

长期氮肥减量深施对双季稻产量和土壤肥力的影响

彭术^{1,2}, 王华², 张文钊^{1*}, 侯海军¹, 陈安磊¹, 魏文学¹, 万勇军³, 袁辉忠⁴

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所/亚热带农业生态过程重点实验室/中国科学院桃源农业生态试验站, 湖南长沙 410125; 2 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 3 桃源县农业技术推广中心木塘垅站, 湖南常德 415700; 4 桃源县农业技术推广中心三阳港镇站, 湖南常德 415700)

摘要:【目的】合理减少氮肥用量是解决我国当前稻田生态系统氮素损失量大、氮肥利用率低等问题的重要途径。然而, 长期减少氮肥投入能否维持水稻产量和稻田土壤肥力还不清楚。以我国南方典型红壤双季稻田为研究对象, 系统分析连续 7 年化肥深施结合不同氮肥用量措施下双季稻产量、氮肥偏生产力、根际土壤速效养分含量和土壤肥力的差异特征, 探讨长期氮肥减量的可行性, 为制定适宜的双季稻田氮肥管理措施提供科学依据。【方法】于 2012 年, 在中国科学院桃源农业生态试验站开始设置氮肥减量深施长期定位试验, 以常规施氮 (CF, 早、晚稻施氮量均为 $N\ 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 基追肥均为表层撒施) 为对照, 基于化肥深施, 设置 3 个氮肥水平 (N1, 减氮 30%; N2, 减氮 23%; N3, 减氮 16%)。每年早、晚稻收获计产, 并于 2018 年早、晚稻分蘖期、拔节期和成熟期采集水稻根际土壤, 测定土壤无机氮、有效磷和速效钾含量, 同时测定晚稻成熟期根际土壤 pH、有机碳和全量养分含量, 研究长期氮肥减量深施对双季稻产量和稻田土壤肥力的影响。【结果】与 CF 处理相比, 深施条件下, 减氮 16%~30% 处理早、晚稻分蘖期根际土壤无机氮和速效钾含量无显著变化, 但减氮 23% 和 30% 处理早稻分蘖期根际土壤有效磷含量显著降低; 拔节期和成熟期根际土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量分别提高了 4.26%~109.00% 和 2.56%~65.50%, 有效磷和速效钾含量分别提高了 3.10%~32.60% 和 5.94%~42.40%, 保证了双季稻生育中后期氮磷钾养分的稳定供应。在化肥深施基础上, 连续 7 年减少 16%~30% 氮肥用量提高了氮肥偏生产力, 早晚稻增产 4.37%~32.70%, 并维持土壤有机质和全量养分含量的稳定。【结论】结合化肥深施, 在常规氮肥用量 ($150\ \text{kg}/\text{hm}^2$) 基础上减少 30% 氮肥投入, 双季稻根际土壤速效养分含量不会降低, 甚至高于撒施。因此, 长期减施氮肥结合深施可以维持双季稻的产量和稻田土壤肥力的稳定, 显著提高氮肥偏生产力。

关键词: 水稻; 深施; 氮肥减量; 氮肥偏生产力; 根际土壤; 稻田肥力

Effect of long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on rice yield and soil fertility in a double rice cropping system

PENG Shu^{1,2}, WANG Hua², ZHANG Wen-zhao^{1*}, HOU Hai-jun¹, CHEN An-lei¹, WEI Wen-xue¹,
WAN Yong-jun³, YUAN Hui-zhong⁴

(1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region/Taoyuan Agro-Ecology Research Station of Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3 Mutangyuan Station, Agricultural Technology Promotion Center of Taoyuan Country, Changde, Hunan 415700, China; 4 Sanyanggang Station, Agricultural Technology Promotion Center of Taoyuan Country, Changde, Hunan 415700, China)

Abstract: 【Objectives】 Appropriate reduction of nitrogen fertilization is an important way to deal with serious nitrogen loss and low fertilizer-nitrogen use efficiency in paddy field ecosystem in China, but it is not clear whether and how much of long-term reduction of nitrogen fertilization could maintain rice yield and soil fertility.

收稿日期: 2019-10-11 接受日期: 2020-04-09

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFD0200307, 2017YFD0301504, 2018YFC0213302); 中央引导地方科技发展专项 (2017CT5010)。

