

网络出版时间:2012-04-16 15:40

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120416.1540.023.html>

广西沙塘林场马尾松和杉木人工林的碳储量研究

陶玉华^{1,2}, 冯金朝¹, 曹书阁², 郭 耆², 向达永²

(1 中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081; 2 广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004)

【摘要】【目的】量化广西沙塘林场马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林碳储量,为评价其碳汇功能和可持续经营提供依据。【方法】在广西沙塘林场选择处于中龄和成熟期的马尾松和杉木人工林,设置样地测算乔木、林下植被和枯落物的生物量,按20 cm分层挖取样地0~60 cm土层土样,最后依据有关方程,计算马尾松和杉木中龄和成熟人工林生态系统的含碳率和碳储量。【结果】马尾松、杉木人工林林下植被含碳率变化于40.06%~45.23%,枯落物含碳率为40.79%~46.06%,0~60 cm土层含碳率变化于0.34%~1.26%。马尾松和杉木人工林生态系统平均碳储量分别为168.36和128.08 t/hm²,其乔木层的平均碳储量分别为106.33和54.8 t/hm²,分别占总碳储量的63.15%和42.79%;土壤平均碳储量分别为54.96和67.33 t/hm²,其分别占总碳储量的32.64%和52.57%;其林下植被和枯落物平均碳储量分别占总碳储量的1.28%,1.02%和2.93%,3.63%。【结论】马尾松人工林总碳储量以成熟林显著高于中龄林,杉木则以中龄林略高于成熟林;土壤和乔木层碳储量是马尾松和杉木人工林生态系统碳储量的主体部分,而林下植被和枯落物对碳储量的贡献较小。

【关键词】 马尾松;杉木;含碳率;碳储量;人工林

【中图分类号】 Q948;S718.55

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)05-0038-07

Study on carbon storage of *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata* plantations at Shatang, Guangxi Province

TAO Yu-hua^{1,2}, FENG Jin-chao¹, CAO Shu-ge², GUO Qi², XIANG Da-yong²

(1 College of Life and Environmental Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China;

2 Guangxi Eco-Engineering Vocational and Technical College, Liuzhou, Guangxi 545004, China)

Abstract: 【Objective】The carbon storage of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantation in Guangxi Shatang Forest Farm were estimated, which can offer a basic reference for evaluating forest carbon sequestration and forest sustainable management. 【Method】Based on aboveground, soil sample plots, and biomass regression equation, the biomass, carbon content, storage in middle-aged and mature forests of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation ecosystems were quantified. 【Result】The results show that the carbon content (percent of dry weight) of the understory layer in all plantations at middle-aged and mature age ranged from 40.06%—45.23%, while the content in the litter ranged from 40.79%—46.06%, the carbon content of soil from 0—60 cm depth ranged from 0.34%—1.26%. The total carbon storage of *P. massoniana*, *C. lanceolata* plantations was 168.36 and 128.08 t/hm² respectively, the carbon storage of tree layer of *P. massoniana*, *C. lanceolata* plantations accounted for 63.15% and 42.79% of the entire stored carbon within each of the respective ecosystems; The carbon stored in the soil of *P. massoniana*, *C. lanceolata* plantations within the 0—60 cm depth was 54.96 and 67.33 t/hm² respectively, account-

* [收稿日期] 2011-11-07

[基金项目] 中央民族大学“985工程”项目(MUC98507-08, MUC98504-14)

[作者简介] 陶玉华(1968—),女,内蒙古兴安盟人,副教授,在读博士,主要从事森林生态学研究。E-mail: tyh7528@hotmail.com

[通信作者] 冯金朝(1964—),男,河南洛阳人,教授,博士生导师,主要从事植物生态学研究。E-mail: jchfeng@263.net

ing for 32.64% and 52.57% of the entire carbon stored within each of the respective ecosystems; The carbon storage percentage of understory and litter ranged from 1.02%—3.63%. 【Conclusion】 For the total carbon storage, mature *P. massoniana* plantation ecosystem was significantly higher than its middle-aged forest, while middle-aged *C. lanceolata* plantation ecosystem was slightly higher than its mature forest. The carbon stored in the tree layer and soil combined accounted for the majority of the carbon stored within these plantation systems, whereas the carbon stored in the understory and litter contributed the less to the total carbon stock.

