

江西千烟洲人工林生态系统的碳蓄积特征^{*}

马泽清^{1,2} 刘琪琛¹ 徐雯佳^{1,2} 李轩然^{1,2} 刘迎春^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 基于测树学及遥感技术研究了江西千烟洲试验站人工林的碳蓄积特征。使用林木各器官的相对生长模型, 结合林分调查, 估算了标准木器官生物量和碳储量分布, 进而获得单位面积及整个小流域森林的生物量和碳储量; 利用 IKONOS 遥感图像进行目视判读, 计算不同类型人工林的面积。林龄 19 年的马尾松、湿地松、杉木的单株标准木地上部分碳含量分别为 29.0、25.6 和 23.3 kg; 杉木林、马尾松林、湿地松林、木荷林、针阔混交林地上部分生物量分别为 14 088.8、768.7、542.1、3 215 和 8 359 g·m⁻²; 人工林地上部分平均生物量和碳储量分别为 8 257 和 3 979 g·m⁻²; 遥感估算的千烟洲面积为 207.96 hm², 其中 78.8% 为森林和柑橘园; 全区地上部分总生物量和活体碳储量分别是 13 291 和 6 336 t; 人工林碳储量占总碳储量的 79.24%, 是千烟洲试验区最大的碳库; 研究区地上生物量从 1983 年的 256 g·m⁻² 增长到 2005 年的 6 391 g·m⁻², 增长了 25 倍。人工造林显著地固定了大气中的碳。

关键词: 千烟洲; 碳储量; 生物量; 马尾松; 湿地松; 杉木; 木荷

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2007)11-0001-07

Carbon Storage of Artificial Forest in Qianyanzhou, Jiangxi Province

Ma Zeqing^{1,2} Liu Qiqing¹ Xu Wenjia^{1,2} Li Xuanran^{1,2} Liu Yingchun^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

Abstract: The carbon storage of artificial forest was studied by means of forest survey and remote sensing in Qianyanzhou Ecological Station, Jiangxi Province. Based on allometric models in addition to field survey, the biomass and carbon storage were calculated for both average ground area and the whole small watershed. IKONOS imagery was used for extracting specific forest areas. The biomass of individual trees for *Pinus massoniana*, *Pinus elliottii* and *Cunninghamia lanceolata*, all 19 years old, were 29.0, 25.6 and 23.3 kg, respectively. The above-ground biomass of *C. lanceolata* forest, *P. massoniana* forest, *P. elliottii* forest, *Schima superba* forest and mixed forest was 14 088.8, 768.7, 542.1, 3 215 and 8 359 g·m⁻², respectively. The average biomass and carbon storage of the artificial forest were 8 257 and 3 979 g·m⁻², respectively; The area of the small watershed was 207.96 hm², of which, 78.8% was forest and orange field; The total above-ground biomass and carbon storage of Qianyanzhou region were 13 291 t and 6 336 t, respectively; Plantation carbon storage accounted for the 79.24% of total carbon storage, which was the largest carbon pool; Aboveground vegetation biomass in this region was enhanced from 256 g·m⁻² to 6 391 g·m⁻² during the period 1983-2005, which increased 25 times. It is significant that artificial afforestation was an effective approach to the fixed carbon.

Key words: Qianyanzhou; carbon storage; biomass; *Pinus massoniana*; *Pinus elliottii*; *Cunninghamia lanceolata*; *Schima superba*

千烟洲是我国红壤丘陵区较早进行退化生态系统恢复治理的地区。由于长期的人为破坏, 原生常绿阔叶林早已不存在, 多为次生灌草丛。从 1983 年开始, 中国科学院在此进行了治理开发试验, 营造了大片人工林。如今的千烟洲森林高度郁闭, 环境明显改善, 不仅物种明显增加, 森林的固碳功能也日益增强。人工造林对生态系统碳汇具有重要的贡献。准确估算碳蓄积是全球碳循环研究的重要课题(Brown, 2002)。全球碳计划(GCP)的科学主题就是研究碳储量和通量的时空分布。碳储量是碳蓄积的现存量, 是比较森林生态系统结构和功能特征(Brown *et al.*, 1999)、评价林地经济产量和立地质量的重要指标(于贵瑞, 2003)。测算碳储量的方法很多, 主要有清查法、模型法和遥感估算法(于贵瑞, 2003), 但都存在不确定性。

