

# 基于森林资源二类调查数据的森林碳储量和固碳潜力评估

——以西藏自治区扎囊县为例

王晓慧,陈永富,刘 华,赵 峰,陈 巧,凌成星,杨廷栋

(中国林业科学研究院 资源信息研究所,北京 100091)

**摘要:**基于森林资源二类调查数据,运用生物量转换因子法和单位面积平均生物量法,估算西藏自治区扎囊县森林生物量,再乘以含碳系数估算森林碳储量。根据生物群落演替的顶级理论和空间代替时间法,以成熟林碳储量作为森林生物量碳容量参照,应用森林生物量碳容量与当前(或某一年)森林碳储量的差值估算森林固碳潜力。结果表明,扎囊县森林植被碳储量为768 751.91 t。灌木林是青藏高原的原生植被,碳储量占森林碳储量的84%,发挥着重要的固碳作用。扎囊县森林资源以发挥生态防护功能为主要目的,有利于森林自然生长积累碳储量,防护林面积和碳储量占森林面积和碳储量比例均高达99%。乔木林碳储量按起源以人工林为主,占91%;按树种以柳树和杨树为主,占90%;在龄组方面,中龄林、近熟林和成熟林碳储量较大,占88%。随着龄组增大,从幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林到过熟林,碳密度依次增大,从1.17 t/hm<sup>2</sup>到55.67 t/hm<sup>2</sup>。乔木幼龄林、中龄林和近熟林在乔木林面积中占88%,但是碳密度远低于乔木成熟林的平均碳密度40.28 t/hm<sup>2</sup>。随着乔木林从幼龄林逐步成长为成熟林,碳储量将显著增大。乔木林固碳潜力为251 782.90 t,是乔木林碳储量的2.21倍。宜林地、无立木林地、未成林造林地和苗圃地固碳潜力与面积大小正相关,固碳潜力为365 947.81 t。相应的措施可以进一步提高森林碳汇:封山(沙)育林等措施促进灌木林资源发展,稳定并提高灌木林面积和覆盖度;全面提升森林经营管理水平,提高森林资源质量;继续推进重点林业工程建设,因地制宜开展人工造林和封山育林,提升森林资源培育水平,确保人工造林成效。

**关键词:**森林资源二类调查;碳储量;碳密度;固碳潜力;扎囊县

中图分类号:S758.4

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)04-0125-07

Estimation of Carbon Storage and Potential Carbon Sequestration Based on the Second Type Inventory of Forest Resources——A Case Study of Zha'ng County of Tibet Autonomous Region

WANG Xiao-hui, CHEN Yong-fu, LIU Hua, ZHAO Feng, CHEN Qiao, LING Cheng-xing, YANG Ting-dong

(Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Based on the second type inventory of forest resources, forest biomass in Zha'ng county, Tibet Autonomous Region was estimated by using the methods of biomass expansion factor and average biomass per unit area, from which forest carbon storage was calculated by further multiplying carbon coefficient. According to the top theory of biological community succession and space-for-time substitution method, and taking carbon storage of mature forest as a reference of carbon carrying capacity, potential carbon sequestration was estimated based on the difference between carbon carrying capacity and carbon storage in current or a certain year. The results showed that forest carbon storage in Zha'ng county was 768 751.91 t.

收稿日期:2019-09-29 修回日期:2020-05-07

基金项目:中国林科院基本科研业务费专项(CAFYBB2017MB012);国家重点研发计划(2017YFC0506502)。

作者简介:王晓慧,博士,副研究员。研究方向:林业信息技术和遥感应用。E-mail:wangxh@ifrit.ac.cn

Shrub forests were the native vegetation in the region, which played an important role in carbon storage, and accounting for 84% of the total. For the purpose of ecological protection, forest resources growing naturally in Zha'nang county were beneficial to the accumulation of carbon storage. Percentages of both protection forest area and carbon storage accounted 99% of the total. The carbon storage of arbor forest was mainly comprised of planted forests with the proportion of 91%. From the view of forest types, *Salix* sp. and *Populus* sp. were the main arbor species with the proportion of 90%. From the view of forest age, middle-aged, pre-mature, and mature forests demonstrated high carbon storage (accounting for 88%). Carbon density increased with the forest age, ranged from 1.17 t/hm<sup>2</sup> to 55.67 t/hm<sup>2</sup>. The carbon densities of young forest, middle-aged forest and pre-mature forest were far below that of mature forest. As young forest developed into mature forest, carbon storage increased significantly. The potential carbon sequestration of arbor forest was 251 782.90 t, 2.21 times the carbon storage of arbor forest. The potential carbon sequestrations of suitable land for forest, unstocked forest land, unforested land and nursery were 365 947.81 t, positively correlated to the area. Taking relevant measures could further promote forest carbon sequestration; to conduct closing hillside project to develop shrub forest, to stabilize and increase the area and coverage of shrub forest; to promote the level of forest management and to improve the quality of forest resources; to sustainably carry out the key forestry projects and to further implement the policy of afforestation and closing the land for reforestation, to promote the level of forest resource cultivation and to ensure artificial afforestation effect.

