

灌溉措施对稻田灰水足迹和水分利用效率的影响研究

肖剑峰¹, 吴梦洋¹, 汤树海², 操信春^{1*}

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 210098; 2.涟水水利科学研究所, 江苏 淮安 223200)

摘 要:【目的】揭示稻田水资源利用效用, 优选高效灌排模式。【方法】通过观测浅水勤灌(FSI)、浅湿灌溉(WSI)、控制灌溉(COI)和蓄水控灌(RCI)下稻田水肥迁移过程, 结合水足迹与用水效率指标, 分析了灌溉措施对稻田排水、灰水足迹及其水分利用效率的影响。【结果】受不同灌溉措施的影响, 稻田排水量、灰水足迹及其水分利用效率均存在差异。2017—2018 年各处理稻田排水量为 387.6~593.7 mm, RCI 处理最小, 而 COI 处理最多。FSI、WSI、COI、RCI 处理下水稻灰水足迹的年均值分别为 386.3、420.6、431.2、273.1 mm。蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹的组成比例分别为 6.0%~24.0%、31.8%~58.0%、37.0%~54.0%, 且 RCI 处理下绿水足迹最大、蓝水足迹和灰水足迹均最小, 其用水结构更符合水稻节水减污的要求。【结论】对比传统方法和水足迹框架下农业水资源评价指标, 将田间排水量及灰水足迹加入稻田水分利用效率评价至关重要, 且蓄水控灌为综合灰水足迹和水分利用效率下的高效灌溉措施。

关键词: 灰水足迹; 用水效率; 灌溉措施; 节水减污; 水稻

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022381

OSID:



肖剑峰, 吴梦洋, 汤树海, 等. 灌溉措施对稻田灰水足迹和水分利用效率的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 42-51.

XIAO Jianfeng, WU Mengyang, TANG Shuhai, et al. Effect of Irrigation on Footprint of Grey Water and Water Use Efficiency of Paddy Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 42-51.

0 引言

【研究意义】水稻是我国主要粮食作物之一, 种植面积约 3 000 万 hm^2 , 占粮食种植面积的 35% 左右。由于耐盐喜湿的生长特性, 淹水灌溉是水稻生产最常用水分管理方式。然而, 肥料的过量使用和不合理的灌溉排水方式, 随地表排水和地下渗漏产生的水量损失和氮磷淋失不仅降低了稻田水肥利用效率, 而且造成严重的面源污染^[1-2]。因此, 在提升水资源效用的同时减少环境负荷是农业节水研究发展的必然趋势。【研究进展】改变灌排模式是调控稻田水肥的主要手段, 将节水灌溉技术与控制排水相结合有利于水稻的节水减污^[3-5]。然而, 由于污染物和水资源效用的评价体系难以融合, 导致了在以往的研究中 2 个方面难以兼顾。作为水资源利用评价的新工具, 水足迹可以从水量和水质衡量人类活动对水资源的消耗。具体到农业生产系统, 它反映了作物生育期对水资源的总需求, 由蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹 3 部分组成, 其中蓝水足迹、绿水足迹分别为以蒸发蒸腾形式

消耗而不再被重复利用的灌溉水和有效降水, 灰水足迹为稀释系统排放污染物(如氮)使其达到环境标准所需的水量^[6]。它不仅区分了作物水分来源的蓝水、绿水属性, 而且还量化了农业生产对水环境的负面影响。因此, 它可以更全面地体现出作物生长过程中广义水资源和真实水耗用之间的关系。由于农作物水足迹占全球水足迹的巨大比例, 农业生产水足迹核算、评估及调控成为水足迹领域的研究热点和发展方向。已有研究^[7-9]开展了不同区域与空间尺度农作物水足迹及其组成的计算与分析, 核算尺度从全球、国家、流域、省市、灌区到田间等。这些研究在说明进行水足迹调控的必要性同时也促发了其应用于区域农业水管理的研究。Wu 等^[10]结合中国粮食水足迹和区域虚拟水流动的评估, 建议将农业水足迹控制作为农业节水的手段; Wang 等^[11]、付强等^[12]利用作物生产蓝绿水足迹来评价区域粮食生产用水效率; Le 等^[13]建立了水足迹框架的灌溉用水可持续评价指标; Duan 等^[14]及韩宇平等^[15]试图通过揭示区域作物水足迹变异的驱动因子来为其降低策略提供参考。特别地, 剥离作物水足迹内涵与传统评价范式难以协调农业生产系统灌排设施建设、水肥高效利用以及粮食安全产出之需求^[16-17]。为此, Cao 等^[18]通过观测田间水肥运移过程对比分析了作物生产水足迹与传统水分生产率指标的表现, 并在水足迹框架下建立农业用水

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979074); 江苏省自然科学基金项目(BK20221504)

作者简介: 肖剑峰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业水土资源高效利用与保护。E-mail: 201310010011@hhu.edu.cn

通信作者: 操信春(1986-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为农业水土资源高效利用与保护。E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

效果^[19]、广义水系数^[20]、水资源效率^[21]、水足迹效率^[22]指标以完善区域农业用水效率评价指标体系。

【切入点】然而,将水足迹理论应用于灌排模式优选,以提高稻田水分利用效率的同时减少环境污染的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究基于水足迹理论,通过观测稻田排水及其中氮磷淋失质量浓度的变化过程,量化水稻生产灰水足迹并分析不同灌排模式对稻田水分利用效率的影响,以期为水稻的节水减污提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2017—2018 年在江苏省涟水水利科学研究所(33°50'N, 119°16'E)进行。试验区土质为

沙壤土, 0~100 cm 土层平均土壤干体积质量 1.424 g/cm³, 田间持水率 27.9%, 饱和含水率 33.04% (质量含水率), 土壤肥力中等, 有机质质量分数为 2.19%, pH 值为 6.82。参照当地农艺技术, 试验共设 4 种灌溉措施: 浅水勤灌 (FSI)、浅湿灌溉 (WSI)、控制灌溉 (COI) 和蓄水控灌 (RCI), 各项灌溉措施的田间水深(含水率)标准如表 1 所示。试验设 4 个处理, 每个处理 3 次重复。每个单元的中间都安装有 1 个微型蒸渗仪 (0.5 m×0.5 m×1.0 m) 和 1 个观察井 (直径 5.0 cm, 深度 1.2 m)。2017 年水稻 6 月 17 日移栽, 10 月 19 日收割, 2018 年 6 月 26 日移栽, 10 月 12 日收割, 基肥为碳酸氢铵 1 125 kg/hm², 磷肥 375 kg/hm², 分蘖期追施尿素 225 kg/hm²。

表 1 水稻各生育期内不同灌溉措施下田间水分控制标准

Table 1 Field moisture control standards of different irrigation measures during rice growing period

