DOI: 10.5846/stxb202201140134

侯瑞萍,夏朝宗,陈健,郑芊卉,李海奎,黄金金,黄翔,邓继峰,韩旭,安天宇,郝月兰,苟丽晖.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究.生态学报,2022,42(23):9483-9498.

Hou R P, Xia C Z, Chen J, Zheng Q H, Li H K, Huang J J, Huang X, Deng J F, Han X, An T Y, Hao Y L, Gou L H.Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt.Acta Ecologica Sinica,2022,42(23):9483-9498.

长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究

侯瑞萍[1],夏朝宗[1,*],陈 健[1],郑芊卉[1],李海奎[2],黄金金[2],黄 翔[1],邓继峰[3],韩 旭[4],安天宇[1],郝月兰[1],苟丽晖[1]

1 国家林业和草原局林草调查规划院,北京 100714

2 中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091

3 沈阳农业大学,沈阳 110866

4 天津市规划和自然资源局林业事务中心,天津 300191

摘要:以全国林业应对气候变化碳汇计量监测体系建设结果数据为基础,应用森林碳库专项调查建立的碳计量模型和参数,结合历次森林资源清查成果等数据,估算了 2020 年长江经济带林地和其他生物质碳储量和碳汇量。研究表明:(1)2020 年长江经济带林地碳储量 24543.58 Tg C(其中森林植被碳储量为 4372.85Tg C),散生木和四旁树等其他生物质碳储量 329.59 Tg C。2020 年长江经济带林地碳汇量 81.81 Tg C/a(300.26Tg CO_2/a)、散生木和四旁树等其他生物质碳汇量 6.60 Tg C /a(24.21 Tg CO_2/a)。无论是林地和其他生物质碳储量、碳汇量、还是森林植被碳储量,乔木林地所占比例最大(69%—85%);长江经济带 11 个省市中,云南省最大,上海市最小;林地碳储量中土壤有机质碳库贡献最大(81.46%),林地碳汇量中生物量碳库贡献最大(90.99%);林地碳汇量中"一直为林地的土地"产生碳汇量贡献最大(71.74%),其中一直为乔木林的土地产生的碳汇量占 69.89%;(2)阐述了长江防护林工程、天然林资源保护工程、珠江防护林工程和沿海防护林工程 4 大重点生态工程对长江经济带碳储量和碳汇量的贡献,长江防护林工程贡献率最大(81%—83%),其次是天然林资源保护工程(32%—38%),珠江防护林工程和沿海防护林工程影响较小。分析了人工造林、中幼林抚育、次生林和低效林改造、退化林修复等生态保护修复措施对长江经济带碳储量和碳汇量的贡献,并提出了碳中和愿景下森林固碳增汇的有效途径。

关键词:长江经济带;碳储量;碳汇量

Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt

HOU Ruiping[1], XIA Chaozong[1,*], CHEN Jian[1], ZHENG Qianhui[1], LI Haikui[2], HUANG Jinjin[2], HUANG Xiang[1], DENG Jifeng[3], HAN Xu[4], AN Tianyu[1], HAO Yuelan[1], GOU Lihui[1]

1 *Academy of Forestry Inventory and Planning (AFIP), National Forestry and Grassland Administration, Beijing* 100174, *China*

2 *Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*

3 *Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*

4 *Forestry Affairs Center, Tianjin Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, Tianjin* 300191, *China*

Abstract: Based on the data of carbon measurement and monitoring system of China's forestry addressing climate change, carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt in 2020 were estimated by using the carbon measurement model and parameters established by the specific survey of forest carbon pools, also

基金项目:2020 年林业应对气候变化碳汇计量和监测体系建设(2020-29-37)

收稿日期:2022-01-14; **网络出版日期**:2022-07-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 584710122@qq.com

combining the previous national forest inventory data. The results showed that: (1) In 2020, the total carbon storage of forest land in the Yangtze River Economic Belt was 24543.58 Tg C (including 4372.85 Tg C of carbon storage of forest vegetation), and the carbon storage of other biomass such as scattered trees and four-side trees was 329.59 Tg C. In 2020, the carbon sink of forest land in the Yangtze River Economic Belt was 81.81Tg C/a (300.26 Tg CO_2/a), and the carbon sink of other biomass such as scattered trees and four-side trees was 6.60 Tg C /a(24.21 Tg CO_2/a). The arbor forestland accounted for the largest proportion (69%—85%) of the total carbon storage or carbon sink of forest land as well as forest vegetation. Among all 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt, the carbon storage or carbon sink of Yunnan Province took the 1st place, while Shanghai was the last. For forest land carbon storage, soil organic matter contributed the most (81.46%), while biomass contributed the most (90.99%) to forest land carbon sinks. 'Land that has always been forest land' contributed the most to forest land carbon sinks (71.74%), of which the carbon sink generated by the land that has always been arbor forest accounted for 69.89%. (2) The contribution of four key ecological projects (namely, the Yangtze River Shelterbelt Project, the Natural Forest Protection Program, the Pearl River Shelterbelt Program and the Coastal Shelterbelt Project) to the carbon storage and carbon sinks in the Yangtze River Economic Belt was expounded. Among the four key ecological projects, the Yangtze River Shelterbelt Project made the largest contribution (81%—83%), followed by the Natural Forest Protection Program (32%—38%), while the Pearl River Shelterbelt Program and the Coastal Shelterbelt Project had less impact. In addition, the contribution of ecological protection and restoration measures to carbon storage and carbon sinks of the Yangtze River Economic Belt was analyzed, including plantations, young and middle-aged forest tending, secondary forest and low-efficiency forest transformation, and degraded forest restoration. An effective path was proposed to enhance forest carbon storage and carbon sinks under the carbon neutral vision.

Key Words: Yangtze River Economic Belt; carbon storage; carbon sink

森林作为陆地生态系统光合作用的主体,每年固定的碳量占整个陆地生态系统的 2/3 左右,在缓解和阻止气候暖化方面发挥着十分重要的作用[1—2]。研究表明,森林生态系统单位面积存储的碳是农田的 20—100 倍[3],全球 30%的森林面积储存的碳量占陆地生态系统总量的比例高达 77%[4—5]。因此,通过增加森林面积和提升森林质量来增加碳汇已成为国际社会应对气候变化的主要措施[6]。在森林固定 CO_2的过程中,从大气中吸收的碳按储存介质分为植被碳库、土壤碳库和死有机物碳库三大类,各碳库之间以相互独立又相互联系的方式共同完成森林生态系统物质和能量的分配[7—8]。为更全面的理解森林固碳和气候变化之间的关系,必须有以上碳库科学全面的数据作支撑,必须建立方法科学、模型精确、参数合理的计量体系,才能更好的服务于林业应对气候变化工作。

森林碳储量及其变化已成为国内外研究 CO_2排放量和吸收量之间平衡的重要内容之一[9—11],森林在减小碳收支平衡中起着关键作用[12—19],是重要的碳汇。目前,关于森林碳储量及其动态变化主要集中的单一碳库(植被碳库或土壤碳库)[20—31]或单个类型森林生态系统[32—40]。涉及多个类型森林生态系统或多个碳库的现存研究成果相对较少,针对某一区域同时包含多个类型森林生态系统和多个碳库的研究几乎没有。本文以林业碳汇监测数据和森林碳库专项调查数据为数据源,以林地和其他生物质(包括四旁树、散生木)为主要研究对象,研究分析了我国长江经济带森林碳储量和碳汇量,其成果不仅可以为该地区森林碳汇可持续发展的宏观政策制定提供科学依据,也可以为全球气候变化研究提供典型的地方案例。

1 研究区概况

长江经济带横跨中国东中西三大区域,东起上海,西至云南,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省市,面积约 205.23 万 km^2,是中央重点实施的"三大战略"之一。人口和经

