

有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率

孟琳^{1,2}, 张小莉¹, 蒋小芳¹, 王秋君¹, 黄启为¹, 徐阳春¹, 杨兴明¹, 沈其荣¹

(¹南京农业大学江苏省固体有机废弃物资源化高技术重点实验室, 南京 210095; ²贵州省烟草科学研究所, 贵阳 550003)

摘要: 【目的】试图探索出有机肥料氮替代化肥氮的最适替代率, 为研制水稻专用有机无机复合肥奠定基础。【方法】试验在江苏省常熟市进行, 采用田间试验研究 4 个氮用量下 (0、180、240 和 270 kg·hm⁻²) 有机肥料氮替代部分化肥氮对水稻 (4007 和常优 1 号) 产量、氮肥利用率和土壤矿质态氮的影响。【结果】(1) 与单施化学氮肥相比, 氮用量为 180 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量为 240 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时, 能够显著提高水稻的稻谷产量。两个水稻品种 (4007 和常优 1 号) 的稻谷产量分别达到 8 242~10 187 kg·hm⁻² 和 10 048~11 654 kg·hm⁻²; (2) 与单施化肥相比, 氮用量在 180 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量在 240 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时, 两个水稻品种的氮素累积量分别为 172.6~256.4 kg·hm⁻²、185.9~235.6 kg·hm⁻², 显著高于单施化学氮肥处理, 此时, 氮肥利用率也达最高, 分别为 36.6%~48.1%、34.3%~40.0%; (3) 与单施化学氮肥相比, 氮用量在 180 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或者氮用量在 240 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时可以获得较为平稳的氮素供应过程。【结论】有机肥料氮与化肥氮配施能获得比单施化学氮肥处理更高或持平的稻谷产量并有效地提高水稻的氮肥利用率。

关键词: 有机肥料氮; 化肥氮; 替代率; 水稻产量

Effects of Partial Mineral Nitrogen Substitution by Organic Fertilizer Nitrogen on the Yields of Rice Grains and Their Proper Substitution Rate

MENG Lin^{1,2}, ZHANG Xiao-li¹, JIANG Xiao-fang¹, WANG Qiu-jun¹, HUANG Qi-wei¹, XU Yang-chun¹, YANG Xing-ming¹, SHEN Qi-rong¹

(¹Jiangsu Key Laboratory for Solid Organic Waste Utilization, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

²Guizhou Tobacco Science Institute, Guiyang 550003)

Abstract: 【Objective】Field experiments were carried out to study the optimum substitution of partial mineral-fertilizer-nitrogen (N) by organic-fertilizer-N and to provide a base for the commercial development of mixed organic and mineral fertilizers for rice. 【Method】Field experiments were done in Changshu city, Jiangsu province under different substitution rates and four N fertilizer rates. 【Result】Grain yields of 8 242-10 187 kg·hm⁻² (4007) and 10 048-11 654 kg·hm⁻² (Changyou 1) were obtained when 180 kg N·hm⁻² was applied with a percentage of organic-fertilizer-N in total N being 15%-30% or 240 kg N·hm⁻² with a percentage of organic-fertilizer-N in total N being 10%-20%, which corresponds to application of 1 500-3 000 kg·hm⁻² of common compost fertilizer, compared with inorganic nitrogen fertilizer treatment. Compared with inorganic nitrogen fertilizer treatment, a more steady supply of nitrogen could be maintained when certain amounts of organic-fertilizer-N were applied together with inorganic-fertilizer-N. Nitrogen accumulation in 4007 and Changyou 1 were 172.6-256.4 kg·hm⁻² and 185.9-235.6 kg·hm⁻², respectively, when 180 kg N·hm⁻² was applied with a percentage of organic-fertilizer-N in total N being 15%-30% or 240 kg N·hm⁻²

收稿日期: 2008-04-16; 接受日期: 2008-08-22

基金项目: 国家“973”项目 (2007CB109304) 和农业部“948”项目 (2006-G62)

作者简介: 孟琳 (1982—), 女, 山东曹县人, 硕士研究生, 研究方向为水稻氮素营养与施肥。Tel: 13765116262; E-mail: littledream-gy@163.com.
通信作者黄启为 (1962—), 女, 湖南常德人, 研究方向为植物营养与有机肥。Tel: 13776684601; E-mail: qwhuang@njau.edu.cn

with a percentage of organic-fertilizer-N in total N being 10%-20%. In these treatments, the highest nitrogen use efficiency was obtained in 4007 (36.6%-48.1%) and Changyou 1 (34.3%-40.0%). **【Conclusion】** Application of mixed mineral-fertilizer-N and organic-fertilizers-N had a better or the same effects on the yields of rice grains and N use efficiency could be significantly increased compared with the single application of mineral nitrogen fertilizer. The best substitution of mineral fertilizer N by organic fertilizer N were 15%-30% or 10%-20% when 180 kg N·hm⁻² or 240 kg N·hm⁻² was applied in terms of rice fertilization.

Key words: organic-fertilizer-N; mineral-fertilizer-N; substitution rate; grain yields

0 引言

【研究意义】随着农业产业结构的调整和人民生活、生活水平的不断提高,各种固体有机废弃物的排放量也日益增多。据统计,中国目前有机固体废弃物中占重要地位的是禽畜粪便(每年约 26×10^8 t)与农作物秸秆(每年约 6×10^8 t)^[1],如果不加以处理和利用,将会严重污染环境。因此,如何有效地利用这些固体有机废弃物已成为急待解决的问题。实践证明,堆肥技术已经成为固体有机废弃物资源化处理和利用的关键途径,同时这也符合农业可持续发展的需要^[2]。然而,单施化肥(长期大量施用导致土壤肥力退化、肥料损失严重且污染环境)和单施有机肥(作物当季产量比施用化肥处理的明显减产)都不是解决中国农业生产和生态环境保护的办法与途径,因此有机无机复合肥是今后肥料产业发展的方向之一。**【前人研究进展】**大量的研究获得的有机肥和无机肥配施的效果结论比较一致,使作物普遍获得了最高产量及氮肥利用率^[3-17]。高菊生等^[3]研究表明,有机无机肥料配施能使水稻持续高产稳产。商跃凤^[13]也认为有机无机复混肥处理的水稻产量最高,与化肥相比,氮肥利用率可提高7%~18%。有机肥中含有大量有机质和作物生长必需的营养元素,长期施用可以提高土壤全氮水平,能持续增加土壤中微生物氮含量^[17],为作物及时提供养分,促进干物质的积累,作物增产奠定了基础。**【本研究切入点】**微生物对施入氮的固持与释放,主要受碳氮比所支配。但是,目前有机肥与无机肥究竟以什么样的配比最合适却无太多报道。**【拟解决的关键问题】**本研究通过田间试验研究了不同氮用量下