处理	灌溉控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FSI	灌溉上限	30 mm	30 mm	50 mm	40 mm	40 mm	0 mm
	灌溉下限	10 mm	10 mm~60% θ_s	10 mm	10 mm	10 mm	(60%~70%) θ_s
	蓄水上限	40 mm	100mm	150 mm	200 mm	200 mm	0mm
WSI	灌溉上限	30 mm	20 mm	20 mm	30 mm	30 mm	0 mm
	灌溉下限	20 mm	(70%~90%) θ_s	90% θ_s	θ_s	80% θ_s	(70%~80%) θ_s
	蓄水上限	40 mm	60 mm	100 mm	100 mm	80 mm	0mm
COI	灌溉上限	30 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	80% θ_s
	灌溉下限	10 mm	(60%~70%) θ_s	(70%~80%) θ_s	80% θ_s	70% θ_s	自然落干
	蓄水上限	40 mm	60 mm	80 mm	80 mm	80 mm	0 mm
RCI	灌溉上限	30 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	80% θ_s
	灌溉下限	10 mm	(60%~70%) θ_s	(70%~80%) θ_s	80% θ_s	70% θ_s	自然落干
	蓄水上限	80 mm	150 mm	200 mm	200 mm	200 mm	0 mm

注 “mm”表示田面水深单位, “%”表示表层 30 cm 土层土壤含水率占土壤饱和含水率 θ_s 的百分比。

1.2 指标及测定

水稻试验 08:00 测定, 当田面有水层时, 通过钢尺读取水层深度, 遇降水进行加测; 当田面无水层时, 利用埋设在土壤中 0~30 cm 的 TDR 探头进行土壤水分测定。灌水和排水情况, 参照各处理灌排控制标准, 当土壤水分降至灌水下限时, 即灌水至上限, 若水层深度超过最大蓄水深度, 则及时排水至蓄水上限, 记录每次的灌排水时间和灌排水量。田间蒸腾量用微型蒸渗仪测量, 生育期每 3 天用小型水泵从观察井排地下水 1 次, 到生育期末补测 1 次, 所有排水均取样进行含氮量、含磷量测试。水样中总氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894—89), 铵态氮测定采用纳氏试剂比色法 (GB 7479—87), 硝态氮测定采用紫外分光光度法 (GB 7480—87), 总磷测定采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893—89)。水样采集后尽量 2 h 内测试分析, 若水样较多时, 可放入冰柜于 4℃低温保存, 24 h 内处理完毕。产量: 在水稻收割前, 对每个处理进行单打单收, 自然晒干, 测定水稻的实际产量。搜集试验区附近气象站点资料, 包括温度、湿度、风速、太阳辐射量、降水量等。如图 1

分别为 2017—2018 年试验区水稻生育期内降水过程。

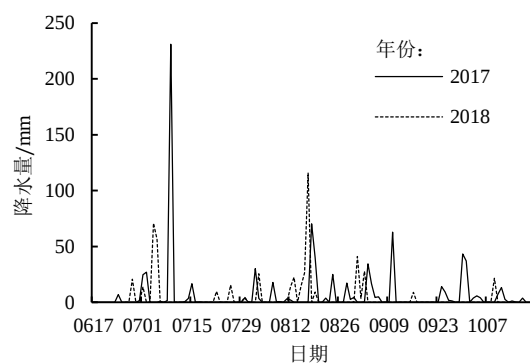


图 1 2017—2018 年试验区水稻生育期内降水量分布

Fig.1 Precipitation of rice growing period in the experimental area from 2017 to 2018

1.3 作物灰水足迹和田间水分利用效率计算

1) 作物灰水足迹。水稻生产过程中形成的面源污染主要是氮、磷引起的, 不同成分环境临界质量浓度不同, 所需的稀释水量也不相同; 同一稀释水能同时稀释多种污染物; 稀释新增面源污染所需的水量由所需稀释水量最大的污染物决定, 在数量上等于该污染物的稀释水量。田间尺度计算有别于区域尺度, 当

某次农田排水中面源污染物超过环境临界质量浓度,才需淡水稀释;反之,排水中面源污染物未超过环境临界质量浓度,则不需淡水稀释,为此采取式(1)进行田间尺度面源污染灰水足迹计算,设农田共排水 N 次,面源污染物有 i 种,受纳水体的自然本底质量浓度指自然条件、无人影响下水体中某污染物的质量浓度设为 0。

第 i 种面源污染源灰水足迹为:

$$GWF^i = \sum_{q=1}^N h_q \left(\frac{C_q^i}{C_{\max}^i} - 1 \right), \quad (1)$$

式中: GWF^i 为第 i 种面源污染源灰水足迹 (mm); h_q 为第 q 次排水的排水量 (mm); C_q^i 为第 q 次排水第 i 种污染物的质量浓度 (g/L); $C_{\max}^i$ 为第 i 种面源污染物的环境容许最大质量浓度 (g/L)。若某次排水中 $C_q^i - C_{\max}^i \leq 0$, 则该次灰水足迹为 0。

面源污染灰水足迹为:

$$GWF = \max[GWF^1, GWF^2, GWF^3, \dots]。 \quad (2)$$

本文选择 TN (总氮) 和 TP (总磷) 2 项指标,参数最大门限值参照《地表水环境质量标准 (GB3838—2002)》《地下水质量标准 (GB/T14848—93)》有关规定,本次 TN 最大门限值为 2 mg/L, TP 最大门限值为 0.2 mg/L。

单位粮食产量的灰水足迹,也称作粮食生产灰水足迹,计算式为:

$$GWF_g = 10 \times \frac{GWF}{Y}, \quad (3)$$

式中: GWF_g 为粮食生产灰水足迹 (m^3/kg); Y 为水稻产量 (kg/hm^2); GWF 为灰水足迹 (mm)。

2) 田间水分利用效率。基于农业水资源评价途径—“利用量-有效程度-产出能力”,本文依次选取作物水足迹 (CWF)、作物水分利用率 (WUE)、灌溉水分生产率 (IWP)、作物生产水足迹 (WFP) 和水资源系数 (WRE) 等指标来评价稻田水分利用效率。

以稻田水量平衡为基础,作物水足迹 (CWF) 反映了作物整个生育期内水分消耗状况,包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹:

$$CWF = CWF_{\text{blue}} + CWF_{\text{green}} + GWF, \quad (4)$$

式中: CWF_{blue} 、 CWF_{green} 分别为蓝水足迹、绿水足迹,二者的和统称为消耗性水足迹,即作物蒸发蒸腾量 (ET),单位均为 mm。

作物生产水足迹 (WFP) 衡量作物对水资源的利用效率,用作物产量和作物水足迹比值表示,计算式为:

$$WFP = \frac{Y}{10 \times CWF}, \quad (5)$$

式中: WFP 为作物生产水足迹 (kg/m^3); CWF 为作物水足迹 (mm); 10 为单位转换系数。

作物水分利用效率 (WUE) 衡量单位水量所获得的作物产量,用作物产量和蒸发蒸腾量的比值表示,计算式为:

$$WUE = \frac{Y}{10 \times ET}, \quad (6)$$

式中: WUE 表示作物水分利用效率 (kg/m^3); ET 表示全生育期蒸发蒸腾量 (mm); 10 为单位转换系数。

灌溉水分生产率 (IWP) 是指单位灌溉用水量消耗所能生产的农作物经济产品数量,计算式为:

$$IWP = \frac{Y}{10 \times ET_b}, \quad (7)$$

$$ET_b = IW \times U_f, \quad (8)$$

式中: IWP 为灌溉水分生产率 (kg/m^3); ET_b 为灌溉水蒸发蒸腾量 (mm); IW 为从最后一级渠道进入田间的灌溉水量 (mm); U_f 为田间灌溉水利用系数,由灌区当局提供; 10 为单位转换系数。

