

4 种典型地带性森林生态系统碳含量与碳密度比较

王斌, 杨校生

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要: 以中国生态系统研究网络长期定位观测的热带、亚热带和温带地区 4 种地带性顶级森林群落类型, 即西双版纳热带季节雨林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林、哀牢山中山湿性常绿阔叶林和长白山阔叶红松林为基础, 分析比较 4 种森林类型的碳含量和碳密度及其空间分布格局。结果表明, 哀牢山和长白山植被碳含量略高于西双版纳和鼎湖山, 植被碳含量从大到小依次为乔木层、灌木层和草本层; 西双版纳总碳密度为 250.78 t/hm², 鼎湖山为 248.72 t/hm², 哀牢山为 530.13 t/hm², 长白山为 254.67 t/hm², 其中西双版纳、鼎湖山和长白山植被层碳密度高于土壤层碳密度, 而哀牢山土壤层碳密度要高于植被层碳密度。

关键词: 地带性森林; 碳含量; 碳密度

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2010)04-0464-06

Comparison of carbon content and carbon density of four typical zonal forest ecosystems

WANG Bin, YANG Xiao-sheng

(Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract: Based on the location observation data of the tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, the subtropical evergreen broadleaved forest in Dinghu Mountain, the moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain and the broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain, this paper analyzed and compared the spatial distribution patterns of carbon content and carbon density in four forest ecosystems. The results showed that the carbon contents of vegetation in Ailao Mountain and Changbai Mountain were higher than those in Xishuangbanna and Dinghu Mountain, the carbon contents of different layers in four forest ecosystems were ordered from larger to little as tree, shrub and herbage. The total carbon density was 250.78 t/hm² in Xishuangbanna, 248.72 t/hm² in Dinghushan Mountain, 530.13 t/hm² in Ailao Mountain and 254.67 t/hm² in Changbai Mountain. The carbon densities of vegetation in Xishuangbanna, Dinghu Mountain and Changbai Mountain were higher than those of soil, but it was opposite in Ailao Mountain.

Key words: zonal forest; carbon content; carbon density

随着全球气候问题日益严峻, 陆地生态系统在全球碳循环动力学中的作用受到越来越多的重视。森林维持的植被碳库约占全球植被碳库的 86%^[1], 维持的土壤碳库约占全球土壤碳库的 73%^[2]。同时, 森林生态系统具有较高的生产力, 每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 2/3^[3-4], 因此, 森林状况很大程度上决定了陆地生物圈是碳源

还是碳汇^[5]。近年来, 很多学者采用不同方法对森林生态系统碳含量与碳密度及其空间差异进行研究, 并取得了一系列研究成果^[6-13]。已有研究表明, 中国森林植被碳库主要集中在东北和西南地区, 平均碳密度以西南、东北以及西北地区较高^[14-15]。中国土壤碳密度大致是东部地区随纬度的增加而递增, 北部地区随经度减小而递减, 西部地区随纬度

收稿日期: 2009-11-24

基金项目: 中国林业科学研究院亚热带林业研究所项目(RISF6903); 国家生态系统观测研究台站网络建设项目(SY066J0220)

作者简介: 王斌(1978—), 男, 湖北石首人, 博士, 助理研究员, 从事生态系统服务功能研究, ylwangbin@sina.com.cn

减小而增加,最高土壤碳密度出现在寒冷的东北地区和青藏高原东南缘^[16-17]。由于采用的方法不同,加上森林生态系统碳密度和碳储量的空间异质性以及随时间变化的复杂性,对中国森林植被和土壤碳库的估算还存在较大的差异^[15-19]。相对于区域尺度的研究而言,目前还很少利用样地资料研究不同气候带森林生态系统碳含量与碳密度及其空间差异,因此,采用实测数据及能够定量确定陆地生态系统碳循环的通用方法,研究不同森林类型的碳含量和碳密度,对于提高中国森林生态系统碳循环研究水平具有重要意义。