Key words: *Pinus massoniana*; *Cunninghamia lanceolata*; carbon content; carbon storage; plantation

森林生态系统是地球生物圈的重要组成部分,储存了陆地生态系统中大部分的有机碳,其中地上部分占80%,地下部分占40%^[1],其在调节全球碳平衡、减缓大气中CO₂等温室气体浓度上升以及稳定全球气候剧变等方面具有不可替代的作用^[2]。随着气候变化问题的日益突出,对森林生态系统碳储量的研究成为了热点问题,因为它是估算森林生态系统向大气吸收和排放含碳气体的关键因子^[3]。量化森林碳储量是碳循环研究的基础,可为评价森林的碳汇功能和森林的可持续经营提供数据参考。

马尾松和杉木是我国南方具有代表性的人工林树种,在广西栽培历史悠久,马尾松(*Pinus massoniana*)具有耐干旱贫瘠、适应性强、用途广、造林成本低和成林容易等优点,是南方荒山绿化的先锋树种^[4];杉木(*Cunninghamia lanceolata*)生长快、材质好,抗虫耐腐性强,易管理^[5];二者在国民经济和林业建设中均占有极为重要的地位。有关马尾松和杉木人工林生态系统生物量和碳储量的研究较多,主要涉及造林密度对马尾松和杉木人工林碳储量的影响^[6-7]、马尾松和杉木混交林生物量和碳储量的分配^[8-9]、不同发育阶段马尾松和杉木林生物量和碳储量的变化^[10-11],以及连植对杉木生物量和碳储量碳素积累的影响^[12]。马尾松和杉木是柳州市内的主要人工林树种,柳州市是广西的工业重镇,因此研究柳州市的碳收支平衡意义重大。本研究以位于柳州市郊的广西沙塘林场马尾松和杉木人工林为调查对象,比较其中龄林和成熟林碳储量的分配规律,以期为该地区以碳汇为经营目的的森林经营管理提供数据参考,同时为在该地区进一步开展碳循环研究提供数据支持。

1 试验地概况

试验地广西沙塘林场位于广西柳州市柳北区沙塘北面,地理坐标为东经108°17'11"~108°24'52",北纬24°27'42"~24°30'07"。主要地貌类型为丘陵。

最高海拔242.6 m,最低海拔99.1 m。属南亚热带季风气候区,光照充足,热量丰富,雨热同季、夏湿冬干,干湿季节明显,年均气温20.1℃,年均日照时数1558 h,年均降雨量1429.7 mm,年均蒸发量1599.8 mm,相对湿度78%,无霜期长达356.8 d。土壤种类主要为砂岩发育成的红壤。森林植被以马尾松(*P. massoniana*)、杉木(*C. lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus* sp.)为主,灌木植被主要有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹(*Melastoma intermedium*)、白背桐(*Mallotus apelta*)、山苍子(*Litsea cubeba*)等,林下植被有凤尾蕨(*Dicranopteris dichotoma*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、茅草(*Imperata cylindrica*)、铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)等。

2 研究方法

2.1 生物量的测定

2.1.1 乔木 选择立地条件相似的马尾松和杉木的中龄及成熟人工林(表1),在每种类型林分内于上、中、下坡位分别设立20 m×30 m样地,在样地内进行每木调查,测量树高和胸径。通过文献对比,找出已发表的广西境内杉木和马尾松生物量与测树因子之间(胸径、树高)的关系方程($W = a(D^2H)^b$,其中 W 、 D 、 H 分别为树木各组分的生物量、胸径和树高, a 、 b 为参数);马尾松和杉木地下根的生物量采用根冠比来计算^[13],充分考虑经纬度、气候、林龄、造林密度等条件尽可能相似的试验地的研究结果,通过回归方程分别计算2种人工林乔木层的生物量(表2)。

2.1.2 林下植被和枯落物 在20 m×30 m样地内分别设立3个1 m×1 m小样方,采用收获法收集灌木、草本和枯落物,称其鲜质量,将材料带回实验室,置于烘箱中(80℃)烘干至恒质量,称其干质量,再分别换算成单位面积林下植被和枯落物的生物量。

表 1 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林研究样地概况

Table 1 Descriptions of selected sites of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi

树种 Species	发育阶段 Growing stage	密度/(株·hm ⁻²) Density	树高/m Height	胸径/cm DBH
马尾松 <i>P. massoniana</i>	中龄林 Middle-aged forest	1 233	12.7	16.3
	成熟林 Mature forest	628	24.3	26.0
杉木 <i>C. lanceolata</i>	中龄林 Middle-aged forest	1 422	15.8	16.1
	成熟林 Mature forest	1 139	17.2	15.9

