理侧渗水量和田埂土壤含水率日变化

Tab.5 Lateral seepage and ridge moisture content daily change during typical periods of weak rainfall of CI treatment

日期	移栽后时间/d	降雨量/mm	CI+CD处理				CI+FD处理			
			土壤含水率/%		侧渗水量/ (mm·d ⁻¹)		土壤含水率/%		侧渗水量/ (mm·d ⁻¹)	
			0~10 cm	10~20 cm			0~10 cm	10~20 cm		
8月29日	90		35.06	42.43	1.35		31.62	33.72	2.42	
8月30日	91	2.42	36.77	42.88	0.85		32.23	35.25	2.32	
8月31日	92		35.64	42.50	0.59		31.63	34.26	1.93	
9月1日	93	0.59	36.64	42.81	0.23		32.11	35.44	1.85	

3 讨论

3.1 灌排调控对稻田-田埂-沟道区域水分侧渗过程和总量的影响

本试验通过设置 4 个处理,对 2 年稻田水分侧渗数据分析发现:灌排调控显著降低了稻田水分侧渗强度和总量,尤其是 CI + CD 处理水分侧渗强度均值为 $2.4 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$,相较 FI + FD 处理的 $6.74 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$ 明显降低。2020 年和 2021 年各处理稻田水分侧渗总量范围分别为 $151 \sim 364 \text{ mm}$ 和 $203 \sim 644 \text{ mm}$,与文献[39–42]相比,各处理侧渗强度和总量均处于正常范围内。TABBLE 等^[39]通过设置 2~5 cm 灌水层灌溉和持续湿润灌溉(田间不建立水层)两种处理,发现二者田埂水分渗漏强度分别为 $20, 5 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。文献[40–41]试验发现,在粉质黏土、粉质黏壤土、黏壤土和黏土质地的稻田中,田埂水分侧向渗漏强度为 $0.2 \sim 20 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。BOUMAN 等^[42]研究表明灌溉水稻在重黏土中的水分侧向渗漏强度为 $1 \sim 5 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。土质会对稻田田埂水分侧渗强度产生影响,本试验基地土质为黏壤土,稻田水分侧渗强度为 $2.4 \sim 6.74 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{d})$,与以往相似土质的试验进行比较,属于合理范围。TABBAL 等^[39]研究发现稻田水分侧向渗漏总量在重黏土中为 $100 \sim 500 \text{ mm}$,本试验的粉质黏壤土与重黏土相似,稻田水分侧渗总量为 $151 \sim 644 \text{ mm}$,与之相比符合正常范围。

本试验结果表明,控制灌溉处理稻田水分侧渗强度峰值和均值较浅湿灌溉处理降低,CD + CI 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值较 CD + FI 处理分别降低 11.43% 和 39.49%;FD + CI 处理稻田侧渗水量峰值和均值较 FD + FI 处理分别降低 43.97% 和 51.90%。以往关于稻田水分侧渗的研究^[8]多采用浅湿灌溉的灌溉模式,浅湿灌溉通过控制田间水层调节稻田侧渗水量,本试验发现控制灌溉处理稻田侧渗水量较浅湿灌溉处理降低 36.32%,这是由于浅湿灌溉处理稻田不能形成系统的干湿循环,而控制灌溉处理的稻田灌溉下限较低,出现了完整的干湿循环过程^[43],因此有效降低了稻田侧渗水量。当排水沟水位保持一致时,浅湿灌溉处理输入水量较控制灌溉处理更大,因此加强了稻田水分通过田埂进入排水沟的迁移过程。此外,通过分析稻田侧渗总量和输入水总量发现,控制灌溉处理稻田输入水总量较浅湿灌溉处理变少,同时稻田侧渗水量变少,但占稻田流失水量比重变大。2020 年和 2021 年试验期内,CI + CD 处理、CI + FD 处理、FI + CD 处理和 FI + FD 处理的稻田侧渗水总量占稻田水分输入总

量(包括灌水和降雨)的比例分别为 32.27%、41.21%、23.32% 和 28.91%。CI + CD 处理和 CI + FD 处理的稻田侧渗水量较 FI + CD 处理和 FI + FD 处理变少,同时,CI + CD 处理和 CI + FD 处理中稻田侧渗水总量占稻田水分输入总量比例增加。本试验发现控制灌溉处理在进行田间水分管理时优于浅湿灌溉处理,且控制灌溉处理稻田侧渗水量占稻田流失水总量比重较浅湿灌溉处理变大,因此,在实施控制灌溉处理以进行更优的稻田水分管理时,需加强对稻田水分侧渗的控制,从而更有效地减少稻田水量流失。

