

# 西双版纳热带季节雨林生态系统氮的生物地球化学循环研究

沙丽清 郑 征 冯志立 刘玉洪 刘文杰 孟 盈 李明锐

(中国科学院西双版纳热带植物园森林生态研究中心, 昆明 650223)

**摘 要** 用小流域集水区 and 物质平衡方法, 于 1999 年对西双版纳热带季节雨林生态系统的氮素循环进行了初步研究。西双版纳季节雨林生态系统的氮库总储量为  $6\,481.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其中活体生物量、凋落物层和土壤(0~30 cm)中的氮储量分别为  $970.9$ 、 $37.7$ 、 $5\,481.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。土壤中的氮占生态系统氮总储量的 84.4%, 活体生物量占 15.0%, 凋落物层仅占 0.6%。结果表明季节雨林的氮主要分布在土壤中, 而在生物量中只占很少部分。大气降水、林内穿透水、树干流及地表径流的氮含量分别为  $0.565$ 、 $0.828$ 、 $0.983$  和  $1.042\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , 氮通量则分别为  $8.89$ 、 $10.97$ 、 $3.57$ 、 $5.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。大气降水输入氮  $8.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 径流输出氮  $5.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 收支平衡(输入—输出)为  $2.94\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。氮的生物循环: 吸收为  $149.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 存留为  $69.30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 归还为  $80.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 循环系数为 0.54。结果表明未受干扰的季节雨林生态系统处于氮积累的状态, 有利于该生态系统的稳定与持续发展。

**关键词** 热带森林 氮 养分循环 西双版纳

## BIOGEOCHEMICAL CYCLING OF NITROGEN AT A TROPICAL SEASONAL RAIN FOREST IN XISHUANGBANNA, SW CHINA

SHA Li\_Qing ZHENG Zheng FENG Zhi\_Li LIU Yu\_Hong

LIU Wen\_Jie MENG Ying and LI Ming\_Rui

(Center for Forest Ecology, XTBG, the Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China)

**Abstract** Xishuangbanna, located in southwest China, bounded by Laos and Myanmar on the upper Mekong River, is on the northernmost edge of tropical Asia. As a result, a mosaic distribution of tropical seasonal rain forest, which mainly appears in the wet valleys, usually with small streams or on the low hills and flats below 1000 m altitude exists in Xishuangbanna. The tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna is rich in species and has a complex forest canopy and structure. In 1999, 119 species with DBH > 10 cm were recorded in the  $1\text{ hm}^2$  study plot. Based on the "small catchment" approach and input-output budgets, we studied on the nitrogen cycling in the seasonal rain forest. The nitrogen stock in the seasonal rain forest ecosystem ( $6\,481.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) was higher than that of montane rain forest in Hainan of China ( $6\,345\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), but lower than montane rain forest in New Guinea ( $20\,190\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), lowland rain forest in Brazil ( $7\,537\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), and lowland rain forest in Ghana ( $7\,230\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ). The distribution of the nitrogen stock in the seasonal rain forest ecosystem is as follows:  $970.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (15.0%) in the living biomass,  $37.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0.6%) in the forest floor, and  $5\,481.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (84.4%) in the soil (0–30 cm). We found that most of the nitrogen in the seasonal rain forest was stored in the soil, but not in the living biomass. Soil (0–10 cm) net nitrogen mineralization rate was  $90.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . Soil played a very important role of stocking and providing N to plants. The nitrogen content in precipitation, throughfall, stemflow and stream flow were 0.565, 0.828, 0.983 and  $1.042\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , respectively. The nitrogen input from precipitation, throughfall and stemflow were 8.89, 10.97 and  $3.57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , respectively. The nitrogen output in stream flow was  $5.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . The nitrogen net increase in the seasonal rain forest was  $2.94\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . In the nitrogen biological cycling,  $149.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  was taken up by plants,  $69.30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  stored in living biomass, and  $80.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  returned to soil. This undisturbed seasonal rain forest had the nitrogen conservation mechanism and remained in the nitrogen accumulation state.

