

鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统 碳素积累和分配特征

方运霆 莫江明* 黄忠良 欧阳学军

(中国科学院华南植物研究所鼎湖山树木园, 广东 肇庆 526070)

摘要: 选取鼎湖山保护区 3 个马尾松(*Pinus massoniana*)、荷木(*Schima superba*)针阔混交林样地, 研究其生态系统的碳素积累和分配特征。结果表明, 鼎湖山马尾松、荷木混交林乔木层生物量(t hm^{-2})为: 174.41–270.11, 平均 227.36, 且均以马尾松的生物量居多(占 54.9%–84.4%)。林下层植物生物量和地表现存凋落物量(t hm^{-2})分别为 7.41–28.28 和 7.06–11.56, 平均 14.41 和 9.03。三个混交林生态系统总碳贮量(t hm^{-2})分别为 146.35、215.30 和 205.79, 平均为 189.15, 其中植被层碳贮量贡献率最大, 依次占 62.9%、61.9%和 69.9%, 平均 65.0%; 土壤层贡献率次之, 依次占 34.3%、35.5%和 28.5%, 平均 32.8%; 而地表现存凋落物层的贡献最小, 仅占 2.8%、2.6%和 1.6%, 平均为 2.3%。此外, 本文还对该生态系统植被碳吸存潜力进行了讨论。

关键词: 碳积累; 碳素分配; 马尾松、荷木混交林; 鼎湖山

中图分类号: S718.556

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)01-0047-06

Carbon Accumulation and Distribution in *Pinus massoniana* and *Schima superba* Mixed Forest Ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve

FANG Yun-ting MO Jiang-ming* HUANG Zhong-liang OUYANG Xue-jun

(Dinghushan Arboretum, South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing 526070, China)

Abstract: Carbon accumulation and distribution were studied in vegetation and soil for *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve. The biomass of trees in three plots ranged from 174.41 t hm^{-2} to 270.11 t hm^{-2} , with an average of 227.36 t hm^{-2} , which was contributed mainly by *Pinus massoniana* (54.9%–84.4%). The biomass of understory plants was 7.41–28.28 t hm^{-2} , with an averages of 14.41 t hm^{-2} . Standing stock of ground litter was 7.06–11.56 t hm^{-2} , with an average of 9.03 t hm^{-2} . Total carbon storage of the forest ecosystems ranged from 146.35 t hm^{-2} to 215.30 t hm^{-2} . Of total carbon, 61.9%–69.9% was distributed by vegetation component, 28.5%–35.5% by soil, only 1.6%–2.8% by standing ground litter layer. Potential carbon sequestration in forest vegetation is discussed.

Key words: Carbon distribution; Carbon storage; *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest; Dinghushan

近代, 由于石化燃料的大量使用和土地利用变化原因, 大气中的 CO_2 浓度不断增加。据报道, 仅在过去的 150 年间大气层中的 CO_2 浓度就增加了

31%^[1,2]。 CO_2 在大气层中的积累, 不仅改变了大气、海洋和陆地间碳循环的格局, 而且还引起全球变暖、降水格局改变和海平面上升等一系列问题。这些问题正威胁着全球生态环境和人类自身生存与发展, 因而引起国际社会的普遍关注^[1-4]。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 其维持的碳库占全球总碳库的 46.3%, 而森林植被部分维持的碳库又占全球植被碳库的 77.1%^[3]。在 1850–1998

收稿日期: 2002-01-21 接受日期: 2002-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(30270283); 广东省自然科学基金项目(021524); 中国科学院华南植物研究所所长基金; 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助。

参加野外工作的同志还有张佑昌、莫定升, 方晓明等, 谨致谢意。

* 通讯作者 Corresponding author

年间全球因土地利用变化而排放的 CO₂ 累积达 136 ± 55 Gt C (1 Gt=10¹² g) (约是石化燃料燃烧和水泥生产所排放的一半), 其中约 87% 来源于森林变化^[3,4]。因此, 森林生态系统与气候变化间的关系成为了当前全球变化, 尤其是全球碳循环研究的重点内容^[1-5]。

