

三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量

王鹏程^{1,2,*}, 邢乐杰¹, 肖文发², 黄志霖², 潘磊^{2,3}, 曾立雄^{1,2}

(1. 华中农业大学, 武汉 430070; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 3. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075)

摘要: 森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 在减缓全球气候变化过程中发挥重要作用。基于 104 块样地调查和森林资源二类清查数据, 运用 GIS 平台, 对三峡库区森林生态系统有机碳密度及储量进行研究, 结果表明: (1) 三峡库区森林优势树种各器官的含碳率为 44.59% ~ 54.45%, 森林凋落物含碳率为 30.61% ~ 42.73%, 平均为 36.38%; (2) 三峡库区森林生态系统平均碳密度为 $117.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于我国森林平均水平; 植被层碳密度平均为 $24.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中常绿阔叶林植被层碳密度最高, 达 $42.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 枯落物层平均碳密度为 $2.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤有机碳密度平均为 $9.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; (3) 三峡库区森林生态系统总有机碳储量为 $286.14 \times 10^6 \text{ t}$, 其中植被层碳储量为 $58.72 \times 10^6 \text{ t}$, 凋落物碳储量为 $6.67 \times 10^6 \text{ t}$, 土壤碳储量为 $220.74 \times 10^6 \text{ t}$; (4) 三峡库区马尾松林分布面积最大, 其总有机碳储量为 $77.24 \times 10^6 \text{ t}$, 占三峡库区森林有机碳总储量的 26.99%; 在各森林类型中, 马尾松林植被层、凋落物层和土壤层有机碳储量均最高, 分别达到 $20.70 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $2.66 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $53.89 \times 10^6 \text{ t}$; (5) 三峡库区森林有机碳密度呈现“东高西低”分布格局, 巴东-秭归、巫山-巫溪、石柱-武隆及江津南部有机碳密度较高。在三峡库区提高森林质量、扩大森林面积是增强森林生态系统碳汇功能的有效途径。

关键词: 三峡库区; 森林生态系统; 有机碳密度; 有机碳储量

文章编号: 1000-0933(2009)01-0097-11 中图分类号: Q143, Q948, S718.56 文献标识码: A

Organic carbon density and storage of forest ecosystems in Three Gorges Reservoir Area

WANG Peng-Cheng^{1,2,*}, XING Le-Jie¹, XIAO Wen-Fa², HUANG Zhi-Lin², PAN Lei^{2,3}, ZENG Li-Xiong^{1,2}

1 *Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

2 *Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*

3 *Forestry Science Institute of Hubei Province, Wuhan 430075, China*

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0097 ~ 0107.

Abstract: Forest ecosystem is a vital component of terrestrial ecosystems and plays an important role in mitigating the global climate change. Using GIS technology, we evaluated data collected in 104 plots and the forestry inventory data, to estimate the organic carbon storage in forest ecosystems in the Three Gorges Reservoir region. The tissues carbon content of dominant species varied between 44.59% and 54.45%, and the carbon content of forest litter ranged from 30.61% to 42.73% with an average of 36.38%. The mean organic carbon density of forest ecosystems was $117.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ that is lower than the average value for whole China. The average organic carbon density in vegetation layer was $24.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ with the greatest density of $42.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the evergreen broad-leaved forest. The mean organic carbon density of litter and soil was $2.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $9.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, separately. The total organic carbon storage of forest ecosystems was about $286.14 \times 10^6 \text{ t}$, consisted of the vegetation layer ($58.72 \times 10^6 \text{ t}$), litter ($6.67 \times 10^6 \text{ t}$) and soil ($220.74 \times 10^6 \text{ t}$). *Pinus massoniana* forests with the largest distribution area had the largest carbon storage of $77.24 \times 10^6 \text{ t}$, accounted for 26.99% of the total carbon storage in the region. Correspondingly, the vegetation layer, litter, and soil of *Pinus massoniana* forests had also the highest carbon storage of 20.70×10^6 , 2.66×10^6 , and $53.89 \times 10^6 \text{ t}$, compared with other forest types, respectively. The organic

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A1301, 2006BAD03A0701); 长江三峡库区(秭归)森林生态定位站资助项目

收稿日期: 2008-06-22; 修订日期: 2008-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengchengwang@163.com

carbon density of forest ecosystems decreased from the southeastern area to the northwestern area. The highest density was found in Badon-Zigui, Wushan-Wuxi, Shizhi-Wulong, and southern Jiangjin. The present study revealed that both the quality and area of forest systems play an important role in determining the carbon storage. Hence, to enhance the carbon sink, it is needed to improve the forest quality and to expand the forest area.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; forest ecosystems; organic carbon density; organic carbon storage

大气中 CO₂ 浓度迅速增加而引发全球变暖已成为世界面临的严峻问题^[1]。森林是陆地生态系统的主要碳库,其碳贮量约为 1146PgC,占陆地总碳贮量的 46%^[2],但是森林对 CO₂ 的存贮能力取决于森林类型、种类组成、林龄及其与人类活动的关系^[3],因此,扩大森林面积和提高森林质量成为缓解全球气候变化的重要手段^[4]。近年来,很多学者采用不同方法对区域森林植被生物量、含碳率和碳储量、土壤碳储量开展大量研究工作^[5-16],但由于研究对象的区域性及复杂性、基础数据来源和计算方法的不统一,导致森林生态系统碳储量研究结果存在较大差异^[6,17]。长江三峡库区地处长江流域的咽喉,生态敏感^[18],一些科研院所相继开展了森林生态系统服务功能研究^[19],但尚无系统报道森林碳储量及其空间分布。本文通过对三峡库区森林及土壤资料收集和调查,以及室内分析,系统研究三峡库区森林生态系统碳储量及分布格局,为科学评价区域森林生态系统对缓解全球气候变化的贡献奠定基础,为人工造林和低产林改造,增加碳储存提供科学的依据。