有机肥料氮替代部分化肥氮对4007和常优1号水稻产量和氮肥利用率的影响,并对有机肥与化肥配施的经济效益进行评价,试图探索出有机肥料氮替代化肥氮的最适替代率,为发展有机无机复合(混)肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为冲积母质(长江冲积物)发育的水稻土,其基本理化性状为:全氮含量 $1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $72.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $11.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $19.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为7.91(水土比2.5:1)。

供试作物为水稻,品种为4007和常优1号。供试化肥为尿素、过磷酸钙和氯化钾,有机肥是以猪粪为主要原料和水稻秸秆经高温发酵制成(其中:有机质35.4%,N、P₂O₅、K₂O分别为1.75%、2.18%、1.46%)。

1.2 试验设计

试验为裂区设计,肥料处理为主处理,水稻品种作为副处理。试验设4个施氮处理,0、180、240和270 kg N·hm⁻²,除未施氮处理外,其它处理的氮量来自有机肥料和化肥(尿素作化肥氮源),其比例见表1。磷肥用量为 $42.75 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ (磷肥为过磷酸钙),钾肥用量为 $130 \text{ kg K} \cdot \text{hm}^{-2}$ (钾肥为氯化钾),所有处理磷钾用量一致,磷钾肥和有机肥作为基肥一次施用。除对照外,其余所有处理氮用量分配比例为:基肥:分蘖肥:穗肥1:穗肥2=4:2:2:2。3次重复,随机区组排列。

表1 不同氮用量下有机肥料氮与化肥氮的比例

Table 1 Organic-fertilizer-N : mineral-fertilizer-N ratios(O:M ratios) under different rates of N fertilizers

氮用量 N application rate (kg·hm ⁻²)	比例1(单施化肥) Ratio1 (Mineral-fertilizer)	比例2 Ratio2	比例3 Ratio3	比例4 Ratio4	比例5 Ratio5
180	0 : 100	15 : 85	29 : 71	34 : 66	44 : 56
240	0 : 100	11 : 89	22 : 78	26 : 74	33 : 67
270	0 : 100	10 : 90	19 : 81	23 : 77	29 : 71

试验于2007年6—11月在江苏省常熟市白茆镇进行。采用大田试验的方法, 小区间田埂用防水塑料薄膜覆盖, 隔离防渗, 四周设保护行, 小区面积 $6\text{ m} \times 7\text{ m} = 42\text{ m}^2$, 每个小区均单设进、排水口, 栽插密度为 $300\ 150\ \text{穴}/\text{hm}^2$, 常规田间管理。

1.3 植株样品采集

收获后测定水稻地上部干物质量及含氮量。每小区选取 3 m^2 收割, 晒干, 扬净称稻谷重。

1.4 土壤样品采集

分别于植株移栽后第7、32、60、75和87天在各小区采用S形采集土壤, 土壤混匀过2 mm筛后待用。

1.5 测定方法

植株样品烘干、称重、粉碎后, 用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮^[18], 连续流动分析仪 (BRAN+LUEBBE AutoAnalyzer3) 测定待测液含氮量。土壤样品用 CaCl_2 浸提法提取, 用 BRAN+LUEBBE AutoAnalyzer3 进行测定分析矿质态氮含量。

1.6 数据处理

数据应用 Excel2003 程序和 SPSS11.5 统计分析软件处理。

根据文献[19], 氮效率计算方法如下:

氮素积累总量 (total nitrogen accumulation, TNA, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 植株地上部的全氮含量 \times 单位面积植株地上部干重;

氮肥回收效率 (nitrogen recovery efficiency, NRE, %) = (施氮区地上部吸氮量 - 无氮空白区地上部吸氮量) / 施氮量 $\times 100$;

氮肥农学利用效率 (agronomic nitrogen use efficiency, ANUE, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (施氮区产量 - 无氮空白区产量) / 施氮量。

2 结果与分析

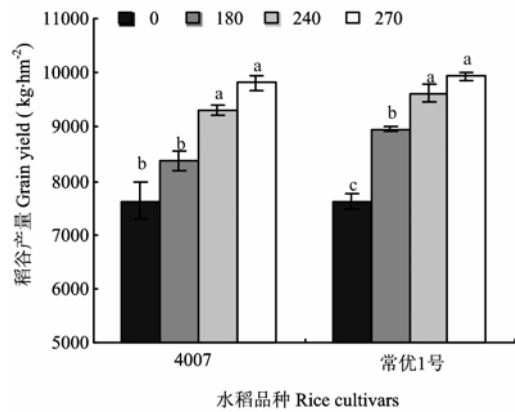
2.1 单施化肥对稻谷产量的影响

从图1可知, 本试验条件下, 两个水稻品种的稻谷产量随着氮肥用量的增加而增加, 超过氮肥用量一定范围后, 水稻稻谷产量没有显著增加。

水稻4007和常优1号在化肥氮用量为240和270 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的稻谷产量显著高于180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但240和270 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间差异不显著, 说明氮用量超过240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后4007和常优1号的稻谷产量没有显著增加。

2.2 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响

通过比较同一氮用量下各处理两个水稻品种稻谷



a、b、c 表示邓肯检验 5% 显著水平。下同

The a, b, c indicates a significant difference at $P < 0.05$ by Duncan test. The same as below

图1 不同化学氮肥用量对稻谷产量的影响

Fig. 1 Effects of different rates of mineral nitrogen fertilizers on rice grain yield