济总量均超过全国的 40%,生态地位重要、综合实力较强、发展潜力巨大。以热带亚热带季风气候为主,夏季高温多雨,冬季温和少雨。地势东西差异大,主要位于第二、三级阶梯,东部平原、丘陵面积广大,长江中下游平原是我国地势最低的平原,河汊纵横交错,湖泊星罗棋布;江南丘陵是我国最大的丘陵,大多有东北-西南走向的低山和河谷盆地相间分布;南岭地区岩浆岩分布广泛;西部以高原、盆地为主。

2　数据与方法

2.1　数据来源

数据来源于全国林业应对气候变化碳汇计量监测体系建设成果,包括林业碳汇监测数据和森林碳库专项调查两部分数据。前者是依据系统抽样原理和我国地理格网国家标准,以 24 km×24 km 格网中心点为抽样点,在长江经济带布设 3695 个大小为 16 km^2(4 km×4 km)的碳汇监测样地(各边方位角分别为 0°、90°、180°、270°)。以 2016 年和 2020 年时相为植物生长季的资源三号星(分辨率 2 m 左右)为基准影像,依据森林资源管理“一张图”年度更新、湿地资源调查等林草专项监测成果,对样地内的林地、湿地、草地等土地利用类型进行区划判读,更新土地利用类型、优势树种、起源、龄组等属性因子;依据第 8—9 次森林资源清查结果,采用插值分析法,分树种按起源和龄组测算 2020 年各省市乔木林单位面积蓄积量及其年均变化、其他生物质蓄积量、“一直为乔木林的土地”和“转为乔木林的土地”的单位面积蓄积量年均变化,更新公顷蓄积、蓄积量等属性因子。

后者是为建立森林碳储量计量模型,采用典型分层抽样方法,按气候带、起源、龄组、森林类型开展的森林碳库专项调查(全国共布设 4663 个样地),其中乔木样地是每木检尺,同时调查枯立木、枯死木,林下设置3 个 2 m×2 m 的灌木层调查样方、3 个 1 m×1 m 的枯落物调查样方和 1 个土壤调查样方,调查因子包括:乔木林优势树种、胸径、平均树高、林龄、郁闭度、枯立木分解状态、枯倒木区分段直径、长度、密度级;灌木层(草本层)优势种、盖度、平均高、样方地上和地下部分鲜重和干重、含碳率等;枯落物层厚度、鲜重、干重等,土壤类型、厚度、容重和有机质含量等,用于获得枯死木、枯落物、林下灌木层、林下草本层、土壤等建模数据。

2.2　研究方法

根据 GPG-LULUCF 指南[41]第 4 卷第 3 章对于“土地一致性的表述”,对接第三次全国国土调查、森林资源清查、湿地资源调查等相关标准和规程的土地分类,本研究将土地利用类别划分为:林地、农地、草地、湿地、聚居地和其它土地六大地类。其中林地包括乔木林地、竹林地、灌木林地、其它林地(疏林地、未成林造林地、苗圃地和迹地)。计量碳库包括生物量碳库(包括地上生物量和地下生物量)、死有机质碳库(包括枯死木和枯落物碳库)和土壤有机质碳库。本文碳储量计量对象为林地和其他生物质(四旁树和散生木),碳汇量计量对象为林地、农地、草地、湿地、聚居地和其它土地六大地类。

2.2.1　碳储量计量

基于 2020 年林业碳汇监测数据,利用森林碳库专项调查建立的碳储量计量模型和参数,按生物量碳库、死有机质碳库和土壤有机质碳库,计算 2020 年长江经济带林地和其他生物质碳储量。其中:生物量碳库包括乔木林地、竹林地、灌木林地、疏林地、其他林地、其他生物质的地上和地下生物量,以及乔木林地的林下灌木层和草本层地上和地下生物量;死有机质碳库包括乔木林地的枯死木、枯落物碳库,以及竹林地、灌木林地和疏林地的枯落物碳库;土壤有机质碳库包括乔木林地、竹林地、灌木林地、其它林地、其他生物质的土壤有机质。碳储量估算方法可概括为生物量扩展因子法、生物量关系模型或比重法、单位面积生物量法、碳密度法。

(1)生物量扩展因子法

乔木林地、疏林地、其他生物质的生物量碳储量估算采用 IPCC 法,即生物量扩展因子法[8]。是遵循 GPG-LULUCF 指南[41]和 LULUCF 清单编制指南[42],依据《中国森林植被生物量和碳储量评估》[43]建立的材积源生物量法和生物量转换因子,在落叶松等立木生物量模型及碳计量参数等标准的基础上,利用最近四次森林资源清查的全部乔木林样地和立木数据,分省市建立的由生物量扩展因子(BEF)、木材基本密度(D)、根

茎比(R)和含碳率(CF)组成的计算模型(表 1)。具体公式如下:

$$C_{Bi} = \sum_i \{V_i \times \mathrm{BEF}_i \times D_i \times (1 + R_i) \times CF_i\} \quad (1)$$

式中,V_i 为 i 树种的蓄积量(m^3);BEF_i 为 i 树种的生物量扩展因子;D_i 为 i 树种的木材基本密度[44](t/m^3);R_i 为 i 树种的根茎比;CF_i 为 i 树种的含碳率。

表 1 主要优势树种(组)碳储量计量模型

Table 1 The carbon storage measurement model of main dominant tree species/groups

省市 Province or city	优势树种 Dominant tree species	BEF	D/(t/m^3)	R	CF	省市 Province or city	优势树种 Dominant tree species	BEF	D/(t/m^3)	R	CF
上海	水杉	1.4566	0.2740	0.2307	0.5083		阔叶混	1.8377	0.5222	0.2351	0.4730
	樟木	1.4267	0.4649	0.2196	0.4916		针阔混	1.8408	0.4754	0.2218	0.5082
	其它硬阔类	1.2680	0.6062	0.2219	0.4911	湖南	马尾松	2.2768	0.4482	0.1865	0.5271
	杨树	1.9155	0.3644	0.2172	0.4502		湿地松	2.3898	0.3590	0.3004	0.5311
	其它软阔类	1.6714	0.4222	0.2079	0.4517		杉木	1.8803	0.3071	0.2378	0.5127
	阔叶混	1.2800	0.5222	0.2351	0.4757		柳杉	1.8891	0.2893	0.2310	0.5331
	针阔混	1.3621	0.4754	0.2218	0.4897		柏木	2.4475	0.4722	0.2108	0.5088
江苏	湿地松	2.5564	0.3590	0.2988	0.5311		栎类	1.7479	0.6119	0.2574	0.4798
	杉木	2.0829	0.3071	0.2424	0.5127		樟木	2.2350	0.4649	0.2184	0.4916
	水杉	1.4498	0.274	0.2256	0.5083		杨树	2.3729	0.3644	0.2161	0.4502
	栎类	1.7814	0.6119	0.2727	0.4798		其它软阔类	1.9770	0.4222	0.2194	0.4555
	樟木	2.2972	0.4649	0.2167	0.4916		针叶混	2.1605	0.3902	0.2086	0.5173
	其它硬阔类	1.6557	0.6062	0.2202	0.4845		阔叶混	1.9121	0.5222	0.2351	0.4795
	杨树	1.9888	0.3644	0.2101	0.4502		针阔混	1.9467	0.4754	0.2218	0.5149
	其它软阔类	2.2137	0.4222	0.2122	0.4503	重庆	马尾松	1.8173	0.4482	0.1866	0.5271
	阔叶混	2.0147	0.5222	0.2351	0.4514		杉木	1.9265	0.3071	0.2341	0.5127
	针阔混	2.0785	0.4754	0.2218	0.4566		柳杉	1.8469	0.2893	0.2247	0.5331
浙江	马尾松	2.1977	0.4482	0.1856	0.5271		柏木	2.1198	0.4722	0.2138	0.5088
	湿地松	2.1231	0.3590	0.2881	0.5311		栎类	1.7038	0.6119	0.2631	0.4798
	黄山松	1.8965	0.4512	0.1810	0.5175		其它硬阔类	1.9278	0.6062	0.2178	0.4822
	杉木	2.3108	0.3071	0.2414	0.5127		其它软阔类	1.8717	0.4222	0.2201	0.4611
	柳杉	2.1458	0.2893	0.2308	0.5331		针叶混	2.0263	0.3902	0.2086	0.5226
	柏木	2.3690	0.4722	0.2077	0.5088		阔叶混	1.8760	0.5222	0.2351	0.4798
	栎类	2.0933	0.6119	0.2770	0.4798		针阔混	1.8641	0.4754	0.2218	0.5153
	木荷	2.1750	0.5161	0.3201	0.5115	四川	冷杉	1.4008	0.3573	0.3268	0.5074
	针叶混	2.1429	0.3902	0.2086	0.5192		云杉	1.4790	0.3728	0.2367	0.4994
	阔叶混	2.0630	0.5222	0.2351	0.4899		马尾松	1.7321	0.4482	0.1871	0.5271
	针阔混	2.0639	0.4754	0.2218	0.5160		云南松	1.1580	0.4832	0.1681	0.5261
安徽	马尾松	2.1875	0.4482	0.1862	0.5271		高山松	1.5869	0.4043	0.1908	0.5009
	国外松	1.9407	0.4894	0.1873	0.5156		柏木	2.2275	0.4722	0.2068	0.5088
	黄山松	1.8590	0.4512	0.1810	0.5175		栎类	1.7660	0.6119	0.2423	0.4798
	杉木	1.7194	0.3071	0.2389	0.5127		桦木	1.5046	0.5270	0.2681	0.4914
	栎类	1.7494	0.6119	0.2676	0.4798		其它硬阔类	2.1925	0.6062	0.2155	0.4832
	其它硬阔类	1.6335	0.6062	0.2200	0.4798		其它软阔类	1.8459	0.4222	0.2098	0.4554
	杨树	2.2599	0.3644	0.2110	0.4502		阔叶混	1.7636	0.5222	0.2351	0.4801
	其它软阔类	1.9744	0.4222	0.2199	0.4507		针阔混	1.6499	0.4754	0.2218	0.5033

