

引用格式:

朱泽宇, 毛志伟, 苏柠, 曾鹏, 胡东升, 谢桂先. 控释氮肥减量施用对稻田氮素径流流失与水稻氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 74–82.

ZHU Z Y, MAO Z W, SU N, ZENG P, HU D S, XIE G X. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer reduced application on nitrogen runoff loss in paddy field and nitrogen use efficiency of rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2025, 51(1): 74–82.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



控释氮肥减量施用对稻田氮素径流流失 与水稻氮肥利用率的影响

朱泽宇¹, 毛志伟¹, 苏柠¹, 曾鹏¹, 胡东升³, 谢桂先^{1,2*}

(1.湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙 410128; 2.土肥高效利用国家工程研究中心, 湖南 长沙 410128; 3.靖州苗族侗族自治县农业农村局, 湖南 靖州 418400)

摘要: 设置不施氮肥(CK)、常规尿素(U)、等氮量控释氮肥(CRU)、控释氮肥减氮10%(CRU1)、控释氮肥减氮20%(CRU2)和控释氮肥减氮30%(CRU3)等6个处理, 通过2020—2021年田间试验研究控释氮肥减量施用对双季稻田氮素径流流失与水稻产量和氮素利用效率的影响。结果表明: 相比U处理, CRU1、CRU2、CRU3处理的稻田总氮(TN)径流流失量显著降低, 其中, 2020年CRU1、CRU2、CRU3处理的早稻稻田TN径流流失量分别降低了57.99%、74.58%、78.49%, 晚稻稻田的分别降低了60.80%、63.89%、66.05%, 2021年CRU1、CRU2、CRU3处理的早稻稻田TN径流流失量分别降低了55.08%、63.77%、72.12%, 晚稻稻田的分别降低了42.18%、66.67%、75.36%, 且TN径流流失量随控释氮肥施用量的减少有降低的趋势; 铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为稻田氮素径流流失的主要形态, 施氮处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失量为0.50~7.98 kg/hm², 占TN径流流失量的28.40%~64.57%; 与U处理相比, 控释氮肥减量处理在维持水稻产量的同时, 氮肥农学效率、氮肥偏生产力 and 氮肥吸收利用率分别显著提高了25.69%~37.63%、13.48%~42.24%、9.55%~40.53%, 其中以控释氮肥减氮30%处理的效果最佳。综上, 控释氮肥减量施用在稳定水稻产量的同时能有效减少稻田氮素径流流失, 提高氮肥利用效率, 适宜在南方双季稻区推广应用。

关键词: 双季稻; 控释氮肥; 氮素径流流失; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1+5; S511.4+20.6 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2025)01-0074-09

Effects of controlled-release nitrogen fertilizer reduced application on nitrogen runoff loss in paddy field and nitrogen use efficiency of rice

ZHU Zeyu¹, MAO Zhiwei¹, SU Ning¹, ZENG Peng¹, HU Dongsheng³, XIE Guixian^{1,2*}

(1.College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Agriculture and Rural Affairs Bureau of Jingzhou Miao and Dong Autonomous County, Jingzhou, Hunan 418400, China)

Abstract: In this study, six treatments, no nitrogen(CK), conventional urea(U), controlled-release nitrogen fertilizer at full(CRU), 10%(CRU1), 20%(CRU2), and 30%(CRU3) reduced nitrogen rates were performed in a field experiment in double-cropping rice fields from 2020 to 2021. The goal of this experiment was to examine the effects of reduced controlled-release nitrogen on nitrogen runoff loss, rice yield, and nitrogen use efficiency. The results indicated that compared with the U treatment, total nitrogen(TN) runoff losses under CRU1, CRU2, and CRU3 treatments were

收稿日期: 2024-01-04

修回日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U19A2050); 湖南省教育厅重点项目(19A219); 湖南农业大学“双一流”建设项目(SYL201802004)

作者简介: 朱泽宇(1997—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究, 1070610075@qq.com; *通信作者, 谢桂先, 博士, 教授, 主要从事农业面源污染防治与农业有机废弃物资源化利用研究, xieguixian@126.com

significantly reduced. In 2020, early rice TN losses under CRU1, CRU2, and CRU3 treatments decreased by 57.99%, 74.58%, and 78.49%, and late rice losses decreased by 60.80%, 63.89%, and 66.05%, respectively, while in 2021, early rice TN losses decreased by 55.08%, 63.77%, and 72.12%, and late rice losses decreased by 42.18%, 66.67%, and 75.36%, respectively. TN runoff loss decreased as nitrogen application rates declined. Ammonium nitrogen($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was the primary form of nitrogen runoff loss, ranging from 0.50 to 7.98 kg/hm² and accounting for 28.40%-64.57% of TN loss in nitrogen fertilizer treatments. Compared with the U treatment, controlled-release nitrogen fertilizer reduced treatments significantly increased agronomic efficiencies, partial factor productivities, and absorption and utilization rates of nitrogen fertilizer by 25.69%-37.63%, 13.48%-42.24%, and 9.55%-40.53%, respectively, while maintaining rice yields. CRU3(30% reduction) treatment performed best. In conclusion, reduced controlled-release nitrogen application effectively lowered nitrogen runoff loss, improved nitrogen use efficiency, and stabilized rice yield, making it suitable for southern double-cropping rice systems.

