

浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力

张骏¹, 袁位高¹, 葛滢², 江波¹, 朱锦茹¹, 沈爱华¹, 常杰^{2,*}

(1. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023; 2. 浙江大学生命科学院, 杭州 310058)

摘要:生态公益林是为保护和改善人类生存环境, 维持生态平衡而建立的。以浙江省的生态公益林为研究对象, 共调查和估算了全省 21 个县 149 个样地(年龄从 5a 到 50a), 包括常绿阔叶林、针阔混交林、马尾松林和杉木林 4 种主要林型的碳储量和碳平衡。结果说明: 浙江省生态公益林生态系统碳密度的加权平均值为 $164.43 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其中常绿阔叶林生态系统碳储量最高, 达 $216.18 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$; 针阔混交林其次, 达 $181.36 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$; 针叶林最低。浙江省森林以幼龄林(小于 30a 的占 87.5%)和马尾松林(大于 55%)为主离成熟状态还相差很远, 尤其是针叶林远低于全国平均水平和中高纬度地区碳密度。全省生态公益林净生态系统生产力加权平均得 $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 在碳积累上还有很大的潜力。通过封育改造、择伐补阔或以灌促阔等森林管理措施, 加快针叶林向针阔混交林直至常绿阔叶林演替, 将最大化中国亚热带地区的幼林或受干扰森林的未来碳储量(最高增长 31.44%), 并成为较大的碳汇。

关键词:净生态系统生产力; 生物量; 碳预算; 碳汇; 中亚热带东部

Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang

ZHANG Jun¹, YUAN Weigao¹, GE Ying², JIANG Bo¹, ZHU Jinru¹, SHEN Aihua¹, CHANG Jie^{2,*}

1 Zhejiang Forestry Academy, Hangzhou 310023, China

2 College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Carbon storage in the terrestrial ecosystem, especially in the forest ecosystem, is an important approach for maintaining carbon balance in the world. Carbon storage of the forest ecosystem usually consists of three pools, i. e. vegetation, forest floor and soil. Ecological service forest (ESF) has been established to maintain ecological processes and protect the environment. The main objective of this study was to evaluate the contribution of these four types ESF in Zhejiang Province. Zhejiang Province is a region with fast growing economy and a good ecological environment, an estimation of carbon storage and balance in this province will set up as a good model in the future for other provinces in similar cases, and a scientific foundation for the policy making about the forest development and a mitigation strategy for climate change. Zhejiang Province is located south side of the Yangtze River Delta, along the eastern coast of China. The region has a long land-use history, and experienced thousands of years human activities and disturbance, most of the native forest vegetation has been destroyed, especially in the last century. We have sampled 149 stands ranging from 5 to 50 years old and covering $101\,800 \text{ km}^2$, in Zhejiang Province. These samples included four main types of ESF: evergreen broad-leaved forest (ESF-EF), coniferous and broad-leaved mixed forest (ESF-MF), pine (*Pinus massoniana*) forest (ESF-PF), and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest (ESF-CF). The ESF in Zhejiang Province has been estimated with the average of $164.43 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ carbon storage, in which the ESF-EF and ESF-MF were averaged to be 216.18 and $181.36 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. ESF in Zhejiang is still young (under 30-year-old account for 87.5%) and pine forest (over 55%) mainly result in low carbon storage less than that of China average and mid-high latitude level. Moreover, the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30970281); 五千万亩生态(经济)公益林建设关键技术研究 and 集成示范项目(2005C12026); 浙江省森林生态系统定位研究网络项目资助

收稿日期:2009-04-04; **修订日期:**2010-04-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jchang@zju.edu.cn

net ecosystem production (NEP) values varied greatly among the four main forest types at the mid and high latitudes in Zhejiang Province; and our observation has shown that the ESF-PF acts as a minor carbon source ($-0.66 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), NEP of the ESF-CF is near to zero ($0.17 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), ESF-MF acts as a minor carbon sink ($0.31 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), and ESF-EF as a large carbon sink ($1.11 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The NEP of ESF in Zhejiang is weight-averaged about $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. We estimated carbon balance for four forest types in subtropical zone through field survey data firstly. Carbon budget of four forest types calculated show that evergreen broad-leaved forest are better than coniferous and broad-leaved mixed forest in terms of the carbon sequestration benefit. Most ecological service forest in Zhejiang Province is still relatively young, so there is a great potential in future for carbon sequestration in this province. Comparing to carbon storage potential and carbon balance for the main forest types in this region, we found that forest management practices such as enclosure, selective cutting and promoting by shrub for ecological service forest should be reformed to accelerate the succession of coniferous forest into evergreen broad-leaved forest. It could maximize (31.44% at best) the carbon storage of young or disturbed forest in future for a larger carbon sinks in subtropical regions of China.