产量的结果可知 (图2), 3个氮用量下配施处理和单施化学氮肥处理的稻谷产量都显著高于未施氮肥处理。

氮用量为180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时 (图2-A), 水稻4007的有机肥与化肥的配施各处理 (15 : 85、29 : 71、34 : 66、44 : 56) 分别比单施化学氮肥处理 (0 : 100) 增产10.6%、11.8%、6.89%和0。相应, 常优1号的配施各处理分别比单施化学氮肥处理 (0 : 100) 增产30.2%、26.4%、12.6%和18.2%, 两个水稻品种的稻谷产量都以15 : 85和29 : 71两个处理最高, 除4007的15 : 85处理外, 均显著高于0 : 100处理, 当有机肥料氮比例升高化肥氮比例降低时, 水稻的稻谷产量呈下降趋势。

氮用量为240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时 (图2-B), 4007的配施各处理 (11 : 89、22 : 78、26 : 74、33 : 67) 分别比单施化学氮肥处理 (0 : 100) 增产8.93%、9.48%、0%和4.78%, 以11 : 89和22 : 78两个处理的稻谷产量最高, 显著高于0 : 100处理, 当有机肥料氮比例升高化肥氮比例降低时, 4007的稻谷产量呈下降趋势。相应, 常优1号的配施各处理分别比单施化学氮肥处理增产11.6%、4.38%、5.33%和8.69%, 以11 : 89处理产量最高, 显著高于0 : 100处理, 当有机肥料氮比例升高化肥氮比例降低时, 常优1号的稻谷产量下降。

氮用量为270 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时 (图2-C), 4007的配施各处理 (10 : 90、19 : 81、23 : 77、29 : 71) 分别比单施化学氮肥处理 (0 : 100) 增产2.38%、3.21%、2.71%

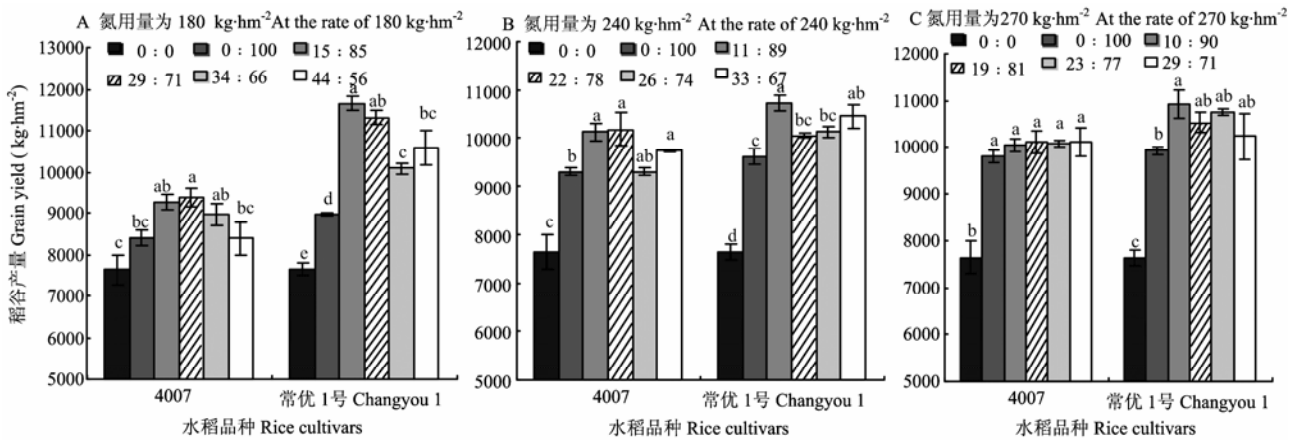


图 2 不同处理对稻谷产量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on rice grain yield

和 3.09%，各处理间差异不显著。相应，常优 1 号的配施处理分别比单施化学氮肥处理增产 9.91%、5.95%、8.21% 和 3.11%，10 : 90 产量最高，显著高于 0 : 100 处理。

由此可见，与单施化学氮肥相比，配施处理能获得与化肥持平或更高的产量，氮用量为 180 和 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，即氮用量在 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内有机肥料氮替代部分化肥氮增产作用明显。氮用量在 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量为 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，有机肥料氮的替代率在 10%~20% 的配施处理的稻谷产量高于单施化学氮肥处理。即氮用量在 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内商品有机肥的用量为 1 500~3 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时稻谷产量最高。

2.3 有机肥料氮替代部分化肥氮对水稻氮素累积的影响

两个水稻品种的各处理生育期氮素累积情况如图 3。氮用量为 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时（图 3-A），两个水稻品种的配施处理在分蘖期和拔节期的氮素累积量低于单施化学氮肥处理，随生育期延长，4007 的 15 : 85 和 29 : 71 处理在齐穗期时显著高于 0 : 100 处理，这种优势一直保持到成熟期，分别增加 17.2% 和 11.5%，成熟期时 34 : 66 和 44 : 56 两个处理与 0 : 100 处理持平。常优 1 号的 15 : 85 处理在成熟期时氮素累积量显著高于 0 : 100 处理，增加了 18.0%，29 : 71、34 : 66 和 44 : 56 在齐穗期与单施化学氮肥处理持平，到收获时分别比单施化学氮肥增加 14.7%、14.0%、7.8%。

氮用量为 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时（图 3-B），4007 的 11 : 89 处理在分蘖期氮素累积量低于 0 : 100 处理，但拔

节期直到成熟期都显著高于 0 : 100 处理，增加了 14.2%，22 : 78 处理到成熟期时显著高于 0 : 100 处理，增加了 17.9%，26 : 74 和 33 : 67 两个处理在分蘖期显著低于 0 : 100 处理，拔节期至成熟期与 0 : 100 处理持平。

常优 1 号各配施处理的氮素累积量在生长前期低于单施化学氮肥处理，但配施处理的氮素累积速度高于化肥处理，到成熟期显著高于单施化学氮肥处理，以 11 : 89 和 22 : 78 处理的氮素累积量最高，分别增加 11.9%、9.0%。

氮用量为 270 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时（图 3-C），两个品种的配施处理氮素累积量与单施化学氮肥在整个生育期持平。

