

王 强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 168–175.

WANG Qiang, JIANG Li-na, PAN Jian-qing, et al. Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 168–175.

一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估

王 强¹, 姜丽娜^{1*}, 潘建清², 马军伟¹, 叶 静¹, 邹 平¹

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 浙江省长兴县农业局, 浙江 长兴 313100)

摘 要:为评估单季稻一次性施肥模式中氮素径流损失风险,通过田间试验研究了一次性施肥模式中缓释氮肥类型、施用比例和氮肥施用量对田面水氮素含量的影响。结果表明:与尿素分次施肥处理($225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,不同缓释氮肥($180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)一次性施肥后田面水铵态氮浓度为稳定性肥料(NIU)>常规分次施肥(Urea)>树脂包膜尿素(RCU)>聚氨酯包膜尿素(PCU);氮肥施用量为 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时田面水铵态氮浓度随缓释氮肥施用比例增加而下降,但 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $144 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理间田面水铵态氮含量没有明显差异。尿素分次施肥和一次性施肥处理的稻田氮素径流损失风险都在施基肥后5 d。研究表明,一次性施肥模式通过缓释氮肥的应用和氮肥减量等措施,虽然基肥用量大于尿素分次施肥处理,但没有增加稻田氮素径流损失风险。

关键词:一次性施肥;缓释肥;氮素;径流损失

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)01-0168-08 doi:10.11654/jaes.2018-0204

Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application

WANG Qiang¹, JIANG Li-na^{1*}, PAN Jian-qing², MA Jun-wei¹, YE Jing¹, ZOU Ping¹

(1. Institute of Environmental Resources and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Changxing Agricultural Bureau, Zhejiang Province, Changxing 313100, China)

Abstract: To evaluate the risk of nitrogen runoff loss from single fertilization in monocropping systems, field experiments were conducted to determine the effects of the types of slow-release N fertilizer (SRN), the ratios of SRN to urea, and the application amount of N fertilizer on the N concentrations in rice paddy surface water. The results showed that the concentrations of ammonium nitrogen (NH_4^+-N) in rice paddy surface water after single application of different SRNs ($180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), compared to multiple applications of urea ($225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), were ranked as follows: nitrification inhibitor urea > conventional multiple application of urea > resin-coated urea > polymer-coated urea. At a rate of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for nitrogen fertilizer, the NH_4^+-N concentration in rice paddy surface water decreased as SRN usage increased. However, no significant difference was seen in NH_4^+-N in the surface water at rates between $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $144 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. All nitrogen runoff amounts peaked on the fifth day for both single and multiple urea fertilizations. With the combination of SRN and reduced nitrogen fertilizer application, single fertilization did not increase the risk in nitrogen runoff loss, although it required more basal fertilizer than that with multiple fertilizations.

Keywords: single basal fertilizer application; slow-release fertilizer; nitrogen; surface runoff

收稿日期:2018-02-07 录用日期:2018-05-17

作者简介:王 强(1979—),男,浙江江山人,博士,副研究员,主要研究方向为植物营养与施肥。E-mail:qwang0571@126.com

*通信作者:姜丽娜 E-mail:jln@mail.hz.zj.cn

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303103);平湖市政府-浙江农业科学院科技合作项目(PH20150001)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201303103); Cooperation Project of Pinghu Municipal Government-Zhejiang Academy of Agricultural Sciences (PH20150001)

水稻生产中合理的氮肥运筹方式应综合考虑土壤基础地力、水稻品种养分吸收特性和施用方式等因素^[1-2]。虽然分次施肥、氮肥后移等施肥措施能有效提高氮肥利用率^[3-5],但在实际应用中仍然受到很大的限制。分次施肥中追肥通常撒施于土壤表层,易造成养分径流、淋溶和挥发损失。另一方面,由于水稻种植业的集约化发展趋势和农业劳动人口的减少,水稻种植大户普遍面临着用工难、用工成本增加等困难。水稻轻简化施肥技术的研究与推广对于提高劳动生产率、降低施肥成本具有重要的意义。

缓释氮肥具有养分释放与作物养分吸收同步率高、肥效长等优点,能有效降低稻田土壤氮挥发损失和氮素径流损失,减轻农业面源污染^[6-8]。我国在缓释氮肥品种筛选、缓释氮肥合理施用技术等方面开展了广泛的研究^[9-11],表明在适宜的缓释氮肥支撑下,水稻一次性施肥能促进水稻根系发育,增强水稻生长后期净光合速率^[12-13]。陈建生等^[14]的研究表明,在氮肥和磷肥分别减施 22.1% 和 21.9% 的基础上,水稻一次性施肥比分次施肥平均增产 8.22%。但已有研究主要集中在一次性施肥技术的稳产机制以及稳产效果等方面,对于一次性施肥技术环境效应的研究偏少。稻田径流损失是水稻生产中重要的氮素损失途径,一次性施肥模式中基肥的用量明显高于分次施肥,是否增加田面水氮含量和径流损失风险,是评估一次性施肥技术环境效应的重要指标。本文通过田间试验研究了一次性施肥稻田田面水氮含量动态变化特征,并结合区域降雨特征提出了降低稻田氮素流失风险的避雨施肥策略,以期为水稻一次性施肥技术的推广提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2015年分别在浙江省金华市蒋堂镇和浙江省长兴县太湖新城进行一次性施肥田间小区试验。蒋堂试验点属金衢盆地丘陵区域,供试土壤为红壤,质地为黏壤土,主要是水稻-油菜(绿肥)轮作。太湖新城试验点为水网平原区,离太湖直线距离约 1000 m,主要是水稻-小麦轮作,供试土壤为湖松田,质地为黏壤

