

# 热带雨林及其下种植砂仁的土壤中 氮素矿化和硝化的对比研究

孟 盈, 甘建民, 郑 征, 沙丽清

(中国科学院西双版纳热带植物园生态站, 云南 勐腊 666303)

**摘 要:** 采用封顶埋管法 (Close – Top Incubation), 在旱季和雨季对西双版纳热带沟谷雨林土壤、及雨林下种植砂仁地土壤氮素矿化和硝化作用进行了研究。结果表明, 在雨季, 两样地的土壤氮净矿化和硝化速率关系为: 砂仁地 (分别为  $6.13$  和  $6.79 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) > 雨林地 (分别为  $1.33$  和  $2.19 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ); 砂仁地和雨林地的氨化速率为负值 (分别为  $-0.66$  和  $-1.03 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ )。而在旱季差异都不显著, 旱季砂仁地土壤氮净矿化和硝化速率 (分别为  $4.40$  和  $2.97 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 显著低于雨季 (分别为  $6.13$  和  $6.79 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ); 雨林地则相反, 旱季氮净矿化速率 ( $3.50 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 显著高于雨季 ( $1.33 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ), 硝化速率无显著差异。

**关键词:** 热带雨林; 热带雨林 – 砂仁; 氮矿化; 硝化; 氨化

中图分类号 S151.93 文献标识码 A 文章编号 1672–2043(2003)01–0021–04

## Mineralization and Nitrification of Nitrogen in Soil Grown Amomum Villosum Under Tropical Rainforest in Xishuangbanna, Southwest China

MENG Ying, GAN Jian-ming, ZHENG Zheng, SHA Li-qing

(Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, China)

**Abstract:** Using Close – Top Incubation method, we measured nitrification and net N mineralization rates in soils (0–15 cm) under tropical rainforest (R), tropical rainforest grown Amomum villosum (RA) in Xishuangbanna, Southwest China during dry and rainy season, respectively. It has been found that N net mineralization and nitrification rates were RA ( $6.13$  and  $6.79 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) > R ( $1.33$  and  $2.19 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) during the rainy season, while ammonification rates of R and RA were negative in rainy season ( $-0.66$  and  $-1.03 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ). However, they had little differences in dry season ( $P > 0.05$ ). In dry and rainy seasons, N net mineralization and nitrification rates of RA ( $4.40$  and  $2.97 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) in dry season were lower than in rainy season ( $6.13$  and  $6.79 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ). N net mineralization rate in dry season ( $3.50 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) was higher than in rainy season ( $1.33 \text{ mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ), but there was little differences between nitrification and mineralization rates.

**Keywords:** tropical rainforest; amomum villosum; N mineralization; nitrification; ammonification

由于氮素在森林生态系统中的重要作用, 使氮的循环受到了更多的关注。国外对森林生态系统氮素循环方面的研究工作开展得比较早, 研究也比较广泛和深入。我国对于氮素的研究以农田生态系统为主, 而近年来森林生态系统氮素转化过程也日益成为人们

关注的热点。沙丽清<sup>[1]</sup>报道了西双版纳热带森林不同演替阶段土壤氮的矿化和硝化作用, 认为西双版纳季节雨林和崖豆藤次生林下土壤的氮净矿化速率和硝化速率接近, 且显著高于轮歇地和林窗下的土壤。孟盈<sup>[2]</sup>则认为就不同林型而言, 西双版纳季节雨林年均土壤氮矿化速率 > 片断热带雨林 > 人工橡胶林。以上研究结果表明, 人为干扰可以影响土壤的氮素矿化动态。

雨林 – 砂仁 (*Amomum villosum*) 这种天然林下种植经济作物的模式, 在西双版纳已有 20 多年的历史。为满足砂仁高产对光照 50% 左右的荫蔽度要求,

