应用生态学报 2017年10月 第28卷 第10期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2017, **28**(10): 3127-3134 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201710.023

# 西藏森林植被乔木层碳储量与碳密度估算

刘淑琴 夏朝宗 冯 薇 张克斌* 马 莉 刘建康
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 国家林业局调查规划设计院, 北京 100013)

**摘 要** 利用第八次森林资源连续清查数据和不同树种的树干密度、含碳率等参数,运用生物量清单法,估算了西藏自治区森林乔木层植被碳储量和碳密度.结果表明:西藏森林生态系统乔木层植被总碳储量为 $1.067\times10^9$ t,平均碳密度为 72.49 t·hm$^{-2}$.不同林分乔木层碳储量依次为:乔木林>散生木>疏林>四旁树.不同林种乔木层碳储量大小依次为:防护林>特殊用途林>用材林>薪炭林,其中前两者所占比例为 88.5%;不同林种乔木层平均碳密度为 88.09 t·hm$^{-2}$.不同林组乔木层碳储量与其分布面积排序一致,依次为:成熟林>过熟林>近熟林>中龄林>幼龄林.其中,成熟林乔木层碳储量占不同林组乔木层总碳储量的 50%,并且不同林组乔木层碳储量随着林龄的增加呈先上升后下降的趋势.

**关键词** 林业碳汇;碳储量;碳密度

**Estimation of vegetation carbon storage and density of forests at tree layer in Tibet, China.**

LIU Shu-qin, XIA Chao-zong, FENG Wei, ZHANG Ke-bin*, MA Li, LIU Jian-kang (*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; *Academy of Forestry Investigation and Planning, Beijing* 100013, *China*).

**Abstract**: The estimation of vegetation carbon storage and density of forests at tree layer in Tibet Autonomous Region was calculated based on the eighth forest inventory data using the biomass inventory method, as well as other attributes like tree trunk density and carbon content of different species. The results showed that the total carbon storage at tree layer in Tibet forest ecosystem was $1.067\times10^9$ t and the average carbon density was 72.49 t·hm$^{-2}$. The carbon storage at tree layer of different stands was in the order of arbor forest > scattered wood > sparse forest > alluvial tree. The carbon storage of different forest types at tree layer were in the order of shelterbelt > special-purpose forest > timber forest > firewood forest. The proportion of the first-mentioned two was 88.5%, and the average carbon density of different forest types at tree layer was 88.09 t·hm$^{-2}$. The carbon storage and its distribution area at tree layer in different forest groups were in the same order, followed by mature forest > over mature forest > near mature forest > middle aged forest > young forest. The carbon storage in mature forests accounted for 50% of the total carbon storage at tree layer in different forest groups. The carbon storage at tree layer in different forest groups increased first and then decreased with the increase of stand ages.

**Key words**: forestry carbon sequestration; carbon storage; carbon density.

森林是陆地上最大的储碳库,约 80%的地上碳储量和 40%的地下碳储量发生在森林生态系统[1-2].因此,减少温室气体排放、增强森林生态系统碳汇功能是人类减缓和适应全球气候变化的重要途径,也是全球碳循环一直研究的难点和热点.而林业碳汇因其对减缓大气 $CO_2$ 浓度升高所起的关键作用,也成为《京都议定书》、“巴厘岛路线图”及“哥本哈根世界气候大会”等国际气候谈判的重要内容[3].碳储量作为大气和森林进行碳交换的一个基本参数,其能为森林生态系统的固碳潜能以及全球碳平衡的维护提供数据支持[4-5].我国为了有效指导森林

本文由中国-GEF 土地退化防治伙伴关系“中国西部适应气候变化的可持续土地管理项目”(PRC-TA-8872)、国家自然科学基金项目(30771764, 2016YFC0500908)、国家林业局荒漠化定位监测项目(660550)和 2016 年碳汇监测数据汇总与数据库建设项目(2016-29-9)资助 This work was supported by the GEF Project of Sustainable and Climate-Resilient Land Management in the Western Regions, PRC-GEF Partnership on Land Degradation in Dryland Ecosystems (PRC-TA-8872), the National Natural Science Foundation of China (30771764, 2016YFC0500908), the Desertification Monitoring Project of the State Forestry Administration of China (660550), and the Summary and Database Construction of Carbon Sink Monitoring Data in 2016 (2016-29-9).
2017-03-14 Received, 2017-08-14 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ctccd@126.com

植被固碳增汇的经营管理,已经开始重视区域上林业碳汇的估算研究.