表 2 广西沙塘林场马尾松和杉木树木生长因子与生物量的关系方程

Table 2 Biomass equation of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi

树种 Species	回归方程 Formulars	相关系数 Related coefficient	文献来源 Sources
杉木 <i>C. lanceolata</i>	$W_{干}=0.037(D^2H)^{0.8808}$	$r=0.9972$	[13]
	$W_{枝}=0.0038(D^2H)^{0.9434}$	$r=0.9822$	
	$W_{叶}=0.0186(D^2H)^{0.7089}$	$r=0.9584$	
	$W_{幼龄林根/冠}=0.227$		
	$W_{中龄林根/冠}=0.12$		
	$W_{成熟林根/冠}=0.08$		
马尾松 <i>P. massoniana</i>	$W_{干}=0.0222(D^2H)^{0.9829}$	$r=0.9954$	[13]
	$W_{枝}=0.0013(D^2H)^{1.2810}$	$r=0.9951$	
	$W_{叶}=0.0025(D^2H)^{0.8943}$	$r=0.9866$	
	$W_{幼龄林根/冠}=0.04$		
	$W_{中龄林根/冠}=0.05$		
	$W_{成熟林根/冠}=0.165$		

2.2 含碳率的测定

收集林下植被层和枯落物层样品,经烘干、粉碎、过筛后用重铬酸钾加热法测定含碳率。在每个样地分别设置 3 个土壤取样点,在每个样点挖取深约 60 cm 的土壤剖面,每个剖面按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 3 层环刀土取样,测定各层土壤容重。在各层取新鲜土样,风干过筛后用于含碳率测定。

2.3 碳储量的计算

乔木、林下植被和枯落物的碳储量通过其生物量和含碳率计算,其中,乔木碳储量的计算采用国际上常用的转换系数 0.5^[14];土壤碳储量通过土壤容重及其含碳率计算,具体公式如下^[15]:

$$S_{SOD} = \sum_{i=1}^n (C_i \times P_i \times T_i) 10^{-1}.$$

式中: S_{SOD} 为特定深度的土壤有机碳储量(t/hm²), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(g/kg), P_i 为第 i 层土壤容

重(g/cm³), T_i 为第 i 层土层厚度(cm), n 为土层数。

3 结果与分析

3.1 马尾松和杉木人工林土壤、林下植被及枯落物的含碳率

3.1.1 土壤含碳率 从表 3 可见,马尾松和杉木人工林 0~20 cm 土层土壤含碳率在 0.66%~1.26%,20~40 cm 土层土壤含碳率在 0.44%~0.75%,40~60 cm 土层土壤含碳率在 0.34%~0.58%,各林分土壤含碳率均随土层深度的增加而递减;杉木林地各土层土壤含碳率均高于马尾松(中龄林 0~20 cm 土层除外),除马尾松林 0~20 cm 土层土壤含碳率在中龄林与成熟林间有显著差异外($P<0.05$),各林分土壤含碳率在中龄林与成熟林间差异均不显著($P>0.05$)。马尾松和杉木林地土壤容重基本上表现为随着土层深度增加而增大。

表 3 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林林地的土壤含碳率及土壤容重

Table 3 Soil carbon content and bulk densities of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi

树种 Species	发育阶段 Growing stage	土壤含碳率/% Soil carbon content			土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
马尾松 <i>P. massoniana</i>	中龄林 Middle-aged forest	1.26 a	0.65 a	0.49 a	1.32	1.44	1.46
	成熟林 Mature forest	0.66 b	0.44 a	0.34 a	1.51	1.53	1.51
杉木 <i>C. lanceolata</i>	中龄林 Middle-aged forest	1.04 a	0.75 a	0.58 a	1.48	1.54	1.55
	成熟林 Mature forest	1.04 a	0.75 a	0.56 a	1.41	1.47	1.45

注:同一树种同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 4,5 同。

Note: To the same species, values in same column with different letters mean significant difference ($P<0.05$). Table below is the same.