**Key words:** forest second type inventory; carbon storage; carbon density; potential carbon sequestration; Zha'nang county

全球气候变化深刻影响着人类生存和发展,是各国共同面临的重大挑战<sup>[1-2]</sup>。温室气体排放增加是造成全球气候变化的重要原因,减少温室气体排放已经成为各国政府的共识。森林生态系统是陆地生态系统最大的碳库,贮存了陆地生态系统中50%~60%的碳,在有效降低大气中温室气体浓度,减缓全球气候变暖方面具有十分重要的作用<sup>[3-4]</sup>。及时准确地估算森林碳储量及其固碳潜力是制定应对气候变化和森林碳汇对策的技术支撑和科学依据。

西藏自治区位于青藏高原西南部,是我国和亚洲重要江河源区,是维系我国和东亚气候稳定的调节器,以及我国气候变化的启动区,生态地位极其重要,被定位为国家生态安全的重要屏障<sup>[5-6]</sup>。根据第九次全国森林资源清查结果,西藏自治区森林资源总量居我国前列,活立木蓄积量和森林蓄积量居全国首位,固碳储碳能力强大<sup>[6]</sup>。与此同时,高寒、干旱和缺氧的气候特征使高原生态环境极为脆弱和敏感,自我调节和修复能力差,一旦破坏,极难恢复。因此保护和管理好西藏自治区现有森林资源,提高森林质量,同时开展造林工程,培育和发展人工林资源,扩大森林面积,对于维护西藏自治区重要生态地位,发挥森林碳汇功能,以及减缓全球变暖具有十分重要的作用。

西藏自治区扎囊县东邻山南市政府驻地乃东

区,北与西藏自治区首府拉萨市区相连,经济社会发展活跃;同时,扎囊县位于雅鲁藏布江中游,雅鲁藏布江自西向东横贯全县中部,生态位置重要。以扎囊县为例,基于森林资源二类调查数据对森林碳储量和固碳潜力进行评估,分析不同森林植被类型、不同林种、不同起源、龄组和优势树种乔木林的碳储量和碳密度的差异性,预测森林植被和无林地造林后的固碳潜力,为该地区继续推动重点林业生态工程造林,全面提升森林经营管理水平,提高森林碳储量和固碳能力,发挥生态防护功能提供科学依据。

## 1 研究区概况

扎囊县位于西藏自治区中南部,山南地区北部。地理位置介于 28°27'50"—29°34'53"N, 90°03'34"—90°38'06"E,总面积 214 881.62 hm<sup>2</sup>。属于雅鲁藏布江中段高原高山河谷地貌,以高山和谷地为主,地势南北高中间低,最低海拔 3 541 m,最高 5 586 m,相对高差约 1 800 m。雅鲁藏布江自西向东从县境中部穿过,将全县分为南北两大部分,北侧为郭喀拉日居山脉,南侧为甘巴拉山余脉朗拉山,中部为雅鲁藏布江谷地。半干旱温带高原季风气候,最高气温 30.0℃,最低温度 -18.0℃,年均降雨量 410.5 mm,年降水分极不均衡,主要集中于 6—9 月,占全年降雨量的 75.5%。主要土壤类型有高山寒漠土、高山草甸土、高山草原土、亚高山草甸土、亚高山

草原土和山地灌丛草原土等6大类。植被属西藏植被地理区划中的藏南河谷亚高山灌丛草原区,受地形地貌、气候、降水等影响,植被分布具有明显的地域性和垂直分带性。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据资料

基础资料为研究区2013年森林资源二类调查数据,包括研究所涉及的因子,如地类、林种、优势树种(组)、小班面积、平均年龄、龄组、起源、小班蓄积量、林分蓄积量、散生木蓄积量、四旁树蓄积量、工程类别、天然更新等级等。

