

基于第九次森林资源清查的云南森林碳储量特征研究

涂宏涛,周红斌,马国强*,张蓉,杨书宇

(国家林业和草原局西南调查规划院,国家林业和草原局西南林业碳汇计量监测中心,云南昆明 650216)

摘要:系统估算云南省森林植被的碳储量和碳密度,为研究区域尺度的森林碳储量提供科学依据。以云南第9次森林资源清查数据为基础,采用生物量—蓄积量转换模型法和平均生物量法,结合不同树种的含碳率,分析乔木林中不同优势树种、林种、起源和龄组的碳储量分布特征。结果表明:1)云南不同森林类型的总碳储量为 1.05×10^9 t,平均碳密度 $44.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;2)乔木林中不同龄组的总碳储量大小排序为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林;3)云南省天然乔木林碳储量为 9.07×10^8 t,占乔木林总碳储量的90.76%;4)天然林的平均碳密度为 $62.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,近人工林的3倍。云南省森林碳储量、碳密度与林龄结构和起源关系密切,表现出森林碳密度随林龄增长而增加,森林碳储量随林龄增长而减少的趋势,天然林碳密度和碳储量均远远大于人工林,该研究为区域尺度的森林碳储量提供了科学依据。

关键词:森林碳汇;碳储量;碳密度

中图分类号:S718.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0185-09

Characteristics of Forest Carbon Storage in Yunnan Based on the Ninth Forest Inventory Data

TU Hong-tao, ZHOU Hong-bin, MA Guo-qiang*, ZHANG Rong, YANG Shu-yu

(Southwest Institute of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration/Center of Southwest Forest Carbon Accounting and Monitoring, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650216, Yunnan, China)

Abstract: The objective of this study was to systematically estimate the carbon storage and carbon density of forest vegetation in Yunnan Province based on the accurate data to provide scientific basis for the study of forest carbon storage in regional scale. The ninth inventory of forest resources in Yunnan Province was used as the basic data source. The biomass-volume conversion model and the average biomass method were adopted. Combined with the the carbon contents of different tree species, the distribution characteristics of the carbon storage of different dominant tree species, forest species, origin and age groups were analyzed. 1) The total carbon storage of different forest types in Yunnan was 1.05×10^9 t, and the average carbon density was $44.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2) The total carbon storage of different age groups in arbor forest occurred in the order of young forest>middle age forest>near mature forest>mature forest>overmature forest. 3) The carbon storage of natural forest in Yunnan was 9.07×10^8 t, contributing 90.76% to the total carbon storage of the forest. 4) The average carbon density of natural forest was $62.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was about three times of that of plantation forest. The forest carbon storage and carbon density are closely related to forest age structure in Yunnan, and forest carbon density increases with the increase of forest age. In addition, the carbon storage and carbon density of natural forests are much higher than that of plantation. This study provides a scientific basis for forest carbon storage at regional scale.

收稿日期:2022-04-07 修回日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金(31860603);国家林业和草原局林业软科学研究项目(2018-R14)。

第一作者:涂宏涛,工程师。研究方向:森林资源监测和生物多样性保护。E-mail:245240316@qq.com

*通信作者:马国强,高级工程师,硕士生导师。研究方向:森林资源监测和生物多样性保护。E-mail:271746575@qq.com

Key words: forest carbon sink; carbon stock; carbon density

随着全球气候变暖形势越发严峻,森林碳储量已成为气候变化领域和国际社会关注的热点^[1]。特别是习近平总书记在出席世界经济论坛“达沃斯议程”对话视频会中指出,“中国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,2060 年前实现碳中和”。因此,准确估算森林碳储量对于研究森林在区域和全球碳循环中有着十分重要的意义^[2]。

云南省作为中国西南区域林业大省,担负着不可替代的水源涵养和水土保持功能,在我国陆地生态系统中具有重要的地位。近年来,诸多学者从不同尺度对云南森林碳储量和碳密度进行了大量研究,李亮^[3]从时间尺度上研究了森林植被碳储量与碳密度随时间增长而增加的动态变化,汤浩藩等^[4]从森林龄林、起源和空间区域尺度上研究了森林植被碳储量与碳密度分布格局,研究显示乔木林碳储量最大、天然林的碳储量及碳密度均高于人工林和碳储量及碳密度表现为西高东低的规律。各学者对森林碳储量和碳密度的计算方法各有不同,特别是区域尺度森林碳储量的精确性仍然有待进一步研究。本研究以云南省第 9 次森林资源连续清查资料为基础,利用生物量—蓄积量转换模型法及平均生物量法,结合各树种不同含碳系数,系统估算云南省森林植被的碳储量和碳密度,分析其森林不同龄组、林种、起源及植被层的碳储量分布格局,为提高森林固碳能力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南(97°31′—106°11′E, 21°08′—29°15′N)地处中国西南边陲,属低纬度高原区域。东西横距 885 km,南北纵距 910 km,东部高原绵延,西部山川纵横,东西差异明显。夏无酷暑、冬无严寒,四季温差小。森林植被丰富多样,全省森林共划分为 4 个森林植被型、17 个森林植被亚型、105 个森林类型,是中国植物种类最多的省份,素有“植物王国”的美誉。据第 9 次全国森林资源清查数据统计,截至 2017 年,全省森林面积 2 106.16 万 hm^2 ,森林蓄积量 19.73 亿 m^3 ,森林覆盖率 55.04%。