鉴于森林在陆地生态系统中的重要性, 早在七十年代末始, 环境问题科学委员会 (SCOPE) 在研究全球尺度和区域碳循环时, 就把森林生态系统作为重要组成部分进行评述。到 20 世纪末, 生态学家已对全球森林生态系统植被和土壤的碳贮量有了一定的了解^[2-5]。然而, 由于碳循环的复杂性, 森林碳库和碳汇的大小及其分布在当前学术界还存在很大的不确定性和争议^[3,6]。与国外相比, 我国森林碳循环的研究起步较晚, 仅近年来, 方精云等^[8,9]和王效科等^[10]分别在我国森林生态系统生物量 and 生产力研究基础上, 结合森林资源调查资料, 推算了我国 50 年来森林碳库及其动态变化。这些结果为评价北半球中高纬度地区碳库和我国森林碳汇功能做出了重大贡献。然而, 对于区域性尤其是南亚热带森林碳循环的研究仍然十分薄弱。我们曾报道过南亚热带马尾松林和常绿阔叶林生态系统碳贮量及其分配格局情况^[12,13], 本文作为研究南亚热带森林生态系统碳循环的一部分, 继续报道南亚热带马尾松、荷木混交林生态系统的碳素贮量和分配状况及探讨其植被碳吸存潜力, 为进一步了解南亚热带森林生态系统碳循环特征和减少我国森林碳库和碳汇评价中的不确定性提供基础。

1 样地概况

本研究在鼎湖山国家级自然保护区进行。保护区位于广东省中部, 东经 112°33', 北纬 23°10'。气候具有明显的季风性, 年平均降雨量为 1 956 mm, 其中 75% 分布在 3 月到 8 月间, 而 12 月到次年 2 月

仅占 6%。年平均相对湿度为 81.5%。年平均温度为 20.9°C, 最冷月 (1 月) 和最热月 (7 月) 的平均温度分别为 12.0°C 和 28.1°C^[14]。

在鼎湖山保护区的缓冲带选取 3 个有代表性的混交林样地 (编号为: 样地 1、2、3), 依次在农校背后、望鹤亭和早坑山脊处。3 个样地的海拔高度和土壤类型 (赤红壤) 相同。森林起源于 30 (样地 3) 和 40 年代中期 (样地 1、2) 营造的马尾松林, 因得到良好保护, 由荷木 (*Schima superba*)、锥栗 (*Castanopsis fissa*) 和黎蒴 (*C. chinensis*) 等阔叶树种逐渐入侵而成^[15]。混交林群落结构较为简单, 乔木 I 层为马尾松, II 层主要种为荷木, 更新层及灌木层为荷木、变叶榕 (*Ficus variolosa*)、三叉苦 (*Evodia lepta*)、豺皮樟 (*Litsea rotundiflora*) 和桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*) 等。

2 研究方法

植物生物量和地表现存凋落物量 在 3 个样地里各设置 8 个 10 m×10 m 的样方, 调查各样方乔木层主要树种的胸径和树高, 得到乔木层组成结构 (表 1)。根据荷木和马尾松相对生长关系式计算根、叶、干、枝和皮生物量, 其中马尾松根生物量按占总生物量的 17.01% 计算^[16]。对于乔木层的其它树种, 则全收获 8 株植株, 建立相对生长关系式: $W = a(D)^b$, 其中 a、b 为参数, D 为胸径, 再依据其关系式计算其各器官的生物量。

