

缓释氮比例对一次性施肥单季晚稻生长和氮素利用的影响

张金萍^{1,2}, 陈照明², 王 强², 马军伟², 俞巧钢²,
叶 静², 马进川², 孙万春², 潘建清³

(1.浙江农林大学环境与资源学院,杭州 311300;2.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所,
杭州 310021;3.浙江省长兴县农业农村局,浙江 湖州 313100)

摘要: 探明单季晚稻缓释氮肥一次性施用模式中缓释氮占总施氮量的适宜比例,为单季晚稻高效施肥提供理论指导。2019—2020 年在浙江省长兴县和平镇开展田间试验。试验共设 6 个处理:(1)不施氮肥(N0);(2)常规施肥(U1,基肥:分蘖肥:穗肥为 4:3:3);(3)常规施肥减氮 12.5%(U2,比例同 U1);(4)57%缓释氮一次性施用(SRU1);(5)45%缓释氮一次性施用(SRU2);(6)34%缓释氮一次性施用(SRU3)。U1 的施氮量为 240 kg/hm²,U2 和 SRU 的施氮量均为 210 kg/hm²。测定水稻产量、养分吸收量、养分利用率、田面水铵态氮含量和氨挥发量等指标。结果表明:N0 处理的单季晚稻产量为 U 处理的 73.55%。与 U 相比,缓释氮肥一次性施用可以维持水稻产量。单季晚稻产量随着缓释氮施用比例升高而增加。SRU 处理与 U 处理之间地上部氮含量及氮素吸收量均无显著差异。2019 年 SRU2 处理和 2020 年 SRU1 处理氮肥利用率分别比 U 处理提高 10.49%和 8.84%,达到显著差异水平,其他处理与 U1、U2 处理间差异均不显著。与 U 相比,SRU 处理显著降低了田面水铵态氮含量和稻田累积氨挥发量,但各缓释肥处理间无显著差异。综合相关产量及氮素损失的结果,34%缓释氮施用比例可满足单季晚稻一次性施肥要求,能保证水稻稳产,同时降低氮素径流和挥发损失。

关键词: 水稻;缓释肥;产量;氮素吸收量;氮素利用率

中图分类号:S511

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0207-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.06.028

Effect of Slow-release Nitrogen Ratio on Growth and Nitrogen Utilization of Single-cropping Late Rice with One-time Fertilization

ZHANG Jinping^{1,2}, CHEN Zhaoming², WANG Qiang², MA Junwei²,

YU Qiaogang², YE Jing², MA Jinchuan², SUN Wanchun², PAN Jianqing³

(1.College of Environment and Resources, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300;

2.Institute of Environmental Resources and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021;

3.Changxing County, Zhejiang Provincial Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Huzhou, Zhejiang 313100)

Abstract: To test the appropriate proportion of slow-release nitrogen (N) to the total N application in the one-time application strategy for single-cropping rice, to provide theoretical guidance for efficient fertilization of single-cropping late rice, a field experiment was carried out in Heping Town, Changxing County, Zhejiang Province from 2019 to 2020. The experiment consisted of six treatments: (1) No N fertilizer (N0); (2) Conventional fertilization (U1, base fertilizer : tillering fertilizer : panicle fertilizer=4 : 3 : 3); (3) Reduction conventional N rate by 12.5% (U2, the proportion was the same as U1); (4) 57% slow-release N with one-time application (SRU1); (5) 45% slow-release N with one-time application (SRU2); (6) 34% slow-release N with one-time application (SRU3). The N application rate was 240 kg/hm² for U1, and 210 kg/hm² for U2 and SRU. The rice yield, nutrient uptake, nutrient utilization efficiency, ammonium N content in-field water, and ammonia volatilization were measured. The results showed that the yield of single cropping rice in N0 was 73.55% of that in U. Compared with U, one-time application of slow-release N fertilizer could maintain rice yield. The yield of single cropping rice tended to increase with the increase of the

收稿日期:2021-05-07

资助项目:浙江省科技厅重大项目(2019C02017);浙江省三农六方项目(2019SNLF027,2020SNLF001)

第一作者:张金萍(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事植物营养与高效施肥研究。E-mail: 3245044733@qq.com

通信作者:马军伟(1972—),男,研究员,主要从事植物营养与施肥、新型肥料研制与开发、施肥与环境效应研究。E-mail: majunwei11@163.com

王强(1979—),男,博士,副研究员,主要从事植物营养、作物高效施肥、农田养分管理技术研究。E-mail: qwang0571@126.com

proportion of slow-release N application. There was no significant difference in aboveground N content and N uptake between SRU and U. Compared with U, the N use efficiency of SRU2 in 2019 and SRU1 in 2020 increased by 10.49% and 8.84% respectively, reaching the significant difference level, but there was no significant difference between other treatments and U1 and U2. Compared with U, SRU significantly reduced the content of ammonium N and cumulative ammonia volatilization in-field water, but there was no significant difference among slow-release fertilizers. According to the results of related yield and N loss, one-time application of 34% slow-release N application ratio could meet the nutrients requirements of single cropping rice, ensure stable rice yield and reduce N runoff and volatilization loss at the same time.