续表

省市 Province or city	优势树种 Dominant tree species	BEF	D/(t/m³)	R	CF	省市 Province or city	优势树种 Dominant tree species	BEF	D/(t/m³)	R	CF
	针叶混	2.1005	0.3902	0.2086	0.5185	贵州	华山松	1.7988	0.3863	0.1517	0.5177
	阔叶混	1.9009	0.5222	0.2351	0.4583		马尾松	1.8763	0.4482	0.1886	0.5271
	针阔混	1.9334	0.4754	0.2218	0.4977		云南松	1.3605	0.4832	0.1693	0.5261
江西	马尾松	2.1414	0.4482	0.1859	0.5271		杉木	1.8611	0.3071	0.2338	0.5127
	湿地松	2.2664	0.3590	0.2956	0.5311		柳杉	1.7688	0.2893	0.2311	0.5331
	黄山松	1.8125	0.4512	0.1810	0.5175		柏木	1.9548	0.4722	0.2135	0.5088
	杉木	1.9450	0.3071	0.2401	0.5127		栎类	1.6935	0.6119	0.2839	0.4798
	栎类	1.6767	0.6119	0.2524	0.4798		其它硬阔类	1.7127	0.6062	0.2150	0.4822
	桦木	1.8082	0.5270	0.2700	0.4914		其它软阔类	1.8451	0.4222	0.2175	0.4536
	樟木	1.7549	0.4649	0.2160	0.4916		针叶混	1.8273	0.3902	0.2086	0.5196
	木荷	2.1561	0.5161	0.3033	0.5115		阔叶混	1.7470	0.5222	0.2351	0.4789
	其它软阔类	1.9857	0.4222	0.2168	0.4632		针阔混	1.7269	0.4754	0.2218	0.5165
	针叶混	2.0480	0.3902	0.2086	0.5188	云南	云杉	1.2706	0.3728	0.2378	0.4994
	阔叶混	1.7872	0.5222	0.2351	0.4835		华山松	1.7633	0.3863	0.1514	0.5177
	针阔混	1.8855	0.4754	0.2218	0.6811		云南松	1.0978	0.4832	0.1685	0.5261
湖北	落叶松	1.4366	0.5053	0.3132	0.5137		思茅松	1.5250	0.4560	0.1889	0.5224
	马尾松	2.0808	0.4482	0.1862	0.5271		高山松	1.7255	0.4043	0.1875	0.5009
	其它松类	2.4750	0.4649	0.2630	0.5266		杉木	2.1088	0.3071	0.2349	0.5127
	杉木	1.8365	0.3071	0.2396	0.5127		栎类	1.7609	0.6119	0.2424	0.4798
	柳杉	1.8064	0.2893	0.2277	0.5331		其它硬阔类	1.8388	0.6062	0.2132	0.482
	栎类	1.7352	0.6119	0.2707	0.4798		其它软阔类	1.7739	0.4222	0.2091	0.4727
	其它硬阔类	1.8948	0.6062	0.2192	0.4826		针叶混	1.6130	0.3902	0.2086	0.5177
	杨树	2.6871	0.3644	0.2148	0.4502		阔叶混	1.7190	0.5222	0.2351	0.4813
	其它软阔类	2.0090	0.4222	0.2211	0.4507		针阔混	1.5792	0.4754	0.2218	0.5066
	针叶混	2.0213	0.3902	0.2086	0.5240						

BEF: 生物量扩展因子 Biomass expansion factor; D: 木材基本密度 Wood basic density; R: 根茎比 Root-to-shoot-ratio; CF: 含碳率 Carbon content,为林木生物量中的有机碳占有机质总量的比值

(2)生物量关系模型或比重法

乔木林地林下灌木层、枯落物、枯死木碳储量估算采用生物量关系模型法。即利用森林碳库专项调查建模数据,分气候带按森林类型分别建立枯死木、林下灌木层、枯落物单位面积生物量与乔木层单位面积蓄积量的关系模型(表 2—4)。对于拟合效果较差的模型,以相应碳库单位面积生物量和林分单位面积地上生物量比值的平均值表示,疏林地、竹林地、灌木林地枯落物碳储量估算采取此方法。具体表达式如下:

$$C_B = \sum_{i,j} \{f(M_{i,j}) \times A_{i,j} \times CF_{i,j}\} \quad (2)$$

或

$$C_B = \sum_{i,j} (\overline{B_{i,j}} \times A_{i,j} \times CF_{i,j}) \quad (3)$$

式中,$f(M_{i,j})$ 为某森林类型某碳库生物量与乔木层蓄积量的关系模型,M 为乔木层单位面积蓄积量(m^3/hm^2);$\overline{B_{i,j}}$ 为某森林类型某碳库单位面积生物量和林分单位面积地上生物量比值的平均值;$A_{i,j}$ 为某森林类型对应的面积(hm^2);$CF_{i,j}$ 表示某森林类型某碳库平均含碳率,其中枯落物生物量平均含碳率为森林碳库专项

