

西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和 硝态氮动态研究^{*}

孟 盈 薛敬意 沙丽清 唐建维

(中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303)

摘 要 用顶盖埋管法(Close-Top Tube Incubations)就西双版纳3种热带森林(热带季节雨林、片断热带雨林、橡胶林)研究了土壤铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)以及土壤氮素矿化速率的季节动态情况。结果表明:西双版纳3种不同林型土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和氮素矿化速率均具有明显的季节性变化。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 以干热季(4月末)最高(平均为 $26.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和干季(2月末)最低(平均为 $12.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\text{NO}_3\text{-N}$ 则以雨季中期(7月中旬)最高(平均为 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和干季(2月末)最低(平均为 $4.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);矿化速率则以干热季((2月末~4月末)最高(平均为 $0.496 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),以雨季(7月中旬~11月初)最低(平均为 $0.0037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。就不同林型而言,季节雨林年均氮矿化速率($0.319 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) > 片断热带雨林($0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) > 橡胶林($0.074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。

关键词 硝态氮 铵态氮 顶盖埋管法 氮矿化 西双版纳

VARIATIONS OF SOIL $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ AND N MINERALIZATION UNDER DIFFERENT FORESTS IN XISHUANGBANNA, SOUTHWEST CHINA

MENG Ying XUE Jing-Yi SHA Li-Qing and TANG Jian-Wei

(Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, the Chinese Academy of Sciences, Mengla Yunnan 666303)

Abstract Variation in $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and N mineralization was investigated under three different tropical forests in Xishuangbanna (tropical seasonal rainforest, fragmented tropical rainforest and rubber plantation) using the Close-Top Tube Incubation method. $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and N mineralization exhibited significant seasonal variations. The mean values of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ were the highest ($26.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the dry-hot season (about April) and the lowest ($12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the dry season (about February); $\text{NO}_3\text{-N}$ was the highest ($8.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the mid-rainy season (mid July) and the lowest ($4.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the dry season; Net N mineralization rates were the highest ($0.496 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) during the dry and dry-hot seasons (February–April) and the lowest ($0.0037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) during the mid-rainy season and at the end of the rainy season (July–November). Annual net N mineralization rates in the three forests were ranked: tropical seasonal rainforest ($0.319 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) > fragment tropical rainforest ($0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) > rubber plantation ($0.074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

Key words $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, Close-Top Tube Incubations, N mineralization, Xishuangbanna

氮素在森林生态系统中是一种限制植物生长的重要元素(Chapin *et al.*, 1986),主要来源于土壤有机碎屑,通过微生物降解而形成植物可利用的有效态氮(Rashid & Scheaffer, 1988)。氮素一方面是植物从土壤中需求量最大的元素,另一方面又是最易通

过淋溶或挥发而从森林土壤中损失的元素。在森林土壤中有有效氮主要以铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)形式存在, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是植物从土壤中吸收氮素的主要形态。可见,土壤中有机氮化合物转化为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的速率直接影响着土壤

* 收稿日期: 2000-03-07 接受日期: 2000-08-21

基金项目: 中国科学院重点课题(KZ952-J1-103)、中国科学院“九·五”重大项目(KZ95T-04-02-07)和中国科学院创新基地项目

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

E-mail: stznet@public.km.yn.cn

的氮素供给能力(Binkley & Hart, 1989)。在森林生态系统中土壤有效氮素的供应能力主要决定于氮素的矿化、固持和移动3个过程。氮素矿化是在微生物的作用下将有机氮转化为无机氮的过程;固持是将无机氮转化为微生物或植物组织中的有机氮。在自然界中,这两个过程是同时进行的(郁梦德等, 1995; 莫江明等, 1997a; 1997b)。Reich 等(1997)研究发现森林生态系统的生产力与其氮素矿化率有很强的相关关系。地上部分的生产力强烈依赖于土壤的年氮素矿化量。因此,研究森林土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的动态和氮矿化速率及其影响因素对于了解森林生态系统的生产力、营养循环和氮素的循环与转化具有重要的意义。国外对森林生态系统氮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主要以农田生态系统为主,而且基本上都是以单个过程为主,这一方面可以找到较多的文献,而对森林生态系统的氮素转化研究还不多(刘国凡, 1989; 傅声雷等, 1995)。对于西双版纳热带森林生态系统,除沙丽清等(2000)用埋袋法于1998年7月对不同森林土壤氮矿化和硝化做了研究外,笔者还未见更详细的报道。