Keywords: rice; slow-release fertilizer; yield; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency

在长江中下游地区水稻生产中,传统的施肥方式通常需追肥 2~3 次。分次施肥可以提高水稻产量,但增加了劳动力成本。同时追施的速效氮肥容易通过地表径流、挥发等途径损失,从而对环境造成污染。因此,合理施肥是培肥土壤、提高作物产量、改善作物品质、增加农民经济收益的关键因素^[1-2]。缓释肥因其养分释放缓慢、养分损失少等优点,近年来在水稻生产中的应用日趋广泛^[3]。缓释肥一次性施肥技术可满足农民轻简化施肥的需求,有效降低劳动成本^[4],而且促进水稻对氮素的吸收^[5-6],提高水稻产量^[7-8]。也有相关研究^[9-10]表明,缓释氮肥一次性施用在减少环境污染、提高土壤肥力和氮肥利用率等方面也具有明显的效果。

缓释肥一次性施用技术受到土壤、环境、肥料种类、施用方式和施用量等因素的影响^[11-12]。傅丽青等^[13]通过研究不同缓释肥类型对水稻产量及经济效益的影响表明,木质素缓释肥氮肥农学利用率达 23.95 kg/kg,明显高于金正大控释肥,但其产量和经济效益却低于金正大控释肥处理;褚光等^[14]研究表明,与常规面施相比,控释尿素侧深施肥处理水稻产量和氮肥利用效率分别显著提高 5.1%~5.7%和 5.2%~5.5%;Zhang 等^[15]通过研究不同缓释尿素用量对作物产量、氮素利用效率的影响表明,缓释肥施用量为 360 kg/hm²时,水稻产量最高,比常规尿素处理提高 28.7%。缓释氮占总氮量的比例是影响缓释肥一次性施用技术应用效果的关键,同时也直接影响施肥的产投比。近年来,尽管有许多科研工作者对于缓释氮肥施用比例做了大量研究,但研究结果间仍存在诸多矛盾。Wang 等^[16]和袁嫚嫚等^[17]研究表明,在水稻栽培中,缓释氮肥施用比例为 70%时,肥效最佳。但付月君等^[18]研究表明,缓释氮肥施用比例为 40%时,水稻产量和氮肥利用率最高。而王家宝等^[19]研究表明,当缓释氮施用比例为 50%时,水稻产量、氮肥表观利用率和氮肥农学利用率都达到最高,分别为 9 325.9 kg/hm²,57.01%和 20.37 kg/kg。因此,本研究选择市售缓释肥品种,通过田间小区试验,研究了不同缓释氮施用比例对浙北地区单季晚稻

生长和氮肥利用率的影响,旨在探明单季晚稻生产上缓释氮肥施用的适宜比例,为缓释氮一次性施用模式的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验于 2019—2020 年 6 月在浙江省湖州市长兴县和平镇(119.91°E,30.84°N)进行。试验点处于长江中下游平原,属亚热带海洋性季风气候,海拔为 98 m,年平均气温为 15.6 ℃,年降水量为 1 309 mm,其中全年降水主要集中在 3—9 月,占年降雨量的 75%以上,近年来当地主要种植模式为稻麦轮作。供试土壤为水稻土,土壤基础农化性状为:pH 5.1,有机质含量 48.7 g/kg,全氮含量 2.8 g/kg,碱解氮含量 106.5 mg/kg,有效磷含量 4.7 mg/kg,速效钾含量 104.7 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 6 月 10 日至 2020 年 11 月 18 日开展,共设 6 个处理:(1)不施氮(N0);(2)常规施肥(U1,基肥:分蘖肥:穗肥为 4:3:3);(3)常规施肥减氮(U2,氮肥运筹比例同 U1);(4)57%缓释氮一次性施用(SRU1);(5)45%缓释氮一次性施用(SRU2);(6)34%缓释氮一次性施用(SRU3)。U1 氮肥用量 240 kg/hm²,U2 和 SRU 氮肥施用量均为 210 kg/hm²。各处理磷肥和钾肥投入量分别为 81,120 kg/hm²,作为基肥一次施用。各处理氮肥施用量和氮肥运筹方式见表 1。