调查实测数据的测定值0.42,枯死木采取IPCC缺省值0.5[41],林下灌木层生物量采取森林碳库专项调查实测值0.465。

表2 乔木林地林下灌木层生物量计量模型

Table 2 The biomass measurement model of shrub layer under arbor forestland

气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2	气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2
亚热带	杉木	人工林	$B=18.75V^{-0.56}$	0.72	亚热带	木荷	天然林	$B=0.0196V$	0.60
Subtropical zone		天然林	$B=2.43V^{0.01}$	0.74	Subtropical zone	其它硬阔	人工林	$B=2.82V^{-0.15}$	0.82
	冷杉	天然林	$B=0.0138V$	0.77			天然林	$B=0.80V^{0.19}$	0.79
	其它杉类	人工林	$B=1.58V^{-0.07}$	0.86		其它软阔	人工林	$B=4.18V^{-0.29}$	0.75
	马尾松	人工林	$B=17.12V^{-0.53}$	0.79			天然林	$B=10.55V^{-0.35}$	0.72
		天然林	$B=12.43V^{-0.27}$	0.72		阔叶混	人工林	$B=7.81V^{-0.31}$	0.75
	云南松	天然林	$B=34.8V^{-0.53}$	0.71			天然林	$B=16.88V^{-0.40}$	0.71
	其它松类	人工林	$B=8.63V^{-0.17}$	0.73		针阔混交	人工林	$B=24.91V^{-0.75}$	0.73
		天然林	$B=0.1263V$	0.71			天然林	$B=111.79V^{-0.76}$	0.73
	柏木	人工林	$B=19.66V^{-0.93}$	0.76	高原山地	云杉	人工林	$B=0.48V^{-0.07}$	0.86
		天然林	$B=0.0170V$	0.58	Plateau		天然林	$B=7.88V^{-1.06}$	0.76
	针叶混	人工林	$B=68.03V^{-0.96}$	0.94	mountain	冷杉	天然林	$B=19.81V^{-0.35}$	0.73
		天然林	$B=4.44V^{0.16}$	0.72		松类	天然林	$B=0.29V0.30$	0.79
	栎类	人工林	$B=423.56V^{-1.46}$	0.81		柏木	天然林	$B=0.75V^{-0.05}$	0.72
		天然林	$B=2.00V^{-0.03}$	0.74		其它针叶	人工林	$B=0.30V^{0.15}$	0.86
	杨树	人工林	$B=113.07V^{-1.33}$	0.83			天然林	$B=0.14V^{0.38}$	0.71
	枫香	人工林	$B=5.73V^{-0.73}$	0.82		桦木	天然林	$B=6.30V^{-0.61}$	0.71
		天然林	$B=1.04V^{0.16}$	0.72		其它阔叶	天然林	$B=0.0185V$	0.66

B: 生物量 Biomass; V:乔木层单位面积蓄积量 Stocking volume per unit area of arbor layer

表3 乔木林地枯死木碳库计量模型

Table 3 The carbon pool measurement model of dead wood in arbor forestland

气候带 Climate zone	森林类型 Forest type	模型 Model equation	R^2
高原山地 Plateau mountain	四川省	$B=6.2399V^{-1.4357}$	0.91
亚热带 Subtropical zone	人工针叶林	$B=0.0104V$	0.52
	人工阔叶林	$B=0.03783V$	0.57
	人工混交林	$B=0.01123V$	0.51
	天然针叶林	$B=0.003959V^{-0.53404}P^{-4.177085}$	0.40
	天然阔叶林	$B=2.842V^{-1.134}$	0.43
	天然混交林	$B=271.998V^{-3.114}$	0.92

P: 郁闭度 Canopy density

表4 主要树种(组)枯落物碳库计量模型

Table 4 The litter carbon pool measurement model of the main tree species/groups

气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2	气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2
亚热带	杉木	人工林	$B=3.47V^{0.10}$	0.81	亚热带	枫香	人工林	$B=0.94V^{0.35}$	0.64
Subtropical		天然林	$B=3.61V^{0.09}$	0.79	Subtropical		天然林	$B=3.46V^{0.05}$	0.87
zone	冷杉	天然林	0.027		zone	其它硬阔	人工林	$B=10.62V^{-0.29}$	0.67
	其它杉类	人工林	$B=31.32V^{-0.25}$	0.75			天然林	$B=5.48V^{0.07}$	0.74
	马尾松	人工林	$B=0.88V^{0.16}$	0.73		其它软阔	人工林	$B=1.82V^{0.17}$	0.73
		天然林	$B=2.46V^{0.19}$	0.72			天然林	$B=2.60V^{0.15}$	0.80
	云南松	天然林	0.104			阔叶混交	人工林	$B=3.61V^{0.04}$	0.75

续表

气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2	气候带 Climate zone	树种 Tree species	起源 Forest origin	模型方程 Model equation	R^2
	其它松类	人工林	$B=0.39V^{0.57}$	0.83			天然林	$B=3.12V^{0.08}$	0.71
		天然林	$B=5.04V^{0.06}$	0.74		针阔混交	人工林	$B=2.62V^{0.12}$	0.75
	柏木	人工林	$B=3.63V^{-0.14}$	0.86			天然林	$B=3.93V^{0.04}$	0.72
		天然林	$B=21.61V^{-0.55}$	0.80	高原山地	云杉	天然林	$B=0.18V^{0.36}$	0.74
	针叶混交	人工林	$B=1.10V^{-0.68}$	0.67	Plateau mountain	冷杉	天然林	0.03	
		天然林	$B=4.82V^{-0.82}$	0.77		其它针叶	人工林	0.114	
	栎类	人工林	0.06				天然林	$B=0.21V^{0.24}$	0.77
		天然林	$B=4.19V^{0.06}$	0.71		阔叶树	人工林	0.05	
	木荷	天然林	$B=2.87V^{0.13}$	0.80			天然林	0.014	
	杨树	人工林	$B=3.85V^{-0.37}$	0.77					

部分模型由于拟合效果较差,以对应样本的单位面积生物量的平均值形式呈现(单位:Mg C/hm^2)

(3)单位面积生物量法

竹林地、灌木林地、林下草本层碳储量估算采用此方法。即利用森林碳库专项调查的建模数据,分省或分区(包括华中、华南、华东、西南)建立竹林地、灌木林地、林下草本层单面面积生物量模型(表 5 和表 6),计算相应碳库碳储量。未成林地、苗圃地碳储量估算方法同灌木林地。表达式如下:

$$C_B = \sum_{i,j} (B_{i,j} \times A_{i,j} \times CF_{i,j}) \quad (4)$$

式中,$B_{i,j}$ 为某森林类型某碳库单位面积生物量(Mg C/hm^2);$A_{i,j}$ 为某森林类型对应的面积(hm^2);$CF_{i,j}$ 表示某森林类型某碳库平均含碳率,其中竹林生物量平均含碳率为 0.4705,灌木林为 0.465,林下草本层为 0.45。

表 5　竹林、灌木林单位面积生物量/(Mg C/hm^2)

Table 5　The biomass per unit area of bamboo and shrub forest

省市 Province or city	竹林类型 Bamboo type		灌木林 Shrub	省市 Province or city	竹林类型 Bamboo type		灌木林 Shrub
上海	杂竹类	70.88	4.09	湖南	毛竹	45.57	10.03
江苏	毛竹	86.98	11.37		杂竹类	40.11	
	杂竹类	96.79		重庆	毛竹	45.92	12.40
浙江	毛竹	66.13	9.03		杂竹类	99.96	
	杂竹类	46.19		四川	毛竹	39.41	18.12
安徽	毛竹	64.92	9.99		杂竹类	99.96	
	杂竹类	66.61		贵州	毛竹	37.23	11.96
江西	毛竹	56.77	10.33		杂竹类	46.92	
	杂竹类	60.10		云南	毛竹	48.04	17.61
湖北	毛竹	59.13	8.17				
	杂竹类	53.28					

表 6　乔木林地林下草本层单位面积生物量

Table 6　The biomass per unit area of herbaceous layer under arbor forestland

地区 Region	单位面积生物量/(Mg C/hm^2)	样本数 Number of samples	不确定性/% Uncertainty	地区 Region	单位面积生物量/(Mg C/hm^2)	样本数 Number of samples	不确定性/% Uncertainty
华东 East China	0.86	184	7.13	华南 South China	1.42	186	5.14
华中 Central China	2.62	208	2.67	西南 Southwest China	1.43	15	12.09

