

太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价

薛利红, 俞映惊, 杨林章

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:研究了不同氮肥管理模式下的稻田氮素平衡特征和环境效应. 在太湖主要入湖河流直湖港下游开展了农户常规施肥处理、缓控释肥处理、有机无机肥配施处理、按需施肥处理以及化肥减量优化处理 5 种氮肥管理模式的田间小区试验, 实测了稻季的径流和淋洗氮损失, 估算了氨挥发和 N_2O 等气体损失, 分析了不同氮肥处理下的环境排放量和氮素平衡特征. 与农户常规施肥处理相比, 其他处理在减少氮肥总投入量 20% ~ 40% 的情况下产量与农户对照基本持平, 氮肥利用率提高了 14.5% ~ 44%. 不同氮肥管理模式下, 缓控释肥处理和按需施肥处理的氮环境排放量最低, 比农户施肥处理分别降低了 52.8% 和 45.4%. 在等氮量投入下, 有机无机配施处理比纯化肥处理减少了环境氮排放量. 农户施肥处理存在着明显的氮盈余, 增加了麦季氮流失的风险, 按需施肥处理略微出现氮亏缺, 在一定程度上减少了麦季氮流失风险. 新型缓控释肥处理和按需施肥处理能在不降低产量和效益的情况下, 提高氮肥利用率, 减少环境排放量, 是值得在太湖流域推广的经济环保氮肥管理模式.

关键词: 按需施肥; 缓控释肥; 产量; 氮肥利用效率; 氮环境排放量

中图分类号: X820.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-1133-06

Nitrogen Balance and Environmental Impact of Paddy Field Under Different N Management Methods in Taihu Lake Region

XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Effects of nitrogen (N) management methods of paddy field on N export to environment and paddy N balance in Taihu lake region, China were studied. Field experiment including site-specific nitrogen management (SSNM), organic & chemical N fertilizer treatment (OCN), control released urea treatment (CRN), reduced chemical N treatment (RN) and farmer's N treatment (FN) were conducted at the taihu lake region in 2008. N loss including runoff, leaching, ammonia volatilization and N_2O were calculated, and the N balance was evaluated. Results showed the grain yield of SSNM, OCN, CRN and RN treatments was identical with FN treatment, while the total N rate reduced about 20% -40%, and N use efficiency (NUE) increased 14.5% -44%. N export of SSNM and CRN treatments decreased 52.8% and 45.4% in comparison with FN treatment. Under the same N input, N export of OCN treatment was lower than pure chemical N treatment (RN). N surplus was observed in FN treatment, while N deficit existed in SSNM treatments. CRN and SSNM treatments could increase NUE, reduce N export without sacrifice of yield and benefit, and could be as an economic and environment-friendly measure to intensify in Taihu lake region.

Key words: site-specific nitrogen management (SSNM); control released fertilizer; yield; N use efficiency (NUE); N export to environment

农业面源污染正成为世界发达国家和发展中国家共同关心的一个重大问题, 农田氮肥面源污染作为其中的重要组成部分备受关注. 太湖地区是我国农业高产、稳产地区之一, 为追求高产, 往往施入大量氮肥. 对太湖流域 3 个行政村 62 户的调查研究表明, 太湖流域稻季施氮量平均在 $352 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 $270 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的占 43.3%, 过量施肥 ($360 \sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和极端过量施肥 (超过 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的分别占 26.6% 和 13.3%^[1]. 过度施肥现象导致氮肥利用率低下, 只有 30% ~ 35%, 而国外发达国家氮肥利用率在 50% 以上^[2]. 大量的氮肥通过径流、淋洗、氨挥发、 N_2O 排放等途径排放到大气和水环境

中, 引发一系列如大气温室效应、水体富营养化等环境问题^[3-6]. 研究表明, 太湖典型稻麦轮作区稻季通过径流损失的氮在 $19.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3,4], 稻田氮素淋洗量在 $3.2 \sim 5.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[4], 向水体排放的总氮占施氮量的 11.4% 左右^[5]. 马立珊等^[6]曾利用小区和大田试验估算了研究区内水田和旱地系统的氮排放量, 得出在降水量接近正常年份的 1987 年, 太湖流

收稿日期: 2010-05-05; 修订日期: 2010-09-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B07); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-005); 农业部公益性行业项目 (200903011)

作者简介: 薛利红 (1977 ~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业面源污染控制, E-mail: lhxue@issas.ac.cn

域农田氮的总排放量为 3.37×10^4 t. 可见农业面源污染是造成太湖氮污染和富营养化的主要原因之一^[7-9]. 因此, 减控农田氮素流失是治理面源污染的重要措施. 西方发达国家多采用化肥减量、农田休闲等环境保护为主的途径应对农业面源污染^[10], 而我国的国情要求必须在保障区域粮食安全的前提下寻求突破口与适宜的方法.