田间试验采用随机区组设计,设 3 次重复,小区面积 30 m²,各小区间用宽 0.3 m、高 0.3 m 的田埂隔开,田埂上覆盖黑色塑料薄膜防止水肥串流。供试水稻品种为当地主推单季杂交稻品种“甬优 1540”,由宁波市种子有限公司提供。供试缓释肥由青阳县茂施农业科技有限公司提供,商品名为“稻坚强”,N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 26%,10%,15%,其中缓释氮含量为 15%,即缓释氮占总氮的比例为 57.7%。SRU2 和 SRU3 处理根据总施氮量与“稻坚强”中缓释氮比例计算缓释肥施用量,氮素不足部分用普通尿素补足。试验中其他肥料采用市售的普通尿素、过磷

酸钙和氯化钾。除施肥处理外,各处理农事操作措施与当地高产栽培技术一致。

2019 年分别在 6 月 11 日、6 月 23 日和 8 月 1 日施基肥、分蘖肥和穗肥,11 月 18 日收获。2020 年分别在 6 月 17 日、6 月 24 日和 7 月 31 日施基肥、分蘖肥和穗肥,11 月 18 日收获。

表 1 试验各处理氮肥运筹和施用量
单位:kg/hm²

处理	氮肥运筹			总施氮量
	基肥 (缓释氮施用量)	分蘖肥	穗肥	
N0	0	0	0	0
U1	96	72	72	240
U2	84	63	63	210
SRU1	210(121.1)	0	0	210
SRU2	210(94.5)	0	0	210
SRU3	210(71.4)	0	0	210

1.3 样品采集

1.3.1 土壤样品采集 小麦收获后至水稻种植前按“S”形多点取样法,用土钻(直径 5 cm)采集不少于 1.0 kg 耕层土壤(0—20 cm)样品,混合均匀,去除根系后带回室内进行自然风干,粉碎分别过 60,100 目筛后备用,测定土壤基础肥力指标。

1.3.2 植株样品采集 待水稻成熟后,各小区水稻全部收获测产,称取约 500 g 稻谷带回实验室烘干,折算含水率,以 14% 的标准含水率计算稻谷产量。同时各小区根据平均有效穗数取植株 3 穴,放入尼龙网带中,带回实验室洗净,放于烘箱中 75 ℃ 下烘干至恒重,分别测定稻谷和秸秆干物重,计算谷草比。根据谷草比计算每公顷稻草生物量。

1.3.3 田面水样品采集 每次施肥后,各小区(包括不施肥处理)分别在第 1,3,5,10 天用 100 mL 医用注射器抽取田面水注入聚乙烯塑料瓶中,取样时不扰动土层,随机抽取 5 处田面水形成 1 个混合水样。带回实验室过滤后,用于水样铵态氮的测定。

1.3.4 稻田氨挥发量测定 采用通气法进行氨挥发收集^[20]。每个小区安装 3 个收集装置,装置采用不透光的 PVC 管制成,上面放置 2 层间距 5 cm 左右,直径约 24 cm 的海绵,海绵预先浸透 10 mL (2.0 mol/L) 的磷酸甘油。本研究重点考察 3 个肥期的氨挥发损失量,氨挥发测定分别在单季晚稻施基肥后第 1,4,6,8 天,追施分蘖肥和穗肥后第 1,3,5,7 天取样。取样时将通气装置下层海绵迅速取出,并装入自封袋中及时密封。样品带回实验室后,用 100 mL 的 KCl 溶液(2.0 mol/L)浸提吸收在下层海绵中的氨,

以 180 r/min 转速,25 ℃ 恒温振荡 1 h,振荡结束取出过滤后,利用 AA3 流动分析仪测定浸提液中的铵态氮含量。

1.4 测定方法

土壤基本理化性质的测定:参考鲍士旦^[21]主编的《土壤农化分析》中的方法进行测定。土壤 pH 采用玻璃电极法(土水比为 1 : 2.5)进行测定;有机质采用重铬酸钾容量法(外加热法)进行测定;全氮、碱解氮、有效磷和速效钾分别采用凯氏消解蒸馏滴定法、碱解扩散法、Bray 法和 CH₃COONH₄ 浸提—火焰光度法进行测定。

田面水铵态氮含量:利用 AA3 连续流动分析仪进行测定^[22]。

氮素利用及相关指标测定:植株样品参照严田蓉等^[23]的方法,利用德国 ElementarVarioIsotope 全自动元素分析仪测定各样品的含氮量。

1.5 数据处理

$$\text{氨挥发量}(\text{kg}/\text{hm}^2)=\frac{C\times10^{-6}}{A\times10\times10^{-4}}\quad [20]$$

(1)

式中:C 为浸提液中 NH₄⁺ 浓度(mg/L);10⁻⁶ 为 mg 换算为 kg;A 为捕获装置的截面积(m²);10⁻⁴ 为 m² 换算为 hm²。

$$\text{氨挥发速率}(\frac{\text{kg}}{\text{hm}^2\cdot\text{d}})=\frac{M}{D}$$

(2)

