

汤佳玮, 丁婕婕, 刘晓淑, 等. 巢湖流域氮肥减施下 2 种控释肥料对水稻产量、氮肥利用率及环境效益的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(10): 1826-1833.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.10.007

巢湖流域氮肥减施下 2 种控释肥料对水稻产量、氮肥利用率及环境效益的影响

汤佳玮¹, 丁婕婕², 刘晓淑², 陈勇², 陈骏², 李慧敏², 罗来超³, 熊启中³, 张卫峰¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院/养分利用与管理国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中盐安徽红四方肥业股份有限公司绿色智能复合肥研究院, 安徽 合肥 230001; 3. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 探讨 2 种控释肥料减氮施用对作物产量与氮素利用率及环境效益的影响, 为巢湖流域氮肥减量增效、作物丰产及面源污染防控提供理论依据。于 2022 年在巢湖流域进行 2 种新型控释肥料减量施用田间试验, 采用两因素随机区组设计, 选取无机包裹肥和增效控释肥 2 种控释肥料, 并设置 5 个施氮水平(不施氮、农户模式施氮量及在农户模式施氮量的基础上减量 20%、28% 和 40%, 即施氮量为 0 kg/hm²、263 kg/hm²、210 kg/hm²、189 kg/hm² 和 158 kg/hm²)。分析 2 种控释肥料氮肥减量施用对水稻产量及其构成要素、氮素转运利用及水稻季环境效益的影响。与农户模式相比, 减氮 20% 施用 2 种新型控释肥料对水稻产量无显著影响, 可以实现减氮不减产, 且显著降低了水稻季活性氮损失的风险。通过回归分析得出, 无机包裹肥和增效控释肥的最佳施氮量为 230 kg/hm² 和 195 kg/hm²。

关键词: 水稻; 氮肥减量; 产量; 氮肥利用率; 活性氮损失; 巢湖流域

中图分类号: S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)10-1826-08

Effects of two controlled-release fertilizers on rice yield, nitrogen use efficiency and environmental benefits under nitrogen fertilizer reduction in Chaohu Lake Basin

TANG Jiawei¹, DING Jiejie², LIU Xiaoshu², CHEN Yong², CHEN Jun², LI Huimin², LUO Laichao³, XIONG Qizhong³, ZHANG Weifeng¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University/State Key Laboratory of Nutrient Utilization and Management, Beijing 100083, China; 2. Green Intelligent Compound Fertilizer Research Institute of CNSIG Anhui Hongsifang Fertilizer Co., Ltd., Hefei 230001, China; 3. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The effects of nitrogen reduction application of two controlled-release fertilizers on crop yield, nitrogen use efficiency and environmental benefits were discussed, which provided a theoretical basis for nitrogen reduction and efficiency increase, crop yield and non-point source pollution prevention and control in Chaohu Lake Basin. A field trial was conducted in 2022 in Chaohu Lake Basin. Two controlled

release fertilizers, inorganic coated fertilizer and synergistic controlled release fertilizer, were selected in a two-factor randomized block design. Five nitrogen application levels were set up, namely, no nitrogen application, nitrogen application rate of farmer mode and reduction of

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 安徽省高等学校科学研究重大项目(2023AH040130); 安徽省科技重大专项(202103a06020012)

作者简介: 汤佳玮(1999-), 女, 辽宁新民人, 硕士研究生, 主要研究方向为新型肥料创制。(E-mail) gzh1230217@163.com

通讯作者: 张卫峰, (E-mail) wfzhang@cau.edu.cn

20%, 28% and 40% on the basis of nitrogen application rate of farmer mode, and the nitrogen application rates were 0 kg/hm², 263 kg/hm², 210 kg/hm², 189 kg/hm² and 158 kg/hm². The effects of nitrogen reduction application on rice yield and its components, nitrogen transport and utilization, and environmental benefits in rice season were analyzed. Compared with the farmer model, the application of two new fertilizers with 20% nitrogen reduction had no significant effect on rice yield, and significantly reduced the risk of seasonal active nitrogen loss. Regression analysis showed that the optimal nitrogen application rates of inorganic coated fertilizer and synergistic controlled release fertilizer were 230 kg/hm² and 195 kg/hm².