根据森林资源二类调查数据,扎囊县林地总面积91 823.67 hm<sup>2</sup>,其中,乔木林地6 737.64 hm<sup>2</sup>,疏林地10.15 hm<sup>2</sup>,灌木林地75 518.38 hm<sup>2</sup>,未成林造林地1 154.20 hm<sup>2</sup>,无立木林地2 648.57 hm<sup>2</sup>,宜林地5 671.99 hm<sup>2</sup>,苗圃地82.73 hm<sup>2</sup>。活立木总蓄积量269 648 m<sup>3</sup>,其中,乔木林蓄积量245 351 m<sup>3</sup>,散生木蓄积量92 m<sup>3</sup>,四旁树蓄积量24 205 m<sup>3</sup>。由于在二类调查数据中没有枯立木、下木层、草本层、枯枝落叶层、土壤层数据,因此未估算这几部分碳储量。本研究无林地包括未成林造林地、无立木林地、宜林地和苗圃地,这类林地新造林未成林或者未来可以造林并且产出林木资源。

### 2.2 生物量估算

研究森林生物量、碳储量和碳密度估算涉及乔木林、疏林、灌木林、散生木和四旁树。基于森林资源二类调查小班数据计算森林植被生物量和碳储量,首先根据森林植被类型和树种组,确定小班生物量计算模型和相关因子,计算小班生物量;然后根据树种组确定含碳率,计算小班碳储量;再根据小班面积计算小班碳密度;各小班生物量和碳储量之和为全县总生物量和碳储量。无林地没有森林植被,有些只有幼苗,生物量和碳储量很小,按照无林地没有森林生物量和碳储量计。

乔木林、散生木和四旁树根据森林资源二类调查数据中的蓄积量估算生物量,采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的材积源生物量法,也叫生物量转换因子法。其计算公式为:

$$B=V \cdot D \cdot BEF \cdot (1+R) \quad (1)$$

式中, $B$ 为生物量, $V$ 为蓄积量, $D$ 为木材密度, $BEF$ 为生物量扩展因子, $R$ 为根茎比(地下生物量与地上生物量之比)。基于式(1)的材积源计算方法,既适用于从宏观到微观的不同尺度,还可保证生物量与蓄积量之间的协调性<sup>[7-8]</sup>。IPCC提供了用于大尺度估计的参数,但这些参数用于中小尺度时往往会产

生较大偏差,需要采用适用于当地、省级或者国家级的参数体系,本文采用国家级的相关参数<sup>[9-10]</sup>。

乔木林根据森林资源二类调查小班数据中林分蓄积量计算林分生物量,所有乔木林分生物量求和获得乔木林总生物量。散生木和四旁树采用生物量转换因子法参照软阔树种参数估算生物量。

扎囊县疏林未达到林分蓄积量起测标准,森林资源二类调查数据中无蓄积量。疏林分布面积较小,只有1个小班为杨树(*Populus* spp.)中龄林。疏林采用平均生物量法估算生物量,单位面积生物量取平均值15.6 t/hm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。

灌木林采用平均生物量法估算生物量,单位面积生物量取西藏自治区平均值17.06 t/hm<sup>2</sup><sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 碳储量和碳密度估算

森林生物量碳储量(简称碳储量)估算通过森林生物量乘以生物量中碳元素的含量(即含碳系数)推算得到,碳密度是单位面积森林生物量碳储量即生物量碳密度(简称碳密度)。乔木林、疏林、散生木和四旁树碳储量具体由某种树种的生物量乘以相应树种的含碳系数得到该树种的碳储量<sup>[7,9]</sup>。

灌木林含碳系数取0.5,根据西藏自治区灌木林单位面积生物量,得到灌木林碳密度为8.53 t/hm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。

森林资源二类调查数据中散生木和四旁树只有蓄积量,没有面积数据,因此散生木和四旁树未估算碳密度。

### 2.4 固碳潜力评估

估算森林固碳潜力的大小需要有一个最大碳储量参考值。根据演替顶极生态系统理论,当植被最终演替为顶极森林生态系统时,生态系统能量和物质的输入、输出趋于平衡,这时的森林碳储量最适宜作为森林最大碳储量参考值。但是,森林植被演替到顶极森林生态系统的时间周期比较长,而且现实中找到当地的顶极森林生态系统比较困难。实际操作中通常采用空间代替时间法,假设成熟林的碳密度可以代表相近区域森林的最大碳密度,此时对应的最大碳储量称为森林生物量碳容量(简称碳容量)<sup>[14]</sup>。将森林碳容量与当前(或某一年)森林碳储量之差称为森林固碳潜力,应用该方法确定森林固碳潜力<sup>[15]</sup>。

