

缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响^①

侯红乾^{1,2,3}, 冀建华^{1,2,3}, 刘益仁^{1,2,3}, 黄永兰⁴, 冯兆滨^{1,2,3},
刘秀梅^{1,2,3*}, 胡兆平⁵, 韦礼和⁶, 王子君^{1,2,3}

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200; 2 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200; 3 农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 南昌 330200; 4 江西省超级水稻研究发展中心, 南昌 330200; 5 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700; 6 吉安市畜禽良种场, 江西吉安 343000)

摘 要: 在江西省双季稻区连续 2 年设置大田定位试验, 设置不施氮(CK)、分次优化施肥(OPT)、一次性基施缓/控释肥(100CRF)和一次性基施 80% 缓/控释肥(80CRF)4 个施肥处理, 研究施用缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收与利用、土壤矿质氮累积以及系统氮素平衡的影响。结果表明: 与 OPT 处理相比, 100CRF、80CRF 处理 2 年 4 季水稻产量均无显著差异, 但 100CRF 处理水稻吸氮量显著提高($P<0.05$), 在 2013 年早晚稻分别提升 32.58%($P<0.05$)和 15.41%($P<0.05$), 80CRF 处理与 OPT 处理无显著差异。施用缓/控释肥与分次优化施肥比较, 能提高早晚稻氮肥表观利用率、氮肥表观残留率, 降低土壤氮素损失率。在双季稻连作体系, 土壤中矿质氮含量在同生育期均表现为早稻高于晚稻, 100CRF、80CRF 处理与 OPT 处理在分蘖期、抽穗期、成熟期均无显著差异, 但土壤 NO_3^- -N 在晚稻成熟期 100CRF 处理显著高于 OPT 处理($P<0.05$)。2 年平均 100CRF 和 80CRF 处理氮损失量比 OPT 处理分别减少 65.34 kg/hm² (33.08%) 和 90.64 kg/hm² (45.89%)。氮盈余量分别减少 51.63 kg/hm² (29.41%) 和 85.13 kg/hm² (48.49%)。因此缓/控释肥施用可促进双季稻获得高产, 增加植株氮素吸收, 维持了较高的土壤氮素水平并减少氮素损失, 当前生产条件下, 缓/控释肥减量 20%, 双季水稻在维持高产的同时氮肥利用率最高, 氮素损失最低, 是一种较为合适的施肥方式。

关键词: 双季稻; 缓/控释肥; 产量; 氮素吸收; 氮素平衡

中图分类号: S143; S51 **文献标识码:** A

氮肥的施用在我国农业生产中发挥了重要的作用, 但近年来随着氮肥施用量迅速增加, 氮肥增产效应呈递减趋势, 氮肥当季利用率偏低、损失率偏高、环境风险增加等问题日益凸显^[1-2]。如何在提高作物产量的同时, 有效减少氮肥对环境的负面作用, 已经成为现在农业科学研究的重大课题。控释氮肥能有效解决这一问题, 控释氮肥具有养分释放与作物吸收同步的优点, 一般认为, 缓/控释肥比速效氮肥利用率提高 10%~30%, 比传统速效肥料可减少用量 10%~40%, 且能实现全生育期一次性施肥^[3-6]。因而, 缓/控释肥的研究与应用对实现 2020 年农用化肥的“零增长”目标, 推动资源节约型和环境友好型绿色农业的发展具有重要意义。

已有结果表明, 缓/控释肥能改善作物生长发育,

提高水稻、小麦、玉米和花生等作物产量^[7-12]。关于缓/控释肥种类、配施方式、掺混比例及管理措施对作物氮素吸收利用、肥料氮的释放、土壤氮素残留等方面有大量的研究^[13-16]。目前在稻田针对缓/控释肥的研究主要集中在水稻产量提升、肥料氮养分释放和养分利用率提升方面, 且多以一年试验结果为主, 由于缓/控释肥肥效较长, 可能在后季作物中进一步发挥, 残留在土壤中氮素, 未被当季作物吸收利用, 这部分残留氮对后季作物仍是有效的, 因此有必要研究施用缓/控释肥在双季稻田多年连作体系, 水稻产量、氮素吸收、土壤-作物系统氮素平衡特征。以期准确评价稻田应用缓/控释肥土壤氮素状况及环境影响。

