

施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响

斯圆丽, 朱少威, 王季丰, 林森, 倪吾钟

(浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 施用新型肥料是减少养分径流损失的重要途径。采用田间试验研究了施用包膜尿素对水稻生长和径流氮磷损失的影响, 试验设置 CK(习惯施肥)、PU1(减磷 41%、减氮 20%、施普通尿素)、PU2(PU1 基础上减氮 13%)、UR1(PU2 基础上施包膜尿素)和 UR2(UR1 基础上减氮 13%)5 个处理。结果表明: PU1 和 UR1 处理水稻氮磷含量与 CK 处理相近, PU1 成熟期氮、磷总积累量比 CK 增加 11.21, 2.69 kg/hm²。PU1 和 UR1 处理成熟期地上部生物量和籽粒产量高于 CK 处理, 籽粒产量分别提高 7.68%, 5.77%。PU1、PU2、UR1 和 UR2 处理径流总磷含量和累积流失量比 CK 处理低, 减少 13.18%~21.51%。施用包膜尿素(PU1、PU2)处理径流总氮、铵氮和硝氮含量低于施用普通尿素(CK、UR1、UR2)处理; 稻田径流总氮、铵氮和硝氮累积流失量分别减少 12.90%~26.91%, 54.52%~49.38% 和 4.03%~15.95%, 其中包膜尿素处理铵氮累积流失量显著($P < 0.05$)小于普通尿素处理。施用包膜尿素和优化施肥能促进水稻对氮磷养分的吸收, 提高水稻籽粒产量, 显著减少稻田氮磷流失量, 值得在水稻生产中推广应用。

关键词: 包膜尿素; 水稻生长; 氮; 磷; 径流流失

中图分类号: S145.5; S511; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0048-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.03.008

Effects of Coated Urea Application on Rice Growth and Runoff Losses of Nitrogen and Phosphorus from Paddy Field

SI Yuanli, ZHU Shaowei, WANG Jifeng, LIN Sen, NI Wuzhong

(College of Environmental and Resource Science, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: The application of new type fertilizer is of great importance to reduce nutrient runoff losses. A field experiment was conducted to investigate the effects of coated urea application on rice growth and runoff losses of nitrogen and phosphorus from paddy field. The experiment included five treatments such as CK (conventional fertilization), PU1 (59% P, 80% N with conventional urea), PU2 (59% P, 67% N with conventional urea), UR1 (59% P, 67% N with coated urea) and UR2 (59% P, 54% N with coated urea). Results showed that nitrogen and phosphorus contents in rice of PU1 and UR1 treatments were similar to CK, but the total nitrogen and phosphorus uptake of PU1 increased by 11.21 kg/hm² and 2.69 kg/hm², respectively with the comparison to CK. The shoot dry weight and grain yield of rice of PU1 and UR1 were higher than CK, as grain yield increased by 7.68% and 5.77%, respectively. Moreover, the content and the discharge of total phosphorus through runoff from paddy field of PU1, PU2, UR1 and UR2 treatments were lower than CK, which decreased by 13.18%~21.51%. The total nitrogen (TN), ammonium-N (NH₄⁺-N) and nitrate-N (NO₃⁻-N) concentrations in runoff of the treatments with coated urea (PU1, PU2) were lower than that with normal urea (CK, UR1, UR2), and TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N cumulative losses decreased by 12.90%~26.91%, 54.52%~49.38% and 4.03%~15.95%, respectively, while the NH₄⁺-N cumulative losses of the treatments with normal urea were significant lower than that with coated urea ($P < 0.05$). The application of coated urea and optimized fertilization can promote the uptake of nitrogen and phosphorus by rice, increase rice grain yield, significantly reduce the runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy field, which is worthy of application in rice production.