1.2 数据来源

分析数据来源于第 9 次(2017 年)全国森林资源清查云南省清查数据,按照 6 km×8 km 网布设的边长 28.28 m、面积 0.08 hm^2 的清查固定样地 7 974 个。因森林资源清查未涉及枯枝落叶层、植被地下层、土壤层等数据的调查,因此,本研究仅包

括乔木林、竹林、疏林和灌木林的生物量和碳储量。

1.3 研究方法

森林蓄积量是森林生长的综合反映,根据目前多数学者研究表明,森林生物量与蓄积量存在着良好的线性回归关系。

1.3.1 生物量与蓄积量转换模型估算法——乔木林(含经济林)、疏林 采用方精云等^[5]的生物量-蓄积量转换模型对乔木林及疏林的生物量进行估算

$$B = aV + b \quad (1)$$

式中: B 表示单位面积生物量(t); V 表示单位面积蓄积量(m^3); a 、 b 为参数。各优势树种的生物量-蓄积量回归方程参数见表 1。在分树种的计算过程中,对于没有明确生物量-蓄积量转换模型的树种采用近似树种参数代替。

对乔木经济林的生物量采用生物量扩展因子法进行估算

$$B = V \times D \times B_{\text{EF}} \times (1 + R_{\text{SR}}) = V \times D / R \quad (2)$$

式中: D 表示木材基本密度; B_{EF} 为生物量扩展因子(地上部分生物量与树干生物量的比值); R_{SR} 为地下部分生物量与地上部分生物量的比值; R 为树干生物量与总生物量的比值。由于云南省乔木经济林以核桃为主,且资料有限,故乔木经济林的 D 、 R 值以核桃的相应值来替代。

1.3.2 平均生物量估算——竹林、灌木 采用平均生物量法来估算灌木林、竹林的生物量

$$B = A \times S \quad (3)$$

式中: A 表示单位面积生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); S 表示面积(hm^2)。由于云南森林资源清查资料各时期竹林面积都集中在杂竹上,没有统计毛竹的面积,所以这次竹林的单位面积平均生物量统一以杂竹来计算。具体使用方精云等^[6]推算中国森林植被生物量时采用的平均生物量:中国经济林的平均生物量为 23.7 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,秦岭淮河以南的灌木林平均生物量为 19.76 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、杂竹的平均生物量为 47.86 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3.3 森林植被碳储量估算 目前,国内大多数研究采用 0.5 或者 0.45 作为平均含碳率来推算森林的碳储量,由于不同树种(组),含碳系数也有所差异,仅统一采用固定含碳率推算碳储量会导致精度降低。因此,本研究根据《造林项目碳汇计量监测指南》(LY/T 2253—2014)及相关学者研究成果^[7-9]进行推算,对于没有测算过含碳率的树种(组),参考与其相近的树种(组)含碳率代替。

表 1 云南省各优势树种生物量方程和含碳率

Table 1 Biomass estimation equation and carbon content rate of different vegetations

