

西双版纳热带季节雨林的 C 贮量及其分配格局

吕晓涛^{1 2}, 唐建维^{1*}, 于贵瑞³, 张一平¹

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园热带雨林生态系统定位研究站, 云南 勐腊 666303;

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

³ 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统研究网络综合中心, 北京 100101)

摘要: 利用已有生物量模型(乔木层、木质藤本)和收获法(灌木层、草本层)获得群落生物量, 结合土壤、植物样品 C 含量的实测值, 对西双版纳热带季节雨林 1 hm²样地的 C 贮量及其分配格局进行了分析。结果表明: (1)西双版纳热带季节雨林生态系统的总 C 贮量为 220 492 t/hm², 其中植物活体部分为 128 099 t/hm²、土壤为 81 85 t/hm²、粗死木质残体为 5 708 t/hm²、凋落物为 4 835 t/hm²。(2)群落植物活体 C 贮量的层次分配以乔木层占绝对优势(97.23%), 其他层次所占的比例很小, 层次分配的大小顺序为: 乔木层>灌木层>木质藤本>草本层。(3)乔木层的 C 贮量随径级而变化, 并在 30 cm<DBH≤40 cm、70 cm<DBH≤80 cm 及 DBH>100 cm 范围内形成三个 C 贮量高峰。(4)乔木的总 C 贮量集中分布于少数优势树种中, 其中绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)的 C 贮量占乔木层的 24.70%。西双版纳热带季节雨林的植被 C 贮量远高于全国平均水平。

关键词: 热带季节雨林; C 贮量; C 分配; 西双版纳

中图分类号: Q945

文献标识码: A

森林生态系统是地球生物圈的重要组成部分, 储存了陆地生态系统有机碳地上部分的 80%, 地下部分的 40%^[1], 在维护生态环境和全球碳平衡方面起着极为重要的作用^[2]。而森林生态系统的 C 贮量是研究森林生态系统与大气间碳交换的基本参数^[3], 也是估算森林生态系统吸收和排放含 C 气体的关键因子。热带森林面积虽然仅占全球植被的 22%^[2], 但其净初级生产力却占世界陆地生产力的 32%~43%^[4], 其植被碳储量占全球植被活体碳库的 46%, 土壤碳储量占全球土壤碳库的 11%^[5], 热带森林在全球碳循环中的重要作用已引起了研究人员的广泛关注^[1-5]。

西双版纳保存有我国最大面积热带雨林, 这里的雨林发育在东南亚热带季风北缘山地, 是一种在水分、热量和分布海拔均到了极限条件的热带雨林

类型, 被称为热带季节雨林^[6]。不少学者对其群落类型和结构、树种多样性、生物量和生产力等方面进行了研究^[6-10], 但对该地区热带森林的 C 循环和 C 贮量的研究仍然十分薄弱, 且未见报道。

本研究以西双版纳热带雨林生态系统定位站 1 hm²长期定位样地为对象, 利用测树学方法, 对西双版纳热带季节雨林的 C 贮量及其分配格局进行了分析。旨在探讨地带性森林植被 C 贮量的分布特点, 为区域森林植被 C 贮量的估算提供科学依据, 同时为将来在本地区开展 C 循环研究提供参考。

1 研究地概况

研究地点位于西双版纳州勐仑自然保护区, 地理位置为 21°57'N, 101°12'E, 坡向为 NW, 坡度 15°

收稿日期(Received date): 2005-12-29 改回日期(Accepted): 2006-04-15

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01)、“西部之光”资助项目和中国科学院野外台站基金项目。

[Supported by the Knowledge Innovation Program of CAS (KZCX1-SW-01) and “Light of Western China” of CAS and the Field Station Foundation of CAS]

作者简介(Biography): 吕晓涛(1982-), 男, 山东济南人, 硕士在读, 主要从事森林生态学研究。Tel: 0691-8715080 E-mail: kxiao@yeah.net

[Lü Xiaotao male born in 1982 M. S. Candidate studying forest ecology]