Keywords: coated urea; rice growth; nitrogen; phosphorus; surface runoff

收稿日期: 2017-11-21

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)

第一作者: 斯圆丽(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 570689253qq@.com

通信作者: 倪吾钟(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型肥料研制与养分资源管理、植物营养与环境胁迫诊断、植物营养与农产品安全、污染环境植物修复原理与技术等研究。E-mail: wzni@zju.edu.cn

氮素是植物生长必需的大量营养元素,增施氮肥是现今最主要的增产方式。据统计,21世纪的前15年内,我国农用化肥纯养分施用量从4 146.0万t增至6 022.6万t,而粮食产量仅从46 217.5万t增至62 143.9万t。我国农业生产的物质投入不断增加,但主要作物单产未见大幅度提高^[1]。水稻是我国的主要粮食作物,年种植面积达3 000万hm²,也是我国化肥消费量最多的农作物^[2]。然而,稻田氮磷损失严重,氮磷径流流失已经被确认是稻田土壤氮磷损失的主要途径之一^[3]。氮磷等生源要素的含量决定着水体中初级生产力的水平,是水体富营养化的主要限制因子^[4-5]。据第一次全国污染源普查结果显示,2007年农业面源污染排放的总氮和总磷分别占全国排放总量的57.2%和67.4%。全世界60%以上的地表水环境问题是农业活动引起的^[6]。可见,由于不合理的农业活动引起的农业面源污染问题十分严峻。

兼顾氮肥施用的农业效益和环境效益,应是氮肥合理施用的基本指导思想^[7]。近年来,缓/控释肥因养分释放慢、肥效持久、能提高产量并减少环境污染等优点成为水稻施肥的研究热点,但多数为研究氮的不同比例缓控释肥代替对水稻产量和氮肥利用率的影响^[8-11]。研究不同氮磷钾比例施用包膜尿素对水稻生长和径流氮磷流失的多少。本文选择太湖主要水源的西苕溪流域为研究地点,通过田间试验,探究不同氮磷钾用量下施用包膜尿素对水稻生长和稻田径流氮磷流失的影响,以期水稻合理施肥和控制农业面源污染提供依据。

1 材料与方 法

试验于2015年5—10月进行,试验地点为浙江省湖州市安吉县杭垓镇新上塘村“早优73杂交稻”推广试验区。该区域属亚热带季风气候,气候温和,雨

量充沛,光照充足,四季分明;多年平均气温15.6℃,多年平均相对湿度80%,年降水量1 510 mm。试验前供试土壤全氮、全磷、全钾、有机碳含量为2.49,0.39,10.16,14.55 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量为190.30,8.34,120.21 mg/kg,pH 5.40。

供试水稻品种为早优73杂交稻。所用肥料为尿素、钙镁磷肥、氯化钾和自制植物油包膜尿素(将一定量的植物油脂在55~58℃的环境中加热,之后加入15%氧化剂,再继续加热至出现一定量的气泡,使植物油脂先进行初步氧化。使用自制装置对大颗粒尿素进行包膜,在其表面覆一层干燥添加剂后再烘干。重复以上步骤进行2次包膜,即得所需包膜尿素,其平均含氮量为33.8%)。

试验设置5个处理,分别为CK(习惯施肥;氮肥为普通尿素)、UR1(在习惯施肥的基础上,减氮20%;氮肥为普通尿素)、UR2(在习惯施肥的基础上,减氮33%;氮肥为普通尿素)、PU1(在习惯施肥的基础上,减氮33%;部分氮肥为自制包膜尿素)和PU2(在习惯施肥的基础上,减氮46%;部分氮肥为自制包膜尿素),各处理重复2次。具体施肥方案见表1。2015年6月上旬播种,在施基肥前不灌水,田间保持湿润;在水稻苗长至20 cm后,对稻田进行灌溉,小区间砌20 cm高,40 cm宽的泥埂覆膜隔离,防止稻面水侧渗,实行单独排灌,灌溉后保持平均田间积水高度为1~2 cm,2015年7月15日施基肥,7月26日施分蘖肥,当水稻生长至分蘖后期,不再进行灌溉;2015年8月15日施穗肥,2015年10月中下旬收获,除施肥外,其他田间管理与当地农户相同。试验小区周围有两米的水稻保护行,小区田埂外侧有40 cm宽,40 cm深的排水沟,在靠近排水沟一侧的田埂上安集水桶,用于收集径流。各处理除施肥外,其他田间管理相同。