式中:M 为氨挥发量(kg/hm²);D 为每次连续捕获的时间(d)。

$$\text{累积氨挥发量}(\text{kg}/\text{hm}^2)=\sum_{i=\text{取样次数}}^n (M_i)$$

(3)

$$\text{氮吸收量}(\text{kg}/\text{hm}^2)=\text{干物重}\times\text{含氮量}$$

(4)

$$\text{氮肥表观利用率}(\%)=\frac{\text{施氮处理氮素吸收量}-\text{不施氮处理氮素吸收量}}{\text{当季氮素(纯氮)施用量}}\times100\% [24]$$

(5)

所有数据均采用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行统计分析。采用 LSD 法对试验数据进行方差分析和显著性检验,文中有关图中标误差线为 3 次重复数据的标准误差。

2 结果与分析

2.1 缓释氮施用比例对单季晚稻产量的影响

缓释氮施用比例对单季晚稻产量的影响见图 1。U1 处理在 2019 年和 2020 年的产量分别为 11 494.22, 8 037.67 kg/hm²;而 N0 处理单季晚稻产量分别为 8 456.20,6 341.52 kg/hm²,分别为 U1 处理的 73.55% 和 79.89%。U2 处理 2019 年产量与 U1 处理间差异不显著,2020 年则显著高于 U1 处理。缓释氮肥一次性施用 3 个处理在 2019 年和 2020 年的产量范围分别为 11 602.44~11 900.00 kg/hm² 和 8 306.69~

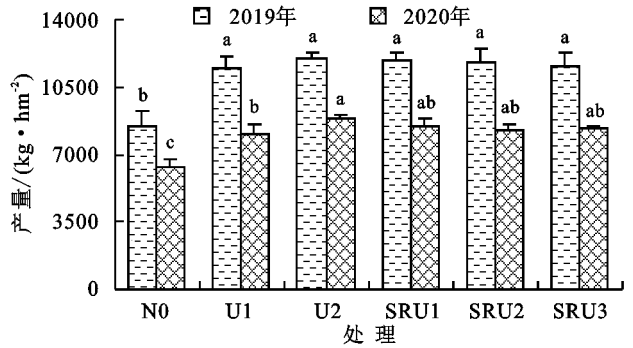
8 506.64 kg/hm²,随着缓释氮施用比例降低呈下降趋势,除 2020 年 SRU1 处理产量显著高于 U1 处理外,其他处理与 U1、U2 处理间均无显著差异。

2.2 缓释氮施用比例对氮肥利用效率的影响

由表 2 可知,除 N0 外,各处理稻谷和稻草的含氮量、地上部总吸氮量无显著差异。2019 年度缓释氮肥一次性施肥 3 个处理稻草和稻谷中含氮量分别在 6.69~7.38,10.56~11.62 g/kg,地上部吸氮量 187.56~198.46 kg/hm²;氮肥利用率在 46.52%~51.72%,其中 SRU2 氮肥表观利用率达 51.72%,比常规尿素处理(U1、U2)有显著提高。

2020 年度水稻产量下降,各施肥处理地上部吸氮量都有较大幅度降低。缓释氮肥一次性施肥 3 个处理地上部吸氮量 114.47~129.42 kg/hm²,与常规

尿素处理无显著差异;氮肥表观利用率随着缓释氮施用比例降低呈下降的趋势,SRU1 氮肥利用率显著高于 U1 处理。



注:图中同一系列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 缓释氮施用比例对单季晚稻产量的影响

表 2 缓释氮施用比例对氮肥利用效率的影响

年份	处理	含氮量/(g·kg ⁻¹)		吸氮量/(kg·hm ⁻²)			氮肥表观 利用率/%
		稻草	稻谷	稻草	稻谷	地上部	
2019	N0	3.91±0.12b	8.08±0.16b	30.72±4.06b	59.14±6.51b	89.86±10.57b	—
	U1	7.54±2.31a	11.06±0.65a	79.59±21.31a	109.86±4.35a	189.44±17.85a	41.49±7.44b
	U2	5.92±0.52ab	10.70±1.11a	65.76±7.26a	110.68±11.93a	176.44±17.10a	41.23±8.14b
	SRU1	7.34±1.62a	10.56±0.34a	80.85±17.27a	108.78±6.38a	189.63±13.66a	47.51±6.50ab
	SRU2	7.38±1.54a	11.62±1.54a	80.49±16.29a	117.97±11.49a	198.46±6.21a	51.72±2.96a
	SRU3	6.69±1.02a	11.55±1.61a	71.59±7.86a	115.97±17.35a	187.56±21.03a	46.52±10.01ab
2020	N0	4.78±0.38b	9.48±1.35a	23.99±2.98c	60.48±12.47b	84.47±13.30b	—
	U1	5.25±0.28a	10.29±0.31a	31.87±1.78bc	82.75±6.76a	114.63±8.50a	12.56±3.54b
	U2	4.96±0.19a	9.68±1.21a	33.15±2.26b	85.64±8.83a	118.78±10.71a	16.34±5.10ab
	SRU1	6.60±0.88a	10.29±0.85a	42.11±4.16a	87.31±3.06a	129.42±5.43a	21.40±2.58a
	SRU2	5.32±1.02a	9.99±1.48a	33.30±9.15b	82.76±9.89a	116.06±11.15a	18.11±0.21ab
	SRU3	6.09±0.83a	9.30±1.08a	36.94±4.69ab	77.53±10.52a	114.47±13.40a	17.65±2.58ab