Key Words: NEP; biomass; carbon budget; carbon sink; eastern mid-subtropical zone

森林生态系统的碳储量由植被、地被层和土壤 3 个分室组成,其碳储量分别由这 3 个库的碳密度及各个森林类型的面积决定。准确了解当前各种森林生态系统的碳库及碳通量大小和分布,并切实评估不同类型植被和土壤的碳储存能力,是合理制定各项政策措施^[1]、从而提高世界植被和土壤的碳吸收速度、增加陆地碳储量的基础^[2-3]。因此,提高陆地生态系统特别是森林的碳储量是维持全球碳平衡的重要手段。

目前国外有关国家、区域及生态系统水平的森林碳平衡的研究较多,大多集中于温带森林和热带森林^[4-6]。近 10a 来我国在森林碳平衡方面亦已有一定研究。在国家尺度上,方精云等^[7]对我国 50a 来森林碳库、平均碳密度和 CO_2 源汇功能变化进行了研究;刘国华等^[8]、周玉荣等^[9]、王效科等^[10]也分别利用森林资源清查资料从不同角度对我国森林生态系统植被碳密度进行了分析。但上述结果相差较大,说明要得出森林生态系统植物碳储量的可靠值,必须采用当地参数和按类型或区域进行详尽的统计,并且应该不断更新数据库,引用最新的森林生物量的生态调查结果。目前全国各地植被分类系统不统一、不同的森林生态系统类型之间在结构组成和群落结构上差异较大,并且大部分文献都是根据 20 世纪 90 年代初的清查数据计算,不符合现状,与实际相差巨大。

基于以上问题,本文利用 1999—2000 年的实地观测得到的大量数据,估算了浙江省生态公益林的森林生态系统碳密度和碳平衡,对下一步准确估算亚热带地区的森林碳储量碳通量、验证中高纬度地区森林可能是重要的陆地碳汇^[11]进行了探索。浙江省的经济发展和生态恢复都走在全国各地前列,对本地区森林碳储量和碳平衡的研究可以为中西部省市的未来发展中将要遇到的相似情况所借鉴,同时也为各级政府制定森林发展规划和应对气候变化政策提供科学依据。

1 研究区域

浙江省位于我国长江中下游东南沿海地区,长江三角洲南翼,处于北纬 $27^{\circ}06'—31^{\circ}31'$,东经 $118^{\circ}01'—123^{\circ}10'$ 。省内山脉多是西南—东北走向,高山基本集中于西南部,平均海拔为 800 m。浙江省属于典型的亚热带气候,水热基本同期,土壤类型多以红壤、红黄壤和黄壤为主,还有少量的石灰土、紫色土等,适合于森林群落的生长,故浙江省境内的森林群落丰富,种类繁多。地带性植被为常绿阔叶林、常绿阔叶和落叶混交林;除此之外还有落叶阔叶林、针叶林、竹林等多种植被类型^[12]。

该地区开发历史悠久,经历了几千年主要是人类活动和干扰,原生森林植被大多已破坏无遗,特别是近百年来几乎完全毁坏。20 世纪 50 年代经济快速发展,人为活动频繁,环境再一次被破坏。20 世纪 90 年代开始重视环境保护,森林恢复迅速,覆盖率已达 59.4%,位居全国前茅^[12-13]。目前浙江省划归为生态公益林的森林近 200 万 hm^2 ,占林业用地面积 30.10%。已归属生态公益林的林分面积中,常绿阔叶林(Evergreen broad-

leaved forest, EF) 面积 48.52 万 hm^2 , 占生态公益林面积的 24.61%; 针阔混交林 (Conifers and broad-leaved mixed forest, MF) 面积 33.93 万 hm^2 , 占 17.21%; 针叶林面积达 101.22 万 hm^2 , 占 51.34%; 竹林面积 10.53 万 hm^2 , 占 5.66%^[14]。

在浙江省按照建群树种、林龄、起源、立地等因子划分成不同的森林类型。在初查后, 选择有代表性的植被类型、且受人为干扰较小而交通相对方便的地方设立样方, 同一群落类型的样地要综合考虑坡位、坡度、坡向、海拔高度等因子进行布点。以地市为单位, 每个地市以一个典型县为重点, 其他县为补充, 设各类样地数 195 个 (表 1)。其中本文研究对象生态公益林 4 种主要林型的 149 个标准样地分布于 21 个县中, 常绿阔叶林 (EF) 样地 47 个, 针阔混交林 (MF) 样地 32 个, 马尾松林 (*Pinus massoniana* Lamb., PF) 样地 38 个, 杉木林 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., CF) 地 32 个 (图 1)。

表 1 各类型样地分布							
Table 1 The distribution of different samples							
样地地点 Site	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forest	竹林 Bamboo forest	常绿阔叶灌丛 Evergreen broad- leaved shrub	合计 Total
杭州 Hangzhou	5	6	7	14	4	7	43
湖州 Huzhou	3	2	1	1	3	0	10
舟山 Zhoushan	1	2	0	1	1	1	6
宁波 Ningbo	2	2	1	2	1	2	10
绍兴 Shaoxing	1	1	2	0	0	3	7
金华 Jinhua	3	3	4	3	2	2	17
衢州 Quzhou	5	4	1	4	3	4	21
台州 Taizhou	4	2	6	4	1	1	18
温州 Wenzhou	5	3	2	4	2	2	18
丽水 Lishui	9	7	8	14	2	5	45
合计 Total	38	32	32	47	19	27	195