1 研究区概况

三峡库区地处东经 105°49' ~ 111°39', 北纬 28°28' ~ 31°44', 东起湖北宜昌,西至重庆江津,总面积为 5.8 万 km²。三峡库区属亚热带地区,四季分明。区内年均温 17 ~ 19℃,年降水量 1000 ~ 1250mm。三峡库区地貌包括平原、丘陵、低山和中山四大类型。库区土壤共有 7 个土类个 16 亚类,主要有黄壤、山地黄棕壤、紫色土、石灰土、潮土和水稻土等。三峡库区植物物种丰富,森林结构多种多样,森林植被包括 2 个植被型组,8 个植被型和 18 个群系组^[20]。

2 研究方法

2.1 森林类型的划分

根据前期研究结果^[19],结合库区森林优势树种组成、分布面积,将库区森林分为马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林、柏木 (*Cupressus funebris*) 林、温性松 (华山松 (*Pinus armandii*))、巴山松 (*Cupressus torulosa*)) 林、针叶混交 (马尾松杉木混交林、马尾松柏木混交林) 林、针阔混交林 (马尾松栎类混交、柏木栎类混交等)、落叶阔叶林 (栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、麻栎 (*Quercus acutissima*) 等)、常绿阔叶林 (丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*))、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 等)、竹林 (毛竹 (*Phyllostachys pubescens*)、水竹 (*Phyllostachys heteroclada*) 等)、经济林 (柑橘 (*Citrus reticulata*)、板栗 (*Castanea mollissima*) 等)、灌木林 (马桑 (*Coriaria nepalensis*)、黄栌 (*Cotinus ogygria*)、檵木 (*Lorpetalum chinense*) 等) 等 11 种森林类型^[19,20]。

2.2 样地的调查

样地设置按森林的分类及其面积分布,在库区 12 个县(区、市)设置 104 个临时样地。样地调查主要包括样地概况、乔木每木检尺、林内更新演替、乔木层组成种生物量测定、灌草层生物量测定、枯落物现存量测定、土壤剖面调查等。乔木层生物量测定方法为:在每个样地选择 2 ~ 3 株标准木,采用分层切割法测定树干鲜重,分层分级调查枝叶鲜重,挖掘法统计地下部分鲜重,同时进行标准木各器官取样,在实验室测定含水率,再统计乔木层总生物量^[21]。在每个样地梅花状设置 5 个 2m × 2m 样方,全部收集灌木、草本和枯落物,称重和取样,室内测定含水率,统计样地灌草层及凋落物的生物量。同时在各样地选择 2 个地点进行土壤 A、B 层取样。样地基本信息见表 1。

2.3 样品各指标测定

(1) 土壤理化性质测定依据中华人民共和国林业行业标准,森林土壤分析方法,LY/T 1210 ~ 1275-1999,

共计测定土壤样品 496 个。

表 1 样地基本信息
Table 1 The fundamental information of plots

森林类型 Forest types	样地数 Numbler	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude(m)	坡度 Slope(°)	土层厚度 Soil thickness (cm)	郁闭度 Clousure
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	14	107°22'15" ~ 110°55'52"	29°16'52" ~ 31°24'38"	320 ~ 1460	5 ~ 25	30 ~ 80	0.5 ~ 0.85
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests	12	106°40'44" ~ 110°37'48"	29°21'53" ~ 31°24'3"	245 ~ 1060	5 ~ 37	10 ~ 65	0.3 ~ 0.85
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	11	106°40'46" ~ 110°55'24"	29°21'15" ~ 31°24'32"	220 ~ 1630	5 ~ 30	60 ~ 100	0.5 ~ 0.85
温性松林 Temperate pine forests	6	107°35'47" ~ 110°29'40"	29°32'45" ~ 31°29'01"	1320 ~ 1720	2 ~ 35	46 ~ 80	0.5 ~ 0.8
针叶混交林 Coniferous mixed forests	5	107°22'15" ~ 110°26'23"	29°32'38" ~ 30°48'37"	984 ~ 1200	5 ~ 25	40 ~ 65	0.6 ~ 0.9
针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests	10	107°17'33" ~ 110°55'49"	29°15'20" ~ 31°09'27"	230 ~ 1390	5 ~ 40	34 ~ 68	0.65 ~ 0.9
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	4	108°23'28" ~ 110°30'51"	30°10'58" ~ 31 °24'14"	1080 ~ 1920	5 ~ 40	20 ~ 60	0.7 ~ 0.95
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests	15	107°32'41" ~ 110°55'38"	29°16'3" ~ 31°32'53"	200 ~ 1820	3 ~ 42	30 ~ 85	0.5 ~ 0.9
竹林 Bamboo forests	8	106°32'20" ~ 109 °37'20"	29°16'52" ~ 31°07'25"	170 ~ 760	2 ~ 18	40 ~ 80	0.45 ~ 0.9
灌木林 Shrubbery	19	107°17'33" ~ 110°46'2"	29°19'7" ~ 31°30'5"	200 ~ 1600	5 ~ 45	10 ~ 70	0.4 ~ 0.9
经济林 Economic forests	10	106°43'29" ~ 110°55'49"	29°42'29" ~ 31°07'26"	185 ~ 540	0 ~ 30	60 ~ 80	0.65 ~ 0.8

(2) 植被各器官及凋落物含碳率测定采用湿热法。即样品通过烘干、粉碎、过筛后, 取样 0.02 ~ 0.03g 于硬质试管中加入 10ml 的重铬酸钾和 10ml 的浓硫酸, 放置到 170 ~ 180℃ 的油浴锅 5min 后, 冷却后将消煮液洗入 100 ml 三角瓶中, 加邻菲罗啉指示剂 2 ~ 3 滴, 用 FeSO₄ 0.1mol/L, 测定样品有机含碳率, 测定乔木主干样品 736 个, 枝、叶及根系样品各 198 个, 灌草层及枯落物样品各 132 个。

