植物营养与肥料学报 2012,18(6):1293-1302
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同有机物及其堆肥与化肥配施对小麦生长及氮素吸收的影响

郁 洁,蒋 益,徐春淼,沈其荣,徐阳春*
(南京农业大学资源与环境学院,江苏省固体有机废弃物资源化高技术研究重点实验室,江苏南京 210095)

摘要: 采用^{15}N示踪技术,选用水稻土和灰潮土在宜兴进行小麦盆栽试验,研究了稻草、猪粪及其堆肥与化肥配施对作物生长及氮素吸收的影响。结果表明,在水稻土和灰潮土上,不同有机物及其堆肥与化肥配施分别比单施化肥增产4.46%~24.82%和1.01%~20.53%,稻草堆肥和猪粪堆肥配施化肥处理籽粒产量分别高于稻草和猪粪直接与化肥配施处理。稻草和猪粪堆肥后更利于作物吸收氮素,增加植物体内^{15}N累积。两种土壤上^{15}N回收率表现为相同配比的堆肥处理>未堆肥处理>单施化肥处理。随着小麦生育期的推进,土壤微生物量氮和矿质态氮含量均呈下降趋势,稻草和猪粪处理的微生量氮含量始终高于稻草堆肥和猪粪堆肥处理。有机无机肥配施处理土壤矿质态氮在小麦生育前期低于单施化肥,成熟期则高于单施化肥。整个生育期中,稻草堆肥和猪粪堆肥处理土壤矿质态氮含量分别高于稻草和猪粪处理。因此,有机物堆肥后与化肥配施更有利于提高产量,促进作物对氮素的吸收利用。

关键词: 小麦;有机无机肥配施;^{15}N回收率;微生物量氮;矿质态氮
中图分类号: S512.1.062　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1293-10

Effects of combined application of inorganic fertilizer with straw and pig slurry and their compost on wheat growth and nitrogen uptake

YU Jie, JIANG Yi, XU Chun-miao, SHEN Qi-rong, XU Yang-chun*
(*College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University/ Jiangsu Key Laboratory for Solid Organic Waste Utilization, Nanjing 210095, China*)

Abstract: Effects of combined application of inorganic fertilizer with straw, pig slurry, straw compost and pig slurry compost on wheat growth and nitrogen uptake were studied in paddy soils and gray alluvial soils. A pot experiment was carried out in paddy soils and gray alluvial soils in Yixing based on ^{15}N isotope tracer. The results show that compared to the inorganic N fertilization treatments, the combined applications of organic and inorganic fertilizers increase wheat yields by 4.46%-24.82% and 1.01%-20.53% in paddy soils and gray alluvial soils, respectively. Wheat yields under the combined applications of the straw compost and the pig slurry compost are higher than those of the combined applications of straw and pig slurry, respectively. The combined applications of the straw compost and the pig slurry compost stimulate N uptake and improve N accumulation of wheat. The treatments of the straw compost and the pig slurry compost have the highest ^{15}N recovery rates, while the ^{15}N recovery rates of the inorganic N fertilization the treatments are the lowest. Soil microbial biomass nitrogen under the combined application of straw and pig slurry is always higher than that under the combined application of the straw compost and the pig slurry compost during wheat growth season. At the tillering stage, soil mineral nitrogen under the inorganic N fertilization treatment is higher, and it is lower in the later growing stages. During the whole growing period, soil mineral nitrogen amounts under the combined applications of the straw compost and the pig

收稿日期: 2012-03-24　　**接受日期:** 2012-07-03
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201103004);国家科技部"973"项目(2007CB109304)资助。
作者简介: 郁洁(1988—),女,江苏姜堰人,硕士研究生,主要从事有机肥研究。E-mail: yjnj88@126.com
*通讯作者 Tel: 025-84396824, E-mail: ycxu@njau.edu.cn

slurry compost are higher than those under the combined applications of straw and slurry. In summary, the combined application of the composts and inorganic fertilizer is more conducive to improving crop yields and plant N uptake.

Key words: wheat; combined application of organic and inorganic fertilizer; ^{15}N recovery rate; microbial biomass nitrogen; mineral nitrogen

我国有机肥源丰富,其中数量最多的是畜禽粪便和作物秸秆。据黄鸿翔等[1]的估算,2002 年全国有机肥料资源总量约 48.8×10^8 t,其中畜禽粪便资源量为 20.4×10^8 t。我国每年约产生 7×10^8 t 秸秆,居世界首位[2],然而其中很多被直接焚烧掉,既造成了资源的浪费,降低了土壤肥力,又污染了空气。因此,对秸秆和畜禽粪便进行充分利用是节约资源和减少污染的重要措施。

长期以来,我国对秸秆的研究多集中于单一还田方式对作物产量、土壤理化性质等的影响方面,且对秸秆的利用大多采用直接还田方式。高祥照等[3]研究发现我国秸秆还田方式约 3/4 为直接还田,仅 1/4 为堆沤还田。劳秀荣等[4]报道秸秆直接还田与化肥配施能够改善土壤结构,提高土壤养分含量。黄继川等[5]发现与对照和单施无机肥相比,施用玉米秸秆堆肥能够提高芥菜生物量,增加根际土壤细菌、放线菌和真菌的数量。李录久等[6]的研究结果表明,将小麦秸秆粉碎后直接还田,在用量为 3000 和 6000 kg/hm^2 时,当季小麦分别比单施化肥减产 7.16% 和 4.00%。盛良学等[7]将稻草切碎后还田,发现第一年玉米的生物学产量和经济产量均有所下降。因此,有必要寻找出更易于促进作物高产的秸秆还田方式。目前对畜禽粪便的研究现状与秸秆利用类似,绝大多数研究都是利用堆肥腐熟粪便或厩肥与无机氮肥配合施用,孟琳等[8]的大田试验研究结果表明,猪粪堆肥与化肥配施能显著提高水稻籽粒产量、每穗实粒数以及氮素养分效率。高菊生等[9]选用腐熟牛粪作为有机肥,发现有机无机肥连续配施,能持续水稻高产稳产,19 年稻谷总产平均比单施化肥高 14.5%。关于猪粪和猪粪堆肥两者之间肥效比较的研究尚不多见,而这方面的研究对农业生产具有重要的指导意义。本试验采用 ^{15}N示踪技术,通过盆栽模拟生物试验研究了秸秆和秸秆堆肥、猪粪和猪粪堆肥与化肥配施的协同效应及其对氮素利用率的影响,以期阐明秸秆、猪粪直接施用影响当季作物生长的机制,为合理利用农业废弃物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验于 2010 年 11 月至 2011 年 5 月在宜兴市江苏省固体有机废弃物资源化高技术研究重点试验室进行。供试土壤为粘质水稻土和沙壤质灰潮土,分别采自江苏省宜兴市和江阴市,基本理化性质见表 1。土壤风干,过 2 mm 筛后装入陶瓷盆(外径 34 cm,内径 27.5 cm,深 28.5 cm),每盆装土 10 kg。供试小麦品种为扬麦 13,购自江苏省农科院明天种业公司。