Key words: rice; nitrogen fertilizer reduction; yield; nitrogen use efficiency; active nitrogen loss; Chaohu Lake Basin

水稻是中国主要的粮食作物,其高产优质生产对保障中国粮食安全具有至关重要的作用。施用氮肥是提升水稻产量的重要途径,中国水稻氮肥用量占全球水稻氮肥总用量的37%,中国水稻总产量为世界水稻总产量的35%左右^[1-2]。通过对中国13 667个田块施肥情况的调查发现,水稻季施氮量平均为294.8 kg/hm²,过量施氮的农户占67%^[3],造成氮肥利用率低、环境和水体污染等一系列问题。控释肥料较传统肥料具有养分释放规律与作物养分需求更匹配、氮肥利用率更高、环境污染较少等特点^[4-7],施用控释肥是实现水稻双高清洁化生产的有效措施之一^[8],但氮肥减量情况下,施用控释肥料对水稻籽粒产量、氮素转运利用和活性氮排放的影响如何,尚不明确。因此,明确施用控释肥料对水稻籽粒产量形成、氮素吸收利用和环境效益的影响,可为稻田清洁生产提供理论依据。已有研究表明,施用控释肥料可显著提高水稻氮肥利用率和籽粒产量^[9-10]。然而,水稻品种、种植区域以及控释肥的种类、施用量均会对水稻生长产生影响。江淮地区不同控释肥料处理的水稻产量较常规肥料增加47.2%~66.2%,水稻籽粒和秸秆氮素吸收量也得到显著提高,在辽宁黄海稻区开展的控释肥料试验结果表明,施用控释肥料的水稻籽粒千粒重、结实率和产量较施用常规肥料分别提高3.2%~4.9%、3.4%~7.1%和5.6%~6.1%^[11]。在陕西省汉中市田间试验结果表明,施用有机包膜肥的水稻产量显著提高8.3%,但施用腐殖酸氮肥和纳米碳增效肥的水稻产量与常规施肥处理差异不显著^[12]。还有研究表明,不同种类的控释肥料在同一个地区不同施用量对水稻生长发育的影响亦有所不同。在山东省济宁市稻麦轮作体系下,水稻季施用增效复合肥可显著提高水稻产量达22.0%,氮肥减量20%施用增效复合肥料的水稻产量与常规施肥量下无显著差异^[13]。在江苏省常熟市,等量施用控释肥料和减量

8%施用控释肥料的水稻植株含氮量在拔节期到抽穗期和抽穗期到成熟期均显著提高,而减量16%和24%施用控释肥料时则显著降低地上部氮吸收进而影响产量^[14]。目前,关于控释肥料施用对水稻生产影响的报道多数仅关注对籽粒产量、氮肥利用率的影响,忽略了对氮素转运分配利用及活性氮损失的影响,且在巢湖流域水稻体系开展减氮施用控释肥料对水稻生长及生态环境效益的影响鲜见报道。本研究拟在巢湖流域水稻主要种植区开展田间试验,测定水稻产量及构成要素,氮素吸收、转运及分配,活性氮损失量,明确氮肥减量情况下,施用控释肥料对水稻产量、氮素吸收利用及环境效益的影响,以期为巢湖流域水稻氮素减施增效及农业面源污染源头减量技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2022年6月-11月在安徽省合肥市庐江县台创园(31°42'32"N, 117°15'90"E)进行。该地北濒巢湖,距杭埠河2 km,为巢湖流域二级保护区,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温16℃,年平均降雨量1 100 mm左右,且主要集中在5-8月。水稻-小麦轮作是该地区主要的栽培模式。稻田土壤基础理化性状:有机质含量23.27 g/kg、碱解氮含量49.70 mg/kg、有效磷含量16.00 mg/kg、速效钾含量131.60 mg/kg、pH 5.32。

1.2 试验设计

田间试验采用两因素随机区组设计,因素一为肥料种类,分别为无机包裹肥(以颗粒尿素为核心,包裹材料为枸溶性磷肥及含有植物营养成分的固体缓释剂,通过改变不同肥料的空间结构及化学组成,实现肥料缓释效果,释放期为90~120 d。N:P₂O₅:K₂O=25:9:10,重量比)和增效控释肥(生

