



尖峰岭热带山地雨林生物量及碳库动态

陈德祥^①, 李意德^①, Heping Liu^②, 许涵^①, 肖文发^③, 骆土寿^①, 周璋^④, 林明献^①

① 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520;

② Department of Physics, Atmospheric Science and Geoscience, Jackson State University, MS 39217, USA;

③ 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;

④ 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871

E-mail: dexiangchen@ritf.ac.cn

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-05-20

国家自然科学基金(批准号: 40601009)、中国林业科学研究院(批准号: 2007-1, RITFYWZX200902)、林业公益性行业科研专项(批准号: 200804001)、国家科技支撑计划(批准号: 2006BAD03A07, 2006BAD03A04)和国家林业局(批准号: 2007-4-18)资助项目

摘要 利用从 1983 年以来, 2 块固定样地清查数据(P8302, P9201)对尖峰岭热带山地雨林生物量和碳源汇大小进行估算, 并探讨该森林碳源汇大小与环境因子的关系. 结果表明, 基于林分生物量、主要树种各组分碳含量而估算的碳密度, P8302 样地在 $(223.95 \pm 45.92) \sim (254.85 \pm 48.86)$ Mg C/ha 间变动, 平均为 (243.35 ± 47.64) Mg C/ha; 而 P9201 样地在 $(201.43 \pm 29.38) \sim (229.16 \pm 39.2)$ Mg C/ha 间变动, 平均为 (214.17 ± 32.42) Mg C/ha. 林分碳源汇的年际变化较大, 多年平均碳汇为 (0.56 ± 0.22) Mg C·ha⁻¹·a⁻¹, 与非洲和美洲热带森林的碳汇量 $((0.62 \pm 0.23)$ Mg C·ha⁻¹·a⁻¹)相近, 表明尖峰岭热带雨林具有一定的碳汇能力. 碳源汇的大小与暴雨次数和干旱月份次数呈现二次曲线的变化趋势, 暴雨次数和干旱月份次数是尖峰岭热带山地雨林碳源汇大小的两个关键影响因子.

关键词

尖峰岭
热带山地雨林
生物量
碳储量
环境控制因素

热带雨林仅占全球陆地面积的 7%~10%, 植被面积的 13%^[1-3], 但由于通过光合和呼吸作用吸收和释放了大量的碳, 因此, 热带雨林在全球碳循环中起着非常重要的作用. 对于热带森林到底是碳源、碳汇抑或是中性的问题, 目前仍然存在争论^[1-3]. 由于净初级生产力的下降^[4], 通常认为热带雨林, 特别是老龄林(Old-growth forest)对于碳的固定与释放是基本平衡的^[5], 但这种结论与目前的一些实测结果并不一致. 近期研究表明, 亚马逊老龄林的碳汇速率为 (0.62 ± 0.23) Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[6,7], 每年可以吸收 0.5~3.0 Pg C^[8]; 非洲热带雨林的碳汇速率约为 0.63 Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[9]. 目前, 越来越多的证据表明热带老龄林可以加速生

长^[10], 增加生物量^[2,6]. 然而, 对于热带森林生物量的变化及其与环境因子的关系了解得仍不透彻, 难以准确量化^[11]. 热带森林生态系统碳平衡状况仍然是全球碳收支中一个最大的不确定性因素^[12-16]. 这种不确定性部分来源于无法准确估计森林砍伐、自然干扰导致的碳的释放以及未扰动热带森林对碳的吸存^[17]. 因此, 已有大量研究致力于阐明森林砍伐对全球碳收支的影响^[18-20], 但是, 开展未受扰动的热带森林或老龄林对全球碳收支贡献的研究较少. 根据现有研究, 是否可以认为所有的热带老龄林都是一直在积累碳? 若是, 积累速率怎样? 并且其碳的积累和年际气候因子的变化关系如何? 对于这些

问题的解答都将有助于加深对全球碳收支状况的了解.

中国的热带雨林仅分布在海南、云南、广西和西藏等少数地区, 尤以海南岛最为典型. 尖峰岭是海南岛目前热带森林保存最为完好、连片面积最大的地区之一, 而热带山地雨林则是尖峰岭地区发育最为完善、结构最为复杂类型, 是地带性植被类型向高海拔方向发展的垂直系列之一^[21]. 方精云等人^[22]曾利用 P9201 样地数据, 从气候、物种组成、群落结构及生物多样性等方面对尖峰岭热带山地雨林进行了综合评价, 认为尖峰岭热带山地雨林属热带雨林向亚热带雨林过渡的类型, 这一过渡性质决定了其在研究世界热带和亚热带雨林生态学中具有不可替代的地位. 因此, 尖峰岭热带山地雨林与典型的亚洲热带雨林在树种组成、结构上存在较大差异, 这种差异必然导致其在功能上也存在一定差异, 尤其是碳源汇格局和强度, 但关于中国热带森林细致的案例研究却鲜有报道. 因此, 对于中国热带森林碳源汇大小及其与环境因子关系的更好了解可为预测热带雨林在全球碳收支中的作用提供更多重要的案例研究.

本研究以中国海南岛尖峰岭热带山地雨林为研究对象, 利用固定样地连续清查数据, 采用生物量模型, 估算生物量和碳密度及碳源汇的大小, 并分析其与主要环境因子的关系, 探讨自然干扰事件对该森林碳源汇能力的影响.

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究样地设在海南岛尖峰岭国家级自然保护区内的热带山地雨林中. 尖峰岭地跨海南省的乐东和东方两县, 地理坐标为 $18^{\circ}23' \sim 18^{\circ}50'N$, $108^{\circ}36' \sim 109^{\circ}05'E$, 总面积为 470 km^2 , 其中山地雨林的面积近 150 km^2 , 为该地区发育最为完善、结构最为复杂的类型, 由于尖峰岭地处热带北缘, 使得其热带雨林特征明显但又有别于亚洲典型的热带雨林, 主要表现为龙脑香科(Dipterocarpaceae)的种类较少^[21]. 气

候类型属热带季风气候, 水资源丰富. 据海拔 820 m 气象站 1980~2006 年的统计数据, 热带山地雨林区域年总辐射量为 5517.4 MJ/m^2 , 年平均气温 $19.8^{\circ}C$, 最低月平均气温 $14.8^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 的年平均积温 $7204^{\circ}C$, 平均相对湿度 88%, 年平均降水量 2449 mm, 干湿季明显, 80%~90% 的雨量集中在 5~10 月的雨季, 雨季的特点是常受副高系统的影响, 槽脊活动、台风、辐合带活动持续时间长, 季风雨、台风雨、热雷雨、地形雨入侵频繁, 形成降雨量的集中分配季节, 其中台风雨量占 50%~70%. 土壤类型为砖黄壤.

1.2 研究方法

(1) 植物清查样地. 森林清查数据始于 1983 年(样地号 P8302, 大小 $100 \text{ m} \times 30 \text{ m}$), 1992 年新增设置了一个样地(样地号 P9201, 大小 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$), 两个样地直线距离约 1000 m(表 1). 虽然不同年份样地的设立稍有差别, 但样地选择基本遵循以下原则: (i) 尽量保证地形、群落类型、土壤类型和母岩一致; (ii) 避免人为干扰, 但又方便调查人员抵达; (iii) 能够保证进行长期的调查, 不会出现中断. 样地基本为南北(S/N)和东西(E/W)走向. 样地位于尖峰岭五分区原始林中, P8302 样地有常受台风干扰影响的痕迹(台风后常发现有树木倒伏), 而 P9201 样地受台风的影响不明显.

采用相邻格子样方法, 将样地分割成若干个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的小样方, 然后对每个样方内树木进行每木调查, 记录种名、坐标、株数、树高、胸径(DBH, 1.3 m 处)、冠幅等, 并挂上标签. 胸径起测标准 1983 年为 $\text{DBH} \geq 7.5 \text{ cm}$, 1992 年为 $\text{DBH} \geq 5.0 \text{ cm}$, 2000 年以后为 $\text{DBH} \geq 1.0 \text{ cm}$. 对于板根植物, 若 1.3 m 处为板根, 则在高于板根最上端 50 cm 处测定胸径, 同时记录测定点高度. 对于藤本植物, 若在 0~2.5 m 高处只要任何一点直径大于 10 cm, 则将该个体记录在案, 其直径进行 3 点测定: (i) 沿干长 1.3 m 处; (ii) 离地面高 1.3 m 处; (iii) 沿干长 0~2.5 m 最大直径处. 同时, 还需记录藤本植物是否已延伸至样地外.