表1 不同处理施肥方案

处理	施肥量/(kg·hm ⁻²)			分次施用方式
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	337.50	101.25	101.25	氮肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占43%,42%,15%;磷肥一次性作基肥;钾肥:基肥、蘖肥分别占44%,56%
UR1	270.00	60.00	90.00	氮肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占30%,40%,30%;磷肥一次性作基肥;钾肥:基肥、蘖肥分别占40%,60%
UR2	225.00	60.00	120.00	氮肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占40%,40%,20%;磷肥一次性作基肥;钾肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占30%,40%,30%
PU1	225.00	60.00	120.00	氮肥(20%普通尿素+80%包膜尿素)一次性作基肥施用;磷肥一次性作基肥;钾肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占30%,40%,30%
PU2	180.00	60.00	120.00	氮肥(20%普通尿素+80%包膜尿素)一次性作基肥施用;磷肥一次性作基肥;钾肥:基肥、蘖肥、穗肥分别占30%,40%,30%

在分蘖盛期、齐穗期和收获期采集植株样,测定地上部生物量和植株的氮磷含量,收获期另测定籽粒产量和籽粒氮磷含量。单次连续降雨量采用雨量筒测量,灌

水期采集田面水样,记录稻面水深;非灌水期采集径流收集桶内水样,记录径流桶内水的体积,测定径流总氮、铵态氮、硝态氮、总磷和无机磷含量。

植物样品统一采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,消煮待测液中的氮和磷分别采用靛酚蓝比色法和钒钼黄比色法测定。径流总氮采用过硫酸钾-紫外分光光度法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;径流总磷采用过硫酸钾-钼锑抗比色法测定,无机态磷采用钼锑抗比色法测定。

采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 对数据进行处理, Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻生物量和籽粒产量的影响

由表 2 可知,分蘖盛期和齐穗期各处理植株地上部

表 2 不同施肥处理水稻地上部各器官生物量和籽粒产量

单位: kg/hm^2

处理	分蘖盛期	齐穗期	秸秆	糙米	稻壳	瘪粒	籽粒	成熟期总量
CK	2219.9a	5887.4a	2942.7b	3658.6ab	969.7a	337.8a	4628.4ab	7908.7b
UR1	2162.5a	5607.2a	3489.6a	4010.2a	973.7a	407.3a	4983.9a	8880.8a
UR2	2152.8a	6004.2a	2748.5b	3777.4ab	899.1a	330.3a	4676.4ab	7755.1b
PU1	2318.4a	5378.9a	3146.0ab	3974.4a	921.0a	350.9a	4895.3ab	8392.3ab
PU2	2208.6a	5668.7a	3056.1ab	3601.3b	987.8a	370.4a	4589.1b	8015.6b

注:同列中不同小写字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。下同。

2.2 不同施肥处理对水稻氮磷营养状况的影响

2.2.1 水稻成熟期地上部氮含量及氮积累量 由表 3 可知,成熟期各处理秸秆、糙米、稻壳、瘪粒的含氮量分别在 $7.7\sim 9.3$, $14.4\sim 18.7$, $2.8\sim 3.3$, $7.7\sim 9.3$ g/kg 。各处理秸秆氮含量为 $UR2>UR1>PU1>PU2>CK$;糙米氮含量为 $CK>UR1>PU1>UR2>PU2$;稻壳氮含量为 $PU2>UR1>PU1>CK>UR2$;瘪粒氮含量为 $UR2>UR1>PU1>PU2>CK$ 。

表 3 不同施肥处理水稻地上部各器官含氮量和氮积累量

处理	氮含量/ $(g \cdot kg^{-1})$				氮积累量/ $(kg \cdot hm^{-2})$				成熟期总积累量/ $(kg \cdot hm^{-2})$
	秸秆	糙米	稻壳	瘪粒	秸秆	糙米	稻壳	瘪粒	
CK	7.72a	18.73a	2.80a	7.72a	22.67a	68.61ab	2.73a	2.59a	96.59ab
UR1	8.19a	18.19a	3.04a	8.19a	28.62a	72.83a	2.95a	3.10a	107.80a
UR2	9.31a	14.49a	2.78a	9.31a	25.58a	54.70ab	2.50a	3.08a	85.85ab
PU1	8.16a	15.05a	3.16a	8.16a	25.56a	59.71ab	2.87a	2.96a	91.09ab
PU2	7.81a	14.44a	3.29a	7.81a	23.98a	52.14b	3.09a	2.89a	82.29b