$$W_{\text{叶}} = 0.0385 (D)^{2.0739} \quad r=0.97$$

$$W_{\text{枝}} = 0.0254 (D)^{2.5870} \quad r=0.97$$

$$W_{\text{干}} = 0.0608 (D)^{2.5585} \quad r=0.97$$

$$W_{\text{皮}} = 0.0442 (D)^{1.8114} \quad r=0.97$$

$$W_{\text{根}} = 0.0435 (D)^{2.3218} \quad r=0.97$$

$$W_{\text{总}} = 0.2047 (D)^{2.3533} \quad r=0.97$$

在各样地设置 4 个 1 m×1 m 小样方, 全收获林

表 1 鼎湖山马尾松针阔混交林乔木层群落结构一些参数

Table 1 Parameters of structure in tree layer of mixed forest in Dinghushan

样地 Plots	树种 Species	年龄 Age (a)	胸径 DBH (cm)			树高 Height (m)			乔木密度 Density (individuals hm ⁻²)
			范围 Range	平均值 Mean	标准误差 SE	范围 Range	平均值 Mean	标准误差 SE	平均值 Mean
1	马尾松(P)	15-50	6.7-42.0	24.5	2.48	4.5-16.0	9.0	0.81	213
	荷木(S)	—	1-29.6	5.8	0.59	2.2-10.5	4.6	0.22	975
2	马尾松(P)	9-70	3.5-39.9	21.8	2.00	3.5-20.0	11.1	0.90	282
	荷木(S)	—	1.9-42.0	6.1	0.71	2.5-12.0	4.7	0.20	925
3	马尾松(P)	30-70	17.0-37.1	28.3	2.09	11.5-19.5	14.4	0.93	125
	荷木(S)	—	2.2-24.8	8.7	0.76	2.6-16.5	7.0	0.47	725

P = *Pinus massoniana*; S = *Schima superba*

下层植物和现存凋落物。林下植物层包括林下灌木和草本层植物,地上和地下两部分。现存凋落物分为未分解和半分解两层。

植物碳素含量 作者曾采用重铬酸钾外加热法对鼎湖山保护区季风常绿阔叶林和马尾松林两个林分的主要种类植物、地表凋落物的碳素含量进行了测定^[17]。因混交林里绝大部分植物种均在以上两个林分里出现,本研究混交林植物体和凋落物层的碳素含量取两个林分的平均值。因此,可得混交林碳素含量(%)依次为:乔木层植物,叶 44.4、枝 48.7、干 52.3、皮 47.6 和根 51.4,总平均 48.9;林下层植物地上部分 43.7、地下部分 40.9;地表现存凋落物层未分解 48.7,半分解 46.3。

土壤容重和土壤碳素含量 土壤环刀法测定土壤容重^[18]。2001年5月,先在每个样地8个乔木样方里随机选择5个采集点,根据土层深度,挖0-100 cm深的剖面,然后在每个土壤剖面按4个层次(0-10、10-20、20-40和>40 cm)采集土壤样品,每层3个重复,分别测定其土壤容重。按4个层次分别采集各土壤剖面的土壤样品,样品风干、磨粉。土壤有机碳含量测定方法采用重铬酸钾外加热法。土壤碳含量指土壤的有机碳含量(颗粒直径<2 mm),以105℃为基准^[18]。

生态系统碳贮量计算 植物和地表现存凋落物碳贮量以其生物量或现存量乘以其碳素含量计算得到,土壤碳贮量则是土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度3者的乘值。

3 结果和分析

3.1 植物生物量和地表现存凋落物量

样地1-3因林分密度和年龄不同(表1),其乔木层生物量($t\text{ hm}^{-2}$)差异很大,依次为174.41、237.56

和270.11,最高是最低的1.55倍(表2),表明了混交林因处在森林演替的中期,各样地间的乔木生物量差异较大。在样地1和样地2的乔木层生物量中,马尾松的贡献率最大,依次为81.8%和84.4%;荷木的贡献率次之,依次为17.7%和14.5%;其它树种贡献很小,仅占0.4%和1.1%。在样地3乔木层生物量中,马尾松的贡献率仍然最大(54.9%),但其它树种的贡献率明显增大,达25.7%。可见,3个样地的生物量均以马尾松为主,但样地不同其比例也不同。

然而,3个样地乔木层叶、枝、干、皮和根各器官所占总生物量的比例基本相似,其平均值(%)依次为:3.2、18.7、54.3、4.4和20.1,其中地上部分枝和干的比例较大(两者之和达73.0%)。