编号	树种 (组)	蓄积-生物量方程	含碳率 (%)	面积/ 万 hm ²	编号	树种 (组)	蓄积-生物量方程	含碳率 (%)	面积/ 万 hm ²
1	冷杉	$B=0.464\ 2V+47.499$	49.99	36.45	17	樟木	$B=1.035\ 7V+8.059\ 1$	49.16	1.44
2	云杉	$B=0.464\ 2V+47.499$	52.08	5.28	18	楠木	$B=1.035\ 7V+8.059\ 1$	50.3	3.35
3	铁杉	$B=0.415\ 8V+41.331\ 8$	50.22	2.4	19	榆树	$B=0.756\ 0V+8.31$	48.34	0.96
4	油杉	$B=0.415\ 8V+41.331\ 8$	49.97	18.24	20	木荷	$B=0.756\ 0V+8.31$	48.34	4.32
5	落叶松	$B=0.609\ 6V+33.806$	52.11	0.48	21	枫香	$B=0.756\ 0V+8.31$	48.34	0.48
6	华山松	$B=0.585\ 6V+18.743\ 5$	52.25	35.03	22	其他硬阔类	$B=0.756\ 0V+8.31$	48.34	7.2
7	云南松	$B=0.510\ 1V+1.045\ 1$	51.13	283.12	23	杨树	$B=0.496\ 9V+26.973\ 0$	49.56	2.88
8	思茅松	$B=0.510\ 1V+1.045\ 1$	52.24	56.15	24	桉树	$B=0.887\ 3V+4.553\ 9$	52.53	42.24
9	高山松	$B=0.517V+33.238$	50.09	21.11	25	楝树	$B=0.475\ 0V+30.603\ 0$	49.56	0.48
10	其他松类	$B=0.516\ 8V+33.237\ 8$	51.10	0.48	26	其他软阔类	$B=0.475\ 0V+30.603\ 0$	49.56	52.3
11	杉木	$B=0.399\ 9V+22.541$	52.01	58.05	27	阔叶混	$B=0.625\ 5V+91.003$	49.0	603.2
12	柳杉	$B=0.415\ 8V+41.331\ 8$	52.35	1.92	28	针阔混	$B=0.801\ 9V+12.279\ 9$	48.93	194.37
13	柏木	$B=0.612\ 9V+46.145\ 1$	50.34	5.76	29	其他经济树种	23.7	47.0	166.04
14	针叶混	$B=0.516\ 8V+33.237\ 8$	51.68	59.02	30	疏林	$B=0.575\ 1V+38.706$	50.0	24.48
15	栎类	$B=1.145\ 3V+8.547\ 3$	50.04	191.48	31	竹林	47.86	46.2	11.52
16	桦木	$B=1.068\ 7V+10.237$	49.14	8.64	32	灌木林	19.76	48.97	437.6

2 结果与分析

2.1 不同森林类型的碳储量及碳密度分析

根据连续清查数据,结合表 1 各优势树种生物量关系方程推算(表 2),由表 2 可以看出,不同森林类型的碳储量及密度存在较大差异。云南省不同森林类型总碳储量为 $1.05\times10^9\text{t}$,平均碳密度 $44.96\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各森林类型碳储量大小排序为乔木林>灌木>竹林>疏林。其中,乔木林碳储量最大,为 $9.99\times10^8\text{t}$,占总碳储量的 95.09%,说明乔木林在云南森林碳平衡方面起着显著的作用。各森林类型碳密度大小排序为乔木林>疏林>竹林>灌木,说明碳密度大小与植被层高度存在一定的关系。

2.2 云南各乔木林不同龄林的碳储量及碳密度分析

由表 3、图 1 可知,不同优势树种的碳储量及碳密度存在较大差异,从树种(组)来看,碳储量最大的为阔叶混交林,达 4.81 亿 t,表明混交林分的碳储量最高,森林生态系统也更稳定;碳密度最大的为铁

杉,达 $152.27\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,已达到全省乔木林平均碳密度($53.63\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的近 3 倍。碳密度最低为樟木,为 $7.19\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。分析其原因,主要由于铁杉林分面积均为成熟林和过熟林,碳储量积累较高,而樟木刺槐林分均为幼龄林和中龄林,其碳积累和碳密度较低。

此外,云南省乔木林各龄林的碳储量及碳密度也存在一定的规律,其与龄林结构密切相关。从乔木林各龄林总碳储量来说,大小排序为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林,表现出林龄越大碳储量越小的规律,分析原因,主要由于云南省乔木林各龄林面积大小排序为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林,碳储量呈现该规律,说明云南省乔木林整体还属于幼中林分阶段,未来仍主要是抚育管理生长阶段;从乔木林各龄林碳密度来说,其大小排序为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,说明碳密度的动态很大程度上取决于龄级的变化,表现为龄级越大碳密度也越大的趋势,这也符合自然生态的规律。

表 2 云南省不同类型森林的碳储量和碳密度

Table 2 Carbon storage and carbon density of different forest types in Yunnan

森林类型	面积/万 hm ²	生物量/t	碳储量/t	碳密度/(t·hm ⁻²)	占总碳储量(%)
乔木林	1 862.87	2.01×10^9	9.99×10^8	53.63	95.09
疏林	24.48	1.33×10^7	6.64×10^6	27.14	0.64
竹林	11.52	5.51×10^6	2.54×10^6	22.11	0.24
灌木	437.6	8.65×10^7	4.23×10^7	9.68	4.03
合计	2 336.47	2.12×10^9	1.05×10^9	44.96	100.00