本研究以南方双季水稻体系为研究对象, 选用具有代表性水稻专用缓/控释配方肥。连续 2 年 4 季作

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200702)、江西省重点研发计划项目(20161BBF60133)和江西省农业科学院创新基金项目资助。

* 通讯作者(lxm3392@163.com)

作者简介: 侯红乾(1980—), 男, 陕西凤翔人, 硕士, 助理研究员, 主要从事新型肥料研究与推广。E-mail: hugh_hhq@yeah.net

物定位研究了全量及减量施用缓/控释肥条件下,早、晚稻的产量效应、氮素吸收利用情况、土壤残留氮素的动态变化及整个系统氮素平衡状况,为南方双季稻区缓/控释肥的推广应用提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于 2012—2013 年连续 2 年在江西省南昌县冈上镇进行定位试验 (28°25'N, 115°51'E), 土壤类型为第四纪红壤发育的潯育性水稻土, 该区域地处中亚热带, 年平均气温 17.5 °C, ≥ 10 °C 积温 5 400 °C, 年降雨量 1 600 mm, 年蒸发量 1 800 mm, 无霜期约 280 d。温、光、热资源丰富, 适宜大多数农作物生长。水稻移栽前土壤有机质为 32.52 g/kg、全氮为 1.89 g/kg、碱解氮为 135.6 mg/kg、有效磷为 35.8 mg/kg、速效钾为 94.14 mg/kg、pH 为 6.20。

1.2 供试品种

早稻品种为佳优 98, 于 4 月中旬抛秧, 密度为 43.4 万兜/hm², 7 月上旬收获, 全生育期 110 d 左右。晚稻品种为 101, 于 7 月中旬移栽, 密度为 18 万兜/hm², 10 月中下旬收获, 全生育期 120 d 左右。

1.3 试验设计

早晚稻大田试验设 4 个处理, 分别为: 不施氮肥(CK); 优化分次施肥(OPT); 一次性基施缓/控释肥(100CRF); 一次性基施 80% 缓/控释肥(80CRF)。其中处理 2、3 等养分设计, 小区面积 30 m², 区组随机排列, 重复 3 次, 共 12 个小区。

早稻以每公顷施纯 N 157.5 kg、P₂O₅ 75 kg、K₂O 135 kg 为基础。晚稻以每公顷施纯 N 180 kg、P₂O₅ 54 kg、K₂O 171 kg 为基础。推荐施肥, 氮肥用尿素 (N, 46.30%), 磷肥用钙镁磷肥 (P₂O₅, 12%), 钾肥用氯化钾 (K₂O, 60%), 早晚稻施肥方法, 氮、钾肥料基肥: 分蘖肥: 穗肥为 50%: 25%: 25%, 磷肥全部基施; 试验用缓/控释肥由金正大生态工程集团股份有限公司生产, 早稻缓/控释肥 (N-P₂O₅-K₂O 含量为 21-10-14), 晚稻缓/控释肥 (N-P₂O₅-K₂O 配方为 20-6-19) 均一次性施用, 缓/控释肥氮素由包膜尿素提供, 磷、钾分别由磷酸一铵、氯化钾提供, 控释尿素养分释放期 80 d, 缓/控释肥用量以 OPT 处理中氮肥为标准, 养分不足部分用氯化钾补充, 详细施肥量及施肥方法见表 1。

在早、晚稻生长期间, 田面灌溉水保持在 5 ~ 8 cm, 水稻收获 10 d 排水, 冬季休闲, 不进行灌溉和栽培作物。小区间用田埂分隔开, 单独设立排灌水

表 1 各处理施肥量和施肥方式
Table 1 Amounts and methods of fertilizer application under different treatments

处理		施肥量(kg/hm ²)			施肥方法
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	(基肥：分蘖肥：穗肥)
早稻	CK	0	75	135	50%：25%：25%
	OPT	157.5	75	135	50%：25%：25%
	100CRF	157.5	75	135	100%：0：0
	80CRF	126	60	108	100%：0：0
晚稻	CK	0	54	171	50%：25%：25%
	OPT	180	54	171	50%：25%：25%
	100CRF	180	54	171	100%：0：0
	80CRF	144	43.2	136.8	100%：0：0

