

西藏林芝地区森林碳储量、碳密度及其分布 *

葛立雯¹ 潘 刚^{2**} 任德智² 杜玉婕¹ 郑祥蕾³

(¹西藏农牧学院, 西藏林芝 860000; ²西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏林芝 860000; ³荆州市城市绿化管理处, 湖北荆州 434000)

摘要 利用林芝地区第六次二类森林资源清查数据, 运用材积源生物量法和平均生物量法, 结合不同树种的分子式含碳率, 估算了林芝地区森林及其组分的碳储量、碳密度, 并分析其分布特征。结果表明: 2004年, 林芝地区森林碳储量为 2.43×10^8 t, 森林平均碳密度为 $76.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中, 林分碳储量>灌木林碳储量>疏林碳储量>散生木碳储量>竹林碳储量>四旁树碳储量, 各林分类型碳储量在 $2.51 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^8$ t, 共计占总森林碳储量的92.0%, 各林分类型的平均碳密度为 $103.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中冷杉林的碳储量和碳密度均最高。在区域分布上, 森林碳储量由西北向东南递增, 森林平均碳密度由西南向东北递增。林分碳储量以成、过熟林碳储量为主, 而过熟林的碳密度在各龄级中最高。随着过熟林的增加, 林芝地区森林碳储量将增加; 但随着过熟林的死亡和分解, 林芝地区森林碳储量将有减小趋势。

关键词 森林 碳储量 碳密度 西藏林芝地区

文章编号 1001-9332(2013)02-0319-07 **中图分类号** Q948 **文献标识码** A

Forest carbon storage, carbon density, and their distribution characteristics in Linzhi area of Tibet, China. GE Li-wen¹, PAN Gang², REN De-zhi², DU Yu-jie¹, ZHENG Xiang-lei³ (¹Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, Tibet, China; ²Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, Tibet, China; ³Jingzhou Urban Greening Management Office, Jingzhou 434000, Hubei, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(2): 319–325.

Abstract: According to the 6th Second Class Forest Resource Inventory data in Linzhi area of Tibet, and by using the volume source biomass method and average-biomass computing method, in combining with the molecular formula carbon rate of different tree species, this paper estimated the carbon storage and carbon density of different standing forests and their components in the area, and analyzed the spatial distribution patterns of the carbon storage and carbon density. In 2004, the forest carbon storage in the area was 2.43×10^8 t, and the average forest carbon density was $76.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The carbon storage followed the sequence of standing forest > shrub forest > open forest > scattered trees > bamboo forest > four-side trees. Standing forests had a carbon storage $2.51 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^8$ t, accounting for 92.0% of the total forest carbon storage in the area. The average carbon density of various standing forests was $103.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and fir forest had the highest carbon storage and carbon density. From the view of regional distribution, the forest carbon storage presented a trend of increased from northwest to southeast, whereas the forest carbon density tended to be increased from southwest to northeast. The carbon storage of the standing forests was mainly consisted by mature and over-matured forests, and the carbon density of over-matured forests was the highest among all the age classes' forests. The forest carbon storage in Linzhi area would be increased with the increase of over-matured forests, but tended to be decreased with the death and decomposition of over-matured forests.

Key words: forest; carbon storage; carbon density; Linzhi area of Tibet.

* 国家自然科学基金项目(31160120)、西藏自治区杰出青年科学基金项目和西藏林芝森林生态系统定位研究项目(2012-LYPT-DW-016)资助。

** 通讯作者. E-mail: xzpg0704@21cn.com

2012-05-08 收稿, 2012-11-23 接受.

森林是陆地生态系统的主体,是地球生物圈的重要组成部分,比其他陆地生态系统具有更高的生产力^[1].因此,森林碳储量被作为反映森林生态系统功能的一个基本参数.西藏位于地球“第三极”青藏高原的西南部,是青藏高原的主要组成部分^[2],其植被组成特殊,是我国森林碳储量最大的省份之一^[3-7].林芝地区是西藏森林分布的主要区域,所辖7个县均为有林县,其林分面积和蓄积量占西藏自治区的52.4%和63.6%.近年来对西藏碳储量的研究仅见王建林等^[8-9]对草地生态系统方面的研究,对森林碳储量研究多为自治区的森林总碳储量估测^[3-7],而对分地区、分树种、分林龄及空间分布规律的研究未见报道.本研究以林芝地区第六次二类清查资料为数据源,估算林芝地区森林植被的碳储量和碳密度,探讨其森林碳储量的现状及其空间分布规律,旨在为西藏乃至全国碳储量估算,以及林芝地区的森林价值及生态功能估算等提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