本试验条件下，与单施化学氮肥相比，有机肥料氮与化肥氮配施有利于水稻生长后期的氮素累积，能获得与单施化学氮肥持平或较高的氮素累积量，从而提高氮肥利用率（表 2）。氮用量在 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量为 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时有机肥料氮的替代率在 10%~20% 的配施处理的氮素累积量显著高于单施化学氮肥处理。

2.4 有机肥料氮替代部分化肥氮对水稻氮效率的影响

氮肥回收效率是评价作物对氮素肥料吸收的一个重要指标，反映作物对土壤中肥料氮的回收利用效果；氮肥农学利用效率是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映；氮素积累总量指的是吸收养分的绝对量。这些指标从不同的侧面描述了作物对氮素的吸收和回收效率。

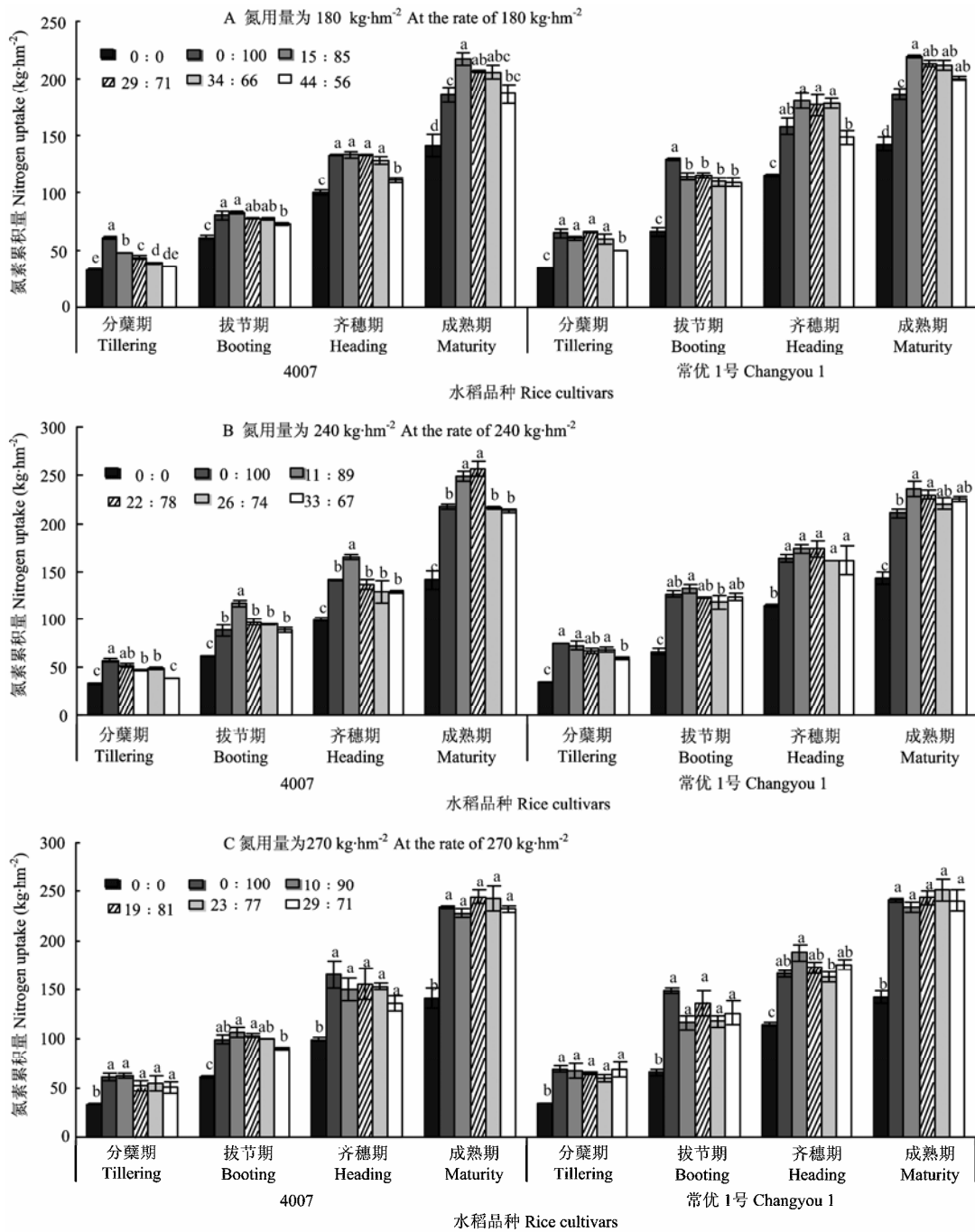


图 3 不同处理对水稻氮素累积量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on N accumulation in rice

两个水稻品种的氮肥利用率情况如表 2。氮用量 180 kg·hm⁻²时，两个水稻品种的氮肥回收效率和氮肥农学效率都是 15 : 85 处理最高，显著高于 0 : 100 处理，4007 的氮肥回收率和氮肥农学效率分别比 0 : 100 处理提高了 72%和 119%，常优 1 号两指标分别提高了 86%和 205%，随着有机肥料氮比例的升高两个水

稻品种的氮肥回收效率和氮肥农学效率逐渐下降，但配施处理的这两项指标仍高于 0 : 100 处理。

氮用量 240 kg·hm⁻²时，两个水稻品种的氮肥回收效率和氮肥农学效率均以 11 : 89 和 22 : 78 处理达到最高值，显著高于 0 : 100 处理。4007 的两个处理氮肥回收效率分别提高了 29%和 51%，氮肥农学效率分

表 2 不同处理对水稻氮效率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on N use efficiency