注: CK、OPT、100CRF 和 80CRF 分别表示不施氮肥、优化施肥、施用缓/控释肥和 80% 用量缓/控释肥处理, 下同。磷肥全部基施。

沟, 各小区均采用最优的水分调控技术进行生产管理, 除肥料处理外的其他田间管理措施与当地农民的大田管理相同。

1.4 项目测定及方法

2012 年试验田施基肥前取 0 ~ 20 cm 耕层土壤, 按常规法测定土壤基本理化性质^[17]。2012—2013 年每年分别在早晚稻分蘖期、抽穗期在每小区选择 5 个位点, 采用土钻取 0 ~ 20 cm 新鲜土样, 在水稻成熟期分别取 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土样, 土壤等层混合后, 放入冰盒迅速带回实验室。新鲜土样过 5 目筛后, 采用 2 mol/L 的 KCl 溶液进行振荡浸提, 采用流动分析仪同时测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。

水稻收获后分小区单打、单收, 以风干重记产, 水稻实际产量用烘干法折算。并在每小区取代表性植株 5 株, 分秸秆和籽粒两部分称取干重后粉碎, 采用 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮, 用凯氏定氮仪测定秸秆和籽粒的含氮量。

1.5 计算公式^[16,18-19]

土壤氮素净矿化量 (kg/hm²) = 不施氮处理作物吸氮量 + 不施氮处理土壤矿质氮累积量 - 不施氮处理土壤起始矿质氮累积量;

土壤氮素表观损失量 (kg/hm²) = 施氮量 + 土壤起始矿质氮累积量 + 土壤氮素净矿化量 - 作物携出量 - 收获后土壤残留矿质氮累积量;

氮素收获指数 = 籽粒吸氮量/植株总吸氮量;

氮肥表观利用率(%) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量)/施氮量 × 100;

氮肥表观残留率(%) = (施氮区土壤矿质氮残留量 - 无氮区土壤矿质氮残留量)/施氮量 × 100;

氮肥表观损失率(%) = 100% - 氮肥表观利用率 - 氮肥表观残留率。

1.6 数据分析

数据处理及作图使用 Sigmaplot 完成。数据分析使用 DPS7.05 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA), 多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 施用缓/控释肥对水稻产量和氮素吸收的影响

由表 2 可知, 连续 2 年施用缓/控释肥早晚稻产量变化规律相似, 所有施肥处理产量均显著高于 CK(不施氮)($P<0.05$), 但各施氮肥处理间无显著差异; 2 年产量平均以 80CRF 处理最高, 比 CK 增产 25.32%($P<0.05$)。所有施氮处理生物量均显著高于 CK ($P<0.05$); 各施氮肥处理间在 2013 年早稻以 100CRF 处理生物量最高, 显著高于 OPT 处理

($P<0.05$), 其余季节施氮肥处理间无显著差异; 2 年生物量平均以 100CRF 处理最高, 比 CK 增产 27.7% ($P<0.05$), 100CRF 与 80CRF 处理间生物量无显著差异。所有施氮肥处理吸氮量显著高于 CK($P<0.05$), 施氮肥处理间也存在显著差异, 其中 100CRF 处理与 OPT 处理, 在 2013 年早晚稻均达到显著差异水平($P<0.05$), 分别提高 32.58% 和 15.41%。100CRF 吸氮量高于 80CRF 处理, 在 2012 年晚稻达到显著差异水平($P<0.05$), 提高了 14.89%, 80CRF 与 OPT 之间无显著差异。氮的收获指数除 2012 年早稻以外, 施氮处理间以 80CRF 处理最高, 在 2012 年晚稻显著高于 OPT、100CRF 处理。

综上, 施用缓/控释肥与优化分次施肥处理间产量相当; 全量施用缓/控释肥比优化分次施肥能提高水稻生物量和吸氮量; 减量 20% 施用缓/控释吸氮量与优化施肥水稻生物量和吸氮量相当, 但能提高氮的收获指数。

表 2 应用缓/控释氮肥对 2012 年和 2013 年双季稻产量、地上部生物量和氮素吸收量的影响

Table 2 Effects of application of slow/controlled-release N fertilizer on grain yields, aboveground dry mass and N uptake under double cropping rice