*通讯作者(Author for correspondence) E-mail: tangjv@xtbg.org.cn Tel: 0691-8715080

~20°, 海拔 730 m。本区为西南季风区, 高温多雨, 属于北热带或边缘热带湿润气候类型。年均温 21.4 °C, 年均降雨量为 1 539 mm, 具有明显的干湿季之分, 5 ~ 10 月为雨季, 集中了全年降雨量的 85 %, 11 月至次年 4 月为干季, 降雨量仅占全年的 15 %。土壤类型为砖红壤, 母岩为白垩系砂岩, pH 值 < 5 土壤层厚度约为 100 ~ 120 cm。该样地的植被为西双版纳典型的地带性植被——以绒毛番龙眼 (*Pometia tomentosa*)、千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*) 为标志的热带季节雨林, 植物种类以樟科 (*Lauraceae*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、桑科 (*Moraceae*)、楝科 (*Meliaceae*) 及茜草科 (*Rubiaceae*) 的种类最多。群落结构复杂, 可分为乔木层、灌木层、草本层和层间植物层。而乔木层又可分为三个亚层: 乔木 I 层由绒毛番龙眼、千果榄仁、多花白头树 (*Garuga floribundavar. gamblei*) 和其它乔木树种组成, 高度 35 ~ 40 m, 盖度约 15 %; 乔木 II 层由梭果玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、滇南椴木 (*Chioscheton simensis*)、大叶白颜树 (*Gironniera subaequalis*)、琼楠 (*Beilschmeidia brachythyrta*) 等组成, 高度 15 ~ 25 m, 盖度约 40 %; 乔木 III 层树高 3 ~ 10 m, 主要由窄序崖豆树 (*Millettia leptobotrya*)、小叶藤黄 (*Garcinia cava*)、核实 (*Drypetes indica*)、细罗伞 (*Andisia tenera*)、蚁花 (*Mezzettipsis creaghii*) 等优势种及乔木的小树组成, 盖度约 35 %; 灌木层多为乔木幼树, 较常见的灌木种类有染木 (*Saprosma ternatum*)、包疮叶 (*Measia indica*)、锈毛杜茎山 (*Measia pernollis*)、细腺萼木 (*Mycetia gracilis*) 等, 高度 1 ~ 4 m, 盖度约 25 %; 草本层主要由乔木的幼苗和蕨类植物组成, 较常见的草本种类有楼梯草 (*Elatostema parvum*)、山壳骨 (*Pseudoranthemum malaccense*)、莠竹 (*Microstegium ciliatum*) 等, 高度 0.5 m 左右, 盖度约 15 %。

2 研究方法

2.1 样地调查

将 1 hm² 的永久样地划分为 100 个 10 m × 10 m 的 II 级样方, 以方便调查。对样地内所有胸径 (DBH) ≥ 2 cm 的植株个体编号、挂牌并进行测树学指标的调查, 记录其种名、胸径、树高、冠幅及树木定位坐标。同时, 对样地内的枯立木进行调查, 记录其胸径和高度。

2.2 样品采集及 C 含量分析

根据样地调查数据, 选取个体数量相对较多的

26 个树种, 每个树种选取不同大小的 3 株个体, 对各树种的不同器官 (树干、枝、叶、根) 进行采样。在样木树干的基部、中部和顶部分别取圆盘, 圆盘烘干后, 进行粉碎制样。在样地左右两侧分别设置 5 个共 10 个 2 m × 2 m 小样方, 按收获法获取灌木层和草本层生物量, 并采集了 12 种灌木、9 种草本、8 种藤本植物的不同器官的样品。在样地中架设 40 个 0.2 m² 的收集筐, 每月一次收集凋落物, 按组分 (枝、叶、花果、杂物) 进行分检, 在 75 °C 下烘干至恒重称量, 并进行凋落物不同组分的 C 含量分析。倒木和枯立木样品的采集采用与乔木树干样品相同的采集方法, 在均匀分布于样地内的 25 个 5 m × 5 m 的样方内收集枯落大枝, 称重并取样品。在样地内从坡下到坡上随机挖取 5 个深度为 1 m 的土壤剖面, 从表土层开始每 20 cm 取一土样, 并用土壤环刀法测定各层次的土壤容重。所有样品在 40 °C 下烘干至恒重、磨碎, 进行化学分析。样品的 C 含量的测定采用重铬酸钾外热法。

2.3 C 贮量的计算

群落各层次、凋落物及粗死木质残体的 C 贮量由各自的 C 含量与其生物量的乘积而得。土壤的 C 贮量则为五层的 C 贮量之和, 每一层的 C 贮量为该层的土壤容重、面积、厚度及 C 含量的乘积。

3 结果与分析

3.1 植物的 C 含量和 C 贮量

3.1.1 植物器官的 C 含量

经测定, 得到活体植物各器官的平均 C 含量 (表 1), 总平均值为 39.67 %。群落各层次之间的 C 含量差别较为明显。其中乔木层各器官的 C 含量最高, 为 42.03 %, 低于人们经常使用的 50 %^[11-13] 或 45 %^[14], 而草本层的 C 含量最低。在各器官的 C 含量中, 以茎的 C 含量为最高, 枝次之, 而植物的光合器官——叶的 C 含量最低。