2.4 数据的处理

2.4.1 植被层碳储量的估算

植被层碳储量的估算采用其生物量乘以植物含碳率。植被层生物量计算依据课题组对三峡库区森林生物量和生产力研究成果^[19]。植被层碳储量计算在三峡库区森林 GIS 平台完成。

2.4.2 凋落物层有机碳储量的估算

利用推算枯落物干重, 根据森林清查资料的数据库统计的结果, 按森林类型和面积进行累加, 即:

$$W = \sum_i Y_i S_i f_i$$

式中, W 是库区森林生态系统凋落物的有机碳储量, Y_i 是 i 类森林单位面积平均凋落物的量, S_i 是 i 类森林的面积, f_i 是 i 类森林凋落物含碳率。

2.4.3 土壤层有机碳储量的估算

本文只对与生物碳循环密切相关的土壤 A 和 B 层碳库进行计算。

(1) 土壤有机碳含量密度为 A 层和 B 层土壤有机碳密度之和, 计算公式为:

$$C_i = HaQ_{ia}W_{ia} + Q_{ib}W_{ib}(H - Ha)$$

式中, C_i 为 i 森林类型各小班土壤平均碳密度 (kg/m^2); Ha 为库区森林二类清查资料 GIS 数据库各小班土壤 A 层厚度; Q_{ia} 为 i 森林类型 A 层有机碳含量 (g/kg); W_{ia} 为 i 森林类型土壤 A 层容重 (g/cm^3); Q_{ib} 为 i 森

林类型 B 层有机碳含量(g/kg); W_{ib} 为 i 森林类型土壤 B 层容重(g/cm^3); H 为库区森林二类清查资料 GIS 数据库各小班土壤总厚度(cm)。

(2) 由各森林森林类型土壤的平均碳密度和分布面积,求得研究区内主要森林森林类型土壤总有机碳贮量。计算公式为:

$$M = \sum C_i S_i$$

式中, M 为库区土壤有机碳储量, C_i 为研究区森林二类清查资料 GIS 数据库各小班土壤平均碳密度, S_i 为研究区内 i 森林森林类型各小班面积。

3 结果与分析

3.1 三峡库区森林植被层有机碳密度及碳储量

从含碳率测定结果可以看出,三峡库区森林优势树种不同器官含碳率变动范围为 44.59% ~ 54.45%; 不同树种的同一器官含碳率均无显著差异,同一树种不同器官含碳率也无显著差异,所有测定树种的根、皮、主干、枝和叶含碳率平均值和标准差分别为 48.09% $\pm$ 3.64%、50.22% $\pm$ 2.32%、48.37% $\pm$ 3.69%、48.64% $\pm$ 3.80% 和 49.85% $\pm$ 4.08%。植被层碳密度统计结果显示(表 2),库区植被层碳密度最高的是常绿阔叶林,达 42.80 $t \cdot hm^{-2}$,其后依次为针阔混交林、落叶阔叶林、马尾松林、针叶混交林、杉木林、经济林、竹林、温性松林、柏木林,碳密度分别为 29.43、28.24、27.48、26.55、26.49、20.51、19.19、18.03 $t \cdot hm^{-2}$ 和 17.06 $t \cdot hm^{-2}$,灌木林生物碳密度最小,仅为 9.34 $t \cdot hm^{-2}$ 。从植被层碳密度分布图可以看出(图 1),三峡库区大部分地区植被层碳密度在 13.0 ~ 40.0 $t \cdot hm^{-2}$ 之间,按面积加权平均值为 24.15 $t \cdot hm^{-2}$ 。碳密度分布呈现“东高西低”格局,碳密度较高区域包括巫溪兴山北部;秭归南部—巴东绿葱坡—巫山南部;武隆北部—涪陵南部—丰都—石柱南部;江津南部等。

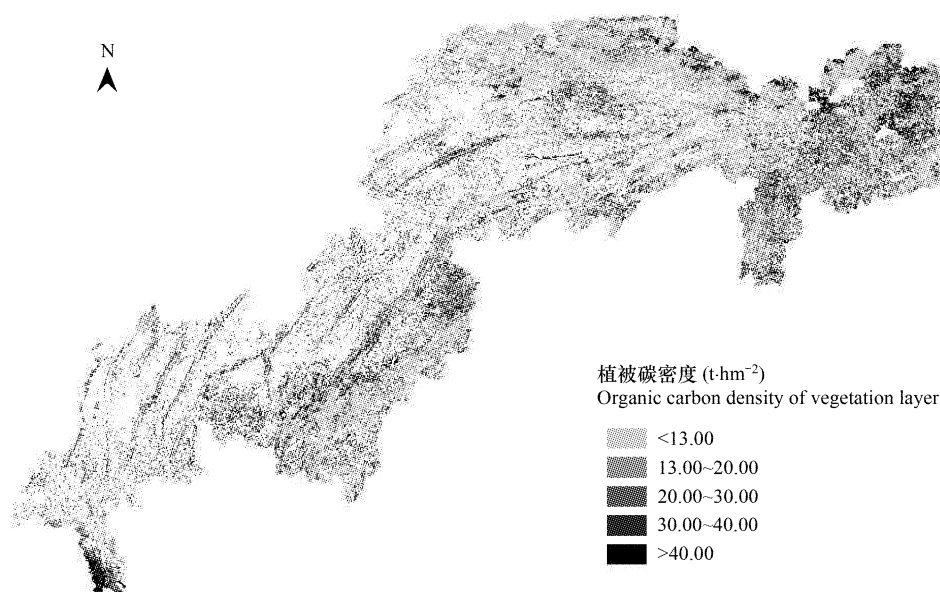


图 1 三峡库区植被层碳密度分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation carbon density in Three Gorges Reservoir Area