2 研究方法

2.1 植被碳储量

2.1.1 植被生物量调查

样地的面积统一为 20 m × 30 m, 形状为长方形, 平行于山脚的为 20 m, 平行于坡面的为 30 m。如图 2 所示, A、B、C、D 为桩号顺序。

对选定样地进行群落植被结构、数量特征以及土壤厚度、海拔高度和坡度等指标的调查。群落层次的划分同中国山地植物物种多样性中采用的方法^[15]。其中乔木层 600 m² 的样地每木检尺, 胸径 3.0 cm 起测, 调查因子为胸径、树高、枝下高、冠幅, 被测树木用塑料牌或金属牌编号挂牌; 下木层面积 36 m², 沿大样方内 A-C 对角线设 1.0 m 宽的调查带 (图 2), 调查每一树种的株数、树高并统计各树种的数量与平均高度; 草本层在大样方内沿 B、D 两点各设 2 m × 2 m 正方形小样方共 2 个 (图 2), 调查小样方内各植物种数量和盖度。本研究的野外调查工作在 1999—2000 年进行。

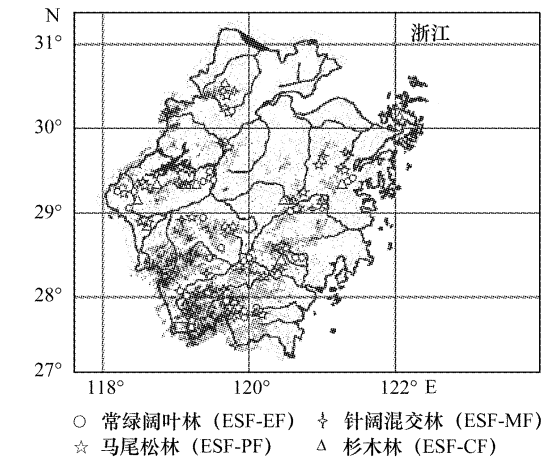


图 1 浙江省生态公益林取样点分布

Fig. 1 Sampling plots for the ecological service forest in Zhejiang Province, eastern China

2.1.2 植被生物量估算

在全省样地外围相似地带寻找标准木测定,将标准木用分层切割法从底部以 2m 截为一段,称鲜重,再取其中一段与部分侧枝、叶、花和果实分别称鲜重;烘干后得干重,计算各部分含水率再根据总鲜重推算得总干重。

将样地逐个植株胸径、株高带入模型估算出各株杉木的地上生物量,再利用地上地下生物量比推算地下生物量,同理马尾松和常绿阔叶林生物量模型^[15]采用本研究组的工作,估算出各株乔木的生物量,逐株累加求得各个公益林样地乔木层生物量。

再通过下木层调查结果,分别确定不同树种、等级的样株 3—5 株,在样方外围选取,分别干、枝、叶、果、根称重,取样并带回实验室烘干,按株数推算各单位面积生物量。草本层生物量测定依据调查结果,在样方外选择类似地段采用收获法^[16]取样、称重,并带回实验室烘干、称重,计算含水率,通过换算求得各单位面积的生物量。

最后通过乔木层、下木层和草本层各层生物量求和得到整个群落的生物量。

2.1.3 植被碳储量换算

不同森林植被因其群落组成、年龄结构的差异,其转换率略有不同,本文采用国际上常用的转换率 0.5^[16-18]。各种林型的群落生物量乘以碳转换系数得植被碳储量。

2.2 地被物层碳储量

森林地被物层是指林内高度在 1m 以下的死活地被物,包括乔灌木幼苗、草本植物、藤本植物、苔藓植物、种子以及凋落物^[19],是年凋落物量与分解量的差值的历年积累。因为地被物层土壤有机碳动态变化的主要组成,估算其对土壤有机碳动态影响是预测生态系统可持续性以及全球大气碳交换的关键^[20]。

如同一般的凋落物收集方法^[21-23],生态公益林凋落物共调查了 13 个县中的 39 个样地,每个 20 m × 30 m 的植被样地内,随机机械布点,设置 5 个样方。凋落物收集器采用 100 cm × 100 cm × 20 cm 的,以小于 3 mm 孔径的尼龙纱网作箱底。每个月底收集 1 次,监测 1a。每次测定时,全部用塑料袋收集样品带回,区分叶、枝、皮、果、虫鸟粪等称量鲜重,80℃ 的烘箱内置烘干至恒重,称重求得含水率后,再换算成单位面积的凋落物重量^[22,24]。

森林凋落物现存量通过年凋落物除以每种林型的分解率^[21,25]得到:

$$B_t = L/K \quad (1)$$

式中, B_t 是凋落物现存量($t \cdot hm^{-2}$), L 是年凋落物量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$), K 是分解率。本研究假设生态系统处于稳定状态,凋落物输入和地被物层分解达到平衡^[24]。地被物层碳密度通过凋落物现存量乘以碳转化系数 0.5 得来。