氮用量 N application rate (kg·hm ⁻²)	有机肥料氮: 化肥氮 O : M ratios	氮肥回收效率 NRE (%)		氮肥农学效率 ANUE (kg·kg ⁻¹)	
		4007	常优 1 号 Changyou 1	4007	常优 1 号 Changyou 1
180	0 : 100	24.7±3.6b	21.5±2.7c	4.14±1.1b	7.35±0.24d
	15 : 85	42.5±0.83a	40.0±0.62a	9.08±1.0a	22.4±0.94a
	29 : 71	36.6±0.56a	36.7±1.4a	9.65±1.3a	20.5±1.0ab
	34 : 66	35.9±3.2a	36.0±2.2a	7.34±1.4ab	13.6±0.83c
	44 : 56	25.4±4.6b	29.5±0.79b	4.14±2.1b	16.4±2.3bc
240	0 : 100	31.8±0.96b	26.4±1.9b	6.95±0.35b	8.33±1.0c
	11 : 89	44.6±2.1a	36.8±3.3a	10.4±0.73a	13.0±1.2a
	22 : 78	48.1±3.1a	34.3±1.9a	10.6±1.4a	10.1±0.29bc
	26 : 74	31.1±0.52b	30.4±2.6ab	9.18±0.20ab	10.5±0.69abc
	33 : 67	30.0±0.92b	32.5±1.0ab	8.80±0.07ab	11.8±1.4ab
270	0 : 100	34.3±0.29a	34.7±0.93a	8.04±0.48a	8.55±0.29b
	10 : 90	32.2±1.5a	32.1±2.1a	8.91±0.51a	12.2±1.1a
	19 : 81	38.3±2.6a	35.7±2.8a	9.21±0.88a	10.7±0.78ab
	23 : 77	37.8±4.8a	38.6±4.3a	9.03±0.25a	11.6±0.21ab
	29 : 71	33.7±1.2a	34.7±4.1a	9.20±0.78a	9.70±1.8ab

abc 表示邓肯检验 5% 显著水平; 误差线表示±SE。下同

The abc indicates a significant difference at $P < 0.05$ by Duncan test; Vertical bars represent standard errors. The same as below

别提高了 50% 和 53%。常优 1 号的两个处理氮肥回收效率分别提高了 39% 和 30%，氮肥农学效率分别提高了 56% 和 21%。有机肥料氮比例升高化肥氮比例降低至 26 : 74 和 33 : 67 时氮肥回收效率和氮肥农学效率呈下降趋势，但仍与 0 : 100 处理持平。

氮用量 270 kg·hm⁻² 时，水稻 4007 各配比处理间的氮肥回收效率和氮肥农学效率差异不显著，常优 1 号各处理的氮肥回收效率差异不显著，10 : 90 处理的氮肥农学效率显著高于 0 : 100 处理。

由此可见，合适比例的有机肥料与化肥配施可以有效提高水稻氮肥回收效率和氮肥农学效率。氮用量在 180 kg·hm⁻² 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或者氮用量在 240 kg·hm⁻² 以内并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时，水稻的氮肥回收效率和氮肥农学效率显著高于单施化学氮肥处理，即氮用量在 240 kg·hm⁻² 以内商品有机肥的用量为 1 500~3 000 kg·hm⁻² 时水稻的氮肥利用率最高。

2.5 有机肥料氮替代部分化肥氮对土壤矿质态氮含量的影响

图 4-A 为氮用量 180 kg·hm⁻² 时土壤矿质态氮的动

态变化趋势，处理间的差异较为显著。不施氮肥处理的土壤矿质态氮含量在整个生育期一直处于最低，主要是由于无外源氮素施入，仅仅依靠土壤本身有机氮矿化所致；水稻移栽后 0 : 100 处理的土壤矿质态氮含量呈逐渐下降趋势，下降幅度和下降速度显著高于配施处理，并且在整个生育期土壤矿质态氮含量较低。这是因为大量无机氮肥施入土壤，缺少外来碳源的加入导致土壤微生物对无机氮的固定能力较低，而水稻苗期从土壤中吸收的氮素较少，因此可能导致过多的氮素损失；15 : 85 处理土壤矿质态氮含量先降低后又有小幅升高最后逐渐降低，说明氮素的矿化比较平稳和持久，并且在整个生育期含量一直较高；29 : 71 处理在生长前期的土壤矿质态氮含量略低于 15 : 85 处理，但氮素矿化量和矿化速度高于 34 : 66 和 44 : 56 两个处理，后两个处理直到移栽后 60 d 时达到最高值，之后逐渐下降，说明有机肥料氮比例越高，氮的矿化越慢，不能为水稻及时提供所需氮素营养，影响了水稻的生长速度和氮素累积，进而影响产量。

图 4-B 为氮用量 240 kg·hm⁻² 时土壤矿质态氮的动态变化趋势。不施氮肥处理的土壤矿质态氮含量在整

个生育期一直处于最低;水稻移栽后 0 : 100 处理的土壤矿质态氮含量呈逐渐下降趋势, 下降幅度和下降速度显著高于配施处理, 并且在整个生育期土壤矿质态氮含量较低; 11 : 89 和 22 : 78 两个处理的土壤矿质态氮呈先下降后有小幅升高最后又逐渐下降趋势, 继小幅升高后到移栽后 32 d 后才开始下降, 并且含量一直比较高; 当有机肥料氮比例升高化肥氮比例降低至 26 : 74 和 33 : 64 时, 水稻前期的土壤矿质态氮含量较低, 第 7 天时有个大幅降低, 随后氮素缓慢释放, 低于 11 : 89 和 22 : 78 两个处理。

氮用量为 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时 (图 4-C), 在生育前期化肥处理的土壤矿质态氮含量下降幅度高于有机无机肥处理, 但生育后期处理间的土壤矿质态氮水平相

当, 可能是因为在较高氮水平下有机肥料氮替代部分化肥氮后, 化肥氮的施用数量仍然保持在较高水平, 为作物持续供应氮素养分能力与单施化肥处理能力相当。

本试验条件下, 与单施化肥相比, 配施处理的土壤矿质态氮含量变化比较平稳, 可以减少氮素在水稻生长前期的损失, 但比例过高影响氮素的释放速度, 影响水稻干物质和氮素累积 (图 3), 不利于水稻高产 (图 2) 和氮肥利用率 (表 2) 的提高。与单施化学氮肥处理相比, 氮用量在 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或者氮用量在 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时, 土壤矿质态氮含量的较高, 变化也比较平稳, 有利于土壤矿质

