

不同施肥措施对稻田土壤氮素矿化的影响

顾春朝, 傅民杰, 孙宇贺, 刘春海

(延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

摘要:采用PVC管原位培养连续取样法测定延边地区生长季节内3种施肥方式(化肥、化肥与有机肥配施、有机肥)下的稻田土壤氮素矿化、硝化的时间动态及氮素矿化的空间分布格局。结果表明:3种稻田土壤氮素矿化存在明显的时空变异性。稻田土壤在8月份表现出强烈的氮矿化过程,而在7~8月份硝化作用较强。3种施肥方式稻田上层土壤(0~10 cm)的氮净矿(硝)化率显著高于下层(10~20 cm)土壤。3种稻田土壤的氨化过程在氮矿化过程中占有重要地位,其上层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在无机氮中的比例分别为58.1%~94.4%(CF)、36.9%~93.8%(CF+OF)、23.3%~93.5%(OF)。施用有机肥有利于促进土壤的氮矿化过程。

关键词:施肥方式;稻田土壤;净氮矿化率;净硝化率

中图分类号:S147.2

文献标识码:A

文章编号:1004-874X(2015)05-0043-06

Effects of different fertilization methods on paddy soil nitrogen mineralization

GU Chun-zhao, FU Min-jie, SUN Yu-he, LIU Chun-hai

(Agricultural College of Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: Tempo-spatial variations in soil net nitrogen (N) mineralization and nitrification of Yanbian growing season paddy with three fertilization methods (chemical fertilizer, chemical and organic fertilizer, organic fertilizer) were investigated with a PVC tube sequential coring and in-situ incubation method. The results showed that there was obvious spatial and temporal variability in three paddy soil nitrogen mineralization. Paddy soil in August showed a strong nitrogen mineralization, and had a strong nitrification in July to August. Nitrogen net mineralization rate (nitrification rate) in the upper soil(0~10 cm) was significantly higher than those of the lower (10~20cm) soil of three kinds of paddy ecosystem. Ammoniated process of three paddy soil occupied an important position in nitrogen mineralization process, its $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ratio of inorganic nitrogen in the upper soil (0~10 cm) were 58.1%~94.4% (CF), 36.9%~93.8% (CF+OF), 23.3%~93.5%(OF). The results indicated that Organic manure treatment had advantages for soil nitrogen mineralization.

Key words: fertilization method; net nitrogen mineralization rate; net nitrification rate

氮素是土壤中重要的养分限制因子^[1],水稻的生长发育以及高产都需要大量的氮素来维持,根据大量的科学研究证明,在施用氮肥的前提下,水稻所需氮素也有50%以上来自于土壤^[2],而在高产稻

田水稻吸收的氮素约有50%~80%来自土壤^[3]。因此,水稻土供氮能力是影响水稻产量的重要因素。而土壤供氮的方式主要是通过氮矿化。土壤氮矿化是土壤无机态氮素的主要来源^[4]。而施肥是现代农业生产的重要管理措施之一,肥料的施入会对土壤有机氮的矿化和作物的生长产生重要的影响,因此施肥对稻田土壤氮矿化的影响一直以来都是国内外研究的重要内容。许多学者关于热带、亚热带地区长期施肥对稻田土壤氮素矿化与积累的影响进行了研究,发现长期施肥可显著增加0~20 cm土层土壤全氮和有机碳的含量,表层土壤在长期淹水条件下存在稳定的厌氧氮矿化过程^[5-8];Singh等^[9]研究

收稿日期:2014-09-29

基金项目:国家自然科学基金(31160103);延边大学科技发展计划项目(延大科合字[2011]第32号);吉林省教育厅项目(201245)