控制排水处理的稻田水分侧渗强度峰值和侧渗总量较自由排水处理均显著降低。CI + CD 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值较 CI + FD 处理分别降低 30.44% 和 28.49%;FI + CD 处理稻田水分侧渗强度峰值和均值较 FI + FD 处理分别降低 44.21% 和 43.15%。控制排水处理稻田水分侧渗总量较自由排水处理明显降低,两年试验期内平均降幅为 34.64%。YU 等^[44]研究发现,控制排水处理的两个典型降雨过程的稻田侧渗水量较自由排水分别减少 47.5% 和 31.3%,峰值排水量分别减少 38.9% 和 14.4%,本试验与之相比符合正常范围。控制排水处理的排水沟道水位较自由排水处理保持更高水位,对田埂内土壤含水率的降低起到了抑制作用,使得控制排水处理的田埂土壤含水率较自由排水处理更高,其中 CI + CD 处理田埂内各深度土壤含水率均高于 CI + FD 处理,使得 CI + CD 处理的田埂土壤水势较 CI + FD 处理更高,从而抑制了稻田内水分通过田埂侧向迁移到排水沟的过程,该结果与 YUAN 等^[45]研究相符合。然而本试验发现 FI + CD 处理田埂各深度土壤含水率较 FI + FD 处理更低,这是因为在浅湿灌溉处理不断补水情况下,稻田内犁底层以上土层含水率较高^[46],且自由排水沟道水面较控制排水沟道水面低,稻田内水位与沟道水位的高差较大,促使稻田水分持续地通过田埂侧渗进入沟道,从而导致控制排水处理的田埂土壤含水率较自由排水处理低。祝惠等^[25]在三江平原进行的田埂侧渗研究同样发现稻田与排水沟的水位差会促进田埂内的侧渗过程。

3.2 区域水分侧渗变化对土壤水分变化的响应

本试验结果表明,灌排处理下稻田水分侧渗强度和深度 10~20 cm 土壤含水率呈极显著正相关关系($p < 0.05$)。稻田土壤水分和排水沟沟道水位会显著影响稻田侧渗水量,因此深入探讨各组合对稻田水分侧渗的影响。文献[47–48]研究发现,土壤水分变化剧烈程度随着土层深度增加而减弱,而深

层土壤含水率受降雨或灌溉影响相对较小,整体上随时间推移变化不明显。本试验通过土壤水分动态监测发现,田埂各深度均呈现浅层土壤含水率波动剧烈,深层土壤含水率较为稳定的现象,在田间灌溉模式和沟道排水方式综合影响下,田埂0~20 cm土壤含水率波动剧烈,20~50 cm土壤含水率较为稳定,这与已有学者的研究结果相符。这是由于田埂表层土壤含水率受灌水和降雨影响不断波动,在一定程度上限制了田埂内土壤水分的垂直下渗^[8,16,30],从而抑制了深层土壤含水率的变化。李胜龙^[14]通过原位染色示踪试验发现,稻田-田埂过渡区土壤染色面积比(SAR)随深度的增加而下降,其中0~20 cm土层SAR较高,占剖面总SAR的53.85%~88.55%,染色结果表明稻田水分侧渗多发生在0~20 cm土层,因此本文选择0~20 cm浅层土壤对土壤含水率和稻田水分侧渗强度进行相关性分析,且2021年较2020年干湿循环更明显,土壤含水率波动和稻田侧渗水量变化更显著,因此选择对2021年的田埂0~20 cm土壤含水率和稻田水分侧渗强度进行相关性分析。分析发现田埂水分侧渗强度的变化与田埂10~20 cm土壤含水率的变化有极显著正相关关系。这是由于当土壤含水率较低时,土壤孔隙不完全饱和,水分以薄膜形式存在于土粒间,导致水分传导性差。随着土壤含水率的增加,水分开始填满孔隙,提高孔隙间的连通性,从而促进水分的侧向流动。此外,土壤含水率不均匀分布会形成水力梯度,水平方向湿润锋运移速率和入渗率均增大^[49],即水分从高含水率区向低含水率区流动。