西双版纳地处热带与亚热带的过渡带,热带森林的类型和结构具有过渡性(Cao & Zhang, 1996)。为了研究不同林型和季节氮矿化作用的动态,我们选择了西双版纳地区分布较为普遍的3种林型作为研究对象:即保存较为完好的热带季节雨林——望天树林(Form. *Parashorea chinensis*),残存的片断化热带雨林(Fragment of the tropical rainforest)——即龙山(Holy hill),人工橡胶林(Rubber plantation)。近年来由于人口的迅猛增长,大片的热带雨林正在以惊人的速度迅速消失,取而代之的是大片的人工橡胶林和刀耕火种的农地和轮歇地。对于刀耕火种和人为干扰对森林生态系统影响将在另文报道。笔者于1998至1999年用顶盖埋管法(Close-Top Tube Incubations)研究了西双版纳热带季节雨林、片断化雨林和人工橡胶林土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的季节动态和不同林型下氮素矿化速率的差异,从而揭示不同林型、季节变化对土壤氮素转化的影响,为提高森林生产力、生态系统管理以及生物多样性保护等提供理论依据。

1 样地概况

本研究在西双版纳勐仑(21°44'N, 101°20'E)自然保护区及橡胶林和勐腊自然保护区(21°29'N,

101°46'E)内进行。西双版纳属西南热带季风气候,干湿季节明显,5~10月为雨季,11月至次年4月为干季,年均降雨量为1500~1600 mm,其中80%以上的降水分布在5~10月,最少月为2月,雨量在20 mm以下。年平均相对湿度为84%,年平均温度为21.4℃,最冷月(1月)和最热月(6月)的平均温度分别为15℃和25℃(徐永椿等, 1987)。

龙山样地位于勐仑保护区城子村后的白象山上,是傣族传统的坟地,受一定的人为干扰,其核心区基本保持原始林的结构与组成。海拔高度在500~700 m之间,代表树种有大叶白颜树(*Cironiera subaequalis*)、大叶藤黄(*Garcinia tinctoria*)等,群落高度40 m,为典型的残存的片断化热带雨林;橡胶林林冠稠密,林下草本稀疏,林龄约为15年,为人工林;季节雨林样地位于勐腊县补蚌自然保护区,海拔700~800 m,优势树种为望天树、小叶藤黄(*Garcinia cowa*)、假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)等,藤本植物丰富,附生半附生植物亦十分丰富,群落高度60 m,林冠稀疏,林下幼苗较为稀少,是西双版纳季节雨林中分布面积最大、保存最好、热带性最强、种类组成最丰富、雨林特点最浓厚最有代表性的类型(朱华, 1990)。研究样地的土壤均为砖红壤,土层较厚,一般均超过80 cm。其土壤的基本理化性质见表1。

表 1 西双版纳 3 种林型土壤养分状况(平均值, 标准差)

Table 1 Soil nutrients contents of three tropical rainforests (means, SE)

林型 Forests	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	C/N	pH	容重 Density (mg · m ⁻³)
龙山 Holy hill	45.4 (0.13)	1.53 (0.12)	12.83 (0.80)	4.83 (0.05)	1.24 × 10 ⁹ (0.12)
季节雨林 Seasonal rainforest	66.0 (0.17)	2.47 (0.10)	15.51 (0.94)	4.63 (0.01)	1.27 × 10 ⁹ (0.14)
橡胶林 Rubber plantation	42.9 (0.19)	1.30 (0.09)	20.16 (1.02)	4.03 (0.02)	1.34 × 10 ⁹ (0.15)

括号内的数值为标准差 The values in the brackets are standard errors

2 研究方法

本研究采用顶盖埋管法(Binkley & Hart, 1989)估测氮素的矿化速率。在实验开始前,准备好大量长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条20 m长的样线,每4 m选取一个样带