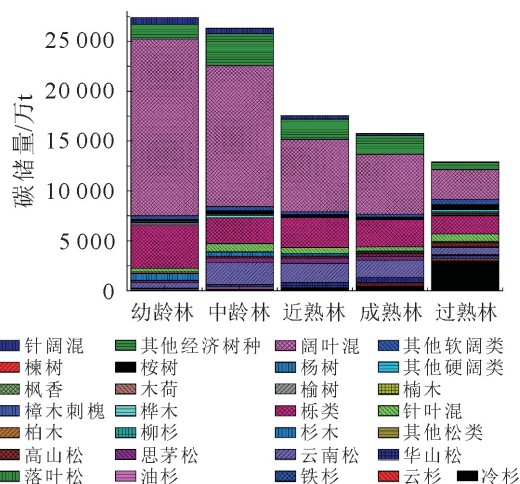


图1 乔木林各龄组优势树种碳储量分布

Fig. 1 Carbon storage distribution of dominant tree species in different age groups in arbor forests

2.3 云南各乔木林不同林种的碳储量及碳密度分析

根据森林经营目标的不同,将云南省第9次森林资源连续清查乔木林数据分为防护林、特种用途林、用材林、薪炭林和经济林五大类,并推算不同优势树种各林种的碳储量及碳密度结果(表4、图2)。云南乔木林种主要以防护林和用材林为主,面积之和占整个乔木林种总面积的78.34%,其碳储量之和占整个乔木林种总碳储量的77.17%。其中,防护林碳储量最高,达 3.94×10^8 t,占乔木林总碳储量的39.43%;经济林碳储量最小,为 1.85×10^7 t,仅占乔木林总碳储量的1.85%。从乔木林不同林种的碳密度来看,其大小排序为防护林>用材林>特种用途林>薪炭林>经济林,其中,特种用途林的碳密度最高,达 $95.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,远高于其他林种,经济林最低,仅为 $11.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,主要由于特种用途林属于重点保护的林种,人为干扰破坏较低,经营利用少,龄级相对高,其碳密度相对较高;而经济林受人为因素较大,因市场经营需要,树种替换较为频繁,龄级相对低,因而碳密度较低。

2.4 云南各乔木林不同起源的碳储量及碳密度分析

由表5可知,云南省天然林碳储量为 9.07×10^8 t,占乔木林总碳储量的90.76%。其中,阔叶混交林碳储量最高,达 4.74×10^8 t,其次为栎类 1.45×10^8 t、针阔混交林 8.73×10^7 t,这3类乔木林的碳储量占天然林总碳储量的70.73%,说明云南天然乔木林中混交林的林分结构最优,碳储量积累最高。人工林碳储量为 9.23×10^7 t,其中,其他经济树种碳储量最高,达 1.85×10^7 t,其次为杉木林 1.53×10^7 t、桉树林 1.23×10^7 t、华山松 1.10×10^7 t,后3类人工乔木林的碳储量占人工总碳储量的41.73%,说明云南省的人工林以桉树、杉木和

山松为主,这也与云南省营造林种大量选择桉树、杉木和华山松密切相关。

从乔木林天然与人工的碳密度来看,二者差异较大,天然林的平均碳密度为 $62.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,近人工林的3倍。从乔木林各优势树种不同起源的碳储量相比较,各优势树种均呈现出天然林大于人工林的碳密度,其中,相差最大的为榆树,达到近20:1,其次为柏木近5:1。分析原因主要为天然林生长受干扰较低,林分结构较优,固碳能力更强,碳储量积累较高,碳密度相对较高。

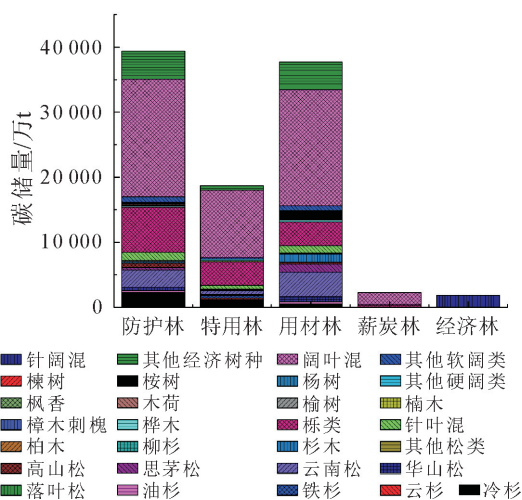


图2 乔木林各林种优势树种碳储量分布

Fig. 2 Carbon storage distribution of dominant tree species in different tree species in arbor forests

2.5 云南森林碳储量空间分布特征

2.5.1 云南省森林垂直尺度碳储量分布特征 森林作为全球陆地最大的碳库,碳储量主要由植被层、枯落物层和土壤层构成,植被层主要由乔木层、灌木层和草本层组成,分析其空间尺度的分布特征对森林碳库具有重要的作用。参照各层碳储量和碳密度系数,估算云南省森林各层碳储量可知,碳储量大小排序为土壤层>乔木层>枯落物层>草本层>灌木层,其中,土壤层最大为3.37亿t,占森林总碳储量约64%;依碳密度大小排序表现为土壤层>乔木层>枯落物>灌木>草本层,除土壤层和枯落物层外,碳密度大小表现为随植被层高度下降而降低。