产过程中添加一种减少损失的内置分子网控释制剂和优质矿源腐殖酸或矿源黄腐酸钾,减少复合肥料施用后挥发、径流和淋溶损失。 $N:P_2O_5:K_2O=23:8:15$ (重量比);因素二为施氮水平,分别为不施氮(CK)、农户模式(FP)及在农户模式施氮量的基础上减量 20%(P1)、减量 28%(P2)和减量 40%(P3),即施氮量为 0 kg/hm^2 、 263 kg/hm^2 、 210 kg/hm^2 、 189 kg/hm^2 和 158 kg/hm^2 。供试肥料均由中盐安徽红四方肥业股份有限公司提供,各处理磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)用量分别为 75 kg/hm^2 和 90 kg/hm^2 ,无机包裹肥处理下的氮肥作为基肥一次性施入,增效控释肥处理的氮肥则采取基肥 90%和追肥 10%(尿素,含氮量为 46%)的比例施入。供试水稻品种为宁香粳 9 号,于 5 月 10 日播种,6 月 19 日移栽,每穴 3 株苗,行距为 30 cm,株距为 20 cm。各处理重复 3 次,小区面积为 30 m^2 ($5\text{ m}\times 6\text{ m}$),小区间田埂宽 40 cm,高 40 cm,覆盖农用薄膜,其他田间农事管理及病虫害防治与当地农户丰产田一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 测定指标及方法 在水稻开花期和成熟期,在每个小区避开边行随机选取 5 穴,采集水稻植株样品,测定水稻地上部和根系生物量。将用蒸馏水快速清洗后的植株样品 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min 后, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,称重。用不锈钢粉碎机粉碎植物样品,称取 $0.20\sim 0.25\text{ g}$ 样品,采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮,使用连续流动分析仪测定消解液氮含量。在水稻成熟期,各小区避开边行随机选取 3 个 1 m^2 的样方进行收割,装入预先编号的大网袋中,风干称重后脱粒,测定含水量,计算水稻产量。

1.3.2 计算公式 地上部氮素积累量(kg/hm^2)=地上部生物量 \times 氮含量

氮素转运量(kg/hm^2)=抽穗期水稻营养器官氮素积累量-成熟期水稻营养器官氮素积累量

氮素转运效率=(氮素转运量 \div 抽穗期水稻营养器官氮素积累量) $\times 100\%$

氮肥偏生产力=水稻产量 \div 施氮量

氮素收获指数=(籽粒氮素积累量 \div 水稻地上部分氮素积累量) $\times 100\%$

氮吸收利用率=[(施氮处理水稻氮吸收量-空白区水稻氮吸收量) \div 施氮量] $\times 100\%$

氮肥农学利用率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量) \div 施氮量

活性氮损失量(NH_3 排放量、 N_2O 直接排放量和 NO_3^- 淋洗量)参照 Chen 等^[15]的方法计算。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据用 Microsoft Excel 2016 进行整理计算,采用 SPSS 2010 进行方差齐性检验和方差分析(ANOVA),采用最小显著性差异(LSD)法进行多重比较,显著水平为 $P<0.05$,使用 Origin 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 肥料种类和施氮水平对水稻产量及其产量构成要素的影响

施氮水平及其和肥料种类的交互作用对水稻的穗数产生显著影响,对水稻产量也有极显著影响($P<0.01$)(表 1)。

表 1 肥料种类和施氮水平对各生理指标的影响效应

Table 1 Effects of fertilizer types and nitrogen application levels on physiological indices

因素	穗数	穗粒数	结实率	千粒重	产量
肥料种类(F)	1.07	2.36	1.72	1.37	0.02
施氮水平(N)	14.85 **	1.70	2.39	0.60	13.39 **
F \times N	2.64 **	1.68	1.36	0.29	2.61 **

*, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著。

由表 2 可知,施用无机包裹肥条件下,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理和 P3 处理的水稻籽粒产量分别显著提高 75.1%、50.1%、62.5% 和 27.0%。与农户模式相比,P3 处理产量显著降低,达 27.5%。施用增效控释肥条件下,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理和 P3 处理的水稻籽粒产量分别显著提高 80.9%、70.8%、38.0% 和 31.8%。与农户模式相比,P2 处理和 P3 处理的水稻籽粒产量则分别显著降低 23.7% 和 27.1%。在相同施氮水平下,2 种肥料处理的水稻产量均无显著差异。

此外,施用无机包裹肥(图 1a)和增效控释肥(图 1b)的水稻产量与施氮量均呈现线性加平台的关系,分别在施氮量 230 kg/hm^2 和 195 kg/hm^2 达到平台产量 $10\ 688.6\text{ kg/hm}^2$ 和 $10\ 538.5\text{ kg/hm}^2$,且施用增效控释肥达到平台产量时较无机包裹肥可减少氮肥用量达 15.2%。

表 2 显示,施用无机包裹肥条件下,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理和 P3 处理的穗数分

别显著提高 30.7%、26.8%、32.7%和 15.7%。与农户模式相比,各减氮处理对穗粒数和千粒重均无显著影响。施用增效控释肥条件下,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理和 P2 处理的穗数分别显著提高