在灌水或较大降雨当日,稻田水分侧渗强度出现峰值,随即田埂10~20 cm土壤含水率上升,无水分输入后,稻田水分侧渗强度下降,田埂10~20 cm土壤含水率随之回落。李胜龙^[14]发现田沟-田埂原

位离子试验过渡区田埂10~20 cm土层离子出流量较多,土壤入渗速率最高,波动最明显,与本试验的稻田侧渗区域现象相符。由此推断,稻田水分侧渗通道主要分布在深度10~20 cm土壤,在这一深度的土层采用适当的防渗措施,可以有效地减少稻田水分侧渗量。在考虑经济的前提下,未来可以将稻田防渗工程的重点集中在深度10~20 cm土壤上。

4 结论

(1)在灌排调控影响下,田埂0~20 cm土壤含水率波动显著,20~50 cm土壤含水率相对稳定。各处理田埂0~20 cm土壤含水率平均变幅为6.68%,20~50 cm土壤含水率平均变幅仅为1.70%。沟道控制排水处理较自由排水处理有效抑制了田埂土壤含水率波动,而稻田控制灌溉处理较浅湿灌溉处理田埂土壤含水率变化更剧烈。

(2)灌排调控显著减少了稻田-田埂-沟道区域水分侧渗总量。沟道控制排水处理和稻田控制灌溉处理相较于浅湿灌溉处理和自由排水处理减小了田埂水分侧渗强度。沟道控制排水处理田埂水分侧渗总量较自由排水处理显著降低,平均降幅为34.64%。控制灌溉处理田埂水分侧渗总量较浅湿灌溉处理显著降低,平均降幅为43.18%。稻田灌溉处理和沟道排水处理对水分侧渗产生显著影响,其中灌溉处理的效应更为显著。控制灌溉处理田埂侧渗水量总量占稻田水分输入总量比例较浅湿灌溉处理增加,在实施控制灌溉时,需特别关注稻田中的侧渗控制,以实现田间水分管理优化。

(3)控制灌溉处理稻田-田埂-沟道区域水分侧渗强度变化与田埂10~20 cm土壤含水率变化具有极显著正相关关系。稻田水分侧渗通道主要分布在田埂深度10~20 cm,在此深度采取合适的防渗措施,可以有效减少田间水分侧渗量。

参 考 文 献

[1] 2022年中国水资源公报[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(7): 2.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

[3] 程建平. 水稻节水栽培生理生态基础及节水灌溉技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.

CHENG Jianping. Study on foundation of physi-ecology and technique of water-saving irrigation rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)

[4] 王笑影, 吕国红, 贾庆宇, 等. 稻田水分渗漏研究 I. 渗漏现状及成因分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5763-5766.

WANG Xiaoying, LÜ Guohong, JIA Qingyu, et al. Study on the water percolation in paddy field(I) [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(11): 5763-5766. (in Chinese)

[5] HELMERS M J, CHRISTIANSON R D, SAWYER J. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4): 1305-1314.

[6] STROCK J S, PORTER P M, RUSSELLE M P. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern U. S. corn belt[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(3): 1010-1016.

[7] YOUSSEF M A, SKAGGS R W, CHESCHEIR G M, et al. Field evaluation of a model for predicting nitrogen losses from drained lands[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 2026-2042.