林芝地区位于西藏东南部($92^{\circ}09'—98^{\circ}47'$ E, $26^{\circ}52'—30^{\circ}40'$ N),地处雅鲁藏布江中下游,东西长646.7 km,南北宽353.2 km,面积 11.7×10^4 km²,辖工布江达、林芝、米林、波密、朗县、墨脱和察隅7县^[10].全地区平均海拔3100 m,南部以高山峡谷为主,北部存留有较完整的高原宽谷地貌,最高处海拔7782 m,最低处海拔155 m,地质结构复杂.整个地

区植被类型丰富,有完整的湿润山地生态系统垂直类型系列,有从高山冰雪带到低河谷热带季雨林等垂直自然带,呈现出幅度宽、类型完整复杂的植被垂直带体系;森林以针叶林为主体,其中,暗针叶林包括急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)、林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)等,亮针叶林包括云南松(*Pinus yunnanensis*)、高山松(*Pinus densata*)等^[11].林芝地区的森林大部分处于原生状态,是全国少有的原始林区.在气候类型上,南部属于热带、亚热带山地季风湿润气候,西部为高原温带季风半湿润气候,东北部为高原温带季风湿润气候.该区年均气温11.2℃,年均降水量650 mm,年均日照2022 h,无霜期180 d,雨旱季明显^[13].

1.2 数据来源

采用西藏林芝地区第六次二类森林资源清查数据(中国控制范围内,不包括中印边界争议区).由于在二类清查数据中没有包括经济林及枯死木、下木层、草本层、枯枝落叶层、土壤层的数据,因此,本研究不包括上述各类碳储量.林芝地区各县植被类型面积和蓄积量统计见表1.由于二类森林清查数据中灌木林、竹林只统计其面积,散生木、四旁树只统计其蓄积量,因而表1中不含灌木林、竹林的蓄积量以及散生木、四旁树的面积.

1.3 研究方法

1.3.1 林分生物量的计算 目前对森林生物量的估测方法主要有样地调查、模型模拟和遥感反演等.其中,材积源生物量法在不同林分类型生物量与蓄积

表1 林芝地区各县不同植被类型森林面积和蓄积量

Table 1 Area and volume of different vegetation types in Linzhi area and all counties

区域 Area	林分 Forest		疏林 Open forest		灌木林 Shrub forest area (hm ²)	四旁树 蓄积量 Four- side tree volume (m ³)	散生木 蓄积量 Scattered trees volume (m ³)	竹林面积 Bamboo forest area (hm ²)	合计 Total	
	面积 Area (hm ²)	蓄积量 Volume (m ³)	面积 Area (hm ²)	蓄积量 Volume (m ³)					面积 Area (hm ²)	蓄积量 Volume (m ³)
工布江达县 Gongbujiangda County	148690	35513601	20222	855482	198641	327	65431	0	367553	36434841
林芝县 Linzhi County	288397	83523895	9801	702604	162950	3768	77592	0	461148	84307859
波密县 Bomi County	360283	108541841	9106	533960	102514	0	27781	0	471903	109103582
米林县 Milin County	270504	90623615	6943	836510	185156	0	49193	0	462603	91509318
朗县 Lang County	58874	16142367	4762	76665	114032	264	6773	0	177668	16226069
墨脱县 Motuo County	294361	88887614	2968	200120	104414	0	52280	134	401877	89140014
察隅县 Chayu County	746091	229568280	13521	760537	95124	0	0	0	854736	230328817
林芝地区 Linzhi area	2167200	652801213	67323	3965878	962831	4359	279050	134	3197488	657050500

量之间均存在良好的回归关系,能较好地反映实际情况,因而成为最常用的一种森林生物量估测方法^[3,13-15].本研究以罗天祥等^[16]建立的回归模型为主,采用材积源生物量法对林芝地区森林生物量进行估测。对区域中罗天祥等^[16]建立的回归模型未涉及到的树种采用方精云等^[17]建立的回归模型估测。在分树种计算过程中,对无明确对应模型的树种,根据本地区实际情况采用近似树种参数替代。如:云杉和冷杉采用云冷杉林方程;高山松和乔松采用山地松林方程;杨类和桦类采用杨桦林方程^[14];硬阔类和软阔类分别参照栎类和杨类。具体的生物量回归方程见表2。