水资源系数 (WRE) 表征区域水资源需求总量的有效性,计算式为:

$$WRE = \frac{ET}{GWF + ET + D}, \quad (9)$$

$$D = D_{\text{run}} + D_{\text{per}}, \quad (10)$$

式中: GWF 为作物灰水足迹 (mm); ET 为全生育期蒸发蒸腾量 (mm); D 为田间排水量 (mm),由地表排水 (D_{run}) 和地下渗漏 (D_{per}) 组成。

2 结果与分析

2.1 灌溉措施对稻田排水及氮磷淋失的影响

表 2 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下地表排水及 TN、TP 质量浓度的变化过程。试验区 2017、2018 年水稻生长期降水分别为 998.0 mm 和 634.2 mm,其中短期暴雨的次数分别为 5 次和 3 次,其频率和发生时间与地表排水基本吻合。由于 2017 年试验区内降水相对频繁,且降水量较多,各灌溉措施下稻田排水量 (地表、地下) 均比 2018 年大,且波动幅度更加明显。

图 2 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下地下渗漏及其污染物质量浓度的变化过程。各处理中,COI 处理下水稻各生育阶段蓄水上限均为最小,因此其地表排水量最大,而 RCI 处理蓄水上限均为最大,其地表排水次数和排水量均最少,特别是在 2018 年,整个生育期内没有进行排水。水稻施肥后,除了少量被植物根系吸收和土壤吸附外,很大一部分游离于田间水层中,因此,排水势必会伴随着污染物 (TN、TP) 的淋失。2017 年地表排水中 TN、TP 淋失质量浓度变化范围分别为 0.87~7.38、0.01~0.23 mg/L,较 2018 年明显减小 (0.9~12.7、0.1~0.5 mg/L)。从整个生育期来看,地表排水中 TN 质量浓度较 TP 质量浓度大,

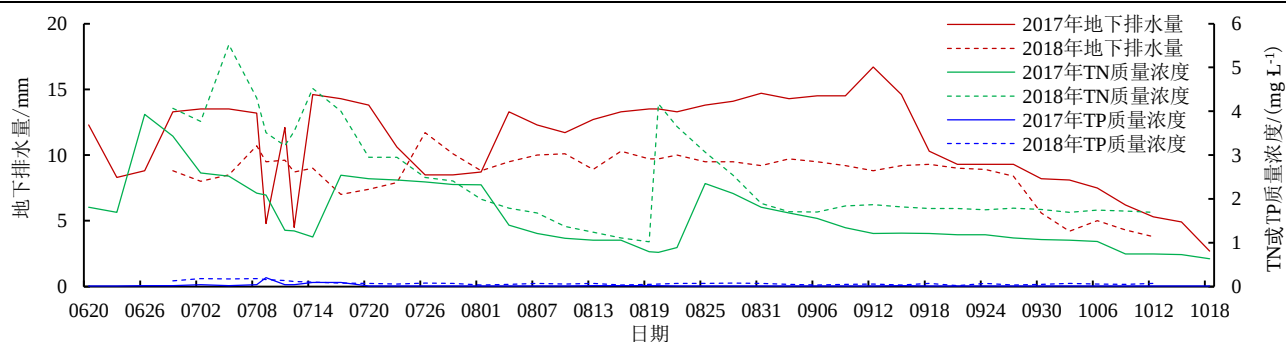
且早期质量浓度明显高于中后期,这是因为水稻生育早期,水稻覆盖度较低,且根系发育尚不发达,基肥降水的淋洗,使肥料中大多数氮磷来不及被水稻根系吸收就随田间排水流出^[23]。

入田之后,对肥料中氮磷元素吸收较少,再加上频繁

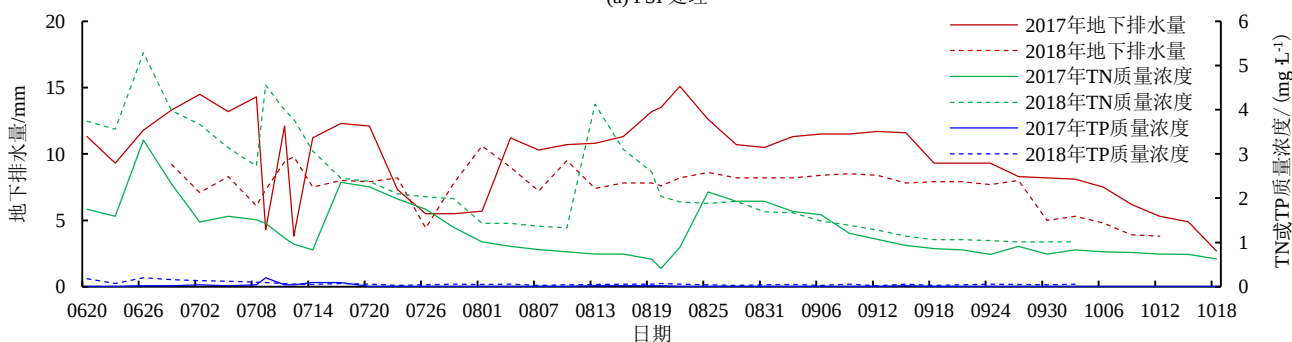
表 2 不同灌溉措施下地表排水量和污染物质量浓度

Table 2 Observed surface drainage and pollutant concentration for different irrigation measures