联系方式: 彭术 E-mail: 652625488@qq.com; * 通信作者 张文钊 E-mail: wzzh@isa.ac.cn

In this study, we analyzed the yearly variation of double-cropping rice yield, partial factor productivity of nitrogen fertilizer, nutrient contents in rhizosphere soil and soil fertility to discuss the feasibility of long-term nitrogen fertilizer reduction and then provide scientific basis for appropriate nitrogen fertilizer management in a double cropping rice system. **【 Methods 】** A long-term field experiment of reduction and deep placement of nitrogen fertilizer was conducted in Taoyuan Agro-Ecology Research Station of Chinese Academy of Sciences since 2012. The conventional fertilization was used as control (CF, N 150 kg/hm² in both early and late rice season, using surface broadcast method for the basal and tillering fertilizer), three reduced N application treatments (reducing 30%, 23%, and 16% of the CF, respectively) were setup and most nitrogen fertilizers were made into a ball and dropped into 7 cm deep beside rice root. Grain yields of early and late rice were recorded every year, and the rhizosphere soil was sampled during rice growing stages for measuring organic matter and total and available nutrient contents. **【 Results 】** Compared with CF, reducing 16%–30% of total N input had no significant effect on the contents of inorganic N and readily available K, but reducing 23% and 30% of total N input significantly decreased available P in rhizosphere soil in the tillering stage of early rice. The NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents in rhizosphere soil in the jointing and maturity stages of double cropping rice were increased by 4.26%–109.00% and 2.56%–65.50%, respectively, and the available P and K contents by 3.10%–32.60% and 5.94%–42.40%, respectively, so the supply of NPK nutrition during the two stages of rice growing were stable under the three N-reducing treatments. Based on deep placement of chemical fertilizers, that reduction of nitrogen fertilizer rate with 16%–30% for continuous seven years enhanced partial factor productivity of applied nitrogen, and increased the yields of early and late rice by 4.37%–32.70%, and maintained the stability of soil organic matter and total N, P and K contents. **【 Conclusions 】** Combined with deep placement, the available nutrient contents in the rhizosphere soil of double rice are higher under reduced N input condition than those under high input but with broadcasting application method. So, continuously reducing 30% of current N fertilizer input will still be able to maintain rice yield and soil fertility of double cropping paddy field in the long run, and increase the partial productivity of nitrogen fertilizers.

Key words: rice; deep placement; reduction of nitrogen fertilizer rate; partial factor productivity of nitrogen; rhizosphere soil; paddy field fertility

水稻是我国主要粮食作物之一，常年种植面积在 3000 万 hm² 左右，稻谷产量占我国粮食总产量的 1/3 以上^[1]，其生产状况直接影响到国家的粮食安全。施用氮肥是实现水稻高产稳产的重要途径。为获取较高的水稻产量，农民常常过量施用氮肥。大量氮肥投入不仅导致氮肥利用效率下降，还会造成土壤质量退化、农业面源污染加重、温室气体排放加剧等一系列生态环境问题^[2-5]。因此，合理减少氮肥投入对于维持稻田生态系统可持续发展具有重要意义。

前人研究结果表明，适当减少氮肥用量可有效降低氮肥损失、提高氮肥利用率和维持水稻产量稳定^[6-9]。例如，Qiao 等^[7]在太湖流域的稻麦轮作试验结果表明，减少 10%~50% 氮肥用量均可维持水稻产量稳定和提高氮肥利用率，过量施氮则显著降低氮肥利用率。还有研究指出，与常规施氮相比，减少 30% 氮肥用量不仅可以确保水稻产量稳定，还可显著降低肥料氮的气态损失^[6]。然而，关于氮肥减施维

持作物高产和提高氮肥效率等方面的研究大多来自 1~3 年的短期田间试验结果，由于部分地区稻田较高的养分供应水平以及大气沉降、灌溉等形式的氮素投入可能会掩盖氮肥减量造成的产量和土壤氮库下降，长期减施氮肥能否维持水稻产量稳定还需要进一步验证。土壤背景氮是土壤肥力的一个重要参数，长期施用大量氮肥和有机肥料导致我国稻田土壤背景氮普遍偏高^[10]。在土壤背景氮较高的情况下，适当降低氮肥用量不仅不会减产，甚至还有可能增产^[11]。这可能也是目前多数研究指出减少氮肥用量仍能保证作物高产和兼顾环境友好的重要原因。有研究指出，减少氮肥用量可明显降低农田土壤中氮素残留量^[12]。据此，我们推测若长期减少氮肥用量可能会导致土壤肥力尤其是土壤氮库的下降，但有关这方面的研究还未见报道。

目前，表面撒施和分次追肥仍是我国水稻生产中普遍采用的施肥方式。这种施肥方式常导致施入

稻田的氮肥通过地表径流、氨挥发或反硝化等途径大量损失^[3,13-14]。与传统的表面撒施相比, 氮肥深施则可显著提高氮肥利用效率和降低氮肥损失, 被认为是提高稻田氮肥利用率的最有效途径^[15-16]。氮肥深施是否可以改善氮肥减量对水稻产量和稻田土壤肥力的影响还少见报道。本研究主要依托于 2012 年建立的氮肥减量深施定位试验, 调查分析了连续多年氮肥减量结合深施下双季稻产量和土壤肥力的变化, 探明长期减少氮肥用量的可行性, 为合理制定双季稻田氮肥管理措施提供科学依据和数据支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验地位于湖南省桃源县漳江镇中国科学院桃源农业生态试验站(111°26'E、28°55'N), 属武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带。年均气温 16.5℃, 年均降水量 1440 mm, 日照时数 1520 h。土壤类型为第四纪红色黏土发育的水稻土。氮肥减量深施定位试验始于 2012 年, 试验开始时耕层(0—20 cm)土壤基本化学性质为: 全氮 2.29 g/kg、全磷 0.73 g/kg、全钾 10.9 g/kg、有机碳 21.3 g/kg、pH 4.84。

