

西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究

沙丽清* 孟 盈 冯志立 郑 征 曹 敏 刘宏茂

(中国科学院西双版纳热带植物园森林生态研究室, 昆明 650223)

摘 要 1998年7月, 用埋袋法对西双版纳热带季节雨林、崖豆藤(*Mellettia leptobotrya*)次生林、季节雨林内林窗和轮歇地土壤的氮矿化和硝化作用进行了研究。研究结果表明季节雨林和崖豆藤次生林的格局基本相同, 氮净矿化速率分别为 $6.55 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 和 $6.37 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$, 硝化速率分别为 $16.28 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 和 $16.38 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 。而林窗下和轮歇地土壤的氮净矿化速率和硝化速率均为负值, 氮净矿化速率分别为 $-7.85 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 和 $-10.69 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$, 硝化速率分别为 $-2.78 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 和 $-3.69 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ 。从实验结果看, 在30d的培养过程中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 消耗较多, 导致硝化速率大于氮净矿化速率。

关键词 热带季节雨林 次生林 林窗 氮矿化 硝化 氨化

NITRIFICATION AND NET N MINERALIZATION RATE OF SOILS UNDER DIFFERENT TROPICAL FORESTS IN XISHUANGBANNA, SOUTHWEST CHINA

SHA Li-Qing MENG Ying FENG Zhi-Li ZHENG Zheng CAO Min and LIU Hong-Mao

(Department of Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden,
the Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223)

Abstract Using the buried-bag method we measured nitrification and net N mineralization rates for soils (0~10cm) under a variety of forest types in Xishuangbanna, Southwest China in July of 1998. The forest types studied were: tropical seasonal rainforest, *Melettia leptobotrya* secondary forest, forest gap, and slash-and-burn agricultural land. Net N mineralization rates were $6.55 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in seasonal rainforest and $6.37 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in secondary forest. Nitrification rates were $16.28 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in seasonal rainforest, $16.38 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in secondary forest. Nitrification and net N mineralization rates were $-2.78 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ and $-7.85 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in forest gap, $-3.69 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ and $-10.69 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$ in agricultural land, respectively. Ammonification rates were negative in all the studied sites, with the result that net N mineralization rates were lower than nitrification rates.

Key words Tropical rainforest, Secondary forest, Forest gap, N mineralization, Nitrification, Ammonification

由于受工业化和农业施用大量氮素的影响, 人们对氮在生态系统中的作用有了更新的认识(N_2O 是一种温室气体, $\text{NO}_2\text{-N}$ 有致癌作用, $\text{NO}_3\text{-N}$ 导致水体生态系统酸化, 水体中氮素过多导致富营养化, 森林生态系统的氮饱和现象等等)。氮循环在生态学、保护生物学、森林经营与管理、全球变化等方面的重要性越来越引起人们的重视。有机态氮通过矿化作用转化为无机态氮后, 才能被植物和微生物吸收利用, 因而氮矿化作用影响氮的生物有效性, 从而影响植物的生长和微生物活性(Keeney, 1980)。氮

和磷一样, 其有效性对森林生产力通常是限制因子(Vitousek, 1984), 因而氮的矿化作用是森林生态系统元素循环研究中的重要内容。氨化和硝化作用是氮素循环中的重要过程, 对氮的形态和比例、氮的有效性、氮的淋失和反硝化作用都具显著影响(Monagnini & Buschbacher, 1989)。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, 而对森林生态系统氮转化过程的研究还不多, 对西双版纳热带森林生态系统的氮转化研

收稿日期: 1999-03-18 修订日期: 1999-10-24

基金项目: 本研究得到中国科学院“九·五”重大项目(KZ95T-04-02-07)、云南省自然科学基金项目(97C017R)、中国科学院重点支持项目(KZ952-S1-101)、中国科学院生物科学与技术研究特别支持项目和中国科学院创新基地项目资助

