

长期施肥对红壤稻田氮储量的影响

陈安磊*, 谢小立, 文苑玉, 王卫, 童成立

(中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室, 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要: 稻田背景氮高是我国氮肥利用率低的主要原因之一, 减少氮肥施用量对提高氮肥的农学利用率和缓解环境压力具有重要的意义。研究采用长期定位试验(1990—2006年)土壤全氮、稻谷产量等数据, 分析施肥模式对稻田耕层土壤氮储量、氮肥农学利用率的影响, 探讨在降低常规施用氮量的33.3%而不明显减产措施的可行性。结果表明: 长期有机物质循环利用能显著提高耕层土壤全氮含量, 氮储量与试验前相比平均提高了18.8%, 仅施用化肥对土壤全氮含量没有显著影响, 减量施肥处理(JS)对耕层土壤氮的积累效应一直优于仅施化肥的处理(NP、NPK)。17a的JS处理并没有降低稻谷产量, 与常量NPK储量相比年际产量相对误差仅为3.2%, 而输入N的农学利用率提高了12%。在半量稻草还田的条件下减少氮肥的施用量到180 kg·hm⁻²是可行的, 红壤稻田产量可维持在10 t·hm⁻²左右。

关键词: 红壤稻田; 施肥模式; 表层土壤氮储量; 节氮可行性

Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil

CHEN Anlei*, XIE Xiaoli, WEN Wanyu, WANG Wei, TONG Chengli

Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

Abstract: High soil indigenous N supply of paddy soil is one of the major reasons of low fertilizer-N use efficiency. Reducing amount of N fertilizer annually can significantly improve fertilizer-N use efficiency and abate environmental stresses. In this study, by analyzing the data of soil total nitrogen and rice yield of long-term field experiment (from 1990 to 2006) in reddish paddy soil, the impact of different fertilizer regimes on soil N storage, N agronomic use efficiency (AUE) and the feasibility of reducing the amount of N fertilizer application by 33.3% were studied. Results showed that long-term cycling of organic matter (17 a) significantly increased soil total N storage in upper layer by 18.8%, while no obvious changes were detected from the plots only applying chemical fertilizers. In the treatment of chemical fertilizer reduction, the accumulation of soil nitrogen in plough layer was higher than that in NP and NPK treatments. Compared with NPK, chemical fertilizer reduction regime resulted in relative error of Grain yield of 3.2% and the increase of input-N AUE 12.0%. Therefore, the economical N fertilizer application under the recycling of half rice straw incorporation was 180 kg·hm⁻² while rice yield could maintain about 10 t·hm⁻².

Key Words: reddish paddy; fertilization systems; soil profile nitrogen storage; feasibility of reducing the amount of N fertilizer application

我国氮肥消费量占世界氮肥消费总量的30%, 而水稻氮肥施用量占世界水稻氮肥总消耗量的37%^[1-2]。氮肥的当季利用率低和过量施用氮肥是我国氮肥施用的两大问题^[1-2], 氮肥的不当施用已经造成了严重的环境问题。朱兆良对我国农田氮损失情况研究表明, 2002年农田化肥氮有2471万t通过损失进入环境, 对环境

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121106); 湖南省自然科学基金资助项目(08JJ3090); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-423, KZCX2-YW-Q1-07)

收稿日期: 2009-08-09; 修订日期: 2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: alchen@isa.ac.cn