供试肥料:稻草、新鲜猪粪、稻草堆肥和猪粪堆肥四种,均由江苏田娘农业科技有限公司提供,其基本理化性质见表 2。磷肥和钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾。氮肥为^{15}N 标记尿素,^{15}N 丰度为 40%,购自上海化工研究所上海稳定性同位素工程技术研究中心。

1.2 试验设计

盆栽试验设 9 个处理:1) 100% ^{15}N 尿素(IF);2) 80% ^{15}N 尿素 + 20% ^{14}N 稻草(S1);3) 80% ^{15}N 尿素 + 20% ^{14}N 稻草堆肥(SC1);4) 80%

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of the tested soils

土壤类型 Soil type	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
水稻土 Paddy soil	12.7	1.89	87.5	109	6.79
灰潮土 Gray alluvial soil	15.6	2.26	21.0	115	4.88

表 2　供试有机肥的理化性质

Table 2　Chemical and physical properties of organic fertilizers

有机肥种类 Organic fertilizer	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碳氮比 C/N	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)
稻草 Straw	377.6	17.79	21.23	3.16	24.54
稻草堆肥 Straw compost	266.1	34.04	7.82	12.02	8.86
猪粪 Pig slurry	396.1	37.22	10.61	26.12	22.12
猪粪堆肥 Pig slurry compost	186.3	24.04	7.75	23.41	11.82

^{15}N 尿素 +20% ^{14}N 猪粪(M1)；5)80% ^{15}N 尿素 + 20% ^{14}N 猪粪堆肥(MC1)；6)70% ^{15}N 尿素 + 30% ^{14}N 稻草(S2)；7)70% ^{15}N 尿素 + 30% ^{14}N 稻草堆肥(SC2)；8)70% ^{15}N 尿素 + 30% ^{14}N 猪粪(M2)；9)70% ^{15}N 尿素 + 30% ^{14}N 猪粪堆肥(MC2)。每个处理重复 12 次，随机区组排列。氮、磷、钾用量为 N 0.15 g/kg，P_2O_5 0.12 g/kg，K_2O 0.12 g/kg，每盆等养分量处理，以氮为准，扣除有机肥中磷、钾后用化肥补足，所有肥料均作基肥一次施入，肥料与土壤混合均匀后装盆。小麦种子用 15% H_2O_2 灭菌，清水冲洗，晾干后播种。每盆 6 穴，每穴 10 粒，30 d 后间苗至每穴 6 株，小麦生长期间通过称重法维持盆钵中土壤水分含量在田间持水量的 70% 左右。

1.3　样品采集与分析

1.3.1 样品采集　小麦播种后分别于第 106 d(分蘖盛期)、135 d(拔节孕穗期)、160 d(穗期)及第 185 d(成熟期)随机选择 3 盆进行破坏性采样，将盆中土壤倒出混合均匀后取样装入塑料自封袋，置 4℃ 冰箱保存。所有新鲜土样于 48 h 内完成矿质氮和微生物量氮的提取，同时测定鲜土含水量。成熟期同时采集植物样品，沿土壤表面剪下植株地上部，将籽粒、秸秆、叶片分开称量鲜重后于 105℃ 杀青 30 min 后，70℃ 烘干至恒重，称重后用粉碎机磨细装入自封袋保存。

1.3.2 样品分析　土壤和植物样品全氮测定参照鲍士旦[10]主编的《土壤农化分析》中的方法，消煮后，冷却定容，定量转移至蒸馏瓶，加入 10 mol/L NaOH 用凯氏蒸馏法定氮。

土壤微生物量氮根据 Brookes 等[11]和 Vance 等[12]的方法，采用氯仿熏蒸灭菌提取法测定，具体步骤如下：称取 25 g 新鲜土样 6 份，3 份放入真空干燥器中，干燥器底部放置装有无醇氯仿的小烧杯，抽真空使氯仿沸腾 5 min，关闭活塞避光 25℃ 培养 24 h 后取出小烧杯，反复抽真空 3 ～ 5 次以排尽氯仿。另外 3 份放入另一真空干燥器中，不熏蒸，避光 25℃ 培养 24 h。培养结束后加入 100 mL 0.5 mol/L K_2SO_4，振荡 30 min 后过滤，滤液定量转移至 100 mL 三角瓶，每个三角瓶加入 2 mL 浓 H_2SO_4 后转入 60℃ 水浴锅，待三角瓶内液体体积约为 20 mL 时取出，加入 3 mL 浓 H_2SO_4 和 1 mL $CuSO_4$，盖上小漏斗后置于数显恒温电热板上消煮，先 100℃ 消煮 1 h 后逐渐升温至 280℃，待消煮液呈现淡蓝色后继续消煮半小时。消煮液转移至蒸馏瓶，加入 10 mol/L NaOH 蒸馏。