氮素损失除了径流和渗漏外, 气态损失如氨挥发和 N_2O 排放也是一个重要途径. 研究表明, 太湖流域稻田氨挥发约占总施氮量的 29% ~ 35%^[9,11,12], 其比例远大于径流和渗漏损失. 以往研究多侧重稻季氮素损失对周围水环境的影响^[2-8], 而同时考虑氨挥发等气体排放的研究较少. 氮素损失受氮肥用量、氮肥品种以及氮肥施用时间等氮肥管理方式的显著影响, 有机无机配施、施用缓控释肥、按需施肥能有效减少氮素损失^[11-15]. 为此, 本研究系统比较了不同氮肥管理方式对稻田氮素径流、渗漏损失以及气体排放的影响, 综合考虑环境效应、经济效应以及稻田肥力的可持续发展, 以期太湖流域稻田寻找一种适宜的氮肥管理模式, 从而达到农业和环境双赢的结果.

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验地点选择在太湖主要入湖河流直湖港下游的一块稻田, 地处无锡市胡埭镇龙延村沙滩自然村. 供试土壤为湖积土, 有机质含量 $35.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $149.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $37.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $118.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 灌溉水源为朱家浜, 为直湖港一级支流龙延河的支浜, 和直湖港直接连通. 稻田排水同样排入朱家浜.

设农户施肥 (farmer's N, FN, $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、化肥减量施肥 (reduced N, RN, $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、基于叶色的按需施肥模式 (site-specific N management, SSNM, $153 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、有机无机配施模式 (organic & chemical N, OCN, $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、新型肥料处理模式 (control released urea, CRN, $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 以及无氮 (NO) 6 个处理, 3 次重复 (表 1). 随机区组设计, 小区面积 80.4 m^2 , 试验地总面积 2017 m^2 . FN、RN 和 OCN 处理的氮肥分基肥、蘖肥和穗肥 3 次施用, 比例分别占 30%、30% 和 40%, 其中 OCN 处理中基肥中有机肥占总氮用量的 20%, 采用的是江苏田娘公司生产的商品有机肥. SSNM 处理基肥用量同 RN

处理, 追肥量根据分蘖期和穗分化期叶片的 SPAD 值来定. CRU 处理中新肥料氮用量占总 N 量的 70%, 全部基施, 采用山东金正大公司产的缓控释尿素 (氮含量 43%), 常规尿素占总氮量的 30%, 用作分蘖肥. NO 处理不施氮肥. 所有处理磷钾肥用量相同, 磷肥用量 (纯 P_2O_5) $65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 一次性基施, 钾肥用量 (K_2O) $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 基肥和穗肥各施用 50%. 水稻供试品种为武育粳 11 号. 水分管理采用当地农户的水层灌溉管理. 苗期和分蘖期保持 5 ~ 8 cm 水层, 分蘖肥施用 8 d 后开始烤田, 烤田结束后覆水施穗肥. 稻季烤田期间遭遇连续降雨, 烤田时间略有延长, 因此, 穗肥采用干施肥技术, 田面保持湿润状态, 直至施肥后的第 11 d 才覆水, 此期没有降雨发生.

表 1 不同处理的氮肥 (以 N 计) 用量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

施肥处理模式	代号	基肥	分蘖肥	穗肥	总量
农户施肥处理	FN	81	81	108	270
化肥减量处理	RN	63	63	84	210
按需施肥处理	SSNM	63	45	45	153
有机无机配施处理	OCN	63(42来自有机肥)	63	84	210
新型肥料处理	CRN	126(缓控释肥)	54	0	180
无氮处理	NO	0	0	0	0

1.2 分析和测定项目

在关键生育期 (施分蘖肥前、穗分化期、抽穗期、灌浆期) 用日本产的叶绿素测定仪 (SPAD-502) 测定各处理最新全展叶的 SPAD 值, 每小区测定 10 穴, 每穴测 3 张叶片. 每张叶片测上中下 3 点, 取平均值作为该小区的代表值. 成熟期测产, 并分析产量构成因素, 同时破坏性取植株样品, 烘干粉碎后利用凯氏微量法测定植株全氮含量 (%), 并计算植株氮吸收. 在施肥后的一周内每天采集田面水, 在施肥后的第 2、4、6 d 采集 40、60、80 和 120 cm 土壤深度的渗漏水样, 同时收集排水和径流水样. 用流动连续注射仪分析水样的氨氮、硝氮和总氮浓度. 用流量计记录进水和排水的次数和水量.