1.2 试验设计

采用随机区组设计, 设置 4 个处理: 常规施氮(150 kg/hm², CF)、减氮 30%+深施(N1)、减氮 23%+深施(N2)、减氮 16%+深施(N3)。每个处理 3 次重复, 小区面积为 48 m²(6 m×8 m), 水稻种植密度为 20 cm×20 cm。供试氮磷钾肥分别为硫酸铵、磷酸二氢铵和氯化钾。各处理磷钾肥用量一致。常规施氮处理早、晚稻氮肥(纯 N)用量均为 150 kg/hm², 分次施用, 按基肥: 分蘖肥 4: 6 施用; 磷肥用量早稻为 P₂O₅ 90 kg/hm², 晚稻为 P₂O₅ 30 kg/hm²; 钾肥用量均为 K₂O 90 kg/hm², 磷、钾肥均作为基肥一次施用, 施用方式均为撒施。减氮深施处理的早稻施氮量与晚稻相同。N1、N2 和 N3 处理的早、晚稻施氮(纯 N)量分别为 105.0、115.5 和 126.0 kg/hm², 其氮磷钾肥均作为基肥分别在插秧前 1 天和插秧后当天施入。早稻插秧前施入的化肥为氮肥和磷肥, 其用量分别为 N 30 kg/hm² 和 P₂O₅ 45 kg/hm²。晚稻插秧前施入的化肥为氮肥, 其用量为 N 30 kg/hm²。其余氮肥均制作成肥球, 在水稻移栽后隔行人工点状深施(图 1), 施肥深度为 7 cm 左右。肥球制作过程如下: 先将确定施肥量的氮、磷和钾肥充分混匀, 再加入过 2~3 mm 筛的红色粘土, 肥料与粘土的比例为

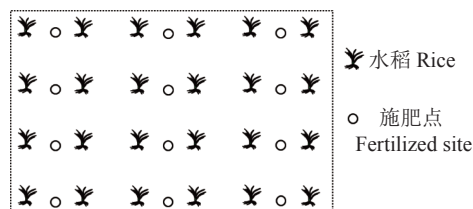


图 1 化肥深施点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deep application site of chemical fertilizers

2: 1, 充分混匀为混合肥料, 喷水至混合肥料用手可以捏成团为止, 放置 10~15 min 后用手捏成直径为 1~1.5 cm 的肥球, 放入到烘箱中 30℃ 烘干即可。稻田田间管理采用当地常规管理方式, 早、晚稻生育期间田间保持 5 cm 左右水层, 早、晚稻均在蜡熟期排水。早、晚稻收获后水稻秸秆全部移出稻田, 各处理田间管理一致。

1.3 土壤样品采集与测定

分别于 2018 年早、晚稻分蘖期(追肥后 10 天)、拔节期和成熟期采集土壤样品。每次采集样品时各小区随机选取 3 穴水稻, 采用抖落法^[17]采集水稻根际土壤样品, 带回实验室用于测定铵态氮、硝态氮、有效磷和速效钾含量。另外, 成熟期部分土壤样品自然风干后用于土壤 pH、有机质和全量养分含量测定。土壤常规理化指标分析参考《土壤农业化学分析方法》^[18]。

1.4 植株样品分析与水稻测产

在早、晚稻成熟期, 随机选取 3 穴水稻植株样, 植株鲜样于 105℃ 下杀青 30 min, 然后在 70℃ 下烘干至恒重, 称重。称重后的植株样品粉碎过筛后用于全氮含量的测定, 测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[18]。另在早、晚稻成熟期各小区采取单打单晒, 实收测产。

1.5 数据分析

水稻产量变异系数(%) = 年际间水稻产量标准误差/水稻产量平均值 × 100

氮肥偏生产力(kg/kg) = 施氮区产量/施氮量

氮素表观平衡(kg/hm²) = 施氮量 - 水稻植株地上部吸氮量

采用 Microsoft Excel 2016 处理分析数据, 采用 Origin 8.0 软件进行绘图, 应用 IBM SPSS Statistic 20 软件进行方差分析(ANOVA), 差异显著性水平采用最小显著差异法(LSD)进行检验。所有数据均采用 3 次重复平均值。