2.2.2 水稻成熟期地上部磷含量及磷积累量 由表 4 可知,成熟期秸秆、糙米、稻壳、瘪粒含量分别在 $3.0\sim 3.3$, $3.7\sim 4.0$, $0.4\sim 0.6$, $1.0\sim 1.2$ g/kg 。成熟期秸秆磷含量为 $PU2>UR1>CK>PU1>UR2$;糙米磷含量为 $PU1>CK>UR2>PU2>UR1$;稻壳磷含量为 $PU2>CK>UR1=UR2>PU1$;瘪粒磷含量为 $PU1>PU2>CK>UR2>UR1$,但成熟期秸秆、糙米、稻壳、瘪粒含磷量不同施肥处理间无显著差异。成熟期磷素总积累量最高的是 UR1 处理,且与 CK、UR2、PU1 和 PU2 处理没有显著差异。成熟期 UR1 处理秸秆磷积累量显著高于 UR2 处理($P<0.05$),但与 CK、PU1 和 PU2 处理差异不显著。与习惯施肥处理 CK 相比,减磷处

生物量无显著差异。总生物量和地上部各器官生物量 UR1 处理最高;UR1 处理的总生物量显著高于 CK 处理和 UR2、PU2 处理($P<0.05$),与 PU1 处理的总生物量无差异;成熟期 UR1 处理秸秆的生物量显著高于 CK 处理和 UR2 处理($P<0.05$),且与 PU1、PU2 处理秸秆的生物量无差异;成熟期 UR1 处理与 PU1 处理糙米的生物量无差异,且两者与 CK 处理相比差异不显著,但显著高于 PU2 处理糙米的生物量($P<0.05$);成熟期 UR1 处理籽粒产量显著高于 PU2 处理($P<0.05$),与 CK、UR2 和 PU1 处理籽粒产量无差异;成熟期各处理稻壳、瘪粒的生物量无差异。

UR1 处理各部位氮含量普遍高于其他处理,且施氮总量高的处理(CK、UR1、UR2)地上部各器官含氮量比施氮总量低的处理高(PU1、PU2),但成熟期秸秆、糙米、稻壳、瘪粒含氮量处理间无显著差异。成熟期氮总积累量和地上部各器官氮积累量 UR1 处理最高,氮总积累量和糙米氮积累量显著高于 PU2 处理($P<0.05$),秸秆、稻壳、瘪粒氮积累量处理间无显著差异。

理(UR1、UR2、PU1、PU2)糙米、稻壳和瘪粒的磷素积累量没有显著差异。

2.3 不同施肥处理对稻田径流氮磷流失的影响

2.3.1 不同施肥处理稻田径流水氮磷含量 由图 1~3 可知,5 次采样中,8 月 17 日径流水总氮、铵氮和硝氮含量最高,其次是 8 月 11 日和 8 月 24 日。由图 1 可知,8 月 17 日、10 月 1 日 PU1、PU2 处理径流水总氮含量显著低于 CK、UR1、UR2 处理($P<0.05$),其中 8 月 17 日 UR2 处理径流水总氮含量显著低于 UR1 处理($P<0.05$)。由图 2 可知,8 月 17 日 PU1、PU2 处理径流水铵态氮含量显著低于 UR1 和 UR2 处理($P<0.05$),UR1 和 UR2 处理径流水铵态氮含量显

著低于CK处理($P<0.05$)。10月1日PU1、PU2处理径流水铵态氮含量显著低于CK处理($P<0.05$)。由图3可知,8月17日PU2、UR2处理径流水硝氮含量显著低于CK处理($P<0.05$),CK处理显著低于UR1处理

($P<0.05$);10月1日PU2处理径流水硝氮含量显著低于CK处理($P<0.05$),且与UR1、UR2和PU1处理无显著差异;10月9日PU2处理径流水硝氮含量显著低于PU1处理($P<0.05$)。

