

# 长期有机养分循环利用对红壤稻田土壤供氮能力的影响

陈安磊, 王凯荣, 谢小立, 苏衍涛

(中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125)

**摘要:** 通过 15 年的田间定位试验结合盆栽试验, 研究了长期有机养分循环利用和不同化肥配施对红壤稻田土壤供氮能力的影响。结果表明, 土壤有机碳、全氮、微生物生物量氮(MB-N)和土壤氮的矿化量与生物吸氮量有极显著的正相关关系, 是良好的土壤供氮能力指标。长期有机养分循环利用或配合化肥施用能显著提高土壤有机碳、全氮含量和氮的矿化量, 提高幅度分别为 20.1%~40.9%、0.46~0.60 g/kg 和 55.0% (6 周); 明显提高土壤 MB-N 含量, 提高幅度平均为 70.3%。长期纯化肥处理对土壤碳、氮库的积累和氮的矿化量的提高作用甚微。盆栽试验表明, 长期施用氮肥和氮、磷、钾肥土壤供氮量提高量极小, 与长期不施肥相比提高幅度分别为 2.1% 和 6.2%, 而有机养分循环利用能显著提高土壤供氮量, 提高幅度为 33.7%~89.0%。随着有机养分循环利用和 NPK 肥配合程度的提高, 土壤供氮量提高幅度呈上升的趋势。

**关键词:** 红壤性水稻土; 有机养分循环利用; 供氮能力

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)05-0838-06

## Effects of long-term cycling of organic nutrient on soil nitrogen supplying capacity in a red soil paddy ecosystem

CHEN An-lei, WANG Kai-rong, XIE Xiao-li, SU Yan-tao

(Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** Nitrogen supplying capacity played an important role in growth and yield of rice. In order to obtain efficient nitrogen and organic nutrient utilization and reduce the possible environmental effects, it is essential to determine the fertilization model which is based on the soil nitrogen supplying capacity. A pot experiment based on long-term field experiment was conducted to determine the effects of long-term cycling of organic nutrient or application of chemical fertilizer on soil in total nitrogen, soil organic carbon, mineralizable nitrogen, microbial biomass nitrogen and carbon content, nitrogen uptake by rice. The field experiment was carried out on a reddish paddy soil in taoyuan, Hunan, during 1990 - 2004, 8 treatments (CK, N, NP, NPK, C, N + C, NP + C, NPK + C) and three replicates were set up. Levels of fertilization were N 182.3 kg/ha, P 39.3 kg/ha, K 197.0 kg/ha after 1997 (N 262.5 kg/ha, P 39.3 kg/ha, K 137.0 kg/ha before 1997). For some treatments with recycling of crop nutrients, rice straw was fully returned to the field after harvesting, 80% of full grains (50% after 1995) and all of the empty or blighted grains were fed to pigs, and the pig manure subsequently was spread in the field, and the last step was that the Chinese milk vetch was cultivated in winter and then ploughed into the field before spring plowing. The pot experiment was carried out in taoyuan(2004), level of fertilization were  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  0.26 g/pot, KCl 0.27 g/pot. The results indicated that there was a significant positive relationship among soil organic carbon, total N, amount of mineralizable N, the microbial biomass N(MB-N) and N uptake of rice, and they were good indicators of soil nitrogen supplied capacity. The recycling application of organic nutrient or application combined

收稿日期: 2006-07-21

修改稿收到日期: 2006-11-23

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-441); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB121106)资助。

作者简介: 陈安磊(1977—), 男, 江苏沛县人, 研究实习员, 硕士, 主要从事土壤化学和环境污染方面的研究。

Tel: 0731-4615223, E-mail: alchen@isa.ac.cn

with chemical fertilizer significantly increased soil organic carbon content, total nitrogen content and amount of net N mineralization (6 weeks) by 20.1%~40.9%, 0.46~0.60 g/kg and 55.0%, respectively; And it obviously increased soil MB-N content by 70.3%. However, there was less effect of chemical fertilizer application on the content of soil nitrogen, soil carbon and mineralizable N. The pot experiment indicated that compared with zero application of fertilizer, there were significant effects of long-term recycling application of organic nutrient on the soil nitrogen supply capacity, and the amount of nitrogen uptake by rice increased by 33.7%~89.0%, while there was less effects of application of chemical fertilizer N and NPK, which only increased by 2.1% and 6.2%. Additionally, soil nitrogen supplying capacity increased with the combination degree between the recycling application of organic nutrient and fertilizer NPK enhancement.

