

广东省森林植被恢复下的碳储量动态

周传艳^{1,2} 周国逸¹ 王春林^{1,3} 王旭¹

(1 中国科学院华南植物园鼎湖山森林生态系统定位研究站 2 贵州省喀斯特资源环境与发展研究中心

3 广东省气候与农业气象中心)

摘要:该研究采用材积源生物量法及广东省 1994—2003 年森林资源档案数据,量化 10 年间森林植被恢复过程中碳储量动态变化。其中 OBPA 是指疏林、竹林、经济林和四旁林。研究结果如下:1994—2003 年广东省森林植被共固定碳 41.67 Tg,碳密度增加了 1.58 Mg/hm²;林下层和凋落物层碳储量占总碳库的 38%~44%,凋落物层碳储量略大于林下层;不同类型森林的碳储量排列如下:针叶林>阔叶林>OBPA>针阔叶混交林;马尾松林碳储量在 11 种林型中最大,南洋楹林最小;10 年中近熟林、成熟林、过熟林碳储量皆有增长,幼龄林碳储量大幅度减少,中龄林碳储量小幅度波动,其碳储量始终高于其他 4 个龄级;阔叶林固碳率大于针叶林和针阔叶混交林,10 年间的波动范围是 0.19~1.36 Mg/(hm²·a)。

关键词:碳储量,碳密度,森林恢复

中图分类号:S718.55+4.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2007)02-0060-06

ZHOU Chuan-yan^{1,2}; ZHOU Guo-yi¹; WANG Chun-lin^{1,3}; WANG Xu¹. **Carbon storage dynamics under the forest restoration in Guangdong Province, China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(2) 60-65 [Ch, 29 ref.]

1 Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, P. R. China;

2 Karst Resources Environment and Development Research Center of Guizhou Province, Guiyang, 550001, P. R. China;

3 Guangdong Climate and Agrometeorology Center, Guangzhou, 510080, P. R. China.

The study was carried out using volume-derived method and forest resource inventory from 1994 to 2003 of Guangdong Province. The authors quantified the carbon accumulation of forest vegetation in the process of forest restoration during the 10 years. OBPA included open forest, bamboo forest, production forest and ambient trees in this paper. Results were as the followings: the whole forest vegetation had accumulated carbon 41.67 Tg during this period. Forest carbon density increased by 1.58 Mg/hm² at the same time. Carbon storage of litterfall and understory occupied 38%~44% of the total carbon pool. Carbon storage of litterfall was a little more than that of understory. The result of comparing four carbon pools is as followings: coniferous forests > broadleaved forests > OBPA > mixed forests. Carbon storage of *P. massoniana* forests was the biggest among the 11 forest types and *Albizia falcataria* (Linn.) Fosberg forest was the smallest. Carbon storage of maturescent forest, mature forest and post-mature forest increased but young forest diminished. Carbon storage of middle-aged forest had little changes and it was always the biggest among the five groups. Carbon accumulation rate of broadleaved forests was the highest among broadleaved forests, coniferous forests and

收稿日期:2005-12-20

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2002CB1115)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A3)、国家自然科学基金项目(30470306)。

第一作者:周传艳,博士,主要研究方向:生态系统生态学、森林生态系统碳循环及其与全球变化的关系。电话:0855-6824329 Email: chyzhou@scib.ac.cn 地址:550001 贵州省贵阳市陕西路 1 号贵州省喀斯特资源环境与发展研究中心。

责任作者:周国逸,博士生导师,首席研究员,主要研究方向:生态系统生态学、森林水文学、森林生态系统碳循环和全球变化。电话:020-37252708 Email: gyzhou@scib.ac.cn 地址:510650 广东省广州天河华南植物园。

mixed forests in Guangdong Province, with the rate ranging from 0.19 to 1.36 Mg/(hm²·a) during this period.