收稿日期: 2006-08-21。

基金项目: 国家重大基础研究项目(2002CB4125)、中国科学院野外台站基金资助。

* 刘琪琛为通讯作者。野外工作得到了中国科学院地理科学与资源研究所林耀明和陈永瑞等同志的协助, 在此一并致谢。

样地清查法是估算碳储量最为基础的方法,主要有平均生物量法(Lieth *et al.*, 1975)和材积源生物量法(Brown *et al.*, 1984)。平均生物量方法是指利用野外实测数据获得单位面积生物量(Lieth *et al.*, 1975)或用树种相对生长模型计算出一定面积的生物量(Foley, 1995; Peng *et al.*, 1997)。材积源生物量法是指基于森林资源清查数据,利用蓄积量—生物量关系由林木蓄积量推算生物量,主要有平均换算因子法(Lieth *et al.*, 1975; Tumer *et al.*, 1995)、换算因子连续函数法(Fang *et al.*, 2001; 方精云, 2000; 方精云等, 2001)、双曲线关系模型(Zhou *et al.*, 2002; 赵敏等, 2004)和指数关系(Brown *et al.*, 1999)。平均生物量法比较可靠,但难以划分森林类型或统计出准确的面积(于贵瑞, 2003);而材积源生物量法需要相关的转化参数。

平均生物量法虽在空间上不符合个体间生物量的分布规律,但具有较强的实用性和可操作性。样地调查只是在点尺度测定碳储量,要解决景观以上尺度森林固碳的问题必须借助遥感手段,可见光红外遥感技术在植被分类(刘纪远等, 1998; 师庆东等, 2003)和土地分类(Nemani *et al.*, 1997)中具有明显优势。直接通过光谱信息和地面实测数据建立相关估算模型,对于纯林(邢素丽等, 2004)、干旱地区植被生物量(Suganuma *et al.*, 2006)和草原生物量(徐建春等, 2002)效果较好,但对于复杂的天然林(国庆喜等, 2003)和亚热带森林生态系统效果较差(杨存健等, 2004)。随着遥感影像的空间分辨率不断提高,应用遥感进行植被分类和提取土地利用信息变得更加准确和可靠。IKONOS 图像分辨率全色波段为 1 m, 多光谱为 4 m, 在植被分类和景观制图等方面的应用越来越广泛(龚建周等, 2004)。

本文旨在通过地面实测,从单木、群落落到小流域多尺度研究试验区各种森林类型的碳储量,结合高分辨率遥感图像分析,阐明景观尺度森林生态系统碳蓄积格局,评价生态恢复在碳循环中的贡献。

1 研究区概况

千烟洲试验站位于江西省中部吉泰盆地典型红壤丘陵区(115°04'13" E, 26°44'48" N)。试验区总面积约 200 hm²。海拔多在 100 m 左右,相对高度 20~50 m,属典型的红壤丘陵区。试验区年均气温 17.9 °C;年均降水量 1 489 mm;年日照时数 1 406 h,太阳年总辐射量 4 349 mJ·m⁻²;无霜期 323 d,具有典型亚热带季风气候特征。主要土壤类型有红壤、水稻土、潮土、草甸土等,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物(中国科学院南方山区综合科学考察队等, 1989)。

试验区以人工林为主,1985 年左右开始栽植,主要森林类型有湿地松(*Pinus elliotii*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林、木荷(*Schima superba*)林、枫香(*Liquidambar formosana*)林,以及柑(*Citrus reticulata*)橘(*Citrus madurensis*)园、板栗(*Castanea mollissima*)园等经济林;灌丛以白栎(*Quercus fabri*)、槲木(*Loropetalum chinense*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)较多;草本植物以刺芒野古草(*Arundinella setosa*)、山芝麻(*Helicteres angustifolia*)为主,近年来林下耐荫蕨类生长十分旺盛,物种已经超出 20 多种,如扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)、乌毛蕨(*Blechnum oriental*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、阔鳞鳞毛蕨(*Dryopteris championi*)等(刘琪琛等, 2005)。

2 研究方法

2.1 单木生物量估计

千烟洲试验站对马尾松、湿地松和杉木建立了单木叶生物量(FB)、枝生物量(BB)、树干生物量(SB)和地上总生物量(TB)相对生长模型(李轩然等, 2006),并根据树干解析结果对湿地松生物量模型进行修正。枫香和木荷的生物量模型参照文献(钱国钦, 2000; 杨桦等, 2004)。有些阔叶树种缺乏生物量模型且在样地中出现频率很低,借用枫香模型或木荷模型。主要树种的生物量模型见表 1。