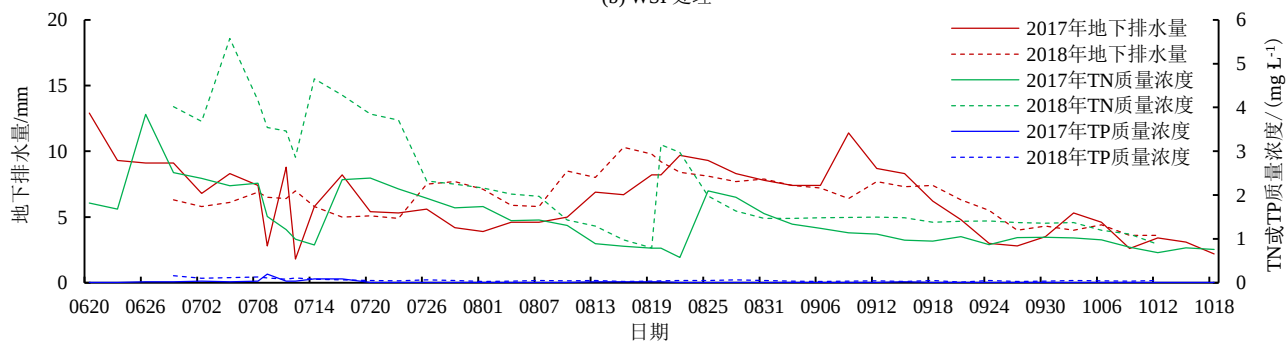
处理	2017 年				2018 年			
	日期	排水量/mm	TN 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	TP 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	日期	排水量/mm	TN 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	TP 质量浓度/(mg·L ⁻¹)
FSI	0709	132.2	6.58	0.21	0705	44.6	12.7	0.5
	0714	33.7	2.05	0.17	0818	28.3	1.9	0.2
	0820	45	1.77	0.07				
	1005	81.4	1.03	0.03				
	总计	292.3			总计	72.9		
WSI	0709	168.5	6.28	0.23	0705	49.5	10.1	0.3
	0714	28.2	1.73	0.13	0706	29.8	9.2	0.2
	1001	60.2	1.36	0.02	0818	66.7	1	0.1
	1005	33.8	0.93	0.01				
	总计	290.7			总计	146		
COI	0709	173.5	6.30	0.21	0705	54	11.1	0.3
	0820	53.2	1.43	0.1	0706	31.2	7.6	0.2
	0911	50.5	2.45	0.12	0817	62.4	0.9	0.1
	1001	33.8	0.87	0.01				
	总计	311.0			总计	147.6		
RCI	0709	73.6	7.38	0.25				
	1001	92.4	1.83	0.04				
	总计	166.0						



(a) FSI 处理



(b) WSI 处理



(c) COI 处理

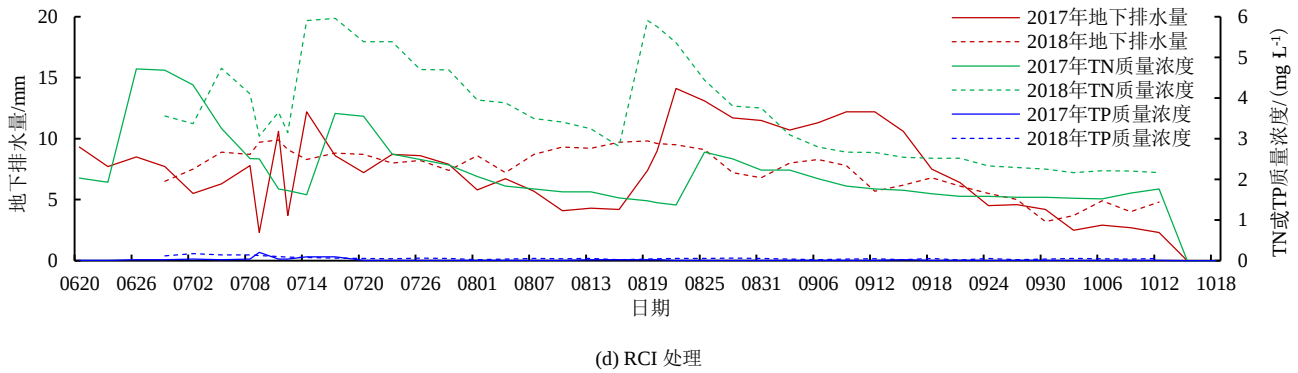


图2 不同灌溉措施下的日地下排水量和污染物质量浓度

Fig.2 Daily subsurface drainage and pollutant concentration for different irrigation measures

各处理中, COI 处理灌水上限、灌水下限和蓄水上限都较低, 使得田间水层较薄或没有, 同时水层存蓄的时间较短, 因此全生育期内其地下渗漏量最小, 年均值为 267.8 mm, 其次是 RCI、WSI、FSI 处理, 年均值依次为 304.6、365.4、411.1 mm。同样地, 2017 年地下排水中 TN、TP 淋失质量浓度分别在 0.41~4.71、0.0~0.2 mg/L 之间波动, 较 2018 年明显减小 (1.01~5.96、0.02~0.2 mg/L), 且各处理中 RCI 处理 TN 淋失质量浓度普遍较高 (1.37~5.96 mg/L)。综合

可知, 地下渗漏是稻田排水的主要方式, 且以 TN 淋失为主。总体而言, RCI 处理排水量最小, 年均值仅为 387.6 mm, 比 FSI、WSI、COI 处理依次减少 34.7%、33.6%、22.0%; RCI 处理 TN、TP 淋失量最小, 其次是 FSI、WSI、COI 处理。

2.2 灌溉措施对稻田灰水足迹的影响

基于灰水足迹的定义, 其在一定程度上反映了水体污染物的淋失状况。表 3 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下由地表排水产生灰水足迹的变化过程。

表3 2017—2018 年由地表排水和化肥浸出造成的灰水足迹

Table 3 Grey water footprint (GWF) caused by surface drainage and fertilizer leaching in 2017—2018

处理	2017 年				2018 年			
	日期	GWF^N/mm	GWF^P/mm	GWF/mm	日期	GWF^N/mm	GWF^P/mm	GWF/mm
FSI	0709	302.7	6.6	309.3	0715	238.1	61.0	299.1
	0714	0.8		0.8	0818			
	0820							
	1005							
	总计	303.6	6.6	310.2	总计	238.1	61.0	299.1
WSI	0709	361.0	25.3	386.3	0705	200.5	36.0	236.5
	0714				0706	107.3		107.3
	1001				0818			
	1005							
	总计	361.0	25.3	386.3	总计	307.8	36.0	343.8
COI	0709	372.8	8.7	381.5	0705	250.1	39.2	289.3
	0820				0706	87.2		87.2
	0911	11.4	0.0	11.4	0817			
	1001							
	总计	384.2	8.7	392.8	总计	337.3	39.2	376.5
RCI	0709	198.0	18.4	216.4				
	1001							
	总计	198.0	18.4	216.4				

2017 年水稻生育期内产生了大量的地表排水, 各灌溉措施下 GWF^N 均较 2018 年高, 但 GWF^P 却正好相反, 这是因为 2017 年地表排水中 TP 的质量浓度普遍较低, 甚至没有达到磷源污染物的环境最大容许质量浓度 (0.2 mg/L)。然而, TN 淋失质量浓度明显大于 TP, 使 GWF^N 所占比例较大 (79.6%~97.8%),

GWF 在年际间的变化规律和 GWF^N 相同。各处理中, RCI 处理地表排水最少, 其产生 GWF 最小, 年均值仅为 108.2 mm, 其次是 FSI、WSI、COI 处理, 依次相差 64.5%、70.4%和 71.9%。同样, 图 3 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下由地下排水产生灰水足迹的变化过程。由图 3 可知, 2017 年 FSI、WSI、COI、