3.1.2 群落各层次的生物量及 C 贮量

根据已建立的生物量模型^[9]推算乔木层和藤本植物的生物量, 分别为 289 878 t 和 3 020 t; 根据收获法所得的灌木层和草本层的生物量数据, 推算样地内灌木层和草本层的生物量分别为 5 329 t 和 0 541 t; 枯立木的生物量由乔木生物量模型推算而来。结合上述各层次的 C 含量, 经计算西双版纳热带季节雨林群落活体植物的总 C 贮量为 128 099 t /

hm²。从群落各层次之间的 C 贮量分配来看, 其差异非常明显, 以乔木层所占比例最高, 达 97. 23%, 灌木层次之, 占 1. 68%, 而草本层最低, 仅占 0. 16%。其分配的大小顺序为: 乔木层>灌木层>木质藤本>草本层。由此可见, 在西双版纳热带季节雨林中, 碳素贮量集中分配于乔木层中。

乔木层的 C 贮量在植物各个器官中的分配差

异也较大, 干、枝、叶、根的 C 贮量分别为 83 827 t/hm²、15 191 t/hm²、1 471 t/hm²和 24 062 t/hm², 分别占乔木层 C 贮量的 67. 30%、12. 20%、1. 18%和 19. 32%。可见该样地中乔木的树干和树根 C 贮量相对较高, 枝叶的 C 贮量较低。

3 1 3 乔木层 C 贮量的径级分布

表 1 西双版纳热带季节雨林植物各器官的 C 含量 (%)

Table 1 Carbon concentration in different organs of plants in tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna (%)

| 组分 Components | 取样数 n | 根 Roots | 茎 Stems | 枝 Branches | 叶 Leaves | 平均 Mean |
|------------------|----------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|
| 乔木 Tree | 78 | 43.20±1.728 | 42.99±4.094 | 42.89±1.554 | 39.03±2.873 | 42.03 |
| 灌木 Shrub | 1240 | 56±4.084 | 42.00±3.210 | 39.78±4.136 | 39.25±3.868 | 40.40 |
| 草本 Herb | 934 | 98±6.370 | 38.32±2.534 | — | 36.56±3.597 | 36.62 |
| 藤本 Liana | 840 | 06±3.021 | 40.40±2.658 | — | 38.47±4.125 | 39.64 |
| 平均 Mean | | 39.70 | 40.93 | 41.34 | 38.33 | 39.67 |

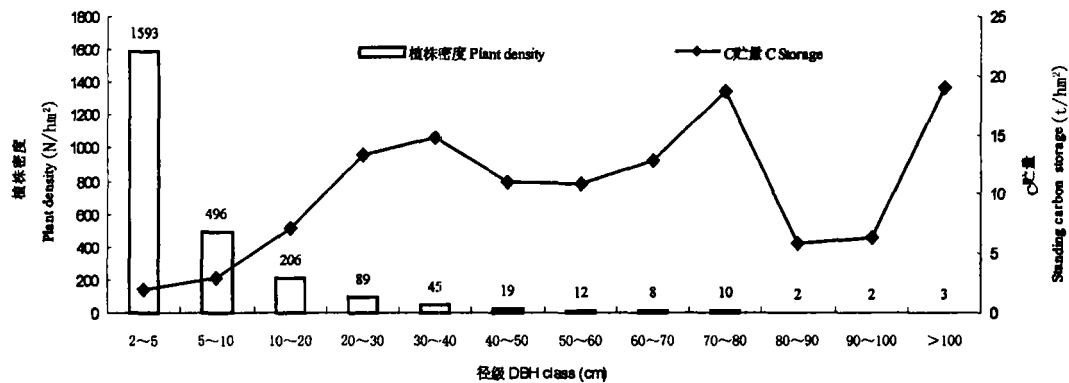


图 1 季节雨林乔木层 C 贮量和植株密度的径级分布状况

Fig. 1 Allocation of standing carbon storage and plant density among the different DBH classes of tree layer

根据 2004 年调查资料, 该样地现存乔木 ($DBH \geq 2\text{ cm}$) 2 485 株。图 1 显示了乔木层 C 贮量的径级分配状况及趋势: 西双版纳热带季节雨林的植株密度随径级的增加而降低, 小径级植株在数量上占绝对优势, 如: $2\text{ cm} \leq DBH \leq 5\text{ cm}$ 的植株数量为 1 593 株, 占全部乔木植株的 64. 10%, 但其 C 贮量却仅占 1. 53%; 而 $DBH > 70\text{ cm}$ 的大树为 17 株, 仅占乔木总株数的 0. 68%, 而其 C 贮量占 40. 06%。乔木层的 C 贮量在 $2\text{ cm} \leq DBH \leq 40\text{ cm}$, $50\text{ cm} < DBH \leq 80\text{ cm}$ 以及 $DBH > 90\text{ cm}$ 三个径级范围内都呈上升的趋势, 分别达到最大值 $14\ 723\text{ t/hm}^2$ 、