*通信联系人 Author for correspondence

究笔者还未见报道。

西双版纳地处热带与亚热带的过渡带,热带雨林的类型和结构具过渡性(Cao & Zhang, 1996)。为了比较植物演替、刀耕火种和林窗对氮矿化作用的影响,我们选择了崖豆藤(*Mellettia leptobotrya*)次生林、轮歇地和林窗 3 块样地与原始的季节雨林进行比较研究。在西双版纳,传统的刀耕火种耕作方式还比较盛行,不合理的土地利用方式,使土壤氮及其它营养元素大量损失(沙丽清等,1998),不仅对土地生产力,而且还会对植物演替产生深刻的影响(Robertson, 1984)。林窗是推动森林演替和更新的重要因素之一,有关林窗的形成、分布,对水、热、光的影响以及对森林循环的作用,国内外都有不少报道。但有关林窗对土壤养分影响的研究还不多见(Vitousek & Denslow, 1986)。研究林窗与林冠下土壤的氮矿化特征,将有助于我们认识热带森林生态系统的动态过程。

本文将讨论西双版纳热带季节雨林及其林窗下、崖豆藤次生林下和轮歇地土壤氮矿化和硝化作用特征,揭示演替阶段、人为活动及自然因素对土壤氮转化的影响,为保护热带森林及提高森林生产力提供理论依据。本研究产生的数据,结合中国生态系统研究网络其它定位站的数据,对认识我国森林生态系统氮循环乃至氮的全球变化具有重要意义。

1 研究样地和研究方法

1.1 研究样地

4 块样地均在中国科学院热带生态站(位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇,21°56'N, 101°16'E)附近,海拔 650~750m。据中国科学院热带生态站气象站多年资料,年均温为 21.4℃,年均降雨量为 1557mm,其中雨季(5~10 月)为 1355mm,占全年的 87%,干季(11~4 月)为 202mm,仅占年降雨量的 13%,相对湿度为 86%。土壤为由白垩系砂岩发育而成的砖红壤。季节雨林样地位于自然保护区内,优势种为番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、云南肉豆蔻(*Myristica yunnanensis*)、滇南风吹楠(*Horsfieldia tetratalepa*)、光叶天料木(*Homalium laoticum*)、金刀木(*Barringtonia macrostachya*)等。群落高度 48m,林龄约 200a。林窗位于季节雨林内,于 1994 年由倒树形成,面积约 500m²。轮歇地距离季节雨林样地约 2km,砍伐森

林后已连续耕作 8a,主要作物为玉米和旱稻。崖豆藤次生林样地为热带季节雨林经砍伐、丢荒后自然恢复起来的次生林,林龄 28a,该群落已处于次生演替中期,其外貌和结构已与季节雨林有许多相似之处。优势种为崖豆藤、蒲桃(*Syzygium* sp.)、印度栲(*Castanopsis indica*)等。样地的详情请参见有关文献¹⁾(Cao & Zhang, 1996;张建侯等,1994)。

1.2 研究方法

野外实验于 1998 年 7 月进行。在每块研究样地内选择一条经过样地中心的样带,在样带上布置间距为 5m 的 5 个取样点。在每一取样点 50cm×50cm 的范围内,用直径 4cm、高 10cm 的环刀取 0~10cm 土层的原状土柱 3 个,保持原状分别装入聚乙烯塑料袋内,密封后放回原处,并覆盖 2cm 厚的表土和枯落物(Eno, 1960; Pastor *et al.*, 1984)。同时用相同方法取样,并将每一取样点的 3 个土柱混合成一个分析样,每块样地共有 5 个混合分析样,分析它们的初始 NO₃-N(还原蒸馏法)和 NH₄-N(氯化钾浸提-蒸馏法),以及 pH(KCl 浸提-玻璃电极法)、有机质(OM)(重铬酸钾氧化-外加热法)、全氮(TKN)(半微量开氏法),详细的操作方法请参见有关文献(刘光崧等,1996)。将实地培养 30d 后的土柱取回实验室内,同上法混合成 5 个分析样,并分析 NO₃-N、NH₄-N。按以下公式计算有关参数(Robertson & Vitousek, 1981):

土壤氮净矿化速率($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$) = (土壤培养 30d 后的 NO₃-N + NH₄-N) - (土壤初始 NO₃-N + NH₄-N)