Keywords: double cropping rice; controlled-release nitrogen fertilizer; nitrogen runoff loss; yield; nitrogen use efficiency

氮是实现水稻高产、稳产的重要元素,对水稻产量提升和品质改善等有着举足轻重的作用。大量氮肥的施用在获得较高水稻产量的同时,也会导致氮素损失量大、氮肥利用率低和环境污染等问题^[1]。中国南方双季稻区早稻和晚稻生育期降雨频次和强度大,农田产流量大,因而径流是稻田氮素的主要损失途径^[2]。此外,常规化学氮肥具有速溶性,也会造成氮素养分的大量流失^[3]。

控释氮肥是一种环境友好型肥料,它能够控制氮素养分缓慢地释放,具有养分利用率高、肥效时间长、施用方便和养分流失量少等特点^[4-6]。控释氮肥的施用能弥补传统氮肥、尿素的不足,满足作物生长过程中各个时期所需要的养分供应,减少农田氮素径流损失,同时能够减少施肥次数,节省财力和物力^[7]。控释氮肥已成为农业面源污染研究的热点^[7]。前人的研究表明,与常规化学氮肥相比,施用控释氮肥能显著降低氮素的渗漏与径流损失,降低氮在土壤中的残留^[8-9],减少氮肥的挥发、淋失和固定,从而提高氮肥的利用率,降低氮流失造成的环境污染的风险^[10-12]。控释氮肥一次性施用能满足水稻不同生育期对氮素的营养需求^[13],提高水稻生长发育后期氮素养分的供给和干物质的积累,对水稻具有稳定的增产效果^[14-15]。针对控释氮肥的施用对稻田氮素流失、水稻产量与氮素养分利用率的影响已开展了相关的研究,但绝大部分研究的周期短,且研究的内容不够全面。笔者通过两年的田间试验,研究施用不同量的控释氮肥的双季稻

田氮素流失特征、水稻氮肥利用率和产量,以期为控释氮肥的大面积推广及农业面源污染的防控等提供依据。

1 试验地概况

定位试验位于湖南省浏阳市沿溪镇花园村(113°49'E, 28°19'N)。该试验从 2013 年开始,本研究中,选取的时间段为 2020—2021 年。试验区域属中亚热带季风湿润气候,年平均气温为 17.4℃,最热月份为 7 月,月平均气温为 28.4℃,最冷月份为 1 月,月平均气温为 5.8℃,年平均日照时数为 1 516.7 h,年平均降水量为 1 680 mm,无霜期 266 d。

2 材料与方法

2.1 供试材料

供试土壤为潮沙泥,主要是由黏土和河流冲积物等成土母质发育而成。试验开始前土壤(0~20 cm)的全氮、全磷、全钾和有机质质量分数分别为 1.18、0.46、10.68、18.24 g/kg。供试肥料为尿素,含 N 46%;控释氮肥由山东农大肥业科技股份有限公司生产,含 N 42%,控释期 60 d;过磷酸钙含 P₂O₅ 12%;氯化钾含 K₂O 60%。供试早稻品种为泰优 395,晚稻品种为泰优 390。

2.2 试验设计

试验设置 6 个处理,分别为不施氮肥处理(CK)、常规尿素处理(U)、等氮量控释氮肥处理(CRU)、控

释氮肥减氮 10%处理(CRU1)、控释氮肥减氮 20%处理(CRU2)、控释氮肥减氮 30%处理(CRU3)。每个处理设置 3 次重复。每小区的面积为 20 m²(5 m×4 m), 小区随机区组排列。

CK、U、CRU、CRU1、CRU2 和 CRU3 处理的早稻 N 肥用量分别为 0、150、150、135、120、105 kg/hm², 晚稻 N 肥用量分别为 0、180、180、162、144、126 kg/hm²。各施肥处理早稻的 P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 72、90 kg/hm², 晚稻的 P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 60、105 kg/hm²。60%的氮、钾肥当成基肥施用, 40%的氮、钾肥当成分蘖肥施用, 100%磷肥当成基肥施用。

早稻和晚稻的栽植株行距均为 20.0 cm×17.4 cm, 每穴 1~2 苗。2020 年双季稻早稻于 4 月 25 日施基肥并移栽, 5 月 3 日追肥, 7 月 18 日收获; 晚稻于 7 月 22 日施基肥并移栽, 7 月 29 日追肥, 10 月 12 日收获。2021 年双季稻早稻于 4 月 30 日施基肥并移栽, 5 月 8 日追肥, 7 月 23 日收获; 晚稻于 7 月 27 日施基肥并移栽, 8 月 3 日追肥, 10 月 17 日收获。整个水稻生育期管理措施与当地水稻生产相同。

2.3 样品的采集与测定

2.3.1 径流量的测定及径流样品的采集和分析

在每个小区的一侧设置排水口连接集流池, 排水口高度差为 8 cm, 降雨时, 小区内水面超过排水口, 即为产生 1 次径流; 径流流入每个小区的集流池内, 测量池内水位刻度, 用体积法测定小区径流流失量; 同时取径流水样于 500 mL 塑料瓶内, 低温保存, 24 h 内完成水样指标分析。采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定径流水样总氮(TN)含量; 径流水样经 0.45 μm 微孔滤膜抽滤后, 采用

碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定溶解态氮(DN)含量, 并运用 SmartChem200 全自动间断化学分析仪测定抽滤后径流水样中硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)的含量。测量并记录早稻和晚稻生长季的降雨情况。

2.3.2 水稻产量测定和植株样品的采集与分析

各小区水稻单收称质量, 测定籽粒和稻草产量。先将采集的籽粒和稻草样品放入烘箱于 105 °C 杀青, 75 °C 烘干至恒重; 然后将样品粉碎过孔径为 0.5 mm 的筛; 最后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯氏定氮法测定籽粒和稻草的全氮含量。