(共 5 个样带), 每个样带埋入 5 个 PVC 管(每隔 1 m 1 个管), 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 5 个原状土, 分别装入袋中, 带回实验室, 分析初始 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$; 以后每次取样时先取出上次所埋管中的培养土(取管), 再用上次同样的方法埋管并取对应的原状土带回实验室, 将取回土壤样品在 60°C 下烘干, 过 20 目筛, 分别测定其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。根据西双版纳的气候变化情况, 我们选取 1998 年 2 月 28 日~4 月 27 日为第一个培养期, 以后依次为 4 月 27 日~6 月 17 日, 6 月 17 日~7 月 17 日, 7 月 17 日~11 月 2 日, 11 月 2 日~1999 年 1 月 21 日。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 用 2N 氯化钾-氧化镁-还原蒸馏法测定; 土壤有机质用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定; 土壤全氮用凯氏法测定; pH 值用电极法测定(刘光松等, 1996)。土壤氮净矿化速率= ((土壤培养后的 $\text{NH}_4\text{-N}$ + $\text{NO}_3\text{-N}$) - (土壤初始 $\text{NH}_4\text{-N}$ + $\text{NO}_3\text{-N}$))/培养天数。

3 结 果

$\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 以及矿化速率在 3 种不同林型下均表现出极显著的季节变化($p < 0.001$) (图 1~图 3)。在许多研究中均发现类似的结果(Raghubanshi, 1992; 郁梦德等, 1995)。它们的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 季节变化均以干热季(4 月末)最高, 而以干季(2 月末)最低; $\text{NO}_3\text{-N}$ 则以雨季中期(7 月中旬)最高, 以干季(2 月末)最低; 就其绝对量而言, $\text{NH}_4\text{-N}$ 在总有效氮中占的比例均高于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 11.7~28.95 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 则在 2.23~12.47 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在鼎湖山季风常绿阔叶林及马尾松人工林的研究中也发现类似的结果(郁梦德等, 1995; 莫江明等, 1997)。在不同林型中, 龙山林年均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在总有效氮中所占比例约为 67% 左右, 季节雨林约为 78%, 橡胶林约为 82%; 龙山 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与其它两种林型差异性显著($p < 0.05$), 而季节雨林与橡胶林差异并不显著; 且年均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 龙山小于其它两种林型, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 则大于其它两种林型。

影响土壤氮素矿化的因素很多。由于氮素矿化是一个微生物参与的过程, 因此研究地区的温度和

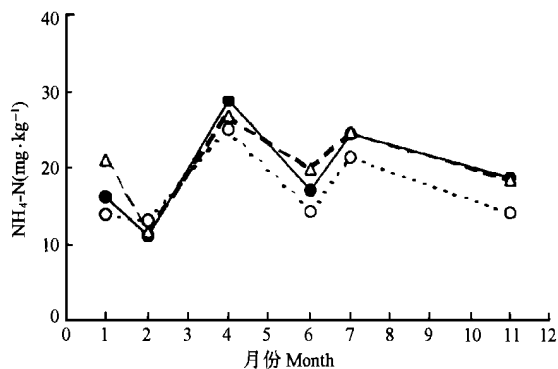


图 1 不同林型 $\text{NH}_4\text{-N}$ 动态

Fig. 1 Seasonal patterns of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ in different forests

—○— 龙山 Holly hill
—●— 季节雨林 Seasonal rain forest
--△-- 橡胶林 Rubber plantation

图 2、图 3、图 6、图 7 图例同此 The legends of Fig. 2, Fig. 3, Fig. 6 and Fig. 7 are the same as Fig. 1

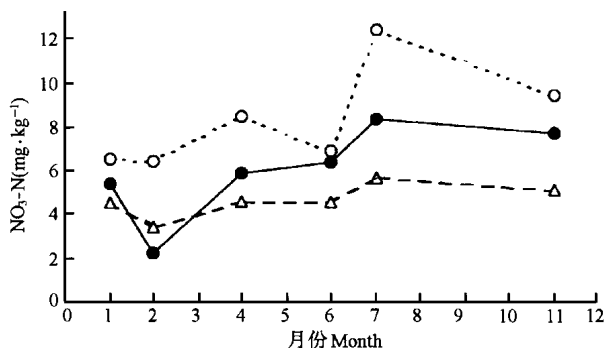


图 2 不同林型 $\text{NO}_3\text{-N}$ 动态

Fig. 2 Seasonal patterns of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ in different forests