2.2 样方调查和生物量计算

2005 年 7 月至 9 月,共调查样地 72 块,总面积 2 hm²,占试验站林地面积(150.05 hm²)的 1.33%,样地面积一般 20 m×20 m,选在面积为 50 m×50 m 的均质地段。对样地内树木(DBH>5 cm)进行每木检尺,根据乔木各器官生物量模型计算生物量。利用千烟洲试验站以前的碳含量分析结果,估算碳储量。通过对调查资料分析,挑选出各树种具有代表性的标准木,计算标准木各器官生物量和碳储量。

荒草地取 8 个样方,各样方大小为 1 m×1 m,将样地所有地上植被全部收获后取样 80 °C 烘干至恒重;农田生物量依据试验站 2005 年调查数据;柑橘园生物量采用标准木法,选取 2 株有代表性的橘树,伐倒后全部

称重, 测算干质量。

林木各器官有机碳含量(表 2)依据 1998 年试验结果(袁小华, 1999); 枫香碳含量比例一律采用 50%。林分碳含量依据 2003 年试验结果(杨凤亭, 2005)。

2.3 遥感影像处理与空间插值

根据千烟洲试验站形状和位置, 在 IKONOS 图像覆盖范围内选择了 44 个地面控制点(GCP), 从中筛选出 32 个较为理想的控制点。使用托普康(Topcon)公司的 Tubro G2 差分 GPS(亚米级精度)对每个点测 3 次, 取平均值作为控制点的坐标值。

表 1 主要树种生物量模型^①

Tab. 1 Biomass models of the main tree species

树种 Species	项目 Item	生物量模型 Biomass model	R ²	样本数 Sample number
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	FB	$W=6.9727D^{2.1973}$	0.874	14
	BB	$W=4.743D^{2.8422}$	0.854	14
	SB	$W=70.32992D^{2.3072}$	0.991	14
	TB	$W=64.4026D^{2.4817}$	0.983	14
湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	FB	$W=12.0741D^{2.1515}$	0.735	19
	BB	$W=40.1892D^{2.0074}$	0.713	19
	SB	$W=24.88D^{2.5459}$	0.991	19
	TB	$W=54.0477D^{2.4295}$	0.959	19
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	FB	$W=5.2619D^{2.1515}$	0.788	22
	BB	$W=1.6255D^{2.0074}$	0.764	22
	SB	$W=37.9323D^{2.398}$	0.975	22
	TB	$W=48.2541D^{2.4616}$	0.976	22
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	TB	$W=0.1206D^{2.3806}$	0.9303	34
	BB	$W=0.1024D^{1.9293}$	0.9863	34
	FB	$W=1.1709D^{0.6414}$	0.6913	34
木荷 <i>Schima superba</i>	TB	$W=0.013369(D^2H)^{1.0569}$	0.995	
	BB	$W=1.086042(D^2H)^{0.9896938}$	0.999	
	FB	$W=0.000411(D^2H)^{1.308806}$	0.986	
	TB	$W=0.031103(D^2H)^{1.01976}$	0.979	

①FB: 叶生物量 Foliage biomass; BB: 枝生物量 Branch biomass; SB: 树干生物量 Stem biomass; TB: 地上总生物量 Tree biomass; W: 生物量 Biomass /g; D: 胸径 Diameter at breast height (DBH) /cm; H: 树高 Height /m. 下同 The same below.

表 2 主要树种各器官碳含量

Tab. 2 Organic carbon content of the main tree species

湿地松 <i>P. elliottii</i>			马尾松 <i>P. massoniana</i>			杉木 <i>C. lanceolata</i>			木荷 <i>S. superba</i>			%
干	枝	叶	干	枝	叶	干	枝	叶	干	枝	叶	
Stem	Branch	Foliage	Stem	Branch	Foliage	Stem	Branch	Foliage	Stem	Branch	Foliage	
51.17	51.37	53.35	52.55	50.85	51.18	50.51	48.84	53.35	46.09	45.47	46.76	

运用遥感图像处理软件一次多项式模型, 最近邻法插值, 对影像进行几何校正, 整体误差小于 1 个像素, X 轴均方根误差(RMS error X)0.89, Y 轴均方根误差(RMS error Y)0.75。通过目视判读, 依据色彩特征勾画图斑, 结合实地调查确认, 然后建立千烟洲土地覆被地理信息系统, 统计各植被类型面积。

利用 Arcgis9.0 自带的空间地统计模块(克里格插值 Kriging, 反距离加权插值 IDW), 根据 72 个样方的结果(样方布设见图 1), 使用系统默认参数, 在林地范围内对地上生物量进行插值。