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 缓释氮施用比例对田面水铵态氮含量的影响

由图 2 可知,除 N0 处理外,其他处理施基肥后田面水铵态氮含量变化趋势基本保持不变,均在监测的第 1 天最高,各处理在 2019 年和 2020 年的田面水铵态氮含量分别为 1.58~28.74,0.56~52.81 mg/L。随着监测时间推移田面水铵态氮含量逐渐下降,各处理在施基肥后第 5 天时田面水铵态氮浓度均小于 4.83 mg/L,且尿素分次施用处理(U1、U2)和缓释氮肥一次性施用处理(SRU)间没有显著差异。SRU 各处理从分蘖期后田面水铵态氮浓度均小于 16.82 mg/L,不同施用比例间没有显著差异。U1 和 U2 处理由于受追施分蘖肥和穗肥的影响,两季的田面水铵态氮含量分别升高到 31.62,33.03 mg/L,然后随着监测时间推移逐渐下降。2019 年不同缓释氮施用比例间没有显著差异,但在 2020 年,随着缓释氮施用比例增大,田面水铵态氮含量略有下降,其中

SRU1 处理田面水铵态氮含量与 U1、U2 处理相比,降低 3.08%~93.11%。

2.4 缓释氮施用比例对稻田氨挥发的影响

水稻生长过程中,稻田氨挥发动态与田面水铵态氮含量动态变化趋势基本相似。从图 3 可以看出,除 SRU2 处理在 2019 年施基肥后第 3 天氨挥发率增大外,其他处理均在施基肥后第 1 天氨挥发率最大,随着监测时间延长逐渐下降,施基肥后第 5 天,各处理氨挥发率分别为 0.19~0.81 kg/(hm²·d)(2019 年度)和 0.67~0.99 kg/(hm²·d)(2020 年度)。尿素分次施肥处理(U1、U2)和缓释氮肥一次性施肥处理(SRU)间没有显著差异。SRU 各处理从分蘖期后氨挥发率均小于 1.87 kg/(hm²·d),不同施用比例间没有显著差异。U1 和 U2 处理在基肥后第 13,21 天由于受到追施分蘖肥和穗肥的影响,两季的氨挥发率分别升高至 3.21,3.49 kg/(hm²·d),之后随着监测时间推移逐渐下降。