近几年,中国生态系统研究网络(CERN)在单站水平上取得了很大的进展,但单站的长期定位监测、试验和研究具有明显的局限性,而多站按照统一规范开展的联网监测、试验和研究,可以揭示出更具普遍性的规律,解决地学和生物学等领域中更具复杂性的问题^[20]。笔者利用CERN长期定位观测的热带、亚热带和温带地区 4 种地带性顶级森林群落类型,即西双版纳热带季节雨林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林、哀牢山中山湿性常绿阔叶林和长白山阔叶红松林资料,分析比较 4 种森林类型的碳含量和碳密度分配特征及其差异,以期进一步了解中国不同气候区森林生态系统的碳循环及其对气候变化的响应。

1 样地自然条件概况

4 个样地均是 CERN 长期定位观测样地,分别属于西双版纳热带雨林生态系统研究站、鼎湖山森林生态系统研究站、哀牢山森林生态系统研究站和长白山森林生态系统研究站,样地保护完好,无放牧及森林砍伐,人为干扰活动较少。

热带季节雨林样地位于西双版纳勐仑自然保护区北片的核心地带,是热带北缘的顶级群落类型,以绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁

(*Terminalia myriocarpa* Huerch)为标志种;灌木层主要由乔木的幼树组成,较常见的灌木种类有染木(*Saprosma ternatum*)、包疮叶(*Measa indica*)、锈毛杜茎山(*Measa permollis*)等;草本层主要由乔木的幼苗和蕨类植物组成,较常见的草本种类有楼梯草(*Elatostema parvum*)、山壳骨(*Pseudoranthemum malaccense*)、莠竹(*Microstegium ciliatum*)等;凋落物厚度 0~3 cm。

亚热带季风常绿阔叶林样地位于鼎湖山自然保护区,植被保护良好,属群落演替顶级阶段,乔木层优势种为锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、云南银柴(*Aporosa yunnensis*)等;林下灌木以光叶山黄皮(*Randia canthioides*)、柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)为主;草本以沙皮蕨(*Hemigramma decurrans*)为主,层间植物比较丰富;凋落物厚度 0~3 cm。

中山湿性常绿阔叶林样地位于哀牢山徐家坝中心地带,属亚热带山地气候,干雨季分明,群落演替稳定,乔木树种主要由壳斗科(Fagaceae)、茶科(Theaceae)、樟科(Lauraceae)及木兰科(Magnoliaceae)组成;灌木层主要以禾本科的箭竹(*Fargesia spathacea*)为优势种并组成显著层片;草本以滇西瘤足蕨(*Plagiogyria communis*)、钝叶楼梯草(*Elatostema obtusum*)为主;凋落物厚度 0~5 cm。

阔叶红松林样地位于吉林省安图县二道白河镇,为原始森林干扰后自然演替的顶级群落,乔木层优势种为红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、假色槭(*Acer pseudosieboldianum*)等;林下灌木以东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)和光萼溲疏(*Deutzia glabrata*)为主;草本以毛缘苔草(*Carex pilosa*)、丝引苔草(*Carex remotiuscula*)为主;枯枝落叶及腐殖质层厚度 0~11 cm。各样地的具体地理环境条件见表 1。

表 1 样地的基本情况

Table 1 Description of study plots

样地	森林类型	平均林龄/ 年	面积/ m ²	海拔高度/ m	地理位置	坡度 /(°)	年均 气温/°C	>10 °C 年 积温/°C	年均降水 量/mm	年均相对 湿度/%
西双版纳	季节雨林	150	10 000	730	21°57'39.4"N, 101°12'00.4"E	22	21.8	4 387.9	1 506.3	86
鼎湖山	常绿阔叶	400	2 500	300	23°10'9.9"N, 112°32'22.64"E	30	21.0	7 495.7	1 996.0	80
哀牢山	中山湿性	130	10 000	2 488	24°32'53"N, 101°01'41"E	15	11.0	3 420.0	1 931.1	86
长白山	阔叶红松	140	1 600	784	42°24'11"N, 128°05'44"E	2	3.50	2 335.0	750.0	71

2 研究方法

2.1 生物量估算及碳含量测定

研究数据来自 CERN 所属西双版纳站、鼎湖山站、哀牢山站和长白山站提交的 2004—2005 年的定位观测数据,所有数据调查均按照 CERN 长期定位观测技术标准执行。由于 4 个台站已经按照要求统一建立了对应样地各树种的生物量估算模型(约 60 个树种、240 个方程),本研究借用这些已建立的模型计算 4 种森林类型的生物量。哀牢山的凋落物现存量每隔 4 月调查 1 次,西双版纳每隔 3 月调查 1 次,鼎湖山每年 12 月调查 1 次,长白山每年 8 月调查 1 次。