3 结果与分析

3.1 单木生物量及其在各器官中的分配

2005 年调查的各种样地中湿地松、马尾松、杉木和木荷的株数分别为 1 648、631、468 和 238 株。径级分布呈典型的正态分布(图 2)。这符合人工同龄林胸径结构的一般规律。

统计结果表明(表 3), 各树种叶生物量占地上部分的 7.5%~11.7%, 枝生物量占 13.4%~20.4%, 树干占 66.7%~73.0%, 树干是地上生物量的主要部分。枫香单木生物量和树枝生物量最大, 其树枝生物量是其他树种的 2 倍左右。阔叶树种枝生物量明显大于针叶树种。湿地松生长最快, 胸径较大, 表现出速生特性, 但木材密度较小(298.9 kg·m⁻³), 树干较轻。而马尾松木质紧密, 树干密度较大(346.6 kg·m⁻³), 单木生物量高于杉木和湿地松。在针叶树种中, 马尾松树干和树叶生物量所占比例较大。每株橘树标准木的地上生物量为 43.7 kg。

标准木各器官碳储量见图 3。单株标准木碳储量的大小比较排序为枫香(39.0 kg, DBH 为 9.7 cm) > 马尾松(29.0 kg, DBH 为 13.6 cm) > 湿地松(25.3 kg, DBH 为 5.9 cm) > 杉木(23.6 kg, DBH 为 14.5 cm) > 木荷(19.5 kg, DBH 为 11.0 cm)。马尾松树枝和树叶的碳储量非常接近; 木荷胸径和碳含量较小, 其积累的碳也



- 马尾松林 *P. massoniana* forest
- 油茶林 *C. oleifera* forest
- ▲ 阔叶林 Broadleaved forest
- 杉木林 *C. lanceolata* forest
- ✦ 针阔混交林 Broadleaved-conifer mixed forest
- ⊙ 天然马尾松林 Natural *P. massoniana* forest
- ◆ 马尾松-湿地松混交林 *P. massoniana*-*P. elliotii* forest
- ✱ 木荷林 *S. superba* forest
- 湿地松林 *P. elliotii* forest
- ★ 灌木林 Shrubland
- × 板栗林 *C. mollissima* forest

图1 千烟洲森林样地布设图

Fig. 1 Forest plots distribution in Qianyanzhou

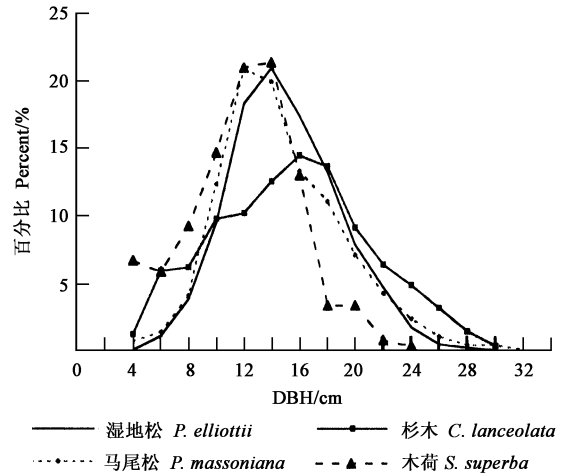


图2 林木胸径结构

Fig. 2 DBH structure of forest

较少。

3.2 林分的生物量和碳储量

表4为不同林分各器官的生物量推算结果。森林地上生物量为4 819~14 088 g·m⁻²,平均生物量(人工林总生物量除以林地总面积)为8 257 g·m⁻²,平均碳储量为3 979 g·m⁻²。杉木林林分密度大,生物量也最大;针阔混交林密度虽然最大,但生物量较小;阔叶林生物量明显大于马尾松林和湿地松林,因为阔叶林树枝生物量较大,冠层

表3 主要树种标准木各器官生物量
Tab. 3 Organ-specific biomass of standard trees

树种 Species	DBH/cm	树高 Height/m	FB/g	BB/g	SB/g	TB/g
湿地松 <i>P. elliotii</i>	15.9	8.7	4 499	8 955	33 418	48 660
杉木 <i>C. lanceolata</i>	14.5	10.8	4 373	7 031	33 192	46 418
马尾松 <i>P. massoniana</i>	13.6	9.6	6 572	7 526	41 070	56 229
木荷 <i>S. superba</i>	11	12.1	3 168	8 645	28 257	42 394
枫香 <i>L. formosana</i>	9.7	9.6	7 403	15 084	52 107	77 979