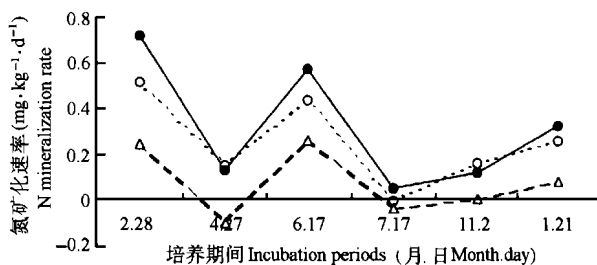


图 3 不同林型矿化速率动态

Fig. 3 Differences of soil N mineralization in different forests

湿度的季节性变化是产生氮素矿化季节性变化的重要因素(Raghubanshi, 1992)。从图 3 可以看出, 土壤氮矿化速率呈明显的波浪式季节变化。土壤氮矿化速率最高($0.244 \sim 0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)均出现在干季到干热季(2 月末~4 月末); 干热季到雨季初期出现低谷(橡胶林出现负值), 雨季初期到雨季中期出现次高峰期, 而最低出现在雨季中期到雨季末期($-0.0381 \sim -0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 其中龙山和橡胶

林出现负值, 雾季(11月初~次年1月)次之; Samina 等(1998)研究也发现雨季的氮矿化速率有较高趋势, 冬季则最低; Nadelhoffer 和 Aber(1985)研究结果表明 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的积累可以引起硝化, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的积累可以增加反硝化。从图4可以看出, 出现低谷主要是由于培养期间 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的降低引起的, 在雨季中期到末期, 由于降水日数多, 土壤水分经常处于过饱和状态, 通气性差, 反硝化作用有可能加强, 因而, 反硝化作用引起的氮损失也是导致氮矿化速率减小的主要原因。土壤氮素矿化速率还与细根的分解、无机氮的吸收等密切相关(Samina *et al.*, 1998)。就不同林型而言, 3种林型中以季节雨林的年均矿化速率为最高($0.319 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 以橡胶林为最低($0.074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 龙山居于两者之间(年均 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。Vitousek 和 Sanford(1986)曾发现肥力高的热带土壤的氮矿化速率高于肥力低的热带土壤。季节雨林的土壤的有机质含量高于橡胶林土壤(表1), 从而导致季节雨林的氮矿化速率高于橡胶林。另外橡胶林与其它两种林型相比, 橡胶林下无幼苗, 草本也较少(因每年均要除草), 地表裸露, 由于割胶不断践踏导致土壤板结, 太阳辐射、气温、地表温度、土壤通气状况均与林下不同, 从而导致氮素转化过程与其它两种林型明显不同。沙丽清等(2000)研究发现西双版纳热带季节雨林和次生林的氮净矿化速率高于林窗和轮歇地。

从图4、图5可以看出在所有培养期间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均呈显著的增加趋势($p > 0.01$), 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在培养前后则随季节呈波浪式变化, 引起氮矿化速率随季节呈波浪式变化的主要是由于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在培养后的波浪式变化引起的。另外还发现 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在培养状态和自然状态下其含量并无显著差异(图4), 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 则显著高于自然状态下(图5) ($p > 0.01$)。这进一步说明了封顶埋管法既能避免降雨淋溶的影响, 又