**Key words:** reddish paddy soil; cycling of organic nutrient; soil nitrogen supplying capacities

我国的秸秆资源总量虽然高达  $6.73 \times 10^8$  吨, 但仅有 20%~36% 用作肥料, 被燃烧和废置的秸秆高达 45%~60%<sup>[1]</sup>。这不仅污染了环境, 更加重了农业对化肥的依赖性。

我国氮肥的当季利用率较低, 约为 30%~35%<sup>[2]</sup>。土壤氮素在作物氮素供应上占有重要的地位。据统计, 当季水稻从土壤中吸收的氮素占其总吸收量的 50% 左右<sup>[3]</sup>, 这些氮主要来自水稻生长季节内土壤有机质的矿化、水解。土壤供氮能力愈高, 作物对土壤氮素的依赖性愈强; 而氮肥的增产效果和利用率愈低<sup>[4-5]</sup>。因此, 根据土壤氮素供应能力, 选择合理的施肥模式, 对减少环境污染、合理利用有机物资源有重要的意义。选用能表征土壤供氮能力的指标是解决这一问题的关键。Bonde 和 Myrold 等<sup>[6-7]</sup>研究认为, 土壤易矿化氮主要来自土壤微生物对氮的释放; 土壤微生物氮的有效性与土壤无机氮相近, 是作物吸收氮素的主要来源<sup>[8]</sup>, 其含量水平是土壤微生物对氮素矿化与固持作用的综合反映。但在长期施用有机物或有机物配施化肥条件下, 土壤氮矿化与微生物氮的变化情况及其两者在表征土壤供氮能力上, 还有待进一步研究。

在长期田间试验中, 不能把土壤养分对作物生长的贡献与施入有机和无机养分对作物生长的贡献分开, 所以水稻田间的生长发育状况和产量不能作为估计土壤养分供应能力的有效参数。另外在各个处理中, 还有其他的因素影响作物的性状和氮素养分的吸收。据此, 我们设计了盆栽试验, 依据在 PK 养分不限制水稻生长的条件下, 通过计算作物吸收的氮素, 以及与土壤养分特征之间的关系, 揭示有机养分循环利用和化肥配合施用对土壤供氮能力的影响, 为合理施肥、减少环境污染提供理论依据。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 样品采集与处理

#### 1.1.1 供试土壤 供试土壤为第四纪红色粘土发

育的水稻土, 采自 1990 年建立的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。试验前土壤基础肥力性状为: 有机碳 15.4 g/kg, 全氮 1.88 g/kg, 全磷 0.60 g/kg, 全钾 12.8 g/kg, 速效磷 16.2 mg/kg, 速效钾 74.3 mg/kg, pH 5.74。试验的 8 个处理为: 1) CK, 不施化肥, 收获物全部移出系统; 2) C, 不施化肥, 收获物中养分循环利用(收获物中养分循环利用以下简称“C”); 3) N, 施化学 N 肥, 收获物移出系统; 4) N + C, 在施化肥 N 的基础上, 收获物中养分循环利用; 5) NP, 施 NP 化肥, 收获物移出系统; 6) NP + C, 在施化肥 NP 的基础上, 收获物中养分循环利用; 7) NPK, 施 NPK 化肥, 收获物移出系统; 8) NPK + C, 在施化肥 NPK 的基础上, 收获物中养分循环利用。3 次重复, 随机区组排列。有“C”处理(2、4、6 和 8 处理)冬季种植紫云英, 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, 猪粪尿作来年早稻的基肥。供试肥料为尿素(N 45%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。施肥情况: 1990~1996 年, 肥料施用量为 N 262.5、P 39.3、K 137.0 kg/hm<sup>2</sup>; 1997~2004 年, N 182.3、P 39.3、K 197.2 kg/hm<sup>2</sup>。

供试的 24 个土样于 2004 年早稻成熟期间采自定位试验田的 8 个处理的土壤表层(0—20 cm), 土样采回混匀后, 一部分新鲜样品用于测定土壤微生物生物量, 其余的风干土样锤碎后一部分装盆用于盆栽试验, 其余的风干样品过筛后用于培养试验和分析测试。