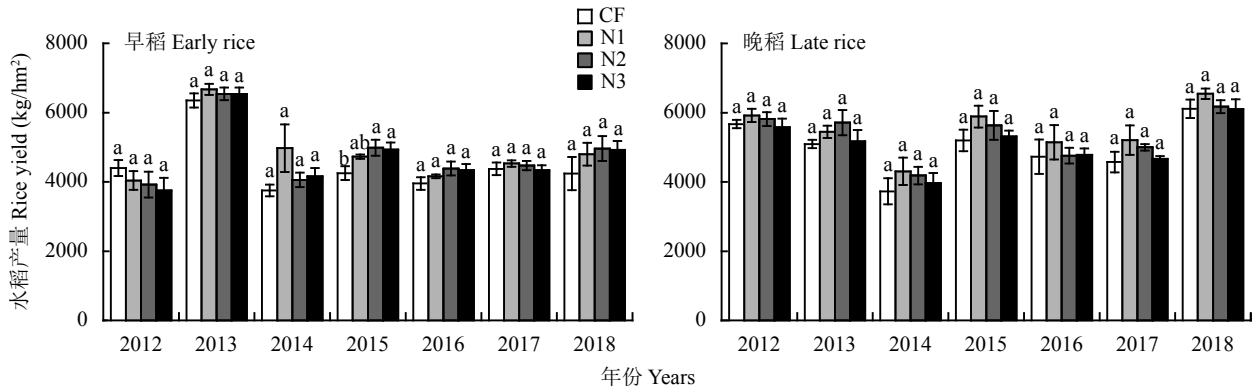


图 2 2012—2018 年氮肥减量深施处理早稻和晚稻产量

Fig. 2 Grain yield of early and late rice under long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer during 2012–2018

[注 (Note): CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 柱上不同小写字母表示同一年处理间产量差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).]

2 结果与分析

2.1 长期氮肥减量深施对双季稻产量及氮肥偏生产力的影响

图 2 显示, 连续 7 年进行氮肥减量深施, 与常规施氮 (CF) 相比, 减氮 16% (N3)、23% (N2) 和 30% (N1), 除 2012 年早稻和晚稻的 N3 处理和 2017 年 N3 处理的早稻产量略有降低外, 其它年份早、晚稻产量均有不同程度增加, 增产幅度为 4.37%~32.70%。2015 年 N2 和 N3 处理的早稻产量显著高于 CF ($P < 0.05$)。N1、N2 和 N3 之间早、晚稻产量差异都不显著。

由表 1 可见, 3 个氮肥减量处理的水稻产量变异系数与对照 CF 没有显著差异, 但除 N3 处理早稻外显著提高了早稻和晚稻季的氮肥偏生产力 ($P <$

0.05)。早稻、晚稻氮肥偏生产力均以 N1 处理最高, 比 CF 分别提高了 54.6%、56.5%, N1 与 N2 处理差异不显著, 但 N1 显著高于 N3 和 CF 处理; 其次为 N2 处理, 与 CF 相比, 早晚稻氮肥偏生产力分别提高了 38.2%、37.9%, 与 N3 差异不显著, 但显著高于 CF; N3 处理的早晚稻氮肥偏生产力与 CF 处理相比, 分别提高了 25.4% 和 20.7%。

2.2 长期氮肥减量深施对双季稻根际土壤速效养分含量的影响

2.2.1 无机氮 早、晚稻季根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随水稻生育期推进均表现为“低-高-低”的变化趋势 (图 3)。在早稻季分蘖期、拔节期和成熟期, 氮肥减量深施处理的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均高于 CF 处理, 提高幅度为 4.26%~50.70%, 但差异不显著。在晚稻季拔节期, N3 处理的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显

表 1 长期氮肥减量深施处理双季稻产量变异系数和氮肥偏生产力

Table 1 Coefficient of variation of yield and partial factor productivity of applied N under long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer

处理 Treatment	产量变异系数 Variable coefficient of yield (%)		氮肥偏生产力 Partial factor productivity of applied N (kg/kg)	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CF	20.6 a	16.5 a	29.8 c	33.4 c
N1	20.5 a	14.1 a	45.7 a	52.3 a
N2	19.3 a	14.7 a	43.0 ab	46.1 ab
N3	19.9 a	14.3 a	39.0 bc	40.3 b