1.3 数据处理和分析

数据处理采用 SPSS 13.0 下的 ANOVA 程序进行不同施肥模式下产量及其构成、氮吸收、氮肥利用率、径流损失、淋洗损失等的方差分析和显著性检验, 并计算了稻田对周围水体的净化能力以及稻田生态系统稻季的氮素平衡特征. 若稻田对水体养分的净化量为正值, 表明稻田对周围水环境有净化能力; 若氮平衡为正值, 表明稻田稻季氮素投入有盈余, 多余的氮以不同形态贮存于土壤中, 土壤氮素水平将持续增高, 冬季养分淋失风险加大. 计算公式

如下.

氮恢复效率 (recovery efficiency of nitrogen, RE_N):

$$RE_N = [(\text{施氮区水稻植株氮吸收} - \text{不施氮区植株氮吸收}) / \text{施氮量}] \times 100\%$$

氮农学效率 (agronomy efficiency of nitrogen, AE_N , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$):

$$AE_N = (\text{施氮区水稻籽粒产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量}$$

稻田对水体的净化量 = 灌溉水输入和雨水输入 - 径流损失 - 渗漏损失

氮平衡 = 输入项 (化肥 + 有机肥 + 秧苗带入氮 + 干湿沉降 + 灌水带入氮) - 输出项 (收获物带出氮 + 径流损失 + 淋洗损失 + 气体排放)

其中大气干湿沉降采用无锡 2009 年稻季实际监测数据, 气体排放中氨挥发量根据宜兴 2009 年稻季田面水氨浓度与氨挥发总量的数学关系模型计算得出, N_2O 排放量根据 IPCC-EF 方法学模型进行估算^[16,17]; 淋洗损失根据渗漏速率及实测的渗漏水浓度累积计算得出.

2 结果与讨论

2.1 产量及其构成

除了无氮处理外, 不同氮肥管理模式间产量并无显著差异, 在 $8\,790 \sim 9\,162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间变化 (表 2). 无氮区产量高达 $7\,132 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明该地的基础肥力较高. 因此, 当季总氮用量减少 22%, 即 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的情况下, 对产量并无影响, 这与张刚等^[18] 及薛峰等^[19] 在该区的研究结果一致. 尤其是新肥料处理和基于叶色的按需施肥模式 (SSNM), 其总氮用量与常规农户施肥模式相比, 总氮用量分别减少了 33% ($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 44% ($117 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 但是产量并没有减少. Xue 等^[20] 在太湖流域常熟的试验结果也表明, 与常规农户施肥处理相比, 基于光谱的按需施肥模式在减少氮肥用量 33% 的情况下还能略微增产, 这也表明太湖流域目前农户施肥量普遍过高. 除不施氮肥处理外, 不同氮肥管理模式对穗粒数、千粒重并无显著影响, 但显著影响了亩穗数和结实率. 化肥减量处理的亩穗数显著低于农户施肥处理, 但其结实率却要显著高于农户处理, 因此其最终的产量并没有降低.

2.2 植株氮吸收和氮肥利用效率

成熟期植株氮吸收变化在 $191.2 \sim 215.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间 (表 3), 不同氮肥管理之间没有显著差

异. 氮肥恢复效率 (RE_N) 和氮肥农学效率 (AE_N) 与施氮量呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.82 和 -0.98 ($n = 5, \alpha_{0.05} = 0.8114$). 其中, 农户施肥处理最低, RE_N 和 AE_N 分别为 38.0% 和 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 按需施肥处理最高, RE_N 和 AE_N 分别为 52.5% 和 $10.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比常规农户施肥处理分别提高了 38% 和 44%, 差异达极显著水平. 缓控释肥处理的 RE_N 和 AE_N 比常规农户处理也分别提高 14.5% 和 31.8%. 在等氮肥投入下, 有机无机配施处理的 AE_N 略高于纯化肥处理, RE_N 却低于纯化肥处理, 这可能是因为有有机肥效不能全部在当季释放导致水稻氮吸收相对偏低的缘故.