土壤矿质态氮参考 Hart 等[13]的方法略作改动，称取 40 g 新鲜土样加入 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液 100 mL，25℃ 恒温振荡 1 h 后过滤，滤液定量转移至蒸馏瓶，加入 Devarda 合金(含 Cu 50%，Al 45%，Zn 5%)0.8 g 和 120 g/L MgO 悬浊液 10 mL 后进行蒸馏。

各样品凯氏定氮后取馏出液用 0.1 mol/L 1/2 H_2SO_4 酸化至 pH 为 2 ～ 3 左右，转移至瓷蒸发皿，放置 65℃ 水浴锅上，当溶液蒸发至约 2 mL 时装入 2 mL 离心管，4℃ 保存，送至中国科学院南京土壤研究所分析测试中心测定 ^{15}N。

1.4　数据处理与统计分析

所有试验数据采用 SPSS16.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行处理与统计分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理对小麦产量的影响

水稻土和灰潮土两种土壤上有机无机肥配施处理的小麦籽粒产量分别为 27.98 ～ 33.43 g/pot 和 36.65 ～ 43.73 g/pot，均高于单施化肥处理的 26.78 和 36.28 g/pot(图 1)。其中水稻土上除配施 20% 稻草的处理(S1)外，其余有机无机肥配施处理均与单施化肥处理差异显著；灰潮土上除配施 20% 稻草(S1)和 20% 猪粪堆肥(MC1)处理外，其余各有机无

机肥配施处理与单施化肥处理差异显著。两种土壤上稻草和猪粪堆肥与化肥配施处理的小麦籽粒产量均呈现出较稻草和猪粪直接与化肥配合处理高的趋势。其中,水稻土上 SC1 和 SC2 处理分别比 S1 和 S2 处理增产 8.88% 和 4.60%,配施 20% 稻草和稻草堆肥处理间差异达显著性水平,MC1 和 MC2 处理籽粒产量分别显著高于 M1 和 M2 处理,增产率为 7.83% 和 6.38%;灰潮土上 SC1 和 SC2 处理分别比 S1 和 S2 处理增产 10.49% 和 4.94%,MC1 和 MC2 处理分别比 M1 和 M2 处理增产 10.85% 和 8.20%,除配施 30 % 稻草(S2)和稻草堆肥(SC2)处理差异不显著外,其余各配施相同比例的有机物料堆肥与未堆制的有机物料之间均达显著性差异水平。可见,两种土壤上,稻草和猪粪两种有机物料经堆肥腐熟后再与化肥配合施用更有利于当季小麦的生长。

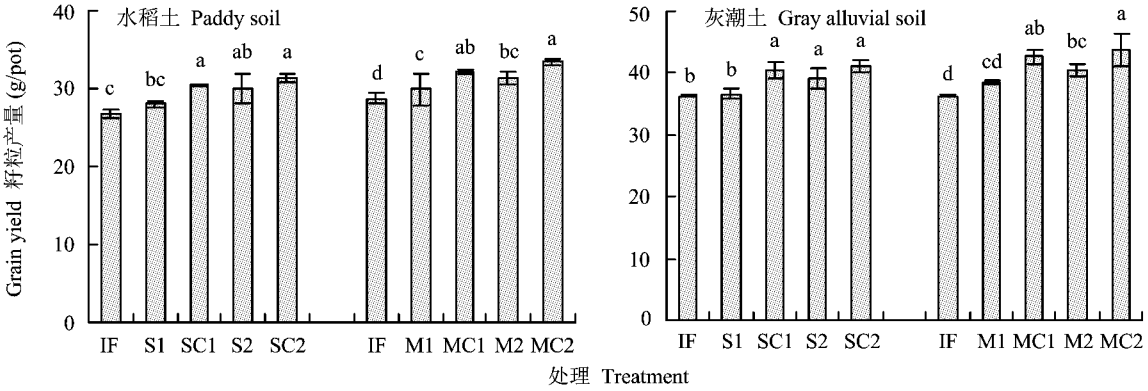

图1 不同施肥处理下小麦籽粒产量

Fig. 1 Wheat grain yields under different fertilizer treatments

[注(Note):柱上不同字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments at $P<0.05$ level.]

2.2 小麦成熟期氮素吸收量和^{15}N 累积量

两种土壤上小麦成熟期籽粒氮素吸收量为 0.64 ~ 1.22 g/pot(表3),均显著高于叶片和秸秆的氮素吸收总量。水稻土上有机无机肥配施处理的小麦籽粒氮素累积量均显著高于单施化肥处理,增加幅度为 7.81% ~ 40.63%;而灰潮土上小麦籽粒氮素累积量仅猪粪和猪粪堆肥与无机肥配施处理显著高于单施化肥,稻草及其堆肥配施化肥处理与单施化肥间差异不显著。水稻土上 SC1 和 SC2 处理小麦籽粒氮素吸收量分别比 S1 和 S2 处理高 15.94% 和 11.25%,其中 SC2 与 S2 差异显著;MC1、MC2 处理籽粒氮素吸收量分别比 M1、M2 处理高 9.76% 和 11.39%。灰潮土上 SC1 和 SC2 处理小麦籽粒氮素吸收量分别比 S1 和 S2 处理高 14.58% 和 9.68%,MC1 和 MC2 处理籽粒氮素吸收量分别比 M1 和 M2 处理增加 12.96% 和 4.46%,其中 MC1 与 M1 差异显著。叶片和秸秆的氮素累积量表现出同样的变化趋势,两种土壤上单施化肥处理的氮素累积量均最低,相同配比 SC 处理和 MC 处理小麦叶片氮素累积量均显著高于 S 和 M 处理;除水稻土上 S1 与 SC1 处理和灰潮土上 M1 与 MC1 处理之间差异不显著外,其余相同配比 SC 处理和 MC 处理小麦秸秆氮素累积量均显著高于 S 和 M 处理。