硝化速率($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$) = (土壤培养 30d 后的 NO₃-N) - (土壤初始 NO₃-N)

氨化速率($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}$) = (土壤培养 30d 后的 NH₄-N) - (土壤初始 NH₄-N)

对实验数据进行方差分析和用 LSD 法进行多重比较(西北农学院等,1979)。

2 结果与讨论

2.1 季节雨林、崖豆藤次生林、林窗和轮歇地土壤的养分状况比较

从表 1 看出,轮歇地和林窗下土壤的 pH 高于季节雨林和崖豆藤次生林下的土壤,且各样地间的差异均达 1%显著水平。对于有机质,季节雨林和崖豆藤次生林高于林窗和轮歇地,各样地间的差异也

1) 任泳红. 1997. 西双版纳热带森林凋落物动态及其对先锋树种种子萌发和幼苗定居的影响. 中国科学院昆明生态所硕士论文.

表 1 季节雨林、崖豆藤次生林、林窗及轮歇地土壤(0~10cm)的 pH、有机质(OM)、全氮(TKN)、C/N、NH₄-N、NO₃-N

Table 1 pH, OM, TKN, C/N, NH₄-N and NO₃-N concentration for soils (0~10cm) under seasonal rainforest, secondary forest, forest gap, and slash-and-burn agricultural land

	季节雨林 Seasonal rainforest	崖豆藤次生林 Secondary forest	林窗 Forest gap	轮歇地 Slash-and-burn agricultural land
pH	3. 75 (0. 10) ^c	3. 47 (0. 07) ^d	4. 15 (0. 05) ^b	4. 93 (0. 13) ^a
有机质 OM (%)	2. 713 (0. 138) ^b	4. 213 (0. 176) ^a	1. 316 (0. 038) ^d	2. 185 (0. 086) ^c
全氮 TKN (%)	0. 140 (0. 018) ^b	0. 235 (0. 030) ^a	0. 093 (0. 009) ^c	0. 134 (0. 010) ^b
碳/氮 C/N	11. 33 (0. 87) ^a	10. 49 (0. 99) ^{ab}	8. 30 (0. 76) ^c	9. 48 (0. 69) ^{bc}
NH ₄ -N (mg · kg ⁻¹)	19. 75 (4. 93) ^a	20. 87 (8. 36) ^a	12. 81 (6. 85) ^a	20. 41 (1. 66) ^a
NO ₃ -N (mg · kg ⁻¹)	4. 71 (1. 37) ^b	11. 66 (2. 28) ^a	5. 67 (2. 52) ^b	7. 37 (2. 61) ^b

括号内的数值为标准差;同行内含有相同上标字母表示差异不显著($p<0.01$) The values in the brackets are standard errors ; Common superscript letters in a row indicate no significant differences between sites ($p<0.01$).

均达 1%显著水平。对于全氮和 C/N,均为季节雨林和崖豆藤次生林高于林窗和轮歇地。各样地间 NH₄-N 浓度差异不显著,而崖豆藤次生林样地的 NO₃-N 浓度显著高于其余样地,且其余样地间的 NO₃-N 浓度差异不显著。各样地的 NH₄-N 浓度均高于 NO₃-N 浓度。NH₄-N 带正电荷,易被带负电荷的粘土矿物和有机胶体吸附,不易淋失。而带负电荷的 NO₃-N 易从生态系统中淋失。森林土壤的 NH₄-N 浓度通常高于 NO₃-N 浓度,这也是生态系统保持氮的一种机制(Montes & Christensen, 1979)。

总的说来,季节雨林和崖豆藤次生林下土壤的 OM 和 TKN 高于轮歇地和林窗下的土壤,这主要是季节雨林和崖豆藤次生林以枯枝落叶的形式归还

土壤的养分多。崖豆藤次生林的年凋落物量(12.01 t · hm⁻² · a⁻¹)大于季节雨林(8.42 t · hm⁻² · a⁻¹)¹⁾,因而崖豆藤次生林下土壤的有机质和全氮都显著高于季节雨林。