表 2 不同氮肥管理模式下的水稻产量及其构成¹⁾

Table 2 Rice yield and yield components under different

处理	nitrogen management treatments					
	N0	SSNM	RN	FN	OCN	CRN
亩穗数/万	18.0c	22.3ab	20.8b	23.4a	22.1ab	22.6ab
穗粒数	114b	123ab	133ab	143a	140a	121ab
结实率/%	97.6a	92.3cd	93.0b	91.3d	92.1cd	94.5b
千粒重/g	26.7a	21.7b	22.9b	21.8b	22.3b	22.8b
产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	7132b	8790a	8934a	9162a	8997a	8914a

1) 同一行内不同字母代表在 0.05 统计水平上差异显著, 下同

表 3 不同氮肥管理模式下的水稻氮吸收、氮肥农学效率和氮肥恢复效率

Table 3 Plant nitrogen uptake, agronomy efficiency and recovery efficiency of nitrogen under different nitrogen management treatments

处理	N0	SSNM	RN	FN	OCN	CRN
水稻氮吸收/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	112.9b	193.3a	211.7a	215.5a	197.0a	191.2a
氮肥恢复效率/%		52.5a	47.1a	38.0b	37.2b	43.5ab
氮肥农学效率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$		10.9a	8.6ab	7.5b	8.9ab	9.9a

2.3 稻季氮的环境排放量

稻季氮的环境排放量主要包括径流输出、渗漏输出以及气体排放. 整个稻季除了烤田期进行了排水外, 在 8 月 18、19 和 20 日分别有少量排水, 整个稻季总排水量为 $5\,580 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. 整个稻季径流损失的总氮负荷见表 4. 可以看出无氮处理最低, 其次是 SSNM 和化肥减量处理 CN, 分别比农户施肥处理 ($8.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 减少了 18.7% 和 15.1%, 减排量略低于张刚等^[18] 2007 年的结果. 缓控释肥处理的总氮径流排放量最高, 为 $9.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机无机配施处理与常规农户处理相差不多, 为 $8.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 和前人研究结果不一致^[21]. 这主要是因为本研究中在施肥初期没有径流发生, 径流排水主要发生在烤田

期间(分蘖肥施后 8 d 开始烤田),此时纯化肥处理的田面水浓度已降至一个较低浓度,而有机无机配施处理以及缓控释肥处理因为其肥效缓慢释放而田面水浓度相对较高(图 1).

表 4 不同氮肥管理模式下的氮素环境排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 4 N export to environment under different N management treatments/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$						
氮肥管理模式	氮用量	径流损失	渗漏损失	氨挥发	N_2O	环境排放总量
农户施肥	270	9.2	6.7	67.5	2.8	85.8
化肥减量施肥	210	7.5	4.5	52.5	2.3	66.8
有机无机配施	210	8.5	6.1	46.2	2.3	63.0
新型肥料处理	180	9.3	5.6	23.4	2.1	40.4
叶色按需施肥	153	6.8	4.1	33.3	1.9	46.4
无氮处理	0	5.1	3.6	10.5	0.8	20.0

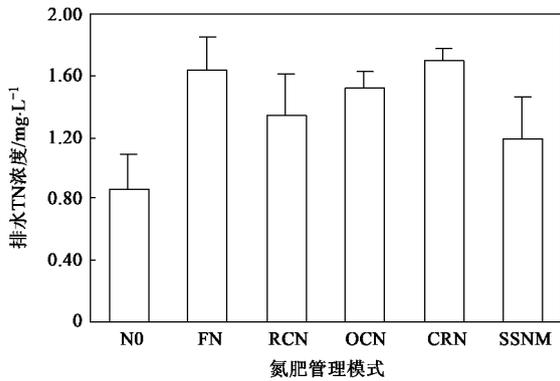


图 1 不同氮肥管理模式烤田时的排水总氮浓度

Fig.1 Total nitrogen concentration in drainage water

渗漏损失与施氮量呈显著正相关($r=0.81$),渗漏损失量约占总施氮量的 2.1%~3.2%,与前人研究结果相近^[4,22].与农户常规施肥处理相比,有机无机配施处理、减量施肥处理、按需施肥处理和缓控释肥处理分别减少渗漏损失 8.9%、32.3%、39.0%和 16.7%,与前人研究结果类似^[15,23].在等氮量施肥条件下,有机无机配施的渗漏损失要高于同等氮量的纯化肥处理(表 4),和邱卫国等^[14]的研究结果相反,具体原因还有待于进一步分析.