土。试验前采集耕层土壤测定基本理化性状。采集样品时将直径 5 cm 土钻插到犁底层为止,2 个试验点耕作层厚度都是大约 20 cm。试验点土壤基本理化性状见表 1。

1.2 供试肥料品种

供试缓释氮肥品种包括含硝化抑制剂的稳定性肥料(NIU),由广州新农科肥业科技有限公司提供,N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 23%、7%、20%,肥料中所有氮肥均添加了硝化抑制剂;树脂包膜尿素(RCU),由金正大公司提供,为商品复合肥,N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 22%、8%、12%;聚胺脂包膜尿素(PCU),其中 PCU1 由美国加阳公司提供包膜尿素母粒,商品名益多宝,氮含量 44.1%,试验中根据各处理缓释氮肥的占比与普通尿素混合,PCU2 由中国农科院提供包膜尿素母粒,氮含量 42%,试验中包膜尿素母粒占总施氮量的 40%。试验中使用的普通尿素、过磷酸钙和氯化钾都采用市售产品。

1.3 试验设计

试验设 9 个处理:(1)N₀(不施氮肥,只施磷、钾肥)。(2)Urea,农民常规施肥(N 225 kg·hm⁻²),施肥量和氮肥运筹根据长兴和金华农民习惯施肥调查结果确定,按 50% 基肥、30% 分蘖肥、20% 孕穗肥分次施用,供试氮肥为尿素。(3)NIU,稳定性肥料一次基施(N 180 kg·hm⁻²)。 (4)RCU,树脂包膜缓释肥一次性施用(N 180 kg·hm⁻²)。 (5)PCU1(40%PCU1, N 180 kg·hm⁻²),40% 聚氨酯包膜尿素(益多宝)+60% 普通尿素一次性施用。(6)PCU2(N 180 kg·hm⁻²),40% 聚氨酯包膜尿素(中国农科院提供)+60% 普通尿素一次性施用。(7)PCU1r(N 144 kg·hm⁻²),40% 聚氨酯包膜尿素(益多宝)+60% 普通尿素一次性施用。(8)20%PCU1(N 180 kg·hm⁻²),20% 聚氨酯包膜尿素(益多宝)+80% 普通尿素一次性施用。(9)60%PCU1(N 180 kg·hm⁻²),60% 聚氨酯包膜尿素(益多宝)+40% 普通尿素一次性施用。各处理磷肥和钾肥用量根据农民习惯施肥情况,分别是 60 kg·hm⁻²和 90 kg·hm⁻²,都作为基肥施用。N₀和 Urea 处理磷肥和钾肥分别用过磷酸钙和氯化钾,其他一次性施肥处理磷肥和钾肥不足部分也分别用过磷酸钙和氯化钾补足。

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic soil properties of field experiment

试验点	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
金华蒋堂	5.33	38.0	2.49	203.46	48.9	149.7
太湖新城	5.10	22.5	1.82	191.07	38.7	40.9

试验重复3次,田间按随机区组排列,小区面积 30 m^2 。金华试验点供试水稻品种为甬优538,2015年6月21日耙田后施基肥,Urea处理在6月30日施分蘖肥。长兴试验点供试水稻品种为嘉33,2015年7月11日耙田后施基肥,Urea处理在7月17日施分蘖肥。

1.4 样品采集与分析

金华试验点在施基肥后2、6、9、11、16、23、25 d和27 d取田面水样,长兴试验点在施基肥后2、3、4、5 d取田面水样。用100 mL医用注射器,取样时不扰动土层,小心抽取5处田面水混合成一个水样,注入聚乙烯塑料瓶中。水样带回实验室后在24 h内进行测定。铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)用靛酚蓝比色法测定,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)用紫外分光光度法测定。

1.5 区域降雨概率计算

从中国气象数据网《中国地面累年值月值数据集(1981—2010年)》《中国地面累年值日值数据集(1981—2010年)》选择金华和长兴站点等试验区域下载累年月雨量及累年日雨量数据,统计区域内单季稻施肥期间月降雨量和日降雨量特征。从中国气象数据网《中国地面气候资料日值数据集(V3)》下载金华站点1995至2015年6月—7月每日20点至次日20点的降雨量数据,计算施肥5 d内产生30 mm降雨量的天数占总天数的概率。

1.6 数据计算与统计分析方法

所有数据均采用Excel 2003和SPSS 17.0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。

