

南方平原区水肥调控下水稻节水减排效应研究

肖新¹, 邹志科², 陈燕飞¹, 罗文兵^{2*}, 李亚龙²,
杨子荣¹, 邹传林³, 邓海龙⁴, 付桃秀⁴

(1.长江大学, 武汉 430100; 2.长江科学院, 武汉 430010;
3.桂林理工大学, 广西 桂林 541006; 4.江西省灌溉试验中心站, 南昌 330201)

摘要:【目的】揭示南方平原区水肥调控下的水稻节水减排效应。【方法】基于田间试验, 设置传统淹灌(W0)和间歇灌溉(W1)2种灌溉模式, 不施氮(N0)、减量施氮(N1, 135 kg/hm²)及常规施氮(N2, 180 kg/hm²)3种施氮水平, 分析不同水肥调控方案下的水稻节水、增产、控污和减排效应。【结果】灌溉模式影响水稻灌水量、渗漏量和排水量, W1模式相比W0模式下的水稻灌水量减少18.12%~28.37%, 渗漏量减少13.68%~22.85%, 平均节水28.77%。在N1、N2施氮水平下, W1处理相比W0处理的水稻平均增产分别达到16.57%与29.94%。与W0模式相比, W1模式下的TN排放负荷量平均减少25.67%。同一灌溉模式下, TN排放负荷量随着施氮量的增加而增加。施氮水平对氨挥发总量有显著影响, 而灌溉模式和水肥交互作用对氨挥发总量的影响不显著。【结论】最优的水肥交互模式为W1N1处理, 相对于当地传统模式可使水稻增产9.82%, 节水27.54%, 控污25.67%, 减排11.90%。

关键词: 节水减排; 水肥交互; 氨挥发; 稻田; 灌溉模式

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022409

OSID:



肖新, 邹志科, 陈燕飞, 等. 南方平原区水肥调控下水稻节水减排效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 67-73.

XIAO Xin, ZOU Zhike, CHEN Yanfei, et al. Improveing Irrigation and Fertilization to Reduce Water Usage and Nitrogen Pollution from Rice Fields in Southern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 67-73.

0 引言

【研究意义】水稻作为中国四大粮食作物之一, 主要种植范围为东北地区和南方地区。其中, 长江中下游地区作为重要的水稻生产基地, 对于保障中国水稻稳产具有重要意义。2020年, 中国稻谷播种面积为3 007.6万hm², 占粮食播种总面积的25.76%, 其中南方地区稻谷播种面积占全国的70.89%^[1]。灌溉用水量占中国农业用水总量的70%, 占中国总用水量的50%^[2]。由于南方地区降水量丰富, 水稻灌溉方式粗放的情况普遍存在, 且大多采用淹水灌溉, 水稻灌溉水有效利用率仅为40%^[3]。此外, 南方降水的时序分布往往与稻田施氮期吻合, 由此引发大量的农田氮、磷非点源污染。水资源高效利用和农业面源污染治理的关键是“节水减排”, 通过对稻田水循环和面源污染迁移转化规律进行研究, 挖掘水稻主产区的稻田节水潜力, 提出适宜于南方稻田自身特性的节水减排调

控策略, 对于提高南方地区水肥利用效率、推进长江经济带生态保护与高质量发展具有重要的现实意义。

【研究进展】关于水稻节水灌溉及水肥调控机理已有一定研究基础。郑世宗等^[4]研究表明, 与传统灌溉相比, 薄露灌溉等节水灌溉技术有利于降低稻田排水过程中的氮、磷等污染物的排放浓度。崔远来等^[5]对南方地区水肥管理下水稻节水减排效果进行了研究, 认为适宜的水肥调控模式可减少稻田氮素排放, 提高水肥利用效率。在不同地区采用控制灌溉技术可在一定程度上提高水稻产量^[6-8]。通过控制排水可减少田间氮素流失, 提高氮肥利用效率^[9-11]。针对稻田氮损失, 除了田间排水和渗漏流失外, 氨挥发也是重要的损失途径之一。据统计, 2016年因稻田氨挥发而流失的氮素总量占稻田施氮总量的11.8%±2.0%^[12-13]。