收稿日期: 2002-03-19 接受日期: 2002-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(40173039)、云南省自然科学基金(97C017R, 2001C0064M)、中国生态系统研究网络(CERN)及中国科学院知识创新工程项目资助

双版纳热带植物园生物地球化学实验室及西双版纳热带生态站提供大力帮助, 特此致谢。

E-mail: shaliq@xtbg.ac.cn

**Key words** Tropical rain forest, Nitrogen, Nutrient cycling, Xishuangbanna

氮是植物正常生长发育所必需的营养元素之一,在大多数的农业和自然的陆地生态系统中,氮也是最受限制的营养元素之一(Mooney *et al.*, 1987; Vitousek, 1984)。在湿润的热带地区,土壤遭受强烈的风化和淋溶,土壤养分贫瘠,土壤氮素和磷素成为影响森林生产力的主要限制因子(Richards, 1952; Laurance *et al.*, 1999)。

氮在生态系统中以多种形式存在,研究相对困难。由于受工业化污染和农业上施用大量氮肥的影响,人们越来越重视氮在生态系统中的作用,如 $\text{N}_2\text{O}$ 对温室效应的影响, $\text{NO}_2^-$ 的致癌作用, $\text{NO}_3^-$ 导致水体生态系统酸化从而影响水生生物的多样性,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。氮循环在生态环境保护、森林经营与管理、全球变化等方面的重要性日益受到重视(韩兴国等, 1999; Perakis & Hedin, 2002)。

我们曾报道过西双版纳热带森林土壤的氮矿化特征,刀耕火种生产方式及林窗形成对土壤养分的影响(沙丽清等, 1998; 1999; 2000; 孟盈等, 2001)。热带森林生态系统由于物种多样,结构极其复杂,对热带森林生态系统元素循环的研究显得尤为困难,在热带北缘的西双版纳季节雨林区还未进行过系统的研究。处于热带北缘的热带雨林,其结构和功能与典型的赤道雨林不同,因而,元素循环也有其特点。该区地处偏远,工业不发达,环境基本不受污染,有关水化学、氮素循环等研究数据对于认识氮的全球变化具有重要意义。用小流域集水区和物质平衡方法(Likens & Bormann, 1995),我们对西双版纳季节雨林生态系统的氮储量、氮通量及氮在系统中的分配进行初步研究,拟构建季节雨林生态系统氮循环的概念性模型和数值模型,为西双版纳地区季节雨林的有效保护及刀耕火种生产方式的科学管理提供理论依据和实践指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 样地概况

样地为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,  $21^\circ 56' \text{N}$ ,  $101^\circ 16' \text{E}$ )的热带季节雨林长期定位样地,海拔 720 m。据中国科学院热带生态站气象站多年资料,年均温为  $21.4^\circ \text{C}$ ,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%,干季(11~4月)为 202

mm,仅占年降雨量的 13%,相对湿度为 86%。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤。季节雨林样地位于国家自然保护区内,在  $1 \text{ hm}^2$  的样地内,  $\text{DBH} > 10 \text{ cm}$  的树种有 119 种,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(*Horfieldia tetrapala*)、光叶天料木(*Homalium laoticum*)、金刀木(*Barringtonia macrostachya*)等。群落高度 48 m,林龄约 200 年。样地的详情请参见有关文献(Zhang & Cao, 1995; Cao *et al.*, 1996; Cao & Zhang, 1997)。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 水文

流域总径流:在小流域的出口处建有水文站,用  $90^\circ$  三角堰板的测流堰结合日记自记水位计测量流量,并换算为径流深(刘玉洪等, 2001)。

大气降水:用置于 70 m 高观测铁塔顶部的自记雨量计测量。

穿透水:在林下随机布置 10 个长方形( $2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ )的接水装置,离地表约 1.5 m 高,承接的水用塑料管引到自制的带三角堰口和自记水位计的容器内,以测量穿透水量。另外,用塑料漏斗下连接塑料瓶的装置收集供分析用的穿透水,此装置安装在离地表约 1.5 m 高的支架上,在林下随机布置 5 套。

树干流:根据样地调查资料,按比例选择不同种类和不同胸径的树木,大树用铝片围成漏斗状,小树用剖开的塑料管作螺旋状缠绕,缝隙用橡皮泥密封。承接的水量同穿透水方法测定。

水量每天都观测,但由于西双版纳地区雨日多,每天降水次数也多,加之分析实验条件的限制,流域总径流、大气降水、穿透水、树干流等各水样中的全氮含量只分析了 4 次。氮通量通过水量乘以氮含量计算而得。