收稿日期: 2002–03–12

基金项目: 云南省自然科学基金项目 (1999C0090M), 中国科学院特别支持项目 (STZ97–1–04), CERN 项目, 中国科学院西南创新基地资助

作者简介: 孟 盈 (1973—), 女, 研究实习生。

联系人: 郑 征

种植砂仁处的雨林中大量乔木被疏伐, 林下草本和灌木也被清除, 造成植物群落 70% ~ 90% 的物种流失, 对热带雨林群落结构和生物多样性都产生了严重的影响<sup>[3~6]</sup>。一般来讲, 在森林生态系统中, 干扰活动能提高土壤氮素转化速率, 从而大大增加氮素从系统中流失的潜势<sup>[7]</sup>。研究热带雨林下种植砂仁, 人为干扰对土壤氮素转化过程的影响, 对于提高森林生态系统生产力和退化生态系统的恢复与重建, 生态系统管理以及生物多样性保护等有重要的现实意义。

## 1 研究样地和研究方法

研究样地位于中科院西双版纳热带植物园附近勐仑镇自然保护区的曼掌沟 (21°56'N, 101°16'E), 海拔 650 m, 据中国科学院热带生态站多年气象资料, 该地年均气温 21.4 °C, 年均降雨量为 1 557 mm, 其中雨季 (5—10 月) 为 1 355 mm, 占全年的 87%, 旱季 (11—4 月) 为 202 mm, 仅占全年降雨量的 13%, 相对湿度为 86%。土壤为由白垩系砂岩发育成的砖红壤。选取干果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、绒毛番龙眼 (*Pometia tomentosa*) 为优势的原始热带湿性季节雨林 (以下简称雨林) 以及在其下种植砂仁 (以下简称砂仁林) 的受人为干扰雨林 (50 m × 50 m) 样地各 2 500 m<sup>2</sup>。原始雨林样地与受干扰样地相邻, 两者生境条件基本一致, 荫蔽度分别为 90% 和 60%。

本研究采用顶盖埋管法 (Close-Top Incubation)<sup>[8]</sup> 估测氮素的氨化、硝化和净矿化速率, 此方法曾在同一地区的另一课题研究中使用过<sup>[2]</sup>, 其可靠性已得到了证实。在实验开始前, 准备好长 15 cm, 内径 6 cm 的 PVC 管, 剪好边长为 10 cm 正方形塑料布、沙布和橡皮圈; 在每块样地内分别建立一个 30 m 长的样线, 每 6 m 选取一个样点, 埋入 1 个 PVC 管, 每块样地取 5 个样点。第一次取样时, 先把 PVC 管垂直打入土中 (以土壤装满 PVC 管为准), 然后小心取出装满土样的 PVC 管 (以免土样从管的底部漏出), 再把 PVC 管顶部用塑料布封住, 底部用纱布封住 (均以橡皮筋固定), 并写上编号后放回原处 (此过程为埋管); 同时用 PVC 管在所埋管旁边对应取 1 个原状土, 分别装入袋中, 带回实验室, 于 24 h 内分别测定其初始  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  ( $\text{Q mol} \cdot \text{L}^{-1}$  氯化钾浸提 - 靛酚兰比色法) 和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ( $\text{Q mol} \cdot \text{L}^{-1}$  氯化钠浸提 - 锌粒镀铜还原紫外分光光度法), 并测定 pH (水浸提 - 复合电极法)、有机质 (重铬酸钾氧化 - 外加加热法) 全氮 (半微量开氏法), 详细的操作方法请参见有关文献<sup>[9]</sup>。1 个月以后取出上次

所埋管中的培养土 (取管), 用同样的方法分析  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。根据砂仁生长发育的特点, 取样时间安排在开花期和结果期, 即 2000 年 4 月 7 日到 5 月 7 日为第一个培养期, 7 月 7 日到 8 月 7 日为第二个培养期, 按以下公式计算有关参数<sup>[10]</sup>:

土壤氮净矿化速率 ( $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) = (土壤培养 30 d 后的  $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$ ) - (土壤初始的  $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$ );

氨化速率 ( $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) = (土壤培养 30 d 后的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) - (土壤初始的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ );

硝化速率 ( $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) = (土壤培养 30 d 后的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) - (土壤初始的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )

## 2 结果与讨论

### 2.1 砂仁地和雨林地土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量变化

从图 1、图 2 可以看出, 旱季砂仁地  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量 ( $3.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 略低于雨林地 ( $3.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) ( $P < 0.05$ ), 雨季砂仁地 ( $2.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 则略高于雨林地 ( $1.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 但无显著差异。而  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度则相反, 旱季砂仁地浓度 ( $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 显著高于雨林地 ( $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) ( $P < 0.005$ ), 而雨季砂仁地 ( $0.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 与雨林地 ( $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 无明显差异。无论是砂仁地还是雨林地, 旱季  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量均高于雨季。以上结果表明, 雨季大气