本研究森林固碳潜力估算涉及森林植被和无林地。基于森林资源二类调查小班数据计算森林固碳潜力,首先森林植被小班根据树种组,无林地小班根据新造林树种或者预计未来造林树种,确定参照的成熟林碳密度;再根据小班面积计算小班的森林碳容量;小班森林碳容量与当前(或某一年)森林碳

储量之差得到小班森林固碳潜力;各小班森林固碳潜力之和为全县森林固碳潜力。

扎囊县乔木经济林都是果树林,主要是苹果(*Malus pumila*)和桃(*Amygdalus persica*)。根据对其它果树林,如柑橘林(*Citrus reticulata*)和杏树林(*Armeniaca vulgaris*)的研究表明,果树乔木层碳储量均随林龄的增长而增大,成林果园和老果园系统碳密度相对较高且较稳定<sup>[16-17]</sup>。本研究中假定果树林碳储量随林龄增长而增大,以盛产期碳储量确定果树林的碳容量。

灌木林通常在最初几年生长迅速,并很快进入稳定阶段,生物量变化较小,而且灌木林萌蘖能力和自我更新能力强,所以灌木林碳储量相对变化小,本文在测算固碳潜力时未考虑灌木林。

二类调查数据中散生木和四旁树没有面积、树种组和龄组信息,实际中造林树种以杨树和柳树为主,因此龄组结构参照乔木林中杨树和柳树各龄组的碳储量所占比例,碳储量增长率参照杨树和柳树幼龄林、中龄林和近熟林的碳储量到成熟林时的增长率,由此获得散生木和四旁树固碳潜力。

疏林经过退化森林修复,补植补造等措施,可以提高森林资源质量和生态防护功能。疏林以杨树乔木成熟林碳储量确定碳容量。

未成林造林地分为人工造林未成林地和封育未成林地,其中人工造林未成林地按照实际造林树种成熟林碳密度估算碳容量,封育未成林地都是灌木林,根据灌木林平均碳密度计算碳容量。根据扎囊县近年来的造林作业设计,该地区造林树种以杨树为主,且无立木林地、宜林地和苗圃地都在乔木垂直生长上限以下,即海拔 4 200 m 以下,因此假定无立木林地、宜林地和苗圃地未来的造林树种为杨树,这些林地根据杨树成熟林碳密度估算碳容量<sup>[18-19]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同森林植被类型的碳储量和碳密度

扎囊县森林植被面积为 82 266.17 hm<sup>2</sup>,占林地面积的 89%,占总土地面积的 38%,森林碳储量为 768 751.91 t(表 1)。青藏高原独特的地形地貌和高、旱、寒的自然特征促进了原生灌木林的生长和广泛分布<sup>[20]</sup>。扎囊县有 75 518.38 hm<sup>2</sup> 灌木林,均为国家特别规定灌木林,占森林植被面积的 92%。灌木林碳储量为 644 171.81 t,占森林碳储量的 84%,发挥着重要的生态防护和固碳作用。

扎囊县乔木林面积为 6 737.64 hm<sup>2</sup>,占森林植被面积的 8%。天然乔木林仅在县域北部有小面积分布,历史上人工乔木林面积不大。近 10 几年来,

陆续开展重点区域生态公益林建设、拉萨周边防护林、生态安全屏障防护林以及退耕还林等林业工程,依靠人工造林扩大森林面积,乔木林大多数是这些工程项目造林成长起来的。扎囊县乔木林碳储量为 113 829.42 t,占森林植被碳储量的 15%。乔木林碳密度为 16.89 t/hm<sup>2</sup>,是灌木林碳密度的 2 倍,乔木林单位面积固碳能力比灌木林更强。

表 1 不同森林植被碳储量和碳密度

Table 1 Carbon storage and carbon density of forest vegetation

森林植被类型	面积 /hm <sup>2</sup>	碳储量 /t	碳密度 /(t·hm <sup>-2</sup> )
乔木林	6 737.64	113 829.42	16.89
疏林	10.15	78.47	7.73
灌木林	75 518.38	644 171.81	8.53
散生木	—	40.41	—
四旁树	—	10 631.80	—

注:“—”表示无数值。

各级政府重视城镇绿化美化和护路林建设,同时农牧民为改善居住环境在房前屋后植树,散生木和四旁树占森林碳储量的 1%,在固碳方面也发挥着一定的作用。疏林面积和碳储量都比较小。

#### 3.2 不同林种森林植被碳储量和碳密度

扎囊县地处雅鲁藏布江中游,境内南北均为高山,中部为沿江宽谷地,受高原温带半干旱季风气候区的影响,干湿季分明降雨集中,风灾严重,每年的 2—4 月大风频繁,常引起沙尘暴天气,生态环境脆弱,对环境保护要求较高。扎囊县森林以发挥生态效能为主要目的,防护林主要有水源涵养林、水土保持林、防风固沙林,防护林面积占森林面积比例接近 100%,防护林碳储量占森林碳储量比例也高达 99%(表 2)。用材林、薪炭林和经济林碳储量按顺序依次减小,三者之和占森林碳储量的 1%。