2.4 数据统计与分析

参照文献[16-17]的方法, 计算 N 素径流流失量、N 素径流流失率、N 肥吸收利用率、N 肥农学效率和 N 肥偏生产力。运用 Excel 2010 进行表格处理和数据分析, 选用 LSD 检验法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同施肥模式对双季稻田氮素径流流失的影响

3.1.1 早稻和晚稻生长季的降水量与产流量

在 2020—2021 年, 早稻和晚稻生长季降水量如表 1 所示。2020 年早稻生长季总降水量为 754.0 mm, 日降水量最大值为 103.4 mm; 晚稻生长季总降水量为 235.0 mm, 日降水量最大值为 78.4 mm。2021 年早稻生长季总降水量为 427.8 mm, 日降水量最大值为 91.2 mm; 晚稻生长季总降水量为 166.5 mm, 日降水量最大值为 68.4mm。总体来说, 这两年中早稻生长季降雨次数和降水量均大于晚稻生长季的。

表 1 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的降水量

Table 1 Rainfall in early and late rice growth seasons from 2020 to 2021

稻季	日期	降水量/mm	稻季	日期	降水量/mm	稻季	日期	降水量/mm
早稻	2020-05-02	24.3	早稻	2020-07-03	22.8	早稻	2021-05-17	50.4
	2020-05-03	81.4		晚稻	2020-08-03		78.4	2021-05-27
	2020-05-04	38.6	2020-08-04		19.8		2021-06-07	31.4
	2020-05-11	103.4	2020-08-05	8.6	2021-06-09		12.2	
	2020-05-12	49.0	2020-08-19	60.4	2021-06-24		42.3	
	2020-05-13	36.0	2020-08-21	6.8	2021-06-29		13.6	

表 1(续)

稻季	日期	降水量/mm	稻季	日期	降水量/mm	稻季	日期	降水量/mm
	2020-05-19	71.2		2020-09-12	22.0		2021-06-03	30.2
	2020-05-02	21.8		2020-09-13	20.6		2021-07-17	22.4
	2020-05-21	41.2		2020-09-14	18.4	晚稻	2021-08-11	68.4
	2020-05-22	98.8	早稻	2021-05-03	36.4		2021-08-28	52.2
	2020-06-02	79.3		2021-05-04	29.6		2021-09-05	8.8
	2020-06-03	25.6		2021-05-06	91.2		2021-09-18	32.5
	2020-06-04	18.5		2021-05-14	18.2		2021-10-02	4.6
	2020-06-29	42.1		2021-05-15	38.5			

由表 2 可知, 2020 年和 2021 年早稻季和晚稻季稻田产流频次差异较大。2020 年早稻季稻田产流共 5 次, 产流时间分别为 5 月 4 日、5 月 11 日、5 月 19 日、5 月 22 日和 6 月 2 日, 5 次产流事件的径流量分别为 287、316、237、256、198 m³/hm²; 晚稻季仅在 8 月 19 日产流 1 次, 径流量为 249 m³/hm², 这是由于晚稻季降雨频次和降雨强度均比早稻季的低。2021 年早稻季稻田产流 2 次, 产流时间为 5 月 7 日和 5 月 14 日, 2 次产流事件径流量分别为 315、273 m³/hm²; 晚稻季分别在 8 月 11 日和 8 月

28 日产流 2 次, 径流量分别为 281、170 m³/hm²。

3.1.2 早稻和晚稻生长季稻田氮素径流流失特征

从表 3 可知, 2020 年 5 月 4 日、5 月 11 日、5 月 19 日、5 月 22 日、6 月 2 日和 8 月 19 日共 6 次产流事件中各施氮肥处理下 TN 径流流失量分别占该处理 TN 径流流失总量的 31.92%~41.59%、14.10%~27.74%、7.65%~11.42%、0.98%~8.04%、0.92%~5.38%、18.84%~28.21%, 由于施肥后降水量较大导致早稻生长期 5 月 4 日、5 月 11 日和晚稻生长期 8 月 19 日的 TN 径流流失量较大; 相比 U 处理, 控释氮肥处理稻田 TN 径流流失量在 5 月 4 日、5 月 11 日、5 月 19 日(早稻季)和 8 月 19 日(晚稻季)均显著降低, 而在 5 月 22 日和 6 月 2 日均显著增加, 这可能是因为控释氮肥在水稻生长后期氮素养分释放, 导致 5 月 22 日和 6 月 2 日时稻田面水氮素养分含量较高。2021 年 5 月 7 日、5 月 14 日、8 月 11 日和 8 月 28 日 4 次产流事件中各施氮肥处理 TN 径流流失量分别占该处理 TN 径流流失总量的 39.19%~44.17%、19.59%~26.74%、20.42%~26.17%、10.70%~15.20%; 在 4 次产流事件中, 相比 U 处理, 施用控释氮肥处理的稻田 TN 径流流失量显著降低。2020—2021 年控释氮肥各处理

表 2 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的径流量

Table 2 Runoff in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

稻季	日期	径流量/(m ³ ·hm ⁻²)
早稻	2020-05-04	287
	2020-05-11	316
	2020-05-19	237
	2020-05-22	256
	2020-06-02	198
晚稻	2020-08-19	249
早稻	2021-05-07	315
	2021-05-14	273
晚稻	2021-08-11	281
	2021-08-28	170