样地调查时间: P8302 样地为 1983, 1989, 1991,

表 1 P9201 和 P8302 样地信息

样地号	森林类型	海拔/m	经度(E)	纬度(N)	坡向	坡度	土壤类型	土壤有机碳含量(%)
P9201	山地雨林	893	$108^{\circ}53' 23''$	$18^{\circ}43' 47''$	无	2	黄壤	2.40
P8302	山地雨林	867	$108^{\circ}53' 37''$	$18^{\circ}43' 44''$	N11E	8	黄壤	1.10

1995, 1998, 1999 和 2003 年; P9201 样地为 1992, 1993, 1995, 1998, 2003 和 2005 年。

(2) 森林生物量估算. 利用样地清查数据估算林木(包括大的棕榈科(Palmae)及藤本植物, 下同)生物量. 由于热带林树种繁多, 1.0 ha 固定样地数据显示 DBH $\geq$ 1.0 cm 的树种约为 250 种, 因此无法像温带等其他地区一样采用单种的异速生长方程利用胸径、树高等来估算林木生物量. 必须利用多树种的混合回归模型来将样地清查数据转换成生物量. 混合模型的建立可基于代表性样地皆伐所获得的生物量数据进行回归, 也可利用一定数量单株生物量与胸径、树高等测树因子建立回归模型^[4]. 有研究表明, 相对于前者, 后者在转换成林分水平时能更好地降低其不确定性^[23,24]. 本研究中单株个体的生物量计算采用标准木法, 将选择的标准木齐地伐倒后, 采用 2 m 区分段“分层切割法”测定标准木的干、皮、枝、叶鲜重, 地下部分采用全挖法处理, 分别测定根头、粗根(直径 $\geq$ 5 cm)、中根(1.0 cm $\leq$ 直径 $<$ 5.0 cm)、细根(0.2 cm $\leq$ 直径 $<$ 1.0 cm)和须根(直径 $<$ 0.2 cm)鲜重. 取样(干、皮、枝在每层中分别抽取一定重量的样品, 叶为全株混合后取样)烘干至恒重, 计算出各器官干物质质量. 共选择 70 个主要树种共计 280 棵个体(3 cm $<$ DBH $<$ 100 cm, 平均 18.9 cm)进行取样. 在 1.0 ha 固定样地中, 这 70 个树种的胸高断面积比(取样个体胸高断面积总和占样地所有个体胸高断面积总和的百分比)高达 90%. 再运用“相对生长原则”建立样木器官生物量(干、枝、叶、根)与测树因子项(D^2H)的混合回归模型^[25], 最后推算所有个体不同器官的生物量:

树干: $W_t = 0.022816(D^2H)^{0.992674}$,

树皮: $W_{bk} = 0.006338(D^2H)^{0.902418}$,

树枝: $W_{br} = 0.005915(D^2H)^{0.999046}$,

树叶: $W_l = 0.005997(D^2H)^{0.804661}$,

树根: $W_r = 0.003612(D^2H)^{1.11527}$.

由于在历次样地清查中, 起测胸径并不一致, 因此, 为了便于比较, 选择样地中 DBH $\geq$ 7.5 cm 的个体来计算和分析生物量密度和碳密度及碳密度变化. 本文的碳密度指单位面积的生物量碳含量, 由生物量与平均含碳量相乘得到; 碳密度变化指两个时期碳密度的差值, 用于表述生物量碳源汇的大小.

(3) 林分平均碳含量计算. 林分平均碳含量(区

分干、根、枝、叶不同器官)采用胸高断面积加权平均计算. 样品的采集、制备与含量分析详见行业标准 LY/T-1211, 1267 和陆地生物群落调查观测与分析^[26]. 最后利用碳含量分析结果将森林生物量换算成森林碳储量.

$$C_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (S_j \times C_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_j}, \quad (1)$$

式中, C_{avg} 为胸高断面积加权平均碳含量, i 为调查样方内物种数, j 为第 i 种的个体数, S_j 为第 i 种第 j 个体的胸高断面积, C_i 第 i 种各器官碳含量. 根据上式及 200 个树种碳含量的实测值可计算得出尖峰岭热带山地雨林各器官碳含量为: 干 51.08%、根 50.54%、叶 50.38%、枝 49.40%, 取样树种碳含量详见附表 1.

(4) 气象数据的获取. 气象资料来自海南尖峰岭国家级森林生态系统定位站气象观测场 1980~2005 年的地面常规气象资料. 气象观测场位于 18°44'25"N, 18°51'30"E, 海拔 820 m. 观测场按国家地面气象站标准设计: 南北和东西边长 35 m $\times$ 25 m, 均质草皮地面, 四周距离天然林保持约 20 m 以上.

(5) 气象因子与碳源汇大小相关关系分析. 为分析碳源汇大小与环境因子(特别是水分因子)间的相关关系, 选择研究期间的暴雨次数(暴雨划分采用国家气象局降水强度等级划分标准, 本研究选用 12 小时雨量 $>$ 100 mm 的大暴雨等级), 以及干旱月份数与碳源汇大小进行相关分析, 干旱月份采用干旱指数(aridity or dryness index, Φ)评价, 干旱指数定义为降雨与蒸散(potential evapotranspiration, PET)的比值, 与气候区相关, 当各月的 $\Phi > 0.75$, 0.5~0.75, 0.2~0.5, $<$ 0.2 时分别对应于湿润、半湿润、半干旱和干旱月份^[27, 28]. 本研究选择 0.2 $<$ Φ $<$ 0.5 的半干旱月份数进行分析.

2 主要结果

2.1 生物量径级分布

尖峰岭热带山地雨林是该地区发育最为完善的地带性森林类型. 为了解不同径级生物量和个体数的分布情况, 综合 P8302 和 P9201 样地的数据进行分

析, 结果显示, $\text{DBH} \geq 1.0 \text{ cm}$ 的个体株数平均为 (4780 ± 208) 株/ha, 植物种数约为 250 种/ha(图 1 和 2). 但生物量和株数的分布趋势并不一致, 株数呈金字塔型分布, 随径级增大, 数量逐渐减少; 而生物量则随径级增大, 其所占比例逐渐增加. 例如, $\text{DBH} \leq 5 \text{ cm}$ 个体数量最多, 占 68%, 但生物量只占 2%, 而 $\text{DBH} > 10 \text{ cm}$ 的个体数量虽然只占 15%, 但生物量却占总和的 90% 以上, 尤其是数量不到 1% 的大径级个体($\text{DBH} \geq 45 \text{ cm}$), 生物量所占比例更是高达 32%. 充分反映了在热带森林中大径级个体对生物量密度和碳密度的贡献占据绝对的主导作用, 该结果与

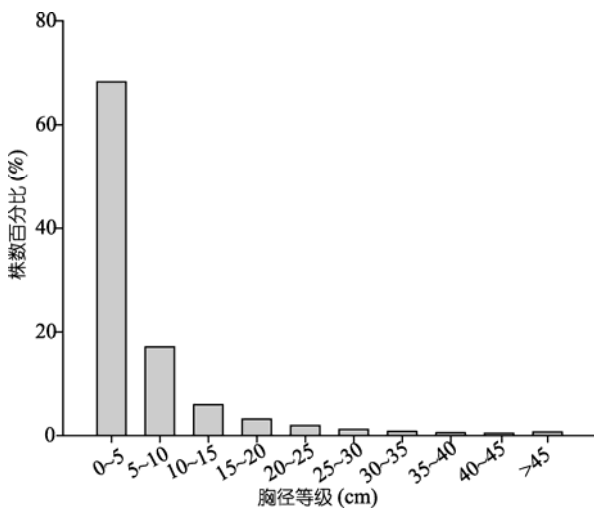


图 1 尖峰岭热带山地雨林不同径级株数分布

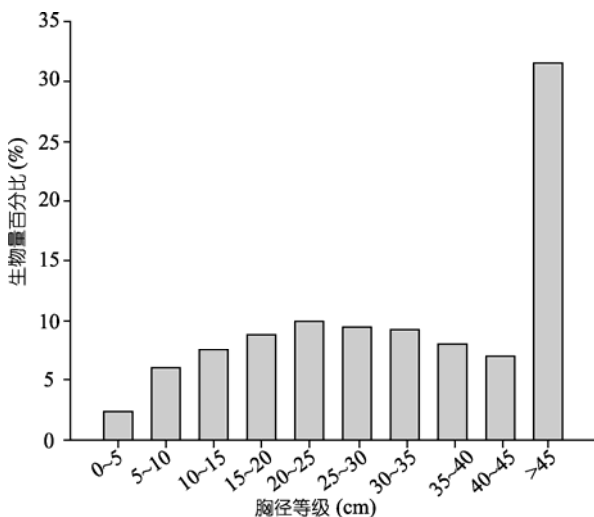


图 2 尖峰岭热带山地雨林不同径级生物量分布

其他热带地区的研究结果相似^[29].