$18\ 602\text{ t/hm}^2$ 和 $19\ 071\text{ t/hm}^2$ 。在第一个径级范围 ($2\text{ cm} \leq DBH \leq 40\text{ cm}$) 内, 虽然随径级的增大植株个体数量明显减少, 但由于个体胸径的增加使 C 贮量增加。而在 $50\text{ cm} < DBH \leq 80\text{ cm}$ 和 $DBH > 90\text{ cm}$ 两个径级范围内上升趋势的出现则是由个体数目和胸径的双重增加作用而致。C 贮量在由 $40\text{ cm} < DBH \leq 60\text{ cm}$ 以及 $80\text{ cm} < DBH \leq 90\text{ cm}$ 范围内都呈下降趋势, 其原因是大径级植株个体数量的减少。

3 1 4 乔木层 C 贮量的垂直分布格局

乔木层的 C 贮量积累随着高度的递增, 由下层 ($H \leq 5\text{ m}$) 向中层 (20 ~ 30m) 快速地增长, 并达到

C 贮量累积的高峰, 为 $44\ 783\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 2)。此后随着层次高度的增加 ($H>30\ \text{m}$), C 贮量呈下降的趋势。尽管 $H\leq 5\ \text{m}$ 层次内的植株个体数量占乔木总数的 $48\ 69\%$, 其 C 贮量却最低, 仅占乔木层总 C 贮量的 $1\ 03\%$ 。干、枝、根的 C 贮量累积的垂直变化与乔木总 C 贮量相似; 而叶的 C 贮量则随着层次高度的增加, 在 $10\ \text{m}<H\leq 20\ \text{m}$ 层次时达到最大, 此后则随着高度的增加而逐渐递减。

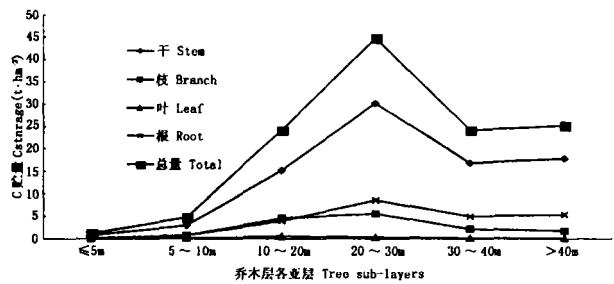


图 2 热带季节雨林乔木层 C 贮量的垂直分布
Fig 2 Allocation of standing carbon storage among the tree sub layers

3 1 5 乔木层 C 贮量的种类分配

从乔木层 C 贮量的种类分配来看, 在该样地中, 占乔木层 C 贮量 1% 以上的树种共有 17 种, 其中超过 5% 的有 3 种, 而且均为上层树种。其中绒毛番龙眼的 C 贮量最大, 达 $30\ 766\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占乔木层总 C 贮量的 $24\ 70\%$, 充分说明了绒毛番龙眼在该群落中的优势种地位。其他两种 C 贮量超过 5% 的为千果榄仁和梭果玉蕊, 虽然千果榄仁仅存一株, 但是其对群落碳贮量的贡献充分证明了巨树在储碳固碳方面的重要作用。虽然这 17 个树种的植株个体数量仅占整个乔木层植株数量的 $21\ 16\%$, 但是其 C 贮量总和却占到乔木层总 C 贮量的 $70\ 61\%$ (表 2)。说明在热带季节雨林中乔木的 C 贮量集中分布于少数的优势树种中。

3 2 凋落物的 C 贮量

根据 4 a 的凋落物收集数据, 西双版纳热带季节雨林的年均凋落物量为 $10\ 059\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。凋落物各组分的 C 含量分别为: 叶 $48\ 62\% \pm 2\ 79\%$, 枝 $46\ 36\% \pm 2\ 69\%$, 花果 $49\ 0\% \pm 2\ 06\%$, 杂屑 $45\ 87\% \pm 4\ 56\%$ 。这表明凋落物各组分中, 花果的 C 含量最高, 杂屑最低; 各组分之间 C 含量的差异不明显。凋落物的总 C 贮量为 $4\ 835\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 各组分的 C 贮量为: 叶 $2\ 493\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、杂物 $1\ 007\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、

枝 $0\ 786\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、花果 $0\ 549\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。凋落物的 C 贮量在其分配方面差异明显, 主要是由于各组分的凋落量不同所致, 如: 叶的凋落量为 $5\ 088\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其 C 贮量占凋落物总 C 贮量的 $51\ 56\%$; 花果的凋落量为 $1\ 129\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其 C 贮量所占比例为 $11\ 36\%$ 。可见, 凋落物 C 贮量的分配主要以叶为主, 大小顺序为: 叶>杂物>枝>花果。