RCI 处理下每日最大地下灰水足迹分别为 9.51、7.71、8.36、11.5 mm，由于环境最大容许质量浓度的限制，FSI、WSI、COI、RCI 处理地下灰水足迹大于 0 的天数分别占整个生育期的 34.1%、11.4%、18.2%和 40.9%，而 2018 年各处理地下灰水足迹日最大峰值较 2017 年明显增大（14.86、13.66、10.86、20.26 mm）。综合以上分析，表 4 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下水稻全生育期作物灰水足迹显著性分析结果。由表 4 可知，2018 年稻田地下排水产生的灰水足迹较 2017 年大，其中 WSI 处理最为明显，灰水足迹比 2017 年增加了 634.6%，其次是 COI、RCI、FSI 处理。各处理

中，由于 COI、WSI 处理地下排水较少，其产生的灰水足迹较小，2 a 均值分别为 46.5、55.5 mm；RCI 处理地下灰水足迹 2 a 均值最大，与其相比，FSI、WSI、COI 处理地下灰水足迹 2 a 均值分别小 50.5%、66.3%和 71.8%。但总体而言，2017、2018 年水稻灰水足迹变化范围分别为 279.1~409.2、267.1~453.2 mm，且各处理中灰水足迹均呈 COI 处理>WSI 处理>FSI 处理>RCI 处理的规律。此外，TN 淋失是稻田灰水足迹的主要来源，地表排水是其主要产生方式，且 RCI 处理是产生灰水足迹最小的灌溉措施，更有利于减轻水稻生产对水环境的污染。

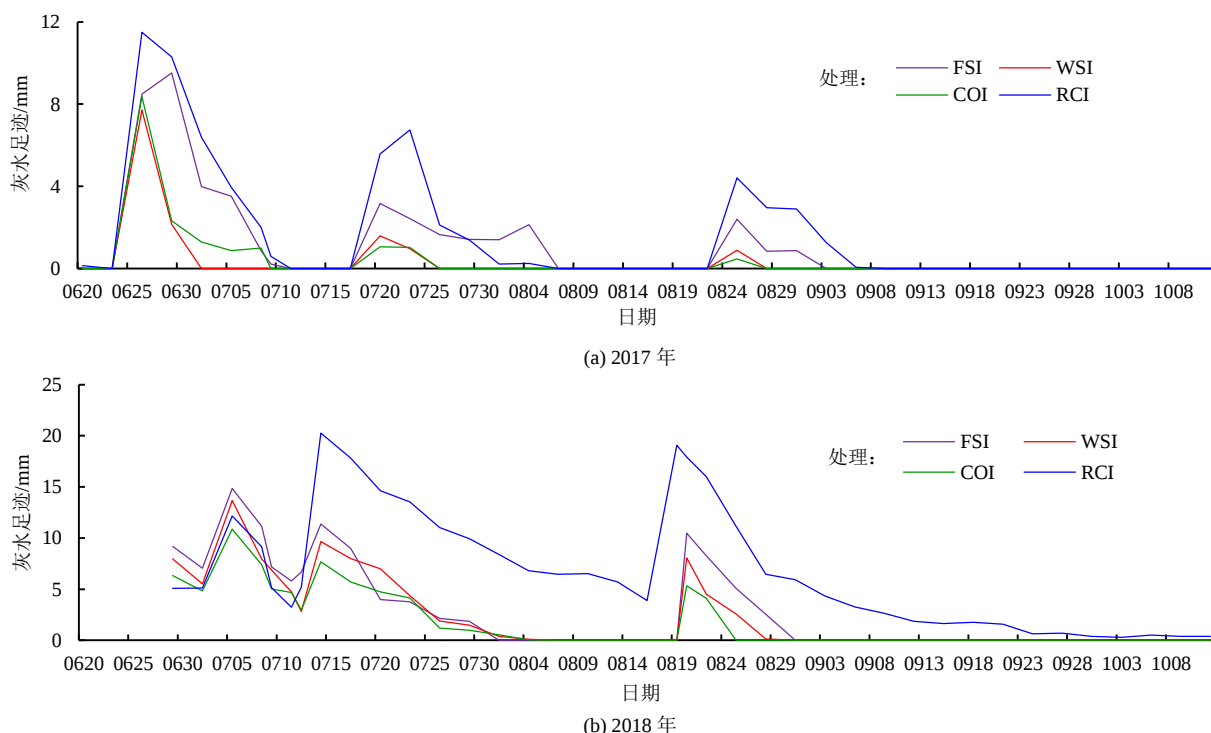


图 3 2017—2018 年地下排水灰水足迹

Fig.3 Grey water footprint caused by subsurface drainage in 2017–2018

表 4 不同灌溉措施下全生育期作物灰水足迹

Table 4 Crop grey water footprint under different irrigation measures

处理	2017 年			2018 年		
	地上	地下	GWF/mm	地上	地下	GWF/mm
FSI	310.2 ^b	42.8 ^b	353.0 ^b	299.1 ^c	120.4 ^b	419.6 ^b
WSI	386.3 ^a	13.3 ^c	399.6 ^a	343.8 ^b	97.7 ^c	441.5 ^a
COI	392.8 ^a	16.4 ^c	409.2 ^a	376.5 ^a	76.6 ^d	453.2 ^a
RCI	216.4 ^c	62.7 ^a	279.1 ^c	0 ^d	267.1 ^a	267.1 ^c

注 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($p<0.05$), 下同。

2.3 灌溉措施对稻田水分利用效率的影响

图 4 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施下水稻生产的作物水足迹组成比例，分析水足迹的组成有助于水资源的分类管理，了解其影响因素。由图 4(a)可知，2017 年各处理水足迹组成比例波动明显，其中灰水足迹比例均超过 37%，COI 处理下更是达到 54.0%，这与其蓄水上限最小、排水量大密不可分，而蓝水足

迹比例最小，仅占 6.0%~23.0%。各处理中，FSI、WSI、COI 处理水足迹的组成成分大小一致，灰水足迹是最主要的，其次是绿水足迹，最后是蓝水足迹，而 RCI 处理则表现为：绿水足迹>灰水足迹>蓝水足迹，这是因为 RCI 处理下蓄水上限较大，排水较少，能够较大可能的将生育期内绿水资源存蓄在稻田中。由图 4(b)可知，2018 年各处理水足迹组成成分变化规律与 2017 年保持一致，蓝水足迹比例仍为最小，但均有小幅度的上升，这是由于 2018 年降水较少，增加了作物对灌溉水的需求。综合以上分析，就水足迹组成而言，蓝水足迹比例最小，仅占 6.0%~24.0%，绿水足迹在 31.8%~58.0%之间，充分表明降水在水稻生产中的重要程度，而灰水足迹则在 37.0%~54.0%之间，说明稻田排水中因 TN、TP 淋失而产生的水污染问题不容忽视。