2.2 生物量和碳密度的动态变化

不同时期森林生物量变化的测定是评估其碳源汇大小的重要手段, 若未扰动热带雨林是一个净的碳汇^[30], 那么在观测时期内测定的森林其生物量是否也增加? 利用 1983~2005 年近 25 年间历次样地清查数据估算显示, 尖峰岭热带森林其生物量密度在 (397.05 ± 57.92) 和 $(502.35 \pm 96.32) \text{ Mg C/ha}$ 范围间变动, 平均为 $(453.13 \pm 80.06) \text{ Mg C/ha}$; 碳密度在 (201.43 ± 29.38) 和 $(254.85 \pm 48.86) \text{ Mg C/ha}$ 范围间变动, 平均为 $(230.84 \pm 40.61) \text{ Mg C/ha}$ (表 2). 生物量和碳密度随时间的动态变化在不同样地差异明显, P9201 样地的生物量和碳密度都随时间呈线性增加趋势; 而 P8302 样地的生物量和碳密度则与时间呈现出二次曲线的变化趋势, 即随时间的增加生物量和碳密度先增加后减少, 在近 22 年的调查期间内, 生物量和碳密度的最高值出现在 1998 年, 而最低值则出现在 1983 年(图 3 和 4). 生物量和碳密度在不同样地间的这种差异, 可能与台风干扰有关, 因为 P9201 样地基本没有受台风明显影响的痕迹, 很少发现有大树倒伏; 而 P8302 样地则受台风影响明显, 经常在台风过后发现样地内有大树倒木, 从而导致由样地调查估算得出的生物量和碳密度呈现出明显的差异.

2.3 碳密度年变化量的动态变化

碳密度年变化量反映了各年份生物量碳储量的增加或减少, 可以表征该森林年际尺度碳源汇的大小. 表 2 和图 5 显示, P9201 样地的碳密度年变化量均为正值, 在 (0.91 ± 0.18) 和 $(3.29 \pm 1.09) \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间变动, 表明该林分各年份均为碳汇; 而 P8302 样地的碳密度年变化量则呈现明显的下降趋势($P < 0.01$), 在 (-7.22 ± 2.21) 和 $(3.39 \pm 0.76) \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间变动, 反映了该林分在某些年份是明显的碳汇(变化量为正值), 而某些年份则是明显的碳源(变化量为负值). 但综合两个样地来计算, 尖峰岭热带森林仍然具备一定的净碳汇能力, 单位面积碳汇速率平均为 $(0.56 \pm 0.22) \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 较低于南美洲新热带地区(neotropical)的平均碳汇速率($(0.71 \pm 0.34) \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)^[31]和整个热带非洲平均碳汇速率 $0.63 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (95%置信区间 $0.22 \sim 0.94$)^[9].

表 2 不同期间尖峰岭热带山地雨林生物量、碳密度及年变化量^{a)}

样地	调查年份	生物量密度/Mg·ha ⁻¹	生物量碳密度/Mg·ha ⁻¹	碳密度年变化率/Mg C·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	平均/Mg C·ha ⁻¹ ·a ⁻¹
201 (1.0/ha)	1992	397.05±57.92	201.43±29.38		
	1993	405.47±57.27	205.70±29.05	2.85±0.27	
	1995	416.68±57.79	211.39±29.32	2.84±0.19	
	1998	426.56±61.28	216.40±31.09	2.01±0.71	
	2003	435.50±71.90	220.93±36.48	0.91±0.18	
	2005	451.71±77.26	229.16±39.20	3.29±1.09	
8302 (0.3/ha)	1983	441.44±90.52	223.95±45.92		0.56±0.22
	1989	481.49±95.10	244.27±48.25	3.39±0.76	
	1991	493.88±96.89	250.55±49.15	3.14±0.89	
	1995	488.68±94.20	247.92±47.79	-0.66±0.17	
	1998	502.35±96.32	254.85±48.86	2.31±0.71	
	1999	489.20±96.57	248.18±48.99	-6.67±1.25	
	2003	460.74±87.73	233.74±44.51	-7.22±2.21	

a) 95%置信区间($\bar{x} \pm 2SE$), SE 由 10 m×10 m 的小样方生物量估算得到

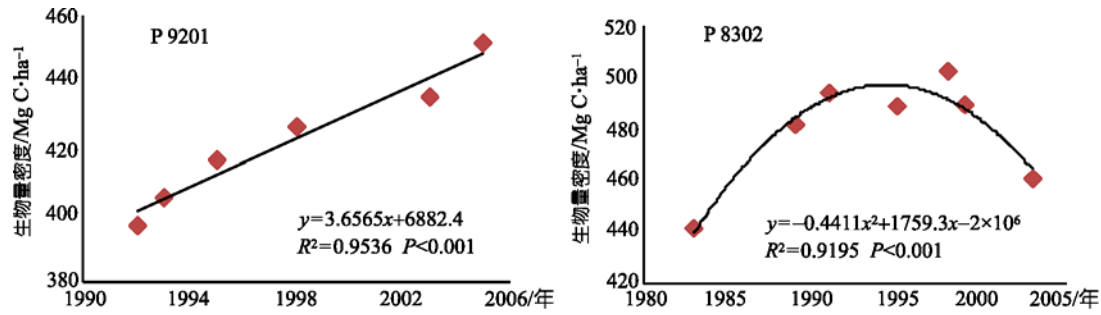


图 3 P8302 和 P9201 样地地上部分生物量 (AGB) 密度时间动态变化

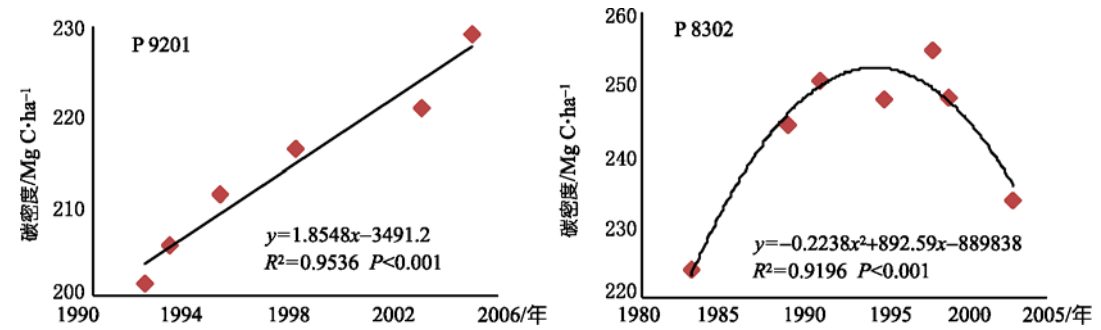


图 4 P8302 和 P9201 样地碳密度时间动态变化

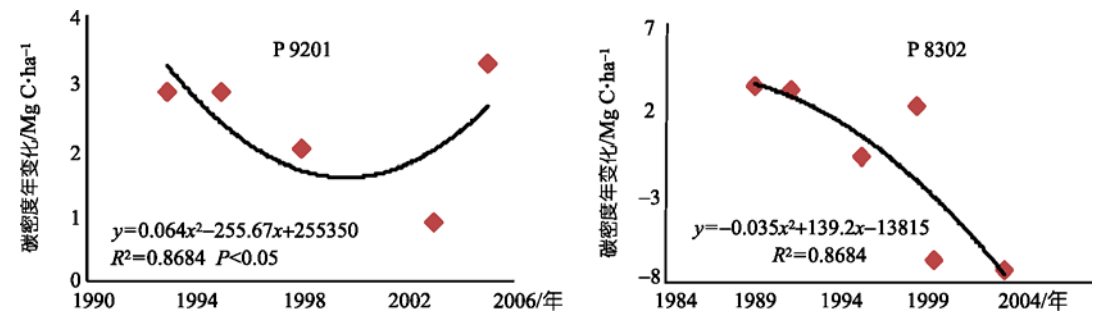


图 5 P8302 和 P9201 样地碳密度年变化量的动态变化

3 讨论

3.1 尖峰岭热带森林碳源汇的控制因子

(1) 降雨输入与水分耗散的影响. 虽然目前已有一些研究证明热带老龄林仍然可能是个碳汇^[2,6,7,9,10,32], 然而对其碳汇能力控制因子的了解仍不清楚^[11]. 由于无法准确估计未扰动热带森林对碳的吸存^[17], 使得热带森林生态系统碳平衡状况仍然是全球碳收支中一个最大的不确定性因素^[12,13]. 因此对热带森林碳源汇大小的准确估计及其控制因子的了解将有助于提高人们正确认识热带森林生态系统碳平衡状况.