2 结果与分析

2.1 缓释氮肥类型对田面水氮含量的影响

缓释氮肥类型对田面水铵态氮含量的影响见图1。金华试验点 N_0 处理整个监测期间田面水铵态氮浓度为 $0.33\sim 5.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,都处于较低水平。其他处理田面水铵态氮含量都在施基肥后2 d最高,施肥后2~16 d内田面水铵态氮含量逐渐降低。Urea处理在基肥后23 d由于追施分蘖肥的影响,田面水铵态氮浓度升高到 $21.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后随着监测时间延长逐渐下降,缓释肥一次性施肥各处理在施基肥23 d后取样时铵态氮含量略有升高,但总体铵态氮浓度都低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。长兴试验点施基肥后田面水铵态氮的变化趋势和金华试验点基本相似,施基肥后2 d田面水铵态氮含量与金华试验点基本接近,但下降速度明显高于金华试验点,在施肥后第4 d就降到了 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

可能与长兴试验点施肥后2 d产生了大暴雨有关。

不同缓释氮肥处理之间田面水铵态氮含量也有一定的差异。NIU处理在金华和长兴试验点中施基肥后2 d田面水铵态氮浓度分别为 $71.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $99.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,都明显高于Urea处理。NIU处理使用的氮肥是添加硝化抑制剂的稳定性肥料,由于硝化抑制剂的存在,减缓了铵态氮向硝态氮的转化,所以导致前期铵态氮含量迅速升高,而且持续时间延长。金华试验点中NIU处理田面水铵态氮含量在施基肥9 d内下降幅度低于其他处理,长兴试验点在施基肥后5 d内也保持了较高的铵态氮浓度。RCU处理缓释氮肥品种是树脂包膜尿素,供试市售成品肥料以速效氮肥和树脂包膜尿素按一定比例配合,该处理只在施肥2 d后测定中田面水铵态氮浓度最高,在以后多次测定中则没有明显增加,表明该肥料的速效肥料比例较高,在施肥后2 d大量释放,之后由于树脂包膜的作用,氮素释放速率减慢。PCU1和PCU2处理都是聚胺脂包膜尿素,在各次测定中铵态氮浓度都较低,表明这两种氮肥的缓释性好于RCU和NIU处理。

不同监测时期田面水硝态氮的含量明显低于铵态氮(图2),但硝态氮动态变化趋势与铵态氮略有不同。NIU处理虽然由于硝化抑制剂减缓了铵态氮向硝态氮的转化,但速效氮肥的施用量高于其他处理,因此田面水硝态氮含量仍然较高。金华试验点施肥2 d后NIU处理硝态氮浓度最高达到 $4.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高出其他处理1倍以上,施肥后6~11 d硝态氮含量逐渐下降,至施肥后16 d硝态氮至最低,之后又略有增加,常规施肥处理施追肥后田面水硝态氮含量变为最高。长兴试验点不同一次性施肥处理对田面水硝态氮含量的影响除RCU处理外与金华结果基本一致,NIU处理明显高于常规分次施肥处理,PCU处理基本与常规分次施肥相同,但在长兴点RCU处理与金华点结果明显不同,并没有表现出明显高于常规施肥处理,基本和常规施肥处理相近。

2.2 氮肥减施对田面水氮含量的影响

氮肥减量对田面水铵态氮含量的影响见图3。金华试验点PCU1和PCU1r处理田面水铵态氮含量随时间变化都是在9 d以内较高,11 d以后趋于平缓。PCU1r处理在各取样时间田面水铵态氮含量与PCU1处理间没有明显差异。长兴试验点测定结果与金华试验点相似,PCU1和PCU1r在施基肥后5 d内田面水铵态氮含量间没有明显差异。氮肥用量对田面水硝态氮含量的影响见图4。金华试验点监测期间田面