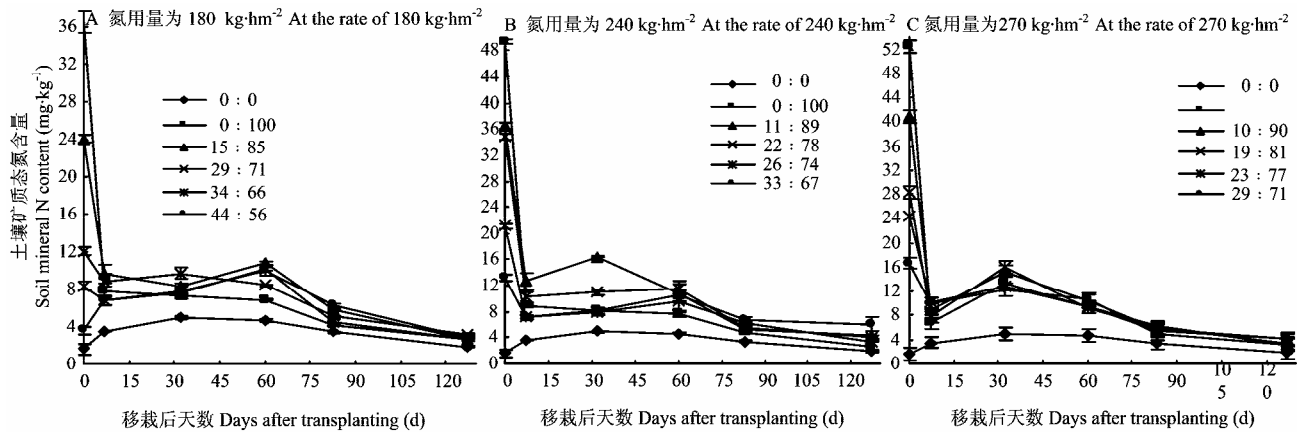


图 4 不同处理对土壤矿质态氮含量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on soil mineral nitrogen

态氮的长期持续供应。

3 讨论

3.1 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响

许多研究结果表明有机无机肥配施均可大幅度提高作物的产量^[20-25]。本试验结果也证明施用有机无机肥能够显著提高稻谷产量。有机无机肥料配施之所以与单施化肥相比能提高作物产量, 主要是有机无机肥料配施能改善土壤氮素供应过程, 使土壤养分平稳释放^[24-26]。

本试验土壤矿质态氮的研究结果表明, 与单施化学氮肥处理相比, 氮用量在 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时, 氮素养分释放更加

稳定, 土壤矿质态氮含量始终维持在较高水平, 能为作物生长持续供应养分^[29], 水稻氮素累积量大 (图 3), 因而显著提高了水稻的稻谷产量^[3,28]。在氮用量为 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 4 个配施处理中化肥氮所提供的数量分别为 244、218、208 和 $191 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 有机肥料氮替代部分化肥氮后增产作用不显著, 可能是因为在较高氮水平下配施处理中化肥氮所提供的量已经能够满足水稻生长对氮素的需求。

3.2 有机肥料氮替代部分化肥氮对水稻氮肥利用率的影响

众多的研究结果表明^[29-32], 有机无机肥配合施用能明显提高氮肥利用率。有机肥与化肥配施能提高氮肥利用率的原因可能是有机肥易被微生物利用, 尿素与有机肥配施后营养更加协调, 施入土壤后刺激了土

壤微生物的活动^[33], 与单施尿素相比更多的化肥氮被固定在微生物体内, 从而避免了前期过多的无机氮存在于土壤中而遭受挥发损失; 当作物需肥量增加时, 土壤中没有更多的能源物质来维持微生物的生命活动, 大量的微生物相继死亡, 被固持在这些微生物体内的这部分氮素释放出来供作物吸收利用^[24-27,34-37]。本试验研究结果表明, 单施化肥土壤矿质态氮释放速度较快, 含量迅速下降, 后期氮素供应不足, 导致生长后期水稻氮素累积量低于配施处理, 因此氮肥利用率较低, 而氮用量在 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或者氮用量在 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时, 氮素释放较为平稳, 减少了氮素的损失, 促进了水稻对氮素的吸收, 收获时氮素累积量显著高于单施化肥处理, 从而提高氮肥利用率。提高有机肥料氮比例氮肥回收效率或氮肥农学效率会降低主要是因为有机肥料氮过多会促进对氮的固持, 氮素释放率降低。

3.3 有机肥料氮替代部分化肥氮的最适替代率

有机无机氮肥配施不仅能提高水稻的稻谷产量和氮肥利用率, 而且同时也能培肥土壤, 改善作物品质。然而, 国内外大量的研究表明有机肥料氮与化肥氮比例对水稻稻谷产量影响较大, 并不是有机肥料氮所占比例越高越好, 超过某个界限时作物产量反而降低, 有机无机肥配施应该存在最适比例^[16,38-41]。

氮用量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 配施处理所提供的化学氮量较低, 分别为 154、128、118、101 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 随着有机肥料氮比例提高, 有机肥料中碳数量也在增加, 微生物固持无机氮的数量也在随之增加, 导致配施处理中矿质养分含量降低, 影响了氮素的早期供应和作物的氮素吸收^[14-15], 从而导致稻谷产量和氮肥利用率的下降(表 2), 因此在此氮用量下有机肥料氮的替代率在 15%~30% 的配施处理水稻稻谷产量最高。氮用量为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 配施处理所提供的化学氮分别为 214、188、178 和 161 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 后两个配施处理所提供的化学氮量相对较低, 供应作物养分不足时, 因此在此氮用量下有机肥料氮的最适替代率为 10%~20%。即氮用量在 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内商品有机肥的最佳用量为 $1\ 500\sim 3\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

4 结论

本试验结果表明, 有机肥料氮与化肥氮配施能获得比单施化学氮肥处理更高或持平的稻谷产量。与单施化学氮肥处理相比, 氮用量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机

肥料氮的替代率在 15%~30% 或氮用量为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 并且有机肥料氮占氮总量的 10%~20% (相当于施用商品有机肥 $1\ 500\sim 3\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 时能够显著提高两个水稻品种(4007 和常优 1 号)的稻谷产量; 与单施化学氮肥处理相比, 施用有机无机肥料可以获得较为平稳的氮素供应过程, 有效地提高水稻的氮肥回收效率和氮肥农学效率。