质量有影响的各形态氮素总量约为其施用总量的 19.1%^[3]。到 2007 年我国 50% 的河流处于重污染, 60% 的湖泊富营养化^[3-4], 中国已成为全球 N 沉降的三大集中分布区之一^[5]。已有研究统计表明, 中国稻田无氮区对照水稻产量通常能达到 5—6 t·hm⁻² 甚至更高, 主要是由于我国的稻田背景氮高, 其主要原因是由于施用大量无机和有机肥料导致氮在稻田土壤积累所致^[2]; 另一个重要的原因可能是从环境中进入农田生态系统的氮量显著增加, 如富营养化的水体用作灌溉水给稻田带来大量的养分, 湿沉降向土壤输入的确态氮和铵态氮是补偿农田生态系统 N 素损失的重要途径之一^[6]。可见, 当前环境条件下减少农田氮肥的施用量是缓解氮肥污染的根本途径, 从环境中带入农田氮量的增加为减少氮肥施用量提供了可行性。研究表明, 在高氮背景下减少氮肥的施用量可以提高氮肥的利用效率^[1-2]。谢迎新利用室内回填土柱和植稻原状土模拟的方法研究了富营养化河水灌溉对稻田土壤氮磷养分贡献的影响, 认为在利用富营养化河水进行稻田土壤灌溉时, 可适量减少太湖地区稻田肥料施用量, 以起到节本增效的作用^[7]。但目前有关减施氮肥对稻谷产量和土壤氮储量的研究较少, 特别是依据定位试验进行长期观测研究的较少。本文利用布置于中国科学院桃源农业生态试验站内的“施肥制度长期定位试验”, 以施肥模式对红壤稻田土壤氮储量的影响为切入点, 结合不同施肥模式对稻谷产量和 N 肥利用效率的影响, 论证目前减施氮肥的可行性, 为红壤稻田氮肥合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土, 采自中国科学院桃源农业生态试验站施肥制度长期定位试验田。1990 年大田试验前土壤基本肥力性状为有机碳 15.4 g·kg⁻¹, 全氮 1.88 g·kg⁻¹, 土壤容重为 1.25 g·cm⁻³, pH 5.74。本研究共选用大田试验的 7 个处理: ①不施化肥, 收获物全部移出系统 (CK); ②不施化肥, 收获物中养分循环利用 (C) (收获物中养分循环利用简称“C”); ③施化肥 N, 收获物移出系统 (N); ④施 N、P 肥, 收获物移出系统 (NP); ⑤施 N、P、K 肥, 收获物移出系统 (NPK); ⑥在施化肥 N、P、K 的基础上, 收获物中养分循环利用 (NPK + C); ⑦2/3 N、P 肥 + 1/3 K 肥 + 1/2 秸秆还田 (JS)。试验完全随机区组排列, 每处理 3 次重复, 共 21 个小区。有“C”处理冬季种植紫云英 (*Astragalus sinicus* L.), 不施肥, 春耕时将紫云英翻压入泥作早稻基肥; 早晚稻秸秆全部直接还田; 生产稻谷的 50% (1994 年以前为 80%) 以及全部空秕谷粉碎后喂猪, 猪粪尿作为第 2 年的早稻基肥。

供试肥料为尿素 (N 45%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。1990—1996 年为 N 262.5 kg·hm⁻²、P 39.3 kg·hm⁻²、K 137.0 kg·hm⁻²; 1997—2006 年为 N 182.3 kg·hm⁻²、P 39.3 kg·hm⁻²、K 197.2 kg·hm⁻²。

1.2 测定项目及方法

土壤容重采用环刀法测定^[8], 测定时间为每年的 3 月份, 因整个冬季无人为干扰及采取排水处理使得土壤物理性质达相对稳定期, 减小土壤容重的测定误差。年际土壤容重数据见表 1。土壤有机碳、全氮和植物样品碳、氮含量测定采用常规测定方法^[9]。

1.3 表层土壤 N 储量估算方法

稻田耕层土壤氮储量估算参数有土壤容重、全氮含量和表层土壤厚度, 类似于森林土壤氮库的估计方法^[10]:

$$C_0 = 100 \times H_i \times B_i \times O_i \quad (1)$$

式中, C_0 为土壤氮储量 (kg·hm⁻²), H_i 为表层土壤统计厚度 (cm), B_i 为表层土壤的容重 (g·cm⁻³), O_i 为表层土壤全氮含量 (g·kg⁻¹)。