【切入点】以往研究多集中于节水灌溉及水肥调控下的水稻节水、增产、控污机理, 而针对氨挥发减排效应的研究较少, 尚未阐明水稻节水减排的综合效应, 没有系统地提出适应于南方水稻灌区特点的水肥调控模式。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究在鄱阳湖流域的江西省灌溉试验中心站开展了水稻水氮调控田间试验, 研究不同水肥调控模式下的水稻节水、增产、控污和减排效应, 在此基础上优选出田间

收稿日期: 2022-07-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中华人民共和国水利部—中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目(U2040213); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(CKSF2019251/NY, CKSF2021299/NY)

作者简介: 肖新(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

E-mail: x18226260094@163.com

通信作者: 罗文兵(1986-), 男, 博士, 研究方向为农业水管理。

E-mail: luowenbing2005_0@126.com

水氮高效模式,为鄱阳湖流域稻田水肥高效管理和农业面源污染防治提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验在江西省灌溉试验中心站(115°58'E, 28°26'N)开展。该区域属于典型的亚热带湿润季风性气候区,年平均降水量为1 634 mm,多集中于4—6月,降水量约占全年降水量的46.1%。多年平均气温为18.1℃,年平均日照时间为1 720 h。试验区内耕层土壤厚度在15~20 cm之间,土壤类型为水稻土,土壤质地为粉壤土,土壤体积质量为1.36 g/cm³,有机质、全氮、全磷、全钾的质量分数分别为1.74%、0.82%、0.25%和1.18%。试验站的气象、地形地貌、土壤条件和水稻种植、灌溉制度在鄱阳湖流域具有一定代表性。

表1 不同灌溉模式下的田间水层控制标准

Table 1 Field water depth thresholds in different irrigation methods

灌溉模式	灌前下限-灌后上限-蓄水上限/mm						
	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
间歇灌溉	0-20-30	85%-20-50	65%-70%-20-50 后期晒田	90%-20-50 干4 d	90%-20-50 干4 d	85%-20-50 干4 d	65%-20-30 后期落干
淹水灌溉	20-40-40	20-50-50	20-50-50 后期晒田	20-50-50	20-50-50	20-50-50	0-30-30 后期落干

注 间歇灌溉的灌前下限为占土壤饱和含水率的百分比。

表2 不同水肥组合

Table 2 Different water and fertilizer treatment combinations

处理	灌水模式	施氮水平	处理	灌水模式	施氮水平
W0N0*	W0	NO	W1N0*	W1	NO
W0N1	W0	N1	W1N1	W1	N1
W0N2	W0	N2	W1N2	W1	N2

注 *表示2020年未设置该处理。

表3 田间水肥管理

Table 3 Field water and fertilizer management

年份	品种	插秧	基肥	蘖肥	穗肥	氮肥比例	钾肥比例	收割时间	灌水次数 (淹灌/间灌)	排水 次数
2019	黄华占	0618	0617	0701	0723	基:蘖:穗= 5:3:2	基:穗= 44%:55%	0917	12/9	8
2020	黄华占	0616	0615	0627	0721			0924	8/7	17
2021	黄华占	0627	0626	0708	0804			1009	9/7	4

1.3 样品采集和分析

降水量通过气象站观测;灌水量通过水表计量;排水量根据排水前后田间水层深度的差值计算;田间耗水量通过观测逐日(每日08:00)水层变化量进行差值计算,灌水或排水时加测;深层渗漏量通过安装钢板测渗筒,筒内安装有铁钎,于每日08:00用水文测针观测测渗筒内的水深变化,再通过每日水深差计算得出。逐日田间耗水量减去逐日田间渗漏量得到水稻需水量。

在排水、生育期末和施氮后的1、3、5、7、9 d进行水稻田面水和土壤水取样,测定总氮、总磷、铵

1.2 试验设计

于2019—2021年开展水稻(品种为“黄占华”)田间小区试验,各小区长8 m,宽3.5 m。小区田埂(高度为80 cm)和排水沟田埂均使用塑料膜包裹隔开,以防止各小区之间发生串水串肥。

试验设置传统淹水灌溉(W0)和间歇灌溉(W1)2种灌溉模式(灌溉水层标准见表1),不施氮(N0)、减量施氮(N1,135 kg/hm²)和常规施氮(N2,180 kg/hm²)3种施氮水平(以纯氮计),共计6个处理(表2)。由于场地限制,2019—2021年的W1N0处理和W0N0处理不设置重复小区(但在小区内进行3次重复取样),其余处理均设置3个重复小区,共计14个小区。其中,2020年未设W1N0处理和W0N0处理,其他处理与2019年和2021年的情况相同,各小区采取随机区组排列的方式设计。其他田间管理措施与当地一致。田间水肥管理见表3。