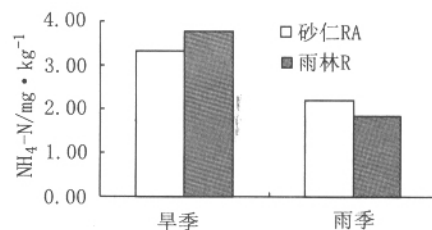


图 1 旱季、雨季砂仁地和雨林地  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  变化状况

Figure 1 Changes of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the soil of rainforest grown *Amomum villosum* during dry and rainy season, respectively

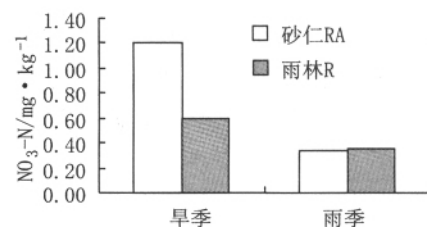


图 2 旱季、雨季砂仁地和雨林地  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  变化状况

Figure 2 Changes of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in the soil of rainforest grown *Amomum villosum* during dry and rainy season, respectively

降雨增加后会对氨化和硝化作用产生影响。这与 Marrs 等<sup>[16]</sup>在哥斯达黎加山地热带雨林研究报道的土壤含水量会抑制氮净矿化或硝化作用结果相同。

由于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  带正电荷易被带负电荷的土壤粘土矿物和有机胶体吸附,不易从土壤中淋失;而带负电荷的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  则易从系统中淋失,因此森林土壤的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度通常高于  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度,这也是森林生态系统保持氮的一种机制<sup>[18]</sup>。从图中可以看出,西双版纳热带雨林地和砂仁地均存在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量在旱季和雨季大于  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的现象。

种植砂仁需对乔木进行疏伐,对灌木杂草进行清除,生态系统在受到干扰后,如森林砍伐和火烧,同样会对硝化作用产生影响。从图中可以看出,砂仁地  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度和雨林地相差不大,但砂仁地与雨林地  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  相比较,在旱季砂仁地中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  显著高于雨林地 ( $P < 0.01$ ),受干扰后的雨林-砂仁模式生

态系统硝化作用大大增加了。

## 2.2 砂仁地和雨林地土壤氮矿化特征

雨林下种植砂仁后,对热带雨林土壤的氮净矿化速率、硝化速率和氨化速率均产生了不同程度的影响,这种影响主要表现在:

其一,砂仁地在雨季的氮矿化速率大大增加了。从表 1 可以看出,雨林地的氮净矿化速率为旱季 ( $3.5 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 显著大于雨季 ( $1.33 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ),孟盈<sup>[2]</sup>在同一地区对热带雨林土壤氮净矿化速率的研究中也发现旱季高于雨季;而砂仁地则表现相反,雨季 ( $6.13 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 明显高于旱季 ( $4.40 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ),且砂仁地雨季土壤的氮矿化速率同样显著大于雨林地,雨季砂仁地土壤的氮矿化速率为雨林地的 4.61 倍。

表 1 砂仁地、雨林地旱季和雨季土壤氮净矿化速率、硝化速率和氨化速率

Table 1 Net N mineralization, nitrification, and ammonification rates during dry and rainy seasons under RA and R, respectively

项目	砂仁地 (RA)		雨林地 (R)	
	旱季	雨季	旱季	雨季
氮净矿化速率/ $\text{mgNH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$	4.40(0.51) <sup>b</sup>	6.13(1.51) <sup>a</sup>	3.50(0.54) <sup>b</sup>	1.33(0.68) <sup>c</sup>
硝化速率/ $\text{mgNO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$	2.97(0.80) <sup>b</sup>	6.79(1.72) <sup>a</sup>	2.29(0.55) <sup>b</sup>	2.19(0.46) <sup>b</sup>
氨化速率/ $\text{mgNH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$	1.42(0.60) <sup>a</sup>	-0.66(0.28) <sup>b</sup>	-1.21(0.15) <sup>c</sup>	-1.03(0.44) <sup>c</sup>