1.1.2 盆栽试验 每盆装 2.5 kg 土样, 3 个重复。移栽前土壤浸水 1 周, 在移栽前一天施肥, 每盆施用 0.26 g 磷酸氢二钠和 0.27 g 的氯化钾。水稻移栽后 37 d 收获(孕穗初期)。测定指标为水稻干物重, 茎叶和根的含氮量。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤 N 矿化能力的测定 采用淹水密闭恒温培养法。取 10.0 g(过 2 mm 筛)土样,每种土样称取 5 份,分别放入洁净且不漏气的塑料瓶中,加入 20 mL 蒸馏水,使土层完全浸湿,盖紧瓶盖,防止漏气<sup>[9]</sup>。将样品置于 25℃ 的恒温室内培养,在 0、1、2、4、6 周随机取各培养土样 1 份,加入 80 mL 2.5 mol/L KCl 溶液浸提,振荡 1 h 后过滤,吸取滤液 5 mL 于连续流动注射仪中测定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,分光光度计测定  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

1.2.2 土壤微生物生物量碳、氮的测定 采用 Wu 等<sup>[10]</sup>的方法。称取经预培养的相当于烘干重 10.0 g 的新鲜土样,在真空干燥器中用氯仿蒸汽熏蒸 24 h,用反复抽真空方法除去残存氯仿后,再用 40 mL 0.5 mol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液振荡提取 30 min,过滤;提取液中的有机碳用总有机碳自动分析仪(Phoenix 8000)紫外一过硫酸氧化法测定。同时以不熏蒸土样为对照。根据  $\text{MB-C} = \text{Ec}/0.45$  计算土壤微 MB-C 的含量。式中 Ec 为熏蒸土壤与对照土壤以  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液提取的有机碳增量,0.45 为转换系数。

年际有机碳归还量为 1991、1994、1997 和 2000 年的平均值,分为根茬和凋落物的自然归还量和绿肥、稻草和厩肥的人工归还量两部分,其中凋落物为早晚稻生育期间各 7 次田间收集量。按常规分析方法测定土壤和植株养分。

试验所得数据采用 SAS 6.12 软件进行统计分

析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期有机养分循环利用对土壤有机碳、全氮的影响

田间试验(表 1)表明,13 年不施任何肥料的土壤有机碳并没有明显降低。施用化肥(N、NP、NPK 处理)的土壤有机碳含量有上升的趋势,提高了 2.6%~11.7%,但与试验前相比差异不显著( $P < 0.05$ )。有机养分循环利用,土壤有机碳含量提高了 20.1%~40.9%,显著高于试验前有机碳含量( $P < 0.05$ )。这与稻田生态系统有机碳归还量较大有关。如 CK 处理年际有机碳归还量为 1368.0  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,随着化肥和有机养分循环利用,使有机碳的归还量显著提高。

13 年不施肥(处理 CK)的土壤全 N 下降了 0.11  $\text{g}/\text{kg}$ ,年下降速率为 0.49%。施用氮肥(无论单施 N 肥或 N 肥与 P、PK 肥配施)对土壤全氮含量没有显著影响(表 1),其中长期施用化肥 N 处理的土壤氮库反而略有下降,13 年土壤全氮下降了 0.09  $\text{g}/\text{kg}$ ,这主要是由化肥 N 在土壤中保存率较低造成的。农田生态系统中稻草等有机物的循环利用都能显著提高土壤全氮含量,与试验前相比,土壤全氮含量提高了 0.46~0.60  $\text{g}/\text{kg}$ (平均为 0.52  $\text{g}/\text{kg}$ ),年际平均提高速率为 2.3%。

表 1 有机养分循环利用对土壤有机 C 和 N 含量的影响

Table 1 Effects of recycling use of organic nutrient on the soil carbon and nitrogen

处理 Treatment	有机碳年归还量 Amount of annual return carbon( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	土壤有机碳 SOC ( $\text{g}/\text{kg}$ )	全氮 Total N ( $\text{g}/\text{kg}$ )	土壤 MB-C Soil MB-C ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	土壤 MB-N Soil MB-N ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	MB-C/SOC (%)
CK	1368	15.4 c	1.77 b	811 d	81 d	5.27
C	6367	18.8 b	2.34 a	1363 abc	131 ab	7.25
N	1702	15.8 c	1.79 b	893 cd	89 cd	5.65
N + C	7271	20.1 ab	2.36 a	1321 abc	114 bcd	6.57
NP	1982	16.9 bc	1.98 b	1054 bcd	125 abc	6.24
NP + C	7846	21.3 ab	2.48 a	1622 a	152 a	7.62
NPK	2192	17.2 bc	1.87 b	868 cd	96 bcd	5.05
NPK + C	8436	21.7 a	2.43 a	1525 ab	158 a	7.05