植被层碳含量测定是在永久样地的外围按照每层的优势种,每种选择 2~3 株,乔木分树干、枝、叶、根;灌木分茎、叶、根;草本分地上、地下部分层采样。在凋落物现存量调查的样地内,凋落枝、叶各取约 200 g 样品。将土壤层划分为 5 个层次(0~10 cm、>10~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm、>60~100 cm)分层采样。对土壤样品按粒级分类,

计算粒径>2 mm 的石砾含量。所有样品烘干至恒重,测定含水量,磨碎后,用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定碳含量;同时按 10 cm 一个等级测定 0~100 cm 各土层容重^[21-22]。

2.2 土壤有机碳密度计算

土壤有机碳密度是由土壤有机碳含量、土壤容重以及土体中粒径>2 mm 石砾的体积分数共同确定的,其计算公式参见文献[23]。

2.3 碳密度估算

生态系统总的碳密度由 3 部分组成,即植被层、凋落物层和土壤层,其中植被层主要由乔木、灌木和草本组成,凋落物层主要由枯枝落叶层和半分解层组成,土壤层则主要由腐殖质层和矿质土层组成。根据测定的不同层次的碳含量和生物量(或土壤容重),估算森林生态系统总的碳密度。

3 结果与分析

3.1 生物量组成

不同森林类型各层生物量结果见表 2。

表 2 不同森林类型各层生物量
Table 2 Biomass composition in different layers of four forest type

样地	乔木层生物量				灌木层生物量			草本层生物量		凋落物层生物量	
	干	枝	叶	根	枝	叶	根	地上部	地下部	枯枝	枯叶
西双版纳	222.76	35.28	4.20	63.10	1.18	0.21	0.40	0.60	0.49	0.51	1.62
鼎湖山	164.99	87.99	6.53	57.54	0.29	0.17	0.21	0.66	0.37	0.84	1.84
哀牢山	310.66	62.34	3.18	89.94	3.19	0.50	0.96	0.48	0.36	4.56	3.25
长白山	164.94	29.22	4.11	58.80	3.50	0.49	1.79	0.10	0.15	4.55	10.10

从表 2 可以看出,4 种森林类型植被层生物量从大到小依次为哀牢山、西双版纳、鼎湖山和长白山,热带亚热带森林植被层生物量高于温带森林,但不同层次之间有所区别,乔木层和草本层的变化规律基本一致,灌木层则相反。4 种森林类型凋落物现存量从大到小依次为长白山、哀牢山、鼎湖山和西双版纳,温带森林凋落枝叶现存量明显高于热带亚热带森林,与已有研究结论^[24]基本一致。全球热带雨林平均生物量约为 450 t/hm²,热带季雨林和常绿林约为 350 t/hm²,温带落叶针阔混交林约为 280 t/hm²^[25]。本研究中,西双版纳、鼎湖山和长白山的生物量稍低于全球平均水平,而哀牢山中山湿

性常绿阔叶林生物量则高于全球平均水平。

3.2 植被层碳含量和碳密度

不同森林类型植被层碳含量和碳密度计算结果列于表 3 和表 4。

从表 3 可以看出,4 种森林类型植被层碳含量在不同器官和不同层次中的分配不同,西双版纳和鼎湖山乔木层树干的碳含量最高,灌木层根的碳含量最高,而哀牢山和长白山乔木层叶的碳含量最高,灌木层茎的碳含量最高;除鼎湖山草本层叶的碳含量大于根的外,其他 3 种森林类型均是根的碳含量大于叶的。碳含量在不同层次植被的分布有较

表 3 不同森林类型植被层碳含量

Table 3 Carbon content of plant in different forest types

g/kg

样地	乔木层碳含量				灌木层碳含量			草本层碳含量		全林加权平均
	干	枝	叶	根	茎	叶	根	叶	根	
西双版纳	472.50	467.10	462.82	470.48	463.61	458.12	466.51	424.15	449.69	471.24
鼎湖山	478.07	463.15	434.29	456.01	449.49	448.40	452.83	428.12	410.14	468.86
哀牢山	508.61	508.67	529.01	503.63	504.21	469.19	501.07	471.67	471.83	507.62
长白山		490.85	529.26	487.78	493.36	433.81	464.53	407.11	428.38	490.42