表4 不同施肥处理水稻地上部各器官含磷量和磷积累量

处理	磷含量/(g·kg ⁻¹)				磷积累量/(kg·hm ⁻²)				成熟期总积累量/(kg·hm ⁻²)
	秸秆	糙米	稻壳	瘪粒	秸秆	糙米	稻壳	瘪粒	
CK	3.01a	3.85a	0.56a	1.18a	8.84ab	14.06a	0.54a	0.40a	23.83a
UR1	3.07a	3.72a	0.52a	1.04a	10.70a	14.91a	0.50a	0.42a	26.52a
UR2	2.99a	3.84a	0.52a	1.13a	8.23b	14.50a	0.47a	0.37a	23.57a
PU1	3.00a	3.99a	0.44a	1.24a	9.43ab	15.85a	0.40a	0.45a	26.13a
PU2	3.26a	3.78a	0.62a	1.23a	10.01ab	13.61a	0.62a	0.46a	24.70a

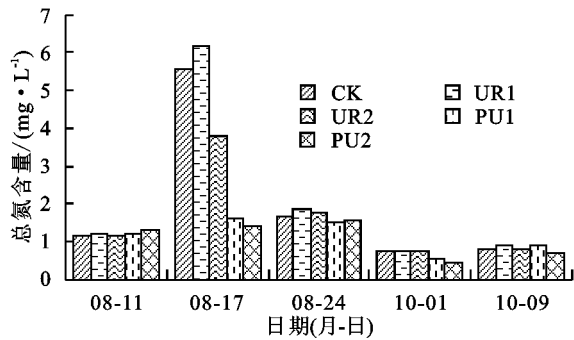


图1 径流水中总氮含量

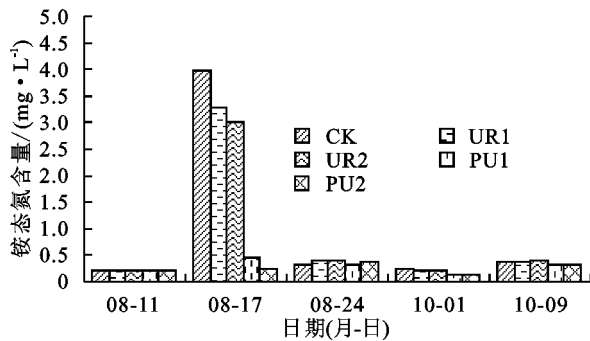


图2 径流水中铵态氮含量

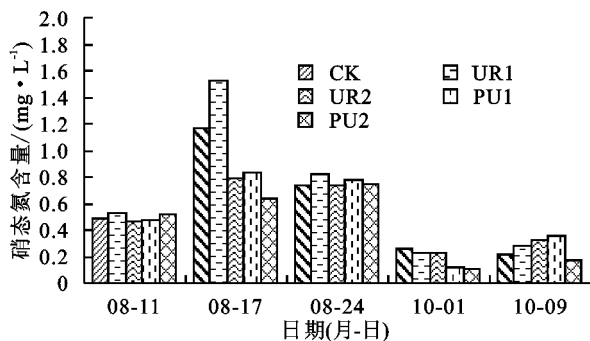


图3 径流水中硝态氮含量

由图4可知,除8月11日以外,其余4次采样时期CK处理总磷含量最高。与CK处理相比,8月17日、10月1日减磷处理(UR2)径流水总磷含量显著降低($P<0.05$),8月24日减磷处理(UR1、UR2、PU2)径流水总磷含量显著降低($P<0.05$),10月8日减磷处理(UR2、PU1、PU2)径流水总磷含量显著降低($P<0.05$)。由图5可知,10月9日UR2处理径流水无机磷含量最高,显著高于CK、UR2、PU1、