图 3 和 4 显示, P8302 和 P9201 样地的生物量和碳密度呈现出明显的差异, 这种变化趋势可能是受到很多因子共同作用的结果, 但极端气候造成环境因子的改变及其对生态系统的干扰可能是其中最为重要的影响因子. TEM(terrestrial ecosystem model)模拟表明, 降雨是影响陆地生态系统 NPP(净初级生产力)的主要气候驱动因子, 降雨量与 NPP 呈显著的正相关^[17]. 因此, 为了探寻水分条件与碳源汇大小的关系, 选择近 22 年来尖峰岭地区的暴雨次数与两个样地估算的碳源汇大小进行了相关分析(图 6), 结果发现暴雨次数与林分碳源汇大小呈明显的二次曲线关系, 是碳源汇大小的显著影响因子(图 6, $P<0.05$). 随暴雨次数的增加, 热带森林的碳汇能力也将逐步增加, 而当暴雨次数进一步增加时, 暴雨将降低热带森林的碳汇能力. 暴雨次数与林分碳源汇大小的关系可能是因为, 尖峰岭地区存在明显的旱、雨季, 且 80%以上的降水集中在雨季, 50%~70%是由台风暴雨带来的, 因此, 暴雨的次数就基本决定了年度降雨的多少. 随着降雨的增加, 林木生长所需的蒸腾耗水能得到较好的保障, 即使到了旱季也不易出现干旱胁迫, 较好的促进林木生长, 保证生物量的增加, 使得碳汇能力随降雨的增加呈现增加的趋势. 当暴雨降雨超过年平均降雨(2600 mm)时, 随暴雨次数的增加碳汇能力则呈显著降低的趋势(图 6), 此时可能由于过量的降雨抑制了林木的生长. Schuur^[33]在研究了近 100 个热带森林降雨与 NPP 的关系后发现, 当降雨超过年平均雨量 2445 mm 时(与本研究地区平均降雨相近), 随降雨增加 NPP 呈下降趋势, 降雨对 NPP 的这种负效应可能是由于降雨的增加导致了辐射输入的减少、土壤营养元素淋溶效应的增加或者土壤

中氧气的减少而产生的一种间接效应. 此外, 过量的降雨还将使得土壤孔隙被水分填充, 导致氧气无法快速扩散, 使得根系和微生物分解速率降低, 从而导致 NPP^[34]降低.

干旱月份次数与林分碳源汇大小也呈二次曲线关系(图 6), 随干旱月份数的增加, 由于异氧呼吸受到抑制, 短期来看能够提高 NEP^[35], 因此热带森林的碳汇能力将增加(图 6), 而当干旱次数进一步增加, 则将减弱热带森林的碳汇能力, 甚至使其转换为排放碳的源. 干旱月份数与碳源汇大小的这种相关关系可能是因为, 光作为 NPP 模型的重要驱动因子, 当热带地区降雨增加时, 由于同时伴随着较多云量的出现, 因此降雨的增加会导致光合有效辐射的减少^[33], 而随着干旱月份数的增加, 说明存在较充足的辐射等光热资源来满足植物的光合作用, 在不存在干旱胁迫的状况下, 林木可以更好地生长, 碳汇能力增加, 而当干旱状况持续并加剧时, 由于旱季降雨较少, 蒸散尤其是旱季期间的蒸散若过于强烈(即当 $0.2<\Phi<0.5$, 与半干旱地区指数相同时), 必然导致土壤水分不能得到及时有效的补充, 因此容易产生干旱胁迫, 抑制林木的生长, 使得碳汇能力随干旱月份数的增加而降低(图 6). 因此, 可以认为, 暴雨次数和干旱月份数可能会影响到土壤水分状况, 从而成为碳源汇大小的控制因子. 另外, 土壤水分的变化会通过影响氮(N)的可获得性从而使净生态系统生产力发生变化^[36,37]. Singh 和 Sing^[38]发现, 当土壤水分减少时, 将造成土壤 N 的可获得性降低 12%~44%. 因为 N 被认为是植物生长的一个最为常见的限制性因子^[39], 能有效加速钙、镁、磷等营养元素的循环和利用^[40], 从而促进林木的生长^[41], 目前也有很多研究表明, N 的增加能够导致固碳能力的增加^[42,43].

有研究报道, 生态系统碳储量变化对降雨的输入和旱季的水分耗散非常敏感^[44,45]. 不管是在热带稀树草原^[46], 还是热带常绿阔叶林^[47]都会出现由于旱季水分的减少导致光合作用下降, 使得生态系统碳储量降低. Brando 等人^[45]曾利用模拟降雨减少来研究干旱对亚马逊盆地热带雨林的影响, 结果显示当降雨输入减少 35%~41%时, 地上部分净生产力(ANPP)在研究的第 2 年降低了 13%, 其余年份 ANPP 降低幅度更是高达 62%. 而且在热带雨林中, 林木与凋落物对干旱的响应存在明显的差异^[45]. 虽然干旱对热带雨林的结构与功能具有重要影响, 干旱将造

成林木无法正常繁殖、干和根生长减缓、凋落物分解下降, 以及改变营养元素循环, 甚至造成个体死亡^[44]. 但是, 当干旱不至于造成土壤水分亏缺时, 由于云量的减少和 PAR 的增加, 热带雨林的 NPP 将增加^[48]. 若干旱造成了生理胁迫(如气孔关闭等), 或者导致林地土壤贫瘠化而使林木死亡率增加, 则将使 NPP 下降^[49,50]. 本文的结果也显示一定限度暴雨次数的增加和干旱月份的减少能显著增加碳汇能力(图 6). 因此, 了解降雨的年间变化动态和降雨分布格局及其与碳源汇大小的关系对于估算整个尖峰岭, 甚至是更大尺度地区的碳储量非常重要.

(2) 干扰事件对热带森林碳源汇的影响. 温室效应除了使气温升高外, 还将使异常气候发生的频率增加^[51], 尖峰岭林区的气候异常发生频率则是 20 世纪 90 年代后明显增加. 尖峰岭热带森林碳源汇能力的时间动态变化, 可能是由于全球性的气候异常变化及尖峰岭地区特殊的地理位置和气候条件决定的. 因为尖峰岭临近海边, 受热带季风气候影响明显, 且极易遭受台风的影响, 台风带来的强降雨和大风将对树木的生长造成严重的影响, 导致大量树木倒伏, 尤其是处在冠层顶部的大树更易被大风吹倒. 而计算生物量现存量时, 并未将倒木计入, 大树倒后形成的林窗, 由于其光热资源充足, 将使下层林木快速生长, 导致生物量及其碳密度年际变化差异较大. 尤其

是 P8302 样地计算的碳密度分别在 1995, 1999, 2003 年明显下降, 在 1991~1995, 1999~2003 年间海南共登陆台风分别为 16 和 8 次, 而其中伴随强风并对尖峰岭有直接影响的台风分别为 6 和 5 次. 台风除了带来高强度的降雨外, 还给森林带来巨大的物理损伤, 对森林生态系统造成严重的干扰. 这期间, 台风分别造成 1995, 1999 和 2003 年 3 次调查时样地倒木分别为 8 株(DBH 平均为 33.1 cm, 最大 48.5 cm)、1 株(胸径 65.9 cm)、9 株(DBH 平均为 37.7 cm, 最大 104.4 cm), 使得生物量和碳密度明显减少. 而在 1998 年由于同时受厄尔尼诺和拉尼娜现象影响, 林木生长更是受到了明显的影响, 表现出生物量密度和碳储量的明显下降.

3.2 尖峰岭热带森林碳源汇与世界其他热带森林比较

虽然在热带地区已经有较多的森林开展了样地的清查工作, 但是仍然还有一些地区缺乏这样的工作, 或者工作不完善^[16]. 即使已经开展这项工作的很多热带地区, 由样地扩展至整个地区的生物量估算时仍然存在较多的问题. Houghton^[18]曾经用 7 种不同的方法对巴西亚马逊地区森林生物量进行估算, 结果显示不同方法测算的生物量不但差异较大, 而且生物量最高和最低的地区也不一致. 虽然热带地