长白山站乔木层采样时未区分干和枝；全林加权平均碳含量=总碳密度/总生物量。

表 4 不同森林类型植被层碳密度

Table 4 Carbon density of plant in different forest types

t/hm²

样地	乔木层碳密度				灌木层碳密度			草本层碳密度		全林合计
	干	枝	叶	根	茎	叶	根	叶	根	
西双版纳	105.25	16.48	1.94	29.69	0.55	0.10	0.19	0.25	0.22	154.67
鼎湖山	78.88	40.75	2.84	26.24	0.13	0.08	0.10	0.28	0.15	149.45
哀牢山	158.00	31.71	1.68	45.30	1.61	0.23	0.48	0.22	0.17	239.40
长白山		95.31	2.17	28.68	1.73	0.21	0.83	0.04	0.06	129.03

明显的规律，从大到小依次为乔木层、灌木层和草本层。目前通过植被碳含量实测值来估算碳密度的例子不多，学者们通常采用碳转换系数(0.45 或 0.50)来估算^[5-6]。本研究结果表明，由于树种组成以及种群结构的不同，不同气候区植被的碳转换系数略有不同，4 种森林类型中哀牢山和长白山的碳转换系数略高于西双版纳和鼎湖山。

从表 4 可以看出，4 种森林类型中，哀牢山碳密度最高，其次是西双版纳和鼎湖山，长白山碳密度最低。碳密度从大到小依次为乔木层、灌木层和草本层。赵敏^[19]利用中国第 4 次(1989—1993 年)森林资源调查资料，估算中国森林植被的平均碳密度为 41.321 t/hm²；周玉荣^[5]应用相同的森林资源调查资料，估算植被的平均碳密度为 57.07 t/hm²；本研究 4 种森林类型的平均碳密度为 168.137 t/hm²，从中可以看出，随着植被的保护和演替发育，中国森林将发挥巨大的碳汇作用。

王绍强等^[26]通过对中国陆地自然植被碳含量空间分布特征的研究，认为中国陆地总体上表现出东部地区植被碳密度和碳含量随纬度增加而降低的趋势；李海涛等^[27]对赣中亚热带森林植被碳密度的空间变化规律研究结果也表明，植被的碳密度与纬度存在显著的相关关系，随着纬度增加植被碳密

度递减。从本研究结果来看，除哀牢山乔木层碳密度较高、鼎湖山灌木层碳密度较低之外，4 种森林类型不同层次碳密度地带性变化的总趋势是乔木层和草本层的碳密度随纬度增加而降低，灌木层的碳密度随纬度增加而增加。

3.3 凋落物层碳含量和碳密度

不同森林类型凋落物层碳含量和碳密度计算结果如表 5 所示。

表 5 不同森林类型凋落物层的碳含量和碳密度

Table 5 Carbon content and carbon density of litterfall in different forest types

样地	碳含量/(g·kg ⁻¹)			碳密度/(t·hm ⁻²)		
	凋落枝	凋落叶	加权平均	凋落枝	凋落叶	合计
西双版纳	458.33	467.17	465.05	0.23	0.76	0.99
鼎湖山	471.44	528.00	507.46	0.39	0.97	1.36
哀牢山	526.44	546.25	533.93	2.40	1.77	4.17
长白山	471.94	512.16	499.66	2.15	5.17	7.32

从表 5 可以看出，4 种森林类型凋落叶的碳含量均高于凋落枝，哀牢山凋落枝和凋落叶的碳含量最高，西双版纳凋落枝和凋落叶的碳含量最低。和植被乔木层、灌木层枝叶碳含量的平均值相比，叶凋落物的碳含量增加，而枝在凋落后的变化情况不同，鼎湖山和哀牢山的碳含量增加，西双版纳和长

白山的碳含量降低。

从4种森林类型分布的纬度梯度来看,凋落物层碳密度随纬度增加而增加的趋势明显,温带针阔混交林凋落物碳密度明显高于热带亚热带阔叶林。吕晓涛^[28]采用森林年凋落量计算西双版纳热带季节雨林凋落物层的碳密度为4.835 t/hm²,远高于本研究结论。考虑到热带季节雨林凋落物分解迅