Key words carbon storage, carbon density, forest restoration

近年来,由于 CO₂ 在全球气候变化中举足轻重的地位,森林碳储量和碳通量的研究受到很大关注^[1].由于森林生态系统储存了陆地生态系统 2/3 的碳,其碳密度高于其他生态系统类型,所以在影响全球碳循环方面扮演着重要角色.通过光合和呼吸作用森林生态系统与大气交换大量 CO₂,且在森林的生长过程中能够固定大量碳^[2].许多研究者对全球、国家和地区森林植被碳库时间尺度上的变化都进行过估算^[3-7].中国^[6,8-12]的一些省份或地区^[13-15]的森林植物碳储量估算工作也揭示了森林地上部分碳库大小.广东省位于中国大陆南部,受亚热带季风气候影响,具有丰富的水热资源.20 世纪 80—90 年代在强劲发展的经济支持下广东省推行“5 年消灭荒山,10 年绿化广东”政策.通过大量造林和相应的管理措施,广东省森林覆盖率从 1979 年的 26.2% 增长到 1986 年的 30.0%,1998 年的 50.1% 和 2003 年的 57.1%.森林覆盖率比 1979 年增加了 2 倍多.然而在当前全球变化的背景下,关注森林恢复过程中碳储量的变化无论从理论还是实践上都具有重大意义.

森林资源评估长期以来被认为是制定森林政策和促进国家发展的必要工具.尤其是希望用森林碳信用抵消其排放量的国家和地区,必须定期对森林碳进行测量以便从森林碳市场价值中获益^[16].尽管《京都议定书》的实施会引起国家和地区间碳汇贸易中的争议,但是对碳进行监测,以实现碳信用却是每个国家和地区不可回避的责任.

本文的研究目的是:①估算 10 年植被恢复如何影响广东省森林植被的碳固定;②探讨包括了林下层和凋落物层的森林碳储量估算方法.

1 研究方法

1.1 研究地点

广东省位于中国大陆南部(109°40′~117°15′E, 25°30′~20°18′N).属亚热带季风气候,年均降水量为 1 366 mm,年平均气温 22℃.陆地总面积 180 000 km².其中包括山地(31.7%)、丘陵(28.5%)、台地(16.1%)和平原(23.7%).

1.2 森林资源档案数据及来源

本研究的数据为广东省林业局提供的森林资源档案数据.从 1994 年起,该数据以年为单位进行更新.这为短时间尺度监测森林资源动态变化提供了方便.森林面积和蓄积以及 5 个龄级(幼龄、中龄、近龄、成龄、过龄)等各项纪录均严格依照国家林业局

制定的标准进行^[17].

1.3 生物量估算

本研究中森林植物生物量的计算包括林业资源档案数据中 11 种森林类型以及 OBPA(open forest, bamboo forest, production forest and ambient trees.即疏林、竹林、经济林及四旁林(包括四旁树、散生木、枯倒木)).

1.3.1 森林乔木层生物量

大量森林乔木层实测生物量与蓄积量的关系研究证明不同的森林类型中二者均存在良好的回归关系^[6,18].本文采用已经建立的回归方程^[6,18],估算 11 种林型乔木层的生物量,其中黎蒴(*Castanopsis fissa*)为广东省本土树种,黎蒴林的结构类似常绿阔叶林,其生物量按阔叶树的公式计算;相思(*Acacia confuse*)、南洋楹(*Albizia falcataria*)为外来树种,这两种林型的结构与桉树人工林相似,生物量按桉树生物量公式计算;湿地松(*Pinus elliottii*)生物量按针叶混交林公式计算.

在计算各林型林下层和凋落物层生物量时,由于实测资料有限,我们根据现有的研究资料^[19-22],按照各林型的生态相似性把广东省 10 种林型的林下层和凋落物层生物量归并为 3 类来计算(表 1).另外,木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)人工林主要作用是防风固沙,分布于沿海滩涂,生境较特殊,林下只生长少量草本植物.我们对广东茂名典型的木麻黄人工林林下层和凋落物层生物量作了调查,结果为:林下层生物量 0.57 t/hm²,凋落物层生物量 1.50 t/hm²(表 2).