(4)碳密度法

乔木林地、竹林地、灌木林地、其它林地、其他生物质土壤碳储量估算采用此方法。即利用森林碳库专项调查获取的样地各土层容重、土层厚度和土壤有机碳含量样品数据和实验测定数据(表 7),按土纲和土壤类型建立土壤有机碳密度,计算土壤碳储量,表达式如下:

$$C_{S,i} = A_i \times D_i \quad (5)$$

式中, A_i 为某土壤类型面积(hm^2); D_i 为某森林碳库专项调查建立的各土壤类型有机碳密度(Mg C/hm^2)。

表 7 土壤容重、有机质含量和有机碳密度

Table 7 The soil bulk density, organic matter content and organic carbon density

土纲 Soil class	土壤类型 Soil type	样点数 Samples number	容重/(g/cm^3) Soil bulk density		有机质含量/(g/kg) Soil organic matter content		碳密度/(Mg C/hm^2) Carbon density	
			均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation
铁铝土 Ferralsols	砖红壤	20	1.33	0.14	12.30	9.99	140.2	115.1
	赤红壤	105	1.31	0.14	22.87	12.29	223.3	101.1
	红壤	328	1.21	0.18	24.61	19.88	167.5	108.4
	黄壤	189	1.14	0.22	25.45	19.39	168.9	102.7
淋溶土 Alfisols	黄棕壤	156	1.15	0.26	29.06	22.14	174.2	136.6
	棕壤	119	1.09	0.24	29.96	27.10	185.9	155.0
	暗棕壤	62	1.13	0.26	42.36	47.67	253.1	157.1
半淋溶土	燥红土*		1.30		10.40			
Semi leaching soil	褐土	70	1.20	0.28	20.14	13.95	130.8	77.2
	塿土*		1.30		17.80			
	灰褐土	54	0.99	0.24	39.12	32.79	212.1	130.3
钙层土 Pedocals	黑垆土*		1.33		9.10			
	黑钙土	18	1.21	0.22	16.56	6.06	181.4	63.3
	栗钙土	24	1.31	0.20	20.82	14.95	134.6	94.5
	棕钙土	1	0.95		10.02		28.4	
	灰钙土	9	1.09	0.27	12.08	5.40	91.0	43.4
石膏盐层土	灰漠土	1	1.16		8.82		66.6	
Gypsum salt layer soil	灰棕漠土*		1.25		3.70			
	棕漠土*		1.40		2.10			
水成土 Hydric Soil	沼泽土	24	0.88	0.33	127.69	159.75	395.5	449.1
	水稻土	21	1.30	0.14	19.01	12.87	156.9	106.7
半水成土	黑土	5	1.31	0.20	22.64	10.42	282.1	179.9
Semi-hydromorphic soil	潮土	24	1.32	0.26	9.04	5.87	99.8	55.6
	砂姜黑土	13	1.44	0.23	8.84	2.96	125.0	41.7
	灌淤土	2	1.06	0.05	10.54	0.03	111.7	4.6
	草甸土	20	1.11	0.25	27.38	21.41	224.6	181.5
盐碱土 Saline-alkali soil	盐土	4	1.33	0.05	13.13	17.35	120.6	121.0
岩成土 Lithogenic soil	紫色土	58	1.30	0.19	18.43	13.70	126.6	82.4
	石灰土	27	1.19	0.23	29.21	13.68	214.6	103.3
	风沙土	38	1.51	0.12	6.5	4.14	85.5	48.8
	火山灰土	2	1.10	0.51	25.55	13.51	31.5	27.9
高山土	山地草甸土	3	1.02	0.28	41.80	23.92	267.5	135.3
High-Mountain Soils	亚高山草甸*		1.20		40.30			

* 为全国第二次土壤普查结果

2.2.2 碳汇量计量

以 2016 年和 2020 年林业碳汇监测数据为基础,构建 2016—2020 年间的土地利用变化矩阵。利用森林碳库专项调查建立的碳计量模型和参数,采用“库-差别法”和“储量变化法”,分别估算前期与后期的碳储量年变化量(Tg C/a)(1 Tg C=1×10^{12} g C),也可以用 CO_2 与 C 的分子量之比(44/12)将碳储量年变化量换算为

二氧化碳当量(Tg CO_2/a),估算 2020 年长江经济带林地和其他生物质产生的碳汇量。

(1)库-差别法

①一直为林地的土地

分别估算“一直为林地的土地”前期与后期的碳储量年变化量。乔木林地、竹林地、灌木林地、疏林地、其他生物质、乔木林地林下灌木层等涉及的前后两期生物量碳库和死有机质碳库碳储量估算方法详见 2.2.1。乔木林地林下草本层碳库总量小,且年变化量小,视为没有变化。未成林地、迹地和苗圃地等其它林地生物量碳储量年变化量小,视为没有变化。

同一林地地类,年际间的土壤有机质碳储量变化很小,因此,只计算 2016—2020 年间林地内二级地类变化引起的土壤碳储量变化。根据 GPG-LULUCF 指南[41],土壤有机碳储量变化达到稳定的缺省时间间隔期为 20 年,本研究以 20 年间的有机碳储量年均变化量为换算因子,计算 2020 年各类林地土壤碳储量变化量。表达式如下:

$$\Delta C_{\mathrm{FL_SOC}} = \sum_k \sum_m \left(A_{FL,mk} \cdot \frac{\mathrm{SOC}_k - \mathrm{SOC}_m}{20} \right) \tag{6}$$

式中,$\Delta C_{\mathrm{FL_SOC}}$ 为“一直为林地的土地”中土壤有机碳储量的变化(Mg C/hm^2);SOC_k 为转化后林地亚类型 k 的平均土壤有机碳密度(Mg C/hm^2);SOC_m 为转化前林地亚类型 m 的平均土壤有机碳密度(Mg C/hm^2);$A_{FL,mk}$ 为间隔期内 m 类林地与 k 类林地之间转化的总面积(hm^2);m,k 为林地类型;20 为 IPCC 规定的土地利用变化地块土壤有机碳储量达到稳定状态的时间。

②转为林地的土地

分别估算农地、草地、湿地、聚居地和其它土地转为乔木林地、竹林地、灌木林地和其它林地各碳库碳储量年变化量。农地、草地、湿地、聚居地和其它土地转为林地,转入前的地上生物量、地下生物量、枯落物、枯死木碳储量总量小,统一视作 0;转入后的生物量碳储量,根据相应林地地类计算其生物量碳储量年变化量。乔木林地枯死木碳储量采用枯死木碳储量与乔木层蓄积量的关系模型计算,乔木林地、竹林地、灌木林地、疏林地枯落物碳储量采用枯落物生物量比重法计算;根据转入前后地类的土壤有机碳密度差异(表 8),以 20 年为时间间隔,计算土壤有机质碳储量年变化量。

表 8　主要土地类型土壤有机碳密度/(Mg C/hm^2)

Table 8　The soil organic carbon density of the main land types

地类 Land type		地区 Region	平均值 Mean	95% 置信区间 95% confidence interval 下限 Lower limit	95% 置信区间 95% confidence interval 上限 Upper limit	土地类型 Land type	地区 Region	平均值 Mean	95% 置信区间 95% confidence interval 下限 Lower limit	95% 置信区间 95% confidence interval 上限 Upper limit
林地	乔木林地	西南	62.87	52.16	73.58	农地 Cropland	西南	43.63	41.44	65.47
Forest		华南	50.34	44.77	55.90		华南	38.77	34.64	65.53
land		华东	54.36	47.99	60.73		华东	34.21	28.11	64.11
	竹林地	西南	69.09	54.09	84.09	草地 Grassland	西南	41.34	33.83	48.86
		华南	62.55	45.42	79.67		华南	30.40	23.59	37.22
		华东	58.34	55.30	61.38		华东	27.67	20.81	34.52
	灌木林地	西南	53.08	41.16	64.99	湿地 Wetland	西南	134.09	72.94	195.24
		华南	37.95	32.11	43.79		华南	87.28	38.19	136.37
		华东	29.07	22.90	35.25		华东	80.51	28.62	132.40
	疏林地	西南	53.08	41.16	64.99	其它土地 Other land	荒漠	16.33	13.51	19.15
		华南	34.81	25.43	44.18		荒地	22.46	17.22	27.70
		华东	33.74	24.86	42.63		平均	17.60	15.11	20.08
	未成林地	全国	17.60	15.11	20.08					