碳储量估算精度主要取决于植被生物量.目前,对生物量的估算有两种方法:一种是通过收获法直接测量,此方法虽然工作量大,但所得数据准确度较高[6];另一种是通过模型、参数以及"3S"技术等方法估算大尺度上植被生物量[7].目前,根据森林资源清查资料整理了我国主要树种的树干密度[8]、含碳率[9]、生物量换算因子系数[10]等.多数建立生物量-蓄积模型求得碳储量,运用此方法估算时一般都会受到植被立地条件的影响[11].生物量清单法是以生物量和蓄积量关系为基础的植被碳储量估算方法,它将森林普查资料和生态学研究成果相结合,是一种明确、直接且技术简单的估算方法[12].因此,它的精度主要取决于森林普查结果,从而避免了地域差异造成的估算误差.通过此方法对地处"世界屋脊"青藏高原主体区域的西藏森林碳储量进行估算,在一定程度上降低了因地理位置和自然条件对碳储量估算精度造成的影响,为西藏林业碳汇规划决策和经营管理提供了科学参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

西藏自治区位于我国西南部(26°50′—36°53′ N,78°25′—99°6′ E),面积 120.21 万 $km^2$,仅次于新疆维吾尔自治区,位居我国第二.西藏是"世界屋脊"青藏高原的主体区域,平均海拔在 4000 m 以上,地势由西北向东南倾斜,地形复杂多样,有沟峡、山脉、戈壁、裸石、冰川等多种地貌类型.受地形、地貌和大气环流的影响,西藏气候独特而复杂,自东南向西北依次有:热带、亚热带、高原温带、高原亚寒带、高原寒带等各种类型.

藏区土地以草地和未利用土地面积最大,占全区总面积的 88.5%,其次是林地、湿地(包括水域)、农地、居民地和建设用地.据西藏林业厅发布的调查成果显示,藏区内林地面积多达 $17.83\times10^6$ $hm^2$,森林面积 $14.72\times10^6$ $hm^2$,森林覆盖率为 11.9%,活立木总蓄积量 $20.9\times10^8$ $m^3$,森林蓄积量$20.86\times10^8$ $m^3$,占中国森林蓄积的 13.8%,居于我国第一位.其中,天然林占全区森林总面积的 99.2%,森林健康率达到 98.4%,森林景观等级Ⅲ级以上的森林面积达 79.3%[13].

### 1.2 数据来源

本文以西藏自治区第八次森林资源连续清查数据(除存在争议的国界区)为基础数据.对不同类型、权属、林种(除经济林)以及林龄的林分碳储量和碳密度进行了分析,数据中不包括土壤层、草本层、枯死木层以及下层植被的数据,因此碳储量和碳密度也不包含这 4 方面的数据.根据调查资料,本文对以下 20 种林分的碳储量和碳密度进行了研究:冷杉林(*Abies fabri*)、云杉林(*Picea asperata*)、铁杉林(*Tsuga chinensis*)、新疆落叶松林(*Larix sibirica*)、华山松林(*Pinus armandii*)、云南松林(*Pinus yunnanensis*)、高山松林(*Pinus densata*)、乔松林(*Pinus griffithii*)、柏木林(*Cupressus funebris*)、紫杉林(*Taxus chinensis*)、栎类林、桦木林(*Betula platyphylla*)、榆树林(*Ulmus pumila*)、其他硬阔类林、其他软阔类、杨树林、柳树林、针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林.

### 1.3 研究方法

本文采用的碳储量计算方法是生物量清单法[12],其计算公式是:

$$C = V\times D/R\times C_c$$

碳密度计算公式为:

$$C_i = C/S$$

式中:$C$ 为碳储量;$V$ 为森林蓄积量;$D$ 为树干密度;$R$ 为树干生物量占乔木层生物量的比例;$C_c$ 为植物中的碳含量;$C_i$ 为植被碳密度;$S$ 为林分面积.其中,树干密度选用中国林业科学研究院的测定结果[12];树干生物量占乔木层生物量的比例来自于中国森林生态系统生物量内部分配状况的统计结果[12];碳含量选用了《森林碳汇计量和核查方法研究》[9]的成果.所需参数数据见表 1.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同森林乔木层植被碳储量和碳密度估算

据第八次全国森林资源清查统计结果显示,西藏自治区全区林地面积 $1.783\times10^7$ $hm^2$,森林面积 $1.472\times10^7$ $hm^2$,森林覆盖率达 11.9%.估算结果显示,西藏自治区不同森林乔木层植被类型碳储量 $1.067\times10^9$ t,平均碳密度 72.49 t · $hm^{-2}$(除去灌木林).由表 2 可知,全区乔木层碳储量几乎全来源于国有林地权属的植被,而集体的占比很少,不到 0.1%.这与西藏以牧业为主的生活方式有关,游牧地点的不确定性使其定产概念薄弱;从整体来看,不同森林植被类型乔木层碳储量大小依次为:乔木林>散生木>疏林>四旁树,其中乔木林乔木层碳储量所占比例最大,占 98.8%.乔木层碳储量在集体林地权属的分布是:四旁树>乔木林>散生木>疏林,其中四