2.3 土壤碳储量

土壤物理性质测定在剖面自上至下用环刀每层采集,顶盖盖住刀口,底盖(有小孔)盖住复滤纸后盖上并记录编号。每个土壤剖面分两层采集(0—20 cm,20—100 cm),每一层土壤取 2 个环刀重复测容重。在环刀取样的同时,自下而上逐层分层采混合土样 1000 g 装入另一塑料袋,样袋内外均附上,写明剖面编号、采样地点、样地号土层深度、采集时间等。封口后送浙江省林科院测试中心进行各项理化性质测定。

土壤容重(Bulk density, $BD, g \cdot cm^{-3}$)是将野外采取的同一层土壤环刀在天平上称取;用铝盒内的土测定土壤含水量,则:

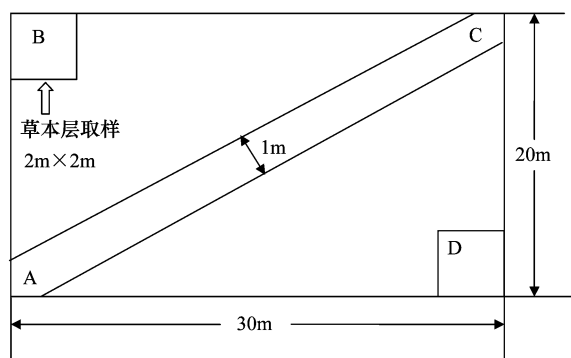


图2 样地和各层小样方设置示意

Fig.2 Setting and investigating communication layers in study site

A-C 对角线 1 m 宽设下木层调查样带,B、D 两点各设 2 m × 2 m 正方形草本层调查样方

$$BD=(M-G) \times 100 / V(100+W) \tag{2}$$

$$V=r^2 h \tag{3}$$

式中, M 是环刀及湿土合重(g), G 是环刀和滤纸重(g), V 是环刀容积(cm^3), W 是土壤含水量(%), r 是环刀有刃口一端内半径(cm), h 是环刀高度(cm)。

本研究中,土壤碳以有机碳为代表,不包括死地被物(O 层)、根和根系共生物。估算土壤有机碳利用土壤剖面的有机物百分含量计算^[24, 26-27]。土壤有机碳基于每层深度、其土壤容重和有机碳百分比,最后各层求和得总土壤碳密度。土壤有机碳($C_t, \text{g cm}^{-2}$)0—100 cm 深度计算公式如下^[28]:

$$C_t=BD \times C_e \times D \tag{4}$$

式中, C_e (%)是土壤碳浓度,通过重铬酸钾氧法测定土壤有机质; D (cm)是土壤取样深度。

2.4 净生态系统生产力

森林生态系统碳平衡包括输入与输出两个过程,输入与输出的差值即为净生态系统生产力(Net Ecosystem Production, NEP),若 NEP 为正,表明生态系统是碳汇,反之则是碳源。 NEP 为生物量年增量($MABI$)和年凋落物量(L)之和减去异养呼吸(heterotrophic respiration, R_h)。具体的计算公式如下^[9, 25, 29]:

$$NEP=MABI+L-R_h \tag{5}$$

Raich 和 Schlesinger^[30] 在全球尺度上通过陆地生态系统土壤呼吸的研究认为:根的呼吸量占土壤总呼吸量的 30%—70%,周玉荣等^[9] 认为我国树木根系呼吸占土壤总呼吸量的比值取 0.45。本研究综合以上文献数据,将浙江森林的异养呼吸占土壤呼吸的比例定为 45%。以此异氧呼吸比例并利用本地区的相同林型(浙江青冈常绿阔叶林和马尾松林群落土壤呼吸分别为 24.12 和 25.33 $\text{tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,相当于碳量 6.58 和 6.91 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[31-32],或相近地区(湖南会同的杉木土壤呼吸量为 5.91 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[33])等研究的结果计算得常绿阔叶林、马尾松林和杉木林的异氧呼吸。针阔混交林异养呼吸暂无文献数据,根据样地的针阔比例(假设针阔各占 50%),通过另外 3 种林型的异养呼吸计算得到:

$$R_{\text{hmf}}=[R_{\text{hef}}+0.5((R_{\text{hpf}}+R_{\text{hef}})]/2 \tag{6}$$

式中, R_{hmf} 、 R_{hef} 、 R_{hpf} 、 R_{hef} 分别代表生态公益林中针阔混交林、常绿阔叶林、马尾松林和杉木林的异养呼吸($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

3 结果

3.1 碳密度

浙江省生态公益林生态系统总碳密度的加权平均值(基于各种林型的面积比例)为 164.43 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中常绿阔叶林生态系统总碳密度平均为 216.18 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、针阔混交林平均为 181.36 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、马尾松林平均为 147.81 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$,杉木林平均为 188.12 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 2)。各个林型的土壤碳库往往占了生态系统碳库的较大比例(75% 以上),针叶林因植被碳库低,土壤碳库都在 80% 以上。