年份	处理	早稻				晚稻			
		产量 (kg/hm ²)	生物量 (kg/hm ²)	吸氮量 (kg/hm ²)	氮素收 获指数	产量 (kg/hm ²)	生物量 (kg/hm ²)	吸氮量 (kg/hm ²)	氮素收 获指数
2012	CK	6 395.00 b	10 882.33 a	123.10 b	0.633 a	8 384.46 b	13 151.86 b	146.99 c	0.652 a
	OPT	6 685.00 a	11 985.56 a	162.16 a	0.630 a	9 805.58 a	15 350.13 a	235.34 ab	0.682 a
	100CRF	7 105.00 a	12 311.67 a	172.37 a	0.624 a	9 848.43 a	15 475.85 a	251.23 a	0.585 a
	80CRF	6 970.00 a	12 716.67 a	174.35 a	0.606 a	9 872.07 a	15 121.66 a	218.75 b	0.631 a
2013	CK	4 937.63 b	9 292.66 c	80.37 c	0.758 a	6 872.64 b	11 998.40 b	111.56 c	0.691 a
	OPT	7 635.30 a	13 876.63 b	155.96 b	0.695 c	8 457.11 a	14 594.92 a	170.97 b	0.660 a
	100CRF	7 818.89 a	16 224.72 a	206.77 a	0.697 c	8 182.73 a	13 855.04 a	197.32 a	0.654 a
	80CRF	7 829.61 a	14 935.94 ab	184.71 ab	0.714 b	8 651.02 a	14 871.31 a	184.87 ab	0.688 a

注：相同年份同一列数值后小写字母不同表示处理间达到显著差异($P<0.05$), 下同。

2.2 施用缓/控释肥对水稻氮素利用及土壤氮素残留、损失的影响

由表 3 可知, 施氮极显著影响早晚稻氮肥表观利用率、残留率和损失率。施缓/控释肥处理氮肥表观利用率最高, 显著高于 OPT 处理($P<0.05$); 第一年早稻, 80CRF 显著高于 100CRF 处理($P<0.05$), 其余季节两个施用缓/控释肥处理之间无显著差异, 原因是 80CRF 虽然施氮量低, 但籽粒秸秆氮含量、吸氮量均较低。100CRF 处理比 OPT 显著提高土壤氮素表观残留率, 两年早晚稻均达到显著差异($P<0.05$); 80CRF 与 100CRF 处理之间无显著差异。100CRF 处理、80CRF 处理比 OPT 处理均显著降低土壤氮素的损失率, 两年早晚稻均达到显著差异($P<0.05$); 80CRF 处理损失率最低, 在 2012 年早稻中显著低于 100CRF

处理($P<0.05$)。

综上, 施用缓/控释肥与分次优化施肥比较, 能提高早晚稻氮肥表观利用率, 提高氮肥表观残留率, 降低土壤氮素损失率。通过缓/控释肥减量 20% 施用, 氮肥表观利用率 2 年平均最高, 氮肥表观损失率最低, 氮肥表观残留率维持在较高的水平。

2.3 施用缓/控释肥对双季稻田土壤矿质氮动态变化的影响

施氮肥处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动态变化有显著影响(图 1), 在早稻季施肥处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度要高于 CK 处理, 在分蘖期达到显著差异($P<0.05$), 在抽穗期和成熟期无显著差异。OPT 处理在分蘖期和抽穗期均最高, 而 100CRF 在成熟期最高, 施肥处理之间无显著差异。在晚稻季变化趋势与早稻相同, 但同期的浓度下降。

表 3 应用缓/控释肥对水稻氮素利用、残留、损失率的影响

Table 3 Effects of application of slow/controlled-release N fertilizer on utility, residual and loss ratios of soil N under double cropping rice

年份	处理	氮肥表观利用率(%)		氮肥表观残留率(%)		氮肥表观损失率(%)	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
2012	OPT	26.03 c	34.50 b	18.68 b	10.49 b	55.29 a	55.01 a
	100CRF	37.28 b	41.38 a	29.33 a	25.00 a	33.39 b	33.62 b
	80CRF	55.58 a	39.11 a	26.40 a	18.19 ab	18.02 c	42.70 ab
2013	OPT	23.98 b	33.01 b	5.86 b	7.84 b	70.16 a	59.15 a
	100CRF	57.85 a	47.64 a	23.38 a	23.07 a	19.08 b	29.29 b
	80CRF	53.93 a	50.91 a	33.04 a	17.46 ab	13.03 b	31.63 b