2.2 季节雨林、崖豆藤次生林、林窗和轮歇地土壤的氮矿化特征

从表 2 看出,对于氮净矿化速率和硝化速率,季节雨林和崖豆藤次生林基本接近,并且都显著高于轮歇地和林窗。轮歇地和林窗的氮净矿化速率和硝化速率都为负值。在 30d 的培养过程中,各样地的 NH₄-N 都被大量消耗,表现为氮净矿化速率低于硝化速率。氨化速率都为负值,且各样地间差异均不显著。

表 2 季节雨林、崖豆藤次生林、林窗及轮歇地土壤(0~10cm)的氮净矿化速率、硝化速率和氨化速率

Table 2 Net N mineralization, nitrification, and ammonification rates for soils (0~10cm) under seasonal rainforest, secondary forest, forest gap, and slash-and-burn agricultural land

	季节雨林 Seasonal rainforest	崖豆藤次生林 <i>Mellettia leptobotrya</i> secondary forest	林窗 Forest gap	轮歇地 Slash-and-burn agricultural land
氮净矿化速率 Net N mineralization (mg (NH ₄ -N + NO ₃ -N) · kg ⁻¹ · 30 d ⁻¹)	6. 55 (12. 49) ^a	6. 37 (6. 37) ^a	-7. 85 (9. 23) ^b	-10. 69 (1. 93) ^b
硝化速率 Nitrification rate (mg NO ₃ -N · kg ⁻¹ · 30 d ⁻¹)	16. 28 (8. 01) ^a	16. 38 (6. 08) ^a	-2. 78 (3. 06) ^b	-3. 69 (2. 62) ^b
氨化速率 Ammonification rate (mg NH ₄ -N · kg ⁻¹ · 30 d ⁻¹)	-9. 73 (6. 12) ^a	-10. 00 (7. 01) ^a	-5. 08 (7. 55) ^a	-7. 00 (2. 11) ^a

括号内的数值为标准差;同行内含有相同上标字母表示差异不显著($p<0.01$) The values in the brackets are standard errors ; Common superscript letters in a row indicate no significant differences between sites ($p<0.01$).

1) 任泳红. 1997. 西双版纳热带森林凋落物动态及其对先锋树种种子萌发和幼苗定居的影响. 中国科学院昆明生态所硕士论文.

土壤的氮矿化速率和硝化速率受土壤肥力、土壤基质、土壤水热条件和土壤微生物等因素的综合影响(Matson & Vitousek, 1981; Rosswall, 1982)。Vitousek 和 Sanford (1986) 曾报道肥力高的热带土壤的氮矿化速率高于肥力低的热带土壤。土壤基质主要与 C/N 和木质素有关。NH₄-N 也影响土壤的硝化速率, 即 NH₄-N 的增加将增大硝化速率(Robertson, 1984; Montagnini & Buschbacher, 1989)。硝化作用还与森林所处的演替阶段有关。许多研究表明随演替年代的增加, 土壤的硝化速率降低(Haines, 1977), 这样可以在生态系统中积累更多的营养元素, 是生态系统发展的一种策略(Odum, 1969)。但也有研究表明演替初期的矿化速率和硝化速率都低(Robertson, 1984), 而演替后期硝化速率也可能较高(Montes & Christensen, 1979)。

国外的许多研究认为, 在未受干扰的热带雨林下, 由于根系层 pH 低和富含单宁, 因而硝化细菌数量少, 硝化速率低, 是生态系统保存氮的一种机制。但当雨林被砍伐、火烧成为农地后, 这种机制则会丧失(Jordan *et al.*, 1979; 1983)。因而森林砍伐后土壤的氮矿化速率和硝化速率均比未受干扰的森林高(Matson *et al.*, 1987; Montagnini & Buschbacher, 1989; Matson & Vitousek, 1981; Vitousek *et al.*, 1979)。