表 2 浙江省生态公益林主要林型生态系统的碳密度($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 Carbon content($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) by ecosystem component for the four different forest type in the ecological forest in Zhejiang, China					
林型 Forest type	碳密度($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) Carbon density				样本数 Sample number
	植被 Vegetation	地被物 Ground cover	土壤 Soil	总计 Total	
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	44.59 (36.61) *	4.66 (1.79)	166.93 (64.70)	216.18	47
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	35.03 (23.32)	3.75 (1.11)	142.58 (80.26)	181.36	32
马尾松林 Pinus massoniana forest	25.62 (19.17)	2.72 (0.68)	119.47 (70.00)	147.81	38
杉木林 Cunninghamia lanceolata forest	26.83 (12.43)	1.52 (0.95)	159.77 (62.93)	188.12	32
加权平均 Average	30.28	3.06	131.09	164.43	149

* 括号内数字代表标准差 Data in the bracket represent variation

将主要林型碳密度乘上各自的分布面积得碳储量,浙江省常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林的碳储量分别 104.89×10^{12} gC, 61.53×10^{12} gC 和 157.76×10^{12} gC。浙江省生态公益林总碳储量为 324.19×10^{12} gC。

3.2 碳平衡

常绿阔叶林生物净增量为 $2.02 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凋落物生成量 $2.05 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,异氧呼吸 $2.96 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整个生态系统的 NEP 为 $1.11 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;针阔混交林净增量为 $1.90 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凋落物生成量 $1.30 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,异氧呼吸 $2.89 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整个生态系统的 NEP 为 $0.31 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;马尾松林净增量为 $1.26 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凋落物生成量 $1.01 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,异氧呼吸 $2.93 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整个生态系统的 NEP 为 $-0.66 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;杉木林净增量为 $1.58 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凋落物生成量 $1.20 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,异氧呼吸 $2.69 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整个生态系统的 NEP 为 $0.17 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。

浙江省生态公益林加权平均生物净增量为 $1.58 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凋落物生成量 $1.20 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,异氧呼吸 $2.70 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整个生态系统的 NEP 为 $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 3 浙江省生态公益林主要林型生态系统的碳平衡

Table 3 The carbon budget ($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) by ecosystem component for the four different forest type in the ecological forest in Zhejiang, China

林型 Forest type	碳预算 Carbon budget/ ($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)			
	年净增碳量 Net vegetation production	年凋落物碳量 Litter production	异养呼吸 Heterotrophic respiration	净生态系统生产力 NEP
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	2.02	2.05	2.96	1.11
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	1.90	1.30	2.89	0.31
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	1.26	1.01	2.93	-0.66
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	2.31	0.55	2.69	0.17
加权平均 Average	1.58	1.20	2.70	0.08

4 讨论

4.1 碳密度

中国浙江生态公益林的平均植被碳密度 ($30.28 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 比方精云等^[7]和王效科等^[10]对中国浙江森林的植被碳密度估算要高。说明主要生态公益林的碳积累要高于整个浙江省所有林型(包括生态公益林、经济林和疏林灌木)的平均值,体现了与其他林型相比生态公益林在碳储量方面的优势。但浙江生态公益林的植被碳密度加权平均 ($30.28 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表 2) 不仅低于全国的平均值 ($38.7\text{—}57.1 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$), 也低于同纬度的美国、日本和欧洲平均值, 更远低于全球中高纬度地区 ($43 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和全球的平均水平 ($86 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) (表 4)。据 Fang 等^[34]对解放初期中国森林的估算, 平均碳密度约为 $50 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从这种意义上来说, 浙江省目前森林离成熟状态还相差很远, 尤其是针叶林(分别为 $25.6 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $26.8 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$)。如果这些人工林和次生林都达到成熟林的碳密度水平, 将吸收大量的 CO_2 , 浙江省生态公益林在碳积累上还有很大的潜力。

4.2 碳平衡

不同研究者估算的全球碳汇值差异很大, 但绝大多数认为北半球中高纬度陆地生态系统是碳汇^[7, 11, 40]。然而, 目前碳汇的证据除了少量通过土地利用和资源清查数据^[7, 37], 大量都是植被碳通量监测^[42]、大气成分变化监测和模型模拟证据^[43-45]。即使利用森林清查数据, 也是通过历年森林植被碳储量的增加来估算全国森林每年能吸收碳排放或碳吸收的总量^[7, 8, 36], 却忽略了土壤碳库的变化。除了方精云等^[29]对北京东灵山 3 种温带林型碳通量和碳平衡和湖南^[33]、福建^[46]杉木林碳平衡报道外, 国内对区域或省尺度上进行森林碳平衡估算的研究极少。本文第 1 次通过实地调查数据, 对亚热带森林东部四种林型的碳平衡进行了估算, 提供了校正全国碳源汇的基础数据, 填补了北纬 $25\text{—}30^\circ$ 之间的数据空白。若能通过地下生产力和异养呼吸的实地测量实验, 更进一步精确估算亚热带森林的碳平衡, 对验证中高纬度地区森林可能是重要的陆地碳汇^[11],

具有重要意义。

表 4 浙江省生态公益林植被碳密度($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}$)与本省、中国和全球森林植被碳密度比较

Table 4 Vegetation carbon density for the ecological service forests in Zhejiang Province in the present study (mean = $30.28 \text{ t C hm}^{-2}$) and in other studies