两种土壤上小麦成熟期籽粒^{15}N 累积量为 23.39 ~ 49.77 mg/pot,水稻土上有机无机肥配施处理小麦籽粒^{15}N 累积量显著高于单施化肥(表3),灰潮土上仅 MC1 处理与化肥单施差异显著。相同配施比例下,两种土壤上 SC 处理小麦籽粒^{15}N 累积量显著高于 S 处理,增幅为 10.58% ~ 15.26%;MC 处理小麦籽粒氮素吸收量和^{15}N 累积量均高于 M 处理,增幅为 1.28% ~ 6.24%。配施 80% 化肥处理小麦籽粒^{15}N 累积量整体较配施 70% 化肥的处理低。小麦叶片和秸秆氮素吸收量和^{15}N 累积量亦表现出同样的变化趋势。可见,稻草和猪粪这两种有机物料经堆肥腐熟后与化学氮肥配合施用更易于促进小麦对化肥氮的吸收利用,其中,稻草堆肥腐熟后效果更显著。

2.3 小麦成熟期植株^{15}N 回收率

两种土壤上小麦成熟期植株^{15}N 回收率为 22.41% ~ 72.54%(表4),有机无机肥配施处理的

表 3　不同施肥处理小麦成熟期氮素吸收量和^{15}N 累积量

Table 3　Nitrogen uptake and ^{15}N accumulation at the harvesting stage of wheat under different treatments

土壤 Soil	处理 Treatment	氮素吸收量 N uptake (g/pot)			^{15}N 累积量 ^{15}N uptake (mg/pot)		
		籽粒 Grain	叶片 Leaf	秸秆 Straw	籽粒 Grain	叶片 Leaf	秸秆 Straw
水稻土 Paddy soil	IF	0.64 ±0.02 d	0.15 ±0.003 f	0.04 ±0.006 d	23.39 ±0.73 c	4.59 ±0.09 e	1.08 ±0.08 b
	S1	0.69 ±0.01 c	0.17 ±0.005 ef	0.05 ±0.002 d	26.35 ±0.52 b	4.93 ±0.15 de	1.09 ±0.05 b
	SC1	0.80 ±0.05 bc	0.19 ±0.007 cd	0.06 ±0.016 bcd	30.37 ±2.17 a	5.21 ±0.21 cd	1.29 ±0.23 b
	S2	0.78 ±0.03 c	0.17 ±0.018 ef	0.05 ±0.008 cd	26.44 ±0.94 b	4.61 ±0.17 e	1.12 ±0.13 b
	SC2	0.89 ±0.04 a	0.20 ±0.007 bc	0.07 ±0.011 bc	30.40 ±1.25 a	5.52 ±0.47 bc	1.48 ±0.15 b
	M1	0.82 ±0.03 abc	0.18 ±0.005 de	0.06 ±0.008 d	29.71 ±1.63 a	4.64 ±0.11 e	1.38 ±0.21 b
	MC1	0.90 ±0.04 a	0.22 ±0.009 b	0.06 ±0.014 ab	30.09 ±0.25 a	5.71 ±0.24 bc	1.66 ±0.33 b
	M2	0.79 ±0.03 bc	0.21 ±0.010 bc	0.06 ±0.002 bcd	28.51 ±1.23 ab	5.60 ±0.27 bc	1.25 ±0.02 b
	MC2	0.88 ±0.05 ab	0.26 ±0.002 a	0.08 ±0.002 a	30.29 ±1.74 a	7.40 ±0.06 a	2.04 ±0.04 a
灰潮土 Gray alluvial soil	IF	0.93 ±0.01 c	0.26 ±0.011 c	0.06 ±0.003 c	40.72 ±0.36 b	11.13 ±0.46 e	2.06 ±0.11 e
	S1	0.96 ±0.05 c	0.31 ±0.001 b	0.07 ±0.003 c	41.39 ±1.93 b	12.59 ±0.03 cd	2.25 ±0.08 de
	SC1	1.10 ±0.03 bc	0.38 ±0.013 a	0.09 ±0.003 bc	45.77 ±0.48 ab	14.38 ±0.47 a	2.75 ±0.1 cd
	S2	0.93 ±0.01 c	0.26 ±0.010 c	0.07 ±0.002 c	39.24 ±0.60 b	10.18 ±0.30 f	2.21 ±0.07 de
	SC2	1.02 ±0.04 bc	0.32 ±0.009 b	0.09 ±0.007 ab	43.66 ±1.67 b	11.91 ±0.34 de	2.38 ±0.09 cde
	M1	1.08 ±0.02 b	0.34 ±0.010 b	0.09 ±0.018 bc	46.87 ±0.84 ab	13.32 ±0.38 bc	3.28 ±0.63 ab
	MC1	1.22 ±0.02 a	0.37 ±0.006 a	0.11 ±0.004 bc	49.77 ±0.62 a	13.69 ±0.23 ab	3.47 ±0.16 a
	M2	1.12 ±0.02 a	0.34 ±0.013 b	0.09 ±0.005 bcd	46.52 ±0.68 ab	11.28 ±0.41 e	2.38 ±0.12 cde
	MC2	1.17 ±0.25 a	0.37 ±0.014 a	0.11 ±0.003 a	48.54 ±4.79 ab	11.63 ±0.43 e	2.87 ±0.09 bc

注(Note)：同列数据后不同字母表示同一土壤上不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters within a column are significantly different among different treatments at $P<0.05$ level for the same type of soil.