态氮和硝态氮质量浓度。每个生育阶段采集一次植株样,进行茎、叶、穗分离和干物质质量测定,烘干后的水稻植株采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、凯氏定氮仪法(NY/T 2419—2013)测量全氮量。收获前1天在小区中取3个1 m²的区域开展水稻测产。采用通气法^[14]测量稻田氨挥发量,施氮后7 d内每天取样1次,后期每1~3 d取样1次,拔节孕穗期后延长到5 d取样1次,直到水稻收获取样结束。氨挥发速率计算式为^[15]:

$$V = \left(\frac{M}{A} \right) \times 0.1, \quad (1)$$

式中:V为田间单位面积单位时间内的铵态氮挥发量(kg/(hm²·d));M为海绵1 d内捕获的氨氮量(μg/d);

A 为玻璃圆筒的横截面积 (cm^2)。

田间排水及渗漏流失氮素负荷量计算式为：

$$T = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_i \times 0.01, \quad (2)$$

式中： T 为氮素流失量 (kg/hm^2)； i 、 n 分别为水稻生育期日序号和全生育期天数； C_i 为第 i 日所取田面水、土壤水中氮素浓度 (mg/L)； Q_i 为第 i 日田间排水量或渗漏量 (mm)。

采用 Excel 和 SPSS 21.0 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水肥调控的节水效应

2019—2021 年稻田水量平衡要素计算和显著性分析见表 4—表 6，表中相对误差在 20% 左右，满足

计算精度要求。通过显著性分析得到灌溉模式是影响稻田水量平衡要素的主要因素，对 3 a 灌水量的影响均达到显著性水平，并对 2019、2020 年的排水量和 2020、2021 年的渗漏量产生显著影响，而施氮水平仅在 2021 年对渗漏量产生影响，水氮交互效应则对水量平衡要素的影响均不显著。间歇灌溉下的 3 a 平均灌水量和渗漏量均小于淹水灌溉，且在 2020 年和 2021 年达到显著水平。间歇灌溉模式下的排水量均小于淹水灌溉，且在 2019 年和 2020 年达到显著水平。

在 3 a 试验中，间歇灌溉模式相比淹水灌溉模式的田间灌水量、排水量和渗漏量均有所减少，减少比例分别为 25.98%、16.03% 和 8.43%。可见，间歇灌溉模式的稻田节水效果显著，与崔远来等^[16]和许怡等^[17]的研究结论一致。

表 4 2019 年不同水肥处理下的水量要素

Table 4 Water balance table of different water-fertilizer treatments during the whole growth period of rice in 2019

处理	降水量/mm	灌水量/mm	补给量 (降水量+灌水量)/mm	排水量/mm	耗水量/mm	渗漏量/mm	腾发量/mm	排泄量(排水量+ 耗水量+渗漏量+ 腾发量)/mm	相对误差/%
W0N0		498.00a	674	164.9a	554.6a	104.3d	450.3	719.5	-6.75
W0N1		518.90a	669.8	154.5ab	675.6ab	149.7c	525.9	830.1	-23.93
W0N2	225.9	510.93a	683.1	125.9b	717.2a	172.1ab	545.1	843.1	-23.42
W1N0		345.21c	436	150.8ab	539.0ab	158.8bc	380.2	689.8	-58.21
W1N1		360.46c	480.4	124.8b	607.7b	183.6a	424.1	732.5	-52.48
W1N2		388.70b	562	93.2c	625.2b	165.3abc	459.9	718.4	-27.83
W		0.022*	-	0.005**	0.177ns	0.302ns	-	-	-
N		0.347ns	-	0.182ns	0.130ns	0.145ns	-	-	-
W×N		0.663ns	-	0.571ns	0.879ns	0.491ns	-	-	-

注 同列数据后不同字母的处理在 LSD 检验下差异显著 ($P<0.05$)，**： $P<0.01$ ，*： $P<0.05$ ，ns：不显著。下同。

表 5 2020 年不同水肥处理下的水量要素

Table 5 Water balance table of different water-fertilizer treatments during the whole growth period of rice in 2020