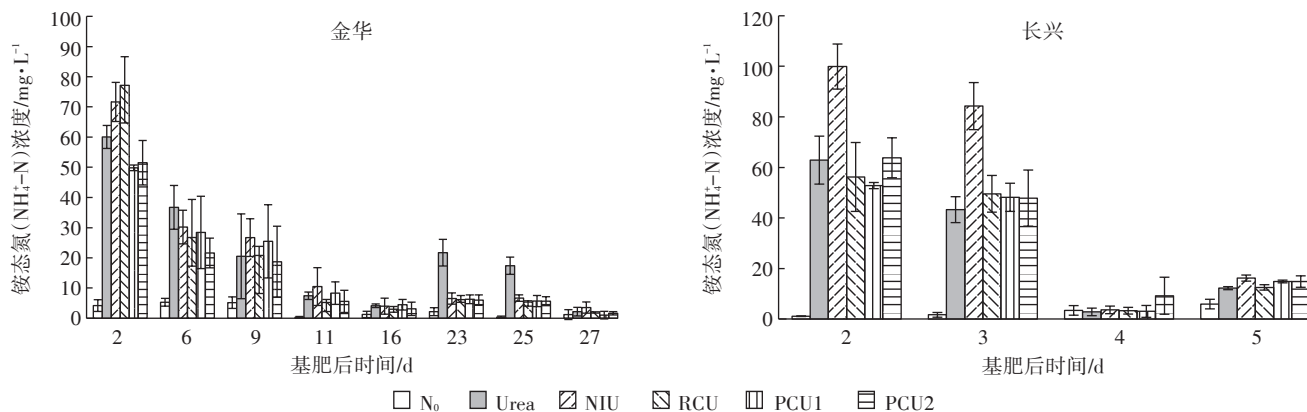


图1 缓释氮肥类型对田面水铵态氮含量的影响

Figure 1 Effects of SRNs type on ammonium concentration of surface water

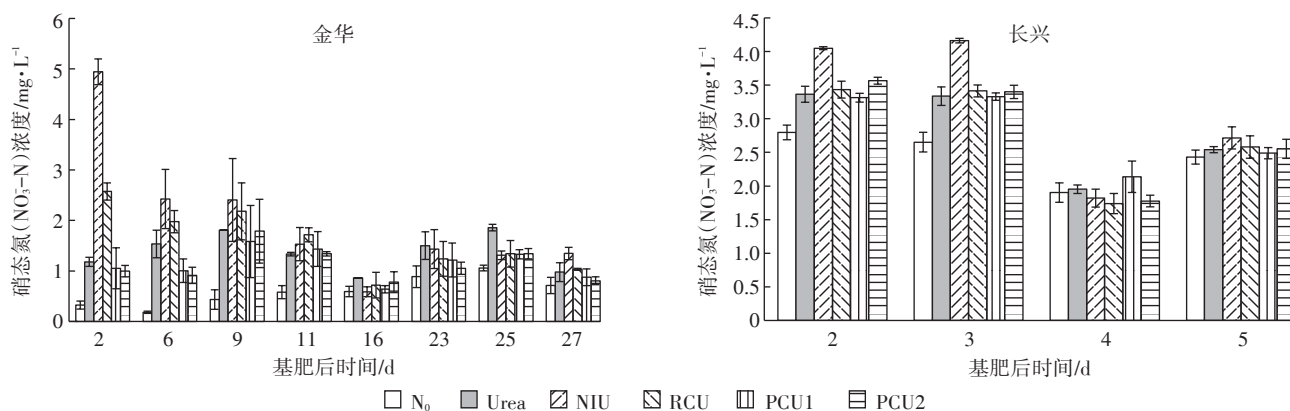


图2 缓释氮肥类型对田面水硝态氮含量的影响

Figure 2 Effects of SRNs type on nitrate concentration of surface water

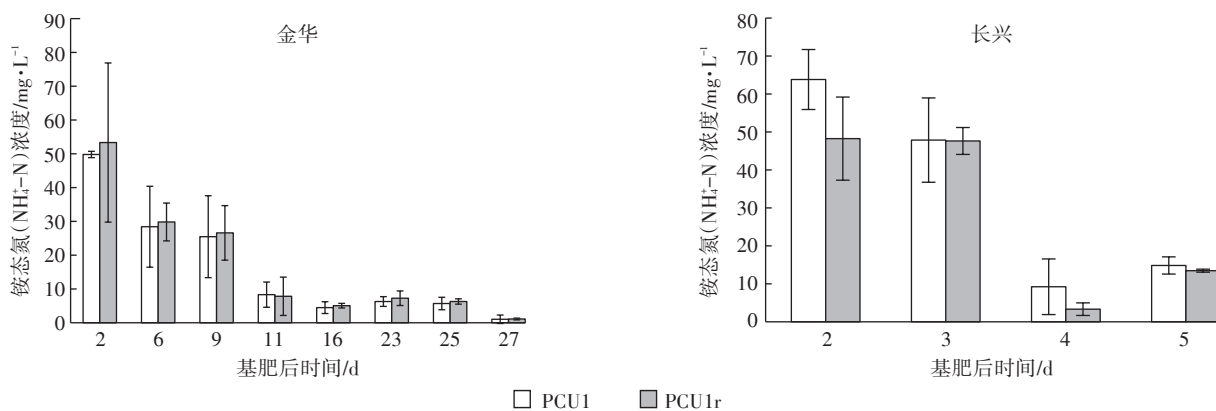


图3 氮肥减施对田面水铵态氮含量的影响

Figure 3 Effects of N reduction on the ammonium concentration of surface water

水硝态氮浓度为 $0.64\sim 1.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PCU1 和 PCU1r 处理都在基肥后 9 d 和 25 d 出现高峰, 但 2 个处理硝态氮含量在同一取样时间时没有明显差异。长兴试验点基肥后 2~5 d 田面水硝态氮浓度为 $1.77\sim 3.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2 个处理硝态氮含量在同一取样时间也没有明显

差异。监测结果表明在 PCU1 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用基础上, 减少 20% 氮肥用量对田面水氮含量没有产生明显的影响。