PU2处理($P<0.05$)。但其余4次径流事件中各处理径流无机磷含量均无显著差异。

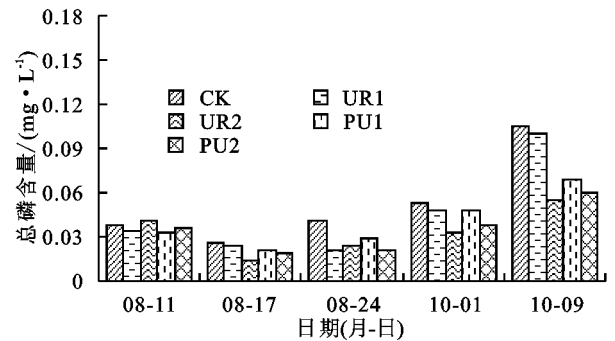


图4 径流水中总磷含量

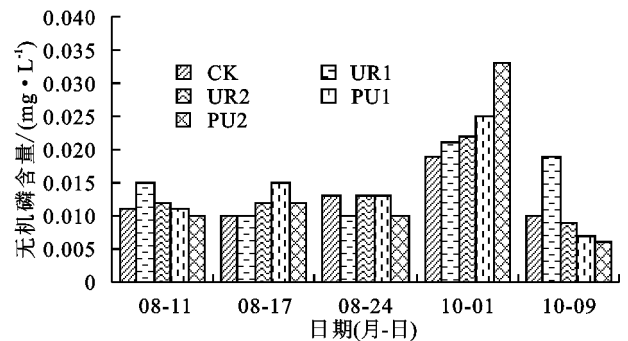


图5 径流水中无机磷含量

2.3.2 不同施肥处理氮磷累积流失量 由表5可知,径流总氮累积流失量为UR1>CK>UR2>PU2>PU1。与CK处理相比,UR2、PU1和PU2处理径流总氮累积流失量减少了164.6,555.0,467.5 mg/hm²,且PU1处理总氮累积流失量显著低于CK处理($P<0.05$)。PU1、PU2处理的径流铵态氮累积流失量显著低于CK、UR1和UR2处理($P<0.05$)。与CK相比,各处理径流硝氮累积流失量没有显著差异。说明随施氮量减少,径流总氮、铵氮、硝氮累积流失量呈逐渐降低趋势,当施氮量相同时配施包膜尿素能显著降低径流铵氮累积流失量。径流总磷累积流失量为CK>UR2>UR1>PU1>PU2。与CK处理相比,减磷处理(UR1、UR2、PU1、PU2)能明显减少径流总磷累积流失量,分别减少15.57%,13.18%,18.64%,21.51%。不同处理径流无机磷累

积流失量无显著差异。说明减磷 41% 能降低径流总磷累积流失量。

表 5 径流水氮磷累积流失量

处理	单位: g/hm ²				
	各形态氮素累积流失量			各形态磷素累积流失量	
	总氮	铵氮	硝氮	总磷	无机磷
CK	2512.4abc	843.1a	914.7a	55.37a	17.44a
UR1	2677.9ab	801.9a	1042.5a	46.75ab	19.49a
UR2	2347.8bc	770.0a	844.8a	48.07ab	18.52a
PU1	1957.4c	389.8b	877.8a	45.05ab	17.64a
PU2	2044.9bc	383.4b	876.2a	43.46ab	14.84a

3 讨论

施用包膜尿素情况下减氮(由习惯施肥 337.5 kg/hm² 降至 225 kg/hm²)水稻的籽粒产量较习惯施肥有所提高,与最高产量(UR1)无显著差异,且分蘖盛期、齐穗期、成熟期水稻地上部生物量较习惯施肥无显著差异;施氮量降至 180 kg/hm² 时产量较最高产量(UR1)显著降低。说明减氮 1/3 配施 80% 包膜尿素不仅可以节氮(减少 112.5 kg/hm²),还能维持水稻正常生长,提高水稻产量(糙米提高 8.6%、籽粒提高 5.8%)。鲁艳红等^[12]研究了 2 种包膜尿素对水稻产量的影响,同样指出施用包膜尿素能提高水稻产量,减少氮肥使用量(减氮 15%~30%)。徐明岗等^[13]研究表明,包膜尿素全量代替普通尿素后水稻氮素积累量提高 18.8%~26.1%。纪德智等^[14]研究表明,硫包衣尿素代替 50% 氮肥显著提高玉米植株、各器官氮磷钾吸收量。本试验也得出相同结论,等氮磷(N、P 含量 225,60 kg/hm²)时配施 80% 包膜尿素氮、磷素总积累量分别提高 6.1%,10.9%,各器官氮磷积累量也有明显提高。刘秀梅等^[15]研究包膜尿素对双季稻生长的影响,其稻草、籽粒氮含量分别在 5.8~6.8,12.1~13.0 g/kg。本试验各处理秸秆、糙米、稻壳、瘪粒氮含量分别在 7.7~9.3,14.4~18.7,2.8~3.3,7.7~9.3 g/kg,磷含量分别在 3.0~3.3,3.7~4.0,0.4~0.6,1.0~1.2 g/kg。水稻氮营养水平较刘秀梅等^[15]略高,水稻氮磷水平与杜加银等^[16]研究减氮控磷稳钾施肥对水稻各器官养分影响所得结果水平一致。说明减氮 33% 减磷 41% 配施 80% 包膜尿素能满足水稻对氮磷养分的正常需求,有利于水稻氮磷元素的吸收积累,提高产量。