注:括号内的数值为标准差 ( $n=5$ ),同行内含有相同上标字母表示差异不显著 ( $P < 0.01$ )。

其二,砂仁地在雨季土壤的硝化速率显著增强。砂仁地土壤的硝化速率雨季 ( $6.79 \text{ mg NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 显著大于旱季 ( $2.97 \text{ mg NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ),是旱季的 2.29 倍;而雨林地则相反,表现为旱季土壤硝化速率 ( $2.29 \text{ mg NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 稍大于雨季 ( $2.19 \text{ mg NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ )。另外,雨季砂仁地土壤的硝化速率还显著 ( $P < 0.01$ ) 高于雨林地,是雨林地土壤硝化速率的 3.10 倍。砂仁土壤的硝化速率雨季大于旱季,与砂仁地土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量旱季显著高于雨季正好相反,表明土壤硝化速率的增加并不意味着增加土壤中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量,反而暗示增加了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  从土壤中流失的可能,这与  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  带负电荷有很大关系。

其三,砂仁地的氨化速率与雨林地相比较大大增加了。从表 1 中可以看出,雨林地土壤中的氨化速率雨季 ( $-1.03 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 和旱季 ( $-1.21 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ ) 均为负值,均分别低于砂仁地 ( $-0.66 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$  和  $1.42 \text{ mg NH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ )。沙丽清<sup>[1]</sup>在同一地区的研究中也发现雨林地土壤氨化速率为负值这一

现象,并解释为反硝化作用引起的氮损失可能是导致氨化速率出现负值的主要原因。

土壤中有机氮的矿化和硝化速率直接或间接地受多种因素的影响,例如温度、水分、pH 值、分解基质的 C/N,矿化和硝化过程本身是否有抑制物质存在,以及参与分解的有机物质量等有很大关系<sup>[13,14]</sup>,一般认为,在低 pH、低  $\text{O}_2$  浓度以及凋落物 C/N 高的情况下硝化作用通常较低<sup>[14,15]</sup>。

雨林下由于种植砂仁,其土壤的养分状况有了较大改变。从表 2 可以看出,砂仁地中的有机质、全氮、C/N、pH 与雨林地相比有较大提高,其中 pH 的增加呈显著差异 ( $P < 0.01$ ),pH 对土壤微生物影响较大,而土壤有机氮的矿化和硝化都是通过土壤微生物进行的。同时砂仁为浅根作物,根系主要分布在 0~20 cm 土层内,显然降低了土壤容重,改善了土壤的通透性。这些土壤养分状况的改变意味着干扰是通过改变土壤的多项指标综合作用促使矿化和硝化作用增强的。

## 2.3 研究方法与结果的差异

对西双版纳雨季 7 月份热带季节雨林下砖红壤

表 2 0~20 cm 雨林地和砂仁地土壤养分状况(平均值, 标准差)

Table 2 Nutrient contents in the soil (0~20 cm) of the rainforest grown *Amomum villosum*

样地名	有机质 /g · kg <sup>-1</sup>	全氮 /g · kg <sup>-1</sup>	C/N	pH	容重 /g · m <sup>-3</sup>	含水量 /g · kg <sup>-1</sup>
雨林地 (R)	22.95(0.83) <sup>a</sup>	1.15(0.04) <sup>a</sup>	11.58(2.70) <sup>a</sup>	5.35(0.15) <sup>b</sup>	1.32 × 10 <sup>6</sup> (0.10) <sup>a</sup>	123.2(0.52) <sup>a</sup>
砂仁地 (RA)	34.2(1.43) <sup>a</sup>	1.40(0.07) <sup>a</sup>	14.22(2.28) <sup>a</sup>	5.86(0.37) <sup>a</sup>	1.31 × 10 <sup>6</sup> (0.12) <sup>a</sup>	163.8(0.44) <sup>a</sup>