3.1.2 林下植被和枯落物含碳率 由表 4 可以看出,马尾松和杉木林下植被含碳率为 40.06%~45.23%;其中,马尾松中龄林和成熟林的林下植被含碳率接近,彼此间差异不显著($P>0.05$),而杉木成熟林含碳率显著高于其中龄林($P<0.05$)。各林

分枯落物含碳率为 40.79%~46.06%;其中,马尾松成熟林枯落物含碳率高于中龄林,但差异不显著($P>0.05$);而杉木成熟林枯落物显著低于其中龄林($P<0.05$);在所有林分中,以杉木中龄林枯落物的含碳率最高。

表 4 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林林下植被及枯落物的含碳率

Table 4 Carbon content of understory and litter of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi %

树种 Species	发育阶段 Growing stage	林下植被含碳率 Understory carbon content	枯落物含碳率 Litter carbon content
马尾松 <i>P. massoniana</i>	中龄林 Middle-aged forest	42.43 a	42.91 a
	成熟林 Mature forest	42.54 a	44.69 a
杉木 <i>C. lanceolata</i>	中龄林 Middle-aged forest	40.06 a	46.06 a
	成熟林 Mature forest	45.23 b	40.79 b

3.2 马尾松和杉木人工林生态系统的碳储量及其分配

马尾松和杉木人工林生态系统碳储量主要由乔木层、林下植被、枯落物、土壤的碳储量 4 部分组成,

根据不同层次的生物量及其相应的含碳率,可计算出 2 个树种人工林生态系统不同层次的碳储量,结果见表 5。

表 5 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林生态系统的碳储量及其分配比例

Table 5 Carbon storage distribution and percentage of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi

树种 Species	发育阶段 Growing stage	乔木层 Tree layer		林下植被 Understory		枯落物 Litter		土壤 Soil		总碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Total carbon storage
		碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	
马尾松 <i>P. massoniana</i>	中龄林 Middle-aged forest	53.85 a	43.00	1.01 a	0.81	4.16 a	3.32	66.21 a	52.87	125.23 a
	成熟林 Mature forest	158.80 b	75.09	3.30 b	1.56	5.69 a	2.69	43.71 b	20.67	211.49 b
杉木 <i>C. lanceolata</i>	中龄林 Middle-aged forest	58.38 a	43.13	0.20 a	0.15	4.61 a	3.41	72.19 a	53.33	135.37 a
	成熟林 Mature forest	51.22 a	42.41	2.40 b	1.99	4.69 a	3.88	62.46 a	51.71	120.78 a

3.2.1 乔木层 由表 5 可以看出,马尾松乔木层碳储量表现为成熟林显著大于中龄林,中龄林和成熟林的乔木层碳储量占总碳储量的比例分别为 43.00%和 75.09%;杉木中龄林乔木层碳储量略高于其成熟林,二者差异不显著,分别占总碳储量的 43.13%和 42.41%。马尾松成熟林乔木层碳储量高于杉木成熟林,杉木中龄林乔木碳储量与马尾松中龄林接近。可见,乔木层碳储量在人工林生态系统总碳储量中占据主体地位。

3.2.2 林下植被 由表 5 可见,马尾松中龄林和成熟林林下植被碳储量分别为 1.01 和 3.3 t/hm^2 ,中龄林显著低于成熟林($P<0.05$),二者占总碳储量的比例分别为 0.81%和 1.56%;杉木中龄林和成熟林林下植被碳储量分别为 0.20 和 2.40 t/hm^2 ,中龄林显著低于成熟林($P<0.05$),二者占总碳储量的比例分别为 0.15%和 1.99%。可见,马尾松和杉木人工林林下植被的碳储量对总碳储量的贡献率较

低。

3.2.3 枯落物 由表 5 可知,马尾松中龄林和成熟林枯落物碳储量分别为 4.16 和 5.69 t/hm^2 ,分别占其总碳储量的 3.32%和 2.69%;杉木中龄林和成熟林枯落物碳储量分别为 4.61 和 4.69 t/hm^2 ,分别占其总碳储量的 3.41%和 3.88%。可见,马尾松和杉木人工林枯落物的平均碳储量略高于林下植被。

3.2.4 土壤 由表 5 可以看出,杉木人工林土壤碳储量高于马尾松;马尾松中龄林土壤碳储量显著高于成熟林($P<0.05$),分别占其总碳储量的 52.87%和 20.67%;杉木中龄林和成熟林土壤碳储量分别为 72.19 和 62.46 t/hm^2 ,二者差异不显著,分别占其总碳储量的 53.33%和 51.71%。可见,土壤碳储量在马尾松和杉木人工林生态系统的总碳储量中也占有重要地位。