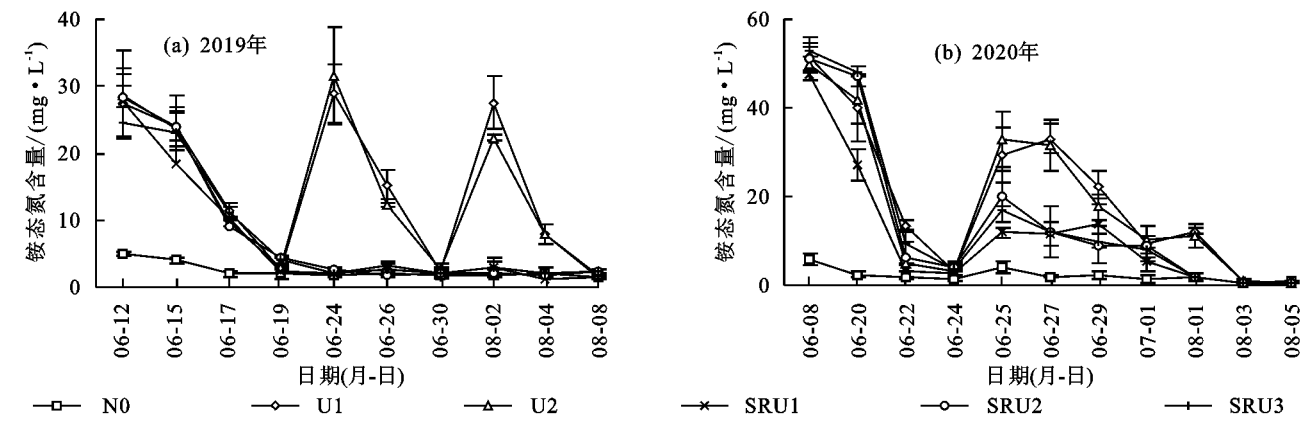


图2 缓释氮施用比例对田面水铵态氮含量的影响

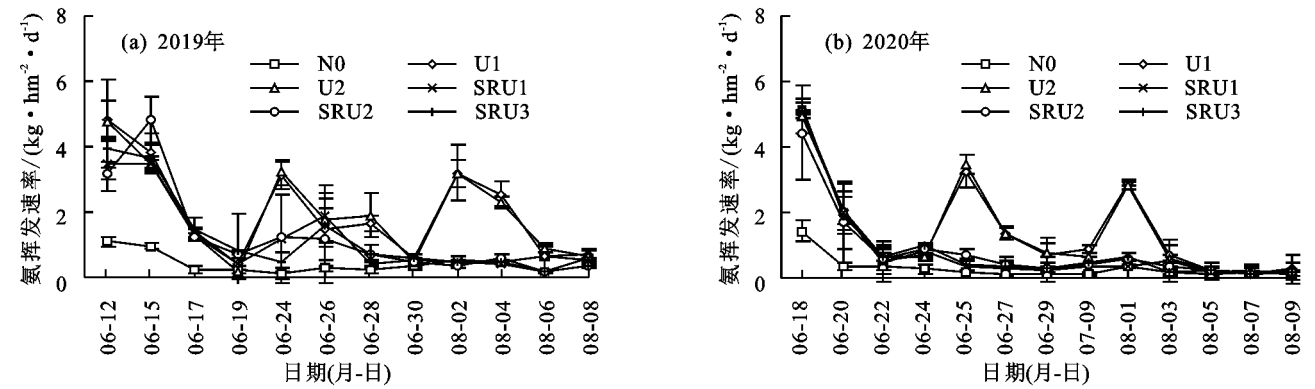


图3 缓释氮施用比例对稻田氮挥发的影响

各处理稻田累积氮挥发损失量见表3。2019年和2020年U1处理累积氮挥发量分别为41.05,26.44 kg/hm²,SRU处理总累积氮挥发量为16.07~28.17 kg/hm²。与U1处理相比,SRU处理的总累积氮挥发量显著降低26.31%~60.85%。不同缓释氮施用比例处理间总累积氮挥发损失量没有显著差异。在追施分蘖肥和穗肥后,SRU处理氮挥发量显著降低35.14%~77.29%。除2019年基肥期和2020年分蘖肥期SRU1处理显著降低外,其他2个SRU处理间氮挥发量无显著差异。

表3 累积氮挥发损失量					单位:kg/hm ²			
处理	2019年				2020年			
	基肥	分蘖肥	穗肥	总量	基肥	分蘖肥	穗肥	总量
N0	4.86±0.32c	1.74±0.42c	3.78±0.98b	10.38±1.56c	3.36±0.32b	0.78±0.09d	1.55±0.16b	5.69±0.27c
U1	19.62±2.70ab	10.51±1.74a	10.92±2.20a	41.05±6.30a	11.69±1.10a	9.18±0.15a	5.57±0.69a	26.44±0.85a
U2	18.16±1.38ab	11.52±1.10a	10.86±1.26a	40.47±2.08a	11.63±0.24a	9.09±0.32a	5.20±0.79a	25.91±0.85a
SRU1	17.59±1.29b	6.81±1.52b	2.86±0.42b	27.26±1.63b	11.58±1.28a	2.08±0.91c	2.41±0.42b	16.07±1.86b
SRU2	21.60±2.13a	6.02±2.37b	2.64±0.21b	30.25±4.64b	10.87±2.83a	2.94±0.24b	2.31±0.43b	16.13±3.28b
SRU3	19.47±2.90ab	6.22±2.01b	2.48±0.16b	28.17±3.28b	12.24±0.55a	2.63±0.53bc	1.99±0.24b	16.85±0.16b

3 讨论

相关研究^[7]表明,缓释氮施用能明显提高单季晚稻的产量。Chu等^[8]研究表明,施用200 kg/hm²的聚合物包膜尿素可使水稻产量和氮肥农学利用率分别提高11.6%和5.5 kg/kg。而在本研究中,虽然SRU与U1处理间产量没有显著差异,但随着缓释氮施用比例的增大而呈现出升高的趋势,其中SRU1处理2019年度和2020年度单季晚稻产量比U1处理分别增加3.52%和5.83%。因此,单季晚稻栽培中施用34%缓释氮处理成本最低,这与郭晨^[25]的研究