作者简介:顾春朝(1990-),女,在读硕士生,E-mail:719957006@qq.com

通讯作者:傅民杰(1972-),男,博士,副教授,E-mail:fuminjie@163.com

热带稻麦轮作体系发现,氮矿化具有明显的季节性,且受土壤水分和微生物量的影响显著;此外,Yan等^[10]对亚热带稻田土壤的研究发现,氮肥的施入增强了土壤氮矿化势,且矿化氮比例随施肥量的增加而增大。一些学者对南方红壤稻田土壤的研究也证实了Yan的结论^[11-12],且无机肥和有机肥配施可显著提高南方稻田土壤氮矿化速率^[13];田秀萍等^[14]对沈阳市开垦60年的淹育水稻土9种施肥处理土壤进行研究,结果表明,不同施肥处理下的氮素矿化速率差异很小,而氮素矿化势则差异很大。总体来看,目前稻田土壤氮矿化研究主要以亚热带和暖温带地区为主,北方对此的相关研究报道较少,主要因温带地区稻田面积较小。本研究以中国东北地区水稻种植历史最久的延边朝鲜族自治州稻田土壤为对象,旨在了解北方温带稻田土壤的氮矿化特征及其土壤无机氮的时空变化格局,丰富我国水

田土壤的研究资料,为深入研究北方水田土壤的供氮特点及其水田土壤培肥等方面提供科学合理的理论依据,对北方地区水田土壤的利用和保护具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地位于吉林省图们市凉水镇(42°29'N, 130°E)。该区属于温带大陆性气候,全年平均温度5.6℃、年平均降水644.8 mm。试验选择3种不同施肥方式的稻田土壤作为研究对象,施肥方式分别为单施无机肥(施肥量分别为:N 150 kg/hm²、P₂O₅ 100 kg/hm²、K₂O 100 kg/hm²)、单施有机肥(粪肥:15 000 kg/hm²)、有机肥和无机肥结合施用(化肥:N60 kg/hm²、P₂O₅ 40 kg/hm²、K₂O 50 kg/hm²、粪肥:65 000 kg/hm²)。其土壤理化性质见表1。

表1 3种施肥方式稻田土壤的理化性质

施肥方式	土层(cm)	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	总磷(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH(H ₂ O)
有机肥(OF)	0~10	20.2	150.4	0.18	59.5	141.7	6.0
	10~20	19.2	120.2	0.16	72.5	147.3	6.0
无机肥(CF)	0~10	17.0	161.4	0.15	24.1	159.7	5.6
	10~20	19.0	92.9	0.17	23.2	130.7	6.0
有机肥+无机肥(CF+OF)	0~10	19.8	99.2	0.14	61.4	165.0	5.7
	10~20	22.2	79.0	0.16	99.1	151.3	6.5

1.2 分析项目及方法

2012年6~11月,在每种施肥方式的样地中,按对角线法选取5个原位培养点。采用原状土原位培养连续取样法(Sequential coring and in-situ exposure)^[15],在每一培养点将两根内径5 cm、长20 cm的PVC管打入土壤。小心取出两管后,一管土壤用于土壤分析,另一管的上下管口用塑料膜封口,埋回原位进行原位培养,每个培养时期约为30 d。培养结束时,取出培养管。同时将下一批管按上述方法布置于前一次培养点附近。将培养后的管分为上层(0~10 cm)和下层(10~20 cm)两层土样,低温带回实验室做室内分析。

室内土壤分析包括土壤水分含量、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及常规理化性质的测定。土壤含水率采用烘干法(105℃,24 h)。土壤中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N测定采用新鲜土样2M KCL浸提法^[16],滤液用连续流动分析仪(BRAN+LUEBBE-AA3, Germany)测定。氮净

矿(硝)化率计算公式如下:

$$NMR=(C_t-C_{t_0})/(t-t_0)$$

$$NNR=(C'_t-C'_{t_0})/(t-t_0)$$

式中,NMR和NNR分别为培养时段内的土壤净氮矿化率和净氮硝化率(mg/kg·d),C和C'分别表示无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量(mg/kg);t₀和t分别表示培养前和培养后的时间。

数据统计采用SPSS 14.0统计软件包,不同开垦年限和施肥类型间的差异显著性采用单因素方差分析法(One-way ANOVA-test)。多重比较采用邓肯检验法(Duncan)。