1.3.2 疏林、灌木林、竹林生物量的计算 由于二类森林资源清查中疏林只有面积和蓄积信息,没有分种类,所以疏林采用方精云等^[7]建立的总平均生物量与总平均林分蓄积量的方程计算;灌木林采用平均生物量法,其参数采用青藏高原主要灌木林生物量均值 $35.166 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[16];竹林按单株平均生物量 22.5 kg 计算^[17-19]。具体的生物量回归方程见表2。

1.3.3 散生木、四旁树生物量的计算 根据林芝地区的实际状况,散生木生物量采用山地松林的方程计算,四旁树生物量采用杨桦林的方程计算。由于二类森林清查数据中只有散生木、四旁树的蓄积,没有面积信息,故根据文献[20]中理论面积推算方法,得到本地区平均单位面积蓄积量为 $292.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,据此求出散生木、四旁树理论面积后得出其总生物量。具体的生物量回归方程见表2。

1.3.4 森林植被碳储量计算 森林植被碳储量为森

林生物量乘以含碳率(含碳系数)^[13]。目前,森林碳储量研究中采用的含碳率主要有平均含碳率、实测含碳率和由不同树种的化学组成及化学成分的分子式推算得到的含碳率(简称“分子式含碳率”)3类。国际上常用的平均含碳率为0.45或0.5^[5,7,21],但由于忽略了种间和种内差异,其精度较低;实测含碳系数^[22]的精度与采样和分析方法相关,其测定结果仅在采样代表区域有较高精度,在测区外无法保证其精度,主要用于小尺度的精确测算。本研究根据文献[23-24]以森林资源清查数据为基础、运用植物分子式确定不同树种含碳率。对部分无确切含碳率的树种或类型,采用相似树种或类型的含碳率。如乔松采用针叶树种含碳率均值;四旁树和散生木分别采用阔叶树种和针叶树种含碳率均值;疏林、灌木林和竹林采用我国平均含碳率(表2)。

2 结果与分析

2.1 林芝地区不同植被类型的碳储量和碳密度

2004年,林芝地区森林面积 3197488 hm^2 (不包括散生木和四旁树面积),总生物量 $4.84 \times 10^8 \text{ t}$,总碳储量 $2.43 \times 10^8 \text{ t}$,不同植被类型的平均碳密度为 $76.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同植被类型的碳储量依次为:林分>灌木林>疏林>散生木>竹林>四旁树(表3),其中林分碳储量最大,占植被总碳储量的92.0%。这主要是由于不同植被类型面积和碳密度的差异所致,相对面积和碳密度越大,其碳储量越大,不同植被类型的碳储量与面积大小排序一致(散生木和四旁树为理论面积),其中林分面积最大,其次为灌

表2 不同树种生物量回归方程及含碳率

Table 2 Biomass regression equation and carbon content rate of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	生物量回归方程 Biomass estimation model	含碳率 Carbon content rate
冷杉/云杉 <i>Abies/Picea</i>	$B = (50.8634 + 0.540621V)A$	0.4999/0.5208
铁杉 <i>Tsuga</i>	$B = (0.4158V + 41.3318)A$	0.5022
柏木 <i>Cupressus</i>	$B = (-2.82318 + 0.926799V)A$	0.5034
落叶松 <i>Larix</i>	$B = (1.64811V^{0.84788})A$	0.5211
华山松 <i>Pinus armandii</i>	$B = (0.5856V + 18.7435)A$	0.5225
高山松/乔松/散生木 <i>Pinus densata/Pinus griffithii/scattered trees</i>	$B = (23.9124 + 0.523162V)A$	0.5009/0.5101/0.5101
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	$B = (0.5101V + 1.0451)A$	0.5113
栎类/硬阔 <i>Deciduous oaks/hard broadleaf</i>	$B = (1.84087V^{0.892619})A$	0.5004/0.4834
桦类/杨类/软阔/四旁树 <i>Betula/Populus/soft broadleaf/four-side tree</i>	$B = (2.37274V^{0.790236})A$	0.4914/0.4956/0.4956/0.4900
疏林 Open forest	$B = (0.5751V + 38.706)A$	0.5000
灌木林 Shrub forest	$B = 35.166A$	0.5000
竹林 Bamboo forest	$B = 22.5 \times 10^{-3}P$	0.5000

B:单位面积植被生物量 Vegetation biomass in the unit area ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); V:单位面积植被蓄积量 Vegetation volume in the unit area (m^3); A:植被面积 Vegetation area (hm^2); P:株数 Plant numbers.