#### 1.2.2 植物

生物量:用标准木回归分析法和样方收获法(冯志立等, 1998),在做生物量的同时采集各器官的样品供化学元素分析。

凋落物量及凋落物分解:用  $0.2 \text{ m}^2$  的收集器收集凋落物,用网袋法做凋落物分解实验(任泳红等, 1999)。

#### 1.2.3 土壤

土壤氮储量:在样地外选择 3 处代表性地点,挖掘土壤剖面,从上至下每隔 20 cm 取样,风干后制

样,供化学分析用。根据每层土壤的重量和含氮量计算氮储量。

土壤氮矿化: 用埋袋法(沙丽清等, 2000)。  
水、植物和土壤中的氮皆用凯氏法测定。

2 结果与讨论

2.1 热带季节雨林下的土壤氮储量

西双版纳热带季节雨林下土壤的全氮储量见表1。可见表层土壤的氮储量较高,0~ 40 cm 土层的储量占0~ 100 cm 土层储量的52%。0~ 10 cm 土层的氮矿化量可达 $90.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,对氮素供应具有重要意义。植物细根分布、土壤动物及微生物活动主要在0~ 40 cm 范围内,该层对土壤养分的保持具有重要作用。

表1 西双版纳热带季节雨林下土壤的全氮储量  
Table 1 Nitrogen stock in the soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna

层次 Depth(cm)	全氮储量 Nitrogen stock( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
0~ 20	4.31 (0.94)
20~ 40	2.32 (0.17)
40~ 60	2.40 (0.34)
60~ 80	2.11 (0.75)
80~ 100	1.57 (0.06)
合计 Total	12.71

括号中的数据为标准偏差 The values in the brackets are standard errors (n= 3)

2.2 季节雨林各器官中氮的浓度和储量

各器官中氮含量的顺序为: 叶> 根> 枝> 干(表2)。西双版纳热带季节雨林叶片氮含量比巴西马瑙斯雨林的稍高,但均低于委内瑞拉、巴西马瑙斯、巴西帕拉、象牙海岸、刚果、加纳等地的热带森林(Jordan, 1985)。氮在各器官中的储量顺序为: 干> 根> 枝> 叶,与生物量的分配顺序一致。

2.3 西双版纳热带季节雨林生态系统的氮库特征

从表3看,西双版纳热带季节雨林生态系统的总氮量为 $6481.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,其中在活体生物量中为 $970.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占总量的15.0%,土壤中(0~ 30 cm)为 $5472.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占总量的84.4%。如按地上部和地下部划分,则分别占总量的10.9%和89.1%。结合世界其它地区(新几内亚低山雨林、巴西低地雨林、加纳低地雨林)及我国海南岛尖峰岭热带山地雨林的资料(Jordan, 1985; 曾庆波等, 1997),可看出热带森林的氮主要分布在土壤中,而生物量中只占较少部分。人们通常认为热带雨林中的营养元素主要分布在生物量中,热带森林将大量养分贮存在生物量中是热带森林生态系统保存养分的一种

机制,相反地,在温带森林生态系统则主要是将养分贮存在土壤中(Richards, 1952)。但是关于此假说,支持和反对的证据都有。许多研究证明事实并非总是如此(Whitmore, 1993)。在湿润热带,将营养元素储存于生物量中作为保持养分的机制,对于氮、磷元素似乎并不重要,但是对于钙、钾等元素却十分重要(Jordan, 1985)。

表2 西双版纳热带季节雨林氮在各器官中的浓度和储量  
Table 2 Nitrogen content and stock in different organs of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna

器官 Organs	氮浓度 Nitrogen content ( $10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	氮储量 Nitrogen stock ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	占活体生物量 氮的% The percentage dis- tribution of ni- trogen in differ- ent living biomass compe- nents
1 根 Root	4.2 (1.55)	299.9	30.9
2 干 Stem	1.9 (0.54)	455.6	47.0
3 枝 Branch	4.1 (1.75)	154.5	15.9
4 叶 Leaf	13.5 (2.72)	60.9	6.2
5 活体生物量 Total (1+ 2+ 3+ 4)		970.9	

括号中的数据为标准偏差 The values in the brackets are standard errors (n= 11)

表3 西双版纳热带季节雨林生态系统的氮库特征  
Table 3 Nitrogen stock in different components of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna

组分 Components	氮储量 N stock ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	占总量的% The percentage distribution of ni- trogen in different components
1 活体生物量 Living biomass	970.9	15.0
2 凋落物层 Forest floor	37.7	0.6
3 土壤 Soil(0~ 30 cm)	5472.6	84.4
4 总量 Total(1+ 2+ 3)	6481.2	
植物 Vegetation(1+ 2)	1008.6	15.6
地上部(枝、干、叶、凋落物层) Aboveground (branch, stem, leaf, forest floor)	708.7	10.9
地下部(根、土壤0~ 30 cm) Un- derground (root, soil 0~ 30 cm)	5472.5	89.1

与其它热带森林生态系统相比(表4),西双版纳热带季节雨林生态系统总的氮储量比海南岛尖峰岭的稍高,低于其它热带森林,凋落物层氮储量在所有森林中为最低;活体生物量中的氮储量和所占百分含量比新几内亚低山雨林高,低于其它热带森林;土壤中的氮储量则相反,高于其它森林而低于新几内亚低山雨林。总的来看,在西双版纳热带季节雨

表 4 几种热带森林生态系统氮储量比较  
Table 4 Nitrogen stock in some tropical forests ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

	海南岛山地雨林 Montane rain forest in Hainan, China	新几内亚低山雨林 Lower montane rain forest in New Guinea	巴西低地雨林 Lowland rain forest in Brazil	加纳低地雨林 Lowland rain forest in Ghana
1 活体生物量 Living biomass	1 535	820	2 983	2 016
2 凋落物层 Forest floor	73	170	294	264
3 土壤 Soil (0~ 30 cm)	4 737	19 200	4 260	4 950
4 总量 Total (1+ 2+ 3)	6 345	20 190	7 537	7 230
活体生物量/ 总量 Living biomass/total	24	4	40	29
凋落物层/ 总量 Forest floor/total	1	1	4	4
土壤/ 总量 Soil/total	75	95	57	68

表中数据引自曾庆波等( 1997), 表 7~ 16 Data from Zeng *et al.* (1997), Table 7~ 16

林生态系统中氮素主要储存在土壤中( 85%), 而生物量中只占很少比例( 15%) 。

2.4 西双版纳热带季节雨林生态系统的氮含量及氮通量

从表 5 可看出, 大气降水经过林冠和树干后, 水中的氮含量有所增加, 这是由于植物体中和植物体表面受到淋洗的结果。热带地区由于高温潮湿, 树叶、树干及树枝上常生长着丰富的藻类、苔藓、菌类、地衣、蕨类以及其它附生植物, 因而, 大气降水经过林冠和树干时所发生的吸收、吸附和淋溶作用似乎更强。

表 5 西双版纳热带季节雨林生态系统大气降水、穿透水、树干流、径流的氮含量和氮通量

Table 5 Nitrogen contents and fluxes in precipitation, through fall, stem flow and run off

	氮含量 Nitrogen content ( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	氮通量 Nitrogen flux ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
大气降水 Precipitation	0.565 (0.085)	8.89
穿透水 Through fall	0.828 (0.101)	10.97
树干流 Stem flow	0.983 (0.204)	3.57
径流 Run off	1.042 (0.229)	5.95

括号中的数据为标准偏差 The values in the brackets are standard errors (n= 4)

穿透水和树干流输入的氮量超过了大气降水输入的氮量, 也大于径流输出的氮量, 这部分氮对于森林内部的氮循环是十分重要的。

与世界其它地区相比, 西双版纳热带季节雨林的降雨输入氮量仅比新几内亚高(  $6.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , Edwads, 1982), 低于委内瑞拉、哥伦比亚(Liu *et al.*, 2002; Veneklaas, 1990) 以及喀麦隆、巴西、加纳和象牙海岸等地(Jordan, 1985), 也低于海南岛尖峰岭热带山地雨林(  $13.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 曾庆波等, 1997), 广东鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林(  $35.29$

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 黄忠良等, 2000) 和云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林(  $12.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , Liu *et al.*, 2002) 的降雨输入氮量。降雨输入氮量与所处地域、大气污染、季节、气象条件和降水过程等因素有关。数据表明所研究的西双版纳地区环境条件较好, 无大气污染。