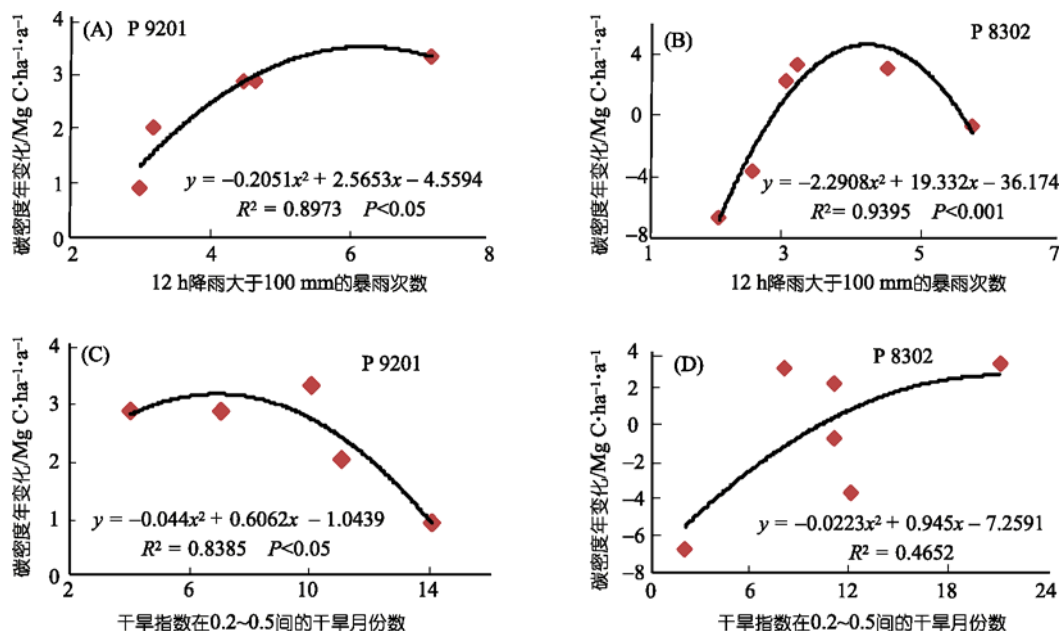


图6 P8302 和 P9201 样地碳密度年变化量与大暴雨次数和干旱月份数的相关关系

区森林资源清查工作存在较大差异,但是,联合国粮食及农业组织(FAO)仍然对热带地区国家层面的森林生物量进行了 3 次估算(分别为 1980, 1990, 2000 年)^[52~55],结果显示热带亚洲是唯一一个生物量碳密度连续减少的地区,减少的幅度近 50%,到 2000 年生物量碳密度仅为 70 Mg C/ha,而拉丁美洲则呈逐年增加的趋势.热带地区森林生物量碳密度减少的根本原因主要是由于森林的砍伐导致一部分原始林变成了次生林或者是转换成其他农耕地^[16].但尖峰岭热带林固定样地调查数据则显示,虽然为老龄林,但从 20 世纪 80 年代开始其碳密度整体仍然呈现增加的趋势(表 2),这其中部分应归功于海南岛较早实施了天然林禁伐计划,使过去常见于热带地区的“刀耕火种”人为破坏热带天然林的干扰方式已基本消失,良好的热带原始森林能够得以较好的保存下来,避免了大面积的砍伐、毁坏,以致林木能够得到较好的生长,使其生物量和碳密度保持增加的趋势.但是 FAO 估算的热带地区国家层面的生物量和碳密度结果与其他的一些研究结果差异较大^[56,57].由于不同国家、不同地区森林类型存在差异,且样地数量、大

小也不一致,因此,生物量和碳密度的这种直接比较就显得意义不大,碳汇大小的比较似乎更能说明问题.而本研究中尖峰岭地区的碳汇大小从 1983~2005 年,年平均为 (0.56 ± 0.22) Mg C·ha⁻¹·a⁻¹,与其他非洲和美洲热带地区的估测结果相近,例如夏威夷热带森林碳汇大小平均为 0.60 Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[58],亚马逊老龄林为 (0.62 ± 0.23) Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[6,7],非洲热带森林为 0.63 Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[19],但要低于东南亚热带森林 $(2.0 \sim 19.1)$ Mg C·ha⁻¹·a⁻¹^[59].因此,与非洲、美洲的热带地区,甚至是亚洲的其他热带国家相比,中国海南岛尖峰岭热带雨林老龄林的碳汇大小虽然略微偏低,但仍然是属于碳汇能力较高的森林类型.同时,通过与其他热带地区地上部分生物量实测值的比较(表 3),尖峰岭热带雨林的地上部分生物量平均为 (453.13 ± 80.06) Mg/ha,高于非洲和美洲热带森林地上部分生物量的平均值 $(307.30 \sim 313.04)$ Mg/ha,也要高于亚洲其他国家或地区热带森林地上部分生物量的平均值 $(188 \sim 403)$ Mg/ha.这些结果说明,虽然中国海南岛地处热带北缘,在树种组成和结构上和典型热带森林存在较大差异,但其仍然具有较高的生物量

表 3 不同地区热带森林地上部分生物量(AGB)比较

参考文献	地区或样地	地上部分生物量/Mg·ha ⁻¹	样地大小/ha	面积/ha
Clark, Clark ^[24]	哥斯达黎加, La Selva	186.1	0.01	11.7
DeWalt, Chave ^[60]	巴西, Amazonas	269.2±45.5	0.05	0.3
Chave 等人 ^[61]	巴拿马, Barro Colorado	281±20	0.25	50
Kauffman 等人 ^[62]	巴西, Rondonia	337±36		
Hughes 等人 ^[63]	巴西, Rondonia	311		1.5
Guild 等人 ^[64]	巴西, Rondonia	399±45		1.5
Saldarriaga 等人 ^[65]	委内瑞拉, Amazonas	234±22	0.03	0.36
Chave 等人 ^[66]	法属圭亚那, St Elie	345±27	1	1
Cummings 等人 ^[67]	巴西, Rondonia	312.8±6.7	0.79	6.32
Malhi 等人 ^[11]	玻利维亚, BosqueChimanes	252.24~263.11	1	1
Ferreira, Prance ^[68]	巴西, Central Amazonia	380.81~444.62	1	1
Pitman 等人 ^[69]	厄瓜多尔, Capiron	326.69~345.17	1	1
Nebel 等人 ^[70]	秘鲁, Jenaro Tahuampa	275.32~279.64	1	1
	文莱	320±26		
	柬埔寨	306±73		
	印度尼西亚	324±78		
	马来西亚, Peninsular	212±42		
Brown 等人 ^[71]	马来西亚, Sabah/Sarawak	338±44		
	缅甸	240±60		
	菲律宾	220±35		
	泰国	188±58		
	越南	264±61		
Hoshizaki 等人 ^[72]	马来西亚, Pasoh Forest Reserve	403~431	6	6
本研究	中国, 海南	453.13±80.06	1	1

和碳密度,同时也属于碳汇能力较高的热带森林类型.

4 结论

基于 1983~2005 年两块固定样地的每木清查数据,发现中国海南岛尖峰岭热带山地雨林生物量随径级增大而增大, DBH>10 cm 的个体占生物量总和的 90%以上,尤其是数量不到 1%的大径级个体 (DBH≥45 cm),其生物量所占比例更是高达 32%,充分反映了在热带森林中大径级个体对生物量和碳密度的贡献占绝对主导作用.生物量密度在(397.05±57.92)~(502.35±96.32) Mg/ha 间变动,平均为(453.13±

80.06) Mg/ha; 碳密度在 (201.43±29.38)~(254.85±48.86) Mg C/ha 间变动,平均为(230.84±40.61) Mg C/ha. 在调查期间,森林碳汇大小密度的动态变化与台风等的干扰密切相关,当台风等极端事件干扰频繁时,森林碳密度整体呈降低趋势;而当台风过后或不存在明显台风干扰时,随时间增加碳密度又逐渐增加,呈现明显的碳汇功能.

尖峰岭热带森林单位面积碳汇速率平均为 (0.56±0.22) Mg C·ha⁻¹·a⁻¹,弱低于南美洲新热带地区(neotropical)和非洲热带森林的碳汇能力.暴雨次数及干旱月份数是影响尖峰岭热带森林碳汇大小的两个关键因子),但碳汇大小动态变化同时受异常气候的明显影响.

致谢 感谢海南尖峰岭国家级自然保护区、中国林业科学研究院热带林业研究所尖峰岭试验站等单位在野外调查中给予的支持,北京大学方精云院士、朱彪教授对本文提出宝贵的修改意见.

参考文献

- Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234—240
- Malhi Y, Grace J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends Ecol Evol*, 2000, 15: 332—337
- Lewis S L. Tropical forests and the changing earth system. *Phil Trans R Soc Lond B*, 2000, 261: 195—210
- Waring R H, Schlesinger W. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Orlando:Academic Press, 1985
- Kira T, Shidei T. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western pacific. *Jpn J Ecol*, 1967, 17: 70—87
- Grace J, Malhi Y. Global change: carbon dioxide goes with the flow. *Nature*, 2002, 416: 594—595
- Baker T R, Phillips O L, Malhi Y, et al. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philos T Roy Soc B*, 2004, 359: 353—365
- Phillips O L, Lewis S L, Baker T R, et al. The changing Amazon forest. *Philos T Roy Soc B*, 2008, 363: 1819—1827
- Lewis S L, Lopez-Gonzalez G, Sonke B, et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forest. *Nature*, 2009, 457: 1003—1007
- Malhi Y R, Wood D, Baker T, et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1107—1138
- Lewis S L, Phillips O L, Baker T R, et al. Concerted changes in tropical forest structure and dynamics: evidence from 50 South American long-term plots. *Philos T Roy Soc B*, 2004, 359: 421—436
- Brown S A, Hall C A S, Knabe W, et al. Tropical forests: their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water Air Soil Poll*, 1993, 70: 71—94
- Melillo J M, Prentice I C, Farquhar G D, et al. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate. In: Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al, eds. *Climate change 1995: the science of climate change*. New York: Cambridge University Press, 1996. 444—481
- DeFries R S, Houghton R A, Hansen M C, et al. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 90s. *PNAS*, 2002, 99: 14256—14261
- Cramer W, Bondeau A, Schaphoff S, et al. Tropical forests and global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Phil Trans R Soc Lond B*, 2004, 359: 331—343
- Houghton R H. Aboveground forest biomass and global carbon balance. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 945—958
- Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. *Global Ecol Biogeogr*, 2000, 9: 315—335