表4 林分生物量
Tab. 4 Forest biomass

林型 Forest type	样地数量 Plots	密度 Density/(tree·hm ⁻²)	胸高断面面积 Basal area/(m ² ·hm ⁻²)	FB/(g·m ⁻²)	BB/(g·m ⁻²)	SB/(g·m ⁻²)	TB/(g·m ⁻²)
湿地松林 <i>P. elliotii</i> forest	29	1 497	31.5	737	1 664	4 865	7 542
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	11	1 905	30.1	565	1 732	5 906	8 768
杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	11	2 368	51.3	836	1 607	11 337	14 088
阔叶林 Broadleaved forest	5	2 650	30.3	1 436	838	7 901	10 339
针阔混交林 Broadleaved-conifer mixed forest	4	1 994	28.1	923	1 440	5 792	8 359
马尾松-湿地松混交林 <i>P. massoniana</i> - <i>P. elliotii</i> forest	3	2 000	26.8	540	1 436	4 474	6 767
板栗林 <i>Castanea mollissima</i> forest	2	1 400	24.7	1 734	386	7 353	9 475
油茶林 <i>Canellia oleifera</i> forest	2	2 300	22.9	892	242	4 831	5 965
天然马尾松林 Natural <i>P. massoniana</i> forest	2	1 450	15.0	231	1 011	3 186	4 819
灌木林 Shrubland	1	200	15.3	269	1 682	3 954	6 602
木荷林 <i>S. superba</i> forest	1	1 825	28.0	2 410	486	10 318	13 215

结构复杂,光能利用充分,固碳能力较强。湿地松林生物量小于马尾松林。

各林型的树干生物量占地上生物量60%以上,杉木林的树干生物量比例最大。木荷林叶生物量最大,

达 18.24%。针叶林叶生物量约占地上生物量 10%；阔叶树种叶生物量较大,所占的比重高于 13.89%。针叶树种树枝生物量大于树叶生物量。阔叶林林分密度最大,杉木林密度次之,湿地松林密度较小,天然马尾松林密度最小。木荷林胸高断面积最大,天然马尾松林胸高断面积最小,阔叶树种大于针叶树种。胸高断面积比较排序为杉木林>湿地松林>马尾松林>马尾松+湿地松混交林。

马尾松造林密度为 5 000~10 000 株·hm⁻²,造林初期的地上生物量为 345.1 g·m⁻²(中国科学院南方山区综合科学考察队等,1989)。目前林分密度是 1 905 株·hm⁻²,自然稀疏迅速,存活率仅有 20%,生物量却增加了 25 倍,地上生物量高达 8 768 g·m⁻²,植被生产力明显提高,说明人工造林在小流域碳循环中作用显著。

3.3 小流域碳储量的遥感反演

IKONOS 遥感影响反演的千烟洲小流域面积总共 207.98 hm²(表 5),林地面积 126.18 hm²,占总面积的 60.67%。本文将柑橘园、板栗园也归为林地,森林覆盖率达 78.81%。图像判读结果显示,湿地松林面积最大,达 75.14 hm²,占全区的 36.12%;其次为柑橘园,占 17.21%;马尾松林和杉木林分别为 24.84(11.94%)和 7.73 hm²(3.71%)。