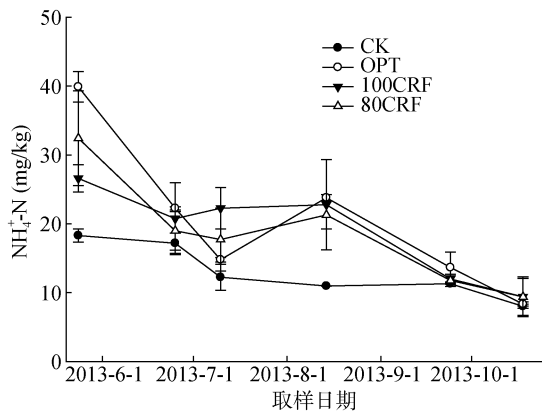
图 1 双季稻体系 0~20 cm 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil ammonium nitrogen in 0-20 cm soil layer under double cropping rice

土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在早晚稻变化规律相同(图 2), 在分蘖期和抽穗期各处理含量均比较低, 但到成熟期后, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著提高, 其中施肥处理显著高于 CK ($P<0.05$), 施肥处理之间表现为缓/控释肥处理要高于 OPT 处理, 其中在晚稻收获期 100CRF 显著高于 OPT、80CRF 处理 ($P<0.05$), 原因可能是稻田土壤处于淹水状态, 土壤氮素以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较低, 到后期由于土壤干湿交替,

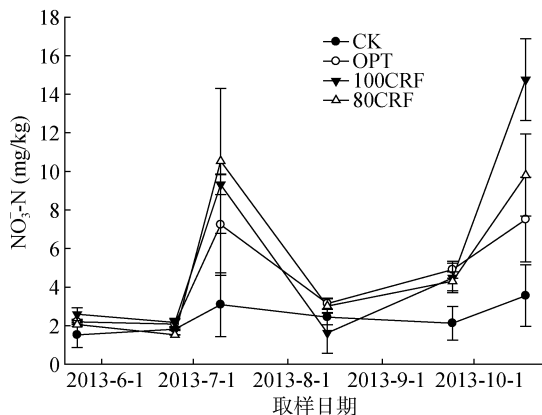
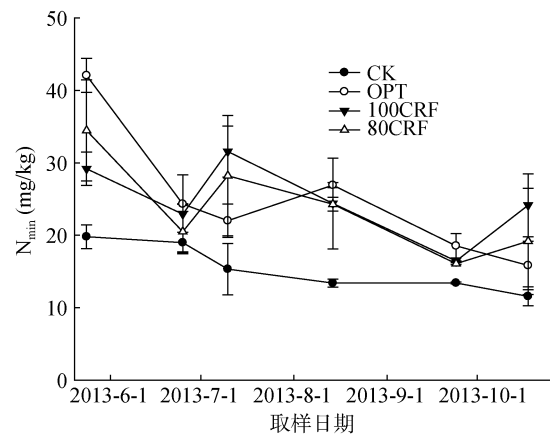
图 2 双季稻体系 0~20 cm 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil nitrate nitrogen in 0-20 cm soil layer under double cropping rice

硝化作用增强, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量水平逐步增高, 控释肥由于土壤氮素在后期仍有释放, 因此有大量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积。

土壤中矿质氮($\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$)是土壤供氮能力的重要指标。其变化直接反映了土壤当季氮素的供应强度。由图 3 可以看出, 早晚稻土壤矿质氮变化规律基本一致, 在分蘖盛期, 施肥处理显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 在分蘖期、抽穗期, 施肥处理间无显著差异; 但在成熟期, 所有施肥处理矿质氮含量均升高, 缓/控释配方肥处理 100CRF 矿质氮含量最高, 其次是处理 80CRF, 均高于 OPT 处理, 但施氮肥处理间无显著差异。

图 3 双季稻体系 0~20 cm 土壤矿质氮(N_{min})动态变化Fig. 3 Dynamics of soil mineral nitrogen (N_{min}) in 0-20 cm soil layer under double cropping rice

2.4 施用缓/控释肥对双季稻体系土壤氮素平衡的影响

双季稻体系土壤-水稻总的氮平衡状况来看(表 4): 2 年表现出相同的规律, 氮素输入主要以施氮肥为主, 占氮素输入量的 44.82%~57.00%; 氮输出项中, 作物带走氮素为主要方式, 占氮素总输出量的 56.47%~83.42%。在氮素损失中, OPT 处理损失最

大,土壤氮素盈余量最高;施用缓控释肥处理土壤氮素损失较少,盈余量也最小;2 年平均 100CRF 和 80CRF 处理损失量比 OPT 分别减少 65.34 kg/hm² (33.08%)和 90.64 kg/hm²(45.89%),盈余量分别减少 51.63 kg/hm²(29.41%)和 85.13 kg/hm²(48.49%)。