2.3 缓释氮肥施用比例对田面水氮含量的影响

缓释氮肥施用比例明显影响田面水铵态氮含量

(图5)。金华试验点施基肥后2 d和6 d田面水铵态氮含量随着缓释氮肥施用比例的增加明显下降,其中40%PCU1和60%PCU1处理在施基肥后2 d田面水铵态氮含量分别比20%PCU1降低了21.1%和27.0%。施基肥11 d以后40%PCU1和60%PCU1处理铵态氮含量高于20%PCU1处理,可能是受缓释氮肥中氮素释放的影响。长兴试验点田面水铵态氮含量变化趋势与金华相似,施基肥2 d后40%PCU1和60%PCU1处理田面水铵态氮含量分别比20%PCU1处理降低了40.4%和54.3%,施基肥5 d后,不同处理铵态氮含量差异逐渐减小。金华试验点20%PCU1处理在施肥后2 d和6 d田面水硝态氮浓度明显高于其他处理(图6),9 d以后各处理间硝态氮含量差异减小,到施肥后27 d时,60%PCU1处理硝态氮含量明显增加,可能受包膜氮肥养分释放的影响。长兴试验点中施肥后2~5 d各处理硝态氮含量则没有明显差异。

3 讨论

3.1 一次性施肥氮素损失风险的评估

水稻稳产和增产是推广一次性施肥技术的前提条件。本研究中缓释氮肥一次性施肥各处理氮肥施用量比常规分次施肥处理减少了20%,但不同处理间水稻产量没有显著差异(另文发表)^[15],主要是因为土壤具有良好的基础地力,而且缓释肥的施用保证了水稻生长后期养分的供应。一次性施肥模式的养分损失风险也是影响技术推广的重要因素。由于田面水中氮含量与稻田氨挥发、径流损失都直接相关,研究一次性施肥稻田田面水氮含量变化特征对于评估该项技术的养分损失风险具有重要意义。

稻田田面水氮含量受到氮肥类型和施用量等因素的影响。本研究中树脂包膜尿素、聚氨酯包膜尿素等缓释氮肥处理降低了田面水铵态氮含量,与以往的

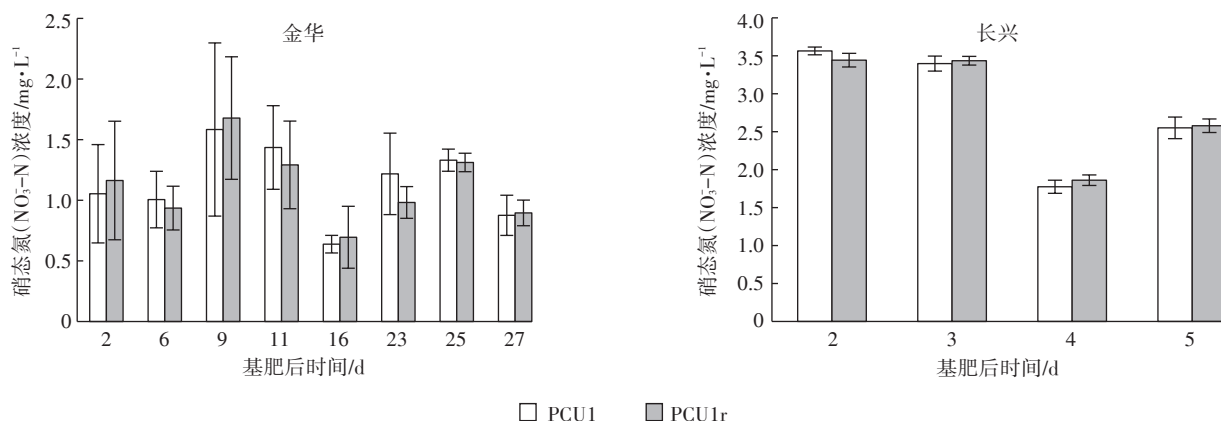


图4 氮肥减施对田面水硝态氮含量的影响

Figure 4 Effects of N reduction on the nitrate concentration of surface water

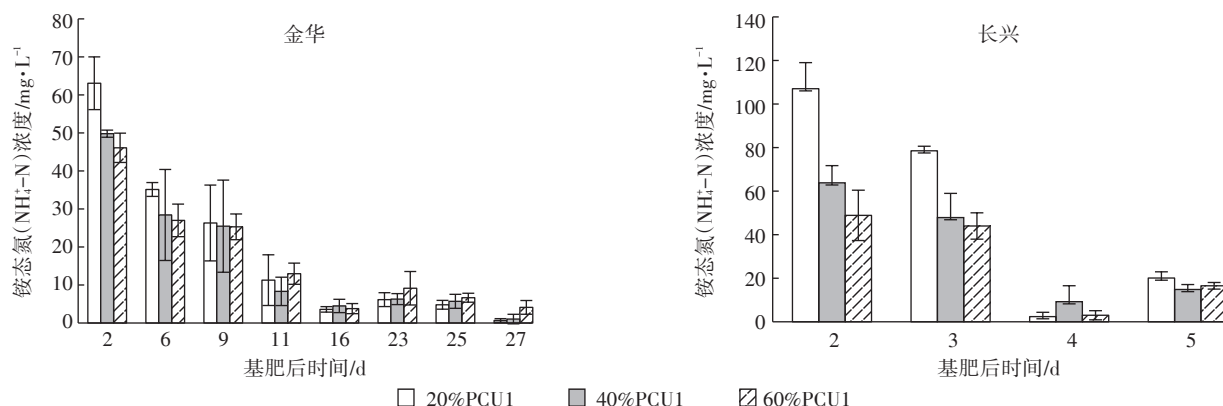


图5 缓释氮肥施用比例对田面水铵态氮含量的影响

Figure 5 Effects of SRNs application ratio on the ammonium concentration of surface water