- 18 Houghton R A. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climatic Change*, 1991, 19: 99—118
- 19 Hall C A S, Tian H, Qi Y, et al. Modelling spatial and temporal pattern of tropical land use change. *J Biogeogr*, 1995, 22: 753—757
- 20 Melillo J M, Houghton R A, Kicklighter D W, et al. Tropical deforestation and the global carbon budget. *Annu Rev Energ Env*, 1996, 21: 293—310
- 21 Li Y D. Community structure in a tropical montane rain forest at Jianfengling, Hainan Island, China (in Chinese). *J Trop Subtrop Bot*, 1997, 5: 18—26
- 22 Fang J Y, Li Y D, Zhu B, et al. Community structures and species richness in the montane rain forest of Jianfengling, Hainan Island, China (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2004, 12: 29—43
- 23 Brown S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests FAO, Forestry Paper 134. Rome: Forest Resources Assessment Publication, 1997
- 24 Clark D B, Clark D A. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *For Ecol Manag*, 2000, 137: 185—198
- 25 Zeng Q B, Li Y D, Chen B F, et al. Management on tropical forest ecosystems (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 1997, 202
- 26 Dong M. Survey, observation and analysis of terrestrial biocommunities (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1997, 143—183
- 27 Oldeman L R, Frère M. A study of the Agroclimatology of the humid tropics of South-East Asia. WMO Technical Note No. 179, Geneva, 1982
- 28 FAO. Guidelines: Land evaluation for irrigated agriculture. Soil Bulletin No. 55, FAO, Rome, 1985
- 29 Kirby K R, Potvin C. Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink project. *For Ecol Manag*, 2007, 246: 208—221
- 30 Andreae M O, Artaxo P, Brandao C, et al. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: the LBA-EUSTACH experiments. *J Geophys Res-Atmos*, 2002, 107: 8066, doi: 10.1029/2001JD000524
- 31 Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, et al. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 1998, 282: 439—442
- 32 Phillips O L, Aragao L E, Lewis S L, et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323: 1344—1347
- 33 Schuur E A G. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology*, 2003, 84: 1165—1170
- 34 Schuur E A G. The effect of water on decomposition dynamics. *Ecosystems*, 2001, 4: 259—273
- 35 Saleska S R, Miller S D, Matross D M, et al. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science*, 2003, 302: 1554—1557
- 36 Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential net primary productivity in South America: application of a global model. *Ecol Appl*, 1991, 1: 399—429
- 37 Neill C, Melillo J M, Steudler P A, et al. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the Southwestern Brazilian Amazon. *Ecol Appl*, 1997, 7: 1216—1225
- 38 Singh B, Sing G. Influence of soil water regime on nutrient mobility and uptake by *Dalbergia sissoo* seedlings. *Trop Ecol*, 2004, 45: 337—340
- 39 Breymeyer A I, Hall D O, Melillo J M, et al. Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands (Scope No 56). New York: John Wiley & Sons Ltd., 1997
- 40 Boisvenue C, Running S W. Impacts of climate change on natural forest productivity: Evidence since the middle of the 20th century. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 862—882
- 41 Verburg P S J. Soil solution and soil N response to climate change in two boreal forest ecosystems. *Biol Fert Soils*, 2005, 41: 257—261
- 42 Adams A B, Harrison R B, Sletten R S, et al. Nitrogen fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest. *For Ecol Manag*, 2005, 220: 313—325
- 43 Hagedorn F, Maurer S, Bucher J B, et al. Immobilization, stabilization and remobilization of nitrogen in forest soils at elevated CO₂: a 15N and 13C tracer study. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 1816—1827
- 44 Nepstad D C, Moutinho P, Dias-Filho M B. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *J Geophys Res*, 2002, 107, NO. D20, 8085, doi: 10.1029/2001JD000360
- 45 Brando P, Nepstad D, Davidson E., et al. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Phil Trans R Soc B*, 2008, 363: 1839—1848
- 46 Miranda A C, Miranda H S, Lloyd J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant Cell Environ*, 1997, 20: 315—328
- 47 Malhi Y, Nobre A D, Grace J, et al. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *J Geophys Res*, 1998, 103: 31593—31612
- 48 Oberbauer S F, Loescher H, Clark D B. Effects of climate factors on daytime carbon exchange from an old-growth forest in Costa Rica.

- Selbyana, 2000, 21: 66—73
- 49 Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 1989, 70: 1346—1354
- 50 Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in undisturbed Amazonian ecosystems. *Nature*, 1998, 396: 664—667
- 51 Denny M W, Hunt L J, Miller L P, et al. On the prediction of extreme ecological events. *Ecol Monogr*, 2009, 79: 397—421
- 52 FAO. Forest Resources Assessment 1990. Global Synthesis. FAO Forestry Paper, 124, 1995
- 53 FAO. Forest Resources Assessment 1990. Tropical Countries. FAO Forestry Paper, 112. 1993
- 54 FAO. Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report. FAO Forestry Paper, 140, 2001
- 55 FAO/UNEP. Tropical Forest Resources Assessment Project. 1981
- 56 Achard F, Eva H D, Mayaux P, et al. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochem Cy*, 2004, 18: 1—11
- 57 Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus*, 2003, 55B: 378—390
- 58 Clark D A, Brown S, Kicklighter D, et al. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecol Appl*, 2001, 11: 356—370
- 59 Aiba S, Takyu M, Kitayama K. Dynamics, productivity and species richness of tropical rainforests along elevational and edaphic gradients on Mount Kinabalu, Borneo. *Ecol Res*, 2005, 20: 279—286
- 60 DeWalt S J, Chave J. Structure and biomass of four lowland neotropical forests. *Biotropica*, 2004, 36: 7—19
- 61 Chave J, Condit R, Lao S, et al. Hubbell. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census in Panamá. *J Ecol*, 2003, 91: 240—252
- 62 Kauffman J B, Cummings D L, Ward D E, et al. Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia*, 1995, 104: 397—408
- 63 Hughes R F, Kauffman J B, Cummings D L. Dynamics of aboveground and soil carbon and nitrogen stocks and cycling of available nitrogen along a land-use gradient in Rondonia, Brazil. *Ecosystems*, 2002, 5: 244—259
- 64 Guild L S, Kauffman J B, Ellingson L J, et al. Dynamics associated with total aboveground biomass, C, nutrient pools and biomass burning of primary forest and pasture in Rondonia during SCAR-B. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3209—32100
- 65 Saldarriaga J G, West D C, Tharp M L, et al. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *J Ecol*, 1988, 76: 938—958
- 66 Chave J, Riera B, Dubois M A. Estimation of biomass in a neotropical forest in French Guiana: spatial and temporal variability. *J Trop Ecol*, 2001, 17: 79—96
- 67 Cummings D L, Kauffman J B, Perry D L, et al. Aboveground biomass and structure of rainforests in the Southwestern Brazilian Amazon. *For Ecol Manag*, 2002, 163: 293—307
- 68 Ferreira L V, Prance G T. Species richness and floristic composition four hectares in the Jau' National Park in upland forests in Central Amazonia. *Biodivers Conserv*, 1998, 7: 1349—1364
- 69 Pitman N C A, Terborgh J W, Silman M R, et al. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. *Ecology*, 2001, 82: 2101—2117
- 70 Nebel G, Kvist L P, Vanclay J K, et al. Structure and floristic composition of flood plain forests in the Peruvian Amazon. I Overstorey. *For Ecol Manag*, 2001, 150: 27—57
- 71 Brown S, Iverson L R, Prasad A, et al. Geographical distributions of carbon in biomass and soils of tropical Asian forests. *Geocarto Int*, 1993, 4: 45—59
- 72 Hoshizaki K, Niiyama K, Kimura K, et al. Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Malaysia. *Ecol Res*, 2004, 19: 357—363