注(Note): 以 1990 年施肥基础数据为协变量,对 2002 年土壤有机碳、全氮数据进行协方差分析。同一列中不同字母表示 5% 的差异显著性,下同。The variance analysis of organic carbon and total N was based on the data of 1990. Different letters in the same column mean significant at 5% level. The same symbol was used for other tables.

农田土壤的有机质是营养元素特别是氮素存在的主要场地,土壤表层中大约 80%~97%<sup>[11]</sup>的氮存在于有机质之中。本研究结果表明,土壤有机碳与全氮有极显著的相关关系( $r = 0.959^{**}$ );且两者都与年际有机碳的归还量呈极显著相关( $r$  分别为  $0.971^{**}$ ;  $0.980^{**}$ )。表明农田生态系统内有机养分循环利用是土壤有机碳和全氮向异化方向发展的最主要的启动因子。

## 2.2 长期有机养分循环利用对红壤稻田土壤微生物碳、氮的影响

土壤 MB-C 代表着土壤微生物量的大小,是土壤有机质中活性较高的部分,对土壤有效养分的影响很大。试验结果(表 1)表明,与 CK 处理相比,稻草等有机养分循环利用(C、N + C、NP + C 和 NPK + C 处理)能显著提高土壤 MB-C 的含量,提高幅度为 47.9%~75.7%,而仅施用化肥对土壤 MB-C 没有显著影响。从相关性分析可知,土壤 MB-C 与年际有机碳的归还量和土壤有机碳有极显著的相关关系( $r = 0.959^{**}$ )。C、N + C、NP + C 和 NPK + C 处理土壤 MB-C 占土壤有机碳的比例(平均为 7.1%),远大于 CK、N、NP 和 NPK 处理所占比例(平均为 5.6%),因此有机养分循环利用提高了土壤有机碳中活性成分所占的比例。

He 等<sup>[12]</sup>研究表明,土壤有机态氮组分中氨基酸态氮、酸解未知态氮的比例较高,可见土壤微生物态氮的活性组分的比例较高,是土壤氮素的重要储备库,对当季作物的氮的吸收影响很大。总体来看,土壤 MB-N 占土壤全氮比例为 4.6%~6.4%(平均为 5.5%),与土壤全氮和 MB-C 有极显著的正相关关系( $r$  分别为  $0.890^{**}$ ;  $0.933^{**}$ )。有机养分循环利用能明显提高土壤 MB-N,施用化肥土壤 MB-N 虽然也有提高了,但与 CK 处理相比,除 NP 处理外差异不显著。另外有机养分循环利用与仅施化肥和不施肥处理相比,平均每公顷稻田土壤微生物多固定 N 92.3 kg,意味着这些处理中较多的氮素通过同化作用转入微生物体内,从而延长氮素在土壤中的周转时间,减少因  $\text{NH}_3$  挥发、 $\text{NO}_3^-$  N 淋失和反硝化脱氮等的氮素损失量,这对调节土壤氮素供应,提高氮肥利用率和减少氮肥对环境的污染有重要的意义。

## 2.3 长期有机养分循环利用土壤氮素矿化特征

据统计,当季水稻从土壤中吸收的氮素占其总吸收量的 50%左右<sup>[3]</sup>,这些氮主要来自水稻生长季节内土壤有机质的矿化和水解;另外可能还有部分秧苗移栽前土壤的无机氮和自生固定氮。可见土壤