研究结果相似^[16]。含硝化抑制剂的稳定性肥料处理则增加了稻田田面水铵态氮含量,与俞巧钢等^[17]的研究结果一致。李旭等^[18]的研究表明,施氮量是影响稻田铵态氮含量和氮素径流损失的重要因素。本研究中一次性施肥处理的氮肥投入量为 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,比尿素分次施肥处理减少了20%,加上缓释氮肥的应用,使一次性施肥模式基肥中速效氮肥施用量低于尿素分次施肥处理。但一次性施肥模式中氮肥施用量 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $144 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理间田面水铵态氮含量没有明显的差异,可能是由于氮肥施用量较低,而且受到土壤吸附等因素的影响。本试验结果表明一次性施肥模式通过缓释氮肥应用和氮肥减量等措施减少了速效氮肥的投入量,虽然基肥中氮肥总投入量高于常规分次施肥处理,但没有明显增加田面水氮含量。稳定性肥料处理由于硝化抑制剂减缓了铵态氮向硝态氮的转化,导致田面水铵态氮含量高于尿素分次施肥处理,是否增加了稻田氨挥发损失,还需要进一步研究。

径流损失是稻田重要的氮素损失形态,研究表明

杭嘉湖地区淹水稻田氮素径流流失约占当季水稻氮素施用量的12.69%^[19]。从金华和长兴试验点看NIU处理田面水氮含量都高于Urea处理,金华试验点RCU处理铵态氮也高于常规施肥处理,说明稳定性肥料和树脂包膜肥料支撑的一次性施肥氮流失的风险要大于常规分次施肥处理。而PCU1和PCU2等聚胺脂包膜尿素支撑的一次性施肥处理由于氮肥缓释性能较好,施肥后5 d内田面水铵态氮含量低于常规施肥,可降低氮素流失风险。稻田氮素流失风险还与施肥后可能产生径流的暴雨有关。长江下游单季稻种植季在6月至7月上旬期间,从金华、长兴两地的累年月平均降雨量看(图7),6月是全年雨量最大的一个月,长兴地区7月的雨量也较大,表明在现行的单季稻种植模式下,尿素分次施肥和一次性施肥模式都存在一定的氮素流失风险。

3.2 一次性施肥减少氮素流失的避雨策略

本研究表明田面水铵态氮含量在施肥后第2 d达到峰值,到施肥后第5 d铵态氮浓度降到 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,研究结果与张丽娟等^[20]的一致。李娟等^[21]的研究

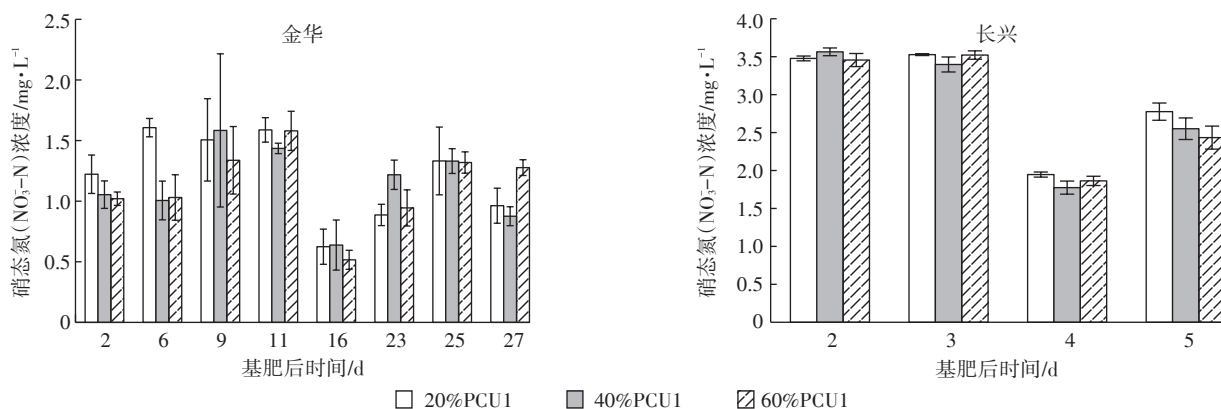


图6 缓释肥施用比例对田面水硝态氮含量的影响

Figure 6 Effects of SRNs application ratio on the nitrate concentration of surface water