- [8] JANSSEN M, LENNARTZ B. Water losses through paddy bunds: methods, experimental data, and simulation studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1):142–153.
- [9] LAHUE G T, LINQUIST B A. The magnitude and variability of lateral seepage in California rice fields[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574:202–210.
- [10] LIN L, ZHANG Z B, JANSSEN M, et al. Infiltration properties of paddy fields under intermittent irrigation[J/OL]. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(1). DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s10333-013-0354-6.
- [11] 李胜龙, 张海林, 刘目兴, 等. 稻田-田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 122–128.
LI Shenglong, ZHANG Hailin, LIU Muxing, et al. Characteristics of soil water transport and holding capacity in paddy and inner field-bund transition zones[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 122–128. (in Chinese)
- [12] TSUBO M, FUKAI S, BASNAYAKE J, et al. Effects of soil clay content on water balance and productivity in rainfed lowland rice ecosystem in northeast Thailand[J]. *Plant Production Science*, 2007, 10(2):232–241.
- [13] LI J, WANG X, BAI L, et al. Quantification of lateral seepage from farmland during maize growing season in arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191:85–97.
- [14] 李胜龙. 稻田-田埂过渡区土壤大孔隙分布与水氮渗漏特征[D]. 武汉:华中师范大学, 2019.
LI Shenglong. Characteristics of macropores distribution and water-nitrogen leakage in the intermediate zone between paddy field and ridge[D]. Wuhan:Central China Normal University, 2019. (in Chinese)
- [15] CHEN S K, LIU C W, HUANG H C. Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 268(1–4): 259–271.
- [16] HUANG H C, LIU C W, CHEN S K, et al. Analysis of percolation and seepage through paddy bunds[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1): 13–25.
- [17] XU B, SHAO D, FANG L, et al. Modelling percolation and lateral seepage in a paddy field-bund landscape with a shallow groundwater table[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 214: 87–96.
- [18] CHEN Kaiwen, YU Shuang'en, MA Tao, et al. Modeling the water and nitrogen management practices in paddy fields with HYDRUS-1D[J]. *Agriculture*, 2022, 12:924.
- [19] LIANG X Q, LI H, CHEN Y X, et al. Nitrogen loss through lateral seepage in near-trench paddy fields[J]. *Environ. Qual.*, 2008, 37: 712–717.
- [20] LI Jinwen, QIAN Xiaoyong, ZHANG Min, et al. Methodology for studying nitrogen loss from paddy fields under alternate wetting and drying irrigation in the lower reaches of the Yangtze River in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 254: 106963.
- [21] 杨霞, 邵东国, 徐保利. 东北寒区黑土稻田土壤水分剖面二维运动规律研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(8): 1017–1026.
YANG Xia, SHAO Dongguo, XU Baoli. Indoor experiment and simulation of soil water two-dimensional movement of the paddy fields in the northeast frigid of China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(8): 1017–1026. (in Chinese)
- [22] SONAWANE A, SHRIVASTAVA P. Partial root zone drying method of irrigation: a review[J]. *Irrigation and Drainage*, 2022, 71: 1–15.
- [23] 张忠学, 薛里, 李铁成, 等. 水氮耦合下黑土区稻田生态系统碳源汇效应分析[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 330–338.
ZHANG Zhongxue, XUE Li, LI Tiecheng, et al. Effect of water and nitrogen coupling on carbon source and sink of paddy ecosystem in black soil area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 330–338. (in Chinese)
- [24] 马强, 刘淑芳, 宇万太, 等. 田埂宽度与种豆对稻田矿质氮侧向迁移影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(3): 585–596.
MA Qiang, LIU Shufang, YU Wantai, et al. Effects of paddy bund width and soybean planting on loss of olsen P with lateral seepage[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 585–596. (in Chinese)
- [25] 祝惠, 阎百兴. 三江平原水田氮的侧渗输出研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 108–112.
ZHU Hui, YAN Baixing. Export of nitrogen by lateral seepage from paddy field in Sanjiang plain[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 108–112. (in Chinese)
- [26] 陈伟, 窦超银, 王良, 等. 辽宁中部地区水稻适宜灌溉方式试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(6): 73–76.
CHEN Wei, DOU Chaoyin, WANG Liang, et al. Experimental study on suitable irrigation mode for rice in middle area of LiaoNing Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(6): 73–76. (in Chinese)
- [27] 张忠学, 宋健, 齐智娟, 等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(3): 42–49, 60.
ZHANG Zhongxue, SONG Jian, QI Zhijuan, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer application on soil nitrogen distribution and nitrogen use efficiency under water-saving irrigation[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(3): 42–49, 60. (in Chinese)
- [28] 杨燕, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 257–263.
YANG Yan, YI Jun, LIU Muxing, et al. Characteristics of soil water transport in different aged paddy fields[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2): 257–263. (in Chinese)
- [29] 褚琳琳, 黄荣玉, 赵燕, 等. 低山丘陵区不同土地利用方式田内-田埂土壤优先流特征[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(4): 115–123.
CHU Linlin, HUANG Rongyu, ZHAO Yan, et al. Characteristics of preferential flow dyeing morphology in the field-bund transition zone of different land use types in low mountainous and hilly areas[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(4):