2 结果与分析

2.1 施肥方式对土壤无机氮的影响

2.1.1 施肥方式对NH₄⁺-N的影响 3种施肥方式(CF、CF+OF和OF)稻田土壤的NH₄⁺-N含量存在

明显的季节变化,施用无机肥的稻田上层(0~10 cm)土壤和下层(10~20 cm)土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均为 8 月份最高,上、下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 25.2 (± 1.2)mg/kg 和 8.4 (± 0.5)mg/kg。而 CF+OF 和 OF 处理稻田上、下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均为 6 月份最高,CF+OF 处理稻田上、下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 40(± 1.5)mg/kg 和 3.6(± 0.9)mg/kg,OF 处理稻田上、下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 42.5(± 3.4)mg/

kg 和 10.8(± 0.1)mg/kg。综合来看,3 种施肥方式的上下层土壤在生长季的末期(9~10 月) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较低。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在 3 种施肥方式间的差异随生长季节而异,上层土壤 6 月份在 CF+OF 和 OF 处理间差异不显著,但二者显著高于 CF 处理。而 8 月份 CF 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 CF+OF 和 OF 处理,这与 CF 处理在 7 月中期稻田追肥有关(表 2)。

表 2 不同施肥方式下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(mg/kg)的时空动态

月份	CF(0~10cm)		CF+OF(0~10cm)		OF(0~10cm)		CF(10~20cm)		CF+OF(10~20cm)		OF(10~20cm)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
6	12.5b	0.8	40a	1.5	42.5a	3.4	1.2b	0.3	3.6a	0.9	10.8a	0.1
7	1.8c	0.2	7.3b	0.4	5.8b	0.6	0.7c	0.0	1.2b	0.3	3.1c	0.7
8	25.2a	1.2	6.1c	0.6	4.5c	0.6	8.4a	0.5	3.5a	0.3	4.1b	0.4
9	0.6d	0.1	3.4d	0.3	1.0d	0.1	0.3d	0.1	1.5b	0.3	0.5d	0.3
10	0.6d	0.3	2.0e	0.4	1.5d	0.3	0.8c	0.1	1.1b	0.4	0.6d	0.3

注:同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著,表 3~表 5 同。

3 种施肥方式土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均存在明显的空间垂直差异性(表 2),且这种空间的差异性随着生长季的延续而逐渐减小。3 种施肥方式 6~8 月份上层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于下层土壤,而 9~10 月份上、下层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量差异不显著。

2.1.2 施肥方式对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响 3 种施肥方式的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同样存在明显的季节变化格局,但峰值出现的时期不同。从表 3 可知,除 CF+OF 处理土壤外,其他所有施肥处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均在 9 月最高,且与其他月份间差异显著,该月份 CF 和 OF 处理上层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别为 10(± 0.2)mg/kg 和 8.9(± 0.4)mg/kg,而下层土壤分别为 10.9 (± 0.5)mg/kg 和 11.1 (± 0.5)mg/kg。而 CF+OF 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 8 月最高,且与其他月份间差异显著,该月份 CF+OF 处理上层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为 20.1(± 0.4)mg/kg,而下层土壤为 21

(± 0.5)mg/kg。

不同施肥方式对土壤上下层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量产生不同的影响,CF 和 OF 处理各月份的上层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著差异,但二者 8 月份和 9 月份土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著低于 CF+OF 处理。下层土壤中,3 种施肥处理间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 也均无显著差异。

不同施肥处理影响了上下层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在时间上的空间分布,由表 3 可知,在 6~8 月份,3 种施肥处理间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均表现为上层土壤高于同期下层。而在 9、10 月份,3 种施肥处理间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则表现为下层土壤高于同期上层。

此外,稻田土壤除 9 月份外,其他各月多以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。3 种稻田的上层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在无机氮中的比例变化范围分别为 58.1%~94.4%、36.9%~93.8%和 23.3%~93.5%;下层土壤分别为 47.8%~93.9%、15.4%~87.0%和 14.1%~79.2%。

表 3 不同施肥方式下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(mg/kg)的时空动态

月份	CF(0~10cm)		CF+OF(0~10cm)		OF(0~10cm)		CF(10~20cm)		CF+OF(10~20cm)		OF(10~20cm)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
6	1.7b	0.6	2.8c	0.7	2.8b	0.2	1.3b	0.2	1.0c	0.5	1.8c	0.2
7	1.3c	0.3	1.4d	0.1	1.5d	0.4	0.5c	0.2	0.3d	0.2	0.5e	0.3
8	1.5bc	0.2	20.1a	0.4	1.9c	0.5	0.5c	0.2	21a	0.5	0.7d	0.5
9	10a	0.5	11b	0.4	8.9a	0.4	10.9a	0.5	11.2b	0.3	11.1a	0.5
10	0.3d	0.1	0.6e	0.2	2.6bc	0.5	0.3c	0.1	0.7cd	0.3	3.1b	0.3