注 (Note): CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

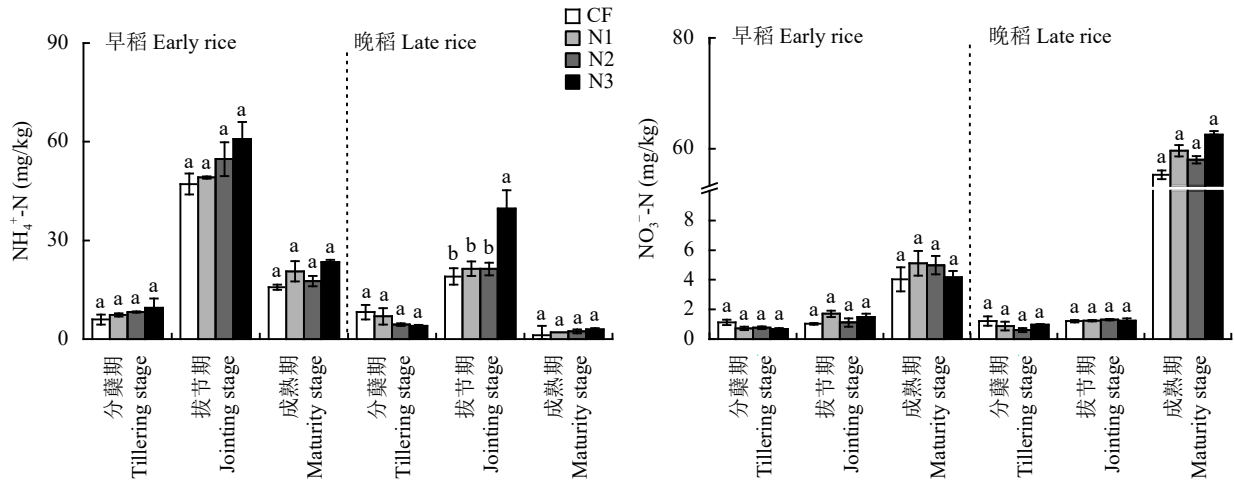


图3 长期氮肥减量深施对双季稻根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响

Fig. 3 Effects of long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on the contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in rhizosphere soil of double cropping rice

[注 (Note): CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 N 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 柱上不同小写字母代表同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments at the same growth stage ($P < 0.05$).]

著高于 CF 处理, 提高了 109.00%; N1 和 N2 处理的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 CF 处理的差异不显著, 但均高于 CF 处理。在晚稻季分蘖期和成熟期, 氮肥减量深施处理的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 CF 处理的差异不显著。除了晚稻季拔节期 N3 处理根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 N1 和 N2 处理外, 其余早、晚稻生育期各氮肥减量深施处理间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均无显著差异。

各处理早、晚稻根际土壤硝态氮含量均以收获期为最高, 分别为 3.48~5.11 和 53.0~63.8 mg/kg; 在早、晚稻分蘖期和拔节期硝态氮含量基本在 1 mg/kg 左右 (图 3)。在早、晚稻季分蘖期, 氮肥减量深施处理根际土壤硝态氮含量略低于 CF 处理, 但差异不显著。在早、晚稻季拔节和成熟期, 氮肥减量深施处理提高了根际土壤硝态氮含量, 分别比 CF 处理提高了 3.47%~65.5% 和 2.56%~18.30%, 但与 CF 处理的差异不显著。各氮肥减量深施处理间硝态氮含量无显著差异。

2.2.2 有效磷和速效钾 早、晚稻季各处理不同生育期根际土壤有效磷含量变化范围为 18.0~36.2 mg/kg (图 4)。早稻季根际土壤有效磷含量随生育期呈先增加后降低的趋势, 晚稻季根际土壤有效磷含量从分蘖期到拔节期表现为增加, 而后到收获期则无明显变化。在早、晚稻季分蘖期氮肥减量深施处理根际土壤有效磷含量明显低于 CF 处理, 其中在早稻季 N1 和 N2 处理的有效磷含量与 CF 处理的差异

达到了显著水平 ($P < 0.05$)。在早、晚稻季拔节期和成熟期氮肥减量深施处理提高了根际土壤有效磷含量, 分别比 CF 处理提高 3.10%~23.5% 和 9.67%~32.6%, 但与 CF 处理的差异未达到 0.05 显著水平。

图 4 显示, 早、晚稻季各处理根际土壤速效钾含量总体上从分蘖期到成熟期呈逐渐降低趋势, 变化范围为 34.7~67.7 mg/kg。在早稻季分蘖期, 与 CF 处理相比, 氮肥减量深施处理的根际土壤速效钾含量相对较低, 但差异未达到 0.05 显著水平。在晚稻季分蘖期, N2 处理的根际土壤速效钾含量低于 CF 处理, 而 N1 和 N3 处理的根际土壤速效钾含量略高于 CF 处理, 但各处理间差异不显著。在早、晚稻的拔节期和成熟期, 与 CF 处理相比, 各氮肥减量深施处理分别提高了 21.90%~42.40% 和 5.94%~31.10%, 但差异未达到 0.05 显著水平。

2.3 长期氮肥减量深施对双季稻田氮素表观平衡和土壤基础肥力的影响

本研究仅考虑肥料投入和作物带走两部分养分的简单平衡, 对长期氮肥减量深施下双季稻田土壤氮素平衡进行了估算 (表 2)。结果表明, 早稻和晚稻季氮素的表观平衡量对照处理均显著高于减氮深施处理, 即对照比减氮深施处理显著增加了氮素的剩余。而早稻、晚稻季以及年度氮素表观平衡量, 3 个减氮深施处理之间差异均未达显著水平, 即氮肥减量深施处理间的氮素盈余量无显著差异。值得注意