处理	降水量/mm	灌水量/mm	补给量 (降水量+灌水量)/mm	排水量/mm	耗水量/mm	渗漏量/mm	腾发量/mm	排泄量(排水量+ 耗水量+渗漏量+ 腾发量)/mm	相对误差/%
W0N1		419.5b	1 168.5	306.5ab	822.6a	205.1ab	617.5	1 129.1	3.37
W0N2	749	317.3ab	1 066.3	333.8b	731.6a	202.7b	528.9	1 065.4	0.08
W1N1		289.4a	1 038.4	278.8ab	743.9a	178.2a	565.7	1 022.7	1.51
W1N2		313.9ab	1 062.9	258.2a	744.2a	173.8ab	570.4	1 002.4	5.69
W		0.005**	-	0.039*	0.892ns	0.015*	-	-	-
N		0.252ns	-	0.876ns	0.266ns	0.688ns	-	-	-
W×N		0.065ns	-	0.285ns	0.213ns	0.927ns	-	-	-

表 6 2021 年不同水肥处理下的水量要素

Table 6 Water balance table of different water-fertilizer treatments during the whole growth period of rice in 2021

处理	降水量/mm	灌水量/mm	补给量 (降水量+灌水量)/mm	排水量/mm	耗水量/mm	渗漏量/mm	腾发量/mm	排泄量(排水量+ 耗水量+渗漏量+ 腾发量)/mm	相对误差/%
W0N0		482.1ab	933.5	85.4a	794.9a	234.1a	560.8	880.3	5.70
W0N1		386.2ab	837.6	65.3a	719.5a	238.5a	481	784.8	6.30
W0N2	451.4	502a	953.4	83.2a	650.2a	193.9b	456.3	733.4	23.08
W1N0		307.6ab	759	59.4a	649.8a	149.7c	500.1	709.2	6.56
W1N1		354b	805.4	57.7a	618.0a	176.1b	441.9	675.7	16.10
W1N2		331ab	782.4	85.1a	673.1a	188.4b	484.7	758.2	3.09
W		0.021*	-	0.342ns	0.224ns	0.005**	-	-	-
N		0.075ns	-	0.113ns	0.189ns	0.011*	-	-	-
W×N		0.064ns	-	0.219ns	0.726ns	0.057ns	-	-	-

2.2 水肥调控的增产效应

2019—2021 年不同水肥处理下的水稻产量和显著性分析结果见表 7。施氮水平和水肥交互效应对水稻产量的影响在 3 a 内均达到显著水平,表明施氮会显著影响水稻产量, N1、N2 处理与 N0 处理之间存在显著差异,而灌溉方式对水稻产量的影响在 2020 年达到极显著水平。

表 7 2019—2021 年不同处理水稻产量对比

处理	2019 年	2020 年	2021 年
W0N0	394.37b	-	473.75abc
W0N1	507.47±91a	396.58±32bc	572.79±30ab
W0N2	538.89±10a	383.67±22c	561.96±19ab
W1N0	382.72b	-	439.41±c
W1N1	535.38±12a	462.30±14ab	590.41±125a
W1N2	541.35±25a	498.53±82a	620.07±48a
W	0.834ns	<0.001**	0.119ns
N	<0.001**	<0.001**	<0.001**
W×N	<0.001**	<0.001**	<0.001**

相同灌溉模式下, 3 a 水稻产量表现为 N2 处理>N1 处理>N0 处理。相同施氮水平下, 间歇灌溉模式下的产量均高于淹水灌溉, 平均增产 6.20%。增施氮肥和间歇灌溉可以增加水稻产量, 这与孙雪梅等^[18]的研究结论一致。