**表 1　不同林分类型树干密度和生物量比值及其含碳率**
**Table 1　Trunk density and biomass ratio and carbon rate of different forest types**

| 林木类型 Forest type | 树干密度 Trunk density ($t \cdot m^{-3}$) | 树干生物量比值 Trunk biomass ratio (%) | 含碳率 Carbon rate (%) |
|---|---|---|---|
| 冷杉林 *Abies fabri* forest | 0.43 | 51.8 | 49.9 |
| 云杉林 *Picea asperata* forest | 0.36 | 51.8 | 52.1 |
| 铁杉林 *Tsuga chinensis* forest | 0.46 | 51.8 | 50.2 |
| 落叶松林 *Larix gmelinii* forest | 0.53 | 51.8 | 52.1 |
| 华山松林 *Pinus armandii* forest | 0.38 | 51.8 | 52.3 |
| 云南松林 *Pinus yunnanensis* forest | 0.47 | 51.8 | 51.1 |
| 高山松林 *Pinus densata* forest | 0.41 | 51.8 | 50.1 |
| 乔松林 *Pinus griffithii* forest | 0.50 | 51.8 | 50.0 |
| 柏木林 *Cupressus funebris* forest | 0.46 | 51.8 | 50.3 |
| 紫衫 林 *Taxus chinensis* forest | 0.50 | 51.8 | 50.0 |
| 桦木林 *Betula platyphylla* forest | 0.49 | 51.8 | 49.1 |
| 榆树林 *Ulmus pumila* forest | 0.50 | 51.8 | 50.0 |
| 栎类林 *Quercus* forest | 0.68 | 51.8 | 50.0 |
| 其他硬阔类林 Hard broad-leaved stand | 0.60 | 51.8 | 48.3 |
| 杨树林 Poplar stand | 0.38 | 51.8 | 49.6 |
| 柳树林 Willow stand | 0.50 | 51.8 | 50.0 |
| 其他软阔林 Soft broad-leaved stand | 0.40 | 51.8 | 49.6 |
| 针叶混交林 Coniferous mixed forest | 0.40 | 51.8 | 50.1 |
| 阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest | 0.50 | 51.8 | 49.0 |
| 针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest | 0.50 | 51.8 | 49.8 |

**表 2　西藏不同森林植被乔木层碳储量**
**Table 2　Carbon storage of tree layer in different vegetation types in Tibet**

| 林地权属 Forestland ownership | 类型 Vegetation type | 碳储量 Carbon storage ($\times 10^6$ t) | 占总森林碳储量 Ratio of total forest carbon storage (%) |
|---|---|---|---|
| 国有 | 乔木林 Arbor forest | 1054.70 | 98.86 |
| State-owned | 疏林 Woodland | 5.38 | 0.50 |
| | 散生木 Scattered tree | 6.35 | 0.59 |
| | 四旁树 Four-side tree | 0.40 | 0.03 |
| | 合计 Total | 1066.80 | 100 |
| 集体 | 乔木林 Arbor forest | 0.17 | 47.47 |
| Collective | 疏林 Woodland | 0.003 | 1.03 |
| | 散生木 Scattered tree | 0.005 | 1.44 |
| | 四旁树 Four-side tree | 0.18 | 50.05 |
| | 合计 Total | 0.36 | 100 |

旁树乔木层的碳储量占到了一半以上.国有林地权属乔木层碳储量分布与整体分布结果一致,其中乔木林乔木层碳储量最大,占国有林地权属乔木层总碳储量的 98.9%.不同森林植被乔木层碳储量排序与植被分布面积一致,说明乔木林面积分布最多,其次是散生木和疏林,四旁树所占比例最少.这主要与立地条件较好的藏东南地区分布着大面积的天然林有关,而这些林地权属非集体或个人所有,在一定程度上对人们砍伐利用森林的活动起到了约束作用,更有利于西藏森林的经营管理.

**2.2**　不同林种森林植被碳储量和碳密度

由表 3 可以看出,不同林分乔木层碳储量依次为:阔叶混交林($298.07\times10^6$ t)>冷杉林($181.73\times10^6$ t)>云杉林($175.48\times10^6$ t)>高山松林($98.24\times10^6$ t)>云南松林($82.14\times10^6$ t)>栎类($46.20\times10^6$ t)>针阔混交林($28.72\times10^6$ t)>柏木林($17.94\times10^6$ t)>针叶混交林($13.77\times10^6$ t)>桦木林($8.89\times10^6$ t)>乔松林($4.81\times10^6$ t)>华山松林($4.30\times10^6$ t)>落叶松林($2.68\times10^6$ t)>铁杉林($2.15\times10^6$ t)>紫杉林($1.31\times10^6$ t)>杨树林($1.37\times10^6$ t)>柳树林($0.77\times10^6$ t)>其他软阔类($0.68\times10^6$ t)>其他硬阔类($0.39\times10^6$ t)>榆树($0.0007\times10^6$ t).碳储量所占比例以阔叶混交林、冷杉林和云杉林较大,分别为 30.7%、18.7%和 18.1%.这与 3 种林分的面积和碳密度大小有关,林木碳密度和分布面积越大,碳储量越多.可见,这 3 种林分在全区森林植被中地位十分重要,在一定程度上其碳储量的动态变化将引起整个藏区森林生态系统的碳源汇功能产生波动.

不同林分乔木层的平均碳密度为 92.82 $t \cdot hm^{-2}$,其大小依次为:冷杉林>针阔混交林>华山松林>云南松林>落叶松林>紫衫林>阔叶混交林>云杉林>高山松林>乔松林>铁杉林>针叶混交林>栎类林>其他硬阔类>桦木林>柳树林>柏木林>其他软阔类>杨树林>榆树林.其中,冷杉林碳密度最大,为 227.40 $t \cdot hm^{-2}$.这主要源于两方面原因,一方面取决于生长环境,冷杉主要分布在海拔 3500 m 以上的阴坡,其生长缓慢,材质过密[14];另一方面与成熟林和过熟林分布面积较大有关.从不同林分乔木层碳密度排序可以看出,冷杉林、针阔混交林、华山松林、云南松林、落叶松林、紫衫林、阔叶混交林、云杉林、高山松林和乔松林碳密度均大于平均碳密度,表明在西藏这 10 种植被的固碳能力较强,在森林生态系统碳源汇功能中,碳汇功能相对较强.