结果相近。然而,袁嫚嫚等^[17]研究表明,包膜尿素与常规尿素按7:3一次性基施比常规尿素基追分次施用增产7.5%;薛欣欣等^[26]也得出了相同的结论,可能是由于包膜尿素的缓释效果与本试验采用的肥料不同,导致得出的缓释氮适宜占比不同^[27]。

稻田施用缓释氮可减缓养分释放速率,有效降低氮素的淋洗、径流和大气损失风险。有研究^[9]表明,施用75,150 kg/hm²的聚烯烃包膜尿素NH₃挥发损失分别减少62%~83%和59%~91%。在一定的施肥量范围内,缓释肥施用量减少10%能使氮挥发降

低约 40%、氮肥表观利用率提高约 80%^[28]。本试验研究表明,与 U1 处理相比,SRU 处理显著降低分蘖期和穗期的田面水铵态氮含量和累积氨挥发量,说明 SRU 减量 12.5% 一次施用能显著降低分蘖期和穗期田面水铵态氮含量和稻田氨挥发损失量。但在 2020 年,随着缓释氮施用比例增大,田面水铵态氮含量下降,与 U1、U2 处理相比,其中 SRU1 处理田面水铵态氮含量降低 3.08%~93.11%。且 SRU1 处理累积氨挥发量最低,比其他 SRU 处理降低 26.31%~60.85%。因此,在单季晚稻栽培中施用 57% 缓释氮更能有效降低氮素径流和挥发损失。与前人^[29-30]研究结果相似。

缓释氮施用也能提高氮素吸收和氮肥利用率。已有研究^[5]表明,施用控释氮肥能减少地表径流损失 57.9% 和 19.1%,提高氮肥利用效率 5.1%~8.9%。本试验研究表明,除 N0 外,各处理间的含氮量和吸氮量无显著差异。除 2019 年 SRU2 处理和 2020 年 SRU1 处理氮肥利用率显著提高 10.49% 和 8.84% 外,其他处理与 U1、U2 处理间均无显著差异,说明施用 SRU1 和 SRU2 能提高氮肥利用率,与前人^[28]的研究结果一致。但付月君等^[18]研究表明,缓释氮与尿素比例为 4:6 效果最好,氮素利用率可以提高 54.2%,这可能与气候、肥料种类和施氮量等综合因素不同有关,导致得出的缓释氮适宜占比不同^[31]。

2019 年的单季晚稻产量和氮素利用率分别约为 2020 年的 1.3、2.8 倍,可能是由于年度间的气候(温度和降水)等综合因素的影响,导致 2020 年田面水铵态氮含量较高,增加氮素径流损失风险,同时也会导致单季晚稻氮肥利用率存在差异,降低单季晚稻氮素吸收量和产量^[7,32]。

4 结论

与常规分次施肥(U1 和 U2)相比,缓释氮一次施用可以维持单季晚稻产量。缓释氮一次性施用能显著降低田面水铵态氮含量和累积氨挥发量,但不同缓释氮肥施用比例处理之间没有显著差异。3 种缓释氮肥施用比例均能实现单季晚稻一次性施肥目标,综合考虑产量、环境效应和肥料成本,施用 34% 缓释氮肥效果最佳。

参考文献:

- [1] 唐秀玲.提高水稻肥料利用率的技术探讨[J].农业开发与装备,2019(9):186,192.
- [2] 毛振荣,王君.提高水稻肥料利用率的技术探讨[J].中国稻米,2019,25(1):100-102.
- [3] 程金秋,朱盈,魏海燕,等.缓控释肥料在水稻上的应用效果综述简[J].江苏农业科学,2017(17):11-15.
- [4] Ke J, Xing X M, Li G H, et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatiliza-

tion, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J].Field Crops Research, 2017,205:147-156.

- [5] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J].Field Crops Research, 2013,144:212-224.
- [6] Geng J B, Ma Q, Zhang M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton [J].Field Crops Research, 2015,184:9-16.
- [7] 聂云鑫,徐卫红,陈序根,等.脲酶硝化双抑制剂缓释肥对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J].中国农学通报,2017,35(11):65-71.
- [8] Chu G, Chen T T, Chen S, et al. Polymer-coated urea application could produce more grain yield in "Super" rice[J].Agronomy Journal, 2018,110(1):246-259.
- [9] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Polyolefin-coated urea-decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China[J].Agronomy Journal, 2013,105(1):277-284.
- [10] 魏海燕,李宏亮,程金秋,等.缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J].作物学报,2017,43(5):730-740.
- [11] 马泉,王亚华,王梦尧,等.缓控释肥的发展应用与评价体系研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(18):24-29.
- [12] Tao Y Y, Qu H, Li Q J, et al. Potential to improve N uptake and grain yield in water saving ground cover rice production system[J].Field Crops Research, 2014, 168:101-108.
- [13] 傅丽青,薛占奎,房玉伟,等.不同缓/控释肥对单、双季晚稻生产特性及经济效益的影响[J].福建农业学报, 2017,32(6):577-582.
- [14] 褚光,徐冉,陈松,等.控释尿素侧深施对机械精量穴直播水稻产量形成与氮肥利用效率的影响[J].作物研究, 2021,35(1):1-7.
- [15] Zhang S G, Shen T L, Yang Y C, et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice[J].Journal of Environmental Management, 2018,5(10):191-197.
- [16] Wang S Q, Zhao X, Xing G X, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China[J].Agronomy for Sustainable Development, 2015,35(3):1103-1115.
- [17] 袁嫚嫚,叶舒娅,李枫,等.树脂包膜尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J].中国农业气象,2011,32(增刊 1):83-87.
- [18] 付月君,王昌全,李冰,等.控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J].土壤,2016,48(4):648-652.