速,笔者认为采用凋落物现存量表示凋落物层的碳密度更合理。

3.4 土壤层的碳含量和碳密度

不同森林类型土壤层的碳含量和碳密度计算结果列于表6和表7。

表6 不同森林类型土壤层的碳含量
Table 6 Carbon content of soil in different forest types

样地	碳含量/(g·kg ⁻¹)									
	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm	>30~40 cm	>40~50 cm	>50~60 cm	>60~70 cm	>70~80 cm	>80~90 cm	>90~100 cm
西双版纳	17.34	10.31	7.17	7.17	4.78	4.78	4.43	4.43	4.43	4.43
鼎湖山	31.40	11.89	10.21	10.21	5.18	5.18	5.15	5.15		
哀牢山	122.05	82.34	58.94	58.94	40.87	40.87	29.62	29.62	29.62	29.62
长白山	104.70	17.70	4.95	3.87	3.87	3.43	3.43	3.60	3.60	3.60

表7 不同森林类型土壤层的碳密度
Table 7 Carbon density of soil in different forest types

样地	碳密度										合计
	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm	>30~40 cm	>40~50 cm	>50~60 cm	>60~70 cm	>70~80 cm	>80~90 cm	>90~100 cm	
西双版纳	21.10	13.62	10.38	10.63	6.74	7.07	6.56	6.28	6.28	6.45	95.11
鼎湖山	28.79	14.86	12.69	12.69	7.94	7.94	6.50	6.50			97.91
哀牢山	51.60	40.90	32.48	31.23	25.15	26.92	19.61	19.22	19.69	19.76	286.56
长白山	47.81	22.66	7.97	6.48	6.17	5.42	5.33	5.57	5.49	5.42	118.32

4种森林类型中,哀牢山中山湿性常绿阔叶林和长白山阔叶红松林具有较明显的腐殖质层,0~10 cm土层内的碳含量主要反映的是土壤腐殖质层的碳含量情况。从表6可以看出,4种森林类型0~100 cm(鼎湖山80 cm)土层的平均碳含量从大到小依次为哀牢山、鼎湖山、长白山和西双版纳。随着采样深度增加,土壤层碳含量逐渐降低,其中长白山腐殖质层(0~10 cm)到矿质土层(>10~20 cm)的碳含量降低最明显,相差6倍左右。从20 cm开始,不同采样深度土壤层的碳含量从大到小依次是哀牢山、鼎湖山、西双版纳和长白山,并且长白山矿质土层的碳含量要明显小于其他3种森林类型。

中国土壤有机碳库的分布格局存在由热带雨林到北方针叶林之间土壤碳密度随纬度升高而增加的趋势^[16]。从表7可以看出,除哀牢山外,本研究支持这一结论。形成这种格局主要是由于热带亚热带地区高温多湿,使得土壤微生物活动加剧,土壤中

有机质易于分解,而温带阔叶红松林全年平均气温较低,凋落物C/N比值高,不易分解,土壤表层的腐殖质积累过程明显,从而使得土壤有机碳积累多。

全球土壤平均碳密度约为104.00~107.70 t/hm²^[29-30]。王绍强等^[16]应用中国第1次土壤普查资料估算中国陆地生态系统土壤有机碳平均密度为108.30 t/hm²。从表7可以看出,西双版纳和鼎湖山土壤碳密度低于全国平均值,而哀牢山和长白山高于全国平均值。4种森林类型总的土壤碳密度平均值为149.473 t/hm²,是全球以及中国土壤碳密度平均值的1.4倍左右。从森林演替角度来看,中国森林土壤具有一定碳汇能力。

3.5 总碳密度比较

不同森林类型总碳密度计算结果如表8所示。从大到小依次为哀牢山、长白山、西双版纳和鼎湖山,哀牢山中山湿性常绿阔叶林的碳密度最高,其他3种森林类型总的碳密度相差不大。西双版纳、