表 3 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的 TN 径流流失量

Table 3 TN runoff in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

处理	TN 径流流失量/(kg·hm ⁻²)									
	2020-05-04	2020-05-11	2020-05-19	2020-05-22	2020-06-02	2020-08-19	2021-05-07	2021-05-14	2021-08-11	2021-08-28
CK	(0.14±0.02)e	(0.14±0.01)d	(0.14±0.02)d	(0.13±0.02)c	(0.13±0.01)b	(0.13±0.01)d	(0.14±0.02)e	(0.14±0.02)d	(0.14±0.01)e	(0.14±0.01)d
U	(6.64±0.14)a	(4.51±0.08)a	(1.56±0.11)a	(0.16±0.04)c	(0.15±0.03)b	(3.24±0.23)a	(7.12±0.20)a	(4.50±0.14)a	(4.41±0.16)a	(1.92±0.08)a
CRU	(4.35±0.24)b	(2.18±0.12)b	(0.80±0.02)b	(0.51±0.03)a	(0.31±0.01)a	(2.31±0.04)b	(4.78±0.24)b	(2.57±0.14)b	(3.12±0.16)b	(1.45±0.08)b
CRU1	(2.32±0.12)c	(1.68±0.14)b	(0.77±0.06)bc	(0.45±0.04)a	(0.25±0.04)a	(1.27±0.02)c	(3.48±0.18)c	(1.74±0.08)c	(2.31±0.22)c	(1.35±0.14)b
CRU2	(1.43±0.04)d	(0.82±0.04)c	(0.47±0.03)c	(0.36±0.05)b	(0.23±0.01)a	(1.17±0.01)c	(2.52±0.07)cd	(1.69±0.08)c	(1.42±0.06)d	(0.69±0.02)c
CRU3	(1.38±0.08)d	(0.55±0.04)c	(0.37±0.03)c	(0.29±0.02)b	(0.21±0.04)a	(1.10±0.16)c	(2.12±0.10)d	(1.12±0.05)c	(0.98±0.03)d	(0.58±0.02)c

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

的稻田 TN 径流流失量峰值(施基肥后第 1 次下雨造成的氮素径流流失量)早稻、晚稻较 U 处理的分别降低了 32.87%~79.22%(2020-05-04、2021-05-07)、28.70%~77.78%(2020-08-19、2021-08-11)。

从表 4 可知,相比 U 处理,在 2020 年早稻季前 3 次产流事件中,控释氮肥各处理下 DN 径流流失量均显著降低;在 5 月 22 日产流事件中,控释氮肥处理 DN 径流流失量显著增加;在 6 月 2 日产流事件中,CRU 和 CRU1 处理 DN 径流流失量显著增加;在 2020 年晚稻季 1 次产流事件中,CRU2 和 CRU3 处理 DN 径流流失量显著降低。2021 年 4 次产流事件中,控释氮肥各处理下 DN 径流流失量均显著低于 U 处理的,且随着控释氮肥施用量的降

低, DN 径流流失量也逐渐降低。

从表 5 可知,与 U 处理相比,2020 年早稻季前 3 次产流事件中,控释氮肥各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量均显著降低;在 5 月 22 日和 8 月 19 日产流事件中,控释氮肥减量处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量显著降低;在 6 月 2 日产流事件中,CRU2 和 CRU3 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量显著降低。2021 年 4 次产流事件中,控释氮肥减量处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量显著低于 U 处理的,且随着控释氮肥施用量的降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量有减少的趋势。

从表 6 可知,与 U 处理相比,在 2020 年早稻季前 4 次和晚稻 1 次产流事件中,控释氮肥各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流流失量显著降低;在 6 月 2 日产流事件

表 4 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的 DN 径流流失量

Table 4 DN runoff in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

处理	DN 径流流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)									
	2020-05-04	2020-05-11	2020-05-19	2020-05-22	2020-06-02	2020-08-19	2021-05-07	2021-05-14	2021-08-11	2021-08-28
CK	(0.11±0.01)d	(0.10±0.01)d	(0.11±0.02)d	(0.10±0.01)b	(0.11±0.01)b	(0.11±0.02)d	(0.11±0.02)e	(0.11±0.02)e	(0.10±0.01)e	(0.11±0.01)e
U	(5.38±0.12)a	(3.00±0.14)a	(0.82±0.06)a	(0.14±0.02)b	(0.11±0.04)b	(1.20±0.04)a	(4.62±0.16)a	(2.66±0.18)a	(3.04±0.24)a	(1.85±0.08)a
CRU	(2.28±0.18)b	(1.24±0.08)b	(0.49±0.04)b	(0.22±0.04)a	(0.18±0.02)a	(1.15±0.02)a	(2.58±0.16)b	(1.43±0.14)b	(1.74±0.08)b	(1.14±0.06)b
CRU1	(1.26±0.10)c	(1.17±0.12)b	(0.38±0.03)bc	(0.21±0.02)a	(0.17±0.02)a	(1.01±0.01)ab	(1.98±0.12)c	(1.10±0.12)c	(0.97±0.08)c	(0.78±0.08)c
CRU2	(1.06±0.02)c	(0.68±0.02)c	(0.34±0.04)c	(0.20±0.02)a	(0.15±0.01)ab	(0.94±0.09)b	(1.50±0.16)d	(1.08±0.06)c	(0.91±0.06)c	(0.62±0.04)c
CRU3	(0.87±0.04)c	(0.46±0.12)c	(0.22±0.04)c	(0.19±0.02)a	(0.14±0.01)ab	(0.76±0.02)c	(1.34±0.08)d	(0.72±0.04)d	(0.42±0.02)d	(0.36±0.02)d