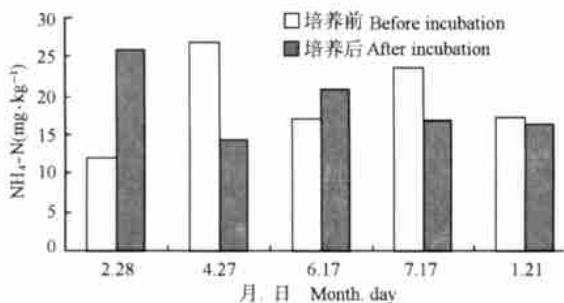


图4 培养前后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 变化

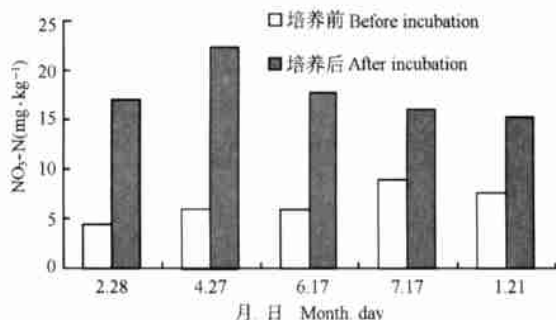


图5 培养前后 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变化

Fig. 5 Changes of $\text{NO}_3\text{-N}$ before and after incubation

能反映自然状态下土壤氮素矿化的优点。其次, 培养期对矿化速率有很大的影响。由于固持和矿化的平衡以及微生物种群动态变化的结果, 氮矿化率并不随培养期呈线性关系, 因此培养期长短的选择对野外培养是很关键的(Binkley & Hart, 1989)。本研究结果表现为培养期最长的矿化速率最低, 这可能与培养期太长有关。

变异系数表现了有效氮空间分布的均匀程度。从图6、图7可见, 热带森林土壤有效氮的变异系数是因林型和季节不同而不同。尽管 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量比较小, 但 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变异系数(35%~106%)远高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 变异系数(22%~38%), 且 $\text{NH}_4\text{-N}$ 变异系数随季节变化不明显, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变异系数随季节变化显著($p < 0.05$)。对于不同林型而言, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变异系数片断化雨林高于季节雨林和橡胶林, 这可能是由于片断雨林林子比较小, 暴露在林缘的比例大, 且离人居住方也较近, 受人为干扰的程度较大的原因; 而其它两个样地林分较为均匀, 故而出现变异系数小的结果。就季节而言, 干热季(4月末)最高, 而雨季中期最低, 这可能是由于干热季土壤含水量的空间变异性大而造成的。

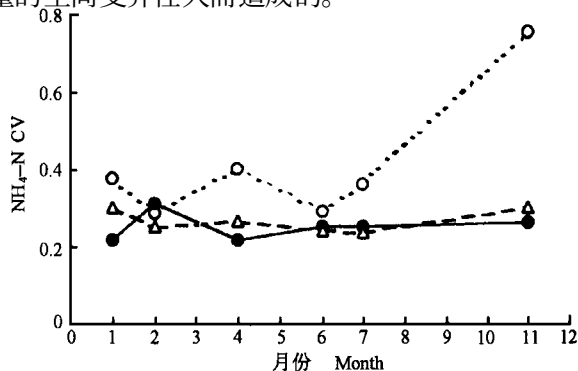


图6 不同林型 $\text{NH}_4\text{-N}$ 变异系数(CV)

Fig. 6 Differences of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ variation coefficient(CV)

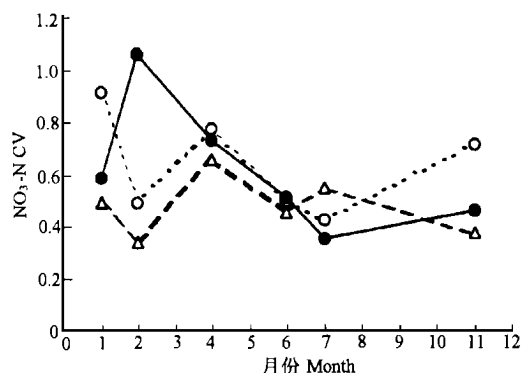


图7 不同林型土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变异系数(CV) 动态

Fig. 7 Differences of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ variation coefficient (CV) in different forests