表 2 乔木层中 17 种主要树种的 C 贮量分配

Table 2 Carbon storage allocation in the main 17 species of tree layer

| 树种 Tree Species | 植株密度 Plant density | | C 贮量 C storage | |
|---|--------------------|-------|----------------|--------------------|
| | N /hm ² | % | % | t /hm ² |
| 绒毛番龙眼 (<i>Pometia tomentosa</i>) | 71 | 2 86 | 30 766 | 24 70 |
| 千果榄仁 (<i>Terminalia myriocarpa</i>) | 1 | 0 04 | 8 540 | 6 86 |
| 梭果玉蕊 (<i>Barringtonia macrostachya</i>) | 91 | 3 66 | 7 766 | 6 24 |
| 多花白头树 (<i>Garuga floribundavar. gambeli</i>) | 8 | 0 32 | 5 568 | 4 47 |
| 毛麻楝 (<i>Chukrasia tabularis var. velutina</i>) | 11 | 0 44 | 5 243 | 4 21 |
| 勐仑翅子树 (<i>Pterospermum menglunense</i>) | 21 | 0 84 | 3 900 | 3 13 |
| 景洪猴欢喜 (<i>Sloanea deliensis</i>) | 12 | 0 48 | 3 742 | 3 00 |
| 白颜树 (<i>Gironniera subaequalis</i>) | 61 | 2 45 | 3 724 | 2 99 |
| 滇南杜英 (<i>Elaeocarpus austroyunnanensis</i>) | 9 | 0 36 | 3 314 | 2 66 |
| 红果葱臭木 (<i>Dysoxylum binectariferum</i>) | 7 | 0 28 | 2 864 | 2 30 |
| 毗黎勒 (<i>Terminalia bellirica</i>) | 5 | 0 20 | 2 172 | 1 74 |
| 龙果 (<i>Pouteria grandifolia</i>) | 12 | 0 48 | 2 059 | 1 65 |
| 火桐 (<i>Fimbrina colorata</i>) | 2 | 0 08 | 1 915 | 1 54 |
| 普文楠 (<i>Phoebe puenensis</i>) | 11 | 0 44 | 1 793 | 1 44 |
| 樟科一种 (<i>Lauraceae sp.</i>) | 1 | 0 04 | 1 627 | 1 31 |
| 滇南溪桫 (<i>Chisocheton simensis</i>) | 85 | 3 42 | 1 570 | 1 26 |
| 蚁花 (<i>Mezaspis creaghii</i>) | 129 | 5 19 | 1 381 | 1 11 |
| 总计 Total | 537 | 21 16 | 87 946 | 70 61 |

3 3 粗死木质残体的 C 贮量

粗死木质残体是热带森林中的重要碳库, 其 C 贮量可占热带森林地上 C 贮量的 $25\%^{[15]}$ 。该样地中粗死木质残体的生物量为 $11\ 025\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中: 枯立木为 $5\ 548\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 倒木为 $2\ 148\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 枯落大枝为 $3\ 329\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。结合各组分的 C 含量实测值 (枯立木 $51\ 69\% \pm 2\ 13\%$ 、倒木 $52\ 89\% \pm 2\ 45\%$ 、大枝 $51\ 19\% \pm 2\ 28\%$), 得其 C 贮量分别为: 枯立木 $2\ 868\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 枯落大枝 $1\ 704\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 倒木 $1\ 136\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

hm^2 , 粗死木质残体的总 C 贮量为 $5\,708\text{ t}/\text{hm}^2$ 。

3.4 群落植物体总 C 贮量及其器官分配

综上所述, 季节雨林群落中植物体 (包括活体植物和植物死体) 的总 C 贮量为 $138\,642\text{ t}/\text{hm}^2$, 其器官分配为: 茎, $90\,088\text{ t}/\text{hm}^2$ (64.98%); 根, $24\,741\text{ t}/\text{hm}^2$ (17.85%); 枝, $17\,985\text{ t}/\text{hm}^2$ (12.97%); 叶, $4\,272\text{ t}/\text{hm}^2$ (3.08%); 花果, $0\,549\text{ t}/\text{hm}^2$ (0.40%) (另, 凋落物中杂屑 C 贮量为 $1\,007\text{ t}/\text{hm}^2$, 占 0.73%)。可见, 在该群落中, 植物体 C 贮量的器官分配的大小顺序为: 茎 > 根 > 枝 > 叶 > 花果。