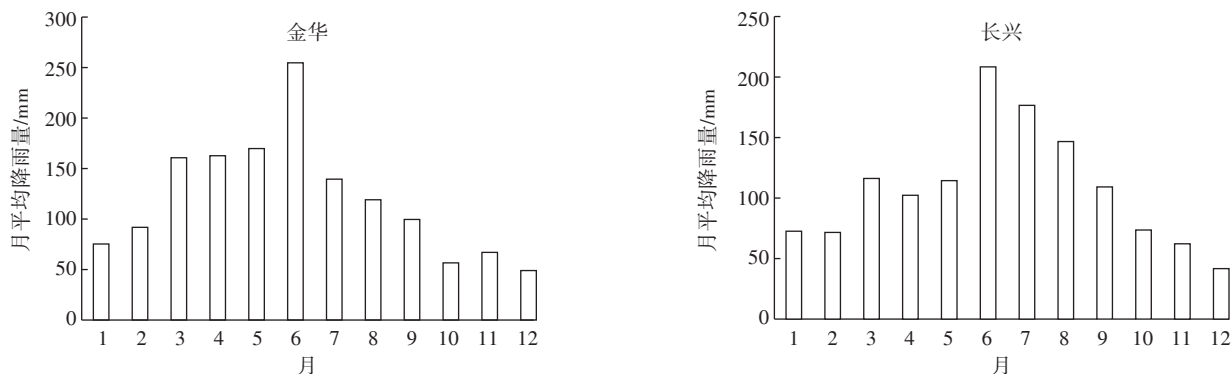


图7 累年月平均降雨量(1981—2010年)

Figure 7 The long-term(1981—2010) average monthly rainfall

也表明稻田田面水铵态氮含量在施肥后第2 d达到峰值,之后迅速下降,第7 d后降至峰值的15%以下并趋于稳定,因此施肥后5 d内是氮素径流损失的关键时期。农户常规种植中一般根据秧龄和气温确定水稻种植时间,对于施肥后是否会因为降雨产生氮素径流损失考虑较少。根据区域降雨概率,合理安排基肥时间,避开施肥后5 d内降雨概率较大的时间段,是降低氮素径流损失的有效策略。从浙江金华和长兴累年(1981—2010年)平均日降雨量看(图8),6月中旬到7月上旬日降雨量较大。统计1995—2015年金华6—7月5 d内出现30 mm降雨概率表明(图9),6月16—26日是5 d内出现30 mm降雨概率最大时段。为降低流失风险,金华地区单季稻种植中应避开6月16日到6月26日降大雨概率大的时段施肥。本研究结论与侯朋福等^[22]的研究结果类似。

4 结论

(1)一次性施肥模式中聚氨酯包膜尿素能有效降低田面水铵态氮含量,树脂包膜尿素在2个试验点间

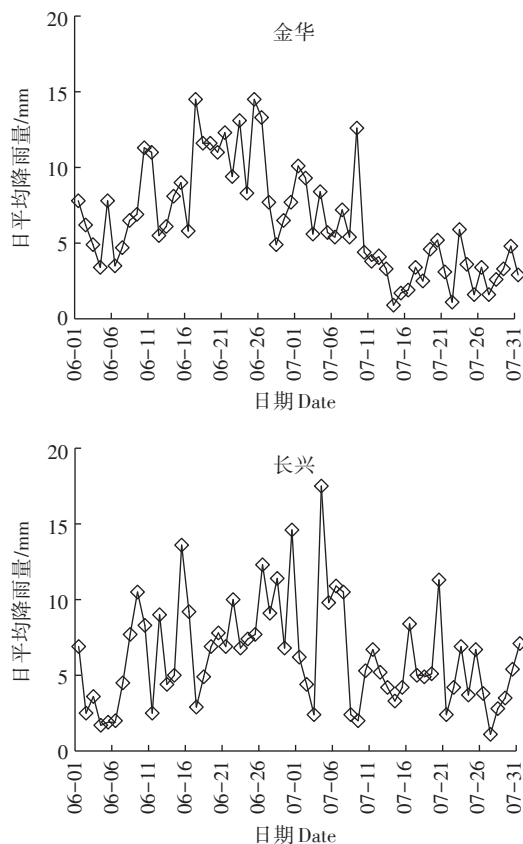


图8 累年6—7月日平均降雨量(1981—2010年)

Figure 8 The long-term (1981—2010) average daily rainfall from June to July

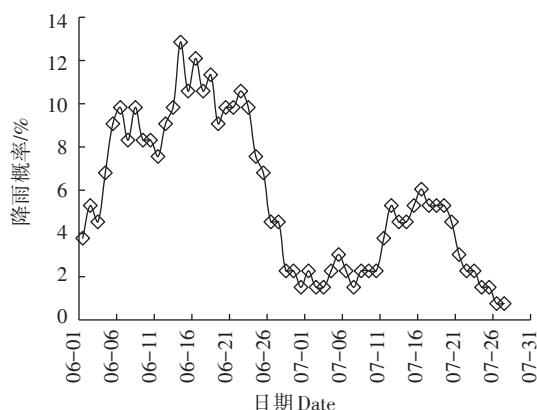


图9 金华5 d内产生30 mm降雨概率(1995—2015年)

Figure 9 The probability of rainfall ≥ 30 mm within 5 days (1995—2015)

