

节水减氮对再生稻和双季稻周年产量及氮肥利用效率的影响

郑华斌¹ 陈其敏² 陈元伟¹ 李 波¹ 张炎胜¹ 唐启源^{1*}

(¹湖南农业大学农学院, 长沙 410128; ²宜宾职业技术学院, 四川宜宾 644000)

摘 要 简易可行的节水减氮栽培措施有利于推动资源节约型和环境友好型水稻栽培技术的发展。本文以两熟制水稻生产模式为对象, 研究节水减氮措施对其周年产量、群体质量特征和氮肥利用效率的影响。结果表明: 节水灌溉不降低再生稻模式和双季稻模式的周年产量, 节水灌溉 2 (W3) 处理的周年产量分别为 8.42 和 12.71 t · hm⁻²; 与不施氮处理 (N0) 相比, 减氮处理 (N2) 与当地施氮水平 (N1) 的周年产量显著增加, 但 N1 和 N2 处理间的周年产量差异不显著; N2 处理的氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均高于 N1 处理; 采用简易的自制 PVC 指示筒观测稻田土壤耕作层的水层变化, 以此确定是否需要人工灌溉, 同时再生稻模式和双季稻模式分别减氮 24% 和 20%, 能达到水稻生产中减少用水和氮肥用量目的, 是一种水稻生产中可行的、简易的节水减氮栽培技术。

关键词 再生稻模式; 双季稻模式; 周年产量; 氮肥利用率

Effects of water-saving and nitrogen-reducing on annual yield and nitrogen use efficiency of ratoon rice and double rice. ZHENG Hua-bin¹, CHEN Qi-min², CHEN Yuan-wei¹, LI Bo¹, ZHANG Yan-sheng¹, TANG Qi-yuan^{1*} (¹College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ²Yibin College of Vocational Technology, Yibin 644000, Sichuan, China).

Abstract: Simple and practical cultivation practice with water-saving and nitrogen-reducing is beneficial to promoting the development of rice cultivation technology with resource-conserving and environment-friendly. Taking production model as object, we examined the effects of water-saving and nitrogen-reducing on annual yield, the characteristics of population quality, and nitrogen use efficiency of double cropping rice. The results showed that water-saving did not decrease annual yield of ratoon rice and double rice, with highest yield of 8.42 and 12.71 t · hm⁻² for both rice modes under the treatment of water-saving irrigation (W3). Compared with no nitrogen application (N0), annual yield under the treatment of nitrogen-reducing (N2) and local nitrogen application level (N1) was significantly increased, with no significant difference between the treatments of N1 and N2. In addition, nitrogen agronomy efficiency, nitrogen partial factor productivity, and nitrogen use efficiency under the N2 treatment was higher than those under the N1 treatment. Therefore, to ascertain irrigating or not by the observation of the water layer in the soil layer using simple and homemade PVC tube, with reducing 24% and 20% nitrogen application respectively in the models of both ratoon rice and double rice, can achieve dual reduction of water and nitrogen use. It is a simple and practical cultivation technology with water-saving and nitrogen-reducing in the rice production model.

Key words: ratoon rice; double rice; annual yield; nitrogen use efficiency.

绿色超级稻“两型”栽培技术集成与示范应用研究(2014AA10A605-3)、国家水稻产业技术体系岗位科学家(CARS-01-26)和湖南省科技计划项目(2016NK2125)资助。

收稿日期: 2018-10-12 接受日期: 2019-03-15

* 通讯作者 E-mail: qytang@hunau.edu.cn

水稻是中国重要的口粮作物,全国 60% 以上人口以稻米为主食(赵丽萍等,2013;张帆等,2016),是中国粮食安全保障基础(袁隆平,1997;苏柏元等,2014),稳定和提高稻谷总产对于保障粮食安全至关重要。在湖南稻区,两熟制种植模式以双季稻模式和再生稻模式为主,其种植面积常年维持在 $140\times 10^4\text{ hm}^2$ 和 $13\times 10^4\text{ hm}^2$ 左右。但是,水稻生产模式一直被认为是水资源和氮肥资源消耗大的种植模式。在灌溉水方面,水稻生产仍是以淹水种植为主的灌溉体系,水资源浪费十分严重,作物水分生产效率不足 $1.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,低于发达国际 $2.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水平(姚林等,2014)。水稻需水中约有 $1/3\sim 2/3$ 是耕作用水和生态用水。研究表明,水稻生态需水和生理需水之间调节性具有很大的空间,水稻栽培节水潜力大(程建平,2006)。氮素是水稻必不可少的营养元素,合理施用氮肥是水稻生产过程中最重要的栽培措施之一。研究表明,科学合理的氮肥运筹方式,不仅可以提高水稻的产量、品质和氮肥利用率,而且对解决因过量施用氮肥带来的环境问题有一定的改善作用(段里成等,2018;张颖睿等,2018;彭术等,2019)。