表 3 林芝地区不同植被类型的碳储量

Table 3 Carbon storage of different vegetation types in Linzhi area

类型 Type	碳储量 Carbon storage ($\times 10^3$ t)	占总森林碳储量 To total forest carbon storage (%)
林分 Forest	223572.02	92.0
疏林 Open forest	2443.29	1.0
灌木林 Shrub forest	16929.46	7.0
四旁树 Four-side tree	1.54	<0.1
散生木 Scattered trees	86.10	<0.1
竹林 Bamboo forest	1.98	<0.1

木林,而林分碳储量所占比例远大于其面积所占比例,林分的平均碳密度($103.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)也远大于灌木林($17.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。这说明林分的固碳能力越强,其在维持区域的碳平衡、释放氧气、减少大气中 CO_2 等温室气体浓度上升方面所起作用越大。灌木林面积占森林总面积的30.1%,其碳储量只占森林总碳储量的7.0%,这主要由于灌木林生长在海拔高的林线以上或其他立地条件较差的环境较恶劣区域,导致其生产力较低。说明灌木林碳储量对生态系统具有重要意义。

2.2 林芝地区不同林分的碳储量和碳密度

林芝地区林分碳储量为 $22.36 \times 10^7 \text{ t}$,不同林分的碳储量依次为:冷杉>云南松>高山松>云杉>硬阔>栎类>落叶松>华山松>桦类>柏木>软阔>铁杉>杨树>乔松(表4)。其中,冷杉的碳储量最高,占总林分碳储量的56.8%,这与其面积在所有林分面积中

表 4 林芝地区不同林分类型碳储量和碳密度

Table 4 Carbon storage and carbon density of different stand types in Linzhi area

林分类型 Stand type	面积 Area (hm^2)	碳储量 Carbon storage ($\times 10^3$ t)	碳密度 Carbon density ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
冷杉 Abies	961632	12.70	132.05
云杉 Picea	136456	1.73	126.68
铁杉 Tsuga	9437	0.09	96.99
柏木 Cupressus	41801	0.20	47.60
落叶松 Larix	31164	0.32	102.47
华山松 Pinus armandii	26801	0.31	117.08
高山松 Pinus densata	283081	1.84	65.00
乔松 Pinus griffithii	4237	0.03	59.32
云南松 Pinus yunnanensis	330608	2.41	72.98
栎类 Deciduous oaks	110702	0.81	73.46
桦类 Betula	70412	0.26	36.79
硬阔 Hard broadleaf	126445	1.41	111.88
杨类 Populus	9882	0.06	62.36
软阔 Soft broadleaf	24542	0.18	73.41
合计 Total	2167200	22.36	103.16

占44.4%,并且碳密度为所有林分类型中最高有关;云南松、高山松、云杉和硬阔的碳储量共计占总林分碳储量的33.1%。上述5种林分类型共占林芝地区森林总碳储量的82.7%,表明这5种林分类型在整个地区森林植被中占有重要地位。因此,这些林分类型碳的动态变化将影响到全地区整个森林的碳的源汇功能。

全地区林分平均碳密度为 $103.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,远高于所有植被的平均碳密度($76.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,表4)。不同林分类型碳密度大小依次为:冷杉>云杉>华山松>硬阔>落叶松>铁杉>栎类>软阔>云南松>高山松>杨树>乔松>柏木>桦类。冷杉和云南松是该区林分碳储量的主要构成部分。在林芝地区,冷杉主要为急尖长苞冷杉,其主要分布在海拔3600 m以上的阴坡,生长速度缓慢、木质致密^[25],因此碳密度高;云南松的碳密度较小,与其过熟林的碳密度小有关。

2.3 林芝地区不同龄组林分的碳储量和碳密度

由图1可以看出,林芝地区森林植被以成熟林和过熟林为主,不同龄组林分的碳储量大小依次为:成熟林>过熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。成熟林和过熟林的碳储量之和占总林分碳储量的81.4%,这与两者面积占整个林分面积的70.1%有关,也与它们的碳密度较高有关。不同龄组林分的碳密度大小依次为:过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。随着林龄的增加,森林植被碳密度逐渐增大,林龄的组成对林分碳密度有直接影响。