- 115 – 123. (in Chinese)
- [30] PATIL D M, DAS B S, BHADORIA P B S. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(1): 66 – 75.
- [31] 汪顺生, 刘帅冶, 傅渝亮, 等. 宽垄沟灌土壤水分累积入渗特性模拟研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 39(12): 57 – 63.
WANG Shunsheng, LIU Shuaiye, FU Yuliang, et al. Experimental study and simulation on cumulative infiltration characteristics of soil water under wide ridge furrow irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 39(12): 57 – 63. (in Chinese)
- [32] DIALAMEH B, PARSINEJAD M, EBRAHIMIAN H, et al. Field comparison of infiltration in conventional and alternate furrow irrigation under various initial and boundary conditions: comparison of infiltration in conventional and alternate furrows [J/OL]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 67. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2176>.
- [33] 刘战东, 秦安振, 宁东峰, 等. 降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布的影响模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 1 – 8.
LIU Zhandong, QIN Anzhen, NING Dongfeng, et al. Effective of simulated different rainfall intensities on soil evaporation and water redistribution in crop field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 1 – 8. (in Chinese)
- [34] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. *水利学报*, 2004, 35(8): 114 – 118.
SUN Hongyong, LIU Changming, ZHANG Yongqiang, et al. Study on soil evaporation by using micro-lysimeter[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(8): 114 – 118. (in Chinese)
- [35] 冀荣华, 刘秋霞, 陈振海, 等. 基于 HYDRUS – 3D 模型的微润灌溉土壤水分入渗模拟[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊): 290 – 295.
JI Ronghua, LIU Qiuxia, CHEN Zhenhai, et al. Numerical simulation of soil water infiltration based on HYDRUS – 3D[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 290 – 295. (in Chinese)
- [36] 周春华, 何锦, 郭建青, 等. 降雨灌溉入渗条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2007(3): 40 – 43.
ZHOU Chunhua, HE Jin, GUO Jianqing, et al. Numerical simulation of soil water movement under rainfall and irrigation infiltration condition[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2007(3): 40 – 43. (in Chinese)
- [37] 田日昌, 陈洪松, 王克林. 雨季红壤坡地油茶林土壤水势变化特征及耗水规律[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 39 – 44.
TIAN Richang, CHEN Hongsong, WANG Kelin, et al. Soil water potential dynamics and water consumption of oil-tea camellia woods on slope land of red soil during rainy season[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3): 39 – 44. (in Chinese)
- [38] 靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 792 – 801.
JIN Yurong, LU Kexin, LI Peng, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 792 – 801. (in Chinese)
- [39] TABBAL D F, BOUMAN B A M, BHUIYAN S I, et al. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 56(2): 93 – 112.
- [40] WICKHAM T H, SINGH V P. Water movement through wet soils[M] // *Soils and rice*, 1978: 337 – 357.
- [41] TABBAL D F, LAMPAYAN R M, BHUIYAN S I. Water-efficient irrigation technique for rice [M] // *Soil and water engineering for paddy field management*, 1992.
- [42] BOUMAN B A M, TUONG T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(1): 11 – 30.
- [43] HAN H, GAO R, CUI Y, et al. Transport and transformation of water and nitrogen under different irrigation modes and urea application regimes in paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107024.
- [44] YU Yanmei, XU Junzeng, ZHANG Pingcang, et al. Controlled irrigation and drainage reduce rainfall runoff and nitrogen loss in paddy fields[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(7): 3348 – 3363.
- [45] YUAN N, XIONG Y, LI Y, et al. Experimental study of the effect of controlled drainage on soil water and nitrogen balance [J]. *Water*, 2021, 13(16): 2241.
- [46] SRIPHIROM P, ROSSOPA B. Assessment of greenhouse gas mitigation from rice cultivation using alternate wetting and drying and rice straw biochar in Thailand[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 290: 108586.
- [47] 司舒阳, 李道西. 黄河下游引黄灌区深层土壤含水率反演模型研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(8): 124 – 127, 42.
SI Shuyang, LI Daoxi. Study on inversion model of deep soil moisture content in the Yellow River diversion irrigation area[J]. *Yellow River*, 2023, 45(8): 124 – 127, 42. (in Chinese)
- [48] 孙媛, 董晓华, 郭梁锋, 等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊2): 74 – 80.
SUN Yuan, DONG Xiaohua, GUO Liangfeng, et al. Simulation of soil water movement and redistribution under varying rainfall intensity conditions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(Supp.2): 74 – 80. (in Chinese)
- [49] 马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 347 – 358.
MA Mengmeng, LIN Qing, XU Shaohui. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 347 – 358. (in Chinese)