4 讨 论

氮素是森林植物生长不可缺少的营养元素, 对于森林土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的动态的研究一直为人们所重视, 但目前还没有一个统一的土壤氮素矿化测量方法。氮素矿化的研究方法很多, 培养法为多数学者采用。培养法包括室内培养、野外培养; 室内培养又分为有氧培养、厌氧培养、重复培养等 (Binkley & Hart, 1989)。其中野外培养又包括封顶埋管法、埋袋法、离子交换树脂法、树脂芯法等。不同研究方法所反映的氮素矿化情况存在差异 (Hart & Firestone, 1989; Raison *et al.*, 1987)。没有一种被证明适用于所有地点 (Hart & Firestone, 1989)。上述方法中, 封顶埋管法看来是最合适的, Nadelhoffer 和 Aber (1985) 提供的证据表明, 这种方法给出了土壤氮净矿化的可靠估计; 它还能避免降雨淋溶的影响, 保持原有的土壤水分动态和土壤结构, 操作简单、成本低, 而且精度较高。尤其在西双版纳地区降雨频繁, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋溶更为严重。实验结果表明: 培养状态下 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著高于自然状态 ($p < 0.05$)。大量研究结果表明, 测定结果与其它方法并无显著差异, 故本研究采用此法。但由于森林土壤根系、石块较多, PVC 管容易破碎, 且在干季土样容易从管底漏掉, 因此本方法有待改进之处。对于土样的处理, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量的测定一般采用新鲜土样, 但近来也有人采用 60°C 下烘干后测定其含量, 认为在控制温度条件下短时间进行烘干能更有效地抑制微生物活动。本研究因地处偏僻, 实验条件受到限制, 无法对大批量的新鲜土样及时进行 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的分析, 故而采用烘干土测定。

本研究发现, 西双版纳 3 种不同林型土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 以及它们的矿化速率均具有明显的季

节性变化, 且空间分布很不均匀 ($> 22\%$)。因此在研究土壤有效氮年供应时, 取样必须涉及各个季节, 培养期间也要相同, 且要有足够的样品数量。氮矿化速率的季节变化是多方面环境因素综合作用的结果。由于氮素矿化是一个微生物参与的过程, 因此土壤温度和湿度的季节变化是其中重要原因之一 (Raghubanshi, 1992)。但是在热带森林生态系统中, 土壤温度年变幅比较小, 这种季节性变化主要是受土壤湿度的季节性变化影响。在西双版纳地区由于雨热同季的气候特点, 氮矿化速率的季节变化尤其明显。

本研究结果表明: 橡胶林的土壤氮矿化速率最低, 热带季节雨林最高。对桉树、刺槐的研究发现不同林型下土壤氮素矿化有明显差异 (Liu & Muller, 1993); 不同森林类型、不同土壤类型下的氮素矿化速率有很大差别, 森林生态系统的生产力与其氮素矿化率有很强的相关关系, 地上部分的生产力强烈依赖于土壤的年氮素矿化量, 而不是林型 (Reich *et al.*, 1997)。有关研究结果表明: 热带季节雨林生态系统的生产力高于人工橡胶林的生产力, 本研究的结果: 望天树季节雨林氮矿化速率高于橡胶林, 正好反映了这种关系。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 除了供应植物生长外, 它们还有可能从林地中流失。两者比较, $\text{NO}_3\text{-N}$ 较 $\text{NH}_4\text{-N}$ 更易于从林地中流失。这是由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 带负电, 易于从土壤尤其是阴离子交换能力差的土壤淋溶流失。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 同样通过反硝化作用变为易于挥发的气体而损失。本研究样地位于热带, 其高温、多雨、潮湿等环境条件, 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的保护更为不利。然而, 本研究结果显示的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占优势的现象, 对于保护林地肥力, 防止林地氮素流失具有重要的现实意义。这可能是由于本研究样地土壤 pH 值 ($4.0 \sim 4.8$ 左右) 低的原因造成的 (表 1)。低的 pH 值对硝化细菌的生长具有抑制作用 (Keeney, 1980)。3 种林型中 pH 值: 片断热带雨林 $>$ 望天树林 $>$ 橡胶林 (表 1)。这与它们的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在总有效氮中所占的比例 (片断热带雨林 $<$ 望天树林 $<$ 橡胶林) 是相一致的。

参 考 文 献

- Binkley, D. & S. C. Hart. 1989. The components of nitrogen availability assessments in forest soils. *Advances in Soil Science*, **10**: 57~112.
- Cao, M. & J. H. Zhang. 1996. Tree species composition of a seasonal rainforest in Xishuangbanna, South west China. *Tropical Ecology*, **37**: 183~192.