从表 2 可以看出,三峡库区森林生态系统植被层总碳储量为 $58.70 \times 10^6 t$ 。森林碳储量高低取决于森林面积、单位面积生物量及其器官分配和各器官的含碳率。分布面积最大的马尾松林碳储量最高,达到 $20.70 \times 10^6 t$; 其后依次为柏木林 $2.09 \times 10^6 t$ 、杉木林 $1.48 \times 10^6 t$ 、温性松林 $0.88 \times 10^6 t$ 、针叶混交林 $5.62 \times 10^6 t$ 、针阔混交林 $6.12 \times 10^6 t$ 、常绿阔叶林 $2.93 \times 10^6 t$ 、落叶阔叶林 $8.32 \times 10^6 t$ 、灌木林 $7.60 \times 10^6 t$ 、经济林 $2.35 \times 10^6 t$ 、竹林 $0.63 \times 10^6 t$ 。在各森林类型中,马尾松林平均每年的固碳量最大,达 $2.71 \times 10^6 t \cdot a^{-1}$,温性松林最小,仅为 $0.16 \times 10^6 t \cdot a^{-1}$ 。库区植被层有机碳生产力平均值为 $3.50 t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$,其中最大为竹林,达

到 $5.05 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最小为柏木林, 仅为 $2.11 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 2 三峡库区森林植被层有机碳储量及碳密度

Table 2 The carbon storage & density of vegetation in Three Gorges Reservoir Area

森林类型 Forest types	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	碳密度 Carbon density ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	碳储量 Carbon biomass ($\times 10^6 \text{ t}$)	年固碳量 Annual carbon productivity ($\times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)	碳生产力 Average carbon NPP ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	75.34	27.48	20.70	270.95	3.60
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests	12.23	17.06	2.09	25.75	2.11
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	5.56	26.49	1.48	22.73	4.09
温性松林 Temperate pine forests	4.88	18.03	0.88	15.87	3.25
针叶混交林 Coniferous mixed forests	21.15	26.55	5.62	72.85	3.45
针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests	20.8	29.43	6.12	66.92	3.22
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	6.84	42.80	2.93	31.15	4.56
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests	29.47	28.24	8.32	96.54	3.28
竹林 Bamboo forests	3.29	19.19	0.63	16.62	5.05
灌木林 Shrubbery	81.39	9.34	7.60	228.61	2.81
经济林 Economic forests	11.43	20.51	2.35	36.06	3.16
平均 Average	—	24.10	—	—	3.50
总计 Total	272.39	—	58.70	884.01	—

3.2 三峡库区森林凋落物层有机碳密度及碳储量

凋落物储量和含碳率决定凋落物有机碳密度。各森林类型凋落物含碳率为 30.61% ~ 42.73%, 平均为 36.38%, 最高为马尾松林, 达到 $42.73\% \pm 6.27\%$, 最低为柏木林, 为 $30.61\% \pm 4.67\%$ 。库区杉木林单位面积凋落物储量最高, 达 $(10.78 \pm 9.99) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 因此其凋落物有机碳密度也最高, 达到 $4.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 随后依次为温性松林、马尾松林、针叶混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、竹林、针阔混交林、柏木林、灌木林、经济林单位面积凋落物储量最低, 仅为 $(1.36 \pm 0.48) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其凋落物有机碳密度仅为 $0.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从凋落物碳密度空间分布格局图可以看出(图 2), 库区凋落物有机碳密度主要 $2.00 \sim 4.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 加权平均值为 $2.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 呈现“东高西低”分布格局, 密度较高区域集中在巴东-秭归、巫山-巫溪、石柱-武隆及江津南部。

三峡库区森林生态系统凋落物有机碳总储量为 $6.67 \times 10^6 \text{ t}$ 。马尾松林面积最大, 其森林凋落物总储量最高, 为 $6.22 \times 10^6 \text{ t}$, 其凋落物有机碳总储量最高, 为 $2.66 \times 10^6 \text{ t}$, 竹林面积最小, 凋落物储量仅为 $22.40 \times 10^4 \text{ t}$, 其凋落物有机碳总储量为 $0.084 \times 10^6 \text{ t}$, 经济林单位面积凋落物储量最低, 凋落物总储量和碳储量也最低, 分别仅为 $0.16 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $0.048 \times 10^6 \text{ t}$ (表 3)。

3.3 三峡库区森林土壤层有机碳密度及碳储量

从表 4 可以看出, 三峡库区森林土壤 A 层有机碳密度平均值为 $5.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 柏木林 A 层土壤有机碳密度最高, 为 $8.77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其后依次为灌木林、落叶阔叶林、温性松林、杉木林、针叶混交林、竹林、针阔混交林、常绿阔叶林、马尾松林, 经济林最低, 仅 $4.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。B 层土壤有机碳密度平均值为 $3.47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 有机碳密度大小顺序依次为经济林、竹林、杉木林、温性松林、柏木林、落叶阔叶林、马尾松林、针叶混交林、针阔混交林、常绿阔叶林和灌木林。三峡库区森林土壤(A、B 层)有机碳密度加权平均值为 $9.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 不同森林类型土壤有机碳密度大小顺序为: 柏木林 $12.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、杉木林 $10.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、温性松林 $10.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、落叶阔叶林 $9.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、灌木林 $8.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、竹林 $9.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、经济林 $9.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、针叶混交林 $8.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、针阔混交林 $7.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、马尾松林 $7.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、常绿阔叶林 $6.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从土壤层碳密度空间分布图可以看出(图 3), 三峡库区绝大多数区域土壤层碳密度为 $40.0 \sim 110.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 库区土壤有机碳密度呈现“东高西低”分布格局, 密度较高区域为巴东-秭归、巫山-巫溪、石柱-武隆及江津南部。

土壤层有机碳储量统计结果表明(表 4), 三峡库区土壤有机碳储量总量为 $220.75 \times 10^6 \text{ t}$, 其中 A 层土壤碳储量为 $147.92 \times 10^6 \text{ t}$, B 层土壤碳储量 $72.81 \times 10^6 \text{ t}$ 。库区各森林类型土层有机碳储量分别为: 马尾松林