2.2 施肥方式对土壤净硝化率与净氮矿化率的影响

2.2.1 施肥方式对净硝化率的影响 3种施肥方式土壤的净硝化存在明显的季节变化,但最适宜硝化的时期和硝化强度却因施肥方式而异(表4)。3种施肥方式土壤的最适宜硝化的时期均出现在7月份,且CF、OF处理在8月存在较强的硝化过程。CF、CF+OF、OF处理上层的最大净硝化率分别为 $0.45(\pm 0.02)$ 、 $0.5(\pm 0.02)$ 、 $0.46(\pm 0.02)\text{mg/kg}\cdot\text{d}$ 。CF、

CF+OF、OF处理下层的最大净硝化率分别为: $0.33(\pm 0.01)$ 、 $0.48(\pm 0.02)$ 、 $0.58(\pm 0.03)\text{mg/kg}\cdot\text{d}$ 。统计分析结果表明,3种施肥方式上层土壤在各个月份间的净硝化存在显著差异,仅OF处理下层土壤在各个月份间的净硝化存在显著差异,而施用化肥的处理(CF和CF+OF)的下层土壤仅个别月份(CF在9月份、CF+OF在7月份)的净硝化率与其他月份差异显著(表4)。

表4 不同施肥方式下净硝化率的时空动态

月份	CF(0~10cm)		CF+OF(0~10cm)		OF(0~10cm)		CF(10~20cm)		CF+OF(10~20cm)		OF(10~20cm)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
6	-0.02c	0.03	-0.06b	0.02	-0.04c	0.00	0.00b	0.01	-0.01b	0.01	0.01c	0.01
7	0.45a	0.02	0.5a	0.02	0.46a	0.02	0.33a	0.01	0.48a	0.02	0.58a	0.03
8	0.31b	0.03	-0.29c	0.02	0.28b	0.02	0.31a	0.01	-0.35c	0.03	0.35b	0.02
9	-0.32d	0.01	-0.35d	0.02	-0.21d	0.02	-0.30c	0.02	-0.34c	0.02	-0.33d	0.03

稻田土壤的净硝化空间垂直变异同样受到施肥方式的影响,其中OF处理上下层土壤净硝化率存在明显空间分异,这两种土壤上层净硝化率在生长季的6~8月份均显著高于下层。CF、CF+OF处理上下层仅在生长季内某个月份(CF在7月份,CF+OF在8月份)存在显著差异。此外,从净硝化率数值来看,各施肥处理上层土壤多数月份表现出 NO_3^- -N的净释过程,而下层土壤的 NO_3^- -N净固持过程逐渐增多(表4)。

CF、OF处理对生长季中土壤净硝化率(上层除7月外)的提高作用明显高于CF+OF处理(表4)。

2.2.2 施肥方式对净氮矿化率的影响 3种施肥方式下层土壤有机氮矿化季节变化趋势一致,生长季末期存在明显的氮固持效应,且最大净矿氮化率均发生在7月份。CF、CF+OF、OF下层的最大净氮矿化率分别为 $0.43(\pm 0.03)$ 、 $0.65(\pm 0.01)$ 、 $0.79(\pm 0.05)$

$\text{mg/kg}\cdot\text{d}$,但3种施肥方式的上层土壤各个月份的净氮矿化率因施肥方式而异。

3种施肥方式的土壤净矿化率垂直空间变异特征受施肥方式的影响,其中CF+OF处理上下层土壤净矿化率存在明显空间分异,上层土壤净矿化率在各个月份内均显著高于下层。CF、OF处理上下层仅在生长季的7、8月份上层显著高于下层。

在生长季节中期,7月份有机肥施入的处理(CF+OF、OF)上下层土壤净氮矿化率显著高于单施化肥的处理(CF),表明有机肥的施入促进了氮素的矿化作用;8月份单施肥料的处理(CF、OF)上下层土壤净氮矿化率显著高于化肥和有机肥配施处理(CF+OF)。在生长季节末期,单施有机肥的处理(OF)上下层土壤净氮矿化率显著高于施用化肥处理(CF、CF+OF)。