研究区域 Study area	生态公益林 Ecological service forest	所有林型 All forest combined	文献来源 Reference source
中国浙江 Zhejiang, China	30.28	19.9	[7]
		12.4	[10]
中国东北 Northeast, China		22.7	[35]
中国 China		42.1	[36]
		38.7	[8]
		57.1	[9]
		44.9	[7]
		41	[37]
美国大陆 USA		61	[38]
日本 Japan		34.7	[39]
欧洲 Europe		32	[40]
全球中高纬度 Mid- and high- latitude in the world		43	[41]
全球 Global		86	[40]

中国浙江生态公益林的四种亚热带森林的净生态系统生产力为 $-0.66 \sim 1.11 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 都比其它研究低(表 5), 只和丹麦($0.9 \sim 1.3 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、德国($0.77 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 以及中国海南($0.37 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 的

表 5 北半球中纬度地区不同地点阔叶林和针叶林生态系统的碳平衡参数

Table 5 Carbon balance of broad-leaved forest and coniferous forest at different sites in the middle latitude region of the Northern Hemisphere

地点 Site	纬度/(°) Latitude	优势种 Dominant species	森林类型 Forest type	年龄 Age/a	观测时间 Study period	NEP /($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	文献 Source
中国浙江 Zhejiang, China	27—31	EB	S	5—50	1999—2000	1.11	本文
中国浙江	27—31	M	S	5—33	1999—2000	0.31	本文
中国浙江	27—31	马尾松	P	9—41	1999—2000	-0.66	本文
中国浙江	27—31	杉木	P	6—28	1999—2000	0.17	本文
中国北京 Beijing, China	40	白桦	S	>30	1992—1994	0.95	[29]
中国北京	40	辽东栎	S	>30	1992—1994	-0.29	[29]
中国北京	40	油松	P	30	1992—1994	4.08	[29]
中国福建 Fujian, China	26	杉木	P	36	2002	3.62	[46]
中国福建	26	CK	P	36	2002	7.66	[46]
中国湖南 Hu'nan, China	27	杉木	P	10—11	2002	-0.43—0.17	[33]
中国海南 Hainan, China	19	TR	NM	>30	1992—1995	0.37	[48]
意大利 Italy	42	BD	NM	105	1996—1997	6.40	[42]
法国 France	49	BD	NM	30	1996—1997	2.20—2.60	[42]
丹麦 Denmark	55	BD	NM	80	1996—1998	0.90—1.30	[42]
法国	44	C	P	29	1996—1997	4.30	[42]
德国 Germany	50	C	NM	45	1997—1998	0.77	[42]
德国	50	C	NM	105	1996—1998	3.30—5.40	[42]
意大利	42	M,EB	N	50	1997	-6.60	[42]
法国	44	C	P	27	1997—1998	5.75	[49]

注: C, 针叶林 coniferous forest; CK, 栲栳林 *Castanopsis kawakamii* forest; EB, 常绿阔叶林 evergreen broad-leaved forest; M, 针阔混交林 coniferous and broad-leaved mixed forest; TR, 热带雨林; S, 次生林 secondary forest; NM, 天然林(有少量人为管理) natural origin and managed; P, 人工林 plantations

接近,也低于 Luyssaert 等^[47]报道的温带干旱常绿林($3.98 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和落叶林($3.11 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),接近温带半干旱常绿林($1.33 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);但都低于周玉荣等^[9]收集文献资料得到的全国各种林型 *NEP* 平均值:其中常绿阔叶林为 $7.29 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,针阔混交林为 $5.85 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,暖性针叶林为 $4.22 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和湖南^[33]、福建^[46]省杉木人工林。一方面,本文研究对象地处中低纬度亚热带地区,年均温较高,分解速率快,呼吸速率高,故 *NEP* 低;另一方面,周玉荣等^[9]收集的文献资料大多还是采用典型的群落植被取样研究,而湖南、福建省的人工林经营强度大大高于浙江省生态公益林,*NPP* 可能偏高。

浙江中亚热带森林四种主要林型的 *NEP* 差距较大:马尾松林是一个较小的碳源,杉木林 *NEP* 基本是零,针阔混交林是一个较小的汇,而常绿阔叶林是一个较大的汇(表 3),说明常绿阔叶林具有较大的碳汇潜力。由于目前浙江省生态公益林以针叶林为主(比例高达 51%),所以全省生态公益林的 *NEP* 加权平均得 $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,和大气 CO_2 交换基本保持平衡状态。若这两种针叶林全部改造成针阔混交林,那么全省生态公益林 *NEP* 将达到 $0.49 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比现有 *NEP* 增长 6 倍;若这两种针叶林全部改造成常绿阔叶林林,那么全省生态公益林 *NEP* 将达到 $0.90 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比现有 *NEP* 增长 12 倍。