由表 6 可知,马尾松和杉木人工林土壤平均碳储量分别为 54.96 和 67.33 t/hm^2 ,在 0~60 cm 土

层深度内,均随着土层深度的增加而降低;但同一土层内 2 个树种中龄林与成熟林间的土壤碳储量均无显著差异($P>0.05$);马尾松中龄林和成熟林 0~20 cm 土层土壤碳储量分别占整个土壤碳储量的

50.45%和 45.76%,杉木中龄林和成熟林 0~20 cm 土层土壤碳储量分别占整个土壤碳储量的 42.82%和 46.86%。可见,0~20 cm 土层土壤碳储量是土壤碳储量的主体。

表 6 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林各土层土壤碳储量及其分配比例

Table 6 Soil carbon storage and percentage of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation in Shatang, Guangxi

树种 Species	发育阶段 Growing stage	0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm		0~60 cm
		碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage	比例/% Ratio	碳储量/ ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon storage
<i>P. massoniana</i>	中龄林 Middle-aged forest	33.40 Aa	50.45	18.52 Ab	27.97	14.29 Abc	21.58	66.21 A
	成熟林 Mature forest	20.00 Aa	45.76	13.36 Ab	30.57	10.35 Abc	23.68	43.71 B
<i>C. lanceolata</i>	中龄林 Middle-aged forest	30.91 Aa	42.82	23.22 Aab	32.17	18.06 Abc	25.02	72.19 A
	成熟林 Mature forest	29.27 Aa	46.86	21.99 Aab	35.21	11.20 Abc	17.93	62.46 A

注:同一树种同列数据后标不同大写字母表示林分间差异显著($P<0.05$),同一树种同行数据后标不同小写字母表示土层间差异显著($P<0.05$)。

Note: To the same species, values in same column with different letters mean significant difference ($P<0.05$), and values in same peer with different letters mean significant difference ($P<0.05$).

4 结论与讨论

广西沙塘林场杉木中龄林林下植被和枯落物的含碳率与田大伦等^[16]计算的湖南会同杉木中龄林接近,亦与康冰等^[17]计算的广西大青山马尾松和杉木混交林林下植被和枯落物的含碳率接近。

本研究中的马尾松成熟林林下植被、枯落物、土壤碳储量均低于鼎湖山生物圈保护区马尾松林^[18],这可能与自然保护区受到较好保护,其林下植被和枯落物受人干扰小有关。马尾松人工林不同深度土层含碳率与梁宏温等^[19]在广西钦州测定的结果一致。本研究中,马尾松中龄林和成熟林乔木层的碳储量分别为 53.85 和 158.80 t/hm^2 ,与方晰等^[20]在广西中部丘陵地区测定的马尾松乔木层碳储量接近;马尾松、杉木人工林乔木层平均碳储量分别为 106.33 和 54.8 t/hm^2 ,均高于周玉荣等^[21]估算的我国暖性针叶林植被平均碳储量(49.97 t/hm^2),这可能与本研究区水热条件好,有利于植被的生长有关。

本研究结果显示,马尾松人工林从中龄林到成熟林的碳储量增长幅度远大于杉木人工林,且马尾松成熟林乔木层碳储量显著大于杉木成熟林。康冰等^[22]、王献溥等^[23]研究认为,杉木在中龄前生长较快,在中龄后很快进入衰退阶段。黄志宏等^[24]对湖南会同杉木人工林枝条、叶、根生物量的研究表明,其随林龄增加呈现缓慢下降趋势。温远光^[25]认为,

杉木人工林的衰退关键在于乔木层。

本研究中,马尾松和杉木人工林生态系统平均碳储量分别为 168.36 和 128.08 t/hm^2 ,与文娟等^[26]研究得出的马尾松人工林碳储量高于杉木人工林的结果一致;但均低于我国森林生态系统的平均碳储量(258.83 t/hm^2)^[21],其原因是本研究中的 2 个树种人工林的土壤碳储量(43.71~72.19 t/hm^2)远低于我国森林生态系统的土壤碳储量(193.55 t/hm^2)^[21],这是由于本研究区土壤呼吸速率较大,以 CO_2 形式释放到大气中的碳量较多,因此土壤碳积累少;同时由于造林前的“炼山”、整地等生产措施影响了林地枯落物的分解,也导致了土壤碳的流失。