表5 不同施肥方式下净矿化率的时空动态

月份	CF(0~10cm)		CF+OF(0~10cm)		OF(0~10cm)		CF(10~20cm)		CF+OF(10~20cm)		OF(10~20cm)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
6	-0.15b	0.06	0.23b	0.07	-1.03d	0.11	0.39a	0.01	-0.02b	0.04	-0.07c	0.03
7	0.8a	0.03	0.97a	0.03	1.06a	0.04	0.43a	0.03	0.65a	0.01	0.79a	0.05
8	0.85a	0.03	-0.08c	0.02	0.35b	0.02	0.04b	0.03	-0.35c	0.02	0.33b	0.02
9	-0.29c	0.07	-0.29d	0.02	-0.17c	0.02	-0.27c	0.03	-0.33c	0.03	-0.23d	0.03

3 结论与讨论

以往净氮矿化率研究结果表明,无机氮含量的

季节变化一般规律是春、夏季升高,夏季后期下降,秋季略微升高,5、6月份为矿化活跃期^[17-18]。而本研究结果却表明,7、8月份的生长季中期是各种不同

施肥方式下稻田土壤有机氮的矿化活跃期,与上述结果有所差异。分析认为,该时期正值北方温度最高的季节,有利于好氧微生物活性的提高。由此可见,温度与土壤空气条件是稻田土壤氮矿化季节变化格局的重要限制因子。同时,稻田土壤生态环境与旱地和林地不同,稻田在整个生长季节内一直处于淹水的厌氧条件下,在春秋季节,水稻根系的通气能力有限,厌氧环境导致稻田土壤有机氮矿化过程受限,但在生长季中期,水稻根系通气能力增强,有利于土壤中氧气条件的改善,因此促进了有机氮的矿化过程。

该地区 3 种施肥方式稻田土壤的净氮矿化率范围为 $-1.03\sim 1.06\text{mg/kg}\cdot\text{d}$,与 Westbrook 等^[19]以生长季中某一时段的研究结果不同。本研究结果变化范围较宽,导致这种结果的主要原因是涵盖了 4 个月份的矿化特征,而其月份间环境条件变化悬殊。以往研究表明土壤温度升高有利于有机氮的矿化^[20],而本研究结果显示 7、8 月份具有较高的净氮矿化率,而其他月份净氮矿化率较低,正是受到温度影响的结果。

本研究中,3 种施肥方式的稻田上层土壤生长季中期(7 月)净氮矿化率大于零,表明土壤有机氮矿化过程比氮的固持过程更为活跃。施肥方式不同,土壤氮矿化能力也不同:有机肥处理表现出最高的矿化能力,而有机肥、无机肥配施处理矿化能力最弱,基本表现出施用无机肥稻田矿化强于有机肥或与无机肥配合施用的稻田的变化趋势。分析认为,3 种施肥方式间氮矿化差异主要是由于土壤中肥料的构成及其比例的不同导致的。从实验条件来看,3 种施肥方式的稻田具有相同的土壤类型、稻田管理措施和气象环境条件,最大的差异主要来源于土壤施肥的种类和肥料构成比例。施肥方式的不同导致土壤有机质质量、pH 值、有效态磷、钾等成分的不同,进而影响到微生物活性,最终影响到土壤的矿化过程。郝晓晖等^[21]研究表明,无机和有机肥配施可显著提高南方稻田土壤氮矿化速率,这与本次研究结果不同。而张玉玲等^[22]的研究也表明,不同施肥方式对北方稻田氮矿化的影响与亚热带和暖温带地区的研究结果不同。

稻田土壤存在较大的垂直空间异质性。本试验中 3 种稻田生态系统(施用无机肥、有机肥和无机肥配合施用/施用有机肥)上、下各 10 cm 的两个层次中,无机氮、净矿化、净硝化过程都存在明显的差

异。上层土壤的矿化作用明显强于下层土壤。研究结果表明,氮素矿化速率较高是由于其土壤具有较高的生物学活性,而土壤中较高的有机碳和全氮含量决定了土壤具有较高的生物学活性^[23-24]。本研究的 3 种稻田生态系统上层土壤具有较高的有机碳、全氮含量,丰富的有机质资源和大量的微生物为土壤氮矿化创造了良好的条件。