包膜尿素能提高产量,还具有环境负荷轻的特点。已有研究^[17-19]表明,包膜尿素做基肥一次性施用,田面水总氮、铵氮和硝氮浓度远低于普通尿素,且田面水氮素浓度动态变化较平稳,可显著降低施肥后 10 天内发生的第 1 次径流液中的总氮浓度。本试验稻田径流研究结果也有类似差异,8 月 17 日(穗肥施

用后 2 天)包膜尿素(PU1、PU2)处理稻田径流总氮含量远低于普通尿素(CK、UR1、UR2)处理,平均含量是普通尿素处理的 29.4%。8 月 24 日(穗肥施用后 9 天)包膜尿素处理总氮含量较普通尿素处理低 12.7%。普通尿素养分释放迅速,在施肥 3 天内田面水总氮浓度处于峰值,绝大部分氮素未被水稻吸收便随径流流失,而包膜尿素养分释放缓慢,可以显著降低氮素径流流失。8 月 17 日 PU1、PU2 处理径流铵氮和硝氮平均含量是 CK、UR1、UR2 处理的 10.2% 和 63.1%。8 月 24 日 CK、UR1、UR2 处理径流铵氮和硝氮平均含量分别下降至 8 月 17 日的 10.9% 和 66.2%,可见普通尿素处理径流中铵氮含量降低速度较硝氮迅速。包膜尿素处理径流总氮含量较普通尿素处理低,主要是通过降低径流铵态氮含量的途径达到的。10 月 1 日包膜尿素处理与普通尿素处理总氮、铵氮、硝氮含量出现短暂显著差异。可能是因为干湿交替影响土壤氮素的转化,风干土壤再湿润后会促进土壤氮素矿化^[20]。由于施肥方案、水稻土壤品种和降雨等的不同,有关施用包膜尿素对稻田径流氮素流失量的报道差异很大,总氮流失量在 0.23~18.8 kg/hm²^[18,21-22]。本试验稻田径流总氮流失量在 2.0~2.7 kg/hm²,处于较低水平,主要是因为本试验径流发生的时间距施肥时间较远,均在 9 天以上,田面水氮素浓度不高。各处理铵氮和硝氮径流累计流失量分别占总氮 18.7%~33.6% 和 36.0%~44.8%。PU1、PU2 处理径流铵氮和硝氮流失量较 CK、UR1、UR2 处理分别降低了 49.4%~54.5% 和 4.0%~16.0%。说明稻田氮素径流流失以硝态氮为主,施用包膜尿素可以降低稻田铵态氮径流流失负荷。这与王小治等^[22]、叶玉适等^[23]的报道相似。

尽管当季磷肥的流失量通常不超过 5%,但对水体富营养化具有关键性的作用^[24]。降低水稻种植期田面水磷含量是控制稻田磷径流流失的关键因子,而施磷导致稻田田面水总磷浓度显著增加,且表现为施磷量越高,田面水总磷浓度越高^[25]。本试验也得到相似的结果,在 5 次径流事件中,减磷(UR1、UR2、PU1、PU2)处理稻田径流总磷含量较习惯施肥(CK)处理低 21.2%~42.1%。降雨或干湿交替等会搅动土壤,改变土壤物理结构的事件都会促使稻田磷素随径流流失。降雨和施肥对磷素径流输出的影响达到显著水平^[21]。梁新强等^[21]对稻田天然降雨条件下径流磷素流失进行研究,得出径流总磷含量在 0.27~4.84 mg/L,总磷累积径流流失负荷在 0.07~0.15 kg/hm²。本试验中,各处理径流总磷含量在 0.014~0.105 mg/L,总磷径流累积流失量在 0.04~0.06 kg/hm²,总磷浓度远低于梁新强等^[21]的试验结果,但总磷径流累积流失量水平接近,是因为本试验降雨与施肥时间间隔较长,但降雨次数多,