附表 1 树种碳含量分析结果

中文名	树种 拉丁名	胸径/cm	碳含量(%)			
			干	根	叶	枝
暗罗	<i>Polyalthia suberosa</i> (Roxb.) Thw.	7.3	49.6	49.25	45.53	49.95
白背槭	<i>Acer decandrum</i> Merr.	2.2	49.11	50.36	50.25	50.72
白格	<i>Albizia procera</i> (Roxb.) Benth.	12.9	52.29	52.82	49.88	49.32
白榄	<i>Canarium album</i> (Lour.) Raeusch.	3.0	47.34	50.17	50.41	43.52
白木香	<i>Aquilaria sinensis</i> (Lour.) Spreng.	3.5	51.92	51.41	47.35	49.79
柏拉木	<i>Blastus cochinchinensis</i> Lour.	2.1	51.53	44.61	44.28	48.91
槟榔青	<i>Spondias pinnata</i> (L. f.) Kurz	4.8	49.11	41.66	45.83	48.46
博兰	<i>Trigonostemon fragilis</i> (Gagnepain) Airy Shaw	3.3	47.69	48.47	41.18	50.38
布渣叶	<i>Microcos paniculata</i> L.	8.8	49.47	48.2	48.15	60.47
赤才	<i>Lepisanthes rubiginosa</i> (Roxb.) Leenh.	6.1	50.19	48.9	52.41	51.67
赤楠蒲桃	<i>Syzygium buxifolium</i> Hook. & Arn.	2.1	52.17	49.32	51.03	51.91
刺桑	<i>Taxotrophis ilicifolius</i> (S. Vidal) Corner	3.3	49.47	47.58	37.06	44.78
刺桐	<i>Erythrina variegata</i> L.	13.1	51.69	47.2	51.05	47.97
丛花山矾	<i>Symplocos poilanei</i> Guill.	7.6	49.91	54.11	45.38	51.32
粗糠柴	<i>Mallotus philippensis</i> (Lam.) Müell.-Arg.	11.5	42.97	47.88	47.7	47.88
粗脉樟	<i>Cinnamomum validinerve</i> Hance	2.5	54.04	58.82	47.71	53.78
粗叶木	<i>Lasianthus chinensis</i> (Champ.) Benth.	1.7	49.18	47.82	43.64	42.59
大青	<i>Clerodendrum catophyllum</i> Turcz.	2.1	51.5	45.42	45.38	50.59
大叶白颜	<i>Girroniera subaequalis</i> Planch.	2.6	54.24	48.56	42.99	43.01
大叶鱼骨	<i>Calthium simile</i> Merr	2.0	53.77	49.51	48.27	51.35
灯架	<i>Alstonia rostrata</i> C. E. C. Fischer	1.7	50.48	51.21	51.1	51.61
吊鳞苦梓	<i>Michelia mediocris</i> Dandy	30.2	50.76	54.34	51.89	48.55
吊罗栎	<i>Castanopsis tiaoloshanica</i> (Chun & W. C. Ko) Y. C. Hsu & H. W. Jen	7.3	47.8	50.97	50.64	52.86
丁公藤	<i>Erycibe obtusifolia</i> Benth.	1.9	51.05	48.9	44.12	47.86
东方琼楠	<i>Beilschmiedia tungfangensis</i> S. K. Lee & L. F. Lau	3.0	53.99	55.1	51.6	48.5
短药蒲桃	<i>Syzygium globiflorum</i> (Craib) P. Chan. & J. Parnell	3.0	49.11	48.64	48.68	48.28
对叶榕	<i>Ficus hispida</i> L. f.	5.6	49.27	47.99	36.28	44.35
多花山竹子	<i>Garcinia multiflora</i> Champ. ex Benth.	2.5	47.68	48.68	42.92	50.13
多花五月茶	<i>Antidesma maclurei</i> Merr.	2.9	52.47	47.27	49.81	51.55
多香木	<i>Polyosma cambodiana</i> Gagnep.	1.6	53.54	45	47.93	49.3
翻白叶	<i>Pterospermum heterophyllum</i> Hance	3.3	51	52.07	38.99	45.37
饭甗栎	<i>Castanopsis fleuryi</i> (Hick. & A. Camus) Chun ex Q. F. Zheng	5.9	52.49	49.56	49.22	45.74
方枝蒲桃	<i>Syzygium tephrodes</i> (Hance) Merr & L. M. Perry	2.3	51.01	48.69	45.96	50.53
高地山香圆	<i>Turpinia montana</i> (Bl.) Kurz.	2.0	55.78	49.66	43.39	49.09
高枝杜英	<i>Elaeocarpus dubius</i> A. DC.	13.0	47.97	53.09	47.5	48.44
割舌罗	<i>Walsura robusta</i> Roxb.	5.4	45.21	53.09	44.4	50.58
贡甲	<i>Maclurodendron oligophlebium</i> (Merr.) T. G. Hart.	2.1	51.46	50.32	48.81	52.86
谷木	<i>Memecylon ligustrifolium</i> Champ. ex Benth.	4.8	52.85	50.79	50.45	51.13
瓜馥木	<i>Fissistigma oldhamii</i> (Hemsl.) Merr.	8.0	50.25	51.26	46.14	45.57
广东山胡椒	<i>Lindera kwangtungensis</i> (H. Liu) C. K. Allen	18.1	53.85	49.62	54.31	57.01
海岛冬青	<i>Ilex goshiensis</i> Hayata	5.2	48.66	52.11	52.21	52.48
海南巴豆	<i>Croton laui</i> Merr. et Metc.	7.5	50.81	52.67	48.74	47.03
海南大头茶	<i>Polyspora hainanensis</i> (H. T. Chang) C. X. Ye ex B. M. Barth. & T. L. Ming	1.9	32.79	51.76	50.5	48.95
海南罗伞	<i>Ardisia quinqueгона</i> Bl. var. <i>hainanensis</i> Walker	1.7	50.63	52.26	49.08	50.24
海南木莲	<i>Manglietia hainanensis</i> Dandy	4.0	54.13	49.04	47.62	49.88
海南蒲桃	<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	11.1	51.93	47.85	47.48	49.96
海南水团花	<i>Pertusadina hainanensis</i> (How) Ridsd.	1.9	48.7	54.67	51.73	51.42
海南杨桐	<i>Adinandra hainanensis</i> Hayata	2.0	51	49.79	52.6	50.63
韩氏蒲桃	<i>Syzygium hancei</i> Merr. & L. M. Perry	10.5	46.61	49.2	51.83	52.21

续附表1

中文名	拉丁名	胸径/cm	碳含量(%)			
			干	根	叶	枝
黑格	<i>Albizia odoratissima</i> (L. f.) Benth.	8.5	50.96	50.63	48.98	49.36
红翅槭	<i>Acer fabri</i> Hance	17.6	47.26	52.73	50.13	45.86
红桐	<i>Lithocarpus fenzelianus</i> A. Camus	2.5	54	49.34	47.01	51.74
红锥	<i>Castanopsis hystrix</i> J. D. Hook. & Thomson ex A. DC.	60.0	54.87	53.32	49.06	
猴耳环	<i>Archidendron clyperia</i> (Jack.) Nielsen	2.5	48.64	50.27	45.67	51.29
厚边木犀	<i>Olea marginatus</i> (Champ. ex Benth.) Hemsl.	8.1	53.99	51.47	56.06	53.08
厚皮树	<i>Lannea coromandelica</i> (Houtt.) Merr.	8.2	46.1	44.89	53.46	49.3
厚皮香	<i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Beddome	2.3	52.99	49.87	50.6	52.49
华润楠	<i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hemsl.	13.0	52.96	49.1	56.89	52.9
黄果榕	<i>Ficus vasculosa</i> Wall. ex Miq.	1.8	48.03	46.73	44.2	46.99
黄牛木	<i>Cratogeomys cochinchinense</i> (Lour.) Bl.	3.6	51.06	50.34	48.03	50.47
黄杞	<i>Engelhardia roxburghiana</i> Wall.	2.8	53.07	48.67	50.71	46.53
黄桐	<i>Endospermum chinense</i> Benth.	2.7	49.84	53.85	41.48	53.65
黄叶树	<i>Xanthophyllum hainanense</i> Hu	1.7	51.24	51.03	51.17	53.51
黄樟	<i>Cinnamomum parthenoxylon</i> (Jack) Meisn.	1.7	53.8	50.52	53.98	47.87
喙果皂帽花	<i>Dasymaschalon rostratum</i> Merr. & Chun	3.1	49.77	51.95	49.38	48.03
鸡毛松	<i>Dacrydium imbricatum</i> (Bl.) de Laub. var. <i>patulus</i> de Laub.	2.5	53.13	56.04	48.6	53.39
假苹婆	<i>Sterculia lanceolata</i> Cav.	3.0	50.76	47.9	45.82	47.96
剑叶灰木	<i>Symplocos lancifolia</i> Sieb. & Zucc.	1.5	49.91	48.45	61.34	48.62
金莲木	<i>Ochna integerrima</i> (Lour.) Merr.	3.0	52.26	45.35	54.02	50.63
九节	<i>Psychotria asaitica</i> L.	1.5	50.18	52.31	50.63	51.01
郎伞木	<i>Ardisia hanceana</i> Mez	2.5	47.5	50.97	49.3	47.91
雷公栎	<i>Castanopsis hui</i> (Chun) Chun ex Y. C. Hsu & H. W. Jen	8.0	50.79	53.13	50.05	48.39
离瓣木樨	<i>Osmanthus didymopetalus</i> P. S. Green	3.5	52.89	45.78	55.59	52.55
黎蒴	<i>Castanopsis fissa</i> (Champ. ex Benth.) Rehd. & E. H. Wils.	16.4	49.64	53.76	51.77	50.91
荔枝叶红豆	<i>Ormosia semicastrata</i> Hance f. <i>litchiifolia</i> How	2.2	49.92	52.75	55.88	53.35
两广梭罗	<i>Reevesia thasodea</i> Lindl.	3.6	50.56	51.53	49.71	58.1
两叶黄杞	<i>Engelhardia unijuga</i> Chun ex P. Y. Chen	7.1	52.04	49.28	54.94	50.22
亮叶猴耳环	<i>Archidendron lucidum</i> (Benth.) Nielsen	2.1	49.71	45.15	50.6	53.78
亮叶栎	<i>Cyclobalanopsis phanera</i> (Chun) Y. C. Hsu & H. W. Jen	4.0	52.44	52.41	49.53	52.29
岭南山竹子	<i>Calophyllum oblongifolia</i> Champ. ex Benth.	1.6	48.99	49.06	48.05	48.08
陆均松	<i>Dacrydium pectinatum</i> de Laub.	4.2	54.52	54.9	53.46	51.38
卵叶新木姜	<i>Neolitsea ovatifolia</i> Y. C. Yang & P. H. Huang	2.1	51.93	51.47	45.73	52.99
卵叶樟	<i>Cinnamomum rigidissimum</i> H. T. Chang	4.1	53.95	55.04	52.15	50.84
轮叶戟	<i>Lasiococca comberi</i> Haines var. <i>pseudoverticillata</i> (Merr.) H. S. Kiu	3.7	47.37	49.1	52.2	50.47
买麻藤	<i>Gnetum montanum</i> Mark.	2.5	50.39	50.05	50.06	50.05
毛冬青	<i>Ilex pubescens</i> Hook. & Arn.	3.1	45.51	48.65	56.56	51.91
毛萼乌口树	<i>Tarennia lancilimba</i> W. C. Chen	2.0	57.5	50.15	52.1	47.63
毛萼紫薇	<i>Lagerstroemia balansae</i> Koehne	3.3	50.61	48.79	48.13	48.42
毛果桐	<i>Lithocarpus pseudovestitus</i> A. Camus	1.7	48.27	47.15	50.86	45.2
毛荔枝	<i>Nephelium topengii</i> (Merr.) H. S. Lo	5.6	48.85	51.72	51.54	50.75
米花木	<i>Decaspermum montanum</i> Ridl.	2.1	60.2	49.44	52.18	49.97
母生	<i>Homalium hainanense</i> Gagnep.	10.0	53.12	52.39	49.88	51.66
木胆	<i>Platea parvifolia</i> Merr. & Chun	14.5	50.56	50.23	52.64	50.36
木荷	<i>Schima superba</i> Gardn. & Champ.	2.2	47.83	50.37	49.68	50.04
木棉	<i>Bombax ceiba</i> L.	8.3	46.72	45.98	47.98	42.84
拟赤杨	<i>Alniphyllum fortunei</i> (Hemsl.) Makino	3.0	55.45	48.11	50.08	49.91
盘壳栎	<i>Castanopsis patelliformis</i> (Chun) Y. C. Hsu & H. W. Jen	45.3	52.92	51.57	54.37	49.54
平滑琼楠	<i>Beilschmiedia laevis</i> C. K. Allen	1.7	48.44	46.32	48.16	52.52
秦氏桂	<i>Cryptocarya chingii</i> W. C. Cheng	2.5	46.31	51.87	52.81	49.5
青梅	<i>Vatica mangachapoi</i> Blanco	2.6	50.27	49.88	52.32	51.33