随着农业的不断发展,资源节约和环境友好在水稻栽培上已经成为主流(Zhang,2007;Chen *et al.*,2014),化肥农药零增长也逐步从政策、技术方面不断完善和落实。本研究从节水措施的可操作性和减氮为出发点,设计了以地下水位为简易指示器的节水处理装置,分析不同两熟制水稻生产模式的周年产量、干物质积累与转运、氮素积累量及氮素吸收利用率的差异特点,以期在水稻生产模式中减少水资源和氮肥用量提供一种可行的、简易的节水减氮栽培技术。

1 材料与方法

1.1 供试地点与材料

基于 2016 年益阳市大通湖区的再生稻模式和 2017 年浏阳市永安镇的双季稻模式开展了试验研究,再生稻模式的供试品种为黄华占,双季稻模式的供试品种为中早 39 和陵两优 104(早稻)、五山丝苗和五优 308(晚稻)。大通湖区年平均气温 $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;年均降水 1240.8 mm ,其土壤为河湖沉积物,肥力水平较高;永安镇全年平均降水量 1171.6 mm ,年平均气温 $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,其土壤为第四纪红土发育的红黄泥,肥力水平中等。

1.2 试验设计

随机区组设计,设水分管理和施氮量。其中,3 个水分管理分别为,常规灌溉方式(W1):按照当地农户习惯灌溉,即深水返青,浅水分蘖,中期晒田;节水灌溉 1(W2):移栽后灌 $3\sim 5\text{ cm}$ 水层,返青后当地下水位低于 10 cm 时灌水,自然落干;节水灌溉 2(W3):移栽后灌 $3\sim 5\text{ cm}$ 水层,返青后当地下水位低于 15 cm 时灌水,自然落干。采用自制的 PVC 指示筒观察(图 1),其余时间不灌水。3 个氮肥用量分别为,不施氮量(N0);当地施氮水平(N1):再生稻和双季稻模式周年施氮量分别为 375 和 $330\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$;减氮水平(N2):与 N1 相比,再生稻和双季稻模式周年施氮量分别减少 24% 和 20% 。3 次重复,小区面积为 30 m^2 。

再生稻模式周年施氮量按头季:再生季= $6:4$ 的比例施用,再生稻头季分别施磷、钾肥 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中磷肥全部作基肥施入,钾肥按基肥:穗肥= $5:5$ 分别追施。促芽肥加施氯化钾 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。再生季追施氯化钾 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,不再追施磷肥。

双季稻模式周年施氮量按早稻:晚稻= $4.5:5.5$ 的比例施用,早晚稻分别施磷、钾肥施用量分别为 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $144\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中磷肥全部作基肥施入,钾肥按基肥:穗肥= $5:5$ 分别追施。

其中氮肥按基肥:蘖肥:穗肥= $5:3:2$ 分配,基肥在移栽前一天施入小区内,追肥在移栽返青后施用,穗肥在幼穗分化 $2\sim 3$ 期施用。病虫害防治按照当地统防统治管理。

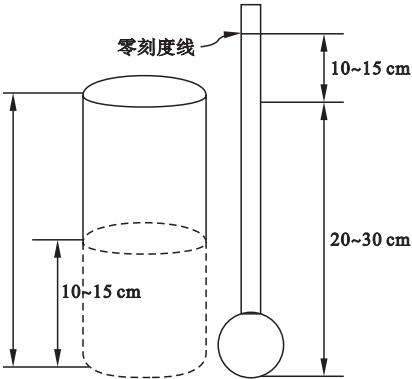


图 1 地下水位观测装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the observation device of underground water

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累 于齐穗期,从每小区随机选取生长均匀的植株 5 穴(除边 3 行外),用水将植株冲洗干净后测定株高、茎蘖数,选取 1 穴进行叶面积测定,然后剪去根,按叶、茎+鞘、穗分开,转至 80 ℃烘干直至恒重,密封冷却至室温测定其干物质量。叶面积采用 LI-COR-3100 叶面积仪结合比叶重测量,计算叶面积指数 LAI。于成熟期,从每小区选取生长均匀的植株 10 穴,然后剪去根,按茎、穗分开,于 105 ℃杀青半个小时,转至 80 ℃烘干直至恒重,密封冷却至室温测定其干物质量、备用。