草丛生物量为 359 g·m⁻²,监测的农田水稻生物量为 982 g·m⁻²。整个小流域地上部分生物量总和

表 5 不同土地覆被型生物量和碳储量

Tab. 5 Biomass and carbon storage of different types of land cover

土地覆被类型 Land cover types	面积 Area/hm ²	地上生物量 Aboveground biomass/(g·m ⁻²)	总生物量 Total biomass/t	碳含量 Carbon content/%	碳储量 Carbon storage/t
杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	7.73	14 088	1 089	48.50	528.17
木荷林 <i>S. superba</i> forest	0.09	13 215	11.89	45.82	5.45
阔叶林 Broadleaved forest	6.08	10 339	628.61	46.25	290.73
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	0.76	8 975	68.21	46.25	31.55
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	24.84	8 768	2 177.97	48.50	1 056.32
针阔混交林 Broad leaved-conifer mixed forest	1.39	8 359	116.19	46.25	53.74
湿地松林 <i>P. elliotii</i> forest	75.14	7 542	5 667.06	48.50	2 748.52
池杉—盐肤木林 <i>Taxodium ascendens-Rhus chinensis</i> forest	0.14	6 602	9.24	46.31	4.28
灌木林 Shrubland	5.24	6 602	345.94	46.31	160.21
薪炭林 Fuel forest	0.77	6 602	50.84	46.31	23.54
竹丛林 Bamboo grove forest	2.53	6 602	167.03	46.31	77.35
油茶林 <i>C. oleifera</i> forest	1.47	5 965	87.69	46.25	40.55
菜地 Vegetable plot	0.1	982	0.98	41.09	0.4
旱地 No irrigated farmland	0.14	982	1.37	41.09	0.56
水田 Paddy field	17.38	982	170.67	41.09	70.13
草地 Unused grassland	16.78	359	60.24	45.41	27.35
人工草地 Artificial grassland	0.11	118	0.13	45.41	0.06
柑橘园 <i>C. reticulata</i> and <i>C. madurensis</i> orchard	35.79	6 923	2 477.74	46.12	1 142.73
板栗园 <i>C. mollissima</i> orchard	1.64	9 475	155.39	46.25	71.87
荒地 Barren land	2.1	241	5.06	45.18	2.29
裸岩石砾地 Exposed bared rock land	0.28	—	—	—	—
农村居民点 Village	1.99	—	—	—	—
试验站生活区用地 Residential area of experiment station	0.81	—	—	—	—
水塘 Reservoirs and pools	4.68	—	—	—	—
总计 Total	207.98	—	13 291.27	—	6 335.8

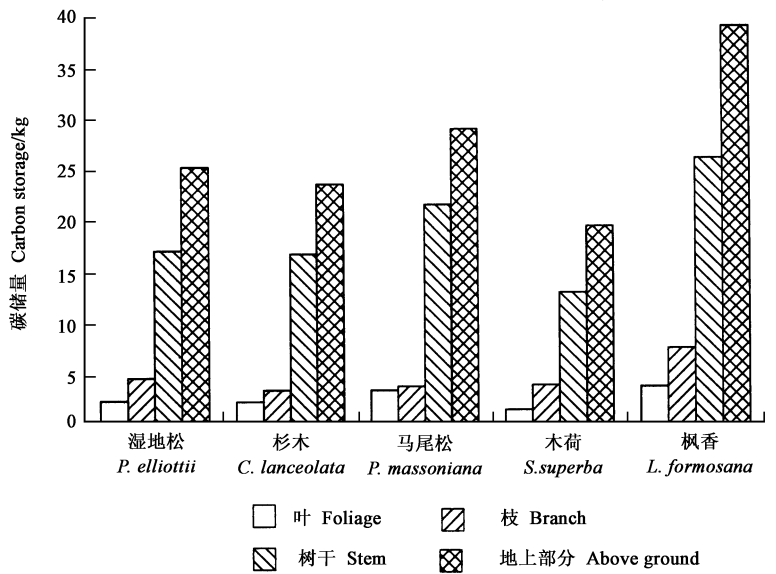


图 3 主要树种标准木各器官碳储量

Fig. 3 Organ-specific carbon storage of standard trees

13 291 t, 折合成碳储量 6 363 t。单位面积平均生物量为 $6\,391\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 折合成平均碳储量 $30.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。按照土地利用现状类型划分为 7 类(图 4)。林地、农地、草地和园地地上生物量分别为 10 419.67、173.02、60.37 和 2 633.13 t, 折算为碳储量分别是 5 020.41、71.09、27.41 和 1 214.6 t。

人工林占总碳储量的 79.24%, 可见森林是千烟洲地区最大的碳库。虽然农田和草地面积占 16.59%, 但碳储量仅占 1.56%。各林型总碳储量的排列顺序为: 湿地松林 > 柑橘园 > 马尾松林 > 杉木林。

4 结论与讨论

本文基于单木碳蓄积模型计算了群落的碳蓄积量, 再用遥感手段扩展到小流域尺度, 研究了千烟洲试验区的碳蓄积特征。人工造林在小流域碳循环中作用显著, 随着年龄增长碳汇趋势会愈加明显。在我国具有良好水热条件的亚热带地区, 人工造林是一种较好的生态恢复手段。

80 年代初期, 千烟洲土地荒芜、水土流失严重, 经过 20 年开发治理, 现已恢复为茂密的森林。造林作为生态恢复的主要手段, 发挥了巨大作用。林地面积从 1983 年的 0.4% 到 2005 年的 78.81%, 地上生物量从 1983 年的 $256\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (中国科学院南方山区综合科学考察队等, 1989) 到 2005 年的 $6\,391\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 增长了 25 倍, 充分说明了人工造林对固碳的贡献。同时也发现: 乡土树种马尾松林生物量大于引进的湿地松林, 木荷等地带性常绿阔叶林大于马尾松林和湿地松林。