从林种水平来看,西藏自治区森林植被以防护林和特殊用途林为主,其乔木层碳储量占 4 大林种(除经济林)总碳储量的 88.5%.不同林种乔木层碳储量大小依次为:防护林>特殊用途林>用材林>薪炭林.由于西藏海拔高,气温低,植被生长缓慢,用材林和薪炭林分布较少.不同林种乔木层平均碳密度为88.09 $t \cdot hm^{-2}$,高于薪炭林而低于防护林、特殊

**表 3 西藏不同林种乔木层植被的碳储量和碳密度**

**Table 3 Carbon storage and carbon density of tree layer in different forest types in Tibet**

| 林分类型 Forest type | 防护林 Shelterbelt | | 特殊用途林 Special-purpose forest | | 用材林 Timber forest | | 薪炭林 Firewood forest | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density (t · hm$^{-2}$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density (t · hm$^{-2}$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density (t · hm$^{-2}$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density (t · hm$^{-2}$) |
| 冷杉林 *Abies fabri* forest | 62.02 | 237.52 | 105.72 | 225.75 | 13.99 | 218.94 | – | – |
| 云杉林 *Picea asperata* forest | 136.96 | 96.03 | 23.04 | 179.86 | 15.48 | 76.50 | – | – |
| 铁杉林 *Tsuga chinensis* forest | – | – | 2.15 | 92.27 | – | – | – | – |
| 落叶松林 *Larix gmelinii* forest | 1.80 | 93.76 | 0.88 | 182.63 | – | – | – | – |
| 华山松林 *Pinus armandii* forest | 3.67 | 192.08 | 0.63 | 99.17 | – | – | – | – |
| 云南松林 *Pinus yunnanensis* forest | 54.54 | 136.99 | 8.01 | 128.58 | 19.59 | 163.81 | – | – |
| 高山松林 *Pinus densata* forest | 76.55 | 110.19 | 20.42 | 123.78 | 1.27 | 85.65 | – | – |
| 乔松林 *Pinus griffithii* forest | 1.44 | 150.02 | 2.66 | 92.33 | 0.71 | 49.45 | – | – |
| 柏木林 *Cupressus funebris* forest | 12.74 | 24.91 | 2.14 | 60.94 | 3.06 | 29.49 | – | – |
| 紫杉林 *Taxus chinensis* forest | – | – | 1.31 | 122.42 | – | – | – | – |
| 桦木林 *Betula platyphylla* forest | 1.81 | 42.65 | 2.11 | 64.99 | 1.06 | 55.04 | – | – |
| 榆树林 *Ulmus pumila* forest | 0.0007 | 0.90 | – | – | – | – | – | – |
| 栎类林 *Quercus* forest | 35.36 | 78.49 | 8.41 | 83.62 | 2.43 | 96.40 | – | – |
| 其他硬阔类林 Hard broad-leaved stand | 0.33 | 34.16 | – | – | 0.03 | 63.20 | 0.03 | 74.62 |
| 杨树林 Poplar stand | 0.32 | 7.70 | – | – | 0.03 | 5.26 | – | – |
| 柳树林 Willow stand | 0.48 | 30.16 | 0.04 | 45.08 | – | – | 0.25 | 48.44 |
| 其他软阔林 Soft broad-leaved stand | 0.03 | 6.00 | 0.65 | 67.28 | – | – | – | – |
| 针叶混交林 Coniferous mixed forest | 6.15 | 85.48 | 5.92 | 69.84 | 1.70 | 117.85 | – | – |
| 阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest | 191.59 | 124.44 | 56.33 | 126.22 | 50.15 | 107.34 | – | – |
| 针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest | 10.99 | 99.80 | 15.65 | 125.63 | 2.08 | 218.71 | – | – |
| 合计 Total | 598.59 | 83.89 | 260.88 | 107.88 | 111.58 | 99.05 | 0.28 | 61.53 |

用途林和用材林.这是由薪炭林中缺少碳密度较大的冷杉林、针阔混交林等植被造成的.

**2.3** 不同林组乔木层碳储量及碳密度

从表 4 可以看出,西藏森林植被以成熟林分布最多,占所有森林植被的 38.7%,其次是近熟林和过熟林,分别占 26.6% 和 18.3%,幼龄林所占比例最少,仅占 6.3%.从植被生长特征来看,西藏森林植被生长潜能较强林分与生长潜能不大的老化林面积相差不大,说明西藏未来的森林发展相对稳定.不同林组乔木层碳储量与分布面积排序一致,依次为:成熟林>过熟林>近熟林>中龄林>幼龄林.成熟林乔木层碳储量占西藏整个森林生态系统的 50%,这与其面积分布和碳密度大小关系密切.不同林分按龄组碳储量来看,阔叶混交林在幼龄林、中龄林、近龄林、成熟林中均为最大,其面积也最大.在过熟林中冷杉林碳储量最大,其面积和碳密度也最大.从不同林组植被可以看出,幼龄林和过熟林中林分分布最多,在 20 种林分中占了 17 种,而幼龄林中林分分布最少,只占 12 类,落叶松、铁杉、华山松、乔松等在幼龄林中均没有分布.