在不同林分类型分龄组碳储量方面,幼龄林中高山松的碳储量最高,中龄林中云南松的碳储量最高,它们的面积在该龄组中也最大;近、成、过熟林中冷杉的碳储量均最高,也与其面积有关,冷杉的成、过熟林面积在该龄组中最大,而近熟林中面积最大的虽然是云南松,但云南松在该龄组的碳密度($68.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)远小于冷杉($133.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。比

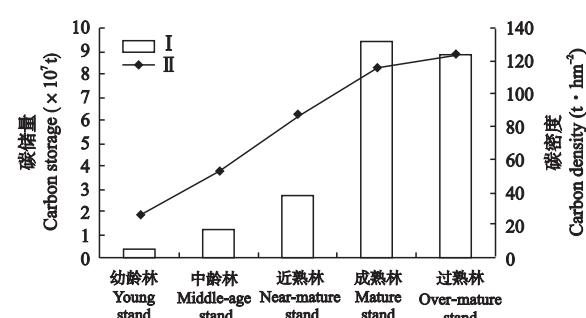


图1 林芝地区不同龄组林分碳储量(I)和碳密度(II)

Fig. 1 Carbon storage (I) and carbon density (II) of different age groups in Linzhi area.

表 5 林芝地区不同龄组林分碳储量和碳密度

Table 5 Carbon storage and carbon density of different age groups and stand types in Linzhi area

林分类型 Stand type	幼龄林 Young stand		中龄林 Middle-age stand		近熟林 Near-mature stand		成熟林 Mature stand		过熟林 Over-mature stand	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
冷杉 <i>Abies</i>	0.62	38.05	7.99	113.38	85.53	133.28	487.00	140.29	688.68	127.15
云杉 <i>Picea</i>	2.25	35.69	1.85	78.79	18.99	95.81	60.77	130.95	89.00	144.52
铁杉 <i>Tsuga</i>	0	0	0	0	0.34	114.72	2.67	82.19	6.14	104.25
柏木 <i>Cupressus</i>	0.02	1.33	0.90	14.39	0.99	24.31	11.84	57.51	6.15	64.50
落叶松 <i>Larix</i>	0.38	30.03	2.60	57.69	7.08	98.08	19.19	121.70	2.47	102.80
华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.19	73.98	4.50	81.38	3.15	92.09	7.20	132.43	16.34	134.41
高山松 <i>Pinus densata</i>	10.54	32.54	28.47	50.30	43.53	70.42	93.79	76.42	7.67	80.27
乔松 <i>Pinus griffithii</i>	0.15	29.43	1.13	48.41	0.44	73.23	0.64	99.02	0.16	100.26
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	7.69	30.74	30.58	53.10	76.01	68.43	115.32	101.70	11.70	49.66
栎类 Deciduous oaks	3.20	16.68	19.36	58.34	10.98	81.63	29.63	98.36	17.04	115.52
桦类 <i>Betula</i>	2.65	13.28	12.62	35.65	2.29	65.60	6.58	63.55	0.90	74.97
硬阔 Hard broadleaf	0.55	30.25	5.24	68.21	15.31	102.82	86.46	114.64	33.69	126.44
杨类 <i>Populus</i>	0.20	19.01	0.99	40.49	1.22	76.54	2.83	73.89	0.81	84.83
软阔 Soft broadleaf	0.16	15.60	2.58	45.37	2.23	72.45	12.35	87.31	0.48	77.64

I : 碳储量 Carbon storage ($\times 10^5$ t); II : 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$).

较所有林分类型的分龄级碳储量可知,除乔松外,其余各林分类型的成、过熟林的碳储量合计比例均超过 50% (表 5)。

在不同林分类型分龄组碳密度方面,除云南松、桦类、杨类外,其余林分类型均呈现出随年龄增大碳密度增加的趋势。云南松是林芝地区森林的主要成分,其碳密度从幼龄林到成熟林呈上升趋势,而过熟林的碳密度急剧下降,为 $49.66 t \cdot hm^{-2}$ 。这是因为在生长初期,个体生物量小、种群密度极大,而后期个体生物量大、种群密度小^[26]。幼龄林和过熟林中华山松的碳密度最大,其余各龄组中均为冷杉碳密度最大。各龄组中柏木的碳密度均最小(铁杉无幼、中龄林,故不计在内),其总体碳密度却高于桦类,这与其成、过熟林比例高于桦类有关。