3个样地林下层植物生物量和地表现存凋落物量($t\text{ hm}^{-2}$)平均为14.41和9.03,其中样地2明显高于样地1和3。对于林下层植物生物量,样地2是样地1和3的3.8和3.7倍,对于地表现存凋落物量,则是样地1和3的1.4和1.6倍(表3)。可见,对于本研究的3个样地,其林下层植物生物量和地表现存凋落物量并没有出现随乔木层生物量增大而增大的趋势,但是林下层植物生物量高的样地其地表现存凋落物量也高(表2、3)。

3.2 土壤容重和土壤碳素含量

3个样地土壤容重基本上随土层深度增加而增加,0-10、10-20、20-40和>40 cm土层平均值依次为($g\text{ cm}^{-3}$):1.070、1.274、1.317和1.277,总平均为1.232。同一土层,各样地间土壤容重无明显差异。各土层土壤碳素含量与土壤容重恰好相反,随深度增加而显著减少(图1),在土层0-10 cm与乔木层的生物量一样,表现为:样地1<样地2<样地3,而其

表2 鼎湖山马尾松针阔混交林乔木层生物量($t\text{ hm}^{-2}$)
Table 2 Biomass ($t\text{ hm}^{-2}$) of trees in mixed forest in Dinghushan

样地 Plots	树种 Species	叶 Leaf	枝 Branch	干 Stem	皮 Bark	根 Root	合计 Total
1	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	3.35	26.84	81.94	6.29	24.26	142.68
	荷木 <i>Schima superba</i>	1.51	4.83	12.71	1.63	10.27	30.95
	其它树种 Other trees	0.10	0.13	0.30	0.08	0.16	0.78
	小计 Subtotal	4.96	31.80	94.95	8.00	34.69	174.41
2	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	4.68	38.29	115.07	8.32	34.07	200.44
	荷木 <i>Schima superba</i>	1.54	5.13	14.75	1.63	11.40	34.46
	其它树种 Other trees	0.29	0.53	1.19	0.21	0.53	2.66
	小计 Subtotal	6.51	43.95	131.01	10.16	46.00	237.56
3	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	3.43	28.92	85.27	5.36	25.19	148.18
	荷木 <i>Schima superba</i>	2.16	7.70	22.41	2.85	17.36	52.48
	其它树种 Other trees	5.21	15.86	36.11	3.88	14.69	69.45
	小计 Subtotal	10.80	52.48	143.79	12.09	57.24	270.11

表 3 鼎湖山马尾松混交林林下层植物生物量和地表现存凋落物量 (t hm^{-2})

Table 3 Biomass of understory plants and standing stock of ground litter (t hm^{-2}) in mixed forest in Dinghushan

	样地 Plot		
	1	2	3
林下植物层 Understory plants			
地上部分 Aboveground	4.70(0.48)	17.93(3.96)	4.78(0.72)
地下部分 Underground	2.71(0.28)	10.35(2.28)	2.76(0.41)
小计 Subtotal	7.41(0.76)	28.28(6.24)	7.54(1.13)
地表现存凋落物 Ground litters			
未分解 Fresh	4.11(1.36)	6.42(1.07)	4.48(0.42)
半分解 Decomposing	4.36(2.08)	5.14(0.63)	2.59(0.74)
小计 Subtotal	8.47(1.68)	11.56(0.63)	7.06(0.57)

括号内为标准误差 Values in parentheses are standard errors.

它土层均表现为: 样地 1 < 样地 3 < 样地 2。

3.3 生态系统碳贮量及其在各组分中的分配

3 个样地植被层碳贮量 (t hm^{-2}) 分别为: 92.07、133.27 和 143.78 (表 4), 其中乔木层占的比例分别为: 96.6%、90.9%和 97.8%。可见, 植被层碳贮量主要取决于乔木层的生物量。地表现存凋落物碳贮量较小, 为 3.40–4.02 t hm^{-2} , 仅是植被层的 2.4%–4.4%。