表 8 不同处理下稻田氮素排放负荷量

处理	2019 年			2020 年			2021 年		
	地表水	渗漏水	总计	地表水	渗漏水	总计	地表水	渗漏水	总计
W0N0	1.32c	0.41c	1.73	-	-	-	1.14b	2.10ab	3.24
W0N1	20.82±2.00ab	4.59±1.09b	25.41±3.09	31.57±1.98b	2.25±0.55b	33.82±2.54	2.36±1.91a	3.74±2.29a	6.10±4.21
W0N2	23.46±3.56a	5.87±3.43b	29.33±7.00	41.53±2.93b	5.42±0.19a	46.95±3.11	0.18±0.19b	2.22±0.39b	2.40±0.59
W1N0	5.29c	0.51c	5.8	-	-	-	1.64ab	2.56ab	4.2
W1N1	18.21±4.15b	2.84±2.23a	31.05±6.38	29.74±1.97b	1.55±0.13c	31.29±2.10	0.49±0.94ab	1.59±0.99ab	2.08±1.93
W1N2	20.25±1.50ab	5.18±3.07a	35.43±4.57	33.31±2.39a	4.99±0.48a	38.30±2.87	0.90±0.29ab	2.26±0.57ab	3.16±0.86
W	0.603ns	<0.001**		0.003**	0.016*		0.608ns	0.683ns	
N	<0.001**	<0.001**		0.002**	<0.001**		0.131ns	0.303ns	
W×N	0.048*	0.012*		0.058ns	0.203ns		0.062ns	0.166ns	

2.4 水肥调控的减排效应

在文献[20]的基础上增加了 2021 年氨挥发的观测试验。对 3 a 稻季氨挥发累积量、各生育阶段氨挥发量进行显著性分析(表 9)。间歇灌溉模式下的稻季氨挥发量大于淹水灌溉模式,但差异不显著,这与前人^[21-22]所得结论一致。施氮水平对稻田氨挥发量的影响显著,且稻田氨挥发量随着施氮量的增加而增加,

2.3 水肥调控的控污效应

不同处理下的地表排水和渗漏的氮素负荷量见表 8。灌溉模式对前 2 a 的渗漏水中的氮素负荷量和 2020 年的地表水氮素负荷量的影响达到显著水平,施氮水平对 2019、2020 年地表水和渗漏水氮素负荷量的影响均达到极显著水平。水肥交互在 2019 年对地表水和渗漏水氮素负荷量具有显著影响。

稻季地表排水的氮素流失负荷量最大的是 W0N2 处理,流失量为 21.72 kg/hm²,占施氮量的 12.07%,而地表排水中氮素流失负荷量最小的是 W1N1 处理,流失量为 16.15 kg/hm²,比 W0N2 处理总氮排放量平均减少 5.57 kg/hm²,控污 25.67%。稻季氮素渗漏淋失量最大的是 W0N2 处理,为 4.50 kg/hm²,占施氮量的 2.50%,而氮素渗漏淋失量最小的是 W1N1 处理,比 W0N2 处理平均减少总氮排放 2.51 kg/hm²,控污 55.78%。相比于常规施氮模式,减氮施氮分别平均减少了 13.74%和 36.16%的地表和渗漏氮素排放负荷量。

与淹水灌溉相比,间歇灌溉模式下的总氮地表流失和渗漏淋失量分别减少了 4.06%~17.66%和 14.73%~21.53%,平均控污率为 11.82%和 18.91%。可见,水稻间歇灌溉相较于传统淹灌,可以减少地表和渗漏氮素负荷量,从而减少田间氮素损失量,这与 Xiao 等^[19]的研究结论一致。

这与彭世彰等^[22]的研究结论一致。

2021 年稻季氨挥发主要发生在分蘖期,占总氨挥发量的 29.00%~56.00%。相同施氮水平下,相比淹水灌溉,间歇灌溉模式下的氨挥发量平均增加了 4.60%;同一灌溉模式下,减氮处理下(N1)的氨挥发量相比传统施氮模式(N2)平均减少了 17.97%。

表 9 2021 年氨挥发量及所占比例

Table 9 Ammonia volatilization and proportion in 2021

处理	分蘖前期		分蘖后期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期		黄熟期		氨挥发总量/ (kg hm ⁻²)
	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	氨挥发量/ (kg hm ⁻²)	占总氮挥发量/ 比例/%	
W0N0	1.51	16	1.23	13	1.29	14	1.79	19	1.19	13	2.50	26	9.51d
W0N1	2.21	19	2.41	20	1.48	13	1.83	16	1.25	11	2.62	22	11.80±1c
W0N2	4.93	35	2.89	21	1.50	11	1.95	14	0.77	5	1.97	14	14.01±2ab
W1N0	1.92	20	1.52	16	1.10	11	1.88	19	1.16	12	2.09	22	9.67d
W1N1	1.40	11	2.25	18	1.66	14	1.86	15	2.27	19	2.80	23	12.24±0.53bc
W1N2	2.33	15	2.61	17	1.70	11	3.33	22	1.73	11	3.63	24	15.33±1a