从林组结构来看,不同龄组乔木层平均碳密度为 86.45 t · hm$^{-2}$.碳密度大小排序为:过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,其中,过熟林乔木层碳密度为不同林林组乔木层平均碳密度的 2 倍,这主要与树种的本身特性有关.同一树种在不同林组中碳密度大小不同,其均随林组的增大而增大,这与植被生长状况有关,初期植被树木特征均很小,随着林龄的增大其慢慢变大,碳密度随之发生了变化.以上分析表明,不同林组中成熟林的分布对西藏地区森林乔木层碳储量影响最大,随着成熟林分布面积的增大,其碳储量也增多.此外,不同林组中林分的分布对其碳储量大小也有一定影响.

**2.4** 不同地区乔木层碳储量和碳密度的分布

西藏独特的地理环境和自然条件使得森林植被分布极不均匀.由图 1 可知,东南至西北植被分布数量和分布密度均呈减少趋势;由于降水稀少、地势高寒的原因,那曲地区和阿里地区基本没有森林分布,植被大多以耐寒耐旱的低矮灌丛、草地为主.而藏东南地区受西南季风气候影响,森林植被比西北地区丰富,且呈明显垂直分布.不同市(区)森林乔木层碳储量分布为:林芝市>昌都市>山南地区>日喀则市>拉萨市>那曲地区>阿里地区;其中,林芝市乔

**表 4　西藏不同林组乔木层林分的碳储量和碳密度**

**Table 4　Carbon storage and carbon density of tree layer in different age groups in Tibet**

| 林分类型 Forest 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 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 面积 Area ($\times10^4$ $hm^2$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) | 面积 Area ($\times10^4$ $hm^2$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) | 面积 Area ($\times10^4$ $hm^2$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) | 面积 Area ($\times10^4$ $hm^2$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) | 面积 Area ($\times10^4$ $hm^2$) | 碳储量 Carbon storage ($\times10^6$ t) | 碳密度 Carbon density ($t \cdot hm^{-2}$) |
| 冷杉林 *Abies fabri* forest | 0.48 | 0.19 | 39.63 | 2.12 | 1.70 | 80.13 | 6.66 | 9.42 | 141.39 | 30.53 | 65.49 | 214.53 | 39.54 | 104.93 | 265.37 |
| 云杉林 *Picea asperata* forest | 9.52 | 0.78 | 8.28 | 14.22 | 5.98 | 42.07 | 32.22 | 19.54 | 60.64 | 86.72 | 100.21 | 115.55 | 32.98 | 48.97 | 148.47 |
| 铁杉林 *Tsuga chinensis* forest | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 0.48 | 2.15 | 447.55 |
| 落叶松林 *Larix gmelinii* forest | – | – | – | 0.48 | 0.15 | 30.96 | 0.48 | 0.69 | 144.81 | 0.48 | 0.52 | 108.71 | 0.96 | 1.31 | 136.59 |
| 华山松林 *Pinus armandii* forest | – | – | – | 0.08 | 0.06 | 77.68 | 0.08 | 0.09 | 113.42 | 0.47 | 0.26 | 55.78 | 1.92 | 3.89 | 202.52 |
| 云南松林 *Pinus yunnanensis* forest | 2.12 | 1.07 | 50.48 | 3.24 | 2.38 | 73.40 | 15.95 | 20.51 | 128.58 | 28.42 | 44.50 | 156.58 | 8.27 | 13.68 | 165.46 |
| 高山松林 *Pinus densata* forest | 0.88 | 0.19 | 22.11 | 5.36 | 2.81 | 52.55 | 17.72 | 15.26 | 86.14 | 48.83 | 58.22 | 119.23 | 14.66 | 21.74 | 148.32 |
| 乔松林 *Pinus griffithii* forest | – | – | – | – | – | – | 19.92 | 15.26 | 76.63 | 23.96 | 58.28 | 242.98 | 12.40 | 21.74 | 175.35 |
| 柏木林 *Cupressus funebris* forest | 16.71 | 0.17 | 0.99 | 15.82 | 1.93 | 12.25 | 10.72 | 2.04 | 19.03 | 11.15 | 6.10 | 54.73 | 10.59 | 7.68 | 72.55 |
| 紫杉林 *Taxus chinensis* forest | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 3.48 | 3.00 | 86.35 |
| 桦木林 *Betula platyphylla* forest | 3.88 | 0.81 | 23.03 | 5.75 | 2.38 | 41.53 | 3.36 | 2.02 | 61.42 | 2.40 | 67.60 | 85.00 | 1.44 | 1.56 | 108.29 |
| 榆树林 *Ulmus pumila* forest | 0.04 | – | – | 0.02 | 0.0007 | 3.60 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 栎类林 *Quercus* forest | 12.02 | 1.02 | 8.45 | 11.83 | 5.46 | 46.14 | 12.67 | 10.94 | 86.32 | 17.55 | 23.29 | 132.69 | 3.56 | 5.51 | 154.69 |
| 其他硬阔类林 Hard broad-leaved stand | – | – | – | 1.08 | 0.41 | 37.81 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 杨树林 Poplar stand | 0.80 | 0.02 | 2.87 | 1.84 | 0.14 | 7.68 | 0.93 | 0.06 | 5.88 | 1.76 | 0.49 | 28.19 | 0.48 | 0.66 | 136.76 |
| 柳树林 Willow stand | 0.60 | 0.01 | 2.01 | 0.48 | 0.03 | 5.20 | 0.52 | 0.28 | 53.98 | 0.12 | 0.06 | 49.92 | 0.47 | 0.39 | 82.95 |
| 其他软阔林 Soft broad-leaved stand | – | – | – | 0.48 | 0.03 | 5.48 | 0.96 | 0.65 | 67.56 | – | – | – | – | – | – |
| 针叶混交林 Coniferous mixed forest | 1.92 | 0.32 | 16.49 | 7.96 | 4.09 | 51.36 | 1.00 | 1.61 | 161.00 | 2.39 | 1.81 | 75.82 | 3.84 | 5.94 | 154.78 |
| 阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest | 4.32 | 1.64 | 38.03 | 15.56 | 8.32 | 53.46 | 111.92 | 113.96 | 101.82 | 88.51 | 128.62 | 145.31 | 25.00 | 45.53 | 182.14 |
| 针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest | 3.35 | 0.79 | 23.56 | 4.32 | 2.37 | 54.86 | 5.28 | 4.81 | 91.15 | 6.20 | 10.39 | 167.66 | 5.28 | 10.36 | 196.26 |