表现不一致,添加硝化抑制剂的稳定性肥料处理增加了田面水铵态氮含量和持续时间。

(2)氮肥类型和施用量直接影响稻田田面水铵态氮浓度,一次性施肥模式通过缓释氮肥的应用和氮肥减量等措施减少了基肥中速效氮肥的施用量,没有增加稻田氮素径流损失风险。

(3)施肥后5 d内是稻田径流流失高风险期,基肥施用应综合考虑区域累年雨量和强降雨概率,避开区域降雨大率时期。

参考文献:

- [1] Jiang L G, Dong D F, Gan X Q, et al. Photosynthetic efficiency and nitrogen distribution under different nitrogen management and relationship with physiological N-use efficiency in three rice genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1/2): 321–328.
- [2] Huda A, Gaihre Y K, Islam M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(1): 53–66.
- [3] 田卡, 钟旭华, 黄农荣. “三控”施肥技术对水稻生长发育和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 150–157. TIAN Ka, ZHONG Xu-hua, HUANG Nong-rong. Effect of three controls nutrient management technology on growth, development and nitrogen uptake of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12): 150–157.
- [4] 卢铁钢, 崔月峰, 孙国才, 等. 氮肥运筹对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 作物研究, 2012, 26(4): 320–323. LU Tie-gang, CUI Yue-feng, SUN Guo-cai, et al. Effects of nitrogen application on yield formation and nitrogen use efficiency of rice[J]. *Crop Research*, 2012, 26(4): 320–323.
- [5] 范立慧, 徐珊珊, 侯朋福, 等. 不同地力下基肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1872–1884.

- FAN Li-hui, XU Shan-shan, HOU Peng-fu, et al. Effect of different ratios of basal to tiller nitrogen on rice yield and nitrogen utilization under different soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1872-1884.
- [6] Dubey A, Mailapalli D R. Development of control release urea fertilizer model for water and nitrogen movement in flooded rice[J]. *Paddy & Water Environment*, 2017(2-3): 1-13.
- [7] 诸海焘, 朱 恩, 余廷园, 等. 水稻专用缓释肥复合配方肥增产效果研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 56-60.
- ZHU Hai-tao, ZHU En, YU Tin-yuan, et al. Effects of slowed release compound fertilizer on rice yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 56-60.
- [8] 李 敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815.
- LI Min, GUO Xi-sheng, YE Shu-ya, et al. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 808-815.
- [9] 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.
- XIONG Hai-rong, WEN Zhuo-qiong, XIONG Yuan-fu, et al. Comparison of one-time application effects of three kinds of slow/controlled release fertilizers on rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(33): 1-5.
- [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.
- WEI Hai-yan, LI Hong-liang, CHENG Jin-qiu, et al. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 730-740.
- [11] 蒋曦龙, 陈宝成, 张 民, 等. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 215-220.
- JIANG Xi-long, CHEN Bao-cheng, ZHANG Min, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 215-220.
- [12] 张 木, 唐栓虎, 逢玉万, 等. 不同氮肥及施用方式对水稻养分吸收特征及产量形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(2): 69-75.
- ZHANG Mu, TANG Shuang-hu, FENG Yu-wan, et al. Effects of different nitrogen fertilizer and fertilization patterns on nutrients uptake and yield formation of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(2): 69-75.
- [13] 彭 玉, 马 均, 蒋明金, 等. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1048-1057.
- PENG Yu, MA Jun, JIANG Ming-jin, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1048-1057.
- [14] 陈建生, 徐培智, 唐栓虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1868-1871.
- CHEN Jian-sheng, XU Pei-zhi, TANG Shuan-hu, et al. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice-specific controlled release fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1868-1871.
- [15] 王 强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 长江下游单季稻一次性施肥产量效应及影响因子研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(11): 1875-1881.
- WANG Qiang, JIANG Li-na, PAN Jian-qing, et al. Yield effect and influence factors of one-time fertilization on single-cropping rice in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(11): 1875-1881.
- [16] 叶玉适, 梁新强, 金 熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 105-112, 118.
- YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy fields as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 105-112, 118.
- [17] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1274-1280.
- YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and runoff loss in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9): 1274-1280.
- [18] 李 旭, 谢桂先, 刘 强, 等. 控释尿素减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 70-74.
- LI Xu, XIE Gui-xian, LIU Qiang, et al. Effect of reducing amount of controlled release urea on nitrogen runoff and leakage loss in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 70-74.
- [19] 田 平, 陈英旭, 田光明, 等. 杭嘉湖地区淹水稻田氮素径流损失负荷估算[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1911-1917.
- TIAN Ping, CHEN Ying-xu, TIAN Guang-ming, et al. Estimation of N loss loading by runoff from paddy field during submersed period in Hangjiahu area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1911-1917.
- [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.
- ZHANG Li-juan, MA Zhong-wen, MA You-hua, et al. Dynamic variation of nitrogen and phosphorus under optimize fertilization and slow-release fertilizer in paddy field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 90-94, 100.
- [21] 李 娟, 李松昊, 郭奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 23-28, 33.
- LI Juan, LI Song-hao, GUO Qi-feng, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 23-28, 33.
- [22] 侯朋福, 薛利详, 俞映惊, 等. 稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1353-1361.
- HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, et al. Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2017, 36(7): 1353-1361.