本研究结果表明,马尾松和杉木各林分林下植被碳储量占其总碳储量的 0.15%~1.99%,各林分枯落物碳储量占其总碳储量的 2.69%~3.88%,林下植被和枯落物碳储量在各林分生态系统中的贡献率均很低,这与人为干扰有关,试验地部分区域是森林公园,属于市郊范围,人为干扰较大,影响了林下植被和枯落物的分布。

本研究发现,马尾松、杉木人工林土壤碳储量在 0~60 cm 土层内均随着土层深度的增加而降低。马尾松和杉木中龄林和成熟林 0~20 cm 土壤碳储量占其土壤总碳储量的 42.82%~50.45%,可见 0~20 cm 土层土壤碳储量在人工林生态系统中占据重要地位。马尾松和杉木人工林乔木层碳储量占

其总碳储量的42.41%~75.09%,对人工林生态系统的碳储量有重要贡献。可见,土壤层和乔木层是人工林生态系统重要的碳储存库。土壤有机碳主要来源于地上部分的枯枝落叶及根系,同时与土壤的理化性质等因素有关^[27],应避免“炼山”,采取合理采伐、保留采伐剩余物等措施来提高土壤的固碳能力。

[参考文献]

- [1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical temperate and boreal forest plant [J]. Cell&Environment, 1999, 22:715-740.
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 林清山,洪伟. 中国森林碳储量研究综述 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(6):220-224.
Lin Q S, Hong W. Summary of research on forest carbon storage in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(6):220-224. (in Chinese)
- [4] 王献博,蒋高明. 广西马尾松林分类、分布和演替的研究 [J]. 植物研究, 2002, 22(2):151-155.
Wang X P, Jiang G M. Study on classification distribution and succession of *Pinus massoniana* forest in Guangxi [J]. Bulletin of Botanical Research, 2002, 22(2):151-155. (in Chinese)
- [5] 刘世荣,温远光. 杉木生产力生态学 [M]. 北京:气象出版社, 2005:1-61.
Liu S R, Wen Y G. Ecology of *Cunninghamia lanceolata* productivity [M]. Beijing: Meteorological Press, 2005:1-61. (in Chinese)
- [6] 张国庆,黄从德,郭恒,等. 不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局 [J]. 浙江林业科技, 2007, 27(6):10-14.
Zhang G Q, Huang C D, Guo H, et al. Spatial distribution property of carbon stocks in artificial pine ecosystems with different density [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2007, 27(6):10-14. (in Chinese)
- [7] 方晰,田大伦,项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(11):47-53.
Fang X, Tian D L, Xiang W H. Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese fir plantation ecosystem [J]. Journal of Central South University of Forestry&Technology, 2010, 30(11):47-53. (in Chinese)
- [8] 赵金龙,梁宏温,温远光. 马尾松与红椎混交异龄林生物量分配格局 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(2):60-64.
Zhao J L, Liang H W, Wen Y G. Distribution pattern of biomass in the mixed uneven-aged stands of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystri* [J]. Journal of Central South University of Forestry&Technology, 2011, 31(2):60-64. (in Chinese)
- [9] 李燕燕,樊后保,苏兵强,等. 马尾松、阔叶树混交异龄林生物量与生产力分配格局 [J]. 生态学报, 2006, 26(8):2463-2473.
Li Y Y, Fan H B, Su B Q, et al. Biomass and distribution of stands mixed *Pinus massoniana* with broad leaved species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8):2463-2473. (in Chinese)
- [10] 张仕光,刘建,黄开勇. 桂西北马尾松人工林生物量生长规律及其分配模式 [J]. 广西林业科学, 2010, 39(4):189-192.
Zhang S G, Liu J, Huang K Y. Biomass and distribution patterns of *Pinus massoniana* plantation in northwest Guangxi [J]. Guangxi Forestry Science, 2010, 39(4):189-192. (in Chinese)
- [11] 刘磊,温远光,卢立华. 不同林龄杉木人工林林下植物组成及其生物量变化 [J]. 广西科学, 2007, 14(2):172-176.
Liu L, Wen Y G, Lu L H. Variety of under-storey species biomass in different age *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Guangxi Sciences, 2007, 14(2):172-176. (in Chinese)
- [12] 荣慧,何斌,黄恒川. 桂西北第二代杉木人工林的生物生产力 [J]. 广西农业生物科学, 2008, 27(4):451-455.
Rong Y, He B, Huang H C. Biomass productivity of the second generation *Cunninghamia lanceolata* plantation in northwest of Guangxi [J]. Journal of Guangxi Agric and Biol Science, 2008, 27(4):451-455. (in Chinese)
- [13] 张林,黄永,罗天祥,等. 林分各器官生物量随林龄的变化规律:以杉木、马尾松人工林为例 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22(2):170-178.
Zhang L, Huang Y, Luo T X, et al. Age effects on stand biomass allocations to different components: A case study in forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(2):170-178. (in Chinese)
- [14] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京:中国林业出版社, 2010:26-60.
Li H K, Lei Y C. Estimation and evaluation of forest biomass carbon storage in China [M]. Beijing: China Forestry Press, 2010:26-60. (in Chinese)
- [15] 钟羨芳,杨玉盛,高人,等. 老龄杉木人工林生态系统碳库及分配 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2):11-18.
Zhong X F, Yang Y S, Gao R, et al. Carbon storage and allocation in old-growth *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(2):11-18. (in Chinese)
- [16] 田大伦,方晰. 湖南会同杉木人工林生态系统的碳素含量 [J]. 中南林学院学报, 2004, 24(2):1-5.
Tian D L, Fang X. Carbon content of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hunan [J]. Journal of Central South Forestry University, 2004, 24(2):1-5. (in Chinese)
- [17] 康冰,刘世荣,张广军,等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征 [J]. 生态学报, 2006, 26(5):1321-1329.
Kang B, Liu S R, Zhang G J, et al. Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan Guangxi of China