2.5.2 云南省森林碳储量地理区域尺度分布特征

根据表6,结合云南省各州市乔木林和森林面积,测算并分析云南省森林碳储量地理区域尺度分布特征(图3、图4),普洱市的森林碳储量最高,其中,乔木林碳储量为1.43亿t、森林总碳储量7.06亿t,占全省森林总碳储量的13.42%;德宏州森林总碳储量最低,为1.78亿t,两州森林总碳储量相差近4倍。此外,云南省碳储量总体呈现西高东低的格局。

表 3 云南省各乔木林不同龄林的碳储量和碳密度面积

Table 3 Carbon storage and carbon density of different tree species for different age classes in Yunnan

树种(组)	幼龄林			中龄林			近熟林		
	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
冷杉	96	4 721.63	49.18	240	12 268.18	51.12	288	14 470.96	50.25
云杉				96	3 072.99	32.01	48	2 289.56	47.70
铁杉					0.00			0.00	
油杉	528	13 917.17	26.36	624	20 049.80	32.13	288	12 362.02	42.92
落叶松					0.00			0.00	
华山松	288	6 017.67	20.89	1 008	26 342.51	26.13	1 247	51 639.01	41.41
云南松	4 703	53 429.75	11.36	10 606	220 347.44	20.78	7 102	193 164.86	27.20
思茅松	1 440	23 075.32	16.02	1 728	46 543.10	26.93	1 296	49 511.36	38.20
高山松	96	2 484.22	25.88	336	14 620.01	43.51	480	22 658.76	47.21
其他松类					0.00			0.00	
杉木	3 503	67 577.83	19.29	1 246	42 272.68	33.93	528	22 837.82	43.25
柳杉	96	2 415.87	25.17		0.00			0.00	
柏木	384	13 342.94	34.75	144	5 574.20			0.00	
针叶混	1 296	36 426.21	28.11	1 966	78 490.01	39.92	1 392	64 603.71	46.41
栎类	10 174	439 060.94	43.16	3 215	260 426.83	81.00	2 639	300 599.04	113.91
桦木	480	14 995.86	31.24	336	25 284.06	75.25		0.00	
樟木刺槐	96	765.26	7.97	48	269.60	5.62		0.00	
楠木	96	3 839.46	39.99	95	9 946.75	104.70	96	8 662.48	90.23
榆树	48	192.82	4.02		0.00			0.00	
木荷	288	6 038.23	20.97	48	2 406.35	50.13		0.00	
枫香	48	1 410.13	29.38		0.00			0.00	
其他硬阔类	480	10 030.22	20.90	96	3 720.01	38.75		0.00	
杨树	144	2 879.24	19.99	48	1 448.91	30.19		0.00	
桉树	1 584	13 235.61	8.36	1 008	28 879.18	28.65	624	21 067.92	33.76
楝树	48	821.47	17.11		226.70			0.00	
其他软阔类	1 535	34 139.40	22.24	1 392	41 072.66	29.51	720	27 348.92	37.98
阔叶混	27 834	1 772 128.16	63.67	17 034	1 412 987.18	82.95	7 535	727 309.01	96.52
针阔混	5 278	148 203.39	28.08	7 296	319 060.24	43.73	3 792	202 070.31	53.29
其他经济树种	6 095	67 892.21	11.14	4 895	54 525.41	11.14	3 119	34 742.54	11.14
合计	66 658	2 739 040.98	41.09	53 505	2 629 834.78	49.15	31 194	1 755 338.27	56.27

树种(组)	成熟林			过熟林			小计	
	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
冷杉	528	48 607.64	92.06	2 493	296 554.92	118.96	376 623.32	103.33
云杉	192	14 634.97	76.22	192	22 163.96	115.44	42 161.48	79.85
铁杉	48	5 568.33	116.01	192	30 976.50	161.34	36 544.83	152.27
油杉	336	13 286.07	39.54	48	1 976.01	41.17	61 591.07	33.77
落叶松		0.00		48	5 172.46	107.76	5 172.46	107.76
华山松	864	50 452.18	58.39	96	5 751.65	59.91	140 203.01	40.02
云南松	4 750	172 076.26	36.23	1 151	70 997.04	61.68	710 015.35	25.08
思茅松	864	36 958.97	42.78	287	11 053.70	38.51	167 142.45	29.77
高山松	672	33 136.16	49.31	527	34 111.40	64.73	107 010.54	50.69
其他松类	48	2 298.62	47.89		0.00		2 298.62	47.89
杉木	384	14 456.99	37.65	144	5 753.11	39.95	152 898.43	26.34
柳杉	96	4 200.55	43.76		0.00		6 616.42	34.46
柏木		0.00		48	8 676.56	180.76	27 593.70	47.91
针叶混	768	43 781.89	57.01	480	74 643.88	155.51	297 945.71	50.48
栎类	2 064	270 655.18	131.13	1 056	182 951.51	173.25	1 453 693.50	75.92
桦木		0.00		48	8 585.19	178.86	48 865.11	56.56
樟木刺槐		0.00			0.00		1 034.85	7.19
楠木		0.00		48	14 155.19	294.90	36 603.87	109.27
榆树		0.00		48	3 863.04	80.48	4 055.86	42.25
木荷	48	6 279.40	130.82	48	14 221.73	296.29	28 945.71	67.00
枫香		0.00			0.00		1 410.13	29.38
其他硬阔类	48	8 750.21	182.30	96	21 010.93	218.86	43 511.36	60.43