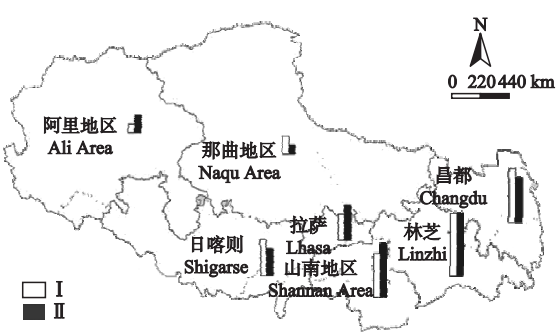



**图 1**　西藏自治区乔木层森林植被碳储量(Ⅰ)、碳密度(Ⅱ)分布

**Fig.1**　Distribution of carbon storage (Ⅰ) and carbon density (Ⅱ) of tree layer in forest vegetation in Tibet.

柱子的高度表示碳储量和碳密度的相对大小 Histogram indicated the relative values of carbon storage and carbon density.

木层碳储量所占乔木层总碳储量比例最大,为64.4%;阿里和那曲两地区乔木层碳储量所占比例不到总碳储量的 1%,这与两地区地理环境密不可分.乔木层碳密度在不同市(区)的大小为林芝市>山南地区>昌都市>拉萨市>日喀则市>阿里地区>那曲地区;其中,林芝市乔木层碳密度最大,为 78.03 $t \cdot hm^{-2}$,这主要因为林芝市分布着以温带松林和亚高山暗针叶林为主的原始森林.可知,水分和温度对西藏森林植被的碳储量分布影响巨大.

## 3　讨　　论

### 3.1　西藏林业碳汇的战略地位

气候变化不仅是科学界研究的核心问题,还与诸国政治、社会、经济、外交等紧密相关[15].据 IPCC 评估报告显示,20 世纪以来全球气温平均上升 0.6 ℃[16],气温的上升不仅影响自然生态系统,同时使区域或全球性极端气候事件的发生频率不断增加.而西藏作为中国乃至世界的重要生态屏障,研究其森林生态系统碳储量和碳密度,不仅有利于西藏林业碳汇的进一步管理,同时还为未来气候变化预测提供基础数据支撑.其战略地位的重要性可以从以下几方面来阐述:

1) 西藏森林资源丰富.从分布面积来看,森林面积在各省中排名第五,森林蓄积则居于全国首位,每公顷蓄积量远远高于国家平均值(72.89 $m^3$),同样居于我国第一位[17].从植被多样性来看,与我国其他省相比,西藏植被丰富程度仅次于云南、四川、广东和广西,其种子植物多达 5766 种,包含了从热带到寒带的大部分植被类型[18].藏东南地区尤其是

林芝和昌都两市在 3500 m 左右地带分布着大面积茂密的原始森林,增强了森林对不利因素的抵抗能力.使其不仅为西藏人民营造了适宜居住的环境,在生态安全的维护和气候变化应对方面也发挥着十分重要的作用.

2)森林乔木层碳储量基数大,总量为 $1.067\times10^9$ t,平均碳密度为 72.49 t·$hm^{-2}$,与同期西南五省相比,其排名依次为:西藏自治区>云南省>四川省>贵州省>重庆市[19].其次,从用途水平来看,防护林碳储量所占比重最大,为 $598.59\times10^6$ t,占所有林种总碳储量的 61.6%,而受人类活动影响大的用材林和薪炭林的碳储量仅占 11.5%.依据我国政策,防护林、特殊用途林受法律保护,不允许人们滥砍乱伐,使其更有利于长远利益的发展.