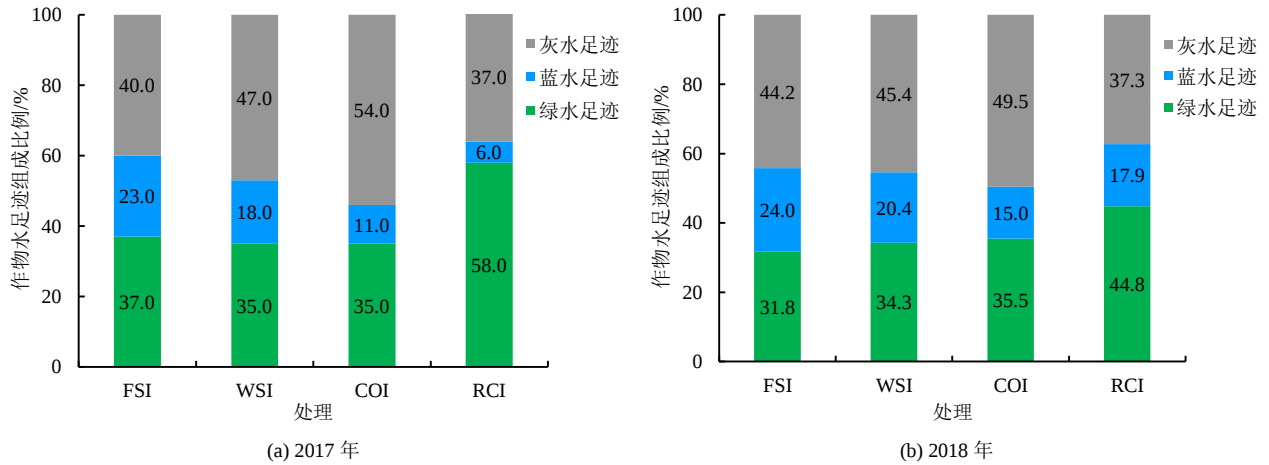


图 4 2017—2018 年水稻生产的作物水足迹构成

Fig.4 Crop water footprint (CWF) composition for rice production in 2017—2018

为探寻田间排水对稻田水分利用效率的影响,表 5 为 2017—2018 年 4 种灌溉措施对作物产量和水稻生产用水效率的显著性分析结果。由表 5 可知,水稻产量的变化范围为 7 950.8~9 811.1 kg/hm², RCI 处理下最小,年均值为 8 093.8 kg/hm²,其次是 FSI 处理,年均值为 8 619.3 kg/hm²。一般来说,作物生长的关键时期水分消耗较大,降水常难以满足田间耗水需求。由于 FSI、WSI 处理灌水上限和灌水下限均较大,使得稻田内经常保有一定的水层,因此其蒸发蒸腾量较 RCI、COI 处理显著增加。与年均值最小的 RCI 处理 (449.6 mm) 相比,FSI、WSI 处理分别增加了 16.1%、12.3%。基于农业水资源评价途径,灌溉措施对各评价指标影响显著,其中作物水足迹 (CWF) 在 711.0~973.2 mm 之间波动,RCI 处理下最小,且比 FSI、WSI、COI 处理平均减少了 21.2%、23.9%和 24.2%,这主要与其灰水足迹最小有关;而作物水分利用效率 (WUE) 变化范围为 1.581~2.087 kg/m³,且 COI 处理下最大,年均值为 2.016 kg/m³,而 FSI 处理最小,

年均值仅为 1.651 kg/m³,这是由 COI 处理下产量较高和蒸发蒸腾量较低共同决定的。对于灌溉水分生产率 (IWP),其由大到小依次是 COI、RCI、WSI、FSI 处理,年均值分别为 6.657、6.312、4.643、3.788 kg/m³,且 RCI、WSI、FSI 处理分别比 COI 处理平均减小 5.2%、30.3%、43.1%,这是因为 COI、RCI 处理下灌水上限和灌水下限均较小,使得生育期内灌水较少,从而降低了作物对灌溉水的消耗。同样地,灌溉措施对作物生产水足迹 (WFP) 影响显著,由于 RCI 处理下作物水足迹显著减小,其年均值 (1.134 kg/m³) 最大,而 FSI 处理最小,年均值仅为 0.952 kg/m³,二者相差 19.1%;而对于水资源系数 (WRE),RCI 处理年均值为 0.405,较其他处理显著增大,其次是 FSI、WSI、COI 处理,分别比 RCI 处理降低了 14.1%、17.3%、19.3%,这与其排水量和作物水足迹均最小有关。综上可知,田间排水及其 TN、TP 淋失而产生灰水足迹是水稻生长过程中水资源消耗的重要内容,将其考虑入稻田水分利用效率评价至关重要。

表 5 2017—2018 年灌溉措施对大田作物产量和水稻生产用水效率的影响

Table 5 Effects of irrigation measures on field crop yield and water use efficiency of rice production in 2017—2018

年份	处理	产量/(kg·hm ⁻²)	ET/mm	CWF/mm	WUE/(kg·m ⁻³)	IWP/(kg·m ⁻³)	WFP/(kg·m ⁻³)	WRE
2017	FSI	8 863.8 ^c	514.2 ^a	860.6 ^c	1.724 ^b	3.896 ^d	1.030 ^b	0.313 ^b
	WSI	9 811.1 ^a	478.1 ^b	901.8 ^b	2.052 ^a	4.949 ^c	1.088 ^b	0.298 ^b
	COI	9 233.6 ^b	442.5 ^d	967.2 ^a	2.087 ^a	6.745 ^a	0.955 ^c	0.307 ^b
	RCI	7 950.8 ^d	450.3 ^c	711.0 ^d	1.766 ^b	6.201 ^b	1.118 ^a	0.372 ^a
2018	FSI	8 374.9 ^c	529.7 ^a	949.3 ^b	1.581 ^c	3.681 ^d	0.882 ^c	0.390 ^b
	WSI	8 596.8 ^b	531.7 ^a	973.2 ^a	1.617 ^c	4.337 ^c	0.883 ^c	0.376 ^c
	COI	8 994.4 ^a	461.5 ^b	914.7 ^c	1.949 ^a	6.570 ^a	0.983 ^b	0.350 ^d
	RCI	8 236.9 ^d	448.9 ^b	716.0 ^d	1.835 ^b	6.424 ^b	1.150 ^a	0.444 ^a
2017—2018	FSI	8 619.3 ^b	521.9 ^a	904.9 ^b	1.651 ^c	3.788 ^d	0.952 ^b	0.348 ^b
	WSI	9 204.0 ^a	504.9 ^a	937.5 ^a	1.823 ^b	4.643 ^c	0.982 ^b	0.335 ^b
	COI	9 114.0 ^a	452.0 ^b	941.0 ^a	2.016 ^a	6.657 ^a	0.969 ^b	0.327 ^b
	RCI	8 093.8 ^c	449.6 ^b	713.5 ^c	1.800 ^b	6.312 ^b	1.134 ^a	0.405 ^a