鼎湖山和长白山植被层的碳密度高于土壤层的碳密度，而哀牢山土壤层的碳密度要高于植被层的碳密度。

表 8 4 种森林类型不同层次的碳密度

Table 8 Carbon density of different layers in four forest types t/hm²

样地	碳密度			合计
	植被层	凋落物层	土壤层	
西双版纳	154.67	1.00	95.11	250.78
鼎湖山	149.45	1.36	97.91	248.72
哀牢山	239.40	4.17	286.56	530.13
长白山	129.03	7.32	118.32	254.67

4 小 结

不同森林生态系统碳含量和碳密度通常存在较大差异。受研究条件限制，已有关于森林生态系统碳密度地带性分布规律研究中^[16,26-27]，很少从样地角度研究这种差异，这主要是因为某一区域范围内，森林生态系统的碳密度受林分和立地因子的影响，各森林类型的主要林分因子(如林分年龄)和立地因子(如海拔、坡度)存在较大差异，使结果不存在可比性。本研究所选的 4 种森林类型，均属于地带性顶级森林群落类型，碳密度可认为是相同气候条件下森林生态系统可蓄积的最大碳量，因此，4 种森林类型碳含量和碳密度的差异，对于研究森林生态系统碳密度的地带性分布规律具有一定指导意义。同时，通过将森林生态系统的观测数据与当地干扰程度不同的森林生态系统进行比较，可用于指导区域森林的保护、经营和管理，使其蓄积更多的碳，这对减缓全球大气 CO₂ 浓度升高也有着重要意义。通过与已有研究结论的比较可以看出，无论是从植被层的碳密度还是从土壤层的碳密度来看，中国森林植被都具有巨大的碳汇潜力，因此，合理经营与管理现有森林植被意义重大。

衷心感谢中国生态网络研究中心提供数据支持。

参考文献:

- [1] Woodwell G M ,Whittaker R H ,Reiners W A ,et al . The biota and the world carbon budget[J] . Science , 1978 , 199 : 141-146 .
- [2] Post W M , Emanuel W R , Zinke P J , et al . Soil carbon pools and world life zones[J] . Nature , 1982 , 298 : 156-159 .
- [3] Kramer P J . Carbon dioxide concentration , photosynthesis , and dry matter production[J] . Bio Science , 1981 , 31 : 29-33 .
- [4] Waring R H , Schlesinger W H . Forest Ecosystems : Concepts and Management[M] . London : Academic Press , 1985 .
- [5] 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[J] . 植物生态学报 , 2000 , 24(5) : 518-522 .
- [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 : 2320-2323 .
- [7] Kurbanov E A , Post W M . Changes in area and carbon in forests of the middle Zavołgie : A regional case study of Russian forests [J] . Climatic Change , 2002 , 55 : 157-173 .
- [8] Zhao M , Zhou G S . Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors [J] . Climatic Change , 2006 , 74 : 175-189 .
- [9] Pibumrung P , Gajasenil N , Popan A . Profiles of carbon stocks in forest , reforestation and agricultural land , Northern Thailand[J] . Journal of Forestry Research , 2008 , 19(1) : 11-18 .
- [10] Potter C , Gross P , Klooster S , et al . Storage of carbon in U . S . forests predicted from satellite data , ecosystem modeling , and inventory summaries[J] . Climatic Change , 2008 , 90 : 269-282 .
- [11] Piao S L , Fang J Y , Ciais P , et al . The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J] . Nature , 2009 , 458 : 1009-1013 .
- [12] 侯琳 , 雷瑞德 , 王得祥 , 等 . 秦岭火地塘林区油松群落乔木层的碳密度[J] . 东北林业大学学报 , 2009 , 37(1) : 23-24 .
- [13] 王立海 , 孙墨珑 . 小兴安岭主要树种热值与碳含量 [J] . 生态学报 , 2009 , 29(2) : 953-959 .
- [14] 王效科 , 冯宗炜 , 欧阳志云 . 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J] . 应用生态学报 , 2001 , 12(1) : 13-16 .
- [15] 徐新良 , 曹明奎 , 李克让 . 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J] . 地理科学进展 , 2007 , 26(6) : 1-9 .
- [16] 王绍强 , 周成虎 , 李克让 , 等 . 中国土壤有机碳库及其空间分布特征分析[J] . 地理学报 , 2000 , 55(5) : 533-544 .

(下转第 473 页)