^{15}N回收率均显著高于单施化肥处理,增幅为26.20%～104.2%。相同比例配施稻草堆肥和猪粪堆肥处理^{15}N 回收率均高于配施稻草和猪粪处理,其中水稻土上 SC2 与 S2 处理、MC2 与 M2 处理之间,灰潮土上 SC1 与 S1 处理、SC2 与 S2 处理之间均达到差异显著水平。配施 70% 化肥处理小麦成熟期^{15}N 回收率高于配施 80% 化肥处理,说明有机肥的施入使作物生长前期的氮素损失减少,促进了作物对无机肥料的吸收,提高了土壤供氮能力,且有机物经堆肥后施用更利于作物吸收氮素。

2.4　小麦不同生育期氮素供应

2.4.1 不同生育期土壤微生物生物量氮的变化　土壤微生物生物量氮是土壤氮素的重要储备库,也是土壤氮素转化中重要的“源”和“库”,研究土壤微生物生物量氮的变化有助于考察土壤的供氮能力。由图 2 可以看出,两种土壤上微生物生物量氮的变化趋势基本一致,播种后 106 d(分蘖盛期)时含量最高。水稻土上土壤微生物生物量氮含量为 107.9～179.0 mg/kg,其中 S1 和 S2 处理土壤微生物生物量氮含量分别比 SC1 和 SC2 处理高 9.20% 和 17.90%,M1 和 M2 处理土壤微生物生物量氮含量分别比 MC1 和 MC2 处理高 6.41% 和 10.36%；灰潮土上土壤微生物生物量氮含量略低,为 70.13～135.6 mg/kg,其中 S1 和 S2 处理分别比 SC1 和 SC2 处理高 12.80% 和 15.57%,M1 和 M2 处理分别比 MC1 和 MC2 处理高 11.34% 和 10.84%,除水稻土上 M1 与 MC1 处理以外,其余各相同配比施用有机物及其堆肥处理之间均达显著性差异水平。播种后 135 d (拔节孕穗期)时土壤微生物生物量氮含量迅速下降,最高仅为 91.69 mg/kg,此后随着小麦生育

表4 不同施肥处理小麦成熟期^{15}N回收率

Table 4 ^{15}N recovery rate at the harvesting stage of wheat under different treatments

处理 Treatment	^{15}N回收率 ^{15}N recovery rate (%)	
	水稻土 Paddy soil	灰潮土 Gray alluvial soil
IF	22.41 ±1.99 e	43.43 ±0.56 f
S1	32.63 ±0.65 d	54.81 ±2.24 e
SC1	35.55 ±4.17 cd	64.16 ±1.02 c
S2	36.89 ±1.02 c	59.07 ±0.77 d
SC2	43.91 ±0.91 ab	66.93 ±2.18 bc
M1	36.43 ±1.25 c	63.98 ±1.87 c
MC1	36.67 ±1.20 c	67.53 ±0.46 bc
M2	40.73 ±1.29 b	70.56 ±1.63 ab
MC2	45.77 ±1.90 a	72.54 ±6.20 a

注(Note): ^{15}N回收率=植株吸收的^{15}N含量/施入土壤的^{15}N含量 ^{15}N recovery rate = Plant ^{15}N accumulation/content of ^{15}N applied into soil. 同列数据后不同字母表示不同处理间在$P<0.05$水平差异显著 Values followed by different letters within a column are significantly different among different treatments at $P<0.05$ level.

期的推进,其含量缓慢下降;至播种后185 d(成熟期)时仅为13.33～38.78 mg/kg。整个生育期中有机无机肥配施处理土壤微生物生物量氮含量均高于单施化肥处理,其中稻草和猪粪直接与化肥配施的处理土壤微生物生物量氮含量分别高于稻草堆肥和猪粪堆肥配施化肥处理,且随着稻草和猪粪施用量的增加土壤微生物生物量氮含量提高。说明新鲜有机物料的加入,促进了土壤微生物对化肥氮的生物固持。

2.4.2 不同生育期土壤矿质态氮变化 土壤矿质态氮包括NH_4^+-N和NO_3^--N,是可以被作物直接吸收利用的主要氮素形态,其含量变化直接影响作物生长发育时的氮素营养状况。由图3可见,播种106 d(分蘖盛期)时单施化肥处理土壤矿质态氮含量显著高于有机无机肥配施处理,随着小麦生育期的推进,至播种后160 d到播种后185 d,有机无机肥配施处理土壤矿质态氮含量均高于单施化肥。两种土壤上,所有处理土壤矿质态氮含量在小麦播种后106 d时最高,为17.4～43.6 mg/kg,这一时期配施稻草堆肥和猪粪堆肥处理土壤矿质态氮含量比配施稻草和猪粪处理高11.01%～29.03%,除水稻土上