土壤氮素的损失除挥发、淋失外, 反硝化作用也是主要的途径。反硝化作用主要受反硝化细菌的影响, 与土壤的水热条件和通气状况密切相关。在通气状况差的情况下, 易产生反硝化作用。土壤反硝化速率还与现有植物群落所处的演替阶段有关, 演替初期和后期的植物群落下的土壤反硝化速率比演替中期的高(Robertson & Tiedje, 1988)。

影响氮矿化作用的因素非常复杂, 对实验结果

应从不同角度进行综合分析。我们的实验结果表明, 西双版纳季节雨林下土壤的硝化速率与亚马逊流域委瑞内拉热带雨林的硝化速率(14.91mg NO₃-N · kg⁻¹ · 30 d⁻¹)接近, 但是氮净矿化速率却远远低于后者(13.96 mg (NH₄-N + NO₃-N) · kg⁻¹ · 30 d⁻¹)(Montagnini & Buschbacher, 1989)。季节雨林的硝化速率和氮净矿化速率与崖豆藤次生林的几乎相同, 表明这两种群落在氮矿化和硝化作用方面已无差异, 这可能是崖豆藤次生林已处于演替中期, 其外貌和结构已与季节雨林相似之故。林窗和轮歇地的硝化速率和氮净矿化速率都为负值, 且都显著的低于季节雨林和次生林。从干扰和演替的角度分析, 似乎轮歇地和林窗土壤的氮净矿化速率和硝化速率应大于次生林和原始季节雨林。但从土壤肥力影响氮矿化作用看, 我们的实验结果也是可以得到解释的, 即肥力高的季节雨林和次生林下土壤的硝化速率和氮净矿化速率高于肥力低的轮歇地和林窗土壤。水热条件也是影响氮矿化的重要因素。7 月正值西双版纳的雨季, 降雨量和气温都较高。表 3 列出了季节雨林、次生林和轮歇地 3 块样地 7 月份的小气候条件。林窗的气候资料缺乏, 但从有关的资料推测(张一平等, 1999), 林窗内的太阳辐射、气温及地表温度均大于林内。林窗和轮歇地与季节雨林和次生林相比, 尽管 NH₄-N 浓度无差异, C/N 也较低, 但由于地表裸露, 太阳辐射强, 气温、地表温度比林内高, 氮转化过程与林下不同。7 月份降雨量大, 降水日数也多, 土壤经常处于水分过饱和状态, 通气性差, 反硝化作用加强。因而, 反硝化作用引起的氮损失可能是导致硝化速率和氮净矿化速率出现负值的主要原因。土壤中细根和微生物对氮的吸收作用也可能有影响。但要得出明确的结论, 还需做进一步的研究, 特别是结合微生物的研究。

表 3 季节雨林、崖豆藤次生林和轮歇地样地的气象条件(1998 年 7 月)
Table 3 Climate conditions of the sites during field experiment (Jul., 1998)

	气温 Air temperature (℃)	降雨量 Rainfall (mm)	降雨日数 Raindays (d)	相对空气湿度 Relative air humidity (%)	地表温度 Surface temperature (℃)
季节雨林 Seasonal rainforest	24.6	439.1	28	94	24.1
崖豆藤次生林 <i>Mellettia leptobotrya</i> secondary forest	25.0	397	26	92	28.0
轮歇地 Slash-and-burn agricultural land	25.5	281.8	18	89	29.3

3 结 语

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。反硝化作用可能是导致轮歇地和林窗下土壤的硝化速率和氮净矿化速率出现负值的主要原因。4 块样地的氨化速率均为负值。西双版纳季节雨林土壤的硝化速率与亚马逊流域委瑞内拉热带雨林的硝化速率接近,但氮净矿化速率却远远低于后者。