表 1 土壤容重

Table 1 Soil bulk density / (g·cm⁻³)

处理 Treatment	年份 Year				
	1994	1998	2002	2004	2006
CK	1.27	1.20	1.12	1.10	1.07
N	1.24	1.19	1.11	1.09	1.07
NP	1.23	1.12	1.10	1.09	1.06
NPK	1.17	1.13	1.06	1.05	1.02
C	1.12	1.10	0.93	0.95	0.93
NPK + C	1.09	1.06	0.98	1.00	0.89
JL	1.11	1.05	0.92	0.99	0.98

1.4 表层土壤统计厚度估算方法

计算方法可以简单地用下式表示:

$$Hi = Gi \times 10^{-5} / Di \quad (2)$$

式中, Hi 为各施肥处理表层土壤统计厚度 (cm); Gi 为 1990 年每公顷表层 (0—20 cm) 土壤重量 (kg); Di 为 2004 年和 2006 年各施肥处理土壤的平均容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 目的是减小土壤容重年际测定误差对估算值的影响, 提高估算精度。

$$\text{肥料农学利用率}^{[11]} (AUE) = (\text{施肥区产量} - \text{无肥区产量}) / \text{施肥量}$$

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS 6.12 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥土壤全氮的变化

从土壤全氮含量的动态变化趋势可以看出, 长期单施化肥和有机物质循环利用处理之间土壤全氮含量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1)。与试验前相比, 17 a 单施化肥 (N、NP 或 NPK) 或长期不施肥 (CK) 土壤全氮含量没有显著变化, 而长期有机物质的循环利用能显著提高土壤全氮含量 ($P < 0.05$), 平均提高幅度为 27.7%。与长期单施化肥处理 (N、NP 或 NPK) 和 CK 处理相比平均提高幅度为 25.0%。方差分析表明, 单施化肥约在 5 a 后土壤全氮含量出现显著降低现象, 之后含量逐渐提高, 处理 C 约在 13 a 后对土壤全氮的提高效应达到显著水平, 而处理 NPK + C 在 5 a 后就达到显著水平 ($P < 0.05$)。减量施肥处理 (JS) 对土壤全氮的积累效应也一直优于施用化肥处理 (NP 和 NPK), 17 a 平均高出 19.7%。

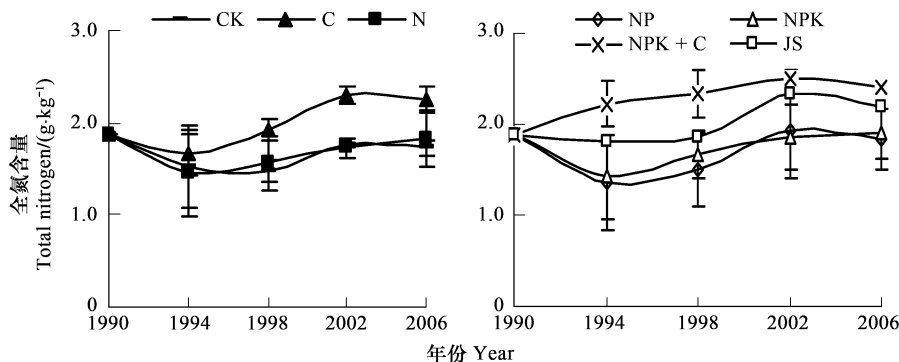


图 1 不同施肥土壤全氮含量

Fig. 1 Content of soil total nitrogen in different fertilization systems

研究表明, 在适宜施氮量下, 化肥氮几乎没有净残余, 而有机肥的长期连续施用可产生累计效应^[2]。土壤有机质是氮素存在的主要场所, 土壤表层中约有 80%—97% 的氮存在于有机质中^[12], 而有机物还田能显著提高土壤有机质含量^[13]。