表 2 不同林种的碳储量和碳密度

Table 2 Carbon storage and carbon density of different forest categories

林种	面积 /hm <sup>2</sup>	碳储量 /t	碳密度 /(t·hm <sup>-2</sup> )
防护林	82 101.03	749 540.08	9.13
用材林	107.81	6 335.96	58.77
薪炭林	47.94	2 083.31	43.46
经济林	9.40	120.35	12.81
合计	82 266.17	75 518.38	9.21

防护林中灌木林面积和碳储量分别占 92%和 86%,乔木林面积和碳储量分别占 8%和 14%,疏林面积和碳储量所占比例都 <1%。用材林均为人工乔木林,优势树种面积以杨树为主。薪炭林均为人工乔木林,优势树种面积以江孜沙棘(*Hippophae gyantsensis*)和杨树为主。各林种碳密度受乔木林

和灌木林组成比例,以及立地条件、栽培密度和经营水平影响,用材林的碳密度最大,为  $58.77 \text{ t/hm}^2$ ,薪炭林的碳密度次之,为  $43.46 \text{ t/hm}^2$ ,经济林和防护林的碳密度比较低。

### 3.3 不同起源、龄组和优势树种乔木林的碳储量和碳密度

不同优势树种面积和碳储量差异比较大,柳树面积和碳储量最大,分别占乔木林面积和碳储量的 61% 和 74%,其次杨树面积和碳储量分别占乔木林面积和碳储量的 24% 和 16%,其他优势树种面积和碳储量比较小(图 1)。柳树和杨树的碳密度分别为  $20.44 \text{ t/hm}^2$  和  $11.06 \text{ t/hm}^2$ ,其他优势树种碳密度平均为  $11.28 \text{ t/hm}^2$ 。

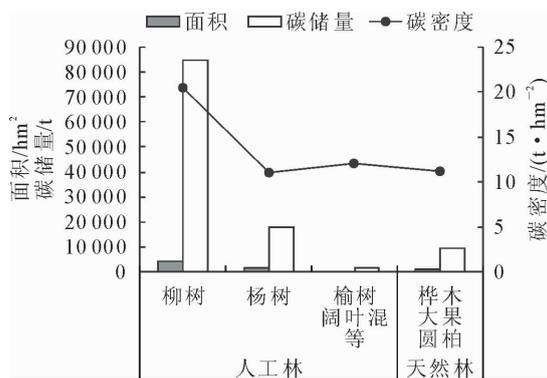


图 1 不同起源和优势树种乔木林碳储量和碳密度

Fig. 1 Carbon storage and carbon density of different origins and tree species of arbor forests

根据林分起源的不同,乔木林分为天然林和人工林 2 类。人工林优势树种有柳树、杨树、榆树 (*Ulmus pumila*)、阔叶混交林、江孜沙棘、苹果和桃,天然林优势树种为桦树 (*Betula* sp.) 和大果圆柏 (*Sabina tibetica*) 纯林。乔木林面积和碳储量均以人工林为主,分别占 87% 和 91%,天然林面积和碳储量较小。人工林碳密度高于天然林,分别为  $16.17 \text{ t/hm}^2$  和  $12.41 \text{ t/hm}^2$ 。

各龄组乔木林面积以幼龄林、中龄林和近熟林为主,三者之和占乔木林面积的 88%,其中中龄林、幼龄林和近熟林面积依次减小,分别占乔木林面积的 41%, 25% 和 22%,成熟林和过熟林面积比较小,二者之和占乔木林面积的 12%(图 2)。近熟林碳储量最大,占乔木林碳储量的 38%,其次中龄林和成熟林,分别占乔木林碳储量 29% 和 21%,过熟林和幼龄林碳储量较小,二者之和占乔木林碳储量的 11%。随着龄组增大,从幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林到过熟林,碳密度依次增大,从  $1.17 \text{ t/hm}^2$  增大到  $55.67 \text{ t/hm}^2$ 。

### 3.4 不同林地类型固碳潜力

林地总固碳潜力为  $869\ 183.82 \text{ t}$ ,其中森林植

被固碳潜力  $274\ 613.82 \text{ t}$ ,无林地固碳潜力  $594\ 570.00 \text{ t}$ (图 3)。各林地类型固碳潜力按大小顺序依次为宜林地 42% > 乔木林 29% > 无立木林地 20% > 未成林造林地 6% > 散生木和四旁树 2% > 苗圃地 1% > 疏林 0.08%。