独特的地理环境和自然条件使得西藏森林碳储量分布很不均匀,呈自西北向东南递减的趋势,林芝市最大,阿里地区最小,这主要由水热分布不均匀引起的,水热条件较好的藏东南地区尤其林芝市森林碳储量较高,而水热条件差的阿里、那曲地区碳储量分布较少.但另一方面,西藏年温差较小,日温差较大,使植物在白天高温下有利于光合作用合成有机物;夜间低温,呼吸作用减弱,增加了干物质积累[20];而较小的年温差对林木生长周期有一定的延缓作用,对林木生长同样有着十分重要的意义[21].其次,由于独特的地形条件和热量条件,与其他省相比,在垂直带上相同类型植被中西藏植被分布的海拔更高.西藏树线高度可达 4300~4500 m;亚热带常绿阔叶林分布的海拔为 2100~2400 m[22];对于同纬度茶树,西藏栽培上限为 2500 m,而华东地区只能达到 1500 m[23],西藏的栽培高度高出华东地区 1000 m 以上[24].此分布规律对西藏引种栽培工作有着十分重要的意义.

西藏林木生长受干扰程度与其他省份相比较小.一方面,西藏森林碳储量 99.9%来自于国有林地权属.另一方面,西藏是以畜牧业为主的省份,大面积的草原都分布于拉萨北部以及那曲、日喀则地区,在一定程度上减少了对林木的需求量;除林产品外,对森林利用较多的方面就是作为燃料和牲畜饲料;而近年来随着我国经济社会的发展,电力行业在西藏发展迅猛,水力发电不仅解决了西藏的燃料问题,还对西藏生态环境保护,尤其森林保护有着十分重要的作用.其次,由于政策关系,西藏林木砍伐量远远低于其他省份.综上所述,西藏森林虽然分布不均匀,但森林健康水平和发展潜能都很高,在未来应对气候变化的过程中意义更重大.

### 3.2 估算方法对碳储量的影响

关于森林生态系统碳储量和碳密度估算问题各国学者已展开了大量研究.目前,林业碳汇估算常见的方法有以下 3 种:1)生物量法[12].早期,人们用标准样地实测平均生物量和相对应的面积推算整个森林生态系统的生物量,但此方法往往会导致估算结果偏大.Brown 等[25]、Schroeder 等[26]和 Fang 等[27]利用林分生物量、蓄积量和林分材积建立了生物量转化因子连续函数模型.此方法克服了生物量与蓄积量的比值为常数的不足,对区域或国家森林生态系统碳储量的估算结果更准确.2)蓄积量法[28].该方法以林分蓄积量和树种平均容重转化求算碳储量,用这种方法的研究成果相对较少.3)生物量清单法,此方法是以蓄积量和生物量的关系为基础.用这种算法需要树干密度、树木碳含率等参数.本文采用第 3 种方法,以文献中的数据和森林资源清查数据估算了西藏地区的森林碳储量.

任德智等[29]和葛立雯等[30]用二次森林清查数据,利用生物量转化因子连续函数法对西藏昌都和林芝的碳储量进行了估算,昌都和林芝森林植被的总碳储量和平均碳密度分别为:$1.06\times10^8$ t、67.31 t·$hm^{-2}$和 $2.43\times10^8$ t、76.01 t·$hm^{-2}$.林芝和昌都作为西藏第一和第二大林区,其碳储量和碳密度比本研究结果略小.忽略因时间引起的差异,3 篇文献的研究结果相差不大,说明在估算不同区域碳储量时,碳储量估算参数受地域差异影响不大.

森林生态系统碳储量估算方法较多,但计算中用到的参数却不一致,这也是导致人们对估算结果很难做出优劣评价的原因.由于地域的差异性,本文所选参数可能导致碳储量估算偏差,这需要进一步研究.

### 3.3 西藏林业碳汇发展以及提升森林碳汇的途径

林组反映了森林生态系统的年龄结构状态.本研究中,不同林组成熟林碳储量最大为 $5.66\times10^8$ t,幼龄林最小仅为 $7\times10^6$ t.一方面,碳储量与植被生长状况和树木本身特性有关,随着苗木的生长,生物量不断增加,碳储量也不断增加,当树木达到一定林龄,生物量不再增加,有的甚至干枯死亡,碳储量下降.另一方面,与森林面积有关,森林面积越大碳储量越多.由表 4 可知,不同林组面积的顺序为:成熟林($349.49\times10^4$ $hm^2$)>近熟林($240.39\times10^4$ $hm^2$)>过熟林($165.35\times10^4$ $hm^2$)>中龄林($90.64\times10^4$ $hm^2$)>幼龄林($56.64\times10^4$ $hm^2$),其中,幼龄林、中龄林和近

熟林面积之和,比成熟林和过熟林之和小 $1.272\times10^6$ $hm^2$;且幼龄林中分布的林分较少,尤其是碳密度较大的华山松、乔松等,长期发展可能会影响未来西藏森林生态系统的碳循环.为使西藏的生态屏障发挥最大的综合效益,西藏林业部门在以后的经营管理中应注重林组结构及其林分组成.