3 讨论

3.1 水肥调控对稻田水量平衡的影响

3 a 试验中, 间歇灌溉模式下的稻田灌水量、排水量和渗漏量均小于淹水灌溉模式。原因在于稻田灌水量受限于田间水层灌溉上限, 而间歇灌溉模式下的稻田灌溉上限低于淹水灌溉模式, 导致间歇灌溉的灌水量显著低于淹水灌溉模式, 这与刘路广等^[11]研究结果一致。由于淹水灌溉模式长期保持高水位, 饱和状态水力传导度达到最大, 而间歇灌溉模式下的稻田处于干湿交替状态, 土壤水存在非饱和状态, 水力传导度小且持续时间较长, 因此稻季内间歇灌溉模式下的渗漏量小于淹水灌溉。由于排水量受限于蓄水上限, 在返青期, 间歇模式下的蓄水上限小于淹水灌溉, 另外由于间歇灌溉模式下的灌水下限小于淹水灌溉, 其调蓄能力更大, 从而导致间歇模式下的排水量小于淹水灌溉。从节水角度出发, 最优的水肥调控模式为 W1N1 处理, 相比于当地传统模式 W0N2 处理平均节水 27.54%。

3.2 水肥调控对水稻产量的影响

相同灌溉模式下, 当地传统施氮处理与减氮处理的水稻产量没有显著差异, 但显著高于不施氮肥处理, 这进一步验证了增施氮肥可以促进植株的生长发育、提高产量, 与崔远来等^[5]的研究结果一致。间歇灌溉能促进水稻根系生长、提高根系活力、改善群体特性等, 从而提高土壤通气性, 进而提高水稻产量^[5]。从增产角度出发, 稻田采用间歇灌溉并将施氮量控制在 180 kg/hm² 最为有利, 即最优水肥调控模式为 W1N2 处理; 但考虑到施氮过高会导致稻田存在较高的面源污染风险, 因此从保证高产的角度出发, 对于环境要求较高的区域, 最优水肥调控模式为 W1N1 处理, 相比当地传统模式 W0N2 处理平均增产 9.82%。

3.3 水肥调控对稻田氮素排放负荷的影响

2019、2020 年和 2021 年的排水次数分别为 8、17

次和 4 次, 其中 2020 年的排水时间主要在 6 月 21—25 日和 7 月 3—10 日 2 个时段, 分别处于返青期和分蘖前期, 由于这 2 个阶段施用了基肥和蘖肥, 因此排水中的氮素量相对较高, 氮素排放负荷较大, 分别为 16.97 kg/hm² 和 9.37 kg/hm², 占稻季氮素排放负荷的 58.50% 和 32.30%。同一灌溉模式下, 稻田总氮的地表流失量会随着施氮水平的增加而增加, 原因在于施氮水平的增加会增加稻田排水中的氮素浓度, 导致在相同排水量下, 高氮处理的排水氮素负荷要高于低施氮处理。同一施氮水平下, 由于间歇灌溉模式下的排水量小于淹水灌溉, 从而减少田间氮素损失量。可见, 通过控制施氮水平, 并根据天气状况适当控制田间水位可有效降低田间氮素排放负荷。从面源污染防治的角度出发, 最优水肥调控模式为 W1N1 处理, 相较于当地传统模式 W0N2 处理, 总氮地表和渗漏排放负荷可平均降低 25.67% 和 55.74%。

3.4 水肥调控对稻季氨挥发排放总量的影响

相同的施氮水平下, 间歇灌溉模式下的氨挥发量均大于淹水灌溉, 与 2019 年和 2020 年的规律一致^[21]。间歇灌溉模式下土壤干湿交替和稻季内光照时间较长促进了田间裂隙的发育, 改善了土壤的结构性和孔隙度, 从而提高了土壤的通水透气性, 进而促进稻田氨挥发排放^[21-23]。此外, 间歇灌溉模式下田间水层的上下限均低于淹水灌溉, 导致间歇灌溉模式下的田面水氮素浓度高于淹水灌溉, 从而促进稻田氨挥发排放。从减少氮素气体排放角度出发, 最优水肥模式为 W0N1 处理, 相较于当地传统模式 W0N2 处理, 平均减少氨挥发量 15.8%。