表 1 广东省 4 大类型森林林下层和凋落物层生物量

t·hm⁻²

TABLE 1 Biomass of understory and litterfall for the four forest types in Guangdong Province

森林类型	林下层生物量	凋落物层生物量	资料来源
阔叶林	2.15	8.74	[19-20]
针叶林	11.03	10.78	[21]
针阔叶混交林	14.41	9.03	[22]
木麻黄林	0.57	1.50	本研究

注:阔叶林包括桉树、黎蒴、相思、南洋楹和阔叶混交林;针叶林包括湿地松、马尾松、杉木和针叶混交林.

1.3.2 OBPA 生物量

本研究根据已有文献资料对疏林、竹林、经济林的生物量进行估算^[23-24].

另外,由于森林资源档案数据资料中未将四旁树、枯倒木、散生木的树种加以说明,只是分别记录

蓄积量,故本研究将四旁树、散生木和枯倒木之和算作四旁林,并且按照杂木林生物量公式估算^[6]。

1.4 碳储量和碳密度

森林植物碳储量为森林生物量乘以转换系数,本文采用目前国际上常用的转换系数 0.5(即每克干物质的碳含量)^[6]。森林植物碳密度即单位面积碳储量^[8]。

2 研究结果

2.1 森林植被总碳库的变化

从 1994—2003 年,广东省森林植被总碳库从 169.61 Tg 增加到 211.28 Tg,森林碳吸存率为 4.63 Tg/a。同时碳密度从 1994 年的 20.02 Mg/hm² 提高到 2003 年的 22.60 Mg/hm²。碳汇增长率为 0.29 Mg/(hm²·a)(表 2)。在此期间,森林面积从 8 47.390 万 hm² 增加到 9 34.664 万 hm²,平均每年增加 9.697 万 hm²。这些数据都表明广东省森林植被在 1994—2003 年间为碳汇。

表 2 广东省 1994—2003 年森林总面积、碳储量及碳密度
TABLE 2 Total forest area, carbon storage and carbon density of Guangdong Province during 1994—2003

年份	森林面积 积/万hm ²	森林植被 总碳库/Tg	森林碳密 度/(Mg·hm ⁻²)
1994	847.390	169.61	20.02
1995	899.860	180.86	20.10
1996	920.194	188.47	20.48
1997	920.789	191.00	20.74
1998	921.871	193.79	21.02
1999	926.562	196.99	21.26
2000	927.695	200.30	21.59
2001	930.162	203.99	21.93
2002	931.542	207.46	22.27
2003	934.664	211.28	22.60

2.2 4 个小碳库的变化

将广东省森林植被总碳库分为针叶林、阔叶林、针阔叶混交林和 OBPA 4 个小碳库并比较它们的大小。结果如图 1 所示,即:针叶林 > 阔叶林 > OBPA > 针阔叶混交林。10 年间针叶林碳库占总碳库的 50% 以上。在所有的针叶林中,以马尾松 (*P. massoniana*) 碳储量最大(59.65 ~ 67.81 Tg),是整个针叶林碳库的最主要成分。其次是杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) (17.15 ~ 20.00 Tg),湿地松(7.65 ~ 14.51 Tg)位列第 3,针叶混交林(5.76 ~ 6.51 Tg)位居第 4。阔叶林碳库由 6 类林型组成。除阔叶混交林碳储量(31.66 ~ 40.02 Tg)较大外,其余皆较小(桉树 *Eucalyptus* spp. 为 4.43 ~ 7.39 Tg;黎蒴为 2.25 ~ 4.00 Tg;相思为 0.28 ~ 1.63 Tg;南洋楹为 0.05 ~ 0.37 Tg;木麻黄为 0.50 ~ 0.69 Tg)。OBPA 碳库位居第 3,如图 2 所示,其中经济林碳储量为

8.47 ~ 12.49 Tg;四旁林碳储量为 3.94 ~ 5.01 Tg;疏林碳储量略有下降为 1.73 ~ 1.27 Tg;竹林碳储量增长幅度最小为 7.04 ~ 7.56 Tg。