1.3.2 测产 于小区中央选取约 5 m²的正方形区域进行测产,称重记录的同时用自动数字水分仪(DMC-700, Seedburo, Chicago, IL, USA)测定稻谷籽粒含水量,并按标准计算方法将收割产量换算成 13.5%的吸湿水来计算水稻的实际产量,并调查小区内 20 穴植株穗数计算有效穗数。

1.3.3 植物不同部位的氮含量 选择水稻成熟期的样品,用微型粉碎机分别将植株稻草、实粒和空秕粒粉碎,装入真空袋保存。测定时称取 0.3 g 左右,2 次重复,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 体系消煮样品,采用荷兰 Skalar San+流动注射分析仪测定样品的氮含量,根据植株样品干物质重和氮含量计算植株不同部位的氮吸收量。

1.4 数据分析

氮肥利用效率,包括氮肥农学利用率(NAE, kg·kg⁻¹ N)、氮肥生理利用率(PE, kg·kg⁻¹ N)、氮肥偏生产力(PFP_N, kg·kg⁻¹ N)、氮肥吸收利用率

(NRE)的计算方法参照谢小兵等(2015)的计算方法。采用 Excel 2007 进行收集整理和作图,利用 Statistica 8.0 数据处理软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同水稻生产模式的周年产量

不同节水灌溉处理的再生稻模式和双季稻模式的周年产量变化都没有达到显著差异,节水灌溉 2 处理(W3)的周年产量分别为 8.42 t·hm⁻²和 12.71 t·hm⁻²。与不施氮处理(N0)相比,减氮处理(N2)与当地施氮水平(N1)的周年产量显著增加,但 N1 和 N2 处理间的周年产量差异不显著,当地施氮水平(N1)的周年产量分别为 10.02 t·hm⁻²和 14.34 t·hm⁻²。水分处理和氮肥处理间没有交互作用(表 1)。

2.2 不同水稻生产模式的干物质积累特征

由表 2 和表 3 可知,节水灌溉处理(W2 和 W3)不影响再生稻模式和双季稻模式齐穗期和成熟期的干物质积累,对双季稻模式的成熟期的干物质积累存在品种间差异,早稻的 W3 处理的干物质积累要低于 W1 处理,晚稻品种 WY308 的 W3 处理干物质积累则要高于 W1 处理。同样,不同水稻生产模式下 N2 与 N1 处理的干物质积累差异不显著,但显著高于 N0 处理。其他指标,叶面积指数、作物生长速率等表现出与干物质积累类似的趋势。

2.3 不同水稻生产模式的氮肥利用效率

再生稻模式下,节水灌溉 2(W3)的头季和再生

表 1 节水节氮措施下再生稻和双季稻模式周年产量变化
Table 1 Variation of annual yield of ratoon rice and double season rice under water-saving and nitrogen reducing

水分处理	氮肥用量	再生稻模式			双季稻模式				
		周年产量 (t·hm ⁻²)	头季 (t·hm ⁻²)	再生季 (t·hm ⁻²)	周年产量 (t·hm ⁻²)	早稻(t·hm ⁻²)		晚稻(t·hm ⁻²)	
						LLY104	ZZ39	WSSM	WY308
W1	N1	9.91 a	6.55 a	3.36 a	14.58 a	7.92 a	7.64 a	6.46 a	7.13 a
	N2	9.77 a	6.47 a	3.30 a	13.98 a	7.32 a	7.38 a	5.85 a	7.40 a
	N0	5.22 b	3.62 b	1.60 b	8.84 b	4.74 b	4.25 b	3.88 b	4.80 b
平均		8.30 A	5.55 A	2.75 A	12.46 A	6.66 A	6.42 A	5.40 A	6.44 A
W2	N1	9.64 a	6.12 a	3.52 a	14.00 a	7.88 a	6.39 a	6.76 a	6.96 a
	N2	9.64 a	6.34 a	3.30 a	14.11 a	6.94 b	7.47 a	6.35 a	7.45 a
	N0	5.65 b	3.83 b	1.82 b	8.73 b	4.82 c	4.12 b	3.94 b	5.28 b
平均		8.31 A	5.43 A	2.88 A	12.40 A	6.55 A	5.99 A	5.69 A	6.56 A
W3	N1	10.51 a	6.70 a	3.81 a	14.45 a	7.80 a	7.59 a	6.34 a	7.17 a
	N2	9.78 a	6.58 a	3.19 a	13.73 a	7.01 a	6.72 a	6.54 a	7.18 a
	N0	4.98 b	3.38 b	1.60 b	9.95 b	5.10 b	5.08 b	4.51 b	5.21 b
平均		8.42 A	5.56 A	2.87 A	12.71 A	6.64 A	6.46 A	5.80 A	6.52 A