面分布特征及影响因素[J].环境科学,2018,39(7):3365-3372.

[23] Yu H Y, Zha T G, Zhang X X, et al. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China[J].Science of the Total Environment,2019,693:e133632.

[24] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J].Biogeochemistry,2005,74(1):47-62.

[25] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田 2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.

[26] 郑琳,韩晓增,郝翔翔,等.取样和计算方法对黑土剖面土壤有机碳密度的影响[J].生态学杂志,2015,34(9):2583-2589.

[27] 解怀亮,王玉刚,李彦,等.灌溉淋溶对土壤有机碳和无机碳及理化性质的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):188-193.

[28] 陈芳,张海涛,王天巍,等.江汉平原典型土壤的系统分类及空间分布研究[J].土壤学报,2014,51(4):761-771.

[29] 林清美,廖超林,谢丽华,等.地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J].土壤学报,2019,56(6):1414-1423.

[30] Wei L, Ge T, Zhu Z K, et al. Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: Accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers[J].Geoderma,2021,398(1/2):e115121.

[31] Chen X B, Hu Y J, Xia Y H, et al. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils [J].Global Change Biology,2021,27(11):2478-2490.

[32] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input[J].Nature Geoscience,2019,12(1):46-53.

[33] Zou Y C, Zhang S J, Huo L L, et al. Wetland saturation with introduced Fe(III) reduces total carbon emissions and promotes the sequestration of DOC[J].Geoderma,2018,325:141-151.

[34] Li Z P, Zhang T L, Li D C, et al. Changes in soil properties of paddy fields across a cultivation chronosequence in subtropical China [J].Pedosphere, 2005, 15 (1):110-119.

[35] 韩光中,张甘霖,黄来明,等.水耕人为土有机碳和全氮对水分状况和耕作时间的响应[J].土壤学报,2019,56(6):1300-1308.

[36] 李忠佩,张桃林,陈碧云,等.红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J].土壤学报,2003,40(3):344-352.

[37] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J].Geoderma,2015,237/238:199-210.

[38] 王凯,宋立宁,张成龙,等.科尔沁沙地典型林分土壤有机碳储量与根际效应的关系[J].水土保持学报,2013,27(6):221-225.

(上接第 212 页)

[19] 王家宝,郭刚,袁嫚嫚,等.新型控释氮肥不同配施比例对水稻生长及养分利用的影响[J].磷肥与复肥,2020,35(4):49-52.

[20] 王强,徐建明,姜丽娜,等.轮作水稻对大棚土壤硝化作用和氮挥发的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):186-190.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[22] 敖玉琴,张维,田玉华,等.脲胺氮肥对太湖地区稻田氨挥发及氮肥利用率的影响[J].土壤,2016,48(2):248-253.

[23] 严田蓉,何艳,唐源,等.缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交水稻叶片生长及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):729-740.

[24] Miao X K, Xing X M, Ding Y F, et al. Yield and nitrogen uptake of bowl-seedling machine-transplanted rice with slow-release nitrogen fertilizer[J].Agronomy Journal,2016,108(1):313-320.

[25] 郭晨.缓/控释尿素施用对作物产量、氮肥利用率及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学,2018.

[26] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等.控释尿素与普通尿素配施对水稻产量及氮肥利用效率的影响[J].热带作物学报,2018,39(11):2132-2139.

[27] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.

[28] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J].中国水稻科学,2018,32(4):387-397.

[29] 石敦杰,杨兰,荣湘民,等.控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J].江苏农业科学,2018,46(11):44-47.

[30] Wang H, Hegazy A M, Jiang X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea[J].Agronomy Journal,2016,108(3):1214-1224.

[31] 周雯雯,贾浩然,张月,等.不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):657-668.

[32] 陈琨,秦鱼生,喻华,等.控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响[J].西南农业学报,2018,31(3):507-512.