从单季氮素平衡状况来看:早稻季土壤氮素矿化量小于晚稻,土壤氮素残留率大于晚稻,氮素表观损失和氮素盈余量均比晚稻小。4 季水稻均表现为 OPT 处理土壤氮素的损失量最高,等量施用缓/控释肥土壤氮素损失量小于 OPT,减量施用缓/控释肥损失量最小。土壤氮素盈余量表现为 OPT>100CRF>80CRF。通过缓/控释肥减量施用土壤氮素平衡较为合理。

表 4 缓/控释肥对双季稻土壤-作物系统 2 年 4 季氮平衡的影响(2012—2013, kg/hm²)
Table 4 Effects of application of slow/controlled-release N fertilizer on N balance in soil-crop system under double cropping rice

稻季		处理	氮输入(kg/hm ²)			氮输出(kg/hm ²)			氮平衡
			施氮量	播前矿质氮	净矿化氮	作物吸量	残留矿质氮	氮素表观损失	
2012	早稻	CK	0.00	96.21	94.39	123.10	67.51	0.00	-28.70
		OPT	150.00	96.21	94.39	162.16	95.53	82.92	82.24
		100CRF	150.00	96.21	94.39	172.37	111.50	56.73	72.02
		80CRF	120.00	96.21	94.39	174.35	99.19	37.06	40.05
	晚稻	CK	0.00	67.51	134.43	146.99	54.94	0.00	-12.56
		OPT	180.00	95.53	134.43	235.34	73.82	100.80	79.09
		100CRF	180.00	111.50	134.43	251.23	99.93	74.76	63.20
		80CRF	144.00	99.19	134.43	218.75	81.13	77.74	59.68
	双季稻	CK	0.00	96.21	228.82	270.09	54.94	0.00	-41.27
		OPT	330.00	96.21	228.82	397.50	73.82	183.72	161.32
		100CRF	330.00	96.21	228.82	423.60	99.93	131.49	135.22
		80CRF	264.00	96.21	228.82	393.10	81.13	114.80	99.72
2013	早稻	CK	0.00	54.94	87.54	80.37	62.11	0.00	7.17
		OPT	150.00	73.82	87.54	155.96	72.66	82.74	81.58
		100CRF	150.00	99.93	87.54	206.77	104.20	26.51	30.77
		80CRF	120.00	81.13	87.54	184.71	109.69	-5.73	22.83
	晚稻	CK	0.00	50.56	99.15	111.56	38.15	0.00	-12.41
		OPT	180.00	72.66	99.15	170.97	52.26	128.58	108.18
		100CRF	180.00	104.20	99.15	197.32	79.68	106.34	81.83
		80CRF	144.00	109.69	99.15	184.87	63.30	104.67	58.28
	双季稻	CK	0.00	54.94	186.69	191.93	38.15	0.00	-5.24
		OPT	330.00	73.82	186.69	326.93	52.26	211.31	189.76
		100CRF	330.00	99.93	186.69	404.09	79.68	132.85	112.60
		80CRF	264.00	81.13	186.69	369.58	63.30	98.94	81.11

注：氮平衡 = 残留矿质氮 - 播前矿质氮 + 氮素表观损失

3 讨论

3.1 应用缓/控释肥对双季稻体系水稻产量的影响

施用缓/控释肥早晚稻氮素吸收量和氮肥利用率均显著提高。全量施用缓/控释肥 2 年平均生物产量最高,氮素的累积量最高;在优化施肥的基础上,早晚稻分别减施 20% 氮肥,2 年平均籽粒产量最高;无论全量还是减量 20% 缓/控释肥,与 OPT 处理产

量均无显著差异,但早晚稻氮素吸收量和氮肥利用率均显著提高。缓/控释肥全量施用易造成秸秆产量增加,氮素吸收浪费,氮素收获指数下降。王斌等^[18]研究发现,施缓/控释肥水稻的地上部分特别是稻草的吸氮量远高于常规尿素,缓/控释肥可能造成植株茎叶的“奢侈”吸氮,Wang 等^[21]也研究表明,一次性施用缓控释肥能满足作物从移栽到齐穗期的氮素需要,极大地增加了氮素的回收率,减少氮素损失和氨