稻季氮素环境排放总量与施氮量之间呈显著正相关($r=0.93$),约占总施氮量的 20%~30%左右.其中氨挥发占总排放量的 50%~80%左右,径流占 10%~25%,渗漏占 6%~18%, N_2O 排放占 3%~5%.不同氮肥管理模式的氮环境排放量存在显著差异,农户施肥处理的氮排放量最高,为 $86.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 4);缓控释肥处理的环境排放量最低,为 $40.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 4),比常规农户施肥处理减少

52.8%,这主要是因为缓控释肥处理显著抑制了氨挥发^[12,15].按需施肥处理和有机无机配施处理也分别减排 45.4%和 26.4%.这与 Ju 等^[24]对太湖地区稻麦轮作系统多年的数据分析结果一致,即优化氮肥处理比农户施肥处理节省氮肥 30%~60%,氮环境排放量减少一半左右.相等氮量投入下($210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),有机无机配施比纯化肥处理减少环境排放量 5%左右.不施氮肥处理的环境排放量仅为 $20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右(表 4),比农户常规对照施肥减排 76.6%.

2.4 稻田对周围水体的净化能力

由于该区灌溉水源主要来源于周围的河道,而周围河道污染比较严重,水质在 V 类左右.监测数据表明,灌溉水的总氮平均浓度为 $2.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过灌溉进入稻田的总氮量高达 $19.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 4).而稻季通过径流和渗漏损失的氮量在 $8.8\sim 16.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,要低于灌溉和降雨输入的氮,因此,稻田对水体养分存在着一定的净化作用.这与谢迎新等^[25]的研究结果一致,符合曹志洪等^[22]认为的“太湖平原稻田是水循环中氮素的汇”的观点.

2.5 稻田生态系统的氮素平衡特征

由于干湿沉降、灌溉及秧苗带入的氮总量约为 $38.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中干湿沉降为 $16.13\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,灌溉带入的氮计 $19.11\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,秧苗带入的氮计 $3.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.稻田稻季生物固氮量以 $26.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计^[26],则稻田稻季总氮输入为 $65\sim 335\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.总体氮素平衡来看(图 2),农户施肥处理氮盈余现象最明显,盈余量达 $33.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次是有机无机配施处理,盈余量为 $19.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,缓控释肥处理也存在着轻微的盈余现象(12.3

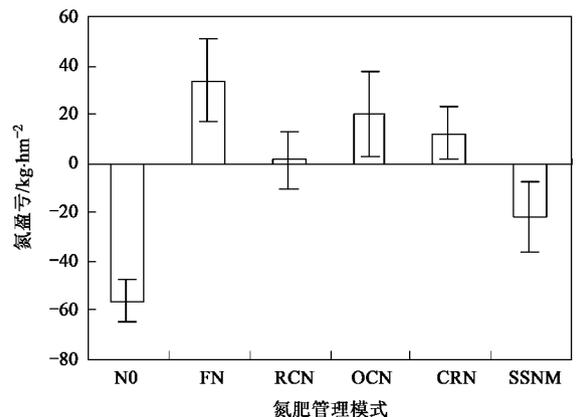


图 2 不同氮肥管理模式下的稻田氮盈亏

Fig.2 Nitrogen deficit of paddy rice under different nitrogen management treatments

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 化肥优化减量处理氮素基本平衡, 按需施肥处理则出现氮亏缺现象, 亏缺量为 $21.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 氮盈余表明稻季结束后将有多余的氮留存于土壤中, 使土壤肥力提高, 从而增大冬季氮素淋洗的风险. 按需施肥处理则能适当降低稻季结束后土壤的氮素水平, 从而减少冬季氮素淋洗的风险. 由于土壤基础地力本身较高, 适当地降低土壤肥力并不会影响到水稻土肥力的可持续性.

2.6 成本效益分析

表 5 给出了不同氮肥处理的成本效益分析, 可以看出, 新型缓控释肥(包膜尿素)虽然比常规尿素价高 20% 左右, 但肥料总用量降低, 而且少施一次肥, 节约了用工成本, 因此相对净收益(没计算农药、整地插秧和收割费用, 因为各处理成本相同)比常规农户施肥模式略高. 而化肥减量处理、按需施肥处理与常规农户处理净收益也仅仅相差 $87 \sim 102 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$. 有机无机配施处理因有机肥价格相对较高, 产量优势并不明显, 因此, 净收益要低于常规农户处理. 无氮处理的相对净收益高达 $10\ 674 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 为常规农户施肥处理净收益的 93.2%.