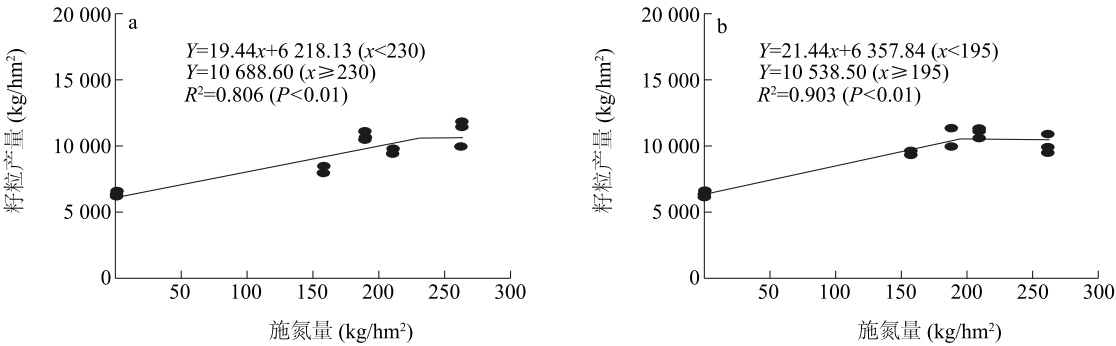
42.9%、25.6%和 16.9%。与农户模式相比,P2 和 P3 处理的穗数分别显著降低 18.2%和 25.6%。在减氮 40%的条件下,与增效控释肥处理相比,无机包裹肥处理的水稻穗数显著增加 8.9%。

表 2 水稻产量及其构成要素

Table 2 Grain yield and its components of rice

肥料种类	施氮水平	穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (个)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
无机包裹肥	CK	254.0 \pm 20.6d	127.9 \pm 8.9b	91.0 \pm 0.1a	21.1 \pm 1.4a	6 999.0 \pm 558.1d
	FP	332.0 \pm 21.3a	169.7 \pm 27.3a	91.0 \pm 0a	21.1 \pm 1.2a	12 258.3 \pm 1 542.2ab
	P1	322.0 \pm 23.1a	161.3 \pm 15.1ab	86.0 \pm 0.1a	20.8 \pm 0.3a	10 506.5 \pm 1 122.1ab
	P2	337.0 \pm 33.5a	147.0 \pm 34.8ab	90.0 \pm 0a	22.2 \pm 2.0a	11 375.6 \pm 1 437.4ab
	P3	294.0 \pm 7.2bc	141.1 \pm 13.0ab	90.0 \pm 0a	21.2 \pm 1.1a	8 886.6 \pm 1 034.7c
增效控释肥	CK	254.0 \pm 20.6d	127.9 \pm 8.9b	91.0 \pm 0.1a	21.1 \pm 1.4a	6 999.0 \pm 558.1d
	FP	363.0 \pm 27.8a	187.9 \pm 25.5a	86.0 \pm 0a	20.6 \pm 0.3a	12 664.4 \pm 369.7a
	P1	319.0 \pm 24.5ab	172.8 \pm 10.1a	92.0 \pm 0a	21.0 \pm 2.0a	11 951.0 \pm 1 207.0ab
	P2	297.0 \pm 14.3bc	163.9 \pm 4.3a	86.0 \pm 0.1a	21.1 \pm 1.2a	9 660.6 \pm 1 301.4b
	P3	270.0 \pm 11.0cd	173.7 \pm 23.1a	83.0 \pm 0a	21.0 \pm 1.1a	9 226.2 \pm 1 099.4bc

CK 表示对照,不施氮肥;FP 表示农户模式施氮量处理;P1、P2 和 P3 分别表示在农户模式施氮量的基础上减量 20%、28%、40%的处理。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。



a: 无机包裹肥;b: 增效控释肥。

图 1 2 种控释肥料不同施氮水平与水稻产量的相关性

Fig.1 Correlation between different nitrogen application levels of two controlled release fertilizers and rice yield

2.2 肥料种类和施氮水平对水稻氮素积累的影响

肥料种类及其与施氮水平的交互效应对水稻扬花期植株氮素积累量有极显著影响,肥料种类则对成熟期植株氮素积累量及籽粒氮素积累量有极显著影响 ($P<0.01$) (表 3)。

由表 4 可知,施用无机包裹肥时,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理、和 P3 处理的扬花期植株氮素积累量分别提高 90.3%、115.0%、77.1%和 107.0%,成熟期籽粒氮素积累量分别提高 87.6%、115.4%、79.7%和 85.5%,各处理间植株氮

表 3 肥料种类和施氮水平对水稻不同时期氮素积累的影响效应

Table 3 Effects of fertilizer types and nitrogen application levels on nitrogen accumulation in rice at different stages