本定位试验中, 土壤全氮年际变化与土壤有机碳含量的年际变化趋势相同, 有显著的正相关关系 (图 2), 土壤全氮含量产生差异的主要原因是有机物是否施用, 因此提高土壤有机碳的措施亦能有效的提高土壤全氮含量。根茬等自然还田的有机物和人工还田的有机物量较大是红壤稻田土壤能维持较高有机碳含量的主要原因^[13], 本定位试验中, 有机碳的自然归还量主要统计的是凋落物和根茬的自然归还量。统计结果表明, 即使不施任何肥料, CK 处理年际有机碳的归还量维持在 $1.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上 (表 2), 不断带入的有机态氮能有效弥补土壤氮通过矿化等途径的损失氮, 最终表现为 CK 处理 17 a 后土壤全氮含量并没有显著降低。仅施用化肥土壤全氮含量呈现先降低后升高的趋势, 17 a 后与实验前相比并没有显著差异 ($P < 0.05$), 也是由于水稻的根茬等生物量的增加 (促进生物固氮等) 所致, 而不是化肥氮残留的直接结果所致, 氮肥在红壤性水稻土中净残留量很少, 所以仅施用 N 肥对提高土壤全氮含量作用甚微。减量施肥处理 (JS) 虽然减少了化肥的投入, 但

有半量的稻草还田,对土壤全氮的积累作用优于仅施用化肥的处理。湖南省其它稻田长期定位监测试验研究也表明在氮素养分投入量基本一致的情况下,与仅施用化肥处理相比,低量和高量有机肥施用对提高土壤全含氮和有机质含量的作用更明显^[14]。

2.2 长期施肥对土壤氮储量的影响

由于土壤容重等指标的变化,土壤全氮含量不能准确地表征施肥措施对土壤氮素积累的作用,要研究不同施肥对土壤 N 的长期影响作用,有必要对土壤氮储量的变化进行比较分析。土壤氮库因土壤层次的不同而差异较大,特别是表层土壤氮库,因受施肥的影响最大而更能直接反映土壤氮库的变化特征。耕层厚度和土壤容重是研究土壤氮储量的重要参数,本研究表明,长

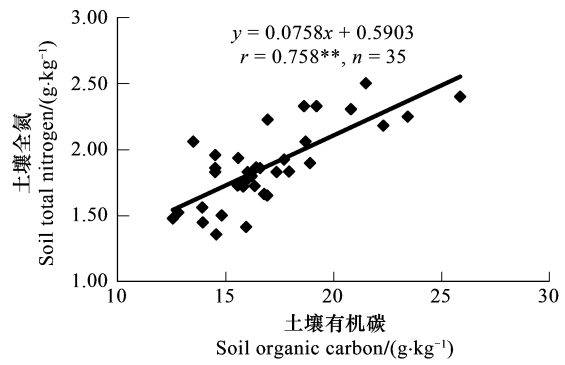


图2 年际土壤全氮含量与土壤有机碳含量的相关关系

Fig. 2 Correlation between soil total nitrogen and soil organic carbon

表2 耕层土壤氮累积量

Table 2 Accumulation of soil nitrogen in plough layer/(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	耕层(实测厚度) 土壤氮储量 N storage of plough layer (depth of measured value)	土壤氮净累积量 Net N storage	耕层土壤(0—20cm) 氮储量 N storage of plough layer (0—20cm)	年际有机碳 自然归还量 Natural recycling of organic carbon	年际有机碳 人为归还量 Artificial recycling of organic carbon
CK	4374 d	-320	3282 b	1368	0
N	4717 bcd	23	3920 ab	1702	0
NP	4638 cd	-56	3870 ab	1982	0
NPK	4522 d	-172	3764 ab	2192	0
C	5339 ab	645	4210 ab	2132	4235
NPK + C	5401 a	707	4419 a	2650	5786
JS	5255 abc	561	4379 ab	2090	2842

注:同列不同英文字母表示 5% 的差异显著性($P < 0.05$)