5 结论

浙江省森林以幼龄林为主(小于 30a 的占 87.5%)目前离成熟状态还相差很远,尤其是针叶林(分别为 $25.6 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $26.8 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$)。如果这些人工林和次生林都达到全国成熟林的碳密度水平($50 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$),将吸收大量的 CO_2 ,故浙江省生态公益林在碳积累上还有很大的潜力。浙江中亚热带森林 4 种主要林型的 *NEP* 差距较大,在 2000 年,马尾松林是一个较小的碳源,杉木林碳源汇基本是零,针阔混交林是一个较小的汇,而常绿阔叶林是一个较大的汇。由于目前浙江省生态公益林以马尾松林为主(比例高达 55%),所以全省生态公益林的 *NEP* 加权平均得 $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与大气的交换基本处于平衡状态。若这两种针叶林全部改造成针阔混交林,那么全省生态公益林的 *NEP* 将达到 $0.49 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比现有的 *NEP* 增长 6 倍;若这两种针叶林全部改造成常绿阔叶林林,那么全省生态公益林的 *NEP* 将达到 $0.90 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比现有的 *NEP* 增长 12 倍。

通过比较该地区主要林型间碳储量潜力和碳平衡,通过封育改造、择伐补阔、以灌促阔等森林管理,加快针叶林向针阔混交林直至常绿阔叶林演替,将最大化中国亚热带地区的幼林或受干扰森林的未来碳储量(最高增长 31.44%),并成为较大的碳汇。

References:

- [1] Baker F D. Reassessing carbon sinks. *Science*, 2008, 317: 1708-1709.
- [2] Robin W, Murray S, Rohweder M. Plot Analysis of Global Ecosystem: Grassland Ecosystems. Washington, D. C.: World Resource Institute, 2000: 49-53.
- [3] Scholes R J, Nobel I R. Storing carbon on land. *Science*, 2001 294, 1012-1013.
- [4] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2:169-182.
- [5] Grace J, Lloya J, Miranda A C, Meir P, Miranda H S, Nobre. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in South-West Amazonia, 1992 to 1993. *Science*, 1995, 270: 778-780.
- [6] Yamamoto S, Saigusa N, Murayama S, Kondo H. Long-term results of flux measurement from a temperate deciduous forest site (Takeyama) // Proceedings of International Work-shop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation. Sapporo:ASAHI Printing CO. Ltd, 2001: 5-10.
- [7] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973.
- [8] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [9] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocool. Sinica*, 2000, 24: 518-522.
- [10] Wang X K, Feng Z Y, Ouyang Z Y. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2001, 148: 117-123.
- [11] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 403: 301-304.

- [12] Liu A X, Zhang Z S, Ding Y D. The natural forest resources of Zhejiang (the volume of forests). Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 2002.
- [13] Editorial Board of Zhejiang Forest Editorial Board. Zhejiang Forest. Beijing: Chinese Forestry Press, 1993.
- [14] Zhejiang Forestry Department. Annual of Construction and Benefit of Ecological Service Forest in Zhejiang Province, 2007.
- [15] Zhang J, Ge Y, Chang J, Jiang B, Jiang H, Peng C H, Zhu J R, Yuan W G, Qi L Z, Yu S Q. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China. Forest Ecology and Management, 2007, 245: 64-75.
- [16] Li H T, Wang S N, Gao L P, Yu G R. The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 693-704.
- [17] Burrows W H, Henry B K, Back P V, Hoffmann M B, Tait L J, Anderson E R, Menke N, Danaher T, Carter J O, Mckeen G M. Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeast Australia: ecological and greenhouse sink implications. Global Change Biology, 2002, 8: 769-784.
- [18] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. Global Change Biology, 2005, 11: 945-958.
- [19] Zhang D J, Ye X Y, You X H. Evergreen broad-leaved forest floor in Tiantong, Zhejiang Province. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(6): 544-556.
- [20] Yanai R D, Currie W S, Goodale C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. Ecosystems, 2003, 56: 197-212.
- [21] Zhang Q F, Song Y C, Wu H Q, You W H. Dynamics of litter amount and its decomposition in different successional stages of evergreen broad-leaved forest in Tiantong, Zhejiang Province. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(5): 250-255.
- [22] Li Y Q, Xu M, Zou X M, Shi P J, Zhang Y Q. Comparing soil organic carbon dynamics in plantations and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico. Global Change Biology, 2005, 11: 239-248.
- [23] Starr M, Saarsalmib A, Hokkanenb T, Merilä P, Helmisaari H S. Models of litterfall production for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland using stand, site and climate factors. Forest Ecology and Management, 2005, 205: 215-225.
- [24] Sun O J, Campbell J, Law B E. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. Global Change Biology, 2004, 10: 1470-1481.
- [25] Chapin F S III, Pamela A, Matson H A M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer Press, 2002.
- [26] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance. Journal of Environmental Sciences, 1996, 8: 249-254.
- [27] Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data. Forest Ecology and Management, 2005, 207: 295-313.
- [28] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology, 2002, 8: 345-360.
- [29] Fang J Y, Liu G H, Zhu B, Wang X K, Liu S H. Carbon cycle of three temperate forest ecosystems in Dongling Mountain, Beijing. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(6): 533-543.
- [30] Raich W J, Schlesinger H W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus, 1992, 44B: 81-99.
- [31] Huang C C. A study on the soil respiration of *Pinus massoniana* forest in Zhejiang Province. Journal of Shaoxing College of Arts and Science, 1999, 19(5): 65-69.
- [32] Huang C C, Ge Y, Chang J, Lu R, Xu Q S. Studies on the soil respiration of tree woody plant communities in the eastern mid-Subtropical zone, China. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 324-328.
- [33] Fang X, Tian D L, Xiang W H, Yan W D, Kang W X. Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation Chinese Fir plantation. Journal Central South Forestry University, 2002, 22(1): 1-6.
- [34] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9): 967-973.
- [35] Wang S Q, Zhou C H, Liu J Y, Tian H Q, Li K, Yang X M. Carbon storage in northeast China as estimated from vegetation and soil inventories. Environmental Pollution, 2002, 116: 157-165.
- [36] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, Xu S L. Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship. Ecological Applications, 1998, 8: 1084-1091.
- [37] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Estimation of carbon sink in China land from 1981 to 2000. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(6): 804-812.
- [38] Turner D P, Koepper G J, Harmon M E, Lee J J. A carbon budget for forest of the conterminous United States. Ecological Applications, 1995, 5: 421-436.
- [39] Iwaki E. Regional distribution of phytomass and net primary production in Japan//Ikushuna I. ed, Contemporary Ecology of Japan, Tokyo. Japan: Kyoritsu Syobban, 1983: 41-48.
- [40] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems. Science, 1994, 263: 185-190.