因素	扬花期植株 氮素积累量	成熟期植株 氮素积累量	籽粒氮素 积累量
肥料种类 (F)	0.07 **	5.21 **	23.53 **
施氮水平 (N)	8.06 **	2.27	0.74
F \times N	11.59 **	1.10	0.37

*, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著。

素积累量无显著差异。与农户模式相比,各减氮处理的水稻成熟期植株和籽粒的氮素积累量差异均不

显著。施用增效控释肥时,与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理、和 P3 处理的扬花期植株氮素积累量分别显著提高 147.1%、235.7%、135.7% 和 128.2%,成熟期植株氮素积累量在减氮 20%和减氮 40%时显著提高 60.0%和 59.4%。与不施氮相比,FP 处理、P1 处理、P2 处理和 P3 处理籽粒氮素积累量分别显著提高了 226.6%、358.1%、314.1% 和 257.7%。与农户模式相比,各减氮处理对水稻植株和籽粒氮素积累量均无显著影响。相同施氮水平下,2 种施肥处理各时期氮素积累量无显著差异。

表 4 水稻不同时期氮素积累量
Table 4 Nitrogen accumulation in rice at different stages

肥料种类	施氮水平	扬花期植株 氮素积累量 (kg/hm ²)	成熟期植株 氮素积累量 (kg/hm ²)	籽粒氮素 积累量 (kg/hm ²)
无机包裹肥	CK	22.7±7.7c	17.0±3.4b	24.1±4.6b
	FP	43.2±12.1a	21.5±2.3a	45.2±6.1a
	P1	48.8±8.6a	20.9±3.0a	51.9±5.0a
	P2	40.2±11.8ab	18.4±1.8a	43.3±6.9a
	P3	47.0±6.3a	18.8±3.7a	44.7±5.2a
增效控释肥	CK	22.7±7.7c	17.0±3.4b	24.1±7.9b
	FP	56.1±11.6ab	22.0±4.9ab	78.7±31.5a
	P1	76.2±2.0a	27.2±4.7a	110.4±24.7a
	P2	53.5±17.5ab	21.8±3.0ab	99.8±35.3a
	P3	51.8±22.7ab	27.1±2.5a	86.2±36.8a

CK、FP、P1、P2 和 P3 见表 2 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 6 水稻氮素转运量及氮效率
Table 6 Nitrogen transport and nitrogen efficiency in rice

肥料种类	施氮水平	氮素转运量 (kg/hm ²)	氮素转运效率 (%)	氮素收获指数 (%)	氮吸收利用率 (%)
无机包裹肥	CK	5.7±5.6c	22.0±15.6b	51.7±1.2a	—
	FP	21.7±14.4ab	46.1±23.1ab	51.2±11.8a	26.9±5.1a
	P1	27.9±7.4a	56.6±6.4a	51.6±1.0a	32.8±8.2a
	P2	21.7±13.6ab	49.7±22.7ab	52.0±1.5a	31.3±1.1a
	P3	28.2±5.0a	60.0±6.7a	48.6±8.5a	28.5±1.6a
增效控释肥	CK	5.7±5.6c	22.0±15.6c	51.7±1.2a	—
	FP	24.1±7.0b	51.9±3.7bc	61.5±14.1a	44.3±10.5b
	P1	69.0±4.2a	70.6±6.1a	58.7±5.4a	63.8±11.3a
	P2	31.7±16.3b	57.2±10.5b	64.0±15.4a	57.8±9.4a
	P3	24.8±25.2b	39.3±29.8bc	62.6±1.1a	40.6±12.8b

CK、FP、P1、P2 和 P3 见表 2 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。—表示无法通过计算公式得出数据。

2.3 肥料种类和施氮水平对水稻氮素转运、分配及利用的影响

表 5 显示,肥料种类、施氮水平以及两者的交互效应对氮素转运量有极显著影响 ($P<0.01$),其中肥料种类对氮素收获指数和氮吸收利用率也产生极显著影响 ($P<0.01$)。

表 5 肥料种类和施氮水平对水稻氮素转运量及氮效率的影响效应
Table 5 Effects of fertilizer types and nitrogen application levels on nitrogen transport and nitrogen efficiency in rice

因素	氮素转运量	氮素转运效率	氮素收获指数	氮吸收利用率
肥料种类(F)	5.22 **	0.97	8.32 **	28.77 **
施氮水平(N)	4.54 **	2.97	0.11	2.07
F×N	3.28 **	2.74	0.15	10.10