所以单次降雨量事件中总磷浓度低,而总磷径流累积流失量差不多。区惠平等^[25]研究得出磷肥施用量为 63 kg/hm² 时的稻面水磷浓度会激增土壤 Olsen-P 含量,增加稻面磷素流失风险。这与本试验减磷处理 60 kg/hm² 的施磷量十分接近。说明减磷 41% 时,不会促进土壤有效磷的释放,还能降低稻田径流总磷含量,环境风险小。与习惯施肥处理相较,减磷处理径流总磷累积流失量减少 13.18%~21.51%。因此,减少磷肥施用量可以通过降低稻田总磷径流含量来减少稻田磷素径流流失负荷,有良好的环境效应。

4 结论

磷肥施用量为 60 kg/hm²,氮肥施用量 < 270 kg/hm² 时,水稻籽粒产量会随施氮量增加而增加,而当施氮量 > 270 kg/hm² 时,水稻产量不增反减。配施包膜尿素情况下,施氮总量为 225 kg/hm² 时有利于水稻生长发育,能提高水稻籽粒产量、成熟期地上部总生物量(较 CK 籽粒产量提高 5.8%,生物量提高 6.1%)。此外,减施氮肥能显著减少稻田氮素径流流失;施氮量相同时配施包膜尿素能显著降低铵氮径流累积流失量,进而达到减少总氮累积流失量的效果;减磷 41% 对控制稻田磷素流失也有明显的效果。因此,单季稻在氮肥用量 225 kg/hm²、磷肥用量 60 kg/hm² 和钾肥用量 120 kg/hm² 的前提下,包膜尿素替代 80% 普通尿素是一种兼具农业效益和环境效益的施肥方式。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 叶玉适,梁新强,周柯锦,等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(1):270-279.
- [3] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [4] McIsaac G F, David M B, Gertner G Z, et al. Eutrophication: Nitrate flux in the Mississippi River [J]. Nature, 2001, 414(6860): 166-167.
- [5] Karl D M. Aquatic ecology: Phosphorus, the staff of life [J]. Nature, 2000, 406(6791): 31-33.
- [6] Owens L, Edwards W M, Van Keuren R W. Nitrate leaching from grassed lysimeters treated with ammonium nitrate or slow-release nitrogen fertilizer [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(6): 1810-1816.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈贤友,吴良欢,韩科峰,等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(4):918-923.
- [10] 张永春,汪吉东,梁永红,等. 硫包衣尿素对水稻的增产效应及氮素利用率的影响研究[J]. 水土保持学报,2007,21(4):108-111.
- [11] Carreres R, Sendra J, Ballesteros R, et al. Assessment of slow release fertilizers and nitrification inhibitors in flooded rice [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 39(2): 80-87.
- [12] 鲁艳红,聂军,廖育林,等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报,2016, 30(2): 155-161,174.
- [13] 徐明岗,李菊梅,李冬初,等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1010-1015.
- [14] 纪德智,王端,赵京考,等. 不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):104-109.
- [15] 刘秀梅,冯兆滨,侯红乾,等. 包膜控释掺混尿素对双季稻生长及氮素利用率的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1737-1743.
- [16] 杜加银,茹美,倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):523-533.
- [17] 田玉华,贺发云,尹斌,等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤,2006,38(6):727-733.
- [18] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1432-1440.
- [19] 张爱平,刘汝亮,杨世琦,等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):555-562.
- [20] Seneviratne R, Wild A. Effect of mild drying on the mineralization of soil nitrogen [J]. Plant and Soil, 1985, 84(2): 175-179.
- [21] 梁新强,田光明,李华,等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报,2005,19(1):59-63.
- [22] 王小治,高人,朱建国,等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. 中国环境科学,2004,24(5):600-604.
- [23] 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.
- [24] Sharpley A N, Charpa S, Wedepohl R, et al. Managing agriculture phosphorus for protection of surface waters: Issues and options [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 437-451.
- [25] 区惠平,周柳强,黄美福,等. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(1):40-47.