References

- [1] 张 敏, 王正银. 生物有机肥料与农业可持续发展. 磷肥与复肥, 2006, 21(2): 58-59.
Zhang M, Wang Z Y. Bioorganic fertilizer and sustainable development of agriculture. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2006, 21(2): 58-59. (in Chinese)
- [2] Saludes R B, Iwabuchi K, Miyatake F, Abe Y, Honda Y. Characterization of dairy cattle manure/wallboard paper compost mixture. *Bioresource Technology*, 2008, (99): 7285-7290.
- [3] 高菊生, 徐明岗, 王伯仁, 秦道珠, 文石林, 申华平. 长期有机无机肥配施对土壤肥力及水稻产量的影响. 中国农学通报, 2005, 21(8): 211-214, 259.
Gao J S, Xu M G, Wang B R, Qin D Z, Wen S L, Shen H P. The effects of rational application of long term organic and chemical fertilizers on soil fertility and rice yield. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 211-214, 259. (in Chinese)
- [4] 张 娟, 沈其荣, 张亚丽, 曹金留, 冉 炜, 褚贵新. 施用预处理稻秆的土壤供氮特征及对冬小麦吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 24-28.
Zhang J, Shen Q R, Zhang Y L, Cao J L, Ran W, Chu G X. Effects of application pretreated rice straw on soil nitrogen supply and nitrogen uptake by winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 24-28. (in Chinese)
- [5] 张树生, 杨兴明, 黄启为, 徐阳春, 沈其荣. 施用氨基酸肥料对连作条件下黄瓜的生物效应及土壤生物性状的影响. 土壤学报, 2007, 44(4): 689-694.
Zhang S S, Yang X M, Huang Q W, Xu Y C, Shen Q R. Effect of application of amino acid fertilizer on biological properties of cucumber plants and soil microorganisms under continuous mono-cropping. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 689-694. (in Chinese)
- [6] 赖 涛, 沈其荣, 褚冰倩, 张春兰. 新型有机肥的氮素在土壤中的转化及其对草莓生长和品质的影响. 土壤通报, 2005, 36(6): 891-895.
Lai T, Shen Q R, Chu B Q, Zhang C L. Effects of organic manure on

- soil N supplying and strawberry quality. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 891-895. (in Chinese)
- [7] 袁 飞, 彭 宇, 张春兰, 沈其荣. 有机物料减轻设施连作黄瓜苗期病害的微生物效应. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 867-870.
- Yuan F, Peng Y, Zhang C L, Shen Q R. Effect of organic materials in controlling cucumber seedling diseases. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 867-870. (in Chinese)
- [8] 沈其荣, 徐 惠, 徐盛荣, 曹翠玉. 有机-无机肥料养分在水田土壤中的转化. *土壤通报*, 1994, 25(7): 11-15.
- Shen Q R, Xu H, Xu S R, Cao C Y. Transformation of inorganic-organic nutrient in paddy soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(7): 11-15. (in Chinese)
- [9] 吕卫光, 黄启为, 沈其荣, 贾建业, 余廷园, 诸海涛. 不同来源有机肥及有机肥与无机肥混施对西瓜生长期土壤酶活性的影响. *南京农业大学学报*, 2005, 28(4): 68-71.
- Lü W G, Huang Q W, Shen Q R, Jia J Y, Yu T Y, Zhu H T. The effect of organic fertilizer and organic-inorganic fertilizer application on soil enzymes activities during watermelon growing period. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(4): 68-71. (in Chinese)
- [10] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2002, 35(4): 403-409.
- Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Contents and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(4): 403-409. (in Chinese)
- [11] 徐阳春, 沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响. *土壤学报*, 2004, 41(1): 87-92.
- Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizer on supplying characteristics of nitrogen in soil and soil particle fractions. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 87-92. (in Chinese)
- [12] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体 C、N、P 含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 1-7.
- Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5): 1-7. (in Chinese)
- [13] 商跃凤. 有机无机复混肥对水稻氮素利用率的影响. *西南农业大学学报*, 2001, 23(3): 262-266.
- Shang Y F. Influence of organic-inorganic compound fertilizers on nitrogen recovery in paddy rice. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2001, 23(3): 262-266. (in Chinese)
- [14] 李冬初, 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 申华平. 有机无机肥配施对红壤稻田氮素形态及水稻产量的影响. *湖南农业科学*, 2004, (3): 23-25, 31.
- Li D C, Li J M, Xu M G, Qin D Z, Shen H P. Effect of organic manure applied combining with inorganic fertilizer on nitrogen conformation and yield of rice in red soil paddy field. *Human Agricultural Sciences*, 2004, (3): 23-25, 31. (in Chinese)
- [15] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 李冬初, 宝川靖和, 八木一行. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 51-56.
- Li J M, Xu M G, Qin D Z, Li D C, Yasukazu Hosen, Kazuyuki Yagi. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 51-56. (in Chinese)
- [16] 李 伟, 戴亨林, 蔡国学. 有机-无机复混肥料的肥料效应初探. *磷肥与复肥*, 2003, 18(6): 67-69.
- Li W, Dai H L, Cai G X. Preliminary study on effect of organo-inorganic compound fertilizers. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(6): 67-69. (in Chinese)
- [17] Iyyemperumal K, Israel D W, Shi W. Soil microbial biomass, activity and potential nitrogen mineralization in a pasture: Impact of stock camping activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, (39): 149-157.
- [18] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 44-49.
- Bao S D. *Soil Agrochemistry Analysis Methods*. Beijing: Agricultural Press, 2000: 44-49. (in Chinese)
- [19] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 甘秀芹, 徐建云, 曹卫星. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 466-471.
- Jiang L G, Dai T B, Wei S Q, Gan X Q, Xu J Y, Cao W X. Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 466-471. (in Chinese)
- [20] 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.
- 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. (in Chinese)
- [21] 彭耀林, 朱俊英, 唐建军, 张美良. 有机无机肥长期配施对水稻产量及干物质生产特性的影响. *江西农业大学学报*, 2004, 26(4): 485-490.
- Peng Y L, Zhu J Y, Tang J J, Zhang M L. Effects of long-term mixed application of organic-inorganic fertilizers on the yield and dry matter producing characters of rice. *Acta Agriculturae Universitatis*