表内双因素分析中,*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著。

由表 6 可知,施用无机包裹肥时,与不施氮相比,各施氮处理的氮素转运量显著提高 280.7%~394.7%,P1 处理和 P3 处理的氮素转运效率分别提高 157.3%和 172.7%,与农户模式相比,各减氮处理氮素转运量、氮素转运效率、氮素收获指数和氮吸收利用率均无显著差异。施用增效控释肥时,与不施氮相比,施氮可以显著提高氮素转运量,其中 P1 处理提高 1 110.5%。各处理间氮素收获指数则无显著差异。肥料种类极显著影响水稻氮素收获指数及氮吸收利用率 ($P<0.01$)。施用增效控释肥时,与农户模式相比,P1 处理和 P2 处理的氮吸收利用率显著提高 44.0%和 30.5%。

2.4 肥料种类和施氮水平对水稻季活性氮排放的影响

表 7 显示,肥料种类、施氮水平及两者的交互效应对水稻季 N₂O 排放量、NO₃⁻淋洗量及总活性氮损失量均有极显著影响($P<0.01$)。

由表 8 可知,2 种肥料处理下,随着施氮量的增加,总活性氮损失量均呈上升趋势。3 种活性氮损失中,NH₃排放量损失占比最大,2 种肥料处理下农户模式的 NH₃排放量较不施氮提高1 400.0%。施用无机包裹肥时,NH₃排放量、N₂O 排放量和NO₃⁻淋洗量大小变化规律相同,依次为 FP 处理>P1 处理>P2 处理>P3 处理>CK 处理。与农户模式相比,P1 处理、P2 处理和 P3 处理的 N₂O 排放量显著降低

50.0%、52.0% 和 70.0%,NO₃⁻淋洗量显著降低 26.6%、27.3% 和 40.3%。增效控释肥处理的各活性氮排放量指标变化与上述结果基本一致。

表 7 肥料种类和施氮水平对水稻季活性氮排放量的影响效应
Table 7 Effects of fertilizer types and nitrogen application levels on active nitrogen emission in rice season

因素	NH ₃ 排放量	N ₂ O 排放量	NO ₃ ⁻ 淋洗量	总活性氮损失量
肥料种类(F)	—	34.17 **	45.17 **	41.31 **
施氮水平(N)	—	58.25 **	73.21 **	73.76 **
F×N	—	4.53 **	5.64 **	5.10 **

表内双因素分析中,*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著。—表示无法通过公式计算得出。

表 8 水稻季活性氮排放量

Table 8 Seasonal active nitrogen emission from rice

肥料种类	施氮水平	NH ₃ 排放量 (kg/hm ²)	N ₂ O 排放量 (kg/hm ²)	NO ₃ ⁻ 淋洗量 (kg/hm ²)	总活性氮损失量 (kg/hm ²)
无机包裹肥	CK	3.0	0.7±0c	6.0±0d	9.7±0e
	FP	45.0	5.0±0.6a	13.9±0.7a	63.9±1.3a
	P1	36.6	2.5±0.5b	10.2±0.7b	49.3±1.3b
	P2	33.2	2.4±0.7b	10.1±1.2b	45.7±1.8c
	P3	28.2	1.5±0.1c	8.3±0.1c	38.0±0.2d
增效控释肥	CK	3.0	0.7±0b	6.0±0c	9.7±0e
	FP	45.0	3.4±0.8a	11.7±1.2a	60.1±2.1a
	P1	36.6	1.1±0b	7.2±0.1bc	44.8±0.1b
	P2	33.2	1.1±0.2b	7.2±0.7bc	41.5±0.9c
	P3	28.2	1.3±0.3b	7.7±0.7bc	37.2±0.9d

CK、FP、P1、P2 和 P3 见表 2 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表内双因素分析中,*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平差异显著。

3 讨论

3.1 氮肥减量情况下,施用 2 种控释肥料对水稻产量及氮肥利用率的影响

目前农户仍普遍通过施用大量氮肥来追求作物高产,造成氮肥过量、养分利用率低和农业面源污染等一系列问题^[16]。据报道,巢湖流域水稻氮肥利用率仅为 30%~35%^[17],低于中国粮食作物氮肥利用率平均水平。因此,巢湖流域水稻种植体系氮肥减量增效势在必行。本研究结果表明,与农户模式相比,2 种控释肥料在减氮 20.0%条件下,对籽粒产量均无显著影响,但当减氮28.0%~40.0%时,则导致减产。在江苏省镇江市,常规施肥模式下氮肥减施