$53.89 \times 10^6 \text{ t}$; 柏木林 $14.94 \times 10^6 \text{ t}$; 杉木林 $6.03 \times 10^6 \text{ t}$; 温性松林 $4.92 \times 10^6 \text{ t}$; 针叶混交林 $17.38 \times 10^6 \text{ t}$; 针阔混交林 $15.29 \times 10^6 \text{ t}$; 常绿阔叶林 $4.54 \times 10^6 \text{ t}$; 落叶阔叶林 $26.00 \times 10^6 \text{ t}$; 灌木林 $64.22 \times 10^6 \text{ t}$; 经济林 $10.48 \times 10^6 \text{ t}$; 竹林 $3.07 \times 10^6 \text{ t}$ 。

表 3 三峡库区森林生态系统凋落物层有机碳密度及碳储量

Table 3 The carbon density & storage of litter in Three Gorges Reservoir Area

森林类型 Forest types	凋落物量 Litter ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	凋落物现存量 Litter biomass ($\times 10^6 \text{ t}$)	有机含碳率 Carbon content rates	有机碳密度 Density ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有机碳储量 Storage ($\times 10^6 \text{ t}$)
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	8.25	6.22	0.4273	3.53	2.66
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests	4.35	0.53	0.3478	1.51	0.19
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	10.78	0.60	0.4158	4.48	0.25
温性松林 Temperate pine forests	10.74	0.52	0.3739	4.02	0.20
针叶混交林 Coniferous mixed forests	8.17	1.73	0.3704	3.03	0.64
针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests	6.49	1.35	0.3508	2.28	0.47
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	8.49	0.58	0.3461	2.94	0.20
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests	8.62	2.54	0.3473	2.99	0.88
竹林 Bamboo forests	6.81	0.22	0.3747	2.55	0.08
灌木林 Shrubbery	3.81	3.10	0.3413	1.3	1.06
经济林 Economic forests	1.36	0.16	0.3061	0.42	0.048
平均 Average	7.08	—	0.3638	2.64	—
总和 Total	—	17.55	—	—	6.67

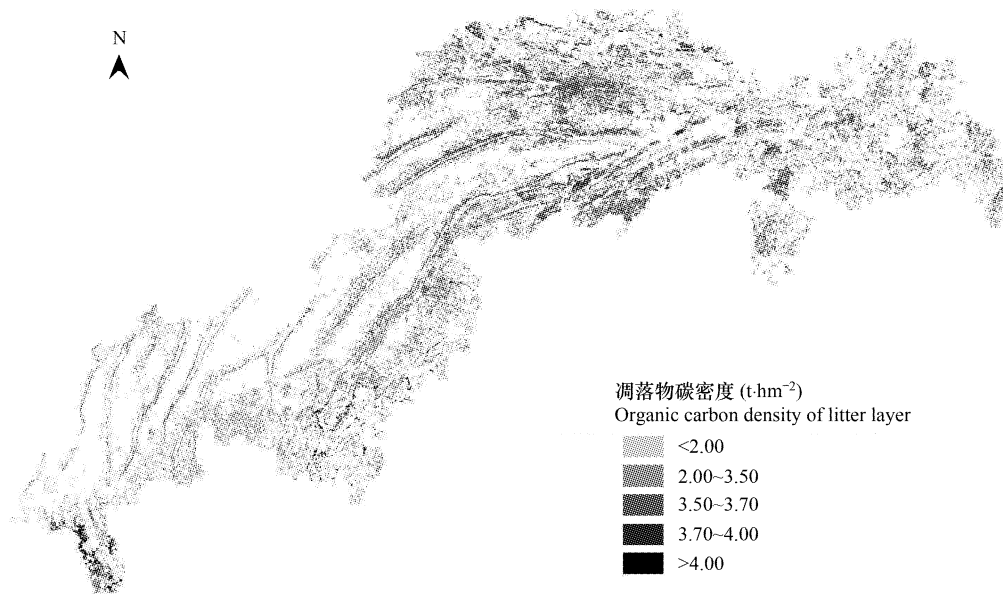


图 2 库区凋落物层碳密度分布

Fig. 2 Spatial distribution of litter carbon density in Three Gorges Reservoir Area

3.4 三峡库区森林生态系统总有机碳密度及碳储量

森林生态系统总有机碳密度为植被碳密度、凋落物碳密度和土壤有机碳密度之和。三峡库区森林生态系统统计结果显示(表 5), 森林生态系统平均碳密度为 $117.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各森林类型系统碳密度由高到低依次为 柏木林 $143.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、杉木林 $137.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、落叶阔叶林 $127.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、温性松林 $124.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、竹林 $118.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、经济林 $114.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、常绿阔叶林 $113.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、针叶混交林 $112.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、马尾松林 $105.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、针阔混交林 $102.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和灌木林 $93.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从生成森林生态系统有机碳密度空间分