树种(组)	成熟林			过熟林			小计	
	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
杨树		0.00		96	3 286.42	34.23	7 614.56	26.44
桉树	384	11 986.10	31.21	624	47 353.56	75.89	122 522.38	29.01
楝树		0.00			0.00		1 048.17	21.84
其他软阔类	671	29 048.83	43.29	912	54 006.76	59.22	185 616.58	35.49
阔叶混	5 518	597 719.51	108.32	2 399	297 137.92	123.86	4 807 281.77	79.70
针阔混	2 447	190 103.95	77.69	624	69 965.25	112.12	929 403.14	47.82
其他经济树种	1 968	21 921.55	11.14	527	5 870.25	11.14	184 951.96	11.14
合计	22 698	1 575 923.36	69.43	12 232	1 290 238.95	105.48	9 990 376.35	53.63

Table 4 Carbon storage and carbon density of different tree species for different forest categories in Yunnan

[illegible]

续表 4

树种(组)	薪炭林			经济林			小计	
	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
其他松类							2 298.62	47.89
杉木							152 898.43	26.34
柳杉							6 616.42	34.46
柏木							27 593.70	47.91
针叶混							297 945.71	50.48
栎类	959	36 661.70	38.23				1 453 693.50	75.92
桦木							48 865.11	56.56
樟木刺槐							1 034.85	7.19
楠木							36 603.87	109.27
榆树							4 055.86	42.25
木荷							28 945.71	67.00
枫香							1 410.13	29.38
其他硬阔类							43 511.36	60.43
杨树							7 614.56	26.44
桉树							122 522.38	29.01
楝树							1 048.17	21.84
其他软阔类	240	6 114.67	25.48				185 616.58	35.49
阔叶混	2 784	181 219.38	65.09				4 807 281.77	79.70
针阔混	96	1 844.57	19.21				929 403.14	47.82
其他经济树种				16 604	184 951.96	11.14	184 951.96	11.14
合计	4 079	225 840.32	55.37	16 604	184 951.96	11.14	9 990 376.35	53.63

表 5 云南省不同起源乔木林中优势树种的碳储量和碳密度

Table 5 Carbon storage and carbon densities of dominant tree species with different origins in Yunnan

优势树种(组)	天然林			人工林			小计	
	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	面积	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)	碳储量/ 10 ² t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
冷杉	3 597	374 907.15	104.23	48	1 716.17	35.75	376 623.32	103.33
云杉	432	39 088.49	90.48	96	3 072.99	32.01	42 161.48	79.85
铁杉	240	36 544.83	152.27				36 544.83	152.27
油杉	1 824	61 591.07	33.77				61 591.07	33.77
落叶松	48	5 172.46	107.76				5 172.46	107.76
华山松	720	30 330.88	42.13	2 783	109 872.14	39.48	140 203.01	40.02
云南松	26 056	664 438.57	25.50	2 256	45 576.78	20.20	710 015.35	25.08
思茅松	3 743	135 768.77	36.27	1 872	31 373.68	16.76	167 142.45	29.77
高山松	2 063	106 133.70	51.45	48	876.84	18.27	107 010.54	50.69
其他松类	48	2 298.62	47.89				2 298.62	47.89
杉木				5 805	152 898.43	26.34	152 898.43	26.34
柳杉				192	6 616.42	34.46	6 616.42	34.46
柏木	96	10 910.32	113.65	480	16 683.38	34.76	27 593.70	47.91
针叶混	4 799	252 353.16	52.58	1 103	45 592.55	41.34	297 945.71	50.48
栎类	19 148	1 453 693.50	75.92				1 453 693.50	75.92
桦木	192	16 688.59	86.92	672	32 176.52	47.88	48 865.11	56.56
樟木刺槐				144	1 034.85	7.19	1 034.85	7.19
楠木	335	36 603.87	109.27				36 603.87	109.27
榆树	48	3 863.04	80.48	48	192.82	4.02	4 055.86	42.25
木荷	432	28 945.71	67.00				28 945.71	67.00
枫香	48	1 410.13	29.38				1 410.13	29.38
其他硬阔类	624	41 415.05	66.37	96	2 096.31	21.84	43 511.36	60.43
杨树	192	5 234.40	27.26	96	2 380.17	24.79	7 614.56	26.44
桉树				4 224	122 522.38	29.01	122 522.38	29.01
楝树				48	1 048.17	21.84	1 048.17	21.84
其他软阔类	3 744	147 135.50	39.30	1 486	38 481.08	25.90	185 616.58	35.49
阔叶混	59 120	4 739 227.90	80.16	1 200	68 053.87	56.71	4 807 281.77	79.70
针阔混	17 661	873 270.42	49.45	1 776	56 132.71	31.61	929 403.14	47.82
其他经济树种				16 604	184 951.96	11.14	184 951.96	11.14
合计	145 210	9 067 026.14	62.44	41 077	923 350.21	22.48	9 990 376.35	53.63