表 4 鼎湖山混交林生态系统各组分碳贮量

Table 4 Carbon storage in each component of Dinghushan mixed forest ecosystem

组分 Components	碳贮量 Carbon storage (t hm^{-2})			
	Plot 1	Plot 2	Plot 3	平均 Mean
乔木层 Trees				
叶 Leaves	2.13	2.79	4.63	3.18
枝 Branches	15.48	21.40	25.55	20.81
干 Woods	49.66	68.52	75.20	64.46
皮 Barks	3.80	4.83	5.74	4.79
根 Roots	17.83	23.65	29.42	23.63
小计 Subtotal	88.90	121.19	140.56	116.88
林下植物层 Understory plants				
地上部分 Aboveground	2.06	7.85	2.09	4.00
地下部分 Underground	1.11	4.23	1.13	2.16
小计 Subtotal	3.17	12.08	3.22	6.16
植被层合计 Total for vegetation	92.07	133.27	143.78	123.04
地表现存凋落物 Standing litter				
未分解 Fresh	2.04	3.19	2.23	2.49
半分解 Decomposing	1.98	2.33	1.17	1.83
小计 Subtotal	4.02	5.52	3.40	4.31
土壤层 Soil depth				
0–10 cm	15.59	22.36	24.02	20.66
10–20 cm	6.23	14.92	11.24	10.80
20–40 cm	9.32	16.70	14.94	13.65
>40 cm	19.12	22.53	8.41	16.69
土壤层合计 Total for soil	50.26	76.51	58.61	61.79
总计 Total	146.35	215.30	205.79	189.15

样地 1–3 的土壤平均厚度分别为: 76、54、47 cm. Average thickness of soil in plots 1, 2 and 3 are 76, 54 and 47 cm, respectively.

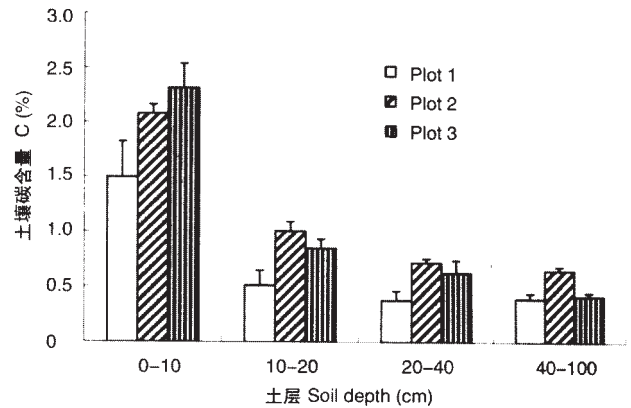


图 1 鼎湖山混交林土壤碳素含量

Fig. 1 Soil carbon concentration in mixed forest in Dinghushan

样地 1、2 和 3 土壤碳贮量(t hm^{-2})分别为: 50.26、76.51 和 58.61, 没有出现随乔木层生物量增大而增大的趋势(表 2、4)。3 个样地土壤碳贮量中, 0–10 cm 占 31.0%、29.2%和 41.1%, 0–20 cm 占 43.4%、48.7%和 60.2%。可见, 土壤表层的碳贮量贡献较大, 因此任何引起水土流失的活动均容易导致土壤碳损失, 同时也反映了南亚热带地区森林土壤的脆弱性。

3个样地生态系统总碳贮量($t\text{ hm}^{-2}$)为:146.35、215.30和205.79,平均为189.15(表4),其中植被层碳贮量贡献率最大,分别为62.9%、61.9%和69.9%,平均65.0%,土壤碳贮量贡献率次之,依次为34.3%、35.5%和28.5%,平均32.8%,而林下层植物的贡献最小,仅为2.8%、2.6%和1.6%,平均为2.3%。可见,鼎湖山3个马尾松、荷木混交林生态系统碳贮量在植被和土壤的分配格局十分相似,其中植被占了绝大部分,表明了保护好植被在维持陆地生态系统的碳贮量有重要的意义。