综合考虑水稻水肥调控的增产、节水、控污、减排效应, 在保证产量的基础上, 优先考虑节水和减少稻田氮素排放负荷, 推荐 W1N1 处理即间歇灌溉+减氮施氮为当地稻田最优水肥调控模式, 相比当地传统模式 W0N2 处理, 增产 9.82%, 节水 27.54%, 控污 25.67% (地表 TN 排放负荷), 减排 11.90%。

4 结 论

灌溉模式对灌水量和田间地表氮素排放负荷量有显著影响, 间歇灌溉模式比淹水灌溉模式下的稻田灌水量、排水量、渗漏量和地表氮素排放负荷量分别减少 25.98%、16.03%、8.43%和 11.80%。

施氮水平对水稻产量、氮素排放负荷量和稻田氨挥发排放量具有显著影响, 减氮施氮比常规施氮减产 2.64%、控污 13.74%、减排 17.97%。

优选当地的水肥交互模式为间歇灌溉+减氮施氮即 W1N1 处理, 相比当地传统模式, 可使水稻增产 9.82%, 节水 27.54%, 控污 25.67%, 减排 11.90%。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1 381-1 387. YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1 381-1 387.
- [3] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 等. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 293-302. LI Tingting, FENG Yufeng, ZHU An, et al. Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 293-302.
- [4] 郑世宗, 陈雪, 张志剑. 水稻薄露灌溉对水体环境质量影响的研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(3): 7-8, 11. ZHENG Shizong, CHEN Xue, ZHANG Zhijian. Study on the impacts of rice thin and wet irrigation on water environment quality[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(3): 7-8, 11.
- [5] 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 280-285. CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LYU Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3): 280-285.
- [6] 李丹, 郭富庆, 董霖, 等. 水稻控制灌溉技术在我国东北三省的应用分析[J]. 节水灌溉, 2011(11): 63-66. LI Dan, GUO Fuqing, DONG Lin, et al. Application and analysis of controlled irrigation technique for rice in three provinces of northeast China[J]. Water Saving Irrigation, 2011(11): 63-66.
- [7] 蔡志欢, 赵瑞, 刘逸童, 等. 不同水分管理方式对优质杂交晚稻产量和稻米品质的影响[J]. 杂交水稻, 2017, 32(6): 59-63. CAI Zhihuan, ZHAO Rui, LIU Yitong, et al. Effects of different water management methods on grain yield and quality of high quality late hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2017, 32(6): 59-63.
- [8] 才硕, 时红, 许亚群, 等. 赣抚平原灌区双季稻优化灌溉方式研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 11-14. CAI Shuo, SHI Hong, XU Yaqun, et al. Research on the intensifying irrigation modes of double season rice in irrigation areas of Ganfu plain[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(4): 11-14.
- [9] 谭学志. 节水灌溉稻田水氮迁移转化机理及模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2016. TAN Xuezhi. Mechanisms and model simulations of water movement

- and nitrogen transport and transformations in lowland paddy fields under water-saving irrigation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [10] 谭学志, 邵东国, 刘欢欢, 等. 节水灌溉控制排水条件下稻田水氮平衡试验与模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 193-198. TAN Xuezhi, SHAO Dongguo, LIU Huanhuan, et al. Modeling and experiment of water and nitrogen balance in paddy fields under water saving irrigation and controlled drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11): 193-198.
- [11] 刘路广, 陈扬, 吴瑕, 等. 不同水肥综合调控模式下水稻生长特征、水肥利用率及氮磷流失规律[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 67-72, 76. LIU Luguang, CHEN Yang, WU Xia, et al. Growth characteristics of rice, water-fertilizer utilization and nitrogen and phosphorus loss law under different water-fertilizer control patterns[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12): 67-72, 76.
- [12] ZHOU F, CIAIS P, HAYASHI K, et al. Re-estimating NH_3 emissions from Chinese cropland by a new nonlinear model[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 564-572.
- [13] FU H, LUO Z B, HU S Y. A temporal-spatial analysis and future trends of ammonia emissions in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 138 897.
- [14] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209. WANG Zhaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205-209.
- [15] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 99-104. YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 99-104.
- [16] 崔远来, 许亚群, 赵树君, 等. 南方水稻灌区节水减排理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017. CUI Yuanlai, XU Yaqun, ZHAO Shujun, et al. Theory and technology of water saving and emission reduction in southern rice irrigation area[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [17] 许怡, 吴永祥, 王高旭, 等. 小区和田块尺度下水稻不同灌溉模式的节水减排效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 60-66. XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Impact of irrigation methods on saving water and alleviating pollutant at different scales in paddy field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 60-66.
- [18] 孙雪梅, 黄彦, 孙艳玲. 不同节水灌溉方式及栽培模式下粳稻生长特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 49-56. SUN Xuemei, HUANG Yan, SUN Yanling. Change in japonica rice growth traits with agronomic cultivation and water-saving irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 49-56.
- [19] XIAO M H, LI Y Y, WANG J W, et al. Study on the law of nitrogen transfer and conversion and use of fertilizer nitrogen in paddy fields under water-saving irrigation mode[J]. Water, 2019, 11(2): 218.
- [20] 罗文兵, 刘凤丽, 肖新, 等. 鄱阳湖流域水肥管理对稻田氨挥发的影响[C]//中国水利学会2021学术年会论文集第二分册, 2021: 123-128. LUO Wenbing, LIU Fengli, XIAO Xin, et al. Effects of water and fertilizer management in the Poyang Lake Basin on ammonia volatilization in paddy fields[C]//Proceedings of the 2021 Annual Conference of the Chinese Society of Hydraulic Resources Volume 2, 2021: 123-128.
- [21] 余双, 崔远来, 韩焕豪, 等. 不同水肥制度下稻田氨挥发变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 1-5. YU Shuang, CUI Yuanlai, HAN Huanhao, et al. Variation of ammonia volatilization in paddy field under different irrigation and fertilization systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,