17.8%时,水稻产量降低,但差异不显著,而在减氮 20.0%时,产量显著降低,降幅可达 2.5%^[18],与本研究结果相似。本研究中施用无机包裹肥减氮 40.0%后的减产幅度达 27.5%,而施用增效控释肥在减氮 28.0% 和 40.0% 时分别减产 23.7% 和 27.1%,2 种控释肥料减氮施用后效果不一致,进一步分析产量构成因素可知,施用增效控释肥在减氮 28.0%和 40.0%时,水稻穗数较农户模式显著降低 18.2%和 25.6%。可见,过量减氮施用增效控释肥会造成水稻穗数降低导致减产。无机包裹肥减氮 40.0%施用,最终产量显著低于农户模式。可见,过量减氮施用无机包裹肥会造成水稻减产。线性加平台拟合分析结果表明,无机包裹肥和增效控释肥

达到平台产量时的施氮量分别为 230 kg/hm²和 195 kg/hm²。潘圣刚等^[19]的研究结果表明,在 240 kg/hm²施氮水平下,水稻穗数显著高于施氮 150 kg/hm²处理和不施氮处理。前人研究结果表明,减氮 33.0%施用氮肥会显著提高水稻穗数、千粒重和结实率,促进产量提升^[20]。无机包裹肥和增效控释肥具有延缓养分释放的作用,使氮素释放延后,满足水稻穗期营养供应。在农户模式施氮量基础上减氮 20.0%~28.0%施用 2 种控释肥料可以有效降低高峰苗而提高成穗率,进而提高籽粒库容量。

减氮施用 2 种控释肥料对氮肥利用率与对产量的影响不一致,减氮 28%施用增效控释肥时会造成水稻减产,与农户模式相比,籽粒产量降低 23.7%,氮吸收利用率显著提高,减氮 40%施用增效控释肥时,氮吸收利用率与其他减氮处理相比则显著降低,说明增效控释肥减氮 20%~28%施用,单位氮量得到充分利用,而减氮 40%施用增效控释肥时,氮吸收利用率显著降低的原因可能是减氮过量导致产量过低。施用无机包裹肥和增效控释肥条件下,农户模式施氮量的氮吸收利用率最低,说明为了追求高产而增加施氮量会造成氮肥利用率降低,浪费资源。也有其他研究结果^[21-23]表明增加施氮量会造成氮肥利用率降低。许凤英等^[24]认为,水稻籽粒产量与抽穗前氮素积累量和氮素转运效率呈显著或极显著相关,本研究中减氮 20%施用增效控释肥时的氮素转运量和氮素转运效率最高,与农户模式相比显著提高,说明氮素转运效率促进氮素向籽粒转移,提高氮肥利用率。无机包裹肥通过在尿素颗粒外层包裹无机材料,延缓尿素颗粒水解释放养分,增效控释肥中添加的网状材料,可以减缓肥料在土壤中的转化过程,促进更多的养分被作物吸收利用,提高氮肥利用率。

3.2 氮肥减量情况下,施用 2 种控释肥料对水稻季环境效益的影响

当前,施用氮肥的环境效益越来越引起研究者的重视,稻田氨挥发损失的氮可达施入量的 9%~42%,硝酸盐淋洗损失可达 10%~40%^[25],造成严重的农业面源污染,危害生态环境。温度对 NH₃挥发影响较大,而水稻施基肥时期环境温度较高,氨挥发损失量大^[26],且随着施氮量的增加,底物浓度增加,加快 NH₄⁺向 NH₃转化,造成氨挥发损失量增加。王家宝等^[27]的研究结果表明,在同一施氮方式下,

稻田土壤氨挥发损失量随着施氮量增加而增加,相似的结果也已有很多报道^[28]。因此减少稻田 NH₃排放量对水稻季环境效益提升意义重大。在本研究中,无机包裹肥通过在尿素颗粒外层包裹无机材料,延缓尿素颗粒水解,一定程度上可以减少 NH₃挥发损失。增效控释肥添加网状材料可以延缓肥料中尿素的水解,降低底物浓度,也可以有效降低 NH₃挥发损失。相关研究结果表明降雨量大或灌水过量,是氮素淋失量增加的首要原因^[25],水稻田外源氮素的投入会增加 N₂O 的排放^[29]。本研究发现,随着施氮量的提高,NO₃⁻淋洗量、N₂O 排放量显著提高,结果表明施氮量是增加 NO₃⁻淋洗量、N₂O 排放量的重要因素。也有研究结果表明 NH₃排放量、N₂O 排放量、NO₃⁻淋洗量与施氮量没有显著的相关性^[30-32],这可能是不同地区环境气候条件不同导致的。本研究中,减氮 20%施用 2 种控释肥料与农户模式相比,N₂O 排放量、NO₃⁻淋洗量和总活性氮损失量都显著降低,但产量却无显著变化,顾建芹等^[33]的研究结果表明,减量 20%施用缓释肥既能稳定水稻籽粒产量,又能有效降低稻田内的氮损失风险,与本研究结果相似,说明合理减氮施用控释肥料可以实现氮肥减量增效,从源头上控制活性氮排放。减氮施用增效控释肥对减少活性氮损失的效果较好。