2.4 林芝地区森林碳储量、碳密度的区域分布

林芝地区森林碳储量的总体区域分布格局由西北向东南呈递增趋势。其中,察隅县森林碳储量最高(7.11×10^7 t),占全地区森林碳储量的 30.4%,朗县森林碳储量最低(7.60×10^6 t),仅占全地区森林碳储量的 3.3%。林芝地区的高碳密度区主要分布在东部的波密县和察隅县,由西南向东北递增(图 2),平均碳密度为 $42.79 \sim 96.38 t \cdot hm^{-2}$;达到地区平均森林碳密度的有波密县($96.38 t \cdot hm^{-2}$)和察隅县($83.22 t \cdot hm^{-2}$),与其相近的有林芝县($72.31 t \cdot hm^{-2}$)和米林县($74.53 t \cdot hm^{-2}$);西部的朗县和工布江达县的平均碳密度最低,分别为 42.79 和 $46.16 t \cdot hm^{-2}$ 。

森林碳储量和碳密度的区域分布不均与森林的

分布有关。察隅县属喜马拉雅山南冀亚热带湿润气候,朗县属高原温带半湿润季风气候。这两县的森林在植被类型和面积上有很大不同。察隅县的森林碳储量主要来源于林分,灌木林碳储量所占比例较大,且主要分布碳密度较高的云南松和冷杉(图 2)。察隅县森林总面积占全地区的 26.7%,而朗县仅占 5.6%。墨脱县与察隅县气候类型相同,林分类型的分布上均以冷杉为主,灌木林面积相似,因此两县森林碳密度相近;而在林分面积上,墨脱县远低于察隅县(表 1),所以墨脱县的森林碳储量低于察隅县(图 2)。波密、林芝、米林 3 县相临,均以林分碳储量为森林碳储量的主体,主要林分类型均为冷杉和云

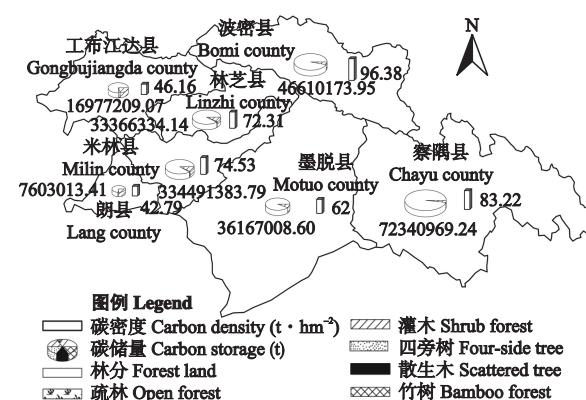


图 2 林芝地区森林碳储量、碳密度区域分布

Fig. 2 Distribution pattern of carbon storage (t) and carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) for forest in Linzhi area.

图中饼的面积大小表示森林总碳储量的大小,饼内各面积大小表示各植被类型碳储量的大小。The square meters of cake in the circle represented the area of the total carbon storage from forest, and the size of circle expressed the dimension of the carbon storage from the vegetation types.

杉、波密县的森林碳储量和林分碳储量均远大于林芝县和米林县，并且平均碳密度为全地区最高。这是因为波密县的气候条件较其余两县好，其年均降水量为 877 mm，而林芝县和米林县分别为 650 和 686 mm，林分生长速度、持续生长期和单位蓄积量远超过其他区域同类林分，以云杉尤为突出。在灌木林碳储量方面，米林县>林芝县>波密县，这与 3 县平均海拔依次递减，且灌木林一般生长在环境较恶劣（如海拔高的林线以上）区域有关。工布江达县东部与林芝县相临，气候温和湿润，西部寒冷干燥，林分类型以栎类、桦类分布较多，灌木林面积大而林分面积小，因而森林碳储量小（图 2），其与朗县的平均碳密度相近，也反映出这两县的森林质量相似。

3 讨 论

林芝地区森林碳储量 2.43×10^8 t，森林平均碳密度 $76.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，林分碳储量 22.36×10^7 t，平均碳密度 $103.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，无论是碳储量还是碳密度，林分都远高于其他植被类型，因此林分对维持整个地区碳库起着重要作用。灌木林的碳储量虽然仅占森林总面积的 7.0%，但其面积较大，占 30.1%，且灌木林生长的区域立地条件只适合生长灌木林，因而其碳储量对生态系统具有重要意义。