期稻作耕层土壤容重呈现持续降低趋势(表 1),其中有机物的循环利用处理土壤容重降低幅度最大,17a 平均降低了 28.0%,长期施用化肥平均降低了 15.8%,这与稻田特殊的水分环境有关,另外稻田根茬等有机物的自然归还量较大也是土壤容重降低幅度较大的重要原因之一^[15]。试验前后土壤容重的变化必然引起耕层土壤厚度的变化,本文根据公式(2)计算耕层土壤统计厚度。计算结果表明,长期稻作条件下稻田耕层土壤厚度发生较大变化,与实验前相比都有所增加(提高幅度为 17.0%)。大田观测试验表明实际耕层土壤厚度也有相应的变化规律,与估算值之间有显著的正相关关系(图 3),两者相对误差仅为 4.6%。由此可见,本文用于稻田土壤氮储量估算的参数——耕层土壤统计厚度计算方法是可行的,为红壤稻田氮储量的估算提供一个参考方法。

耕层厚度估算值代入公式(1)估算土壤氮储量。结果表明,长期有机物质循环利用能显著提高表层土壤氮储量(表 2),与试验前相比平均提高幅度为 18.8%;施用化肥对土壤氮储量作用不明显,长期施用氮肥(N 处理)土壤氮储量略有提高(0.5%),而 NP、NPK 处理土壤氮储量略有降低(分别为 1.2% 和 3.7%)。相关性分析表明,土壤氮储量变化(y)与年际有机碳归还量

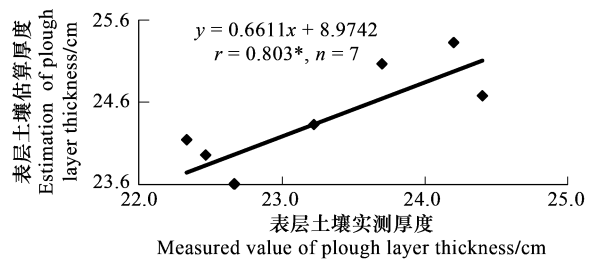


图3 表层土壤实测厚度与估算厚度的相关关系

Fig. 3 Correlation of plough layer thickness between measured value and estimation

(x)可用线性方程 $y = 0.1766x + 4249.8$ 来表示 ($r = 0.933^{**}$, $n = 8$)。本文除对表层土壤氮库作总体估算外,还采用固定耕层厚度(20 cm)对氮储量进行估算,结果表明以 20 cm 作为统计深度,土壤氮储量与估算耕层厚度的氮储量相比平均低估了 17.8%,而且与试验前相比都有所降低(降低幅度平均为 14.3%),其中土壤全氮含量显著提高的 C 处理土壤氮储量低估 10.3%,NPK + C 处理的氮储量也略低于试验前,这表明利用原来统计厚度(20 cm)进行估算氮储量的方法出现明显错误。另外,以固定统计厚度估算氮储量忽略了施肥模式之间土壤耕层厚度的差异性,在氮储量估算上表现出各施肥处理间统计差异性的减小(表 2)。

从上述分析可知,土壤全氮与土壤有机碳有极显著的正相关关系(图 2),而土壤有机碳含量(2006 年)与年际有机碳的归还量间有极显著的相关关系($r = 0.989^{**}$, $n = 7$)。结合土壤全氮变化的规律来看,有机物质循环利用是通过提高土壤有机质含量来影响全氮含量,继而影响土壤氮储量的,可见红壤稻田氮储量取决于有机碳的归还量。年际土壤容重与土壤有机质有极显著的负相关关系(图 4),稻田生态系统持续、大量归还的有机物是稻田土壤容重呈现降低趋势的主要原因。通过假设试验前后土壤质量守恒,建立土壤容重和土壤耕层厚度的相关关系,消除了两者相对变化对土壤氮储量估算的不确定性。