表 2 节水节氮措施下再生稻模式的干物质积累特征
Table 2 Dry matter accumulation of ratoon rice under water-saving and nitrogen reducing

水分处理	氮肥用量	齐穗期			成熟期		
		TDM	LAI	CGR	TDM	CGR	HI
		(g·m ⁻²)			(g·m ⁻²)		
头季							
W1	N1	834.85 a	5.36 a	7.52 a	1246.20 a	9.10 a	0.61 a
	N2	842.07 a	6.29 a	7.59 a	1168.00 a	8.53 a	0.66 a
	N0	419.55 b	1.79 b	3.68 b	631.33 b	4.54 b	0.59 a
平均		698.82 A	4.48 A	6.26 A	1015.20 A	7.39 A	0.62 A
W2	N1	856.33 a	6.17 a	7.71 a	1191.67 a	8.70 a	0.67 a
	N2	818.73 a	5.46 a	7.38 a	1203.36 a	8.78 a	0.61 a
	N0	494.82 b	2.00 b	4.34 b	661.13 b	4.76 b	0.66 a
平均		723.29 A	4.54 A	6.48 A	1018.70 A	7.41 A	0.65 A
W3	N1	855.72 a	5.61 a	7.71 a	1244.67 a	9.09 a	0.62 a
	N2	782.30 a	4.84 a	7.05 a	1188.40 a	8.67 a	0.59 a
	N0	426.88 b	1.75 b	3.74 b	575.14 b	4.14 b	0.67 a
平均		688.30 A	4.06 A	6.17 A	1002.70 A	7.30 A	0.63 A
再生季							
W1	N1	672.87 a	2.27 a	21.03 a	800.19 a	12.31 a	0.43 a
	N2	625.38 a	1.91 a	19.54 a	775.70 a	11.93 a	0.44 a
	N0	293.80 b	0.66 b	9.18 b	372.88 b	5.74 b	0.39 a
平均		530.68 A	1.61 A	16.58 A	649.59 A	9.99 A	0.42 A
W2	N1	626.21 a	1.99 a	19.57 a	799.88 a	12.31 a	0.48 a
	N2	567.41 a	1.68 a	17.73 a	713.28 a	10.97 a	0.45 a
	N0	303.81 b	0.74 b	9.49 b	391.18 b	6.02 b	0.41 a
平均		499.14 B	1.47 A	15.60 b	634.78 A	9.77 A	0.45 A
W3	N1	640.58 a	2.13 a	20.02 a	811.54 a	12.49 a	0.44 a
	N2	630.71 a	1.84 a	19.71 a	799.88 a	12.31 a	0.46 a
	N0	303.22 b	0.71 b	9.48 b	386.43 b	5.95 b	0.39 a
平均		524.84 AB	1.56 A	16.40 AB	665.95 A	10.25 A	0.43 A

TDW 为总干物质重, LAI 为叶面积指数, CGR 为作物生长速率, HI 为收获指数。

季的氮肥农学利用率分别为 15.60 kg·kg⁻¹ N 和 16.19 kg·kg⁻¹ N, 高于常规灌溉方式(W1)和节水灌溉 1(W2), 氮肥生理利用率和氮肥偏生产力也表现出同样的规律。而 W1 处理的氮肥吸收利用率高于 W2 和 W3 处理, 但处理间差异不显著。头季和再生季 N2 处理的氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均高于 N1 处理(表 4)。

双季稻模式下, ZZ39 的氮肥农学利用率以及生理利用率皆以 W1>W2>W3, 且 W1 显著高于 W3。而 LLY104 的氮肥生理利用率以 W2 最高, 达到 33.07 kg·kg⁻¹ N。WY308 的氮肥农学利用率以及生理利用率皆表现出 N2 显著高于 N1, 分别为 15.61 kg·kg⁻¹ N 和 31.03 kg·kg⁻¹ N。早晚两季的氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均为 N2 显著高于 N1, 可见适当的减氮能提高双季稻的氮肥偏生产力以及氮肥吸收利用率(表 5)。