3.5 土壤中的 C 含量和贮量

根据 5 个土壤剖面 (深度为 1 m) 共计 25 个土壤样品的分析数据, 该样地土壤平均容重为 $1.37\text{ g}/\text{cm}^3$, 土壤中的有机碳平均含量为 $0.60\% \pm 0.30\%$, 热带季节雨林土壤总 C 贮量为 $81.850\text{ t}/\text{hm}^2$ 。在各层次间, 土壤容重与 C 含量的变化趋势相反, 前者由上至下逐渐增加, 而后者由上到下呈递减的趋势。土壤各层的碳储量与碳含量变化趋势相同, 由上到下递减。

3.6 群落总的 C 贮量及其组成

综上所述, 西双版纳热带季节雨林生态系统的总 C 贮量为 $220\,492\text{ t}/\text{hm}^2$, 其中活体植物、土壤、凋落物、粗死木质残体四个碳库的 C 贮量分别为 $128\,099\text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $81.85\text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $4\,835\text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $5\,708\text{ t}/\text{hm}^2$ 。季节雨林生态系统中大部分的碳元素集中于活体植物之中, 占该生态系统的 58.10% , 土壤层次之, 凋落物层最少。

4 讨论

西双版纳热带季节雨林的 C 贮量为 $220\,492\text{ t}/\text{hm}^2$, 其中植物活体占 58.10% , 土壤占 37.12% , 植物死体占 4.78% 。此值略低于我国森林生态系统的平均 C 贮量 ($258.83\text{ t}/\text{hm}^2$)^[16] 和世界热带森林的平均 C 贮量 ($248\text{ t}/\text{hm}^2$)^[17]; 但其植被的 C 贮量 ($128\,099\text{ t}/\text{hm}^2$) 却远高于全国平均水平 ($57.07\text{ t}/\text{hm}^2$)^[3] 和全球森林植被的平均水平 ($86\text{ t}/\text{hm}^2$)^[17]。由此可见, 造成西双版纳热带季节雨林生态系统 C 贮量低于全国平均水平的主要原因是土壤 C 贮量非常低。全国森林土壤的平均 C 贮量为 $193.55\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[16], 为本研究中土壤 C 贮量的 2.36 倍。

由于本地区终年高温多雨, 水热条件充足, 植物

生长旺盛, 且植物种类十分丰富, 使本地区的群落生物量较高, 单位面积上的植被 C 贮量远高于全国平均水平。但其 C 贮量要远低于海南岛尖峰岭热带山地雨林 ($341\,982\text{ t}/\text{hm}^2$), 仅相当于其森林群落现存量的 C 贮量 ($231 \sim 237\text{ t}/\text{hm}^2$)^[18]。而造成本地区植被 C 贮量低于海南岛尖峰岭热带山地雨林的主要原因是: (1) 尖峰岭山地雨林的生物量远高于本研究中的热带季节雨林, 前者乔木层的生物量可达 $420 \sim 430\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[18], 而在本研究中测得季节雨林乔木层的生物量仅为 $298\,768\text{ t}/\text{hm}^2$; (2) 森林植物碳素含量受树种组成对影响, 而西双版纳热带季节雨林的植物种类组成与海南的热带山地雨林恰存在一定差异^[19]。另外, 本研究中乔木各器官的平均碳含量约为 42% 。而在尖峰岭山地雨林的研究中采用燃烧法测定植物碳含量, 得到植物平均生产 1 g 干物质需同化 CO_2 的系数为 1.947 转换成常用的碳含量系数为 53.1% , 比本研究中的实测值约高 11 个百分点。在与本研究采用相同方法进行 C 贮量研究的鼎湖山亚热带常绿阔叶林两群落中乔木层各器官的平均碳含量为 43.3% ^[20]。由以上对比可见, 笼统的采用 50% 或者 45% 的碳含量系数来推算各种森林群落的 C 贮量将可能与实际贮量有较大差异。

与亚洲其他地区的热带森林相比较, 该地区季节雨林生态系统的 C 贮量接近于亚洲热带低地季节雨林的平均值 $224\text{ t}/\text{hm}^2$, 但其植被 C 贮量要高于亚洲同类森林的平均值 ($103\text{ t}/\text{hm}^2$)^[21]。但该值低于菲律宾的热带次生林 ($418\text{ t}/\text{hm}^2$)^[22]。与南美的热带雨林相比, 该地区季节雨林生态系统的 C 贮量不仅远低于巴西的亚马逊地区的热带雨林 ($300\text{ t}/\text{hm}^2$) 和大西洋岸热带雨林 ($430\text{ t}/\text{hm}^2$), 同时也低于相同类型的巴西东部的季节雨林 ($260\text{ t}/\text{hm}^2$)^[23]。可见, 西双版纳热带季节雨林生态系统 C 贮量要低于世界其他地区的大部分热带雨林。这与其分布位置具有一定关系: 与世界其他热带雨林分布地区相比, 季节雨林在西双版纳的生长环境是降水偏少、温度偏低、海拔偏高, 成为一种在水分、温度及分布海拔均到达极限的雨林类型^[6]。这些环境因子势必影响该地区雨林的生物量和 C 贮量。