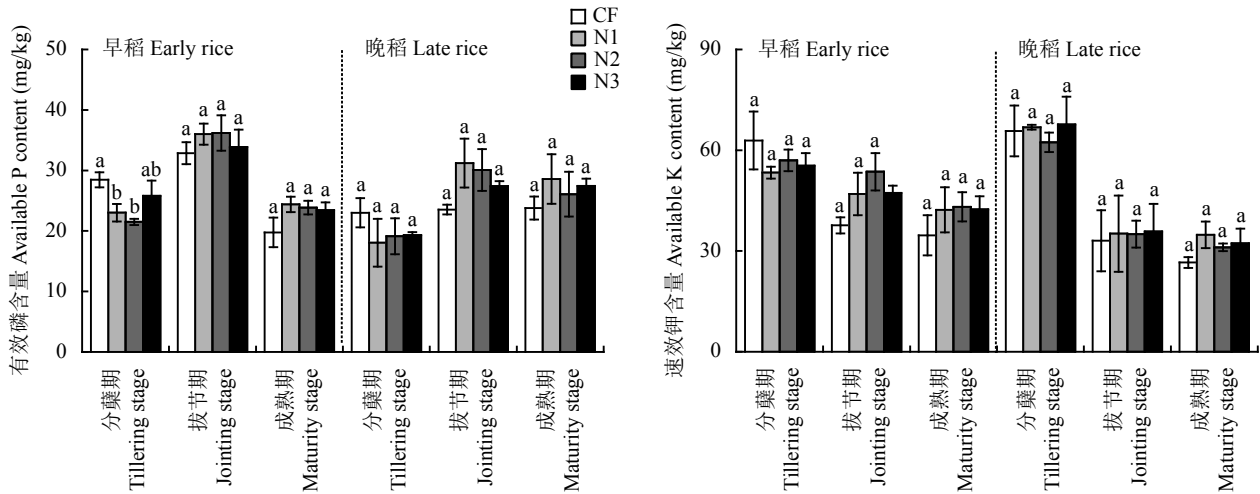


图 4 长期氮肥减量深施对双季稻根际土壤有效磷和速效钾含量的影响

Fig. 4 Effects of long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on the contents of available phosphorus and potassium in rhizosphere soil of double cropping rice

[注 (Note) : CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 N 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 柱上不同小写字母代表同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments at the same growth stage ($P < 0.05$).]

表 2 长期氮肥减量深施处理双季稻田氮素的表观平衡 (kg/hm²)

Table 2 Apparent balance of soil nitrogen in double cropping rice field under long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer

处理 Treatment	早稻季 Early rice season			晚稻季 Late rice season			年表观平衡 Annual apparent balance
	氮输入 N input	氮输出 N output	表观平衡 Apparent balance	氮输入 N input	氮输出 N output	表观平衡 Apparent balance	
CF	150.0	88.46 ± 5.26 a	61.54 a	150.0	114.3 ± 3.28 a	35.66 a	97.20 a
N1	105.0	82.79 ± 4.50 a	22.21 b	105.0	111.5 ± 5.06 a	-6.470 b	15.74 b
N2	115.5	85.29 ± 11.41 a	30.21 b	115.5	109.9 ± 9.16 a	5.560 b	35.77 b
N3	126.0	93.44 ± 9.07 a	32.56 b	126.0	119.0 ± 5.68 a	6.980 b	39.54 b

注 (Note) : CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 N 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 氮输入为施肥量, 输出为作物带走 The input and output of N indicate fertilizer amount and crop removal. 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 3 长期氮肥减量深施处理双季稻田土壤基础肥力

Table 3 Basic soil fertility of double cropping rice field under long-term reduction and deep placement of nitrogen fertilizer

处理 Treatment	有机质 (g/kg) Organic matter	pH	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K
CF	37.0 ± 0.16 a	4.56 ± 0.02 a	2.30 ± 0.05 a	0.75 ± 0.02 a	12.5 ± 0.17 a
N1	37.5 ± 1.33 a	4.59 ± 0.08 a	2.37 ± 0.06 a	0.77 ± 0.01 a	12.9 ± 0.14 a
N2	37.4 ± 0.19 a	4.57 ± 0.04 a	2.41 ± 0.01 a	0.78 ± 0.00 a	12.6 ± 0.14 a
N3	37.2 ± 0.59 a	4.53 ± 0.02 a	2.38 ± 0.06 a	0.76 ± 0.00 a	12.9 ± 0.34 a

注 (Note) : CF—表面撒施 N 150 kg/hm² Broadcasting N 150 kg/hm²; N1—深施 N 105 kg/hm² Deep applying N 105 kg/hm²; N2—深施 N 115.5 kg/hm² Deep applying N 115.5 kg/hm²; N3—深施 N 126 kg/hm² Deep applying N 126 kg/hm². 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

的是, 晚稻减氮 30% 的 N1 处理表观平衡量出现了负值。各处理晚稻季的氮素输出明显高于早稻季。

连续 7 年氮肥减量深施处理双季稻田土壤肥力结果 (表 3) 显示, 3 个氮肥减量深施处理之间及其与 CF 相比, 土壤 pH、有机质、全氮、全磷和全钾含量差异均不显著。