2.5 西双版纳热带雨林生态系统氮素的生物地球化学循环

表 6 给出了应用小流域集水区 and 物质平衡方法得出的西双版纳热带季节雨林生态系统的氮收支平衡为  $2.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 表明该系统处于氮素积累的状态, 是一个成熟和稳定的生态系统, 也证明了未受干扰的热带雨林生态系统具有对氮素的保持机制。国内其它热带、亚热带地区的研究也证明, 未受干扰的森林生态系统具有保持氮素的机制( 曾庆波等, 1997; 黄忠良等, 2000)。

循环系数是反映元素循环速率的指标, 数值越大, 表明循环越快。西双版纳热带雨林生态系统氮素的循环系数为 0.54, 低于尖峰岭的热带山地雨林( 0.82)。

表 6 西双版纳热带季节雨林生态系统氮素的生物地球化学循环  
Table 6 Nitrogen biogeochemical cycling at a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna

类型 Type	
地球化学循环 Geochemical cycling ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	
1 降水输入 Rain input	8.89
2 径流输出 Run off output	5.95
收支平衡 Budget (1- 2)	2.94
生物循环 Biological cycling ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	
3 吸收 Uptake	149.86
4 存留 Restore	69.30
5 归还 Return	80.56
循环系数 Cycling rate (5/3)	0.54

## 2.6 氮循环模式

热带雨林物种极其丰富、层次结构非常复杂、物质循环迅速，是陆地生态系统中最为复杂的生态系统，要想系统、全面地研究热带森林生态系统中的氮循环是非常困难的。森林生态系统氮循环包括大气沉降、共生固氮、非共生固氮、植物吸收、动物采食、氨化、硝化、反硝化、淋溶和挥发等过程。在西双版纳的研究中，我们借鉴了国内外的有关研究，对系统作了简化，建立了热带季节雨林生态系统的氮循环模型，如图 1。

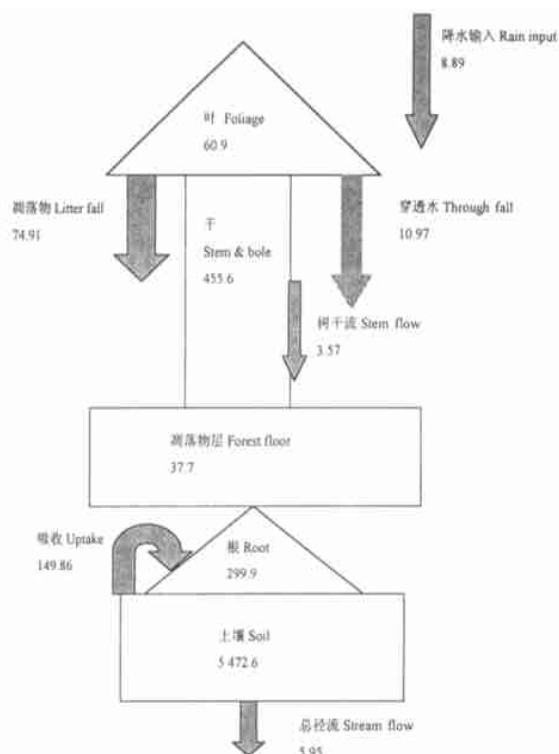


图 1 西双版纳热带季节雨林生态系统的氮循环模型  
Fig. 1 Nitrogen contents ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and fluxes ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) at a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna

## 3 小 结

西双版纳地区大气降水中的氮含量较低，由降水输入的氮量也低，与其它地区相比，仅比新几内亚高，低于委内瑞拉、哥伦比亚以及喀麦隆、巴西、加纳和象牙海岸等地，也低于海南岛尖峰岭热带山地雨林、广东鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林和云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林的降水输入氮量，说明西双版纳地区基本上无大气污染。与其它热带森林生态系统相比，西双版纳热带季节雨林生态系统的氮储量比海南岛尖峰岭热带山地雨林的稍高，低于新几内亚低山雨林、巴西低地雨林及加纳低地雨林。西双版纳热带季节雨林生态系统是一个处于氮素积

累状态的生态系统，系统中 85% 的氮素分布于土壤中(0~30 cm)，生物量中只占 15%。在高温高湿和雨量集中的西双版纳地区，如雨林遭到破坏，不但地上部分的氮素会受到损失，土壤中的氮素也会因严重的水土流失而急剧减少，不仅造成土壤的严重退化，氮在生态系统中的分配格局及生物地球化学循环也会发生重大变化。