本地区热带季节雨林生态系统的土壤 C 贮量远低于全国平均水平, 这与对我国土壤有机碳库和分布格局的研究结果相符, 即: 由热带雨林向北到北方针叶林之前土壤碳密度随纬度升高而增加^[24]。

我国森林土壤与植被 C 贮量的比值平均为 2.78^[25], 而在本研究中, 该比值仅为 0.64。该区土壤 C 贮量之所以较低, 可能是由于下面几个因素的综合作用: 高温多湿的气候使土壤微生物活动加剧, 土壤中的有机物质因此更易分解, 即: 土壤呼吸速率较高; 植被茂密, 大量营养从土壤中转移到植物体中, 形成了较大的植被碳库^[25]。

在季节雨林乔木层中, C 贮量主要分布于大径级树木之中。样地中 DBH>70 cm 的大树的个体数量虽然仅占乔木层个体总数的 0.68%, 但其 C 贮量高达 49.896 t/hm², 占群落乔木层总 C 贮量的 40.06%。该结果进一步证明: DBH>70 cm 的个体虽然在样地中频度很低, 但是 C 贮量却能够占据古老森林的 40% 以上^[13]。通常这些大树 (DBH>70 cm) 寿命可达几百年, 并且与小胸径的树木相比其周转速率要慢得多, 因此可将其视为一种长期的碳库。正是由于这些大树的存在, 使得热带季节雨林能够在植被中储存大量的碳素。

参考文献 (References)

- [1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P J. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests [J]. *Plant Cell and Environment* 1999 22: 715~740
- [2] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature* 1993 363: 234~240
- [3] Kerner C. Biosphere response to CO₂ enrichment [J]. *Ecological Applications* 2000 10(6): 1590~1619
- [4] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science* 1998 281: 237~240
- [5] Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle [J]. *Biotropica* 1982 14: 161~187
- [6] Zhu Hua, Wang Hong, Li Baogui, et al. Research on tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, south Yunnan [J]. *Guohua* 1998 18(4): 372~384 [朱华, 王洪, 李保贵, 等. 西双版纳热带季节雨林研究 [J]. 广西植物, 1998 18(4): 372~384]
- [7] Jin Zhenzhou. The diversity features of the ecological structures of plant species component in the tropical rain forest of Xishuangbanna Yunnan [J]. *Acta Botanica Yunnanica* 1997 Suppl IX: 32~58 [金振洲. 西双版纳热带雨林植被的植物群落类型多样性研究 [J]. 云南植物研究, 1997 增刊 IX: 32~58]
- [8] Cao M, Zhang J H, Feng Z L, et al. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Journal of Tropical Ecology* 1996 37(2): 183~192
- [9] Feng Zhili, Zheng Zheng, Zhang Jianhou, et al. Biomass and its all location of a tropical wet seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. *Acta Phytocologia Sinica* 1998 22(6): 481~488 [冯志立, 郑征, 张建侯, 等. 西双版纳热带湿性季节雨林生物量及其分配规律的研究 [J]. 植物生态学报, 1998 22(6): 481~488]
- [10] Zheng Zheng, Feng Zhili, Cao M, et al. Biomass and net primary production of primary tropical wet seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. *Acta Phytocologia Sinica* 2000 24(2): 197~203 [郑征, 冯志立, 曹敏, 等. 西双版纳原始热带湿性季节雨林生物量及其净初级生产 [J]. 植物生态学报 2000 24(2): 197~203]
- [11] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science* 2001 292: 2320~2322
- [12] Liu Guohua, Fu Bojie, Fang Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2000 20(5): 733~740 [刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献 [J]. 生态学报, 2000 20(5): 733~740]
- [13] Lugo A E, Brown S. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon [J]. *Forest Ecology and Management* 1992 54: 239~255
- [14] Philips O L, Malhi Y, Higuchi N, et al. Change in the carbon balance of tropical forests: evidence from long term plot [J]. *Science* 1998 282: 139~142
- [15] Rice A H, Pyle E H, Saleska S R, et al. Carbon balance and vegetation dynamics in an old growth Amazonian forest [J]. *Ecological Applications* 2004 14(4): S55~S71
- [16] Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocologia Sinica* 2000 24(5): 518~522 [周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 [J]. 植物生态学报, 2000 24(5): 518~522]
- [17] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science* 1994 263: 185~190
- [18] Li Yide, Wu Zhongmin, Zeng Qingbo, et al. Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan island [J]. *Acta Ecologica Sinica* 1998 18(4): 371~378 [李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究 [J]. 生态学报, 1998 18(4): 371~378]
- [19] Zhu Hua, Zhou Hongxia. A comparative study on the tropical rain forests in Xishuangbanna and Hainan [J]. *Acta Botanica Yunnanica* 2002 24(1): 1~13 [朱华, 周虹霞. 西双版纳热带雨林与海南热带雨林的比较研究 [J]. 云南植物研究, 2002 24(1): 1~13]
- [20] Tang Xuli, Zhou Guoyi, Wen Dazhi, et al. Distribution of carbon storage in a lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan nature reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2003 23(1): 90~97 [唐旭利, 周国逸, 温达志, 等. 鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林 C 贮量分布 [J]. 生态学报, 2003 23(1): 90~97]
- [21] Brown S, Iverson L R, Prasad A, et al. Geographical distributions of carbon in biomass and soils of tropical Asian forests [J]. *Geocarto International* 1993 4: 45~59