4 结 论

在巢湖流域水稻生产中,农民常规施氮量为 263 kg/hm²,本研究结果表明施氮量在此基础上减少 20%~28%并配合无机包裹肥施用,减氮 20%配合增效控释肥施用,可以保证水稻籽粒产量不显著降低。此外,减少施氮量可以显著降低活性氮损失,提高水稻季环境效益。综合考虑 2 种控释肥料减氮施用潜力和环境效益评价,通过回归分析得出 2 种控释肥料的氮素施用量,无机包裹肥和增效控释肥的最佳施氮量分别为 230 kg/hm²和 195 kg/hm²。推荐农户施用控释肥料,减少肥料的施用量,达到节本增收的同时也为巢湖地区农业面源污染防控做出贡献。

参考文献:

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [2] 周江明,赵琳,董越勇,等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮

- 肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
- [3] 闫 湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077.
- [4] 许祥富, 林明义. 我国新型肥料的研究现状及在水稻上的应用进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 17-19, 29.
- [5] 吴萍萍, 李录久, 耿言安, 等. 不同新型肥料对江淮地区水稻生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 149-153.
- [6] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [7] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 新型高效肥料研究展望[J]. 土壤与作物, 2012, 1(1): 2-9.
- [8] 申义珍, 张正林, 钱晓晴, 等. 高产水稻的氮素营养特点与施肥[J]. 土壤通报, 1994, 37(2): 78-80.
- [9] 张文学, 孙 刚, 何 萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830.
- [10] 许方甫. 缓控释肥用量对机插水稻产量及品质的影响[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(17): 1-3.
- [11] 仇 真. 辽宁黄海稻区水稻应用缓控释肥料肥效试验研究[J]. 北方水稻, 2022, 52(4): 23-25, 29.
- [12] 崔月贞, 吴玉红, 郝兴顺, 等. 汉中盆地水稻产量和土壤微生物对新型肥料的响应[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2592-2599.
- [13] 周丽平, 赵 秋, 张新建, 等. 新型增效复合肥料对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(2): 112-120.
- [14] 王文青, 何玮恒, 陈培峰, 等. 新型缓释肥料对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(1): 84-87.
- [15] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [16] 杜文婷, 雷肖肖, 卢慧宇, 等. 氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4863-4878.
- [17] 朱小红, 马中文, 马友华, 等. 施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2119-2126.
- [18] 陈 俊, 姜 慧. 不同氮肥用量对水稻生长及其产量的影响[J]. 上海农业科技, 2023, 52(2): 133-134, 137.
- [19] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟 晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23-29.
- [20] 黄航航. 灌溉方式与施氮量对水稻产量和品质的交互作用及其生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [21] 杨海龙, 雷锦超, 蔡金洋. 不同施氮水平对太湖流域水稻生长发育和氮素利用效率的影响[J]. 上海农业学报, 2021, 37(5): 78-84.
- [22] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161-165.
- [23] 刘春美. 氮肥减量对水稻生长发育、产量及氮肥利用率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [24] 许凤英, 秦亚平, 王晓玲, 等. 不同新型功能尿素对水稻产量及氮肥吸收利用率的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 59(10): 2257-2260, 2263.
- [25] 顾海燕. 施氮量及时期对稻田氮素挥发、淋失和水稻利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [26] 张博文, 赵 森, 敖玉琴, 等. 含氯氮肥对太湖稻麦轮作体系氮挥发及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 557-566.
- [27] 王家宝, 郭 刚, 袁漫漫, 等. 不同施氮量及施氮方式对水稻田氮挥发及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, 58(5): 10-17.
- [28] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106: 9. DOI: 10.1073/PNAS.0813417106.
- [29] 刘智远. 稻田土壤 N_2O 排放特征及影响机制研究进展[J]. 科学与财富, 2018(34): 234.
- [30] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [31] 田 伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2426-2434.
- [32] 丁武汉, 谢海宽, 徐 驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1097-1109.
- [33] 顾建芹, 江 健. 减量施肥条件下稻田径流氮磷流失特征的研究[J]. 上海农业学报, 2023, 39(1): 87-93.

(责任编辑:陈海霞)