表 3 节水节氮措施下双季稻模式的干物质积累特征
Table 3 Dry matter accumulation of double season rice under water-saving and nitrogen reducing

季节	水分处理	氮肥用量	齐穗期			成熟期		
			TDW	LAI	CGR	TDW	CGR	HI
			(g·m ⁻²)			(g·m ⁻²)		
早稻 LLY104	W1	N1	759 a	7.02 a	12.9 a	1112 a	9.8 a	0.51 ab
		N2	802 a	6.00 a	13.6 a	951 b	8.4 b	0.48 b
		N0	503 b	2.38 b	9.1 b	710 c	6.5 c	0.54 a
		平均	688.0 A	5.13 A	11.87 A	924.4 A	9.46 A	0.51 A
	W2	N1	792 a	5.92 a	13.4 a	1085 a	9.6 a	0.51 a
		N2	710 a	4.47 a	12.0 a	1032 a	9.1 a	0.51 a
		N0	449 b	2.25 b	8.2 b	617 b	5.7 b	0.53 a
		平均	650.7 A	4.21 A	11.21 A	911.2 A	10.43 A	0.52 A
	W3	N1	862 a	5.54 a	14.6 a	1133 a	10.0 a	0.53 a
		N2	807 ab	6.46 a	13.7 a	1017 b	9.0 b	0.51 ab
N0		454 c	2.43 b	8.3 b	558 c	5.1 c	0.45 b	
平均		707.6 A	4.81 A	12.18 A	902.9 A	7.81 A	0.50 A	
早稻 ZZ39	W1	N1	774 a	4.62 a	14.1 a	1152 a	10.4 a	0.54 a
		N2	744 a	5.15 a	13.5 a	1199 a	10.8 a	0.52 a
		N0	480 b	2.10 b	9.4 b	651 b	6.1 b	0.52 a
		平均	666.0 A	3.96 A	12.34 A	1000.6 A	12.39 A	0.53 A
	W2	N1	768 a	4.37 a	14.0 a	1138 a	10.3 a	0.53 a
		N2	752 ab	2.84 b	13.7 a	1097 a	9.9 a	0.51 a
		N0	492 c	1.90 b	9.7 b	764 b	7.1 b	0.49 a
		平均	672.6 A	3.04 A	12.46 A	999.6 A	12.11 A	0.51 A
	W3	N1	772 ab	4.01 a	14.0 a	1072 a	9.7 a	0.54 a
		N2	810 a	5.04 a	14.7 a	1067 a	9.6 a	0.50 a
N0		532 b	1.82 b	10.2 a	716 b	6.7 b	0.51 a	
平均		704.7 A	3.62 A	13.00 A	951.8 A	9.24 A	0.52 A	
晚稻 WSSM	W1	N1	1012 a		20.7 a	1056 a	8.1 a	0.45 a
		N2	995 a		20.3 a	1144 a	8.7 a	0.46 a
		N0	727 b		15.8 b	773 b	6.0 b	0.46 a
		平均	911.6 A		16.92 A	1001.7 A	1.84 A	0.46 B
	W2	N1	979 a		20.0 a	1110 a	8.5 a	0.46 a
		N2	918 a		18.7 a	1162 a	8.9 a	0.49 a
		N0	697 b		15.2 b	721 b	5.6 b	0.48 a
		平均	864.7 A		16.05 A	1004.4 A	2.85 A	0.48 A
	W3	N1	1000 a		20.4 a	1094 a	8.4 a	0.45 a
		N2	942 a		19.2 a	1104 a	8.4 a	0.49 a
N0		670 b		14.6 b	809 a	6.3 a	0.45 a	
平均		870.7 A		16.15 A	1002.4 A	2.69 A	0.46 B	
晚稻 WY308	W1	N1	920 a		16.7 a	1147 a	8.6 a	0.53 ab
		N2	856 a		15.6 a	972 ab	7.3 ab	0.49 b
		N0	595 b		11.7 b	851 b	6.5 b	0.55 a
		平均	790.0 A		16.39 A	996.3 A	3.97 A	0.52 A
	W2	N1	859 a		15.6 ab	1160 ab	8.7 ab	0.53 a
		N2	950 a		17.3 a	1292 a	9.6 a	0.54 a
		N0	623 b		12.2 b	883 c	6.8 c	0.55 a
		平均	810.6 A		16.82 A	1147.9 A	6.49 A	0.52 A
	W3	N1	905 a		16.5 a	1160 ab	8.7 ab	0.53 a
		N2	812 a		14.8 a	1292 a	9.6 a	0.54 a
N0		630 b		12.3 b	883 c	6.8 c	0.55 a	
平均		782.3 A		16.24 A	1111.4 A	6.33 A	0.54 A	