- [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1321-1329. (in Chinese)
- [18] 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 pine forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Guihaia*, 2002, 22(4): 305-310. (in Chinese)
- [19] 梁宏温, 罗 宏, 温远光, 等. 桉树林取代马尾松林对森林生态系统碳贮量的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(6): 1168-1174.
Liang H W, Luo H, Wen Y G, et al. Effects of *Eucalypt* plantation replacing masson pine nature forest on the carbon accumulation of forest ecosystems [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(6): 1168-1174. (in Chinese)
- [20] 方 晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态 [J]. *中南林学院学报*, 2003, 23(2): 11-15.
Fang X, Tian D L, Xu C H. Productivity and carbon dynamics of masson pine plantation [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23(2): 11-15. (in Chinese)
- [21] 周玉荣, 余振良, 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. (in Chinese)
- [22] 康 冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征 [J]. *林业科学*, 2009, 45(8): 147-153.
Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Characteristics of biomass, carbon accumulation and its spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem in low subtropical area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 147-153. (in Chinese)
- [23] 王献溥, 郭 柯, 田新智, 等. 广西杉木林的分类、分布和演替 [J]. *植物资源与环境学报*, 2004, 13(1): 43-47.
Wang X P, Guo K, Tian X Z, et al. Classification, distribution and succession of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) HK forests in Guangxi, China [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2004, 13(1): 43-47. (in Chinese)
- [24] 黄志宏, 田大伦, 康文星, 等. 湖南会同第 1 代杉木人工林生物量分配动态 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(5): 37-43.
Huang Z H, Tian D L, Kang W X, et al. Dynamics of biomass distribution in first rotation of Chinese fir plantations in Huitong County, Hunan Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(5): 37-43. (in Chinese)
- [25] 温远光. 杉木林生产力与森林结构关系的研究 [J]. *福建林学院学报*, 1997, 17(3): 246-250.
Wen Y G. Study on the relation between productivity and stand structure in Chinese fir plantation [J]. *Journal of Fujian College of Forest*, 1997, 17(3): 246-250. (in Chinese)
- [26] 文 娟, 金大刚, 莫祝平, 等. 不同造林模式人工林碳贮量的预估及比较分析 [J]. *广西林业科学*, 2009, 38(1): 36-38.
Wen J, Jin D G, Mo Z P, et al. Estimate and comparative analysis of carbon stock of different afforestation models [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2009, 38(1): 36-38. (in Chinese)
- [27] 张小全, 武曙红, 何 英, 等. 森林、林业活动与温室气体的减排增汇 [J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 150-156.
Zhang X Q, Wu S H, He Y, et al. Forests and forestry activities in relations to emission mitigation and sink enhancement [J]. *Forestry Science*, 2005, 41(6): 150-156. (in Chinese)