- [41] Myneni R B, Dong J, Tucker C J, Kaufmann R K, Kauppi P E, Liski J, Zhou L, Alexeyev V, Hughes M K. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. *PNAS*, 2001, 98: 14784-14789.
- [42] Valentini R, MaReucll C, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik ü, Berbigier P, Loustau D, Gu mundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861-865.
- [43] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Stephen D P. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon Fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [44] Tao B, Cao M K, Li K R, Gu X F, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Space pattern and variety of Net ecosystem productivity of China land 1981 — 2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [45] Wang S, Chen J M, Jub W M, Feng X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901 — 2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 524-537.
- [46] Yang Y S, Chen G S, Wang Y Y, Xie J S, Yang S H, Zhong X F. Carbon Sequestration and Balance in *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata* Plantations in Subtropical China. *Scientia Silvae Sinica*, 2007, 43(3): 113-117.
- [47] Luyssaert S, Inglima I, Jung M, Richardson A D, Reichstein M, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Wingate L, Matteucci G, Aragao L, Aubinet M, Beers C, Bernhofer C, Black K, Bonal D, Bonnefond J M, Chambers J Q, Ciais P, Cook B, Davis K J, Dolman A J, Gielen B, Goulden M L, Grace J, Granier A, Grelle A, Griffiths T, Grünwald T, Guidolotti G, Hanson P J, Harding R, Hollinger D Y, Hutya L R, Kolar P, Kruijt B, Kutsch W, Lagergren F, Laurila T, Law B E, Le Maire G, Lindroth A, Loustau D, Malhi Y, Mateus J, Migliavacca M, Misson L, Montagnani L, Moncrieff J, Moors E J, Munger J W, Nikinmaa E, Ollinger S V, Pita G, Rebmann C, Rouspard O, Saigusa N, Sanz M J, Seufert G, Sierra C, Smith M L, Tang J, Valentini R, Vesala T, Janssens I A. The CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2509-2537.
- [48] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, Zhou G Y, Chen B F, Fang J Y. Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 371-378.
- [49] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197.

参考文献:

- [7] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [8] 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. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [9] 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. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [12] 刘安兴, 张正寿, 丁衣冬主编. 浙江林业自然资源(森林卷). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [13] 浙江森林编辑委员会. 浙江森林. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [14] 浙江省林业厅. 浙江省重点公益林建设与效益年报, 2007.
- [16] 李海涛, 王姗姗, 高鲁鹏, 于贵瑞. 赣中亚热带森林植被碳储量. *生态学报*, 2007, 27(2): 693-704.
- [19] 张笃见, 叶晓娅, 由文辉. 浙江天童常绿阔叶林地被层的研究. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 544-556.
- [21] 张庆费, 宋永昌, 吴化前, 由文辉. 浙江天童常绿阔叶林演替过程凋落物数量及分解状态. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 250-255.
- [29] 方精云, 刘国华, 朱彪, 王效科, 刘邵辉. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(6): 533-543.
- [31] 黄承才. 浙江省马尾松林土壤呼吸的研究. *绍兴文理学院学报*, 1999, 19(5): 65-69.
- [32] 黄承才, 葛滢, 常杰, 卢蓉, 徐青山. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 324-328.
- [33] 方晰, 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. *中南林学院学报*, 2002, 22(1): 1-6.
- [34] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [37] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981 — 2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [44] 陶波, 曹明奎, 李克让, 顾峰雪, 季劲钧, 黄玫, 张雷明. 1981 — 2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [46] 杨玉盛, 陈光水, 王义详, 谢锦升, 杨少红, 钟美芳. 格氏栲人工林和杉木人工林碳吸收与碳平衡. *林业科学*, 2007, 43(3): 113-117.
- [48] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 周光益, 陈步峰, 方精云. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. *生态学报*, 1998, 18(4): 371-378.