- Jiangxiensis*, 2004, 26(4): 485-490. (in Chinese)
- [22] 索东让. 长期定位试验中化肥与有机肥结合效应研究. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 71-75.
- Suo D R. Combined fertilization of chemical and organic fertilizers in a long-term position experiment. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 71-75. (in Chinese)
- [23] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 郑春莲. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 236-241.
- Ma J Y, Li K J, Cao C Y, Zheng C L. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 236-241. (in Chinese)
- [24] 王艳博, 黄启为, 孟 琳, 沈其荣. 有机无机肥料配施对菠菜生长和土壤供氮特性的影响. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 44-48.
- Wang Y B, Huang Q W, Meng L, Shen Q R. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizer application on growth of spinach and soil nitrogen supply. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3): 44-48. (in Chinese)
- [25] 杨春悦, 沈其荣, 徐阳春, 常志州. 有机高氮肥的施用对菠菜生长及土壤供氮能力的影响. 南京农业大学学报, 2004, 27(2): 60-63.
- Yang C Y, Shen Q R, Xu Y C, Chang Z Z. Effect of application of organic fertilizer with high nitrogen content on growth of spinach and soil nitrogen supply. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(2): 60-63. (in Chinese)
- [26] 张 娟, 沈其荣, 冉 炜, 徐 勇, 徐阳春. 施用预处理秸秆对土壤供氮特征及菠菜产量和品质的影响. 土壤, 2004, 36(1): 37-42.
- Zhang J, Shen Q R, Ran W, Xu Y, Xu Y C. Effects of the application of pretreated rice straw with nitrogen fertilizer on soil nitrogen supply and spinach growth and quality. *Soils*, 2004, 36(1): 37-42. (in Chinese)
- [27] 张亚丽, 张 娟, 沈其荣, 王金川. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1575-1578.
- Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, Wang J C. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1575-1578. (in Chinese)
- [28] 周 青, 陈风华, 张国良, 周凤明, 吕玉亮, 滕志英. 有机肥追施对水稻产量形成及氮肥施用效益的影响. 安徽农业大学学报, 2006, 33(2): 252-256.
- Zhang Q, Chen F H, Zhang G L, Zhou F M, Lü Y L, Teng Z Y. Effects of organic fertilizer on rice yield development and nitrogen usage efficiency. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2006, 33(2): 252-256. (in Chinese)
- [29] 陈振德, 何金明, 李祥云, 陈建美. 施用腐殖酸对提高玉米氮肥利用率的研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 52-54.
- Chen Z D, He J M, Li X Y, Chen J M. Studies on increasing N utilizing efficiency in maize by applying humic acid. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 52-54. (in Chinese)
- [30] 史春余, 张夫道, 张树清, 李 辉, 付成高. 有机-无机缓释肥对番茄产量和氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 584-587.
- Shi C Y, Zhang F D, Zhang S Q, Li H, Fu C G. Effects of organic-inorganic slow release fertilizers on yield and nitrogen recovery in tomato. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 584-587. (in Chinese)
- [31] 姜丽娜, 符建荣, 马军伟, 叶 静, 林成远. 有机无机复配肥氮肥利用率的 ^{15}N 生物示踪研究. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 287-291.
- Jiang L N, Fu J R, Ma J W, Ye J, Lin C Y. Study on nitrogen fertilizer utilization efficiency of organic and inorganic compound fertilizer with ^{15}N isotope. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5): 287-291. (in Chinese)
- [32] Cassman K G, De Data S K. Long-term comparison of the agronomic efficiency and residual benefits of organic and inorganic nitrogen source for tropical lowland rice. *Experimental Agriculture*, 1996, 32: 427-444.
- [33] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 209-213.
- [34] 徐阳春, 沈其荣, 冉 炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89-96. (in Chinese)
- [35] 沈其荣, 余 玲, 刘兆普, 茆泽圣. 有机无机肥料配合施用对滨海盐土土壤生物量态氮及土壤供氮特征的影响. 土壤学报, 1994, 31(3): 288-294.
- Shen Q R, Yu L, Liu Z P, Mao Z S. Effects of combining application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on biomass nitrogen and nitrogen-supplying characteristics of coastal saline soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(3): 288-294. (in Chinese)
- [36] Zaman M, Di H J, Cameron K C, Frampton C M. Gross nitrogen mineralization and nitrification rates and their relationships to enzyme activities and the soil microbial biomass in soils treated with dairy shed effluent and ammonium fertilizer at different water potentials. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29: 178-186.

- [37] Li J T, Zhang B. Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 568-579.
- [38] 李淑仪, 邓许文, 陈发, 古幸福, 龚劲波, 蓝佩玲, 廖新荣, 王荣萍. 有机无机肥配施比例对蔬菜产量和品质及土壤重金属含量的影响. *生态环境*, 2007, 16(4): 1125-1134.
- Li S Y, Deng X W, Chen F, Gu X F, Gong J B, Lan P L, Liao X R, Wang R P. Effects of the quantity and proportion of organic and mineral fertilizers on vegetable yield and quality and soil heavy metal contents. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1125-1134. (in Chinese)
- [39] 王传雷, 瞿和平, 万一花, 李四斌, 葛秀文, 刘卫平. 有机无机肥配合施用长期定位试验. *湖北农业科学*, 2003, (5): 58-59.
- Wang C L, Qu H P, Wan Y H, Li S B, Ge X W, Liu W P. Long-term experiment of combined application of organic and inorganic fertilizer. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003, (5): 58-59. (in Chinese)
- [40] 郑兰君, 曾广永, 王鹏飞. 有机肥、化肥长期配合施用对水稻产量及土壤养分的影响. *中国农学通报*, 2001, 17(3): 48-50.
- Zheng L J, Zeng G Y, Wang P F. Impacts of combined application for organic and inorganic fertilizers on rice yield and soil nutrients. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(3): 48-50. (in Chinese)
- [41] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, Tomar O K, Shurpali N J, Pandey P S. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers. *Field Crops Research*, 2000, 68: 219-246.

(责任编辑 李云霞)