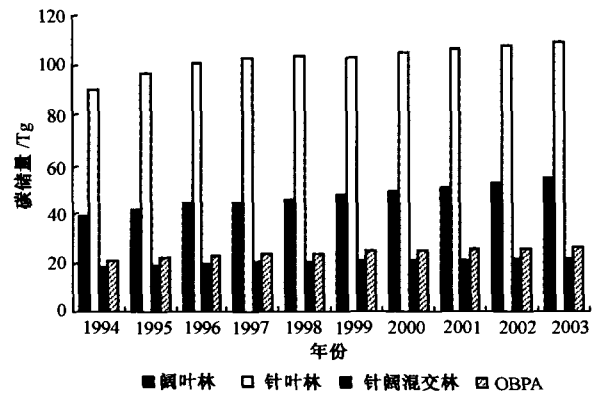


图 1 4 个小碳库的变化(1994—2003)

FIGURE 1 Changes of four forest carbon pools in Guangdong Province during 1994—2003

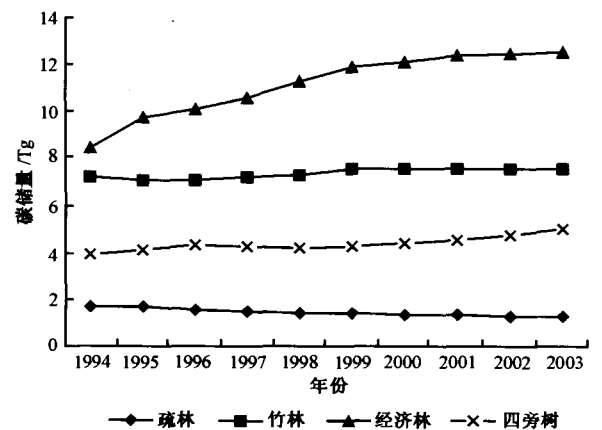


图 2 疏林、竹林、经济林和四旁树碳储量变化

FIGURE 2 Changes of carbon storage for open forest, bamboo forest, economic forest and ambient trees

2.3 乔木层、林下层和凋落物层碳储量

如图 3 所示,乔木层碳储量从 1994 年的 94.91 Tg 增加到 2003 年的 130.84 Tg。林下层碳储量从 1994 年的 34.88 Tg 增加到 1996 年的 37.79 Tg,然后又减少到 2003 年的 36.79 Tg。凋落物层碳储量从 1994 年的 39.82 Tg 增加到 2003 年的 43.62 Tg。10 年中凋落物层碳储量始终高于林下层碳储量,且二者的差距逐渐增大(从 4.94 到 6.83 Tg)。可见在此期间,不论是乔木层、凋落物层还是林下层都不同程度地增加了碳的储存。

阔叶林林下层生物量比针叶林林下层生物量少 8.88 t/hm²。1996 年后林下层植物碳储量减少的主要原因是针叶林面积从 1996—2003 年减少了 24.734 万 hm²。尽管同时阔叶林面积增加了 24.972 万 hm²。针阔叶混交林、木麻黄林及竹林面积

分别增加 1.093、0.025 和 2.300 万 hm^2 , 但它们的变化对林下层植被碳库影响不大。

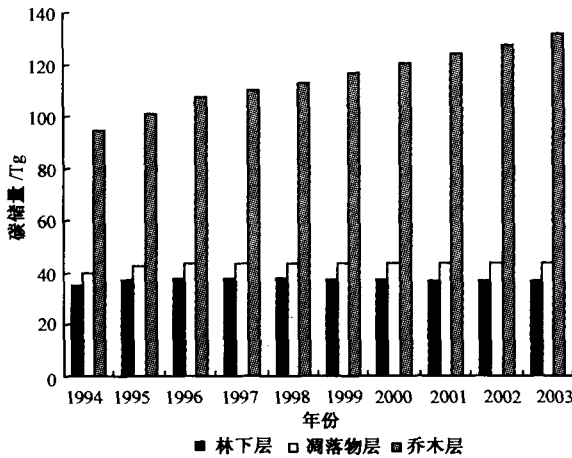


图 3 乔木层、林下层和凋落物层碳储量变化

FIGURE 3 Changes of carbon storage in forest tree layer, understory and litterfall