续附表1

中文名	拉丁名	胸径/cm	碳含量(%)			
			干	根	叶	枝
青皮	<i>Vatica mangachapoi</i> Blanco.	49.6	53.13	56.07	56.68	57.75
青皮木	<i>Schoepfia jasminodora</i> Sieb. et Zucc.	2.5	53	46.01	45.48	50.16
鹊肾	<i>Streblus asper</i> Lour.	6.0	45	45.21	41.23	46.65
绒毛山胡椒	<i>Lindera nacusua</i> (D. Don) Merr.	4.0	47.11	54.12	55.64	52.58
三叉苦	<i>Melicope pteleifolia</i> (Champ. ex Benth) T. G. Hart.	2.0	51.9	50.38	43.72	53.56
三角瓣花	<i>Prismatomeris tetrandra</i> (Roxb) K. & Schum	1.6	53.6	51.06	45.2	52.05
三脉木	<i>Rhodamnia dumetorum</i> var. <i>hainanensis</i> Merr. & L. M. Perry	4.5	50.71	54.08	57.31	53
山苍子	<i>Litsea cubeba</i> (Lour.) Pers.	1.5	48.38	50.45	50.83	51.05
山黄麻	<i>Trema orientalis</i> (L.) Bl.	3.0	47.84	51.22	45.46	48.54
山月桂	<i>Olea tsoongii</i> (Merr.) P. S. Green	5.3	51.59	52.97	49.92	51.06
水锦	<i>Wendlandia uvariifolia</i> Hance	1.8	52.05	53.64	54.08	51.64
水石梓	<i>Sarcosperma laurinum</i> (Benth.) Hook. f.	5.8	50.04	47.85	50.43	48.03
台湾枇杷	<i>Eriobotrya deflexa</i> (Hemsl.) Nakai	1.5	47.12	51.81	46.45	49.64
台湾榕	<i>Ficus formosana</i> Maxim.	1.6	48.66	50.32	49.99	51.23
桃金娘	<i>Rhodomatus tomentosa</i> (Art.) Hassk.	3.0	51.45	48.73	50.88	52.45
网脉琼楠	<i>Beilschmiedia tsangii</i> Merr.	3.0	54.9	50	54.24	51.42
乌才	<i>Diospaos eriantha</i> Champ. ex Benth.	3.5	40.65	45.38	56.62	51.27
乌榄	<i>Canarium pimela</i> K. D. Koenig	1.7	50.94	49.96	43.22	48.04
五裂木	<i>Pentaphylax euryoides</i> Gardn. & Champ.	1.8	53.27	51.63	52.74	49.7
西南桦	<i>Betula alnoides</i> Buch.-Ham.	4.2	49.3	47.61	54.48	47.41
细基丸	<i>Polyalthia cerasoides</i> (Roxb.) Benth. & Hook. f. ex Bedd.	5.4	53.38	46.11	50.49	47.97
细轴尧花	<i>Wikstroemia nutans</i> Champ. ex Benth.	3.7	52.52	51.96	49.96	48.44
狭叶泡花树	<i>Meliosma angustifolia</i> Merr.	1.7	47.09	47.28	41.78	52.53
肖蒲桃	<i>Syzygium acuminatissimum</i> (Bl.) Candolle	6.8	52.66	48.81	49.39	49.66
小叶胭脂	<i>Artocarpus staacifolius</i> Pierre	2.8	56	50.71	46.04	48.04
斜基算盘子	<i>Glochidion coccineum</i> (Buch.-Hamil.) Müell.-Arg.	1.7	52.31	49.49	49.02	47.77
锈毛杜英	<i>Elaeocarpus howii</i> Merr. & Chun	3.8	49.08	50.57	52	48.69
鸭脚木	<i>Schefflera heptaphylla</i> (L.) Frod.	2.4	52.06	51.11	50.82	48.67
羊舌树	<i>Symplocos glauca</i> (Thunb.) Koidz.	1.5	52.05	55.43	48.88	52.12
野漆树	<i>Toxicodendron sylvestris</i> (Sieb. & Zucc.)	1.8	47.23	54.09	49.58	50.38
硬叶灰木	<i>Symplocos pseudobarberina</i> Gontsch.	3.0	48.26	51.12	37.87	45.78
油丹	<i>Alseodaphne rugosa</i> Merr. & Chun	13.0	54.66	49.02	56.69	52.76
油楠	<i>Sindora glabra</i> Merr.	7.2	48.12	53.55	54.08	45.84
越南白椎	<i>Castanopsis tonkinensis</i> Seem.	14.0	48.44	50.08	48.22	51.27
长柄杜英	<i>Elaeocarpus petiolatus</i> (Jack) Wall. ex Steud.	2.5	49.76	48.94	51.22	49.97
长柄山龙眼	<i>Helicia longipetiolata</i> Merr. & Chun	3.1	49.08	48.47	51.73	49.76
长柄梭椶	<i>Reevesia longipetiolata</i> Merr. et Chun	3.5	52.86	52.37	53.53	52.92
长花厚壳树	<i>Ehretia longiflora</i> Champ. ex Benth.	3.5	49.99	48.37	53.36	48.85
长眉红豆	<i>Ormosia balansae</i> Drake	3.0	49.97	50.22	54.8	46.41
长叶木兰	<i>Magnolia paenetaula</i> Dandy	2.1	51.37	49.78	45.29	48.69
长柱山丹	<i>Duperrea pavettaefolia</i> (Kurz) Pitard	1.6	54.28	50.96	50.02	52.32
鸢尾麻	<i>Kleinhovia hospita</i> L.	15.6	50.61	47.85	48.19	45.79
枝花李榄	<i>Chionanthus ramiflorus</i> Roxb.	1.5	50.37	48.5	53.39	54.24
中华厚壳桂	<i>Cryptocarya chinensis</i> (Hance) Hemsl.	25.0	55.84	54.28	53.58	50.07
重阳木	<i>Bischoffia polycarpa</i> (H. Léveillé) Airy Shaw	4.1	47.13	48.18	47.47	45.74
竹节树	<i>Carallia brachiata</i> (Lour.) Merr.	2.5	51.44	51.63	50.3	51.05
竹叶栎	<i>Castanopsis neglecta</i> Schott.	2.8	52.04	52.2	48.66	50.9
竹叶松	<i>Podocarpus neriifolius</i> D. Don	5.1	54.62	48.77	54.03	53.9
子京	<i>Madhuca hainanensis</i> Chun & How	4.4	50.15	53.63	52.23	50.57
子凌蒲桃	<i>Syzygium championii</i> (Benth.) Merr & L. M. Perry	4.5	49.87	48.63	51.83	48.13