表 6 云南森林碳储量空间分布特征

Table 6 Spatial distribution characteristics of forest carbon storage and carbon density in Yunnan

空间分层	面积/万 hm ²	碳储量/t	碳密度/(t·hm ⁻²)	占比(%)	备注
乔木层	1 862.87	10.06×10 ⁸	54.00	19.12	乔木层包括乔木林和疏林
灌木层	449.12	4.48×10 ⁷	9.98	0.85	灌木层包含竹林和灌木林
草本层	2 311.99	1.79×10 ⁸	7.76	3.4	参照郭琦等 ^[10] 研究乔木林下取 7.52 t·hm ⁻² ,灌木林下取 8.75 t·hm ⁻²
枯落物层	4 623.98	6.60×10 ⁸	14.27	12.55	参照周玉荣等 ^[11] 枯落物碳密度为植被碳密度的 14.4%计算
土壤层	2 106.16	3.37×10 ⁹	159.95	64.08	参照包承宇等 ^[12] 土层厚度 0~100 cm,取平均值 159.95 t·hm ⁻²
合计	11 354.12	5.26×10 ⁹	46.13	100	

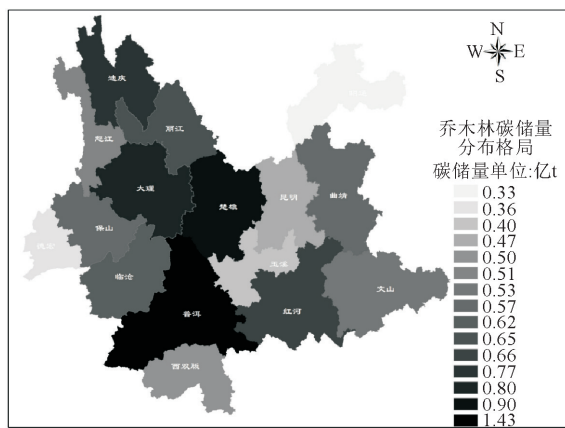


图 3 云南省乔木林碳储量地理区域分布特征

Fig. 3 Regional distribution characteristics of carbon storage in arbor forests in Yunnan

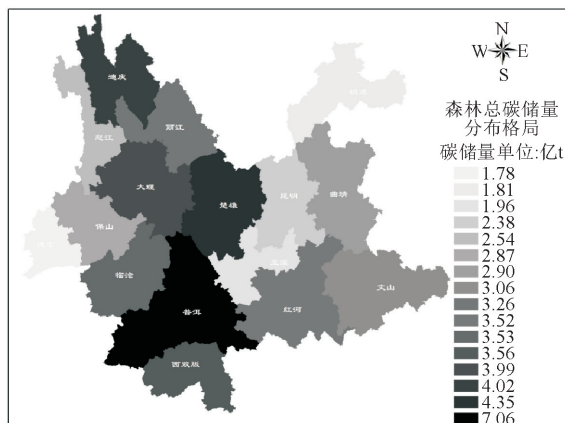


图 4 云南省森林总碳储量地理区域分布特征

Fig. 4 Regional distribution characteristics of total forest carbon storage in Yunnan

3 结论与讨论

3.1 结论

研究表明,云南森林碳储量为 $10.47 \times 10^8 \text{ t}$,森林平均碳密度为 $49.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中,乔木林的碳储量为 $9.99 \times 10^8 \text{ t}$ 、碳密度 $53.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占森林总碳储量的 95.42%。表明乔木林是森林生态系

统固碳的主体,李海奎等^[2]与李伟等^[7]研究结果一致,且远高于广西乔木林碳储量占森林总碳储量的 83.07%、贵州的 86.41%和辽宁的 85.68%,表明云南省的森林生态系统固碳能力较强^[16]。