的挥发。同时会增加植株后期吸氮量,降低氮收获指数。这些结论与本研究基本一致,通过减量施用 20% 的缓/控释肥,氮收获指数比优化施肥显著提高,氮素利用效率最高,同时节约了成本,这有利于缓/控释肥的推广应用。综合 2 年 4 个轮作周期的结果,在优化施肥的基础上,施用缓/控释肥减施 20% 是可行的。但也有研究认为缓/控释肥减量条件下与普通尿素处理相比,水稻有效穗数、每穗粒数、产量、氮肥农学利用率有所下降^[22]。造成这种结果差异的原因可能与试验点的基本条件和所用缓/控释肥种类不同有关。

3.2 应用缓/控释肥对双季稻体系氮素平衡的影响

优化分 3 次施肥,比传统农民习惯施肥能减少氮肥的损失,是一种比较科学的施肥模式。本研究条件下,2 年早晚稻氮肥平均损失量为 197.54 kg/hm²,占氮输入量 59.9%;施用缓/控释肥水稻吸氮量显著增加,土壤矿质氮残留量也显著增加;土壤氮素损失量显著减小。2 年双季稻平均损失量为 132.17 kg/hm²,占氮输入量 40.05%;通过缓/控释肥减量 2 年双季稻平均损失量为 106.87 kg/hm²,占氮输入量 40.48%,损失量最小。从土壤氮平衡来看,在双季稻田,土壤氮素的残留量早稻大于晚稻,土壤氮素的损失晚稻季大于早稻季。Fan 等^[23]认为在稻麦轮作系统中,氮素的损失主要发生在水稻季,水稻淹水泡田造成大量 NO₃⁻-N 的反硝化损失。Zhao 等^[24]研究认为,稻田的氮素损失主要是氮挥发和反硝化作用,均占到 22%,在习惯施肥下,土壤中残留的氮素很少。梁钢^[25]在研究包膜控释尿素对小麦—玉米轮作的影响时,发现施用控释尿素能增加土壤耕层(0~20 cm)的氮素积累。衣文平等^[26-27]研究发现,施用控释肥不仅可促进作物增产、氮肥利用率提高,还可使土壤中的 NO₃⁻-N 总累积量有一定提高。这些研究与本研究基本一致,本研究条件下,OPT 处理土壤氮素残留最少,全量施用缓/控释肥土壤矿质氮残留量最大。其中 NO₃⁻-N 含量在收获期显著提高,早晚稻分别比 OPT 提高 28.7% 和 96.5%。早稻收获后随着淹水泡田,造成残留氮素的淋溶和反硝化损失,这也是晚稻季的氮损失量高于早稻的原因之一,因此施用缓/控释肥其施肥量应该在 OPT 基础上减少施用。这样既提高了肥料的经济效益,减少氮素损失,又使输入土壤中的氮素更好地以植物吸收的方式输出,确保土壤的氮素循环处于一个相对平衡稳定的水平。

4 结论

与优化施肥(OPT)相比,施用缓/控释肥双季稻产量无显著影响,但施用缓/控释肥能显著提高双季稻地上部生物量和吸氮量,提高土壤氮素残留,减少氮素损失,提高氮素的利用率;通过缓/控释肥减量 20% 在稳产的同时减少氮素奢侈吸收,提高氮素的收获指数,在保持土壤供氮的同时进一步减少氮素的盈余和损失,提高了氮肥利用率,是一种较为合适的施肥方法。

参考文献:

- [1] 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): 155-174
- [2] 黄丽娜,刘俊松. 我国缓/控释肥发展现状及产业化存在的问题[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(6): 527-530
- [3] 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
- [4] Li G Q, Yang J T, Yan L Y, et al. The effects of controlled release fertilizer and conventional complex fertilizer on the dry matter accumulation and the yield in winter wheat[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, 2013, 5(7): 2724-2728
- [5] 李艳梅,廖上强,薛高峰,等. 减量灌溉下番茄施控释肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 134-140
- [6] 侯红乾,黄永兰,冀建华,等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(4): 389-396
- [7] 杨春蕾,袁玲,李英才,等. 南太湖流域控释包膜尿素对水稻产量及稻田氮素流失的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 184-190
- [8] Acquaye S, Inubushi K. Comparative effects of application of coated and non-coated urea in clayey and sandy paddy soil microcosms examined by the 15N tracer technique[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50(2): 205-213
- [9] 邱现奎,董元杰,史衍玺,等. 控释肥对花生生理特性及产量、品质的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 223-227
- [10] 杨雯玉,贺明荣,王远军,等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 627-633
- [11] 王宜伦,韩燕来,苗玉红,等. 砂薄地夏玉米施用包膜氮肥效果研究[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(3): 349-351
- [12] 李方敏,樊小林,陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 494-500