TDW 为总干物质重, LAI 为叶面积指数, CGR 为作物生长速率, HI 为收获指数。

表 4 节水节氮措施下再生稻模式的氮肥利用效率
Table 4 Nitrogen use efficiency of ratoon rice under water-saving and nitrogen reducing

水分处理	氮肥用量	氮肥农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)	氮肥生理利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)	氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)	氮肥吸收利用率 (%)
头季					
W1	N1	13.02 a	13.54 b	29.11 b	64.31 a
	N2	14.64 a	16.21 a	33.21 a	65.87 a
平均		13.83 B	14.88 AB	31.16 AB	65.09 A
W2	N1	11.64 a	13.27 a	27.20 b	58.56 a
	N2	12.90 a	13.17 a	32.54 a	66.26 a
平均		12.27 B	13.22 B	29.87 B	62.41 A
W3	N1	14.76 a	17.39 a	29.80 b	59.55 a
	N2	16.43 a	17.67 a	33.78 a	62.30 a
平均		15.60 A	17.53 A	31.79 A	60.93 A
再生季					
W1	N1	11.72 b	17.62 a	22.43 b	48.28 b
	N2	18.80 a	19.24 a	36.64 a	67.66 a
平均		15.26 A	18.43 A	29.54 A	57.97 A
W2	N1	11.37 b	15.31 b	23.50 b	49.72 b
	N2	16.41 a	21.76 a	36.63 a	55.50 a
平均		13.89 B	18.53 A	30.07 A	52.61 A
W3	N1	14.71 b	21.91 a	25.40 b	47.85 b
	N2	17.67 a	18.59 b	35.49 a	66.02 a
平均		16.19 A	20.25 A	30.44 A	56.93 A

3 讨论

本研究中,采用简易的自制 PVC 指示筒观察观测稻田土壤耕作层的水层变化,以此确定是否需要人工灌溉,W2 和 W3 处理的灌溉指示地下水层分别为 10 cm 和 15 cm。结果表明,节水灌溉通过观测地下水层变化能够指导水稻生产过程的灌溉管理,且再生稻模式和双季稻模式的周年产量、季节间产量不受节水灌溉的影响。这与前人的研究结果一致(吕露等,2011;姜萍等,2013),节水灌溉有利于水稻营养生长期对氮素的吸收利用和生殖生长期养分向产量器官的转移,能有效控制稻田氮素流失在一定程度上提高水稻产量;与传统的淹水灌溉模式相比,节水灌溉模式在提高水分利用效率方面优势明显。但是,本研究中,没有准确计量人工灌溉量、测定 10 cm 和 15 cm 地下水层时的土壤水势,以致于无法准确计算节水条件下的水分利用效率、合理的给出两个地下水层指标的土壤水分变化情况。

在一定范围内,植株体内氮素含量越高,营养生长期长势越好,从而干物质积累越多,产量越高(Makino,2010)。但当氮肥量超过一定范围,水稻产量和氮素吸收量表现出报酬递减的规律(邹应斌

表 5 节水节氮措施下双季稻模式的氮肥利用效率
Table 5 Nitrogen use efficiency of double season rice under water-saving and nitrogen reducing