表 4 三峡库区各森林类型土壤有机碳密度及碳储量

Table 4 Soil organic carbon density and storage of diverse forest types in Three Gorges Reservoir Area																		
森林类型 Forest types	A 层容重 Volume-weight of layer A soil (kg·cm ⁻³)	B 层容重 Volume-weight of layer B soil (kg·cm ⁻³)	A 层有机 含碳率 Organic carbon content rates of layer A soil (g·kg ⁻¹)		B 层有机 含碳率 Organic carbon content rates of layer B soil (g·kg ⁻¹)		A 层碳密度 Organic carbon density of layer A soil (kg·m ⁻²)		B 层碳密度 Organic carbon density of layer B soil (kg·m ⁻²)		土壤碳密度 Organic carbon density of soil (kg·m ⁻²)		A 层碳储量 Organic carbon storage of layer A soil (×10 ⁶ t)		B 层碳储量 Organic carbon storage of layer B soil (×10 ⁶ t)		土壤碳储量 Organic carbon storage of soil (×10 ⁶ t)	
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	1.33	1.47	16.82	10.59	4.47	2.97	7.45	32.33	21.48	53.89								
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests	1.34	1.49	32.74	16.19	8.77	3.76	12.53	10.46	4.49	14.94								
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	1.15	1.27	26.59	13.47	6.13	4.56	10.69	3.46	2.57	6.03								
温性松林 Temperate pine forests	1.09	1.18	28.34	16.17	6.17	4.09	10.26	2.96	1.96	4.92								
针叶混交林 Coniferous mixed forests	1.25	1.32	21.36	10.8	5.34	2.93	8.27	11.22	6.16	17.38								
针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests	1.31	1.38	18.01	13.09	4.7	2.41	7.11	10.10	5.18	15.29								
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	1.11	1.31	20.32	9.38	4.51	2.25	6.76	3.03	1.51	4.54								
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests	1.43	1.56	21.52	15.08	6.14	3.52	9.67	16.51	9.46	26.00								
竹林 Bamboo forests	1.33	1.45	17.75	12.19	4.72	4.97	9.69	1.50	1.57	3.07								
灌木林 Shrubbery	1.25	1.25	26.64	11.19	6.65	1.65	8.29	51.51	12.78	64.22								
经济林 Economic forests	1.63	1.78	13.18	10.15	4.3	5.01	9.31	4.84	5.64	10.48								
平均 Average	1.29	1.41	22.12	12.57	5.63	3.47	9.09	—	—	—								
合计 Total	—	—	—	—	—	—	—	147.92	72.81	220.74								

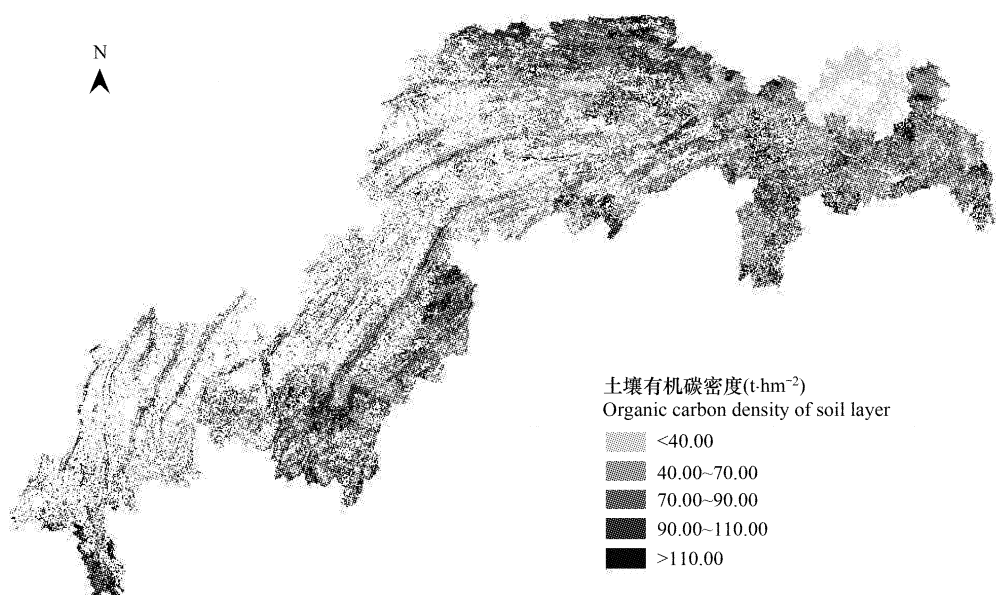


图3 土壤有机碳密度分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of soil organic carbon density in Three Gorges Reservoir Area

布图可以看出(见图4),三峡库区大部分区域森林生态系统有机碳密度在 $61.00 \sim 170.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。森林生态系统碳密度呈现“东高西低”的分布格局,巴东—秭归、巫山—巫溪、石柱—武隆及江津南部等区域有机碳密度较高。

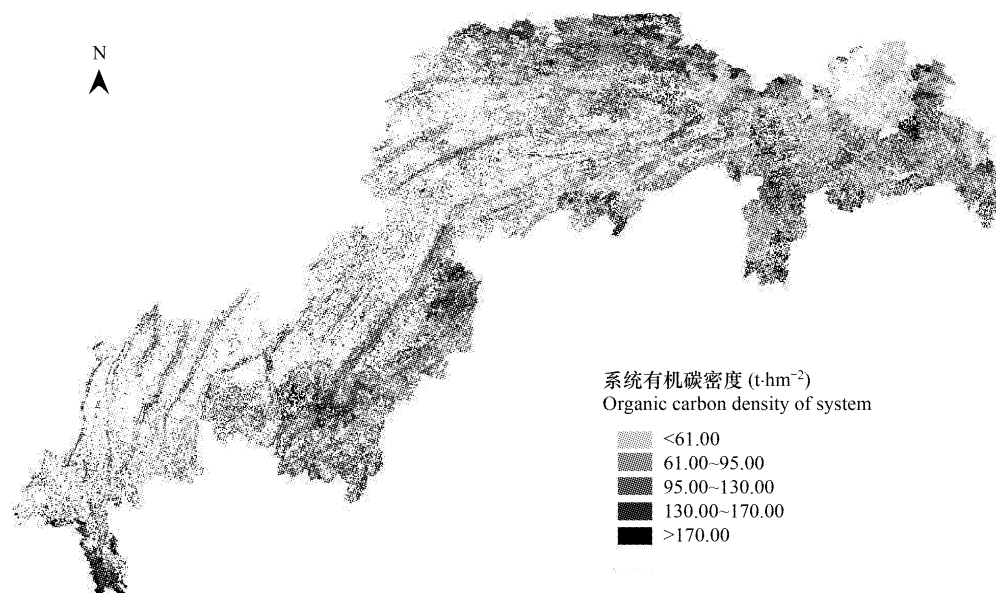


图4 三峡库区森林生态系统有机碳密度分布

Fig. 4 Spatial distribution of forest ecosystem organic carbon density in Three Gorges Reservoir Area