土壤深度 30cm 范围内

(2)储量变化法

采用“储量变化法”估算其他生物质(散生木、四旁树)的碳储量年变化量,

$$\Delta C_{TOF,t} = \frac{C_{TOF,t_2} - C_{TOF,t_1}}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

式中：ΔC_{TOF} 为散生木和四旁树的生物量碳储量变化量(Mg C/hm^2)；C_{TOF} 为散生木和四旁树的生物量碳储量(Mg C)；t 为计量年。

3 结果与分析

3.1 碳储量及分配特征

2020 年长江经济带林地碳储量 24543.58 Tg C、散生木和四旁树等其他生物质碳储量 329.59 Tg C(表 9)。(1)从不同地类碳储量来看(图 1)，乔木林地碳储量最大，为 18110.56 Tg C，占总碳储量 72.81%，其次是灌木林地碳储量，为 4486.00 Tg C，占总碳储量 18.04%。竹林地和其它林地碳储量相当，占总碳储量的 4%左右。碳储量最小的是散生木、四旁树等其他生物质，占总碳储量的 1.33%。碳储量从大到小排序为：乔木林地>灌木林地>竹林地>其它林地>其他生物质。(2)从不同碳库碳储量分配来看(图 2)，土壤有机质碳库最大，为 20262.61 Tg C，占总碳储量 81.46%，其次是生物量碳库，为 4387.43 Tg C，占总碳储量 17.63%，最小的是死有机质碳库，为 223.13 Tg C，仅占总碳储量的 0.91%。由表 3 可知，乔木林地生物量碳储量(3740.39 Tg C)中，乔木层碳储量为 3581.45 Tg C，占乔木林地生物量碳储量 95.75%，林下灌木层、草本层碳储量较小，碳储量分别为 99.36 Tg C 和 59.58 Tg C，分别占 2.66%和 1.59%。(3)从不同地理区域碳储量分布来看(图 3)，云南、四川、贵州、湖南、江西、湖北等 6 省 2020 年林地和其他生物质碳储量 20570.79 Tg C，占总碳储量的 82.70%。云南省最大，占总碳储量的 25.49%，其次是四川省，占总碳储量的 21.58%。贵州、湖南、江西、湖北、浙江等省占总碳储量 5%—10%之间。安徽、江苏、重庆、上海等 4 省市均小于 5%。上海林地和其他生物质碳储量最小，仅占总碳储量的 0.09%。碳储量从大到小排序为：云南>四川>贵州>湖南>江西>湖北>浙江>安徽>江苏>重庆>上海。

表 9 2020 年长江经济带林地和其他生物质碳储量按地类和碳库统计/Tg C

Table 9 Statistics of carbon storage of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt in 2020 (by land type and carbon pool)

地类 Land type	碳库 Carbon pool		碳储量 Carbon storage
总计 Total	24873.17		
乔木林地 Arbor forestland	合计		18110.56
	生物量碳储量	小计	3740.39
		乔木层	3581.45
		林下灌木层	99.36
		林下草本层	59.58
	死有机质碳储量		153.83
	土壤有机质碳储量		14216.34
竹林地 Bamboo forestland	小计		993.27
	生物量碳储量		138.59
	死有机质碳储量		16.65
	土壤有机质碳储量		838.03
灌木林地 Shrub forestland	小计		4486.00
	生物量碳储量		154.51
	死有机质碳储量		49.53
	土壤有机质碳储量		4281.96
其它林地 Other forestland	小计		953.75
	生物量碳储量		24.35
	死有机质碳储量		3.12
	土壤有机质碳储量		926.28
散生木、四旁树等其它生物质 Other biomass such as scattered trees and four-side trees			329.59

2020 年长江经济带森林植被碳储量(包括乔木林地、竹林地、灌木林地、疏林地、四旁树和散生木,仅含生物量碳库)为 4372.85 Tg C。(1)从不同地类碳储量来看(图 4),乔木林地森林植被碳储量最大,为 3740.39 Tg C,占森林植被碳储量 85.54%,其次是其他生物质森林植被碳储量,为 329.59 Tg C,占森林植被碳储量 7.54%,竹林地和灌木林地森林植被碳储量相当,分别占森林植被碳储量的 3.17%和 3.53%。疏林地森林植被碳储量最小,为 9.77 Tg C,仅占 0.22%。(2)从不同地理区域碳储量分布来看(图 4),云南和四川两省森林植被碳储量占总森林植被碳储量的 52.76%,其中云南省占森林植被碳储量 29.10%,其次是四川省,占森林植被碳储量 23.66%;江西、湖北、湖南、贵州、浙江、安徽、重庆等 7 省市森林植被碳储量介于 200—4008 Tg C 之间,森林植被碳储量占比介于 4%—9%之间;江苏和上海两省市森林植被碳储量较小,占比不到 1.5%。

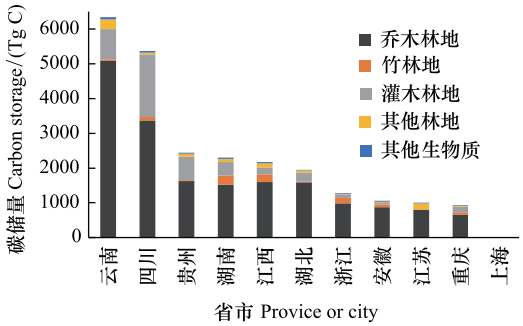

图 1　2020 年长江经济带林地和其他生物质按地类的碳储量

Fig.1　Carbon storage of various land types of forest land and other biomass of the Yangtze River Economic Belt in 2020

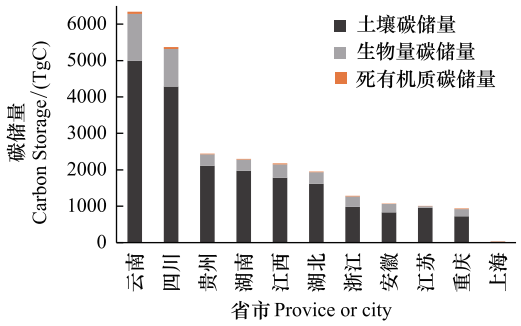

图 2　2020 年长江经济带林地和其他生物质按碳库的碳储量

Fig.2　Carbon storage of various carbon pools of forest land and other biomass of the Yangtze River Economic Belt in 2020

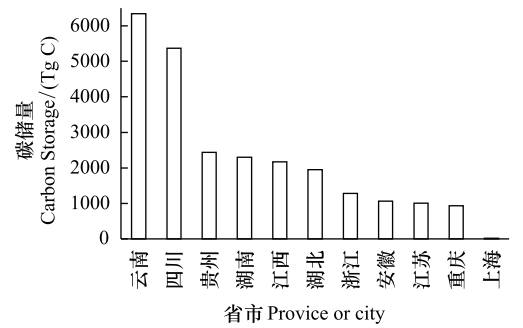

图 3　2020 年长江经济带各省市林地和其他生物质碳储量

Fig.3　Carbon storage of forest land and other biomass in each province or city of the Yangtze River Economic Belt in 2020

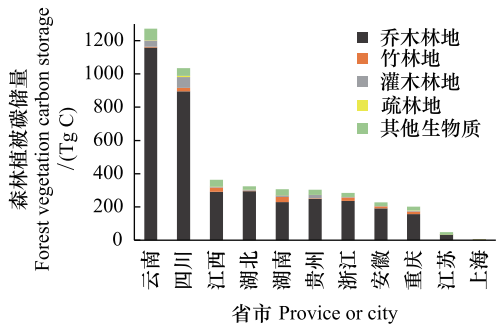

图 4　2020 年长江经济带各省市森林植被碳储量

Fig.4　Carbon storage of various forest vegetation types in each province or city of the Yangtze River Economic Belt in 2020