在各林分类型中，冷杉林的碳储量最高，占总林分碳储量的 56.8%，同时，冷杉也是全地区碳密度最高的林分类型。如果对现有冷杉林加以抚育和管理，将有利于森林碳汇的增加。从各林分不同龄级的碳密度来看，幼龄林和过熟林中华山松的碳密度最大，其余各龄组均以冷杉最大。而从不同龄级碳储量的分布来看，均出现成、过熟林比例过半的现象，并且总体上这两者占林分碳储量的 81.4%，其中冷杉、云杉的成、过熟林比例甚至达到 92.6% 和 86.6%。随着过熟林的增加，整个地区的碳储量将增加；但随着过熟林的死亡和分解，整个地区的森林碳储量将有减小趋势。

目前，林芝地区的森林主要为原始天然林，人工林很少。由于地理和气候等条件的差异，整个地区的森林碳储量分布不均匀，仍有 6982 hm^2 的无立木林地。如在各县选择碳密度高且适宜生长的林分类型进行人工造林，可以进一步增加全地区的森林覆盖度和总碳储量。

林芝地区的森林碳储量在 $7.60 \times 10^6 \sim 7.11 \times 10^7$ t，碳密度在 $42.79 \sim 96.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，森林碳储量呈从西北向东南递增的趋势，森林平均碳密度呈自

西南向东北递增趋势。森林碳储量最高的为察隅县，森林碳密度最高的为波密县，朗县的森林碳储量和森林碳密度均最低，总体上呈现出区位分布不均现象，东部为碳汇的主要区域。

据文献资料显示，西藏自治区的林分碳密度为 $102.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23]，远高于全国平均水平^[23,27-28]。2004 年林芝地区的林分碳密度 ($132.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高于西藏自治区的平均水平。林芝地区是西藏主要林区，其林分蓄积量占西藏自治区的 63.6%，这说明林芝地区森林在全国范围内有较强的碳储功能，在全国森林碳储量中扮演着重要角色。

在全地区植被类型中，灌木林的面积较大，占 30.1%，仅次于林分，其碳储量的估算结果会影响全地区的总森林碳储量。林芝地区位于藏东南，其地理和气候等条件与青藏高原的其他区域不同。由于对藏东南灌木林的研究报道较少，所以本文对灌木林的生物量估算采用平均生物量法，其参数为青藏高原主要灌木林生物量的平均值，由此得出的灌木林碳储量与实际灌木林的碳储量之间是否存在差异，还有待于进一步研究。

本研究为评价林芝地区森林的碳汇潜力提供了基础数据，但森林碳储量的估算精度仍有进一步提高的可能性。首先，森林生物量模型对森林碳储量估算结果的精度影响很大^[6,23,27-28]，因而在建立不同林分类型蓄积量与生物量的关系式时，其各项参数的选择应尽可能贴近区域特征；由于某些森林类型没有相应方程而采用近似树种方程，在研究中可根据实际建立其特有方程，从而更好地估算其碳储量。其次，对中国陆地生态系统自然植被类型划分的不同引起了面积差异，也是导致植被碳储量估算出现较大差异的一个重要原因^[29]，说明碳储量的估测还存在较多的不确定性。

参考文献

- [1] Turner DP, Koerper GJ, Harmon ME, et al. A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological Applications*, 1995, 5: 421-436
- [2] Dai R (戴 睿), Liu Z-H (刘志红), Lou M-Y (娄梦筠), et al. Characteristics of climatic variation in Tibet area for last 52 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2012, 26(12): 97-101 (in Chinese)
- [3] Li H-K (李海奎), Lei Y-C (雷渊才), Zeng W-S (曾伟生). Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, 47(7): 7-12 (in Chinese)
- [4] Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and