季节	水分处理	氮肥用量	氮肥农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)		氮肥生理利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)		氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$)		氮肥吸收利用率 (%)	
早稻			LLY104	ZZ39	LLY104	ZZ39	LLY104	ZZ39	LLY104	ZZ39
	W1	N1	21.21 a	22.59 a	31.52 a	34.93 a	52.79 a	50.92 a	66.94 b	64.40 a
		N2	21.56 a	26.09 a	27.46 a	35.01 a	61.03 a	61.50 a	78.25 a	74.50 a
	平均		21.39 A	24.34 A	29.49 AB	34.97 A	56.91 A	56.21 A	72.60 A	69.45 A
	W2	N1	21.02 a	15.12 b	37.94 a	22.90 a	52.55 a	42.56	55.29 b	65.71 b
		N2	18.42 a	27.95 a	28.19 a	37.47 a	57.83 a	62.26 a	65.86 a	74.17 a
	平均		19.72 A	21.54 AB	33.07 A	30.19 AB	55.19 A	52.41 A	60.58 B	69.94 A
	W3	N1	18.01 a	16.75 a	27.59 a	26.21 a	51.99 a	50.59 a	65.31 b	64.02 b
		N2	15.95 a	13.67 a	21.10 a	18.90 a	58.43 a	55.98 a	75.22 a	73.61 a
	平均		16.98 A	15.21 B	24.35 B	22.56 B	55.21 A	53.29 A	70.27 A	68.82 A
晚稻			WSSM	WY308	WSSM	WY308	WSSM	WY308	WSSM	WY308
	W1	N1	14.37 a	12.93 a	34.88 a	28.30 a	35.91 a	39.60 a	41.68 a	46.33 a
		N2	13.74 a	18.01 a	33.37 a	38.99 a	40.65 a	51.35 a	41.31 a	46.00 a
	平均		14.06 A	15.47 A	34.13 A	33.65 A	38.28 A	45.48 A	41.50 A	46.17 B
	W2	N1	15.67 a	9.36 a	39.44 a	18.80 a	37.57 b	38.67 b	39.64 b	50.37 a
		N2	16.74 a	15.10 a	34.83 a	29.38 a	44.11 a	51.74 a	48.55 a	51.71 a
	平均		16.21 A	12.23 A	37.14 A	24.09 B	40.84 A	45.21 A	44.10 A	51.04 A
	W3	N1	10.14 a	10.92 a	24.90 a	22.46 a	35.22 a	39.85 b	40.31 a	48.87 a
		N2	14.04 a	13.72 a	33.52 a	24.72 a	45.38 a	49.89 a	41.95 a	55.42 a
	平均		12.09 A	12.32 A	29.21 A	23.59 B	40.30 A	44.87 A	41.13 A	52.15 A

等,2015)。大量研究表明(杜加银等,2013;刘红江等,2017;黄巧义等,2017;向璐等,2018;彭术等,2019),减氮处理不会显著降低水稻产量且能提高氮肥的利用效率,在小麦和白菜生产上面同样随着氮肥的减量施用提高氮肥利用效率(李银坤等,2016)。本研究中,基于再生稻模式和双季稻模式的当地施氮水平,减氮处理的周年产量、季节间产量的差异不显著,说明上述模式分别减氮20%和24%是一个较为合理的减氮范围。同时,从氮肥利用效率来看,N₂处理的氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均高于N₁处理,但双季稻模式下减氮处理存在品种间差异。

水、肥之间存在一种“以水调肥”的互作效应,即稻田土壤肥力和水稻对养分的吸收能力随着稻田水分状况的改变,从而导致水稻生长发育受到影响。在土壤干旱条件下水稻的“以肥调水”作用受到灌溉量及施氮量高低的影响。土壤干旱程度轻,增施氮肥后产量明显提高,“以肥调水”作用明显;在土壤干旱程度较重时,“以肥调水”的效应减小,并且随着氮水平的提高,“以肥调水”的作用减弱。因此,在氮肥施用,除了根据作物的长势长相及需求特性外,还应注意到土壤干湿程度(杨建昌等,1996)。在土壤严重干旱时不宜过多地施用氮肥,以免降低水稻产量。杨建昌等(1996)和王绍华等(2004)的研究表明,轻度水分胁迫并不会降低水稻对氮素的吸收能力;相反,对水肥相互调节能力有促进作用,可促使水稻抽穗前叶片和茎鞘中储存的氮素参与再分配和再利用,从而提高稻草中营养物质向籽粒转移,有利于提高氮素利用率。崔远来等(2004)认为,水稻的正常生长离不开水肥的协调配合。节水灌溉条件下,适当增加追肥次数,有利于水稻对氮素的吸收,提高氮肥利用率;节水灌溉条件下水稻对氮素的吸收利用率高于淹灌,且有利于氮素养分向稻谷转移。尤小涛等(2006)认为,节水灌溉下有利于氮素干物质生产效率和氮素运转效率的提高;水稻氮素积累总量及氮素转运效率与施氮量呈抛物线关系,氮素干物质生产效率、氮素产谷效率及氮素收获指数随着施氮的增加而下降。本研究中,虽然水分处理和氮肥处理不存在互作效应,但从产量、群体质量变化和氮肥利用效率来看,我们可推测出,节水灌溉条件下,基于当地施氮水平,再生稻模