注: 括号内的数值为标准差 (n = 5), 同列内含有相同上标字母表示差异不显著 (P < 0.01)。

的氮矿化速率,沙丽清<sup>[3]</sup>采用埋袋法和孟盈<sup>[4]</sup>采用埋管法进行研究, 所得结果分别是 6.55 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup> 和 13.88 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup>, 而本实验所得结果为 1.33 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup>, 对于硝化速率和氨化速率,沙丽清 (2000) 为 16.28 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup> 和 -9.73 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup>, 本实验则是 2.19 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup> 和 -1.03 mgN · kg<sup>-1</sup> · 30d<sup>-1</sup>。可以看出, 矿化和硝化速率不仅有空间的变化, 也有时间上的变化, 而土壤化学特征和小气候条件分别是影响空间异质性和时间变化的主要因素<sup>[16]</sup>。同时, 研究方法的选择也与研究结果有很大关系。

3 小结

西双版纳热带季节雨林土壤的氮净矿化速率和硝化速率为旱季大于雨季, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量也有相同趋势。雨林下种植砂仁后, 土壤的氮净矿化速率和硝化速率显著增加, 雨季显著大于旱季, 但砂仁地雨季土壤硝化速率的增加并未促使土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量的升高, 暗示 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 在雨季有易淋失的特点。

参考文献:

[1] Sha L Q(沙丽清), Meng Y(孟盈), Feng Z L(冯志立), et al. Nitrification and net N mineralization rate of soils under different tropical forests in Xishuangbanna, Southwest China[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), 2000, 24: 152 - 156. (in Chinese)

[2] Meng Y(孟盈), Xue J Y(薛敬意), Sha L Q(沙丽清), et al. Variations of soil NH<sub>4</sub> - N, NO<sub>3</sub> - N and N mineralization under different forests in Xishuangbanna Southwest China[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), 2001, 25: 99 - 104. (in Chinese)

[3] Zou S Q. Cultivation of *Amomum villosum* under Tropical Rainforest[J]. *Forestry Management and Ecology*, 1993, 60: 157 - 162.

[4] Yin S H(殷寿华). Invasion of *Amomum villosum* and its influence on Tropical Forest Plant Diversity. Symposium of Seminar on Biodiversity in

Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science Press, 1993. 180 - 188. (in Chinese)

[5] Su W H(苏文华), B R Wang(王宝荣), H Z Yan(闫海忠). Influence of planting *Amomum* on tropical ravine rain forest community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 1997, 8(supp.): 71 - 74. (in Chinese)

[6] Wang B R(王宝荣), Su W H(苏文华), Yan H Z(闫海忠). Impact of planting *Amomum* on key protected plants in Mengyang Nature Reserve of Xishuangbanna and its countermeasures[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 1997, 8(supp.): 75 - 81. (in Chinese)

[7] Li G C(李贵才), Han X G(韩兴国), Huan J H(黄建辉). Dry - season dynamics of soil inorganic nitrogen pools in primary lithocarpus xylocarpus forest and degraded vegetations in Ailao Mountain, Yunnan Province. 2001. (in Chinese)

[8] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils[J]. *Advances in Soil Sciences*, 1989, 10: 55 - 112.

[9] Liu G S(刘光崧), Jiang N H(蒋能惠), Zhang L D(张连第), et al. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996. 121 - 265. (in Chinese)

[10] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrification potentials in primary and secondary succession[J]. *Ecology*, 1981, 62: 376 - 386.

[11] Marrs R H, Proctor J, Heaney A, et al. Changes in soil nitrogen mineralization and nitrification along an altitudinal transect in tropical rain forest in Costa Rica[J]. *Journal of Ecology*, 1988, 76: 466 - 482.

[12] Montes R A, Christensen N L. Nitrification and succession in the piedmont of North Carolina[J]. *Forest Science*, 1979, 25: 287 - 297.

[13] Matson P A, Vitousek P M. Nitrogen mineralization and nitrification potentials following clearcutting in the Hoosier National Forest, Indiana[J]. *Forest Science*, 1981, 27: 781 - 791.

[14] Rosswall T. Microbiological regulation of the biogeochemical nitrogen cycle[J]. *Plant and Soil*, 1982, 67: 15 - 34.

[15] Robertson G P. Nitrification in forested ecosystems Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1982a, 296B: 445 - 457.

[16] Pymal, Boerner, Boerner R J, et al. Relative nitrogen mineralization and nitrification in soils of two contrasting hardwood forests: effects of site microclimate and initial soils chemistry[J]. *Forest Ecology and Management*, 1987, 21: 21 - 36.