云南省森林碳储量空间分布不均衡,从树种(组)来看,森林碳储量主要集中在阔叶混和栎类,两者占森林总碳储量的 62.67%;从森林类型来看,森林碳储量主要集中在乔木林,其占森林总碳储量的 95%以上;从不同龄组来看,森林碳储量主要集中在幼龄林和中龄林,两者占森林总碳储量的 53.74%;从不同林种来看,森林碳储量主要集中在防护林和用材林,两者占森林总碳储量的 77.17%;从森林起源来看,森林碳储量主要集中在天然林,占森林总碳储量的 90.76%。

本研究主要针对森林植被层进行碳储量研究,粗略对草本层枯落物层以及土壤层的碳储量进行了估算,因此,森林生态系统的碳储量研究还不够全面和准确,此外,本研究在生物量与碳储量转化过程中采用平均含碳系数,但未对不同区域、不同林组、不同起源等含碳系数进行研究,其估算结果还不够准确,因此,在今后有待作进一步改善。

3.2 讨论

根据研究结果可知,森林碳储量、碳密度与林龄结构和起源结构关系密切,表现为碳密度随着林龄变大而增加,与程鹏飞等^[14]研究结果一致。此外,天然林碳密度和碳储量均远远大于人工林,在森林资源中占主导地位^[15]。此外,云南省森林碳储量仍有较大提升空间,云南省乔木林天然与人工碳储量相差近 10 倍,碳密度相差近 3 倍。下一步针对人工林开展林分结构改善和加强经营管理,针对天然林继续开展封山育林工程,以提高森林碳储量,对增强森林碳汇潜力具有重要意义。

参考文献:

[1] 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)
- [2] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- LI H K, LEI Y C, ZENG W S. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(7): 7-12. (in Chinese)
- [3] 李亮. 云南省 1992-2007 年森林植被碳储量动态变化及其碳汇潜力分析[D]. 昆明: 云南财经大学, 2012: 1.
- [4] 汤浩藩, 许彦红. 云南省森林植被碳储量和碳密度及其空间分布格局[J]. 林业资源管理, 2019(5): 37-43.
- TANG H F, XU Y H. Carbon storage and carbon density of forest vegetation and their spatial distribution pattern in Yunnan Province[J]. *Forest Resources Management*, 2019(5): 37-43. (in Chinese)
- [5] 方精云, 刘国华. 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. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508. (in Chinese)
- [6] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973. (in Chinese)
- [7] 李伟, 张翠萍. 基于第 8 次森林资源清查数据的广西森林碳储量特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(3): 127-133.
- LI W, ZHANG C P. Forest carbon storage in Guangxi province estimated by 8th forest inventory data[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2017, 37(3): 127-133. (in Chinese)
- [8] 王晓慧, 陈永富. 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[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 125-131.
- WANG X H, CHEN Y F. Estimation of carbon storage and potential carbon sequestration based on the second type inventory of forest resources—a case study of Zha'nang County of Tibet Autonomous Region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 125-131. (in Chinese)
- [9] 路秋玲, 王国兵. 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法的评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 155-160.
- LU Q L, WANG G B. A review on the estimation methods of carbon pools of forest ecosystems[J]. *J. Nanjing For. Univ. : Nat. Sci. Ed.*, 2012, 36(5): 155-160. (in Chinese)
- [10] 郭琦, 王新杰. 不同林龄杉木纯林林下生物量与土壤理化性质的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 85-88.
- GUO Q, WANG X J. Correlation of understory biomass and soil under *Cunninghamia lanceolata* pure forest of different age[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(1): 18-22. (in Chinese)
- [11] 周玉荣, 于震良. 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. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522. (in Chinese)
- [12] 包承宇, 曾和平. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 260-266.
- BAO C Y, ZENG H P. Spatial distribution and estimation of soil organic carbon in Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 260-266. (in Chinese)
- [13] 杜雪, 王景弟. 基于克里金插值法的湖南省慈利县森林碳储量专题图研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 198-204.
- DU X, WANG J D. Development of thematic map of forest carbon storage based on Kriging Interpolation method in Cili County, Hunan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(1): 198-204. (in Chinese)
- [14] 程鹏飞, 王金亮. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. 林业调查规划, 2009, 34(6): 39-45.
- CHENG P F, WANG J L. Research progress in estimating carbon storage of forest ecosystem[J]. *Forest Inventory And Planning*, 2009, 34(6): 39-45. (in Chinese)
- [15] 王伟峰, 段玉玺. 适应全球气候变化的森林固碳计量方法评述[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(3): 170-176.
- WANG W F, DUAN Y X. Review on forest carbon sequestration counting methodology under global climate change[J]. *J. Nanjing For. Univ. : Nat. Sci. Ed.*, 2016, 40(3): 170-176. (in Chinese)