- 34(3): 1-5.
- [22] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35-39.
PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 35-39.
- [23] 张忠明, 王忠波, 张忠学, 等. 不同灌溉模式对寒地水稻田碳排放、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 1-7.
ZHANG Zhongming, WANG Zhongbo, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different irrigations on carbon emission, water consumption and yield of paddy field in cold regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 1-7.

Improveing Irrigation and Fertilization to Reduce Water Usage and Nitrogen Pollution from Rice Fields in Southern China

XIAO Xin¹, ZOU Zhike², CHEN Yanfei¹, LUO Wenbing^{2*}, LI Yalong²,
YANG Zirong¹, ZOU Chuanlin³, DENG Hailong⁴, FU Taoxiu⁴

(1. Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
3. Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 4. Jiangxi Center Station of Irrigation Experiment, Nanchang 330201, China)

Abstract: 【Objective】Agriculture is responsible for 8.5% of greenhouse gasses emitted to the atmosphere. Improving agricultural management and reducing gas emissions from soils is hence important in the fight against global warming. In this paper, we investigate the effect of different irrigation and fertigation on reducing nitrogen losses from rice fields in Poyang Lake Basin in southern China. 【Method】The field experiment was conducted at the Ganfu Plain Irrigation Area located at the Irrigation Experiment Center Station of Jiangxi Province. It consisted of an intermittent irrigation (W1) and a flooding irrigation (W0), each irrigation treatment had three nitrogen fertilizations: no fertilization (N0), fertilizing 135 kg/hm² (N1), and 180 kg/hm² of nitrogen (N2). Rice growth, its associated water use efficiency, and nitrogen emissions from each treatment were measured during the experiment. 【Result】Irrigation impacted water consumption and leakage. Compared with W0, W1 reduced irrigation water usage by 18.12%~28.37%, water leakage by 13.68% to 22.85%, and saved water by 28.77%. Depending on nitrogen application, W1 treatments increased the average yield by 16.57% to 29.94% and reduced average nitrogen emissions by 16.42%, compared to the W0 treatments. Increasing nitrogen fertilization led to an increase in nitrogen emission when the irrigation was the same; fertilization had a significant effect on ammonia volatilization. Irrigation-fertilization did not show a significant interactive impact on ammonia volatilization. 【Conclusion】The optimal irrigation and fertilization for rice production in Poyang Lake Basin was intermittent irrigation coupled with fertilizing 135 kg/hm² of N. Compared to W0+N2 – flooding irrigation with 180 kg/hm² of nitrogen fertilization, the optimal irrigation and fertigation can increase rice yield by 9.82%, reduce irrigation amount, nitrogen pollution and nitrogen emissions by 27.54%, 25.67% and 11.90%, respectively.

Key words: water saving and emission reduction; water and fertilizer interaction; ammonia volatilization; paddy field; irrigation mode

责任编辑：韩 洋