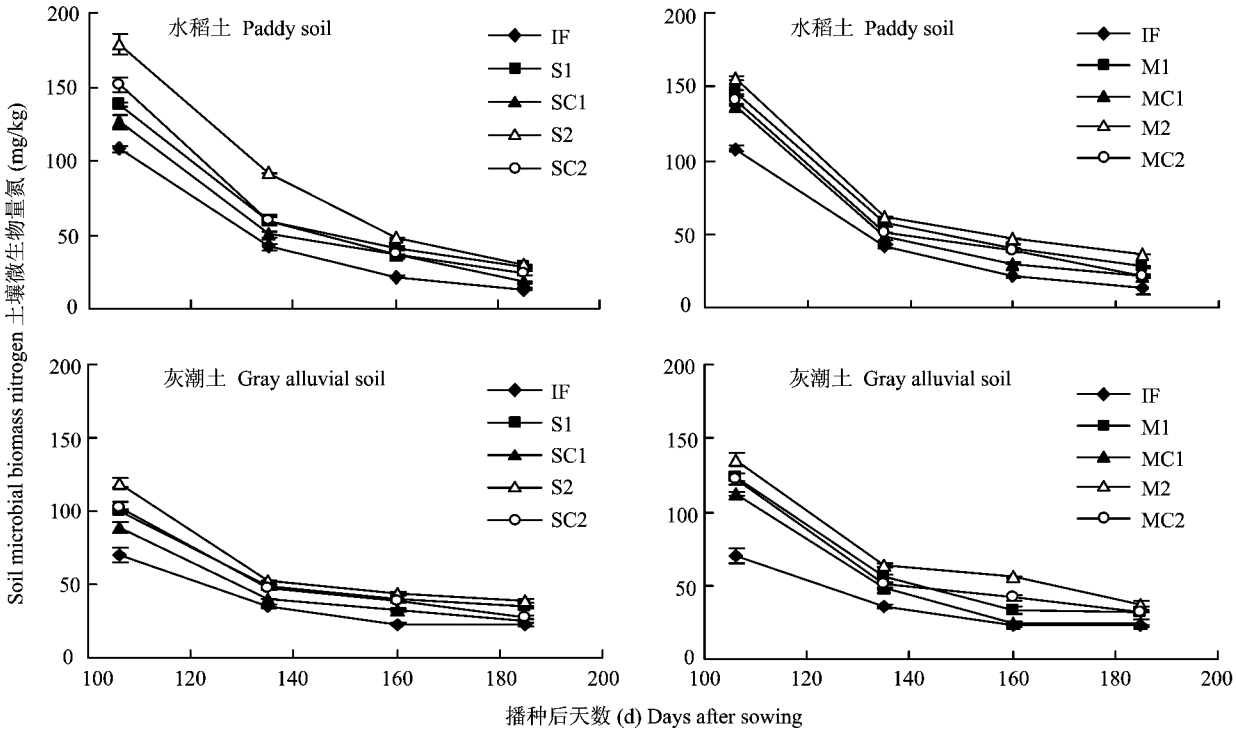

图2 不同处理土壤微生物生物量氮动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil microbial biomass nitrogen under different fertilizer treatments

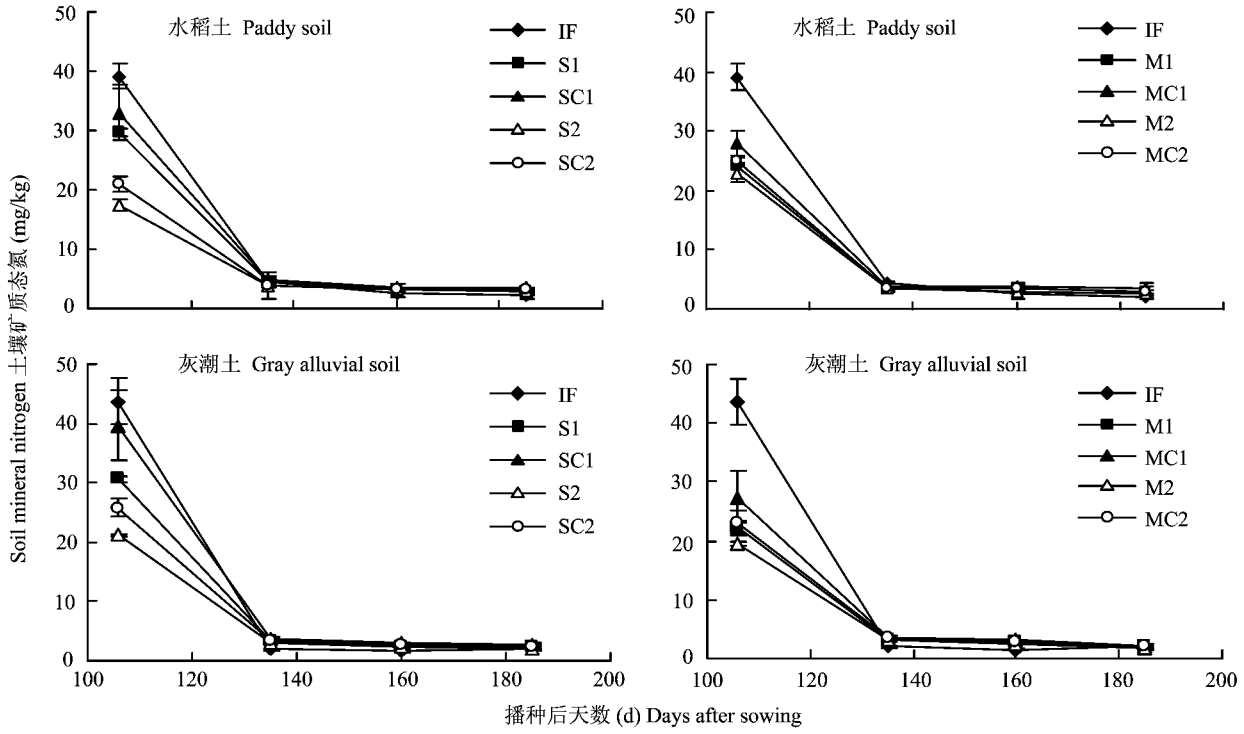

图 3　不同处理土壤矿质态氮动态变化

Fig. 3　Dynamics of soil mineral nitrogen under different fertilizer treatments

M2 与 MC2 处理和灰潮土上 M1 与 MC1 处理之间差异不显著外，其余相同比例配施有机物与有机物堆肥处理之间均达显著性差异；至播种后 135 d（拔节孕穗期）时土壤矿质态氮含量迅速下降至 5 mg/kg 以下。整个生育期中，SC 处理和 MC 处理土壤矿质态氮含量均高于 S 和 M 处理。可见，有机物堆肥的施入能够调节土壤氮素供应，使其更加稳定，从而更好地满足作物生长各个时期的氮素需求，促进作物优质高产。