2.3 稻田减氮措施的可行性分析

红壤稻田具有较高的生产力持续性。有研究表明,在主要产稻国家即使长期不施用任何肥料,稻谷产量也能维持在 $3-4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [2],稻田生态系统是一个自我维持能力较高的生态系统。本定位试验表明,红壤稻田即使 17a 不施任何肥料(CK 处理),稻谷产量也能维持在 $5.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右(图 5),远高于其它产稻国产量,背景氮含量高是我国稻田无氮对照区水稻产量较高的重要因素 [2];另外,由于我国氮肥用量的逐年增加从而使随降雨和灌溉水带入稻田氮量显著高于以往,呈现出稻田自然供氮量提高的趋势 [1],最近在太湖地区和华北地区的观测表明,由降雨和灌溉水带入的氮量已高达 $80-90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,远高于以往的 $15-30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,从而成为稻田自然供氮量的重要构成部分 [1],本定位试验中稻田 CK 处理稻田自然供氮量高达 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,17a 后土壤全氮含量和氮储量略有降低(分别为 8.0% 和 6.9%),可见长期不施肥土壤氮库并没有出现快速枯竭现象,而是维持着较低的下降速率,稻田有机物的归还特性造成了这种土壤 N 库变化特征,这可能也是保持稻田生产力持续性的重要原因之一。

N 肥与 PK 肥配合施用能提高 N 肥的农学利用率和稻谷产量。偏施化肥(N、NP 处理)的稻谷产量比长

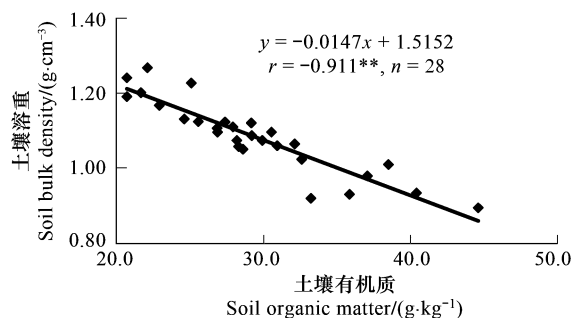


图 4 年际土壤全氮含量与土壤有机碳含量的相关关系(1994、1998、2002、2006 年数据)

Fig. 4 Correlation between soil bulk density and soil organic matter (data of 1994, 1998, 2002, 2006)