氮的矿化量可作为土壤氮素供应能力的重要指标。

总的来看,8 个处理的氮矿化量(6 周)占总 N 的 7.2%~9.6%;矿化产生的  $\text{NH}_4^+$ -N 占矿化量的绝大部分。说明在淹水厌氧条件下矿化首先产生  $\text{NH}_4$ -N。普遍认为,土壤矿化氮与土壤全氮、全碳、微生物态氮呈正相关关系<sup>[13]</sup>。本研究分析结果表明,土壤 6 周矿化氮量与土壤全 N、有机碳有显著正相关关系(相关系数分别为  $0.888^{**}$ ,  $0.953^{**}$ ),与 MB-N 也有显著的正相关关系( $r = 0.924^{**}$ )。这与风干土样释放出大量的微生物态氮,矿化量增大有关,大田试验中稻田的落干和淹水过程也会导致这种现象发生。

施肥模式不仅对土壤氮素积累有显著影响,而且对土壤氮素矿化能力的异化也有明显促进作用(图 1)。施氮肥对提高土壤供氮能力作用不大,虽然随着氮肥与磷、钾肥配合有增加趋势,但是其增幅较小,与 CK 相比 6 周土壤氮矿化量提高幅度平均为 9.4%;而有机养分循环利用,则明显提高土壤氮矿化量,平均增幅达 55.0%,土壤氮素的矿化速率,培养 1 至 2 周后提高了 65.2%。可见土壤氮库和有机碳矿化速率的积累,及其活性成分的提高对土壤氮的矿化能力有显著的影响。

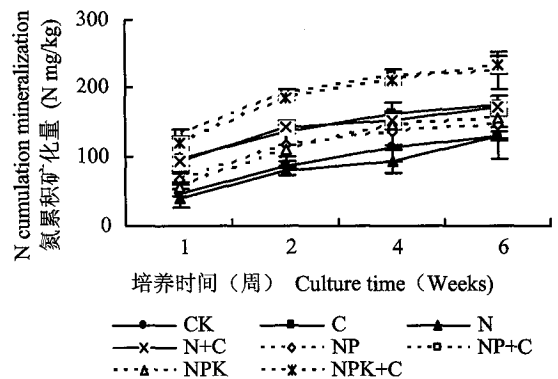


图 1 培养期间土壤 N 素的累积矿化量

Fig.1 Cumulative mineralization N during incubation

## 2.4 长期有机养分循环利用对植株干物重及吸氮量的影响

表 2 看出,有机养分循环利用的植株干物重和吸氮量都高于单施化肥和不施肥处理。与长期不施肥的土壤供氮量相比,长期施用氮肥和氮磷钾肥土壤供氮量提高幅度分别为 2.1%和 6.2%,而有机养分循环利用提高幅度为 33.7%~89.0%,随着有机养分循环利用和氮磷钾肥配施,土壤供氮量提高幅

度呈上升的趋势。

从植株吸收氮量变化规律来看,与土壤的一些指标有相同的变化趋势。整株吸氮量与土壤全氮、

土壤 MB-N 和氮矿化量有极显著的相关关系(表 3),可见土壤 MB-N 和氮矿化量也能较好地表征土壤的供氮能力。

表 2 长期有机养分循环利用对水稻干物重及吸氮量的影响

Table 2 Effect of long-term organic matter recycling on dry weight and nitrogen uptake of rice

处理 Treatment	生物量 Biomass(g/pot, DW)		吸氮量 N uptake(g/pot)	
	地上部 Shoot	整株 Whole plant	地上部 Shoot	整株 Whole plant
CK	18.7 bc	27.0 b	0.217 cd	0.291 c
C	19.9 bc	29.1 b	0.285 bc	0.389 bc
N	17.1 c	26.5 b	0.170 d	0.296 c
N + C	20.7 bc	30.5 b	0.321 ab	0.458 ab
NP	21.9 b	31.6 b	0.215 cd	0.342 c
NP + C	21.9 b	31.4 b	0.341 ab	0.484 ab
NPK	19.3 bc	29.0 b	0.188 d	0.309 c
NPK + C	27.5 a	38.3 a	0.395 a	0.550 a

表 3 土壤全氮, MB-N 和可矿化氮与植株生物量和吸氮量的相关关系

Table 3 Correlation of total nitrogen, MB-N, mineralizable nitrogen with biomass and nitrogen uptake

项目 Item	土壤全氮 Soil TN	土壤微生物生物量氮 Soil MB-N	可矿化氮量 N mineralization	
			1 周 1 week	6 周 6 week
地上部生物量 Biomass of shoot(g/pot)	0.668	0.836**	0.734*	0.810*
整株生物量 Biomass of whole plant(g/pot)	0.662	0.831*	0.719*	0.810*
地上部吸氮量 Total N in shoot(g/pot)	0.929**	0.850**	0.932**	0.914**
整株吸氮量 Total N in whole plant	0.928**	0.883**	0.933**	0.935**