森林生态系统有机碳储量包括分为植被碳储量,凋落物碳储量和土壤有机碳储量。从总有机碳储量统计结果可以看出(表5),三峡库区森林生态系统总有机碳储量为 $286.14 \times 10^6 \text{ t}$,其中植被碳储量为 $58.72 \times 10^6 \text{ t}$,凋落物碳储量为 $6.67 \times 10^6 \text{ t}$,土壤碳储量为 $220.74 \times 10^6 \text{ t}$ 。分布面积最大的马尾松林总有机碳储量最高,为 $77.24 \times 10^6 \text{ t}$,其后依次为灌木林 $72.87 \times 10^6 \text{ t}$ 、落叶阔叶林 $35.20 \times 10^6 \text{ t}$ 、针叶混交林 $23.64 \times 10^6 \text{ t}$ 、针阔混交林

22.18 × 10⁶t、柏木林 17.22 × 10⁶t、经济林 12.87 × 10⁶t、常绿阔叶林 7.67 × 10⁶t、杉木林 7.76 × 10⁶t、温性松林 6.00 × 10⁶t,面积最小的竹林总有机碳储量最低,为 3.78 × 10⁶t。在系统有机碳库储量中,植被层有机碳所占总有机碳的比例在 9.99% ~ 37.76% 之间,土壤层为 59.64% ~ 88.63% 之间,凋落物层为 0.37% ~ 3.35% 之间。

表 5 三峡库区各森林类型总有机碳储量
Table 5 Organic carbon storage in different forest types in Three Gorges Reservoir Area

森林类型 Forest types	系统碳密度 System carbon density (t·hm ²)	系统碳储量 System carbon storage (×10 ⁶ t)	植被碳比例 Vegetation proportion (%)	凋落物碳比例 Litter proportion (%)	土壤碳比例 Soil proportion (%)
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	105.51	77.24	26.04	3.35	70.61
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests	143.87	17.22	11.86	1.05	87.09
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	137.87	7.76	19.21	3.25	77.54
温性松林 Temperate pine forests	124.65	6.00	14.46	3.23	82.31
针叶混交林 Coniferous mixed forests	112.28	23.64	23.65	2.70	73.66
针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests	102.81	21.88	28.63	2.22	69.16
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	113.34	7.67	37.76	2.59	59.64
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests	127.93	35.20	22.07	2.34	75.59
竹林 Bamboo forests	118.64	3.78	16.17	2.15	81.68
灌木林 Shrubbery	93.54	72.87	9.99	1.39	88.63
经济林 Economic forests	114.03	12.87	17.99	0.37	81.65
平均 Average	117.68	—	20.71	2.24	77.05
总计 Total	—	286.14			

4 结论与讨论

三峡库区森林优势树种不同器官含碳率变动范围为 44.59% ~ 54.45%;不同树种、不同器官的含碳率最大相差接近 10%,针叶林各器官的平均含碳率普遍高于阔叶林,与方运霆、黄从德等学者的研究结果基本一致^[22,23]。在评估区域森林生态系统碳储量过程中,由于树种繁多,获取树种不同器官的含碳量比较困难,国内外学者大多采用含碳量为 45.00% 或 50.00%,因此森林植被碳储量的估算结果存在一定误差。本研究植物含碳率的样品选择充分考虑了树木年龄、立地质量等多种因素,测定含碳量平均值为 49.27%,因此,选择 45.00% 作为平均含碳量来估算森林乔木层的碳储量可能产生较大的误差,以 50.00% 作为转换系数可以获取精度较高的结果,与黄从德的研究结论一致^[23]。

三峡库区大部分区域森林有机碳密度为 61.00 ~ 170.00 t·hm⁻²,平均碳密度为 117.68t·hm⁻²,低于我国森林生态系统(植被、凋落物层、土壤)碳密度 258.83 t·hm⁻² 的平均水平^[24]。在我国云杉、冷杉林碳密度最大,暖性针叶林最小^[24],大面积马尾松、杉木、柏木等人工林或低产次生林可能为三峡库区森林生态系统碳密度偏低的主要原因。三峡库区森林总有机碳密度较高区域主要为巴东-秭归、巫山-巫溪、石柱-武隆及江津南部等,也正好是三峡库区植被保存较好、生物量较高的区域^[19]。

三峡库区大部分区域森林植被层碳密度为 13.0 ~ 40.0t·hm⁻²,平均值为 24.15 t·hm⁻²,与黄从德、王兵等对四川省、江西省森林植被层碳密度值 18.47、25.38 t·hm⁻² 一致^[17,25],其中常绿阔叶林最高,达 42.80 t·hm⁻²,其后为针阔混交林、落叶阔叶林,森林植被层碳密度低于我国平均碳密度 57.07 t·hm⁻² 水平^[24],可能与三峡库区大面积的人工幼林或质量的次生林、疏林有关^[24,26],因此,加强保护、恢复和重建三峡库区的地带性植被——常绿阔叶林和扩大混交林和落叶阔叶林面积是增加区域森林碳素积累量的重要措施,对发挥区域森林生态系统的碳汇功能有着重要意义。三峡库区大部分区域森林凋落物有机碳密度为 2.00 ~ 4.00 t·hm⁻²,平均值为 2.74 t·hm⁻²,低于全国平均水平,与同纬度江西省水平相当^[24,25]。森林凋落物碳素积累主要取决于区域植被类型、水热因子、地域特点等。三峡库区森林主要为暖温性针叶林,落叶量少,水热充足,枯枝落叶分解快及人为活动较频繁等因素都会影响凋落物的积累。三峡库区森林土壤有机碳密度平均为 9.09