以本地经验公式和实测资料为有效的推移依据进行尺度转换, 阐明了植被碳储量空间分布格局, 提高了碳储量估测精度。以胸径 15.9 cm 的湿地松为例, 用模型 ($W=0.147D^{2.47952}$) (张连水等, 2001) 的计算结果为 140.0 kg, 而使用本文模型 ($W=54.0477D^{2.4295}$) 只有 44.39 kg, 误差达 3.15 倍。说明因生境条件差异, 即使是同一树种, 测树学参数也会有很大变化。所以, 建立本地的树木生物量模型是提高碳蓄积估测精度的有效途径。

经过 19 年的生长, 地上部分乔木生物量最大可以达到 $14\,088\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均 $8\,272\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; 湿地松生长最快, 平均胸径达 15.9 cm。湿地松林、马尾松林、杉木林、木荷林和针阔混交林地上平均生物量分别是 7 542、8 768、14 088、13 215 和 $8\,359\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 与其他地区相比基本接近 (江西省常绿阔叶林研究课题组, 1996; 杨桦等, 2004; 揭建林等, 2002; 张林等, 2005; 方晰等, 2003; 田大伦等, 2004)。同时也表明: 生物量或碳储量的决定因素是密度和林龄, 随林分密度增加而增大。此外, 湿地松从材积生长来看表现为速生, 但是由于木材密度低, 其生物量或碳储量明显低于马尾松。

应用高分辨率的 IKONOS 遥感图像提取土地利用和植被信息, 效果较为理想, 但需要建立统一的判读标志。高分辨率遥感影像和高精度 GPS 的使用, 无疑会提高估算区域碳储量的精度, 提升尺度转化的可靠性。

本文在对生物量的空间进行插值时使用了反距离加权法、克里格插值法、平均生物量法, 计算的林地平均地上生物量分别是 8 663、8 587 和 $8\,257\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 地上总生物量依次为 11 073.04、10 980.19 和 10 554.09 t。反距离加权法插值结果最高, 而克里格插值结果比反距离法略低, 插值的总体结果与面积平均生物量法估算值近似 (误差最大 4.7%)。在样点充分、分布均匀的情况下进行空间插值, 是计算景观尺度生物量较为有效和可靠的方法。

由于人力所限, 本研究没有对所有树种建立生物量模型, 对部分树种借用其他树种的生物量模型会产生一些误差。本文只探讨了林地乔木层地上生物量和碳储量, 而对林下灌木、草本、凋落物和根系没有涉及; 对

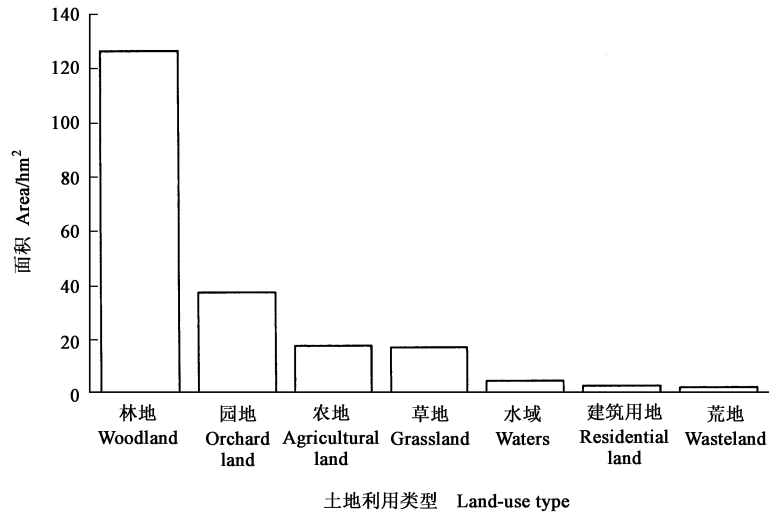


图 4 千烟洲土地利用类型组成图

Fig. 4 Land-use structure in Qianyanzhou

于荒草地、农田和园地仅做了初步讨论。今后需要在建立更多树种生物量模型的基础上,对乔木层以外的生物量进行研究,同时加强地下碳蓄积特征的研究,更加准确地评价生态恢复在碳循环中的作用。