热带雨林生态系统的氮矿化过程非常复杂,影响因素多。欲较全面的认识西双版纳热带森林生态系统的氮循环特征及其影响因素,还需进行长期的定位研究。

参 考 文 献

- Cao, M. & J. H. Zhang. 1996. Tree species composition of a seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China. *Tropical Ecology*, **37**(2): 183~192.
- Eno, C. 1960. Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. *Proceedings of Soil Science Society of America*, **24**: 277~279.
- Haines, B. L. 1977. Nitrogen uptake: apparent pattern during old field succession in southeastern U. S. *Oecologia*, **26**: 295~303.
- Jordan, C. F., R. L. Todd & G. Escalante. 1979. Nitrogen conservation in a tropical rainforest. *Oecologia*, **39**: 123~129.
- Jordan, C. F., W. Caskey & G. Escalante. 1983. Nitrogen dynamics during conversion of primary Amazonian rain forest to slash and burn agriculture. *Oikos*, **40**: 131~139.
- Keeney, D. R. 1980. Prediction of soil nitrogen availability in forest ecosystems: a literature review. *Forest Science*, **26**: 159~171.
- Liu, G. S. (刘光崧), N. H. Jiang (蒋能惠), L. D. Zhang (张连第) and 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)
- Matson, P. A. & P. M. Vitousek. 1981. Nitrogen mineralization and nitrification potentials following clearcutting in the Hoosier National Forest, Indiana. *Forest Science*, **27**: 781~791.
- Matson, P. A., P. M. Vitousek & J. J. Ewell. 1987. Nitrogen transformations following tropical forest felling and burning on a volcanic soil. *Ecology*, **68**: 491~502.
- Montagnini, F. & R. Buschbacher. 1989. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon. *Biotropica*, **21**: 9~14.
- Montes, R. A. & N. L. Christensen. 1979. Nitrification and succession in the piedmont of North Carolina. *Forest Science*, **25**: 287~297.
- Northwest Agricultural College (西北农学院) & South China Agricultural College (华南农学院). 1979. Research methods of agricultural chemistry. Beijing: China Agriculture Press. 167~185. (in Chinese)
- Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, **164**: 262~270.
- Pastor, J., J. Aber, C. McClaugherty & J. Melillo. 1984. Above-ground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk Island, Wisconsin. *Ecology*, **65**: 256~268.
- Robertson, G. P. & P. M. Vitousek. 1981. Nitrification potentials in primary and secondary succession. *Ecology*, **62**: 376~386.
- Robertson, G. P. 1984. Nitrification and nitrogen mineralization in a lowland rainforest succession in Costa Rica, Central America. *Oecologia*, **61**: 99~104.
- Robertson, G. P. & J. M. Tiedje. 1988. Deforestation alters denitrification in a lowland tropical rain forest. *Nature*, **336**: 756~759.
- Rosswall, T. 1982. Microbiological regulation of the biogeochemical nitrogen cycle. *Plant and Soil*, **67**: 15~34.
- Sha, L. Q. (沙丽清), J. W. Deng (邓继武), K. J. Xie (谢克金) & Y. Meng (孟盈). 1998. Study on the change of soil nutrient before and after burning secondary forest in Xishuangbanna. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **22**(6): 513~517. (in Chinese)
- Vitousek, P. M., J. R. Gosz, C. C. Grier, J. M. Melillo, W. A. Reiners & R. L. Todd. 1979. Nitrate losses from disturbed ecosystems. *Science*, **204**: 469~474.
- Vitousek, P. M. 1984. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, **61**: 285~298.
- Vitousek, P. M. & R. L. Sanford. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **17**: 137~167.
- Vitousek, P. M. & J. S. Denslow. 1986. Nitrogen and phosphorus availability in treefall gaps of a lowland tropical rainforest. *Journal of Ecology*, **74**: 1167~1178.
- Zhang, J. H. (张建侯), K. Y. Zhang (张克映), L. Q. Sha (沙丽清) & Y. H. Liu (刘玉洪). 1994. An introduction to the permanent plots of Xishuangbanna Station of Tropical Ecology. Development of Research Network for Natural Resources, Environment and Ecology (资源生态环境网络研究动态), **5**(2): 47~48. (in Chinese)
- Zhang, Y. P. (张一平), Y. H. Liu (刘玉洪), Y. X. Ma (马友鑫) & J. X. Wang (王进欣). 1999. Primary analysis on characteristics of temperature in dry hot season to canopy gap on Xishuangbanna tropical secondary forest. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境), **8**(2): 7~12. (in Chinese)

责任编辑:孙冬花