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

表 5 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量

Table 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ runoff in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

处理	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)									
	2020-05-04	2020-05-11	2020-05-19	2020-05-22	2020-06-02	2020-08-19	2021-05-07	2021-05-14	2021-08-11	2021-08-28
CK	(0.08±0.02)d	(0.09±0.01)d	(0.08±0.02)d	(0.08±0.01)c	(0.09±0.01)b	(0.09±0.01)d	(0.08±0.02)d	(0.08±0.01)d	(0.07±0.01)e	(0.07±0.01)d
U	(4.42±0.08)a	(2.51±0.16)a	(0.85±0.04)a	(0.11±0.04)a	(0.09±0.02)a	(0.92±0.16)ab	(4.16±0.22)a	(1.96±0.18)a	(1.80±0.08)a	(1.07±0.12)a
CRU	(1.30±0.16)b	(1.14±0.04)b	(0.44±0.04)b	(0.19±0.02)a	(0.16±0.04)a	(1.00±0.05)a	(1.98±0.12)b	(1.33±0.08)b	(1.26±0.04)b	(1.04±0.02)a
CRU1	(1.15±0.03)b	(0.95±0.04)bc	(0.28±0.02)c	(0.13±0.04)b	(0.10±0.01)a	(0.82±0.02)b	(1.54±0.16)bc	(1.01±0.08)b	(1.02±0.02)b	(0.40±0.2)b
CRU2	(0.88±0.04)bc	(0.44±0.04)bc	(0.18±0.01)c	(0.12±0.02)c	(0.09±0.02)b	(0.62±0.02)c	(1.20±0.06)bc	(0.84±0.06)bc	(0.84±0.04)c	(0.38±0.02)b
CRU3	(0.64±0.06)c	(0.35±0.04)c	(0.11±0.02)d	(0.08±0.01)c	(0.08±0.01)b	(0.50±0.01)c	(0.94±0.04)c	(0.64±0.02)c	(0.36±0.01)d	(0.27±0.04)c

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

表 6 2020—2021 年早稻和晚稻生长期间的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流流失量

Table 6 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ runoff in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

处理	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流流失量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)									
	2020-05-04	2020-05-11	2020-05-19	2020-05-22	2020-06-02	2020-08-19	2021-05-07	2021-05-14	2021-08-11	2021-08-28
CK	(0.01±0.01)d	(0.02±0.01)d	(0.01±0.02)d	(0.02±0.01)d	(0.01±0.01)d	(0.02±0.01)e	(0.01±0.02)d	(0.02±0.01)d	(0.01±0.01)d	(0.02±0.01)d
U	(0.68±0.03)a	(0.37±0.4)a	(0.18±0.04)a	(0.12±0.02)a	(0.05±0.01)ab	(0.28±0.04)a	(0.68±0.02)a	(0.44±0.01)a	(0.42±0.08)a	(0.24±0.02)a
CRU	(0.36±0.06)b	(0.18±0.04)b	(0.10±0.02)b	(0.08±0.02)b	(0.07±0.01)a	(0.13±0.02)b	(0.41±0.02)b	(0.27±0.08)b	(0.25±0.06)b	(0.17±0.04)b
CRU1	(0.21±0.02)c	(0.12±0.04)bc	(0.07±0.02)bc	(0.04±0.01)c	(0.04±0.01)b	(0.15±0.02)c	(0.32±0.08)bc	(0.09±0.02)c	(0.12±0.01)c	(0.11±0.1)bc
CRU2	(0.11±0.02)c	(0.08±0.02)c	(0.05±0.01)c	(0.04±0.01)c	(0.04±0.02)b	(0.14±0.03)c	(0.24±0.08)c	(0.08±0.02)c	(0.12±0.04)c	(0.08±0.01)c
CRU3	(0.06±0.02)cd	(0.04±0.01)c	(0.04±0.01)c	(0.03±0.01)c	(0.02±0.01)c	(0.09±0.01)d	(0.23±0.08)c	(0.07±0.01)c	(0.07±0.01)c	(0.04±0.01)c

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

中,控释氮肥减氮处理 NO_3^- -N径流流失量显著降低。2021年4次产流事件中,控释氮肥各处理 NO_3^- -N径流流失量均显著低于U处理的,且随着控释氮肥施用量的降低, NO_3^- -N径流流失量有降低的趋势。

3.1.3 早稻和晚稻生长季稻田的氮素径流流失量和流失率及流失形态

从表 7 可知,相比 U 处理,控释氮肥减量施用能显著降低稻田 TN、DN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 径流流失量(2020 年晚稻 CRU1 处理的 NH_4^+ -N 径流流失量除外)和降低稻田 TN 流失率。2020 年施氮处理早稻季稻田 TN 径流流失总量为 2.80~13.02 kg/hm^2 , TN 流失率为 2.02%~8.23%;晚稻季稻田 TN 径流流失总量为 1.10~3.24 kg/hm^2 , TN 流失率为 0.64%~1.73%;相比 U 处理,CRU、CRU1、CRU2、CRU3

处理的早稻季稻田 TN 径流流失量分别降低了 37.40%、57.99%、74.58%、78.49%,晚稻的分别降低了 28.70%、60.80%、63.89%、66.05%,且随控释氮肥用量的减少, TN 径流流失量均逐渐降低。