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于我国森林土壤平均碳密度 $19.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要因为三峡库区山高坡陡, 降雨量大且集中, 大面积的人工林树种单一、结构简单, 高强度的水土流失造成森林有机碳库的严重损失。因此, 低产低效林的改造和天然林的保护是发挥森林生态系统水土保持和碳汇功能的重要举措。

三峡库区森林生态系统不仅在保持水土、涵养水源等方面发挥了重要作用, 而且在我国森林碳库中占有重要的地位, 其总有机碳储量为 $286.14 \times 10^6 \text{ t}$, 其中植被层碳储量为 $58.72 \times 10^6 \text{ t}$, 占总有机碳的 20.52%; 凋落物碳储量为 $6.67 \times 10^6 \text{ t}$, 占 2.33%; 土壤碳储量为 $220.74 \times 10^6 \text{ t}$, 占 77.14%, 与前期我国许多学者的研究结果相当^[24,25]。分布面积最大的马尾松林总有机碳储量最高, 为 $77.24 \times 10^6 \text{ t}$, 占三峡库区森林有机碳总储量的 26.99%。马尾松林植被层、凋落物层和土壤有机碳储量均最高, 分别达到 $20.70 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $2.66 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $53.89 \times 10^6 \text{ t}$, 分别占森林植被层、凋落物层和土壤有机碳总储量的 35.26%、39.88% 和 24.41%, 由此可以看出, 碳贮量与碳密度有关, 但森林面积是决定因素^[24], 因此, 在提高森林质量的同时, 扩大森林面积是发挥森林碳汇功能最有效的途径。

References:

- [1] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U. S. Carbon Budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285, 574—577.
- [2] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 715—740.
- [2] Watson R T, Verardo D J. Land-use change and forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Houghton, Skole D L, Nobre C A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 4 (3): 301—304.
- [4] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate. *Unasylva*, 1996, 47: 3—10.
- [5] Fang J Y. Forest biomass carbon pool of the middle and high latitudes in North Hemisphere is probably much smaller than present estimates. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 635—638.
- [6] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320—2323.
- [7] Julia Glenday. Carbon storage and emissions offset potential in an African dry forest, the Arabuko-Sokoke Forest, Kenya. *Environ Monit Assess*, 2008, 142: 85—95.
- [8] Kurbanov E A, Post W M. Changes in area and carbon in forests of the middle ZAVOLGIE: A regional case study of Russian forests, *Climatic Change*, 2002, 55: 157—173.
- [9] Pibumrung P, Gajasenil N, Popan A. Profiles of carbon stocks in forest, reforestation and agricultural land, Northern Thailand. *Journal of Forestry Research*, 2008, 19(1): 11—18.
- [10] Manhas R K, Negi J D S, Rajesh Kumar, *et al.* Temporal assessment of growing stock, biomass and carbon stock Indian forests, *Climatic Change*, 2006, 74: 191—221.
- [11] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors. *Climatic Change*, 2006, 74: 175—189.
- [12] Christopher Potter, Peggy Gross, Steven Klooster. *et al.* Storage of carbon in U. S. forests predicted from satellite data, ecosystem modeling, and inventory summaries. *Climatic Change*, 2008, 90: 269—282.
- [13] Smiley G L, Kroschel J. Temporal change in carbon stocks of cocoa gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. *Agroforest Syst*, 2008, 73: 219—231.
- [14] Zhou X L, Peng C H, Dang Q L, *et al.* A simulation of temporal and spatial variations in carbon at landscape level: A case study for lake ABITIBI Model forest in ONTARIO, Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12: 525—543.
- [15] Cheng T R, Feng J, Ma Q Y. *et al.* Carbon pool and allocation of forest vegetations in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 33—44.
- [16] Analía Carrera, Jorge Ares, Juan Labraga, *et al.* Scenarios of future climate and land-management effects on carbon stocks in northern Patagonian shrublands. *Environmental Management*, 2007, 40: 944—957.
- [17] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Spatio-temporal variation of carbon storage in forest vegetation in Sichuan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2687—2692.
- [18] Ni J, Chen Z X, Dong M. A n ecogeographical regionalization for biodiversity in China. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(4): 370—382.

- [19] Zeng L X, Wang P C, Xiao W F, *et al.* Estimating vegetation biomass and productivity and their distribution patterns in the Three Gorges Reservoir region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3808—3816.
- [20] Xiao W F, Li J W, Yu C Q, *et al.* Terrestrial flora and fauna ecology in the Yangtze Three Gorges Reservoir. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2000. 5—11.
- [21] Ding G J, Wang P C, Yang R F. Studies on the dynamic change of the commercial biomass of masson pine stands and its modeling. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(1): 33—41.
- [22] Fang Y T, Mo J M, Peng S L, *et al.* Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1685—1694.
- [23] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966—975.
- [24] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518—522.
- [25] Wang B, Wei W J. Carbon storage and density of forests in Jiangxi province. *Jiangxi Science*, 2007, 25(6): 681—687.
- [26] 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.

参考文献:

- [5] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513—517.
- [15] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 等. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征. *生态学报*, 2008, 28(1): 33—44.
- [17] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林植被碳储量的时空变化. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2687—2692.
- [18] 倪健, 陈仲新, 董鸣. 中国生物多样性的生态地理区划. *植物学报*, 1998, 40(4): 370—382.
- [19] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发, 等. 三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局. *生态学报*, 2008, 28(8): 3808—3816.
- [20] 肖文发, 李建文, 于长青, 等. 长江三峡库区陆生动植物生态. 重庆: 西南师范大学出版社, 2000. 5—11.
- [21] 丁贵杰, 王鹏程, 严仁发. 马尾松纸浆商品用材林生物量变化规律及模型研究. *林业科学*, 1998, 34(1): 33—41.
- [22] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. *生态学报*, 2003, 23(9): 1685—1694.
- [23] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 966—975.
- [24] 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.
- [25] 王兵, 魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究. *江西科学*, 2007, 25(6): 681—687.
- [26] 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.