- [22] Lasco RD, Guillermo D, Cruz RVO, *et al*. Carbon stocks assessment of secondary tropical forest in Mt Makiling Forest Reserve Philippines [J]. *Journal of Tropical Forest Science* (in press)
- [23] Behling H. Carbon storage increases by major forest ecosystems in tropical South America since the Last Glacial Maximum and the early Holocene [J]. *Global and Planetary Change* 2002 33: 107~116
- [24] Wang SQ, Zhou CH, Li KR, *et al*. Analysis on spatial characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. *Acta Geographica Sinica* 2000 55(5): 533~544 [王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及其空间分布特征分析 [J]. 地理学报, 2000 55(5): 533~544]
- [25] Fang Yunting, Mo Jiangming. Study on carbon distribution and storage of a pine forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Guohua* 2002 22(4): 305~310 [方运霆, 莫江明. 鼎湖山马尾松林生态系统碳素分配和贮量的研究 [J]. 广西植物, 2002 22(4): 305~310]

Carbon Storage and Distribution of Tropical Seasonal Rain Forest in Xishuangbanna, Yunnan

LÜ Xiaotao^{1, 2}, TANG Jianwei¹, YU Guirui³, ZHANG Yiping¹

(1 Tropical Rain Forest Ecosystem Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Mengla, Yunnan 666303, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3 CERN, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract Tropical forests play an important role in the global carbon cycle because they store large quantities of carbon in vegetation and soil as well as exchange carbon with the atmosphere through photosynthesis and respiration. It is of theoretical importance to understand carbon storage in forest ecosystems, especially in the tropical forests.

This research was conducted in Xishuangbanna, south Yunnan, which stands on the northern edge of tropical Southeast Asia. Tropical seasonal rain forest with the highest tree species diversity is one of the five primary forest vegetation types in this area. The carbon storage and its distribution pattern of the primary tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna was studied based on biomass data in 1 hm² permanent plot and carbon contents of different plant species and soil layers. The grid method (10 m × 10 m) was used to record all individuals in tree layer with a DBH greater than 2.0 cm in the plot. Biomass of trees and woody lianas was obtained by the regression analysis, and shrub and herb layer were harvested in 10 sub-quadrats (2 m × 2 m) to estimate their total biomass in the plot. The results were as follows: 1. Total carbon storage in the tropical seasonal rain forest ecosystem amounted to 220 492 t/hm², therein the living plant contributed 58.10% (128 099 t/hm²), soil (to 100 cm depth), coarse woody debris and fine litter made up 37.12%, 2.59% and 2.19%, respectively. 2. Among the four layers of the tropical seasonal rain forest, tree layer dominated the carbon storage with 97.23% of total living carbon storage, and only 2.77% were contributed by other layers. So the allocation of standing carbon storage among different layers ranked in this order: tree layer > shrub layer > woody liana layer > herb layer. 3. Carbon storage in the tree layer changed with DBH classes. There were three maximum values of standing carbon storage occurring within the DBH classes of 30 ~ 40 cm, 70 ~ 80 cm and > 100 cm. Large trees (defined here as a tree with a DBH greater than 70 cm) occurred at a low frequency in the forest but they were accounted for 40.06% of the carbon storage of tree layer. 4. Carbon storage of tree layer concentrated on dominant tree species. 24.70% of the total carbon storage of tree species was contributed by dominant tree *Pometia tomentosa*, *Teminalia myriocarpa* and *Barringtonia macrostachya* ranked in the second and third place, which were amounted for 6.86% and 6.24%, respectively. The other dominant tree species made up only from 1.1% to 4.5%.

Key words Tropical seasonal rain forest; carbon storage; carbon distribution; Xishuangbanna