2021 年施氮处理早稻季稻田 TN 径流流失总量为 3.24~11.62 kg/hm^2 , TN 流失率为 2.82%~7.56%;晚稻季稻田 TN 径流流失总量为 1.56~6.33 kg/hm^2 , TN 流失率为 1.02%~3.36%;与 U 处理相比,CRU、CRU1、CRU2、CRU3 处理的早稻季稻田 TN 径流流失量分别降低了 36.75%、55.08%、63.77%、72.12%,晚稻季的分别降低了 27.80%、42.18%、66.67%、75.36%。两年中两个稻季的 TN 径流流失量均随控释氮肥用量的减少逐渐降低,且控释氮肥减氮处理稻田 TN 径流流失量均显著低于 CRU 的。

表 7 2020—2021 年早稻和晚稻生长期期间的氮素径流流失量和总氮流失率

Table 7 Nitrogen runoff losses and total nitrogen loss rates in early and late rice growing seasons from 2020 to 2021

年份	稻季	处理	N 径流流失量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$				TN 流失率/%
			TN	DN	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	
2020	早稻	CK	(0.68±0.04)e	(0.53±0.01)e	(0.42±0.21)e	(0.07±0.02)e	
		U	(13.02±0.19)a	(9.45±0.12)a	(7.98±0.34)a	(1.40±0.03)a	8.23
		CRU	(8.15±0.21)b	(4.41±0.11)b	(3.23±0.12)b	(0.79±0.01)b	4.98
		CRU1	(5.47±0.23)c	(3.19±0.33)bc	(2.61±0.25)c	(0.48±0.01)c	3.55
		CRU2	(3.31±0.06)d	(2.43±0.06)c	(1.71±0.22)d	(0.32±0.04)c	2.19
		CRU3	(2.80±0.09)d	(1.88±0.02)d	(1.26±0.04)d	(0.19±0.04)d	2.02
	晚稻	CK	(0.13±0.01)d	(0.11±0.02)d	(0.09±0.01)d	(0.02±0.01)e	
		U	(3.24±0.23)a	(1.20±0.04)a	(0.92±0.16)ab	(0.28±0.04)a	1.73
		CRU	(2.31±0.04)b	(1.15±0.02)a	(1.00±0.05)a	(0.13±0.02)b	1.21
		CRU1	(1.27±0.02)c	(1.01±0.01)ab	(0.82±0.02)b	(0.15±0.02)c	0.70
		CRU2	(1.17±0.01)c	(0.94±0.09)b	(0.62±0.02)c	(0.14±0.03)c	0.64
		CRU3	(1.10±0.16)c	(0.76±0.02)c	(0.50±0.01)c	(0.09±0.01)d	0.77
2021	早稻	CK	(0.28±0.01)e	(0.22±0.02)e	(0.16±0.12)e	(0.03±0.02)e	
		U	(11.62±0.12)a	(7.28±0.10)a	(6.12±0.06)a	(1.12±0.01)a	7.56
		CRU	(7.35±0.12)b	(4.01±0.01)b	(3.31±0.02)b	(0.68±0.01)b	4.71
		CRU1	(5.22±0.20)c	(3.08±0.03)bc	(2.55±0.03)c	(0.41±0.02)c	3.66
		CRU2	(4.21±0.04)d	(2.58±0.04)c	(2.04±0.06)c	(0.32±0.04)c	3.28
		CRU3	(3.24±0.03)d	(2.06±0.04)d	(1.58±0.04)d	(0.30±0.02)d	2.82
	晚稻	CK	(0.28±0.02)e	(0.21±0.01)d	(0.14±0.02)d	(0.03±0.02)e	
		U	(6.33±0.04)a	(4.89±0.08)a	(2.87±0.04)a	(0.66±0.01)a	3.36
		CRU	(4.57±0.04)b	(2.88±0.04)b	(2.30±0.03)a	(0.42±0.02)a	2.38
		CRU1	(3.66±0.02)c	(1.75±0.03)b	(1.42±0.02)b	(0.23±0.02)b	2.09
		CRU2	(2.11±0.02)c	(1.53±0.03)b	(1.22±0.02)b	(0.20±0.02)b	1.27
		CRU3	(1.56±0.12)d	(0.78±0.02)c	(0.63±0.04)c	(0.11±0.01)c	1.02

同列不同字母示同年同季处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

从表7还可知,各施氮处理下DN流失量占TN径流流失量的37.04%~80.34%;NO₃⁻-N径流流失量占TN径流流失量的5.63%~11.97%;NH₄⁺-N径流流失量占TN径流流失量的28.40%~64.57%,且各控释氮肥处理的早稻NH₄⁺-N径流流失量占TN径流流失量的占比均小于U处理的。因长期处于淹水状态,稻田面水和土壤溶液中氮素以NH₄⁺-N形态为主,所以稻田氮素径流流失的主要形态为NH₄⁺-N。

3.2 不同施肥模式对双季稻产量及肥料利用率的影响

3.2.1 早稻和晚稻的产量与地上部氮积累量

相比CK处理,施氮处理均显著提高了2020年和2021年早稻和晚稻的籽粒产量,但早稻和晚稻籽粒产量在施氮处理间的差异均无统计学意义(表8)。从两年的结果来看,相比U处理,CRU、CRU1处理的早稻籽粒氮积累量均显著增加,增幅

表8 2020—2021年早稻和晚稻的籽粒产量与地上部氮积累量

Table 8 Grain yields and aboveground nitrogen accumulations of early and late rice from 2020 to 2021