2.4 森林碳储量和林龄结构

从森林年龄结构来说,如图 4 所示 10 年间幼龄林碳储量持续减小,从 22.89 Tg 到 14.91 Tg. 中龄林碳储量最初增加,但 1996 年后保持相对稳定,波动幅度在 38.32 Tg 到 39.08 Tg 之间,却始终高于其他龄级碳储量. 近成林碳储量增长最快从 11.57 Tg 到 29.18 Tg, 1998 年后超过幼龄林. 成熟林碳储量从 4.55 Tg 增加到 15.99 Tg, 直到 2002 年才超过幼龄林碳储量. 过熟林碳储量一直最小并且增长幅度不大从 2.62 Tg 到 8.39 Tg. 林龄结构表明“5 年消灭荒山, 10 年绿化广东”的政策执行后森林植被得到恢复, 并且从森林固碳的角度来看广东省森林具有不可小窥的潜力。

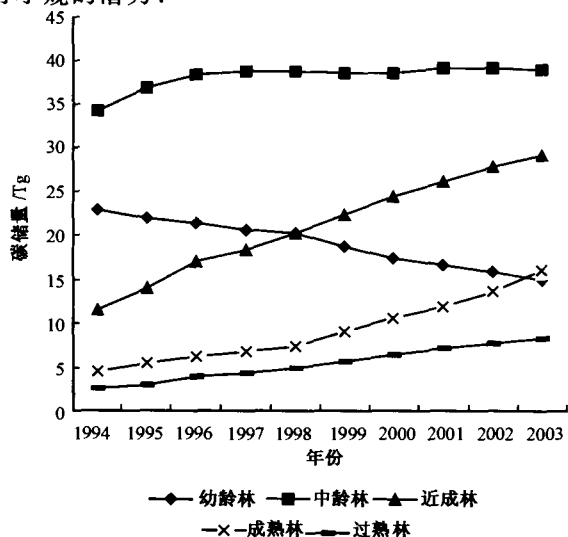


图 4 不同龄级的森林碳储量比较

FIGURE 4 Comparison of carbon storage in different forest age classes

2.5 不同类型森林固碳率比较

已有研究表明,欧洲^[25]和北美^[26-29]经营管理较好的森林固碳率为 2.5 ~ 6.6 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. 而位于亚热带的广东省森林植被 1994—2003 年间固碳率为 0.27 ~ 1.19 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. 但广东省不同类型森林的固碳率也不一样(图 5). 阔叶林相对较高为 0.19 ~ 1.36 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 除了 1997 年外针叶林固碳率 (-0.13 ~ 1.23 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 始终低于阔叶林; 针阔叶混交林固碳率波动最大 (0.01 ~ 1.36 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$). 初步分析图 5 数据变化较大的原因为 1998、1999 两年气候异常所致, 该问题还有待进一步深入探讨。