参 考 文 献

- 方精云,柯金虎,唐志尧,等. 2001. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 25(4): 414—419
- 方精云. 2000. 全球生态学. 北京: 高等教育出版社, 319
- 方 晰,田大伦,胥灿辉. 2003. 马尾松人工林生产与碳素动态. 中南林学院学报, 23(2): 11—15
- 国庆喜,张 锋. 2003. 基于遥感信息估测森林的生物量. 东北林业大学学报, 31(2): 13—17
- 龚建周,张 鹏,杨景荣,等. 2004. IKONOS 数据在植被景观制图和景观空间格局分析中的应用——以丘陵沟壑区准格尔五分地沟小流域为例. 干旱区资源与环境, 18(2): 130—136
- 江西省常绿阔叶林研究课题组. 1996. 江西省常绿阔叶林地上部分生物量研究. 江西林业科技 (2): 1—4
- 揭建林,詹有生,黄文超,等. 2002. 京九线井冈山段岗地湿地松林分生产力调查研究. 江西林业科技, (2): 17—21
- 李轩然,刘琪璿,陈永瑞,等. 2006. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算. 应用生态学报, 17(8): 1382—1388
- 刘纪远,庄大方,凌扬荣,等. 1998. 基于 GIS 的中国东北植被综合分类研究. 遥感学报, 2(4): 285—292
- 刘琪璿,胡理乐,李轩然. 2005. 小流域治理 20 年后的千烟洲植物多样性. 植物生态学报, 29(5): 766—774
- 钱国钦. 2000. 枫香人工林净生产量动态变化研究. 江西农业大学学报, 22(3): 399—405
- 师庆东,吕光辉,潘晓玲,等. 2003. 遥感影像中分区分类法及在新疆北部植被分类中的应用. 干旱区地理, 26(3): 264—230
- 田大伦,项文化,闫文德. 2004. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征. 生态学报, 24(10): 2207—2210
- 邢素丽,张广录,刘慧涛,等. 2004. 基于 Landsat ETM 数据的落叶松林生物量估算模式. 福建林学院学报, 24(2): 153—156
- 徐建春,赵英时,刘振华. 2002. 利用遥感和 GIS 研究内蒙古中西部地区环境变化. 遥感学报, 6(2): 1412—1491
- 杨存健,刘纪远,张增祥. 2004. 热带森林植被生物量遥感估算探讨. 地理与地理信息科学, 20(6): 22—25
- 杨风亭. 2005. 中国南方红壤丘陵区土地利用对陆地碳循环的影响——以千烟洲试验站为例. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文
- 杨 桦,詹有生,曾志光,等. 2004. 吉水三种造林模式林分生物量及生长量研究. 江西农业大学学报, 26(2): 164—121
- 于贵瑞. 2003. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 460
- 袁小华. 1999. 红壤丘陵区土地利用变化对陆地生态系统有机碳储量的影响. 中国科学院地理科学与资源研究所硕士论文
- 张 林,黄 永,罗天祥,等. 2005. 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. 中国科学院研究生院学报, 22(3): 170—179
- 张连水,庄志贤,李秀全. 2001. 湿地松地上生物量变化研究. 林业科技开发, 15(增刊): 42—43
- 赵 敏,周广胜. 2004. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 24(1): 550—555
- 中国科学院南方山区综合科学考察队,江西省吉安地区自然资源开发治理办公室. 1989. 红壤丘陵开发和治理——千烟洲综合开发治理试验研究. 北京: 科学出版社, 130
- Brown S L, Schroeder P, Kern J S. 1999. Spatial distribution of biomass in forests of eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 123 (1): 81—90
- Brown S. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116: 363—372
- Brown S, Lugo A E. 1984. Biomass tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 223: 1290—1293
- Fang J Y, Chen A P, Peng C H. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320—2322
- Foley J A. 1995. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus* 47(B): 310—319
- Lieth H, Whittaker R H. 1975. *Primary productivity of the Biosphere*. New York: Springer Verlag, 215
- Nemani R, Running S. 1997. Land cover characterization using multitemporal red, near-IR, and thermal-IR data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7 (1): 79—90
- Peng C H, Michael J A. 1997. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum reconstruction from paleo vegetation maps and an empirical biosphere model. *Tellus*, 49 (B): 393—408
- Suganuma H, Abe Y, Taniguchi M, *et al.* 2006. Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia. *Forest Ecology and Management*, 222: 75—87
- Tumer D P, Koerber G J, Hamon M E. 1995. Carbon sequestration by forests of the United States—current status and projections to the year 2040. *Tellus*, 47B: 232—239
- Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, *et al.* 2002. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, 169: 149—157

(责任编辑 于静娴)