式和双季稻模式分别减氮24%和20%,能够实现上述模式的产量不降低,且提高氮肥利用效率。因此,采用简易的自制PVC指示筒观察观测稻田土壤耕作层的水层变化,同时再生稻模式和双季稻模式分别减氮24%和20%,是一种水稻生产模式中减少水资源和氮肥用量可行的、简易的节水减氮栽培技术。

采用简易的自制PVC指示筒观察观测稻田土壤耕作层的水层变化,结合氮肥减量,实现水稻稳产和高产,同时减少水资源和氮肥用量,为推动水稻栽培向两型(资源节约型和环境友好型)栽培技术发展提供理论依据和技术支撑。

参考文献

- 程建平,曹凑贵,蔡明历,等. 2006. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响. 应用生态学报, **17**(10): 1859-1865.
- 崔远来,李远华,吕国安,等. 2004. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究. 水科学进展, **15**(3): 280-285.
- 杜加银,茹美,倪吾钟. 2013. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响. 植物营养与肥料学报, **19**(3): 523-533.
- 段里成,吕伟生,方加海,等. 2018. 施氮量和每穴苗数对双季杂交早稻产量及氮肥利用率的影响. 生态学杂志, **37**(10): 2959-2967.
- 黄巧义,唐拴虎,张发宝,等. 2017. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响. 中国生态农业学报, **25**(6): 829-838.
- 姜萍,袁永坤,朱日恒,等. 2013. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究. 农业环境科学学报, **32**(8): 1592-1596.
- 李银坤,武雪萍,武其甫,等. 2016. 水氮用量对设施栽培蔬菜地土壤氮挥发损失的影响. 植物营养与肥料学报, **22**(4): 949-957.
- 刘红江,郭智,郑建初,等. 2017. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响. 生态学杂志, **36**(3): 713-718.
- 吕露,冯常萍,崔远来. 2011. 水稻不同节水灌溉模式的水分利用效率比较——以荆门、桂林为例. 节水灌溉, (3): 15-17, 22.
- 彭术,张文钊,侯海军,等. 2019. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响. 生态学杂志, **38**(1): 153-160.
- 苏柏元,陈惠哲,朱德峰. 2014. 水稻直播栽培技术发展现状及对策. 农业科技通讯, (1): 7-11.
- 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 2004. 水氮互作对水稻氮吸收

- 与利用的影响. 中国农业科学, **37**(4): 497–501.
- 向璐, 周萍, 盛良学, 等. 2018. 减氮条件下不同施肥措施对双季稻产量和氮肥利用的影响. 农业现代化研究, **39**(2): 335–341.
- 谢小兵, 周雪峰, 蒋鹏, 等. 2015. 低氮密植栽培对超级稻产量和氮素利用率的影响. 作物学报, **41**(10): 1591–1602.
- 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 1996. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究. 中国农业科学, **29**(4): 58–66.
- 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 2014. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势. 生态学杂志, **33**(5): 1381–1387.
- 尤小涛, 荆奇, 姜东, 等. 2006. 节水灌溉条件下氮肥对粳稻米产量和品质及氮素利用的影响. 中国水稻科学, **20**(2): 199–204.
- 袁隆平. 1997. 杂交水稻超高产育种. 杂交水稻, **12**(6): 1–3.
- 张帆, 沈超, 徐敬洪, 等. 2016. 四川水稻直播发展现状与思考. 四川农业科技, (8): 8–9.
- 张颖睿, 杨滨娟, 黄国勤. 2018. 紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响. 生态学杂志, **37**(2): 430–437.
- 赵丽萍, 陶优生, 唐云鹏, 等. 2013. 水稻栽培方式的演变历史和发展趋势. 作物研究, **27**(2): 169–173.
- 邹应斌, 夏冰, 蒋鹏, 等. 2015. 水稻生产目标产量确定的理论与方法探讨. 中国农业科学, **48**(20): 4021–4032.
- Chen XP, Cui ZL, Zhang FS, *et al.* 2014. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, **514**: 486–489.
- Makino A. 2011. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. *Plant Physiology*, **155**: 125–129.
- Zhang QF. 2007. Strategies for developing green super rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**: 16402–16409.
-
- 作者简介** 郑华斌,男,1982年生,博士,从事作物栽培与水稻生理生态研究。E-mail: hzbzheng@hunau.edu.cn
- 责任编辑** 李凤芹
-