3.2　碳汇量及分配特征

2020 年长江经济带林地碳汇量为 81.81 Tg C/a(300.26 Tg CO_2/a),散生木和四旁树等其他生物质碳储量 6.60 Tg C/a(24.21 Tg CO_2/a),分别占总碳汇量的 92.54%和 7.46%(表 10)。(1)从不同土地利用变化类型碳汇量分配来看(图 5),“一直为林地的土地”产生碳汇量贡献最大,为 63.42 Tg C/a(232.76 Tg CO_2/a),占总碳汇量 71.74%;“转为林地的土地”产生碳汇量贡献较小,为 18.39 Tg C/a(67.50 Tg CO_2/a),仅占总碳汇量 20.80%。“一直为林地的土地”产生的碳汇量中,一直为乔木林的土地产生的碳汇量贡献最大,占总碳汇量的 69.89%;“转为林地的土地”产生的碳汇量中,由农地转为林地的产生的碳汇量最大,占总碳汇量的 13.12%。碳汇量从大到小排序为:“一直为林地的土地”>“转为林地的土地”>其他生物质。(2)从不同碳库碳汇量分配来看(图 6),生物量碳库碳汇量贡献最大,为 80.45 Tg C/a(295.26 Tg CO_2/a),占总碳汇量 90.99%,其次是

土壤有机质碳库,为 4.79 Tg C/a(17.56 Tg CO_2/a),占总碳汇量 5.41%,最小的是死有机质碳库,为 3.17 Tg C/a(11.65 Tg CO_2/a),仅占总碳储量的 3.59%。碳汇量贡献从大到小的排序为:生物量碳库>土壤有机质碳库>死有机质碳库。(3)从不同地理区域碳汇量分布来看(图 7),云南、贵州、湖北、江西、浙江等 5 省 2020 年林地和其他生物质碳汇量占总碳汇量的 67.40%。其中云南省最大,占总碳汇量的 20.49%,贵州省、湖北、江西、浙江等 4 省碳汇量相当,占总碳汇量介于 10%—14%之间。湖南、重庆、安徽、四川等 4 省市占比介于 6%—10%之间。江苏和上海碳汇量较小,占比均低于 3%,上海最小,仅占 0.3%。碳汇量从大到小排序为:云南>贵州>湖北>江西>浙江>湖南>重庆>安徽>四川>江苏>上海。

表 10 2020 年长江经济带林地和其他生物质各碳库碳汇量 *

Table 10 Carbon storage of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt in 2020

土地利用变化转移矩阵 Land use change conversion matrix	合计 Total	生物量碳库 Biomass carbon pool	死有机质碳库 Dead organic mattercarbon pool	土壤有机质碳库 Soil organic matter carbon pool
总计 Total	−88.41(−324.47)	−80.45(−295.26)	−3.17(−11.65)	−4.79(−17.56)
林地碳汇量计 Carbon sink measurement for forest land	−81.81(−300.26)	−73.86(−271.05)	−3.17(−11.65)	−4.79 (−17.56)
一直为林地的土地 Forestland land has been forestland all the time	−63.42(−232.76)	−59.58(−218.67)	−2.37(−8.71)	−1.47(−5.38)
乔木林地 Arbor forestland	−60.91(−223.54)	−58.10(−213.23)	−2.81(−10.31)	—
竹林地 Bamboo forestland	−1.32(−4.84)	−1.25(−4.58)	−0.07(−0.26)	—
灌木林地 Shrub forestland	−0.02(−0.09)	−0.02(−0.08)	−0.002(−0.01)	—
其它林地 Other forestland	−4.01(−14.72)	−3.92(−14.38)	−0.09(−0.34)	—
林地亚地类之间转移 Conversion between sub-forestland type	+2.84(+10.43)	+3.71(+13.60)	+0.60(+2.21)	−1.47(−5.38)
转为林地的土地 Land converted to forestland	−18.39(−67.50)	−14.27(−52.38)	−0.80(−2.94)	−3.33(−12.18)
农地→林地 Cropland→forestland	−11.60(−42.58)	−9.72(−35.67)	−0.54(−2.00)	−1.34(−4.91)
草地→林地 Grassland→forestland	−0.28(−1.03)	−0.23(−0.84)	−0.02(−0.06)	−0.04(−0.13)
湿地→林地 Wetland→forestland	−0.07(−0.25)	−0.12(−0.44)	−0.01(−0.02)	+0.06 (+0.21)
聚居地→林地 Settlements→forestland	−1.12(−4.12)	−0.66(−2.44)	−0.03(−0.12)	−0.43(−1.56)
其它土地→林地 Other land→forestland	−5.32(−19.52)	−3.54(−12.99)	−0.20(−0.74)	−1.58(−5.79)
其它生物质碳汇量计 Carbon sink measurement of other biomass	−6.60(−24.21)	−6.60(−24.21)	—	—
散生木 Scattered trees	−2.25(−8.24)	−2.25(−8.24)	—	—
四旁树 Four-side trees	−4.35(−15.97)	−4.35(−15.97)	—	—

−代表吸收二氧化碳,+ 代表排放二氧化碳,—表示不包括此项;* 括号内数据为碳当量,碳储量年变化量单位:Tg C/a,二氧化碳当量单位:Tg CO_2/a

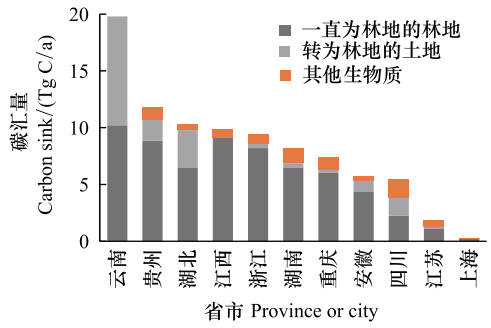

图 5 2020 年长江经济带林地和其他生物质按土地利用变化的碳汇量

Fig.5 Carbon sinks of various types of land use change of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt in 2020

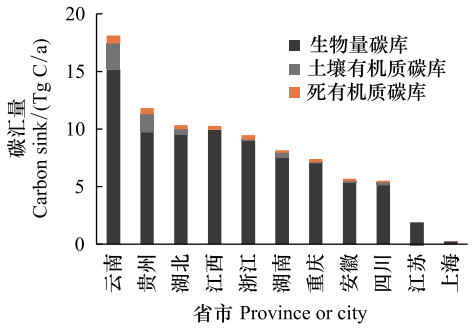

图 6 2020 年长江经济带林地和其他生物质按碳库的碳汇量

Fig.6 Carbon sinks of various carbon pools of forest land and other biomass in each province or city in the Yangtze River Economic Belt in 2020

4　讨论与结论

4.1　讨论

4.1.1　重点生态工程对长江经济带碳储量和碳汇量的贡献

改革开放以来,我国相继启动的重点生态工程中,涉及长江经济带 11 省市的重点工程包括长江防护林工程、天然林资源保护工程、珠江防护林工程和沿海防护林工程等 4 个重点生态工程。按照本研究方法测算结果表明:长江防护林工程对长江经济带碳储量贡献最大,其次是天然林资源保护工程,珠江防护林工程和沿海防护林工程因涉及长江经济带省份较少,对其碳储量影响较小。这些重点生态工程的实施,促进了长江经济带林地碳储量的积累和增加,增强了森林固碳能力和森林生态系统碳汇功能的发挥。经测算,长江防护林工程林地碳储量为 22224.29 Tg C,涉及长江经济带绝大多数省份,长江防护林工程的实施对长江经济带林地碳储量的贡献率为 83.00%。天然林资源保护工程林地碳储量为 34925.19 Tg C,对长江经济带林地碳储量的贡献率为 37.13%。珠江防护林工程和沿海防护林工程涉及长江经济带省份较少,林地碳储量分别为 6802.83 Tg C、3968.47 Tg C,对长江经济带林地碳储量的贡献率分别为 23.86%和 19.09%。长江经济带 11 省市中,四川省林地碳储量在长江防护林工程和天然林资源保护工程比重最高,在 35%—50%之间,原因是四川省碳密度较高,森林面积大,这和与张逸如[45]等对天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征研究是一致的,也与长江上游地区天然林保护工程区的研究一致[46]。