3　讨论与结论

许多研究[14-16]表明，有机无机肥配施能够提高作物产量，本试验结果亦表明不同有机无机肥料配施均能提高小麦产量。本试验中与单施化肥相比，有机无机肥配施增加了作物对氮素的吸收，提高了^{15}N 回收率，这一结果与前人研究相一致[17-18]。有机肥料的施入促进了土壤微生物的大量繁殖，增加了土壤对无机肥料的固持，减少了作物生育前期的化肥损失，从而使得成熟期作物体内氮素吸收量、^{15}N 累积量及^{15}N 回收率均高于单施化肥处理。本试验中 SC 处理和 MC 处理增产效果比 S 和 M 处理更好，是因为猪粪和稻草经堆肥后 C/N 比下降（表 2），导致其微生物对矿质态氮的固持量低于 SC 和 MC 处理，能够被植物直接吸收利用的矿质态氮增多，从而促进小麦生长，增加小麦产量，提高了该处理小麦成熟期体内的氮素吸收量、^{15}N 累积量及^{15}N回收率。王岩等[19]和唐玉霞等[20]研究亦表明，高 C/N 比会增加土壤微生物对矿质态氮的固持，因此秸秆直接还田的残效问题亦值得深入研究。此外有研究表明，秸秆直接还田时其中的虫卵和带菌体等容易引起作物病害[21-22]；彭娜等[23]和单玉华等[24]探索稻草还田中有机酸危害，发现稻草还田后短期内常产生高浓度的有机酸，主要为乙酸、丙酸等，从而阻碍水稻生长；秸秆还田过程中产生的还原性铁会抑制水稻的某些酶活性而抑制水稻生长[25]；张树清等[26]研究表明，畜禽粪中多种重金属元素、兽药残留、盐分含量以及一些有害微生物含量超高，这些也可能是导致 S 和 M 处理产量等指标低于 SC 和 MC 处理的因素。

土壤微生物生物量氮是土壤中微生物所固持的氮，其含量受环境、施肥及作物生长等影响。土壤微生物对施入氮素的固持与释放主要受施入的碳和氮

的种类和数量的影响[27],不同的肥料对土壤微生物生物量氮的影响不同。本试验中有机无机肥配施处理土壤微生物生物量氮含量高于单施化肥处理,这一结果与之前的报道[28-29]一致,其原因可能是有机无机肥配施处理下作物生育前期土壤微生物对氮素的固定有利于减少氮素损失,作物生育中后期随着土壤微生物死亡,其固定的氮素重新释放出来,供作物吸收利用,有机无机肥配施为作物提供了一个稳定的供氮环境。试验中稻草和猪粪两种有机物料经堆肥后 C/N 比下降,所能提供的碳源也下降,因此微生物生长受限。S 和 M 处理土壤微生物生长旺盛,固持了大量的土壤无机氮,微生物对养分的竞争降低了植物可吸收氮量,导致作物生长发育较 SC 和 MC 处理要差,直接导致了其产量、氮素吸收量等的相对下降。

土壤矿质态氮主要包括铵态氮和硝态氮,它有两方面的来源:一是施入氮肥的残留,二是土壤中有机肥的矿化[30]。矿质氮尽管占土壤中全氮含量的比例不高(1%～10%),却最易被植物吸收,具有重大的农学意义[31]。播种后 106 d 时土壤矿质态氮含量最高,因为此时作物对氮素的吸收量很低,同时有机无机肥配施处理土壤微生物生长迅速,微生物在生长过程中将部分土壤矿质态氮固持在体内,从而导致其土壤矿质态氮含量低于单施化肥处理。至播种 135 d 时土壤矿质态氮含量迅速下降,之后其含量一直保持在较低水平,这一结果与郑国砥[32]的研究一致,这是因为至播种 135 d,小麦植株逐渐长大,对氮素的需求量增加,导致土壤矿质态氮含量迅速降低,之后由于土壤微生物逐渐死亡,前期被固持的氮素逐渐释放,因此至小麦收获时土壤矿质态氮含量下降缓慢,甚至略有上升。Ross 等[33]研究亦表明,土壤微生物生物量氮与土壤矿质态氮含量之间关系密切。前面提到稻草和猪粪经堆肥处理后 C/N 比下降,微生物活动相应减弱,能够固持的土壤氮含量下降,因此其土壤矿质态氮含量较未经堆肥处理的要高,SC 和 MC 处理的氮素供应较 S 和 M 处理更能满足作物不同生育期对氮素的需求,更有利于促进作物生长和提高氮素利用率。

本试验中,稻草和猪粪经堆肥后再与无机肥配合施入土壤中后,其土壤微生物生物量氮较直接配施稻草和猪粪处理的低,其矿质态氮含量则比直接配施稻草和猪粪的处理高,表明配施稻草堆肥和猪粪堆肥处理氮素的生物固持较少,土壤供氮能力更强,其氮素供应与小麦需求的同步性更好,更有利于作物的吸收利用,同时也减少了氮素的淋失、挥发等损失。因此,将稻草和猪粪这两种有机物料堆肥后再施用,更利于增加作物产量,提高氮肥利用率。

参考文献:

[1] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006, (1): 3-8.
Huang H X, Li S T, Li X L *et al*. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soil Fert. Sci., 2006, (1): 3-8.

[2] 张金桃, 周传云. 农作物秸秆能源利用现状与前景[J]. 酿酒, 2007, 34(4): 12-15.
Zhang J T, Zhou C Y. The energy utilizing status and prospects of the crop straw resources[J]. Liquor Mak., 2007, 34(4): 12-15.

[3] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-623.

[4] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 施用玉米秸秆堆肥对盆栽芥菜土壤酶活性和微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 348-353.
Huang J C, Peng Z P, Yu J H *et al*. Impacts of applying corn-straw compost on microorganisms and enzyme activities in pot soil cultivated with mustard [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 348-353.

[5] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242-247.
Gao X Z, Ma W Q, Ma C B *et al*. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2002, 21(3): 242-247.

[6] 李录久, 杨哲峰, 李文高, 等. 秸秆直接还田对当季作物产量效应[J]. 安徽农业科学, 2000, 28(4): 450-457.
Li L J, Yang Z F, Li W G *et al*. Effect of returning straw into field on plant yields[J]. Anhui Agric. Sci., 2000, 28(4): 450-457.

[7] 盛良学, 黄道友, 汪立刚, 等. 稻草还田对春玉米生长发育与产量的影响[J]. 广西农业生物科学, 2006, 25(1): 56-59.
Sheng L X, Huang D X, Wang L G *et al*. Effects of returning rice straw into field on spring maize growth and productivity[J]. J. Guangxi Agric. Biol. Sci., 2006, 25(1): 56-59.