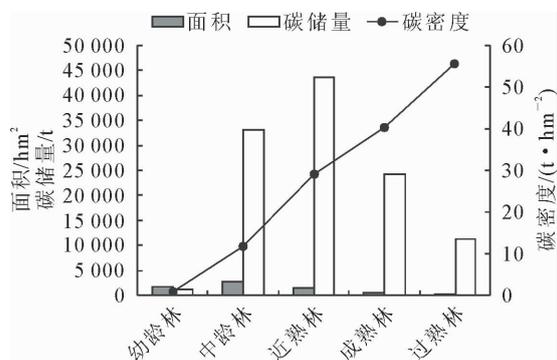


图 2 不同龄组乔木林碳储量和碳密度

Fig. 2 Carbon storage and carbon density of different forest ages of arbor forests

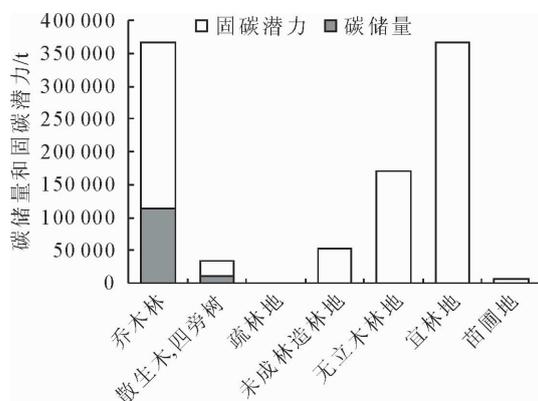


图 3 不同林地类型碳储量和固碳潜力

Fig. 3 Carbon storage and potential carbon sequestration of different forest lands

乔木林固碳潜力为  $251\ 782.90 \text{ t}$ ,是乔木林碳储量的 2.21 倍。主要是因为乔木林幼龄林、中龄林和近熟林在乔木林面积中占优势,但是这部分乔木林碳密度比较低,远低于乔木成熟林的平均碳密度  $40.28 \text{ t/hm}^2$ (图 2)。因此随着乔木林植被的自然生长,从幼龄林、中龄林和近熟林成长为成熟林,碳密度将逐渐增大,碳储量也将逐渐增大,有较大的固碳增长潜力<sup>[21]</sup>。散生木和四旁树龄组结构与乔木林类似,以幼龄林、中龄林和近熟林为主,其固碳潜力是碳储量的 2.08 倍。

乔木林以人工林固碳潜力为主,占乔木林固碳潜力的 99%(图 4)。各乔木林优势树种中,柳树和杨树固碳潜力最大,分别占乔木林固碳潜力的 61% 和 35%。不同龄组乔木林固碳潜力大小顺序依次为中龄林 48% > 幼龄林 37% > 近熟林 15%。

无林地固碳潜力与其面积大小正相关,固碳潜

力大小顺序依次为宜林地>无立木林地>未成林造林地>苗圃地。无林地固碳潜力为 365 947.81 t, 未来继续推进重点林业工程建设, 因地制宜实施人工造林和封山育林增加森林资源总量, 将产生较大的碳汇潜力。

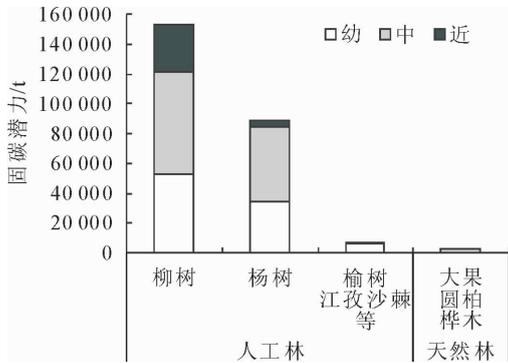


图 4 不同起源、龄组和优势树种乔木林固碳潜力

Fig. 4 Potential carbon sequestration of different origins, forest ages and tree species of arbor forests

## 4 结论与讨论

本研究基于森林资源二类调查数据, 估算了扎囊县森林、林木和林地资源的碳储量、碳密度和固碳潜力。

灌木林是适应青藏高原高、早、寒的原生植被, 在改善人类生存环境, 维持生态平衡方面发挥着重要作用。扎囊县灌木林碳储量为 644 171.81 t, 占森林植被碳储量的 84%。完善森林资源管护体系, 合理解决林农、林牧矛盾, 采取封山(沙)育林等措施促进灌木林资源发展, 增加灌木林面积和覆盖度, 有利于提高灌木林碳储量。