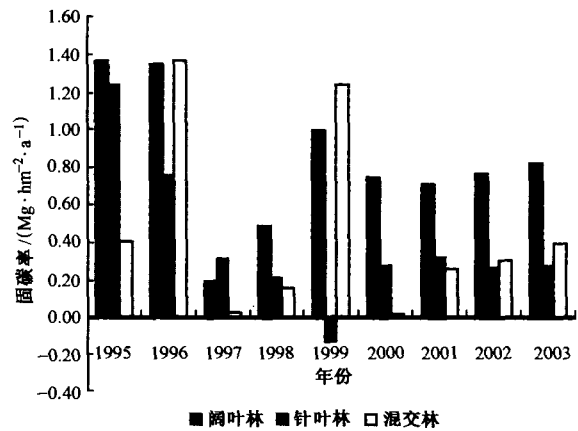


图 5 不同森林类型的固碳率变化

FIGURE 5 Changes of carbon accumulation rates among different forest types

3 讨 论

方精云等^[6-7]及王效科等^[8]分别估算了全国及各省森林碳储量、碳密度. 关于广东省森林碳他们得出的结果相差甚远(表 3). 其差异主要来源于不同的研究方法和采用不同的碳含量系数. 本研究估算广东省森林植被碳储量大于他们的估算结果. 主要原因在于森林植被碳库中包含了他们所未曾考虑过的 11 种林型的林下层和凋落物层生物量, 以及 OBPA(疏林、竹林、经济林和四旁树). OBPA 占森林植被总碳库的 12.25% ~ 12.71%. 林下层碳储量占森林植被总碳库的 20.56% ~ 17.41%. 凋落物层碳储量占森林植被总碳库的 23.48% ~ 20.65%, 其显然也是森林碳储量估算中不容忽视的部分(图 1、3). 因此, 在森林植被碳储量估算时如何避免对小的碳储存库的忽略是广大研究人员应达成共识的问题之一。

10 年间针阔叶混交林碳密度保持所有森林类型中最高水平 (25.78 ~ 28.99 Mg/hm^2). 阔叶林类型中阔叶混交林碳密度最高, 但是 1998 年后碳储量增

长最快的黎蒴林(18.74 ~ 32.66 Mg/hm²)超过了它。针叶林碳密度相对较低,从1994—2003年,各种针叶林林型的碳储量变化如下:马尾松林(18.38 ~ 20.76 Mg/hm²)、湿地松林(13.95 ~ 20.68 Mg/hm²)、

杉木林(19.18 ~ 21.31 Mg/hm²)和针叶混交林(19.21 ~ 21.94 Mg/hm²)。竹林碳密度在24.50 Mg/hm²左右,变化幅度很小。疏林碳密度为9.88 Mg/hm²,经济林碳密度为16.60 Mg/hm²。

表3 广东省森林碳的不同研究结果比较

TABLE 3 Comparison in the research results of forest carbon storage during varied periods in Guangdong Province

	1949	1950—1962	1973—1976	1977—1981	1984—1988	1989—1993	1994—1998
碳密度 ^[7] /(Mg·hm ⁻²)	34.7	33.9	31.5	30.5	27	26.1	29.4
碳密度 ^[8] /(Mg·hm ⁻²)	-	-	-	-	-	-	20.02 ~ 21.02
森林碳库 ^[7] /Tg	135.75	141.4	160.2	145.85	108.55	138.85	155
森林碳库 ^[8] /Tg	-	-	-	-	34.81	-	-
森林碳库*/Tg	-	-	-	-	-	-	169.61 ~ 193.79

注: * 为本研究。

本研究中广东省森林碳密度低于同期中国森林碳密度的原因主要有以下两个方面:①估算中包括了疏林和经济林,它们各自的碳密度为9.88和16.6 Mg/hm²,均低于11种林型的碳密度;②广东省在20世纪80年代提出“5年消灭荒山,10年绿化广东”之后大量造林和森林更新,使得之后的1994—2003年森林年龄结构以幼龄林、中龄林和近成林为主,尤其是中龄林一直都是份额最大的部分。成熟林和过熟林所占比例较小。这样的林龄结构必然使森林碳密度偏低。但是,可以预见随着时间推移,森林整体成熟度不断增加,森林经营管理水平同时跟上,整个广东省森林植被碳密度将在一定时间内保持上升,然后稳定在一个较高的水平,碳储量也如此。

4 结 论

本研究的结果表明,1994—2003年随着森林植被的恢复,广东省森林植被碳储量增加41.67 Tg,同时森林碳密度增大了1.58 Mg/hm²。10年间广东省森林林下层和凋落物层碳储量占森林总碳库的38%~44%,林下层和凋落物层碳储量是估算森林植被总碳库时不应忽略的部分。