- [5] 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320–2322
 Wang X-K (王效科), Feng Z-W (冯宗炜), Ouyang Z-Y (欧阳志云). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 13–16 (in Chinese)
- [6] Zhao M (赵敏), Zhou G-S (周广胜). Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2004, **24**(1): 50–54 (in Chinese)
- [7] Fang J-Y (方精云), Chen A-P (陈安平). Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2001, **43**(9): 967–973 (in Chinese)
- [8] Wang J-L (王建林), Chang T-J (常天军), Li P (李鹏), et al. The vegetation carbon reserve and its relationship with climate factors of grassland system in Tibet. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(3): 120–125 (in Chinese)
- [9] Wang J-L (王建林), Ouyang H (欧阳华), Wang Z-H (王忠红), et al. Distribution characteristics and influential factors of vegetation carbon density of alpine grassland ecosystem in the south slope of Gongga South Mountain-Lhagoi Kangri Mountain. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(6): 1253–1259 (in Chinese)
- [10] Guo Q-Q (郭其强), Luo D-Q (罗大庆), Fang J-P (方江平), et al. Value Evaluation of the forest ecosystem service function in the Linzhi area of Tibet. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37**(18): 8746–8749 (in Chinese)
- [11] Li W-Y (李文毅), Luo H-B (罗怀斌). Ecological tourism resources and characteristics in Linzhi of Tibet. *Central South Forest Inventory and Planning* (中南林业调查规划), 2005, **24**(1): 43–46 (in Chinese)
- [12] Xu J-D (徐济德). A Study on Evaluation and Planning of the Landscape Ecology of Nyingchi Prefecture in Tibet. PhD Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2005 (in Chinese)
- [13] Liu G-H (刘国华), Fu B-J (傅伯杰), Fang J-Y (方精云). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(5): 733–740 (in Chinese)
- [14] Wang X-C (王新闻), Qi G (齐光), Yu D-P (于大炮), et al. Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2013–2020 (in Chinese)
- [15] Hung C-D (黄从德), Zhang J (张健), Yang W-Q (杨万勤), et al. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(3): 966–975 (in Chinese)
- [16] Luo T-X (罗天祥), Li W-H (李文华), Leng Y-F (冷允法), et al. Estimation of total biomass and potential distribution of new primary productivity in the Tibetan plateau. *Geographical Research* (地理研究), 1998, **17**(4): 337–344 (in Chinese)
- [17] Fang J-Y (方精云), Liu G-H (刘国华), Xu S-L (徐嵩龄). Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1996, **16**(5): 497–508 (in Chinese)
- [18] Wu D (吴丹), Shao Q-Q (邵全琴), Liu J-Y (刘纪远), et al. Spatiotemporal dynamics of forest carbon storage in Taihe County of Jiangxi Province in 1985–2030. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(1): 41–46 (in Chinese)
- [19] Tian X-L (田秀玲), Xia J (夏婧), Xia H-B (夏焕柏), et al. Forest biomass and its spatial pattern in Guizhou Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 287–294 (in Chinese)
- [20] Li X (李鑫), Ouyang X-Z (欧阳勋志), Liu Q-J (刘琪璟). Carbon storage of forest vegetation and its geographical pattern in China's Jiangxi Province during 2001–2005. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2011, **26**(4): 655–665 (in Chinese)
- [21] Ma Q-Y (马钦彦), Xie Z-M (谢鸣). Estimation of the carbon stored in Chinese pine forests. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1996, **18**(3): 31–34 (in Chinese)
- [22] Yu Y (于颖), Fan W-Y (范文义), Li M-Z (李明泽). Forest carbon rates at different scales in Northeast China forest area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 341–346 (in Chinese)
- [23] Li H-K (李海奎), Lei Y-C (雷渊才). Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China. Beijing: China Forestry Press, 2010 (in Chinese)
- [24] Gu K-P (顾凯平), Zhang K (张坤), Zhang L-X (张丽霞). Researches on estimation method of forest carbon sequestration. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences)* (南京林业大学学报·自然科学版), 2008, **32**(5): 105–109 (in Chinese)
- [25] Ren Q-S (任青山), Yang X-L (杨小林), Cui G-F (崔国发), et al. Smithfir population structure and dynamics in the timberline ectone of the Sejila Mountain, Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(7): 2669–2677 (in Chinese)
- [26] Cai N-H (蔡年辉), Xu Y-L (许玉兰), Li G-Q (李根前), et al. Studies on the biomass dynamics of natural *Pinus yunnanensis*. *Journal of Southern Agriculture* (南方农业学报), 2011, **42**(10): 1255–1258 (in Chinese)
- [27] Xu X-L (徐新良), Cao M-K (曹明奎), Li K-R (李克让). Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2007, **26**(6): 1–10 (in Chinese)
- [28] Pan YD, Luo TX, Birdsey R, et al. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change*, 2004, **67**: 211–236
- [29] Wang S-Q (王绍强), Zhou C-H (周成虎), Luo C-W (罗承文). Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography* (地理科学进展), 1999, **18**(3): 238–244 (in Chinese)

作者简介 葛立雯,女,1986年生,硕士研究生。主要从事生态系统生态学研究。E-mail: hyperionwenli@qq.com

责任编辑 李凤琴