3 讨论

适当减少氮肥用量是解决我国农业生产中氮肥过量施用带来一系列生态环境问题的主要途径。多数研究指出, 合理减少氮肥投入可有效提高氮肥利用率, 减少氮肥损失和维持作物产量的稳定^[6-9]。本研究连续 7 年的试验结果也表明, 在施用 N 150 kg/hm² 的基础上早稻和晚稻分别减少 16%~30% 氮肥用量, 结合氮肥深施可以维持双季稻产量的稳定, 提高氮肥偏生产力。其原因主要是深施可以在水稻需肥关键期维持较高的根际无机氮含量 (图 3)。在本研究中, 早、晚稻分蘖期根际土壤 NH₄⁺-N 含量明显低于拔节期, 不同于常规施肥下的水稻生育期土壤无机氮动态变化的结果^[19-21]。分蘖期根系体积较小, 对氮素的绝对需求量不高, 因此, 分蘖期较低的根际无机氮含量对水稻后期生长和养分需求影响不明显。拔节期水稻根系活力增强, 体积加大, 对氮素的吸收强度和数量要求高, 之后的养分需求也十分旺盛, 各氮肥减量深施处理的根际 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量均高于常规施氮处理, 说明通过氮肥深施, 增强了化肥氮素对拔节期养分的供应能力。3 个不同比例的氮肥减施处理间, 根际土壤铵态氮和硝态氮含量没有显著差异, 这也是 3 个处理间产量没有显著差异的主要原因。除 2013 年外, 其余年份减少 30% 氮肥用量的晚稻增产效果好于减氮 16% 和 23% 的水稻。此外, 试验过程中我们也观察到, 减氮 16% 处理 (N3) 的晚稻在成熟期存在较为明显的贪青晚熟现象, 可能与其根际外土壤中的氮素较多, 对根际氮素的补充更快有关。依据土壤氮素表观平衡的研究结果 (表 2) 可知, 3 个减氮处理的早稻、晚稻当季氮素表观平衡量, 或者说氮素剩余量均显著低于常规施肥 (CF), 但是年度表观平衡均为正值 (剩余), 这也是连续多年减施氮肥土壤肥力和产量没有降低的重要原因。虽然 3 个减氮深施处理在水稻收获后的氮素当季剩余量和年度剩余量间差异不显著, 但是, 减氮 23% 和 16% 的 N2 和 N3 处理的剩余量几乎是 N3 (减氮 30%) 的一倍, 在水稻生长过程

中, 由于氮素在土壤中十分活跃, 不能排除 N2 和 N3 存在氮素供应过量的可能。

在深施条件下, 即使减少了 16%~23% 的氮肥用量, 仍存在氮肥过量施用问题, 说明氮肥深施可以较大程度的减少氮素损失, 使肥料氮存留在土壤中供水稻吸收利用^[22]。有研究指出, 在当地常规施氮基础上, 连续 2 年减少 20% 氮肥投入量可显著降低稻田土壤氮素残留量^[12]。与文献报道的直接减少氮肥用量不同, 本研究在减少氮肥施用的同时, 采用了化肥一次点状深施的施肥方式, 这种施肥方式已被证明是目前能够减少化肥损失和提高肥料利用率的最有效途径^[14-16]。另外, 巨晓棠^[23]研究指出, 在秸秆不还田情况下, 作物地上部吸氮量基本上可作为该作物一定目标产量的理论施氮量。本研究通过氮素表观平衡估算发现 N1 处理的氮盈余维持在 N 15 kg/hm² 左右, 基本上实现了施氮量约等于作物地上部吸氮量。这说明在本试验条件下, 在当地习惯施氮量的基础上减少 30% 氮肥用量是合理的, 既可以维持作物高产, 又能维持土壤氮素平衡, 还能最大限度降低环境污染风险。在本研究中, 常规施肥处理的氮盈余显著高于氮肥减量深施处理, 但其土壤全氮含量与氮肥减量深施处理无显著差异, 说明常规施肥存在氮肥过量施用问题, 氮素损失量也会随之增加^[24]。与本研究地点相同的另一田间试验结果显示, 常规施肥处理的早晚稻季氨挥发平均损失率分别达到了 23.6% 和 20.3%^[25]。结合前人在亚热带区关于红壤稻田 N₂O 排放、氮素地表径流损失和淋溶损失等方面的研究结果^[26-28], 可推算出该区域常规施肥情况下, 以氨挥发、N₂O 排放、地表径流和淋溶等途径损失的氮素约占施氮量的 25%~28%, 这还不包括反硝化过程中以 N₂ 形式损失的氮素。因此, 从氮素损失角度也可印证本研究在常规施肥基础上减少 30% 氮肥用量是合理的。当然, 这并未把氮肥点状深施的氮素损失率考虑在内。尽管多数研究已经证实氮肥深施可有效降低肥料氮经地表径流、氨挥发或硝化反硝化过程损失, 但在本试验条件下, 这种点状深施的施肥方式降低肥料氮素损失的程度究竟有多大, 以及土壤氮库的稳定是与深施氮肥的高残留量有直接关系, 还是与较高的作物产量带来根系高残留量有较大关系等还需要进一步验证。