延边稻田土壤氮矿化与硝化作用存在明显的季节特征。7、8 月份土壤氮矿化和硝化作用强烈,该时期施用无机肥、有机肥和无机肥配施以及施用有机肥 3 种稻田最大矿化率分别为 $0.43(\pm 0.03)$ 、 $0.65(\pm 0.01)$ 、 $0.79(\pm 0.05)\text{mg/kg}\cdot\text{d}$ 。

3 种施肥方式稻田土壤氮矿化、硝化过程存在明显的空间垂直变异,上层土壤矿(硝)化作用明显强于下层土壤。

3 种施肥方式稻田土壤的矿(硝)化作用强度存在明显差异。单施有机肥土壤有机氮矿化能力高于单施化肥或化肥与有机肥配施的稻田土壤。

参考文献:

- [1] 叶优良,张福锁,李生秀. 土壤供氮能力指标研究[J]. 土壤通报,2001,32(6): 273-276.
- [2] 文启孝. 土壤氮素的含量、形态和 15N 丰度 - 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.
- [3] 朱兆良. 中国土壤的氮素肥力与农业中的氮素管理 - 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [4] 付会芳,张兴昌. 旱地土壤氮素矿化的动力学研究[J]. 干旱区资源与环境,1997, 11(1):53—57.
- [5] Mirasol F, Pampolino, Eufrocino V, et al. Soil carbon and nitrogen changes in long-term continuous lowland rice cropping[J]. Soil Science Society of America, 2008,2:798-807.
- [6] Genxing Pan, Ping Zhou, Zhipeng Li, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2009, 131(3-4):274-280.
- [7] Zhongpei Li, Ming Liu, Xiaochen Wu, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research,2010,106(2):268-274.
- [8] Chengli Tong, Heai Xiao, Guoyong Tang, et al. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and

- coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1):8-14.
- [9] Singh S, Ghoshal N, Singh K P. Synchronizing nitrogen availability through application of organic inputs of varying resource quality in a tropical dryland agroecosystem [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36 (2-3): 164-175.
- [10] Marco Roelcke, Han Yong, Cai Zucong, et al. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Chinese Taihu region under aerobic conditions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3):255-26.
- [11] Ghosh P, Dhyani P P. Temporal changes in soil microbial and N mineralization in sole versus intercropped paddy and foxtail millet [J]. *International Journal of Ecology & Environmental Sciences*, 2004, 30(3):229-239.
- [12] 周卫军, 王凯荣, 刘鑫. 有机物循环对红壤稻田土壤 N 矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1):39-43.
- [13] 贾俊仙, 李忠佩, 刘明, 等. 施用氮肥对不同肥力红壤性水稻土硝化作用的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4):329-333.
- [14] 田秀萍, 关连珠. 北方淹育水稻土不同施肥处理氮矿化位势的研究[J]. *土壤通报*, 1998(5):209-211.
- [15] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in-situ [J]. *Soil biology & biochemistry*, 1987, 19 (5):521-530.
- [16] Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, et al. Soil physical, chemical analysis and description of soil profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996:33-37.
- [17] Ehrenfeld J G, Han X, Parsons W F, et al. On the nature of environmental gradients: temporal and spatial variability of soils and vegetation in the New Jersey Pinelands[J]. *Journal of Ecology*, 1997, 85:785-798.
- [18] Farley R A, Fitter A H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 87:688-696.
- [19] Westbrook C J, Devito K J, Allan C J. Soil N cycling in harvested and pristine Boreal forests and peat lands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234 (1-3): 227-237.
- [20] Bremer E, Kuikman P. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190: 119-126.
- [21] 郝晓晖, 肖宏宇, 苏以荣, 等. 长期不同施肥稻田土壤的氮素形态及矿化作用特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, 33(5): 544-550.
- [22] 张玉玲, 张玉龙, 虞娜, 等. 长期不同施肥对水稻土有机氮素矿化特性影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 272-276.
- [23] Sanchez L F, Garcia miragaya J, Chacon N. Nitrogen mineralization in soil under grasses and under trees in a protected venezuelan savanna[J]. *Acta Ecologica*, 1997, 18 (1):27-37.
- [24] Berendse F. Organic matter accumulation and nitrogen mineralization during secondary succession in heath land ecosystems[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(2):413-427.

(责任编辑 杨贤智)