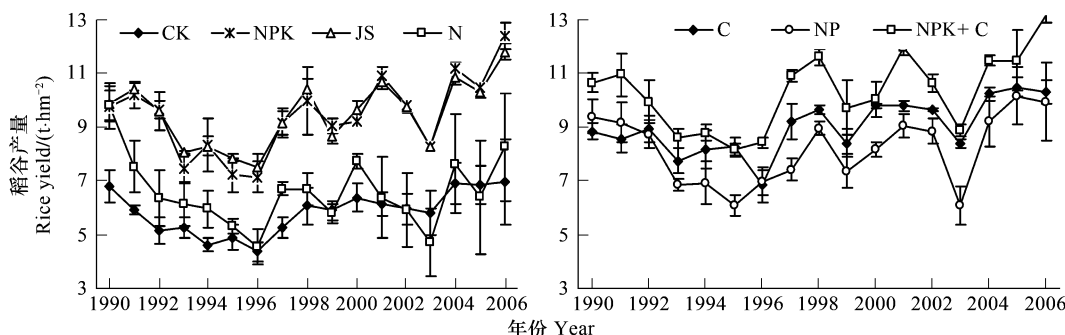


图 5 长期施肥对稻谷产量的影响

Fig. 5 The effect of long-term fertilization on the rice grain yield

期不施肥(CK)平均高出 27.6%,产量分别维持在 6.6 和 8.2 t·hm⁻²,而平衡施肥(NPK)产量提高幅度为 62.1% (平均产量为 9.4 t·hm⁻²)。从 N 的输出量来看,随着 NPK 养分的平衡施用,收获物携带出稻田生态系统的 N 量逐步提高,偏施 N 肥,N 肥的农学利用率极低(仅为 2.8%),而与 P、PK 肥配合施用后其农学利用率分别提高到 8.8% 和 13.1%。本定位试验已有研究表明,红壤稻田有机物的循环利用表现出增产效应,但是随着 NPK 肥配合程度的提高,有机养分循环利用的增产效应呈明显下降趋势^[16],这是由于养分投入量高反而降低了养分的利用效率。如 NPK + C 处理与 NPK 处理相比,N 输入量高出了 77.8%,稻谷产量提高了 9.5%,而输入 N 的农学利用率却降低了 29.6% (仅为 8.8%),可见稻田大量 N 素的投入降低了 N 的农学利用率。金继运等认为,偏施 N 肥是中国水稻生产 N 肥农学利用率大幅降低(从 15—20 kg·kg⁻¹ N 下降到 9.1 kg·kg⁻¹ N)主要原因之一^[1-2],另外 N 肥施用量的持续增加也是重要原因之一^[1]。NPK 肥的平衡施用和 N 肥的适量施用是提高 N 肥利用效率的有效方法,目前我国的稻田生产过程中存在 N 肥施用过量问题,而适量减少化肥氮的投入量是提高 N 肥利用效率的可行方法^[1-2]。

本长期定位试验设置了减量施肥处理 JS,与 NPK 处理相比 N 肥施用量减少了 1/3,只有 1/2 的秸秆还田。17a 的试验表明,JS 与 NPK 处理稻谷产量没有显著差异($P < 0.05$,图 3),产量的年度相对误差平均值仅为 3.2%。从 N 的输入、输出量比较来看,JS 处理输入 N 量与 NPK 处理相比低了 8.3%,而 N 得输出量高了 9.0%,输入 N 的农学利用率提高了 12.0%。可见,在红壤稻田较高的生产力持续性背景下半量稻田还田,适量减少氮肥施用量是可行的,本区域 N 肥施用量 180 kg·hm⁻²可以维持红壤稻田产量在 10 t·hm⁻²左右。

随着 NPK 养分的平衡施用,收获物携带出稻田生态系统的 N 量逐步提高,N、NP 和 NPK 处理 N 素输入、输出平衡盈余量呈现逐渐降低趋势,与 JS 处理相比平均高出 72.6%,但由于 N 肥在红壤性水稻土中净残留量很少,生产中通过根茬和凋落物等形式归还的 N 量较小(表 3),仅施用化肥 N 对土壤氮库的积累作用不明显,因此进入环境中的 N 量较高。而 JS 处理中增加了有机肥氮所占总施入氮的比例,能显著提高土壤氮库的积累,对缓解氮肥施用对环境的压力具有积极意义。本定位试验中 N 素的输入、输出值(表 3)具有长期监测数据,但要进一步的明确本区域稻田生态系统的外源氮的输入对红壤稻田生产力的影响变化,需要对灌溉水和大气干湿沉降带入 N 量的动态变化进行长期观测。

表 3 稻田年际 N 素输入输出

Table 3 N input and output

处理 Treatment	氮输入 N input/(kg·hm ⁻²)					氮输出 N output/(kg·hm ⁻²)	
	化肥 Chemical fertilizer	猪粪 Pig manure	稻草 Rice straw	绿肥 Green manure	根茬 crop residue	稻草 Rice straw	稻谷 Rice grain
CK	0	0	0	0	8.1	29.0	59.6
N	274.2	0	0	0	13.1	49.1	89.5
NP	274.2	0	0	0	13.9	54.0	97.4
NPK	274.2	0	0	0	13.2	58.5	111.4
C	0	28.3	46.4	63.4	12.5	46.4	101.4
NPK + C	274.2	39.5	84.8	96.1	16.4	84.8	140.0
JS	182.8	0	66.6	0	14.1	66.6	118.6