- Chapin III, F. S. H., P. Vitousek & K. V. Cleve. 1986. The nature of nutrient limitation in plant communities. *American Naturalist*, **127**: 148~158.
- Fu, S. L. (傅声雷), W. M. Yi (蚁伟民) & M. M. Ding (丁明懋). 1995. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass under different plantations in Dinghushan. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **19**: 217~224. (in Chinese)
- Hart, S. C. & M. K. Firestone. 1989. Evaluation of three *in situ* soil nitrogen availability assays. *Canadian Journal of Forest Research*, **19**: 185~191.
- Keeney, D. R. 1980. Predication of soil nitrogen availability in forest ecosystems: a literature review. *Forest Science*, **26**: 159~171.
- Liu, G. F. (刘国凡). 1989. Source, transformation and adjustment of nitrogen in forest soils. *Soil Advances* (土壤学进展), **17**: 18~21. (in Chinese)
- Liu, G. S. (刘光崧), N. H. Jiang (蒋能惠), L. D. Zhang (张连第) & Z. L. Liu (刘兆礼). 1996. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles. Beijing: Standards Press of China. 121~265. (in Chinese)
- Liu, Y. & R. N. Muller. 1993. Above-ground net primary productivity and nitrogen mineralization in a mixed mesophytic forest of eastern Kentucky. *Forest Ecology and Management*, **59**: 53~62.
- Mo, J. M. (莫江明), M. D. Yu (郁梦德) & G. H. Kong (孔国辉). 1997a. The dynamics of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ in a pine forest of Dinghushan, as assessed by ion exchange resin bag method. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **21**: 335~341. (in Chinese)
- Mo, J. M. (莫江明) & G. H. Kong (孔国辉). 1997b. Effects of litter and understory removal on soil N availability in a subtropical pine forest of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **17**: 109~112. (in Chinese)
- Nadelhoffer, K. J. & J. M. Aber. 1985. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology*, **66**: 1377~1390.
- Raghubanshi, A. S. 1992. Effect of topography on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**: 145~150.
- Raison, R., M. Connell & M. Khanna. 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ* culture. *Soil Biology Biochemistry*, **19**: 521~530.
- Rashid, G. H. & R. Scheaffer. 1988. Seasonal variation in the nitrogen mineralization and mineral nitrogen accumulation in two temperate forest soils. *Pedobiologia*, **31**: 335~347.
- Reich, P. B. & F. G. David, D. A. John & T. Stith. 1997. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology*, **78**: 335~347.
- Samina, U., Y. S. Rawat & S. P. Singh. 1998. Mineralization and inorganic-N uptake in chir pine forest of Central Himalaya. *Tropical Ecology*, **39**: 193~199.
- Sha, L. Q. (沙丽清), Y. Meng (孟盈), Z. L. Feng (冯志立), Z. Zheng (郑征), M. Cao (曹敏) & H. M. Liu (刘宏茂). 2000. Nitrification and net N mineralization rate of soils under different tropical forests in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **24**: 152~156. (in Chinese)
- Vitousek, P. M. & R. L. Sanford. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **17**: 137~167.
- Xu, Y. C. (徐永椿), H. Q. Jiang (姜汉侨) & F. Quan (全复). 1987. Integrated investigation reports of Xishuangbanna nature reserve. Kunming: Technology Press of Yunnan. 44~57. (in Chinese)
- Yu, M. D. (郁梦德), J. M. Mo (莫江明) & G. H. Kong (孔国辉). 1995. Assessing soil nitrogen availability in Dinghushan monsoon evergreen broadleaf forest by ion exchange resin bag method. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), **3**(4): 44~48. (in Chinese)
- Zhu, H. (朱华). 1990. Vegetation of tropical rainforest in Xishuangbanna. *Tropical Geography* (热带地理), **10**: 233~239. (in Chinese)

责任编委: 欧阳华 责任编辑: 张丽赫