注 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 灰水足迹的计算

受污染物淋失量、污染物类型、土壤类型、作物

生长状况及田间水分运移过程等因素的影响,水稻生产灰水足迹存在明显差异。表 6 为以往有关水稻生产灰水足迹与本研究结果对比。

表 6 关于水稻生产灰水足迹的研究结果对比

Table 6 Comparison on the grey water footprint of rice production

相关研究	污染物	计算方法	研究区	研究时间	$GWF_g/(m^3 \cdot kg^{-1})$
Bulsink 等 ^[24]	氮肥	假定 10%氮肥流失	印度尼西亚	2000—2004	0.212
Chapagain 等 ^[25]	氮肥	假定 5%氮肥流失	中国	2000—2004	0.117
Yoo 等 ^[26]	TN、TP	参考 TN、TP 研究	韩国	2004—2009	0.048
Mekonnen 等 ^[27]	TN	假定 10%氮肥流失	全球	1996—2005	0.166
Zhuo 等 ^[28]	动物粪便	假定 10%肥料流失	黄河流域	1996—2005	5.164
徐鹏程等 ^[29]	氮肥	假设 10%氮肥损失	江苏省	2000—2010	0.190
Cao 等 ^[18]	TN	试验观测	淮安	2011—2014	0.720
Li 等 ^[30]	氮肥	—	和平灌区	—	0.137
Wu 等 ^[31]	TN	试验观测	南京	2015—2018	0.310
本文	TN、TP	试验观测	涟水	2017—2018	0.431

由表 6 可知,水稻生产灰水足迹范围为 0.048~5.164 m^3/kg ,且除 Zhuo 等^[28]和 Cao 等^[18]外,本研究中水稻生产 GWF_g 均较大。氮素是以往最为关注的稻田污染物。由于各地环境水质标准不统一,污染物最大容许限度也存在差异。Zhuo 等^[28]在估算灰水足迹时考虑了动物粪便肥料,同时他们对最大容许和天然氮质量浓度之间的差值进行了最为严格的假设($C_{max}-C_{nat}=0.8\text{ mg/L}$),而在其他研究多为 10 mg/L ,因此其 GWF_g 最大;Yoo 等^[26]同时量化了水稻生产中氮磷流失的影响,但由于设定的环境水质标准较低(N: $C_{max}-C_{nat}=40\text{ mg/L}$; P: $C_{max}-C_{nat}=4\text{ mg/L}$),其所得 GWF_g 反而最小;Chapagain 等^[25]依据欧盟硝酸盐标准,设定“50 mg/L ”的允许限度,因此其 GWF_g 也较小。然而,本研究仅关注 TN 和 TP 的淋失,而忽略了杀虫剂、除草剂、重金属等其他污染物和水体自净能力的影响, GWF_g 可能不太准确。因此,综合考虑多种污染物的共同影响仍然是精确量化作物生产灰水足迹的重点。此外,由于缺少淋溶率数据库和田间试验数据, $\alpha=10\%$ 是常用的粗略假定值。然而,这可能与实际情况不一致。为此, Yoo 等^[26]在估算 GWF_g 时参考了前人研究中水稻生产的氮磷淋失量(TN: 12.9 kg/hm^2 ; TP: 1.01 kg/hm^2); Cao 等^[18]通过现场测量证实了水稻生产水足迹评估在田间试验中的可行性,且发现氮浸出率仅为 6.2%; Wu 等^[31]基于日尺度下稻田排水中氮浓度变化计算其淋失量。然而,农业水污染主要是面源污染,结合相关水文模型计算淋失率也可以提高计算精度。

特别地, Cao 等^[18]发现作物灰水足迹受生育期降水影响,且当降水量为 400~1 000 mm 时,水稻灰水足迹在 0.63~0.96 m^3/kg 之间波动。虽然施肥量与施肥策略相同,但本研究中计算所得的 GWF_g 较小,这是

因为本试验区水稻生育期内降水量和排水量显著增加,降低了 TN、TP 的流失质量浓度。可见,改变灌排模式将有助于减轻污染物的流失,这在本研究中也得到了验证。然而,本研究参考当地农艺技术只设计了 4 种常见灌溉措施,最优化的灌排模式还有待进一步探究。

3.2 灌排模式评价指标

构建合适的指标以核算水资源消耗情况是评价农业用水效率的一般方法。基于农业水资源评价途径——“利用量-有效程度-产出能力”,表 5 中 ET 、 WUE 和 IWP 是以往常用的评价指标。根据本文的研究结果,高耗水和氮磷污染是限制水稻发展的重要挑战。然而,这与稻田排水密切相关。 ET 表征作物生产水资源的有效消耗量,却忽略了排水中氮磷等污染物对水环境的负面影响。降水和灌溉水是作物生产水分消耗的直接来源,但由于天然降水的机会成本相比灌溉水低,减少灌溉水的投入量或提高灌溉水分生产率(IWP)是以往水稻节水研究的主要途径^[32-34]。虽然, WUE 核算了单位广义水资源消耗的作物产量,但没有区分蓝水、绿水资源属性和各自发挥的作用。此外,选择合理的灌排措施将有助于水稻节水高产,降低氮磷流失污染。然而,由于评价指标的限制,有关水稻节水和减污的研究常是单独进行^[23, 35]。基于水足迹的框架,蓝水、绿水足迹对应作物蒸发蒸腾量(ET)的同时还表明水稻生育期内 31.8%~58.0%的水分消耗是来自降水资源,而灌溉水仅为 6.0%~24.0%,且通过降低蓝水足迹可以减少作物需水量。显然,这将有助于水资源的分类管理。特别地,基于灰水足迹,它不仅衡量了稀释稻田排水中污染物使其达到环境标准所需的水量,而且通过降低其在作物水足迹的组成比例就可以反映水稻的减污效果。综上所述,水足迹

理论将稻田氮磷淋失的污染水量统一于作物水分消耗之中,不仅可以更全面地描述水稻生产中广义水资源与真实水资源耗用之间的关系,而且为稻田节水减污的综合评价提供了便利。

4 结 论

1) 地下渗漏是稻田排水的主要方式, TN 是水稻生产的主要污染物, 且蓄水控灌下排水次数和排水量均为最少, 有利于在节省田间劳作成本的同时降低肥料流失的可能性。

2) 地表排水是稻田产生灰水足迹的主要途径, 且蓄水控灌下水稻对水环境的污染显著减少。就水足迹组成而言, 蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹的组成比例分别为 6.0%~24.0%、31.8%~58.0%、37.0%~54.0%, 说明水稻生产的降水利用和污染问题不容忽视。