4 讨论

4.1 马尾松、荷木混交林生态系统碳贮量的分配格局

鼎湖山现有马尾松、荷木针阔混交林植被碳贮量在92.07–143.78 $t\text{ hm}^{-2}$ 间,平均为123.04 $t\text{ hm}^{-2}$ 。该平均值高于我国针叶混交林和针阔混交林成熟林的平均值(分别为98.87和86.85 $t\text{ hm}^{-2}$)^[10],也大于我国针叶、针阔混交林植被碳贮量的平均水平(64.76 $t\text{ hm}^{-2}$)^[19]。可见,鼎湖山马尾松、荷木针阔混交林植被碳贮量较高,可能是因为:1) 南亚热带地区水热充沛,植物生长速度快;2) 在建保护区后植被受到良好保护,植被生物量较高。

鼎湖山3个马尾松、荷木混交林生态系统中,植被与土壤碳贮量的比值依次为:1.8、1.7和2.5,平均为2.0,与鼎湖山马尾松林和季风常绿阔叶林的比值相近(分别为2.2、2.1)^[12,13],与尖峰岭热带山地雨林原始林的比值2.25^[20]接近。该比值大大高于全球低纬度地区森林的平均水平0.98^[5],也明显高于我国针叶、针阔混交林的平均水平0.36^[19],表明鼎湖山混交林生态系统碳贮量中植被占的比重较大,这可能与鼎湖山保护区森林土壤因土层较浅(土壤平均厚度为47–76 cm,表4)碳贮量低有关。此外,混交林土壤碳贮量中,表层土壤(0–20 cm)的贡献达43.4%–60.2%。因此,如果现有的混交林被转变耕地等其它生态系统类型,植被和表层土壤维持的那部分的碳很容易被释放到大气中。本研究结果一定程度上说明保护好森林植被对于维持大气CO₂浓度稳定有着重要的意义。

4.2 马尾松、荷木混交林植被碳吸存潜力

除大力减少石化燃料和工业CO₂源排放之外,人们还利用陆地生态系统植被和土壤积累有机碳来增加陆地生态系统碳贮量以达到减缓全球变暖速度的目的^[2–5]。国外对通过森林资源管理和造林等行为带来的碳吸收探讨较多^[2–9],而我国在这方面研

究报道较少^[10,20,21],且大部分集中在人工纯林和原生性天然林上^[20,21],混交林因其多样性和不稳定性,对其研究报道很少^[22]。目前,在我国南方存在大面积的针阔混交林,它多起源于人工针叶林,是向阔叶林自然演替的必不可少的重要阶段,在森林组成中也占非常大的比重^[10,15,23]。封山育林,随着林分的发育生长、演替,使碳得到不断的积累,这种碳吸存方式在我国减缓碳排放的策略中有重大现实意义^[6,8,10]。在我国,大量人工林经营不善,天然林大面积遭到严重人为破坏。如果能够很好地保护现有的森林,让其自然生长,中国森林生态系统将是大气中CO₂的一个重要的碳汇^[6,8,10,12]。本研究中,鼎湖山3个马尾松林、荷木混交林植被碳贮量最高达到143.78 $t\text{ hm}^{-2}$ (表4),是与其林龄相当但受到一定人为干扰的马尾松林(74.91 $t\text{ hm}^{-2}$)^[12]的1.9倍,与具有400年历史季风常绿阔叶林的(154.29 $t\text{ hm}^{-2}$)^[13]接近。该结果表明,鼎湖山混交林有着比较高的碳贮存能力。马尾松是我国松属树种中分布最广的一种,也是我国亚热带东部湿润地区典型的针叶乡土树种,分布于广东、广西等14省(区)。目前,马尾松林的面积居全国针叶林的首位^[12,23]。然而,由于多种原因,如疏于对松林的抚育管理,或因农村燃料的缺乏而过度的修枝和割去林下层植物等人为干扰活动,碳贮量非常低^[10,12,23]。因此,如果把现有马尾松林保护起来,其植被碳贮量将达到混交林的水平,那么,马尾松林植被碳贮量将翻一番,其碳吸存能力将会有很好的前景。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2001: the Science of Climate Change. Summary for Policymakers, a Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva, Switzerland, 2001. 1–98. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>
- [2] IPCC. Land Use, Land-use Change, and Forestry, Summary for Policymakers, a Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva, Switzerland, 2000. 1–20. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/srllucf-e.pdf>.
- [3] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate [J]. *Unasylva* 185, 1996, 47:3–10.
- [4] Dixon R K, Winjum J K, Schroeder P E. Conservation and sequestration of carbon [J]. *Global Envir Change*, 1993, 3(2):159–173.
- [5] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 1994, 5:190.
- [6] Fang Y T (方运霆), Xiao J X (肖金香), Mo J M (莫江明). The role of forestry activities in carbon sequestration and mitigation of global warming [J]. *Acta Agri Univ Jiangxiensis* (江西农业大学