$r_{0.05} = 0.707$ ;  $r_{0.01} = 0.834$

### 3 结论

1) 15 年的定位试验研究表明,红壤稻田土壤全氮、有机碳、微生物生物量和氮的矿化量等指标能较好的反映土壤供氮能力的变化。

2) 长期施用氮肥或与磷钾肥配施,土壤供氮能力提高甚微,对土壤氮库积累及活性成分的提高也没有显著作用。

3) 有机养分循环利用配合化肥施用不仅能显著提高土壤氮库的积累及活性成分,还显著提高土壤的供氮能力,延长氮素在稻田生态系统内周转时间、提高氮肥利用效率,减少环境的污染,是较好的施肥方式。

### 参考文献:

[1] 包雪梅,张福锁,马文奇.我国作物秸秆资源及养分循环利用研究[J].中国农业科技导报,2003,5(增刊): 14-17.  
Bao X M, Zhang F S, Ma W Q. The resources of crop straw and their recycling nutrient in China[J]. Review of China Agric. Sci. Tech., 2003, 5(Suppl.): 14-17.

[2] 朱兆良.我国氮肥的施用现状、问题和对策.中国农业持续发展中的问题[M].南昌:江西出版社,1998.25-31.  
Zhu Z L. Countermeasure, problem and actuality of applied N fertilizer in China. Problem of agricultural sustainable development in China [M]. Nanchang: Jiangxi Press, 1998. 25-31.

[3] 朱兆良.土壤氮素的矿化和供应.我国土壤氮素研究工作的现状与展望[M].北京:科学出版社,1986.14-27.  
Zhu Z L. Supplying and mineralization of nitrogen in soil. Prospect and actuality of nitrogen research in China [M]. Beijing: Science Press, 1986. 14-27.

[4] 朱兆良.我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J].土壤,1985,17(1): 1-9.  
Zhu Z L. Progress in studies on soil nitrogen supplying capacity and fate of applied fertilizer nitrogen in China [J]. Soils, 1985, 17(1): 1-9.

[5] 唐耀先,张继宏,须湘成,等.土壤基础供氮能力和肥料氮素利用率及其应用的研究[J].土壤通报,1986,27(5): 204-208.  
Tang Y X, Zhang J H, Xu X C *et al.* Studying for soil based nitrogen supplying capacity, N using efficiency and use [J]. Chinese J. of Soil Sci., 1986, 27(5): 204-208.

[6] Bonder A T, Schniirer J, Rosswall T. Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable N in soil from long-term field experiments [J]. Soil Sci. Biochem., 1988, 20(4): 447-452.

- [7] Myrold D D. Relationship between microbial biomass nitrogen and nitrogen availability index[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 1047-1049.
- [8] 王淑平,周广胜,孙长占,等.土壤微生物氮的动态及其生物有效性研究[J].*植物营养与肥料学报*,2003,9(1): 87-90.  
Wang S P, Zhou G S, Sun C Z *et al.* The dynamic of soil microbial biomass nitrogen and its biological availability[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003,9(1): 87-90.
- [9] 李慧琳,韩勇,蔡祖聪.上海地区水稻土氮素矿化及其模拟[J].*土壤学报*,2004,41(4): 503-510.  
Li H L, Han Y, Cai Z C. Nitrogen mineralization in paddy soils Shanghai region under anaerobic conditions: Dynamics and model fitting[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2004,41(4): 503-510.
- [10] Wu J, Joergensen R G, Birgit P *et al.* Measurement of soil microbial biomass by fumigation-extraction an automated procedure[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1990,22 (8): 1167-1169.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所.中国土壤[M].北京:科学出版社,1978.382-383.  
Institute of Soil Science, CAS. *Soils in China*[M]. Beijing: Science Press, 1978.382-383.
- [12] He Z L, Wu J, O'Donnel A G *et al.* Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture[J]. *Biol. Fert. Soils*, 1997,24: 421-428.
- [13] Janssen B H. Nitrogen mineralization in relation to C/N ration and decomposability of organic materials[J]. *Plant Soil*, 1996,181: 39-45.