从林种结构来看, 扎囊县森林资源以发挥水源涵养、水土保持、防风固沙等生态防护功能为主要目的, 防护林面积占各林种总面积比例接近 100%, 防护林碳储量占森林总碳储量比例也高达 99%, 其他林种, 用材林、薪炭林和经济林三者之和占总碳储量的 1%。扎囊县森林受人类经济活动, 如采伐木材和薪材影响比较小, 更有利于森林自然生长积累碳储量, 稳定发挥森林的固碳能力。

扎囊县乔木幼龄林、中龄林和近熟林占乔木林面积的 88%, 乔木幼龄林的碳密度 0.81 t/hm<sup>2</sup>、中龄林的碳密度 11.90 t/hm<sup>2</sup> 和近熟林的碳密度 29.21 t/hm<sup>2</sup> 均低于成熟林的碳密度 40.28 t/hm<sup>2</sup>。随着乔木林从幼龄林逐渐成长为成熟林, 乔木林碳储量将明显增大, 乔木林固碳潜力是乔木林现有碳储量的 2.21 倍。全面提升森林经营管理水平, 不断提高森林资源质量, 将有利于提高森林碳汇能力。

扎囊县宜林地固碳潜力为 365 947.81 t, 占森林、林木和林地资源总固碳潜力的 42%, 是未来发挥固碳作用的重要组成部分。宜林地比较均匀地分布在扎囊县各乡(镇), 大部分分布在河滩地、流动沙丘、地势较为平坦的山坡地上。人工造林的固碳潜力取决于造林地的立地条件和造林质量。随着各项造林项目的不断推进, 水热条件、立地条件适合造林的面积也越来越少。扎囊县属青藏高原气候区, 不仅冬春季多大风、气温低, 干湿季分明、降雨量少而集中, 立地条件差, 造林绿化困难大。因此, 需要加大科技投入, 从造林地、树种和种苗选择, 以及整地、植苗、抚育和管理等环节入手, 引进优良适宜品种和挖掘、筛选乡土树种, 推广抗旱、抗碱、抗病虫害、抗逆性强适宜本地生长的植物良种。继续推进重点林业生态工程建设, 因地制宜开展人工造林和封山育林, 扩大森林面积; 提升森林资源培育水平, 确保人工造林成效, 才能保证未来人工造林的碳汇潜力。

由于森林二类调查数据中缺少林下植被、草本层、枯枝落叶层、枯死木和土壤层数据, 本研究未涉及上述各类碳储量, 仅考虑活立木和灌木林的碳储量, 因此对扎囊县森林碳储量和碳密度的估算有一定程度的偏低。

参与生物量和碳储量计算的参数, 根据数据源优先顺序排序为实测研究区相关树种参数>公开发表的研究区或相似生态条件下的数据>省级数据>国家级数据<sup>[9]</sup>。对于生物量的估计, 生物量模型法精度最高, 林木水平生物量模型精度高于林分水平模型<sup>[8,22]</sup>。本研究用参数主要来自于文献收集的省级和国家级数据, 应用的是林分水平生物量模型。参照立木生物量模型行业标准, 以及开展研究区生物量测定和研究有利于提高结果的适用性。

对于灌木林生物量和碳储量的估算, 采用了灌木林平均生物量, 没有完全反映灌木林受人畜活动影响、生境差异导致的灌木林生态系统多样性和特异性, 以及封山(沙)育林后灌木林质量的提升, 也没有考虑灌木林固碳潜力。在灌木林资源调查的基础上, 有待进一步开展灌木林样地水平的生物量模型构建, 以及灌木林固碳潜力估算研究。

## 参考文献:

- [1] 秦大河, Thomas Stocker, 259 名作者和 TSU. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- QIN D H, THOMAS S, 259 Authors and TSU. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 1-6. (in Chinese)

- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告( I ):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):1-5.  
DING Y H,REN G Y,SHI G Y,*et al.* National assessment report of climate change ( I ):climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*,2006,2(1):1-5. (in Chinese)
- [3] DIXON R K,BROWN S,HOUGHTON R A,*et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*,1994,262:185-190.
- [4] 张颖,吴丽莉,苏帆,等. 森林碳汇研究与碳汇经济[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(3):288-291.  
ZHANG Y,WU L L,SU F,*et al.* Forest carbon sinks and carbon sinks economy[J]. *China Population,Resources and Environment*,2010,20(3):288-291. (in Chinese)
- [5] 杜志,甘世书,黄湘南,等. 西藏自治区森林资源特点及经营管理策略[J]. 中南林业调查规划,2018,37(4):18-21.  
DU Z,GAN S S,HUANG X N,*et al.* Characteristics and protection strategy of forest resources in Tibet[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*,2018,37(4):18-21. (in Chinese)
- [6] 冯松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998,43(6):633-636.  
FENG S,TANG M C,WANG D M. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*,1998,43(6):633-636. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 曾伟生,陈新云,蒲莹,等. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J]. 林业科学研究,2018,31(1):66-71.  
ZENG W S,CHEN X Y,PU Y,*et al.* Comparison of different methods for estimating forest biomass and carbon storage based on national forest inventory data[J]. *Forest Research*,2018,31(1):66-71. (in Chinese)
- [9] 国家林业局. 碳汇造林项目方法学[EB/OL]. [2015-01-28]. <http://www.forestry.gov.cn/zlszz/4249/73699/5.html>,2015.
- [10] 李金良,施志国. 林业碳汇项目方法学[M]. 北京:中国林业出版社,2016.
- [11] 方精云,刘国华,徐蒿龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报,1996,16(5):497-508.  
FANG J Y,LIU G H,XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,1996,16(5):497-508. (in Chinese)
- [12] 付达夫. 西藏自治区灌木林碳储量估算[J]. 中南林业调查规划,2014,33(4):4-7.  
FU D F. Shrubwood carbon reserve estimation in Tibet Autonomous region [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*,2014,33(4):4-7. (in Chinese)
- [13] 燕腾,彭一航,王效科,等. 西南5省市区森林植被碳储量及碳密度估算[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):39-43.  
YAN T,PENG Y H,WANG X K,*et al.* Estimation on carbon reserve and carbon density of the forest vegetation in five Southwestern Provinces [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2016,31(4):39-43. (in Chinese)
- [14] 刘迎春,于贵瑞,王秋凤,等. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力[J]. 中国科学:生命科学,2015,45(2):210-222.  
LIU Y C,YU G R,WANG Q F,*et al.* Carbon carry capacity and carbon sequestration potential in China based on an integrated analysis of mature forest biomass[J]. *Science China: Life Sciences*,2015,45(2):210-222. (in Chinese)
- [15] 刘迎春,高显连,付超,等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. 生态学报,2019,39(11):4002-4010.  
LIU Y C,GAO X L,FU C,*et al.* Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on national forest resources inventory[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2019,39(11):4002-4010. (in Chinese)
- [16] 吴晓莲,程玥晴,罗友进. 重庆三峡库区柑橘果园系统碳储量及碳汇潜能研究[J]. 西南农业学报,2014,27(2):693-698.  
WU X L,CHEN Y Q,LUO Y J. Carbon sequestration and storage of citrus orchard system in three gorges reservoir region of Chongqing [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2014,27(2):693-698. (in Chinese)
- [17] 沈会涛,张韬,马文才,等. 太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征[J]. 生态学报,2018,38(18):6722-6728.  
SHEN H T,ZHANG T,MA W C,*et al.* Carbon storage and its allocation pattern in *Armeniaca vulgaris* plantations at different ages on the eastern slope of Taihang Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2018,38(18):6722-6728. (in Chinese)
- [18] 廖亮林,周蕾,王绍强,等. 2005—2013年中国新增造林植被生物量碳库固碳潜力分析[J]. 地理学报,2016,71(11):1939-1947.  
LIAO L L,ZHOU L,WANG S Q,*et al.* Carbon sequestration potential of biomass carbon pool for new afforestation in China during 2005—2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*,2016,71(11):1939-1947. (in Chinese)
- [19] 李奇,朱建华,冯源,等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J]. 气候变化研究进展,2018,14(3):287-294.  
LI Q,ZHU J H,FENG Y,*et al.* Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China [J]. *Climate Change Research*,2018,14(3):287-294. (in Chinese)
- [20] 黄清麟,张超. 西藏灌木林研究[M]. 北京:中国林业出版社,2011.
- [21] 李奇,朱建华,冯源,等. 中国主要人工林碳储量与固碳能力[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):1-6.  
LI Q,ZHU J H,FENG Y,*et al.* Carbon stocks and carbon sequestration capacity of the main plantations in China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2016,31(4):1-6. (in Chinese)
- [22] 曾伟生. 基于木材密度的34个树种组一元立木生物量模型建立[J]. 林业资源管理,2017(6):41-46.  
ZENG W S. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China [J]. *Forest Resources Management*,2017(6):41-46. (in Chinese)