注:表中数据为 1990—2006 年平均值

3 小结

稻田生态系统内有机物质循环利用配合氮肥施用能显著提高土壤全氮含量,增加耕层土壤氮储量,长期施用化肥对土壤氮储量影响较小。在估算土壤氮储量时,有必要考虑土壤容重及土壤统计厚度变化对氮储量的影响。

红壤稻田有较高的生产力持续性,平衡施肥能显著提高稻谷产量和 N 肥的农学利用率,平衡施肥配合有机物施用能进一步提高稻谷产量,但由于投入 N 量高反而降低了 N 的农学利用率,而减量施肥与常量 NPK 肥相比产量并没有显著差异,反而提高了投入 N 素的农学利用率,可见在目前施肥状况及环境背景下红壤稻

田生态系统减少 N 肥投入量是提高 N 肥利用率的可行措施。

References:

- [1] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [2] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zhou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agriculture Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [3] Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, Zhang L X. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. *Science & Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.
- [4] Fu B J. Blue Skies for China. *Science*, 2008, 321: 611.
- [5] Twonsend A R, Braswell B H, Holland E A, Penner J E. Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, 6: 804-814.
- [6] Haynes R J. Origin distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems//Hanyes R J ed. *Mineral Nitrogen in Plant-Soil System* Acatem. , USA: Academic Press Inc, 1986: 1-51.
- [7] Xie Y X, Xiong Z Q, Zhao X, Xing G X, Guo T C. Contribution of nitrogen and phosphorus on eutrophied irrigation water in a paddy soil: a case study in taihu lake region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3618-3625.
- [8] Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996: 5.
- [9] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 132-136, 68-70, 375-377.
- [10] Zhang C N, Yan X D, Yang J H. Estimation of nitrogen reserves in forest of China. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2004, 26(5): 572-579.
- [11] Li Y Z, Wang F X, Huang Y F. Comparison for various definitions about soil water and nutrient use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(4): 150-155.
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soils of China*. Beijing: Science Press, 1978: 382-383.
- [13] Zhou W J, Wang K R, Hao J J, Liu X. Effects of organic materials cycling on soil organic carbon turnover in a red soil paddy ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 140-144.
- [14] Liu S L, Tong C L, Wu J S, Jiang P. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 106-112.
- [15] Chen A L, Xie X L, Chen W C, Wang K R, Gao C. Effect of long-term fertilization on soil plough layer carbon storage in a reddish paddy soil. *Environmental Science*, 2009, 30(5): 1267-1272.
- [16] Wang K R, Liu X, Zhou W J, Xie X L, Buresh R J. Effects of nutrient recycling on soil fertility and sustainable rice production. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1041-1045.

参考文献:

- [1] 朱兆良. 中国氮素研究. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778-783
- [2] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 周应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [3] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 张林秀. 我国农业面源污染的控制政策和措施. *科技导报*, 2005, 23(4): 47-51.
- [7] 谢迎新, 熊正琴, 赵旭, 刑光熹, 郭天财. 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3618-3625.
- [8] 刘光崧. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996: 5.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 132-136, 68-70, 375-377.
- [10] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. *西南农业大学学报*, 2004, 26(5): 572-579.
- [11] 李韵珠, 王凤仙, 黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较. *土壤通报*, 2000, 31(4): 150-155.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所编. *中国土壤*. 北京: 科学出版社, 1978: 382-383.
- [13] 周卫军, 王凯荣, 郝金菊, 刘鑫. 红壤稻田生态系统有机物料循环对土壤有机碳转化的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 140-144.
- [14] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 蒋平. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨. *土壤学报*, 2007, 44(1): 106-112.
- [15] 陈安磊, 谢小立, 陈惟财, 王凯荣, 高超. 长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响. *环境科学*, 2009, 30(5): 1267-1272.
- [16] 王凯荣, 刘鑫, 周卫军, 谢小立, Buresh R J. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1041-1045.