表 5 不同氮肥处理的成本效益分析/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 5 Cost-benefit analysis of different N management treatments/ $\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理	NO	FN	RN	OCN	CRN	SSNM
肥料成本	690	1 867.5	1 605	2 404.5	1 629	1 357.5
人工成本	450	1 350	1 350	1 350	900	1 350
产量收益	11 814	14 667	14 302.5	14 401.5	14 269.5	14 070
相对净收益	10 674	11 449.5	11 347.5	10 647	11 740.5	11 362.5

3 结论

(1) 当前太湖流域稻田施氮量减少 20% ~ 40%, 不会对稻谷产量造成明显影响, 氮肥利用率明显增加(可提高 14.5% ~ 44%), 氮的环境排放量减少 22.6% ~ 52.8%.

(2) 不同氮肥管理模式中, 缓控释肥处理最为环保, 其次是按需施肥处理, 农户施肥处理环境排放量则最高. 在等氮量投入下, 有机无机配施比纯化肥处理能减少环境氮排放量.

(3) 结合成本效益分析, 缓控释肥处理和按需施肥处理能在不降低产量和效益的情况下, 提高氮肥利用率, 减少环境排放量, 是值得在太湖流域推广的高效环保氮肥管理模式.

(4) 在当前河道污染严重的情况下, 稻田作为一种特殊的湿地, 具备净化周围水体的功能. 尤其是在目前水稻土养分水平已相对较高的地区, 短期不

施肥也可维持水稻较高的产量(常规产量的 78%), 并能显著减少氮的环境排放量(减排 76.6%), 其对环境的正面影响远远大于产量损失的负面影响.

参考文献:

- [1] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. 农业环境与发展, 2009, (3): 10-15.
- [2] Dobermann A, Cassman K G. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia [J]. Plant and Soil, 2002, 247: 153-175.
- [3] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, 20: 29-30.
- [4] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu lake region, China [J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 445-456.
- [5] 朱兆良. 农田中氮肥的损失和对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [6] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 39-47.
- [7] Jin S K, Seung Y O, Kwang Y O. Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1-2): 128-139.
- [8] Zhang Q L, Chen Y X, Jilani G, et al. Model AVSWAT apropos of simulating non-point source pollution in Taihu lake basin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 824-830.
- [9] 朱兆良, 范晓晖, 孙永红, 等. 太湖地区水稻土稻季氮素循环及其环境效应[J]. 作物研究, 2004, (4): 187-191.
- [10] Constantin J, Mary B, Laurent F, et al. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 135: 268-278.
- [11] 李慧琳, 韩勇, 蔡祖聪. 运用 Jayaweera-Mikkelsen 模型对太湖地区水稻田稻季氮挥发的模拟[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1045-1052.
- [12] Wang X Z, Zhu J G, Gao R, et al. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu lake region [J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 62-69.
- [13] Wang G H, Zhang Q C, Witt C, et al. Opportunities for yield increases and environmental benefits through site-specific nutrient management in rice systems of Zhejiang province, China [J]. Agricultural Systems, 2007, 94(3): 801-806.
- [14] 邱卫国, 唐浩, 王超. 稻作期氮素渗漏流失特性及控制对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(sup): 99-103.
- [15] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137-142.
- [16] 邹建文, 秦艳梅, 刘树伟. 不同水分管理方式下水稻生长季 N_2O 排放量估算: 模型建立[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 313-321.
- [17] 邹建文, 刘树伟, 秦艳梅, 等. 不同水分管理方式下水稻生长

- 季 N_2O 排放量估算:模型验证和输入参数检验[J]. 环境科学, 2009, **30**(4):937-948.
- [18] 张刚,王德建,陈效民. 稻田化肥减量施用的环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(2):327-330.
- [19] 薛峰,颜廷梅,乔俊,等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(4):26-31, 51.
- [20] Xue L H, Yang L Z. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, **100**:524-534.
- [21] 鲁艳红,纪雄辉,郑圣先,等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(3):490-495.
- [22] 曹志洪,林先贵,杨林章,等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2):256-260.
- [23] 杜建军,毋永龙,田吉林,等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(2):49-52.
- [24] Ju X T, Xing G X, Chen X B, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010, **106**(9):3041-3046.
- [25] 谢迎新,熊正琴,赵旭,等. 富营养化河水灌溉对稻田土壤氮磷养分贡献的影响——以太湖地区黄泥土为例[J]. 生态学报, 2008, **28**(8):3618-3625.
- [26] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11):1884-1888.