## 参 考 文 献

- Cao, M., J. H. Zhang, Z. L. Feng, J. W. Deng & X. B. Deng. 1996. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China. *Tropical Ecology*, **37**: 183~192.
- Cao, M. & J. H. Zhang. 1997. Tree species diversity of tropical forest vegetation in Xishuangbanna, SW China. *Biodiversity and Conservation*, **6**: 995~1006.
- Edwards, P. J. 1982. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. I. The distribution of organic matter in the vegetation and soil. *Journal of Ecology*, **65**: 943~969.
- Feng, Z. L. (冯志立), Z. Zheng (郑征), J. H. Zhang (张健侯), M. Cao (曹敏), L. Q. Sha (沙丽清) & J. W. Deng (邓继武). 1998. Biomass and its allocation of a tropical wet seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **22**: 481~488. (in Chinese)
- Han, X. G. (韩兴国), L. H. Li (李凌浩) & J. H. Huang (黄建辉). 1999. An introduction to biogeochemistry. Beijing: China Higher Education Press (in Chinese); Heidelberg: Springer-Verlag. 197~231.
- Huang, Z. L. (黄忠良), G. H. Kong (孔国辉), Q. F. Yu (余清发) & Z. H. Zhang (张志红). 2000. Hydrological function and nutrient dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broadleaved forest. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **24**: 157~161. (in Chinese)
- Jordan, C. F. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. New York: John Wiley & Sons. 1~155.
- Laurance, W. F., P. M. Fearnside & S. G. Laurance. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, **118**: 127~138.
- Likens, G. E. & F. H. Bormann. 1995. Biogeochemistry of a forested ecosystem. New York: Springer-Verlag, Inc.
- Liu, W. Y., J. E. Fox & Z. F. Xu. 2002. Nutrient fluxes in bulk precipitation, throughfall and stemflow in montane subtropical moist forest on Ailao mountains in Yunnan, southwest China. *Journal of Tropical Ecology*, **18**: 1~23.
- Liu, Y. H. (刘玉洪), K. Y. Zhang (张克映), Y. X. Ma (马友鑫), W. J. Liu (刘文杰), Y. P. Zhang (张一平) & L. Q. Sha (沙丽清). 2001. Study on construction of V-notch weirs in forested catchments in Xishuangbanna, southwest China. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, **15**: 141~143. (in Chinese)
- Meng, Y. (孟盈), J. Y. Xue (薛敬意), L. Q. Sha (沙丽清) & J. W. Tang (唐建维). 2001. Variations of soil  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and N mineralization under different forests in Xishuangbanna, southwest China. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **25**: 99~104. (in Chinese)
- Mooney, H., P. M. Vitousek & P. A. Matson. 1987. Exchange of material between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, **238**: 926~932.
- Perakis, S. S. & L. O. Hedin. 2002. Nitrogen loss from unpolluted south American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, **415**: 416~419.
- Ren, Y. H. (任泳红), M. Cao (曹敏), J. W. Tang (唐建维),

- Y. Tang (唐勇) & J. H. Zhang (张建侯). 1999. A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **23**: 418~ 425. (in Chinese)
- Richards, P. W. 1952. *The tropical rain forest*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schlesinger, W. H. 1991. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. California: Academic Press, Inc. 1~ 351.
- 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 Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **22**: 513~ 517. (in Chinese)
- Sha, L. Q. (沙丽清) & M. Cao (曹敏). 1999. Nutrients in tree fall gap of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), **27** (6): 78~ 80. (in Chinese)
- 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 Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **24**: 152~ 156. (in Chinese)
- Whimore, T. C. 1993. *An introduction to tropical rain forest*. Oxford: Clarendon Press. 1~ 194.
- Veneklaas, E. J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Ecology*, **78**: 974~ 992.
- Vitousek, P. M. 1984. Litter fall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forest. *Ecology*, **61**: 285~ 298.
- Zeng, Q. B. (曾庆波), Y. D. Li (李意德), B. F. Chen (陈步峰), Z. M. Wu (吴仲民) & G. Y. Zhou (周光益). 1997. *Tropical forest ecosystems: research and management*. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)
- Zhang, J. H. & M. Cao. 1995. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna and its secondary changes, with special reference to some problems in local nature conservation. *Biological Conservation*, **73**: 229~ 238.

责任编委: 欧阳 华 责任编辑: 张丽赫