[8] 孟琳, 王强, 黄启为, 等. 猪粪堆肥与化肥配施对水稻产量和氮效率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(1): 68-71, 76.
Meng L, Wang Q, Huang Q W *et al*. Effects of combined application of pig manure compost and inorganic fertilizers on yield of rice grain sand nitrogen use efficiency[J]. J. Ecol. Rur. Environ., 2008, 24(1): 68-71, 76.

[9] 高菊生, 徐明岗, 王伯仁, 等. 长期有机无机肥配施对土壤肥力及水稻产量的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 211-214, 259.

Gao J S, Xu M G, Wang B R *et al*. The effects of rational application of long term organic and chemical fertilizers on soil fertility and rice yield[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(8): 211-214, 259.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京：中国农业出版社, 2000. 39-49.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 39-49.

[11] Brookes P C, Landman A, Pruden G *et al*. Chloroform fumigation and the release of soil N: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Biol. Biochem., 1985, 17(6): 837-842.

[12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biol. Biochem., 1987, 19(6): 703-707.

[13] Hart S C, Stark J M, Davidson E A *et al*. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification [A]. Weaver, R W, Angle J S, Bottomiey B S. Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and biochemical properties, Vol. 5 [M]. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1994. 985-1018.

[14] Wu C L, Shen Q R, Mao J D, Xu Y C. Fate of ^{15}N after combined application of rabbit manure and inorganic N fertilizers in a rice-wheat rotation system[J]. Biol. Fert. Soils, 2010, (46): 127-137.

[15] 倪治华，马国瑞. 有机无机生物活性肥料对蔬菜作物生长及土壤生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 212-215.
Ni Z H, Ma G R. Effect of bio-activated organic-inorganic-mixed fertilizer on growth of cabbage and soil biological activity [J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(3): 212-215.

[16] Meng L, Zhang X L, Jiang X F *et al*. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate [J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42: 532-542.

[17] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species; J]. Oecologia, 2005, 142: 247-260.

[18] 谢秋发，刘经荣，石庆化，等. 不同施肥方式对水稻产量、吸氮特性和土壤氮转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 462-467.
Xie Q F, Liu J R, Shi Q H *et al*. Effect of different fertilization patterns on rice yield and nitrogen uptake and transformation in soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(5): 462-467.

[19] 王岩，张莹，沈其荣，史瑞和. 施用有机、无机肥后土壤微生物量、固定态铵的变化及其有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 307-314.
Wang Y, Zhang Y, Shen Q R, Shi R H. The changes of soil microbial biomass and the clay fixed ammonium after application of organic and inorganic fertilizers and their biol-effects [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1997, 3(4): 307-314.

[20] 唐玉霞，孟春香，贾树龙，等. 不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 37-40.
Tang Y X, Meng C X, Jia S L *et al*. Effects of different C/N combinations of fertilizers on biological fixation and release of nitrogen fertilizer and wheat growth[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(2): 37-40.

[21] 曾木祥，王蓉芳，彭世琪. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 336-339.
Zeng M X, Wang R F, Peng S Q. Summary of returning straw into field of main agricultural areas in China[J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(5): 336-339.

[22] 李文革，李倩，贺小香. 秸秆还田研究进展[J]. 湖南农业科学, 2006, (1): 46-48.
Li W G, Li Q, He X X. Research progress of returning straw into field[J]. Hunan Agric. Sci., 2006, (1): 46-48.

[23] 彭娜，王开峰，王凯荣，谢小立. 不同水分管理下施用稻草对土壤有机酸和养分有效性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 857-862.
Peng N, Wang K F, Wang K R, Xie X L. Effects of rice straw incorporation on accumulation of organic acids and nutrients availability under different water regimes [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(5): 857-862.

[24] 单玉华，蔡祖聪，韩勇，等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 941-947.
Shan Y H, Cai Z C, Han Y *et al*. Accumulation of organic acids relation to C∶N rations of straws and N application in flood soil [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(6): 941-947.

[25] 章艺，刘鹏，宋金敏，等. 高 Fe^{2+} 对水稻离体根边缘细胞的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2925-2930.
Zhang Y, Liu P, Song J M *et al*. Effect of excessive Fe^{2+} on root border cells *in vitro* of rice[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(6): 2925-2930.

[26] 张树清，张夫道，刘秀梅，等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M *et al*. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(6): 822-829.

[27] 朱莱红，董彩霞，沈其荣，徐阳春. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282-288.
Zhu C H, Dong C X, Shen Q R, Xu Y C. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 282-288.

[28] 刘益仁，李想，郁洁，等. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81-86.
Liu Y R, Li X, Yu J *et al*. Mechanisms for the increased fertilizer nitrogen use efficiency of rice in wheat-rice rotation

system under combined application of inorganic and organic fertilizers[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(1): 81-86.

[29] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 765-772.
Han X R, Zheng G D, Liu X Y. Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40 (4): 765-772.

[30] 巨晓棠, 李生秀. 旱地土壤供氮能力研究的发展[J]. 干旱地区农业研究, 1993, (11): 43-48.
Ju X T, Li S X. Progress in research on N supplies by dryland soils[J]. Agric. Res. Arid Areas, 1993, (11): 43-48.

[31] 刘益仁, 徐阳春, 李想, 郁洁. 有机肥部分替代化肥对土壤微生物生物量及矿质态氮含量的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(11): 70-73.
Liu Y R, Xu Y C, Li X, Yu J. Influence of partial replacement of chemical fertilizer by organic manure on soil microbial biomass and mineral nitrogen content [J]. Acta Agric. Jiangxi, 2009, 21(11): 70-73.

[32] 郑国砥. 有机肥料氮矿化-固持周转(MIT)过程的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2001.
Zheng G D. Study on mineralization-immobilization turnover (MIT) of organic fertilizer nitrogen [D]. Shenyang: MS thesis, Shenyang Agricultural University, 2001.

[33] Ross D J, Sparling G P, Burkd C M. Microbial biomass C and N in litter and mineral soil under *Pinus radiate* on a coastal stand: Influence of under age and harvest measurement [J]. Plant Soil, 1995, (175): 167-177.