3) 根据农业水资源评价途径, 蓄水控灌下水稻作物水足迹最小(利用量), 水资源系数(有效程度)和作物生产水足迹(产出能力)均为最高。因此, 综合考虑灰水足迹和水分利用效率下, 蓄水控灌是促进水稻节水减污的最优灌溉措施。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王矿, 袁先江, 曹秀清, 等. 深蓄控排条件下稻田土壤水氮变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 40-48.
WANG Kuang, YUAN Xianjiang, CAO Xiuqing, et al. Variation in paddy soil nitrogen as impacted by combination of deep rainfall storage and controlled drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 40-48.
- [3] 韩焕豪, 刘鑫焱, 高蓉, 等. 水稻再生水灌溉下的节水减排效果[J]. 节水灌溉, 2021(12): 43-49.
HAN Huanhao, LIU Xinyan, GAO Rong, et al. Effect of water saving and emission reduction under reclaimed water irrigation of rice[J]. Water Saving Irrigation, 2021(12): 43-49.
- [4] SHAO G C, WANG M H, YU S G, et al. Potential of controlled irrigation and drainage for reducing nitrogen emission from rice paddies in Southern China[J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015: 913-917.
- [5] AZIZ O, HUSSAIN S, RIZWAN M, et al. Increasing water productivity, nitrogen economy, and grain yield of rice by water saving irrigation and fertilizer-N management[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(17): 16 601-16 615.
- [6] HOEKSTRA Arjen Y, CHAPAGAIN Ashok K, ALDAYA Maite M, et al. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] ABABAEI B, RAMEZANI ETEDALI H. Water footprint assessment of main cereals in Iran[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 401-411.
- [8] LOVARELLI D, BACENETTI J, FIALA M. Water Footprint of crop productions: A review[J]. Science of the Total Environment, 2016, 548/549: 236-251.
- [9] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6 647-6 654.
ZHANG Yu, LI Yunkai, OUYANG Zhiyun, et al. The grey water footprint of the winter wheat-summer maize crop rotation system of the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6 647-6 654.
- [10] WU P T, WANG Y B, ZHAO X N, et al. Spatiotemporal variation in water footprint of grain production in China[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2015, 2(2): 186.
- [11] WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 497/498: 1-9.
- [12] 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 184-192.
FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184-192.
- [13] LE ROUX B, VAN DER LAAN M, VAHRMEIJER T, et al. Establishing and testing a catchment water footprint framework to inform sustainable irrigation water use for an aquifer under stress[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 1 119-1 129.
- [14] DUAN P L, QIN L J, WANG Y Q, et al. Spatial pattern characteristics of water footprint for maize production in Northeast China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(2): 561-568.
- [15] 韩宇平, 张嘉晟, 代小平, 等. 灌区粮食生产水足迹的影响因素研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(2): 42-46.
HAN Yuping, ZHANG Jiayu, DAI Xiaoping, et al. Study on factors impacting water footprint of grain production of irrigation area[J]. Yellow River, 2017, 39(2): 42-46.
- [16] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651-660, 669.
WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660, 669.
- [17] PERRY C. Water footprints: Path to enlightenment, or false trail? [J]. Agricultural Water Management, 2014, 134: 119-125.
- [18] CAO X C, WU M Y, SHU R, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 84-93.
- [19] 操信春, 任杰, 吴梦洋, 等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1-8.
CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 1-8.
- [20] 操信春, 邵光成, 王小军, 等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 14-21.
CAO Xinchun, SHAO Guangcheng, WANG Xiaojun, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: A case study of grain production in China[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 14-21.
- [21] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1 189-1 198.
CAO Xinchun, CUI Simeng, WU Mengyang, et al. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1 189-1 198.
- [22] CAO X C, SHU R, REN J, et al. Variation and driving mechanism analysis of water footprint efficiency in crop cultivation in China[J].

- Science of the Total Environment, 2020, 725: 138-537.
- [23] 彭世彰, 张正良, 罗玉峰, 等. 灌排调控的稻田排水中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21-26.
- PENG Shizhang, ZHANG Zhengliang, LUO Yufeng, et al. Variation of nitrogen concentration in drainage water from paddy fields under controlled irrigation and drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 21-26.
- [24] BULSINK F, HOEKSTRA A Y, BOOIJ M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1): 119-128.
- [25] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. Ecological Economics, 2011, 70(4): 749-758.
- [26] YOO S H, CHOI J Y, LEE S H, et al. Estimating water footprint of paddy rice in Korea[J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(1): 43-54.
- [27] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment[J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 214-223.
- [28] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961—2009)[J]. Advances in Water Resources, 2016, 87: 29-41.
- [29] 徐鹏程, 张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 232-237.
- XU Pengcheng, ZHANG Xingqi. Study on water footprint of main crops production in Jiangsu Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 232-237.
- [30] LI X C, CHEN D, CAO X C, et al. Assessing the components of, and factors influencing, paddy rice water footprint in China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 229: 105-939.
- [31] WU M Y, CAO X C, GUO X P, et al. Assessment of grey water footprint in paddy rice cultivation: Effects of field water management policies[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127-876.
- [32] 刘广明, 杨劲松, 姜艳, 张秀勇. 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.
- 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.
- [33] 刘路广, 崔远来, 吴瑕. 考虑回归水重复利用的灌区用水评价指标[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 522-528.
- LIU Luguang, CUI Yuanlai, WU Xia. Water use assessment indices under the influence of return flows in irrigation districts[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 522-528.
- [34] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 169-177.
- [35] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 1-3, 7.
- GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 1-3, 7.

Effect of Irrigation on Footprint of Grey Water and Water Use Efficiency of Paddy Fields

XIAO Jianfeng¹, WU Mengyang¹, TANG Shuhai², CAO Xinchun^{1*}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Lianshui Water Conservancy Research Institute, Huaian 223200, China)

Abstract: 【Objective】 Improving irrigation water use efficiency is important in developing sustainable agriculture. Taking paddy field as an example, this paper investigates how to achieve this goal via irrigation optimization.

【Method】 The study is based on changes in water and fertilizers measured in 2017—2018 from fields under four different irrigation methods: frequent-shallow irrigation (FSI), wet-shallow irrigation (WSI), controlled irrigation (COI), rain-catching and controlled irrigation (RCI). For each irrigation, we calculate its impact on drainage, grey water footprint (GWF), and water use efficiency combined with grey water footprint (WF). **【Result】** Drainage from different treatment ranged from 387.6 to 593.7 mm, with RCI and COI draining the least and highest water, respectively. The annual average GWF of FSI, WSI, COI and RCI is 386.3, 420.6, 431.2 and 273.1 mm, respectively. The percentage of blue, green, and gray water in all treatments is in the range of 6.0%~24.0%, 31.8%~58.0%, 37.0%~54.0%, respectively, with the RCI giving the greatest green footprint and least blue print. **【Conclusion】** Comparing traditional method and the proposed WF framework reveals that it is crucial to considering both drainage and GWF in evaluating water use efficiency of the paddy fields. For the four irrigation methods we compare, RCI is most efficient for paddy fields in the region we studied.

Key words: grey water footprint; water use efficiency; irrigation measure; water saving and pollution reduction; paddy

责任编辑：白芳芳