年份	稻季	处理	籽粒产量/(t·hm ⁻²)	地上部氮积累量/(kg·hm ⁻²)				
				籽粒	稻草	总积累量		
2020	早稻	CK	(4.74±0.04)c	(44.38±0.70)d	(28.70±1.61)c	(72.90±1.47)c		
		U	(6.19±0.03)ab	(75.22±0.68)c	(39.89±3.17)a	(115.11±0.25)ab		
		CRU	(6.51±0.15)a	(83.79±0.72)a	(34.40±3.38)b	(118.19±1.42)a		
		CRU1	(6.48±0.11)a	(79.03±1.31)b	(37.37±1.17)b	(116.40±0.80)ab		
		CRU2	(6.28±0.08)ab	(76.82±2.03)c	(36.37±3.10)b	(113.19±2.05)b		
		CRU3	(6.15±0.09)ab	(76.17±1.63)c	(34.86±3.48)b	(111.03±1.45)b		
	晚稻	CK	(6.73±0.08)c	(57.45±0.74)d	(20.69±1.57)c	(78.15±1.69)c		
		U	(9.07±0.03)ab	(93.63±2.27)c	(38.80±2.32)a	(132.43±1.12)b		
		CRU	(9.53±0.11)a	(102.81±1.00)a	(34.39±1.91)b	(137.20±1.02)a		
		CRU1	(9.26±0.08)a	(98.73±1.21)b	(32.92±1.39)b	(131.65±1.45)b		
		CRU2	(9.11±0.08)ab	(100.67±0.70)ab	(31.10±0.63)b	(131.77±1.30)b		
		CRU3	(9.00±0.04)ab	(99.61±1.32)ab	(31.93±2.41)b	(131.54±1.22)b		
		2021	早稻	CK	(5.02±0.02)c	(46.27±0.31)d	(28.33±0.72)c	(74.60±1.47)c
				U	(6.48±0.10)ab	(77.25±0.44)c	(41.32±1.12)a	(118.57±0.21)ab
				CRU	(6.83±0.05)a	(85.84±0.65)a	(35.64±2.02)b	(121.48±0.48)a
CRU1	(6.78±0.11)a			(81.04±0.87)b	(38.73±0.84)b	(119.77±0.55)ab		
CRU2	(6.56±0.04)ab			(78.66±0.88)c	(37.52±0.59)b	(116.18±0.98)b		
CRU3	(6.31±0.12)ab			(78.50±1.22)c	(35.30±0.65)b	(113.80±1.02)b		
晚稻	CK		(6.82±0.05)c	(59.66±1.71)d	(20.36±1.01)c	(80.02±1.23)c		
	U		(9.12±0.09)ab	(95.68±0.90)c	(40.54±0.73)a	(136.22±0.71)b		
	CRU		(9.61±0.04)a	(103.21±0.88)a	(37.85±0.81)b	(141.06±0.42)a		
		CRU1	(9.34±0.05)a	(100.34±1.02)b	(35.29±0.92)b	(135.63±1.22)b		
		CRU2	(9.21±0.11)ab	(101.89±0.51)ab	(33.11±0.33)b	(135.00±0.85)b		
		CRU3	(9.08±0.04)ab	(100.15±1.31)ab	(34.30±0.46)b	(134.45±0.44)b		

同列不同字母示同年同季处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

为4.91%~11.39%;控释氮肥处理晚稻籽粒氮积累量均显著增加,增幅为5.45%~9.80%;控释氮肥处理的稻草氮积累量均显著降低,但稻草氮积累量在控释氮肥处理间的差异无统计学意义。综上,控释氮肥能提高籽粒氮素积累量,降低稻草中氮素的累积。

3.2.2 早稻和晚稻的氮肥利用率

从表9可知,与U处理相比,除CRU的氮肥

偏生产力外,控释氮肥处理水稻的氮肥农学效率、偏生产力和吸收利用率均显著提高;控释氮肥减氮处理两年中,早稻氮肥农学效率、偏生产力和吸收利用率分别增加了25.69%~34.16%、16.25%~41.92%、14.16%~29.03%,晚稻的分别增加了27.64%~37.63%、13.48%~42.24%、9.55%~40.53%,其中各稻季各指标均以CRU3处理的最高。

表 9 2020—2021 年早稻和晚稻的氮肥利用率

Table 9 Nitrogen use efficiencies of early and late rice from 2020 to 2021					
年份	稻季	处理	氮肥农学效率/%	氮肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹)	氮肥吸收利用率/%
2020	早稻	U	(18.62±0.50)c	(41.27±0.20)d	(28.14±0.86)d
		CRU	(22.62±1.26)b	(43.41±0.97)d	(30.19±1.73)c
		CRU1	(23.50±0.53)ab	(48.00±0.85)c	(32.22±0.74)b
		CRU2	(24.64±1.34)a	(52.30±0.67)b	(33.57±2.65)b
		CRU3	(24.98±0.80)a	(58.57±0.85)a	(36.31±1.04)a
	晚稻	U	(15.92±0.81)c	(50.37±0.29)d	(30.15±1.08)d
		CRU	(19.86±0.47)b	(52.93±0.62)d	(32.80±1.42)c
		CRU1	(20.32±1.09)ab	(57.16±0.51)c	(33.03±1.17)c
		CRU2	(20.39±1.64)ab	(63.25±0.57)b	(37.24±0.73)b
		CRU3	(21.91±0.80)a	(71.41±0.33)a	(42.37±0.47)a
2021	早稻	U	(19.27±0.34)c	(43.20±0.14)d	(29.31±0.47)d
		CRU	(24.00±0.23)ab	(45.53±0.24)d	(31.25±0.43)c
		CRU1	(24.22±0.82)ab	(50.22±0.88)c	(33.46±0.38)b
		CRU2	(25.17±0.21)a	(54.66±0.67)b	(34.65±1.21)b
		CRU3	(25.76±0.47)a	(60.09±0.21)a	(37.33±1.18)a
	晚稻	U	(15.94±0.88)c	(50.66±0.44)d	(31.22±0.82)d
		CRU	(20.50±0.60)b	(53.38±0.31)d	(33.91±0.42)c
		CRU1	(20.74±0.34)ab	(57.65±0.44)c	(34.33±1.07)c
		CRU2	(21.32±0.22)a	(63.95±0.78)b	(38.18±0.26)b
		CRU3	(21.51±0.62)a	(72.06±0.19)a	(43.20±0.62)a