4 结论

连续 7 年试验表明, 通过将传统的氮肥表面撒

施改为点状深施 (7 cm), 在常规氮肥用量 (150 kg/hm²) 基础上减施 16%~30%, 双季稻生育期根际土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、速效钾和有效磷含量没有显著变化, 可满足水稻对氮磷钾养分的需求, 并可显著降低土壤氮素当季和年度残余量, 保持正的氮素表现平衡, 不会对基本土壤肥力产生不良影响。综合考虑氮素偏生产力和产量及环境效应, 采用点状深施方法, 在常规氮肥用量 (150 kg/hm²) 基础上减施 30% 的氮肥用量效果最佳。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国国民经济和社会发展统计公报[DB/OL]. 2018, http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201902/t20190228_1651265.html. National Bureau of Statistics. China's statistical bulletin on national economic and social development[DB/OL]. 2018, http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201902/t20190228_1651265.html.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [3] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514: 486–489.
- [4] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, *et al.* Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 23–31.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106: 3041–3046.
- [6] Zhang X X, Yin S, Li Y S, *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 381–388.
- [7] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, *et al.* Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146: 103–112.
- [8] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, *et al.* Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49: 93–103.
- [9] Yan X Y, Ti C P, Vitousek P, *et al.* Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 095002.
- [10] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095–1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, *et al.* Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095–1103.
- [11] 刘立军, 徐伟, 唐成, 等. 土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005, 19(4): 343–349.
Liu L J, Xu W, Tang C, *et al.* Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer-N use efficiency in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(4): 343–349.
- [12] Zhang Q W, Yang Z L, Zhang H, *et al.* Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River basin[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 158: 118–126.
- [13] Shang Q Y, Gao C M, Yang X X, *et al.* Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 715–725.
- [14] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, *et al.* Urea deep placement for minimizing NH₃ loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 28: 254–266.
- [15] De Datta S K. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia[A] De Datta S K, Patrick Jr W H. Nitrogen economy of flooded rice soils[M]. Springer Netherlands, 1986. 171–186.
- [16] Liu X W, Wang H Y, Zhou J M, *et al.* Effect of nitrogen root zone fertilization on rice yield, uptake and utilization of macronutrient in lower reaches of Yangtze River, China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15: 625–638.
- [17] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (*Glycine max* L. Merr) root-soil interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33: 905–908.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Analytical method of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 等. 免耕条件下水稻产量及稻田无机氮供应特征[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1172–1181.
Wu J, Guo X S, Zhang X M, *et al.* Effects of no-tillage on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and rice yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1172–1181.
- [20] 谭亦杭, 沈健林, 蒋炳坤, 等. 秸秆还田与水分管理对双季水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(3): 511–519.
Tan Y H, Shen J L, Jiang B K, *et al.* The effects of straw incorporation and water management on nitrogen uptake and nitrogen use efficiency in a double rice cropping system[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(3): 511–519.
- [21] 苗艳芳, 吕静霞, 李生秀, 等. 铵态氮肥和硝态氮肥施入时期对小麦增产的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 91–96.
Miao Y F, Lü J X, Li S X, *et al.* Effects of applied time of ammonium and nitrate N on wheat yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 91–96.
- [22] 刘晓伟, 陈小琴, 王火焰, 等. 根区一次施肥提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 13–20.
Liu X W, Chen X Q, Wang H Y, *et al.* Effects and principle of root-zone one-time N fertilization on enhancing rice (*Oryza sativa* L.) N use efficiency[J]. *Soils*, 2017, 49(5): 13–20.
- [23] 巨晓棠. 理论施肥量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 249–261.
Ju X T. Improvement and validation of theoretical N rate-discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica*

- Sinica, 2015, 52(2): 249–261.
- [24] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281–296.
- Ju X T, Gu B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281–296.
- [25] 商庆银. 长期不同施肥制度下双季稻田土壤肥力与温室气体排放规律的研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2012.
- Shang Q Y. Studies on soil fertility and carbon sequestration and mitigation under long-term fertilization in Chinese double rice cropping systems[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2012.
- [26] 彭术, 张文钊, 侯海军, 等. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 153–160.
- Peng S, Zhang W Z, Hou H J, *et al.* Effects of reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on rice yield and N₂O emissions from double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 153–160.
- [27] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1626–1634.
- Zhu J, Ji X H, Tian F X, *et al.* Effects of straw-returning on double cropping rice yield and runoff loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11): 1626–1634.
- [28] 纪雄辉, 郑圣先, 石丽红, 等. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 663–671.
- Ji X H, Zheng S X, Shi L H, *et al.* Effects of fertilization on nutrient leaching loss from different paddy soils in Dongting Lake area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 663–671.