西藏森林生态系统碳储量还有很大的提升空间.其中,未利用土地占有相当大的比例,可以通过人工造林扩大林地面积,提高森林碳汇;与此同时,可以通过科学合理的森林经营提升森林质量,增加森林植被碳密度,从而提高西藏森林生态系统的总碳储量.

## 参考文献


[1] Dixon RK, Solomon AM, Brown S, *et al*. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185-190

[2] Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 945-958

[3] Solomon S. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group Ⅰ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[4] 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)

[5] Liu W-W (刘魏魏), Wang X-K (王效科), Lu F (逯非), *et al*. Regional and global estimates of carbon stocks and carbon sequestration capacity in forest ecosystems: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(9): 2881-2890 (in Chinese)

[6] West PW. Tree and Forest Measurement. Berlin: Springer, 2009

[7] Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, *et al*. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*, 2007, **126**: 197-207

[8] Xiao X-W (肖兴威). Study on Forest Biomass and Productivity in China. PhD Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2005 (in Chinese)

[9] Zhang K (张　坤). Researches on Estimation Method of Forest Carbon Sequestration. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2007 (in Chinese)

[10] Liu H (刘　华), Lei R-D (雷瑞德). Research methods and advances of carbon storage and balance in forest ecosystems of China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2005, **25**(4): 835-843 (in Chinese)

[11] Luo Y-J (罗云建), Zhang X-Q (张小全), Wang X-K (王效科), *et al*. Forest biomass estimation methods and their prospects. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(8): 129-134 (in Chinese)

[12] Dai J-S (戴景晟). Research and Application for the Calculation Method of the Carbon Sequestration of Stand. Master Thesis. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2009 (in Chinese)

[13] China News Network (中国新闻网). The First Comprehensive Survey of Forest Resources in Tibet [EB/OL]. (2015-04-08) [2016-10-21]. http://politics.people.com.cn/n/2015/0408/c70731-26814562.html (in Chinese)

[14] 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)

[15] Schulze ED, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. *Science*, 2000, **289**: 2058-2059

[16] Li G-D (李国栋), Zhang J-H (张俊华), Chen C (陈聪), *et al*. Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2013, **22**(5): 873-878 (in Chinese)

[17] State Forestry Administration (国家林业局). Results of the eighth national forest inventory. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2014(1): 1-2 (in Chinese)

[18] Wu Z-Y (吴征镒). Flora of Tibet. Beijing: Science Press, 1983 (in Chinese)

[19] Yan T (燕　腾), Peng Y-H (彭一航), Wang X-K (王效科), *et al*. Estimation on carbon reserve and carbon density of the forest vegetation on five southwestern provinces. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2016, **31**(4): 39-43 (in Chinese)

[20] Liu Z-M (刘志民), Yang J-D (杨甲定), Liu X-M (刘新民). Effects of several environmental factors on plant physiology in Qinghai-Xizang Plateau. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2000, **20**(3): 309-313 (in Chinese)

[21] Zhao X-P (赵西平), Guo M-H (郭明辉), Zhu X-L (朱熙岭). Advance in research on the effects of temperature on trees growth and wood formation. *Forest Engineering* (森林工程), 2005, **21**(6): 1-4 (in Chinese)

[22] Yang J-X (杨建祥). The distribution features and development strategy of Tibet forest resource. *Sichuan Forestry Exploration & Design* (四川林勘设计), 1997(3): 5-12 (in Chinese)

[23] Li L (李　兰), Jiang Y-W (江用文), Xiong X-P (熊兴平), *et al*. Analysis on regional distribution and some botanical characters of teagermplasm resources in China. *Chinese Teas* (中国茶叶), 2008, **30**(5): 17-20 (in Chinese)

[24] Ren Q-S (任青山), Yang X-L (杨小林), Cui G-F (崔国发), *et al*. Smith fir population structure and dynamics in the timberline ecotone of the Sejila Mountain, Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报),

2007, **27**(7): 2669-2677 (in Chinese)
[25] Brown SL, Schroeder P, Kern JS. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 1999, **123**: 81-90
[26] Schroeder P, Brown S, Mo J, *et al*. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Science*, 1997, **43**: 424-434
[27] Fang JY, Chen AP, Peng CH, *et al*. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320-2322
[28] Zhou Z-Y (周志勇), Wang X-P (王襄平), Zheng J-M (郑景明), *et al*. Estimation methods in predicting carbon stock of forest communities in the natural reserve of Baihua Mountain. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2012, **40**(11): 139-146 (in Chinese)
[29] Ren D-Z (任德智), Ge L-W (葛立雯), Wang R-H (王瑞红), *et al*. Carbon storage and spatial pattern of forest vegetation in Changdu, Tibet. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2016, **35**(4): 903-908 (in Chinese)
[30] Ge L-W (葛立雯), Pan G (潘 刚), Ren D-Z (任德智), *et al*. Forest carbon storage, carbon density, and their distribution characteristics in Linzhi area of Tibet, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 319-325 (in Chinese)

**作者简介** 刘淑琴, 女, 1990 年生, 硕士研究生. 主要从事荒漠化监测与防治研究. E-mail: lsqin_2265@163.com

**责任编辑** 孙 菊