- 学报), 2002, 24(6):796–801. (in Chinese)
- [7] Fang J Y (方精云), Liu G H (刘国华), Xu S L (徐嵩龄). Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 1996, 16(5):497–508. (in Chinese)
- [8] Fang J Y (方精云), Chen A P (陈安平). Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Acta Bot Sin (植物学报)*, 2001, 43(9):967–973. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] Wang X K (王效科), Feng Z W (冯宗炜). The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China [J]. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 2000, 19(4):72–74. (in Chinese)
- [11] Huang Y (黄耀). Consideration on carbon cycling in China terrestrial ecosystem [J]. *Forum of Young Scholar in 21st Century (21 世纪青年学者论坛)*, 2001, 23(1):66–68. (in Chinese)
- [12] Fang Y T (方运霆), Mo J M (莫江明). Study on carbon distribution and storage of a pine forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Guihaia (广西植物)*, 2002, 22(4):116–121. (in Chinese)
- [13] Mo J M (莫江明), Fan Y T (方运霆), Peng S L (彭少麟), et al. Carbon accumulation and allocation of lower subtropical evergreen broadleaf forests in a MAB Reserve of China [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2003, (in Press). (in Chinese)
- [14] Kong G H, Liang C, Wu H, et al. Dinghushan Biosphere Reserve, Ecological Research History and Perspective [M]. New York: Science Press, 1993. 1–38.
- [15] Zhou H C (周厚诚), Li M J (李明佳), Zhou Y R (周远瑞), et al. The vegetation map of Dinghushan Biosphere Reserve with reference to its illustration [A]. In: *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 4 [C]*. Haikou: Hainan People's Press, 1986. 43–52. (in Chinese)
- [16] Peng S L (彭少麟). Community Dynamics in Lower Subtropical Forests [M]. Beijing: Science Press, 1996. 204. (in Chinese)
- [17] Fang Y T (方运霆), Mo J M (莫江明), Zhang D Q (张德强), et al. Comparison of plant carbon concentration between pine forest and monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan [A]. In: *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 9 [C]*. 2002. 64–72. (in Chinese)
- [18] Sun H L (孙鸿烈), Liu G S (刘光崧). Standard Methods of Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network I. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. 2nd ed. Beijing: China Criterions Press. 1995. 31–32. (in Chinese)
- [19] Zhou Y R (周玉荣), Yu Z L (于振良), Zhao S D (赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytoecol Sin (植物生态学报)*, 2000, 24(5):518–522. (in Chinese)
- [20] Wu Z M (吴仲民), Li Y D (李意德), Zeng Q B (曾庆波), et al. Carbon pool of tropical mountain rain forest in Jianfengling and effect of clear cutting on it [J]. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 1998, 9(4):341–344. (in Chinese)
- [21] Chen C Y (陈楚莹), Liao L P (廖利平), Wang S L (汪思龙), et al. Research on carbon allocation and storage in Chinese fir plantation ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 2000, 11(Supp.):175–178. (in Chinese)
- [22] Yan X D (延晓冬), Zhao S D (赵士洞). Simulation model of carbon storage dynamics in temperate broadleaved-coniferous mixed forest ecosystem: I. Dynamics of carbon storage in tree layer [J]. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 1995, 14(2):6–12. (in Chinese)
- [23] Mo J M, Brown S, Leant M T, et al. Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China [J]. *Biotropica*, 1995, 27(3):290–304.