致谢 感谢广东省林业局提供1994—2003年森林资源档案数据;感谢刘世忠工程师和汤新艺同学协助调查木麻黄林林下层和凋落物层生物量;感谢张倩媚老师提供相关资料。

参 考 文 献

- [1] DAVIS M R, ALLEN R B, CLINTON P W. Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand *Nothofagus* forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177:313-321.
- [2] SCHIMMEL D S. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2001, 414: 169-172.
- [3] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263: 185-190.
- [4] BIRDSEY R A, PLANTINGA A J, HEATH L S. Past and prospective carbon storage in United States forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, 58:33-40.
- [5] GRIGAL D F, OHMANN L F. Carbon storage in upland forests of the lake states[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 935-943.
- [6] 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: 2 320-2 322.
- [7] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及意义[J]. *植物学报*, 2001, 43(9):967-973.
FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9):967-973.
- [8] WANG X K, FENG Z W, OUYANG Z Y. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 148: 117-123.
- [9] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因素分析[J]. *地理科学*, 2004, 24(1):50-54.
ZHAO M, ZHOU G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
- [10] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5):518-522.
ZHOU Y R, YU Z L, ZHAO S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [11] LI K R, WANG S Q, CAO M K. Carbon storage in China's vegetation and soils[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(1):72-80.
- [12] 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.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [13] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(5):437-441.
GUAN D S, CHEN Y J, HUANG F F. The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(5): 437-441.

- [14] 张德全, 桑卫国, 李日峰, 等. 山东省森林有机碳储量及其动态的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(增刊): 93-97.
ZHANG D Q, SANG W G, LI R F, *et al.* Forest organic carbon storage and its trend in Shandong Province[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(Supp.): 93-97.
- [15] 曹军, 张德铿, 刘燕华. 近20年海南岛森林生态系统碳储量变化[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 551-560.
CAO J, ZHANG Y L, LIU Y H. Changes in forest biomass carbon storage in Hainan Island over the last 20 years[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(5): 551-560.
- [16] 吴水荣. 估算森林碳储量变化的新指南[DB/OL]. (2005-07-30)[2005-11-18]. <http://www.lyzc.org.cn>
WU S R. New guide in estimating changes of forest carbon storage [DB/OL]. (2005-07-30)[2005-11-18]. <http://www.lyzc.org.cn>
- [17] 中华人民共和国林业部. 林业资源清查标准[S]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
State Forestry Administration, P. R. China. Standards for forestry resource survey [S]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982.
- [18] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, *et al.* Forest biomass of China: An estimate based on the biomass-volume relationship[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8: 1 084-1 091.
- [19] 温达志, 魏平, 张倩媚, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林生物量的研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(增刊): 11-21.
WEN D Z, WEI P, ZHANG Q M, *et al.* Studies on biomass of three lower subtropical evergreen broad-leaved forests in a MAB reserve of south China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23 (Supp.): 11-21.
- [20] 屠梦照, 姚文华, 翁袁, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物的特征[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 34-41.
TU M Z, YAO W H, WENG H, *et al.* Characteristics of litter in evergreen broad-leaved forest of the Dinghu Mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1): 34-41.
- [21] 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.
FANG Y T, MO J M. Study on carbon distribution and storage of a pine forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Guihua*, 2002, 22(4): 305-310.
- [22] 方运霆, 莫江明, 黄忠良, 等. 鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(1): 47-52.
FANG Y T, MO J M, HUANG Z L, *et al.* Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(1): 47-52.
- [23] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
FANG J Y, LIU G H, XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.
- [24] 聂道平. 毛竹林结构的动态特征[J]. 林业科学, 1994, 30(3): 201-207.
NIE D P. Structural dynamics of bamboo forest stands[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1994, 30(3): 201-207.
- [25] VALENTINI R, MATTEUCCI G, DOLMAN A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404: 861-865.
- [26] GRECO S, BALDOCCHI D D. Seasonal variation of CO₂ and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 183-198.
- [27] GOULDED M L, MUNGER J W, FAN S M, *et al.* Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest response to interannual climate variability[J]. *Science*, 1996, 271: 1 576-1 578.
- [28] GOULDED M L, MUNGER J W, FAN S M, *et al.* Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 169-182.
- [29] BALDOCCHI D D, VOGEL C A, HALL B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1997, 83: 147-170.

(责任编辑 赵 勃)