同列不同字母示同年同季处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

4 结论与讨论

本研究结果表明,在施肥后短时间内降雨会导致稻田径流氮素流失量增加,施肥后降低稻田氮素径流流失的关键是减少稻田径流,这与前人的研究结果^[18-19]一致。各施氮处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在径流 TN 中占比较大,说明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是径流中氮素的重要来源^[20]。各控释氮肥处理下早稻氮素径流流失量中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 TN 径流流失量中的占比均小于 U 处理的,说明控释氮肥处理降低了以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主的相对流失潜能^[21-22]。

本研究中,控释氮肥减量施用能显著降低稻田氮素径流流失量,且稻田氮素径流损失量随控释氮肥施用量的减少有降低的趋势,以控释氮肥减量 30% 处理的降低氮素径流流失量最为明显,同时控释氮肥处理降低了稻田氮素径流流失峰值时期的氮素径流流失,这与前人研究结果^[23]一致。同时,与常规施肥相比,控释氮肥合理用量不仅能减少氮素径流损失,还能提高水稻产量。主要原因可能是

用控释氮肥代替速效氮肥后,氮素释放周期持久,会增加水稻中后期土壤氮素供应能力,满足作物长时间养分吸收,提高作物的氮素利用效率,同时也促进了土壤中微生物的生长繁殖,从而提高了水稻产量^[24]。与常规施肥相比,等氮量控释氮肥处理能显著提高早稻和晚稻籽粒氮积累量和总氮积累量。各控释氮肥处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率均高于常规施肥处理的,且随着控释氮肥施肥量的减少,氮肥吸收利用率有增加的趋势,以控释氮肥减量 30% 处理的效果最佳,这可能是由于控释氮肥更能满足作物生长期的养分需求,提高水稻籽粒对氮素的吸收^[25]。

综上,通过两年的田间试验结果发现,控释氮肥减量 30% 时能在保持水稻产量稳定的同时,也能提高氮素利用效率,可在南方双季稻地区推广。

参考文献:

- [1] 黄思怡,周旋,田昌,等.控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响[J].土壤,2020,52(4):

- 736-742.
- [2] 向速林, 王全金, 徐刘凯, 等. 赣江尾闾区农田沟渠径流中氮磷负荷与迁移特征[J]. 河南农业科学, 2012, 41(3): 72-74.
- [3] 袁浩凌, 黄思怡, 孔小亮, 等. 不同施肥模式对早稻季农田氮磷径流流失的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 776-784.
- [4] LEE C, FEYEREISEN G W, HRISTOV A N, et al. Effects of dietary protein concentration on ammonia volatilization, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from dairy manure applied to lysimeters[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 398-408.
- [5] 施瑾, 马彩婉. 缓控释氮肥一次性施用对水稻甬优12产量及氮肥利用率的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11): 2219-2220, 2225.
- [6] 熊海蓉, 文卓琼, 熊远福, 等. 3种水稻缓/控释肥一次性施用效果比较[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 1-5.
- [7] 张成兰, 吕玉虎, 刘春增, 等. 减量化肥配施紫云英对水稻产量稳定性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 704-713.
- [8] 史桂芳, 董浩, 于淑慧, 等. 缓控释肥施用方式对夏玉米产量、肥料利用率及经济效益的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(8): 80-84.
- [9] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
- [10] 姚先荣. 缓/控释肥料的研究进展及发展趋势[J]. 现代农业科技, 2019(2): 133, 135.
- [11] 胡昱彦, 庄舜尧, 郭益昌, 等. 不同施肥模式对雷竹林氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 51-57.
- [12] 侯朋福, 薛利祥, 周玉玲, 等. 掺混控释肥侧深施对稻田田面水氮素浓度的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 16-21.
- [13] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 长江下游单季稻一次性施肥的适宜缓释氮肥筛选[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 48-53.
- [14] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5): 859-870.
- [15] 罗兰芳, 郑圣先, 廖育林, 等. 控释氮肥对杂交水稻糙米蛋白质品质和氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 403-410.
- [16] 卜东升, 刘冬碧, 肖依波, 等. 江汉平原稻区16个水稻品种对氮肥的响应及其利用率差异[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1182-1192.
- [17] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [18] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 743-749.
- [19] 姜萍, 袁永坤, 朱日恒, 等. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1592-1596.
- [20] 张丽娟, 马中文, 马友华, 等. 优化施肥和缓释肥对水稻田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 90-94, 100.
- [21] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1561-1566.
- [22] 王强, 杨京平, 沈建国, 等. 稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 51-54.
- [23] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 21-28.
- [24] 李玉浩, 何杰, 王昌全, 等. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 469-475.
- [25] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 713-718.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正