- [13] 成艳红, 武林, 钟义军, 等. 控释肥对稻草覆盖红壤花生产量及土壤有效氮平衡的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 306-313
- [14] 司贤宗, 韩燕来, 王宜伦, 等. 缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦-夏玉米施肥效果的研究[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1390-1398
- [15] 谷佳林, 边秀举, 徐凯, 等. 不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及氮素挥发的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 235-242
- [16] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005
- [18] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368
- [19] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499
- [20] 王斌, 万运帆, 郭晨, 等. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1104-1112
- [21] 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
- [22] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 971-975
- [23] Fan M S, Lu S H, Jiang R F, et al. Nitrogen input, 15N balance and mineral N dynamics in a rice-wheat rotation in Southwest China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(3): 255-265
- [24] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in Southern China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 1068-1078
- [25] 梁钢, 梁林洲, 董晓英, 等. 控释肥料在华北潮土小麦-玉米轮作体系中的施肥效应[J]. 土壤, 2016, 48(1): 53-58
- [26] 衣文平, 孙哲, 武良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 687-693
- [27] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-534

Effects of Slow/Controlled-Release Fertilizer on Grain Yield, N Uptake and Soil N Balance in Double Cropping Rice

HOU Hongqian^{1,2,3}, JI Jianhua^{1,2,3}, LIU Yiren^{1,2,3}, HUANG Yonglan⁴, FENG Zhaobin^{1,2,3},
LIU Xiumei^{1,2,3*}, HU Zhaoping⁵, WEI Lihe⁶, WANG Zijun^{1,2,3}

(1 Soil & Fertilizer and Resources & Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China; 3 Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanchang 330200, China; 4 Jiangxi Super-rice Research and Development Center, Nanchang 330200, China; 5 Kingerta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu, Shandong 276700, China; 6 Ji'an Breeding Farms of Livestock and Poultry, Ji'an, Jiangxi 343000, China)

Abstract: A location-fixed field experiment was carried out for 2 years under double cropping rice in Nanchang, Jiangxi Province of Southern China. Four treatments were designed which included no nitrogen fertilizer (CK), optimization of nitrogen fertilization application split by three times (OPT), slow/controlled release fertilizer all used as basal fertilizer (100CRF), and 80% slow/controlled release fertilizer all used as basal fertilizer (80CRF). Each treatment had three replicates. Rice grain yield, nitrogen absorption and utilization, soil mineral nitrogen accumulation and nitrogen balance in soil-crop system were investigated. The results showed that compared with OPT, 100CRF and 80CRF did not changed the rice yield significantly, but 100CRF increased nitrogen uptake of rice significantly ($P<0.05$). Nitrogen uptake increased by 32.58% ($P<0.05$) in early rice and 15.41% ($P<0.05$) in late rice in 2013, respectively; while no difference existed in nitrogen uptake between 80CRF and OPT. Compared with OPT, CRF improved utilization rate of nitrogen of rice and thus reduced loss of soil nitrogen. Soil mineral nitrogen was higher in early rice than in late rice in the same growth period, no significant difference existed in soil mineral nitrogen between different treatments in tillering, heading and mature stages, but soil nitrate nitrogen in late rice under 100CRF was significantly higher than that of OPT in mature stage. Compared with OPT, the average nitrogen loss ratio of 100CRF and 80CRF reduced by 65.34 kg/hm² (33.08%) in 2013 and 90.64 kg/hm² (45.89%) in 2014, respectively. Therefore controlled release nitrogen fertilization can promote rice yield, increase nitrogen absorption of rice, maintain high soil nitrogen level, reduce soil nitrogen loss and improve utilization rate of nitrogen fertilizer. Reducing 20% of applied controlled release fertilizer is more reasonable under current situation because it can maintain high yield of cropping rice while has the highest utilization rate of nitrogen fertilizer and the lowest nitrogen loss at the same time.

Key words: Double cropping rice; Slow/controlled-release fertilizer; Grain yield; N uptake; N balance