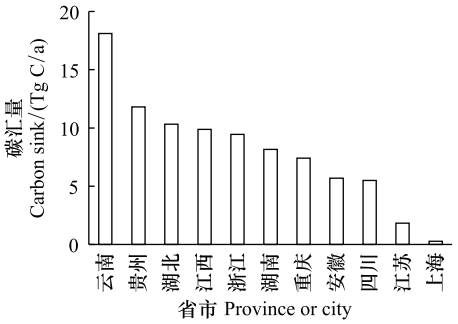

图 7　2020 年长江经济带各省市林地和其他生物质碳汇量

Fig. 7　Carbon sinks of forest land and other biomass in each province or city of the Yangtze River Economic Belt in 2020

从长江经济带林地和其他生物质碳汇量来看,研究表明:长江防护林工程、天然林资源保护工程、珠江防护林工程和沿海防护林工程等 4 个重点生态工程中,长江防护林工程林地碳汇量为 79.05 Tg C/a(290.10 Tg CO_2/a),工程实施对长江经济带贡献最大,贡献率达 81.28%,其次是天然林资源保护工程,林地碳汇量为 127.60 Tg C/a(468.29 Tg CO_2/a),贡献率为 32.18%,珠江防护林工程和沿海防护林工程对长江经济带林地碳汇量的影响较小,分别为 36.85 Tg C/a(135.26 Tg CO_2/a)和 30.49 Tg C/a(111.91 Tg CO_2/a),贡献率分别为 14.55%和 19.05%。乔木林仍为各重点生态工程碳汇增加的主力,所占比重在 80%—90%之间。重点生态工程的实施,使得长江经济带新增固碳量逐步增加,碳汇能力不断增强。

4.1.2　生态保护修复措施对长江经济带碳汇量的贡献

长江经济带林地碳汇量 81.81 Tg C/a(300.26 Tg CO_2/a)中,“一直为林地的土地”产生碳汇量 63.42 Tg C/a(232.76 Tg CO_2/a)贡献最大(71.74%),其中以一直为乔木林的土地产生的碳汇量为主体。原因可能与我国实施的生态保护修复措施有关。根据 2021 年中国国土绿化状况公报,我国共完成天然林抚育 113.33 万 hm^2,实施全国“十四五”期间年森林采伐限额,开展森林质量精准提升,完成退化林修复 93.33 万 hm^2。林业有害生物防治面积达 966.67 万 hm^2。长江经济带现有乔木林以中幼龄林为主,处于快速生长固碳的关键时期。通过近年来实施中幼林抚育、次生林、低效林改造、退化林修复、封山育林、森林防火、病虫害防治等措施,长江经济带森林质量有所提升,优化了森林结构和功能,增强了林地储碳能力,提高了森林固碳效率。

“转为林地的土地”产生碳汇量为 18.39 Tg C/a(67.50 Tg CO_2/a),占林地总碳汇量 20.80%。原因可能与我国持续推进的国土绿化措施有关。根据 2021 年中国国土绿化状况公报,我国退耕还林工程共完成 38.08 万 hm^2。长江、珠江、沿海、太行山等重点防护林工程完成造林 34.26 万 hm^2。完成石漠化综合治理 33 万 hm^2。长江经济带还有一定数量的适宜造林地,通过在宜林荒山荒地荒滩、废弃地、边角地以及其他土地等开展国土绿化,持续增加森林面积和蓄积,营造高效固碳林,有效发挥森林固碳作用,提升生态系统碳汇增量。

4.1.3 碳中和愿景下森林固碳增汇途径

2020 年第七十五届联合国大会上,中国政府承诺采用更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和;同年 12 月的气候雄心峰会上,提出了 2030 年森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿 m^3 的具体指标;2021 年 3 月,明确把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设的整体布局,有效发挥森林和草原等固碳作用,提升生态系统碳汇增量。实现碳中和有两条途径,一是减少碳排放,二是增加碳封存,在自然界主要通过陆地生态系统和海洋生态系统中形成的碳库"收集"大气层中的碳。森林是陆地生态系统的主体,全球陆地约 80%的地上碳储量和 40%的地下碳储量发生在森林生态系统。碳中和愿景下,加强森林的固碳增汇功能是抵消和吸纳碳排放最经济和最有效的途径[47]。本研究表明,长江经济带林地碳汇量中生物量碳库碳汇量 80.45 Tg C/a(295.26 Tg CO_2/a)。生物量碳库在碳汇量所做贡献(占比约 91%)远大于在碳储量中所做贡献(占比约 17%),可见,通过在长江经济带科学开展国土绿化、森林质量提升、森林资源保护,是巩固和提升森林生态系统碳汇功能的有效途径。

结合长江经济带区域特点,森林固碳增汇的主要实现途径为:一是科学推进国土绿化,增加碳汇增量。实施扩绿增碳攻坚行动,科学推进绿化,实施重要生态系统保护和修复重大工程,深入开展全民义务植树,协同推进部门绿化,统筹推进城乡绿化,不断增加生态系统碳汇量。二是精准提升森林质量,提高碳汇能力。全面保护天然林,实施天然次生林抚育修复。建立健全森林经营方案制度,实施森林质量精准提升工程,全面加强森林经营,提高森林生态系统固碳与适应能力。依据林木生长与碳汇功能变化规律,科学开展森林更新,维持生态系统碳汇功能稳定。积极发展能源林,实施木竹替代行动,提升生物减排固碳能力。三是加强长江经济带森林资源保护,减少碳库损失。加强林地定额管理、森林采伐限额管理,减少林地流失、森林破坏导致的碳损失;健全林草火灾预防体系,减少火灾导致的碳损失。落实重大森林草原有害生物监测,减少有害生物灾害导致的碳损失。

4.2 结论

本研究以全国林业应对气候变化碳汇计量监测体系建设成果为基础,对 2020 年长江经济带林地和其他生物质碳储量、碳汇量进行了估算和分析,结果表明乔木林是长江经济带碳汇的主体,土壤有机质碳库对碳储量贡献最大,而生物量碳库对碳汇量贡献最大。长江经济带 11 个省市中,云南省碳储量和碳汇量最大,上海市最小。重点生态工程的实施增强了长江经济带固碳能力。研究表明长江防护林工程对长江经济带碳储量和碳汇量的贡献最大,其次是天然林资源保护工程,珠江防护林工程和沿海防护林工程影响较小。近年来持续推进的生态保护修复措施对长江经济带碳储量和碳汇量具有重要贡献。碳中和愿景下,可通过科学推进国土绿化、精准提升森林质量、加强森林资源保护等固碳增汇途径来提高长江经济带碳汇能力。

参考文献(References):

[1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexier M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[2] 李国栋, 张俊华, 陈聪, 田海峰, 赵丽萍. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(5): 873-878.

[3] 曹吉鑫, 田赟, 王小平, 孙向阳. 森林碳汇的估算方法及其发展趋势. 生态环境学报, 2009, 18(5): 2001-2005.

[4] 张守攻. 提升生态碳汇能力. 上海企业, 2021(7): 64.

[5] Food and Agriculture Organization (FAO). Global Forest Resources Assessment Report 2020, World Forest Change. Rome: FAO, 2020.

[6] 孙丽娜. 山西省森林生物量碳密度空间格局和影响因素研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.

[7] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, 2006.

[8] Liu S Q, Bian Z, An T Y, Xia C Z, Zhang M, Chen J, Hou R P, Zhang K B, Zhao H Q. Carbon pools of biomass and dead organic matter in typical forest ecosystems of Tibet: a new estimation based on the first forestry carbon sequestration monitoring undertaken in China. Land Degradation & Development, 2021, 32(10): 2877-2891.

[9] 张煜星, 王雪军, 蒲莹, 张建波. 1949—2018 年中国森林资源碳储量变化研究. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14.

[10] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.

[11] Koch G, Mooney H. Carbon dioxide and terrestrial ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1997, 34: 543.

[12] Grier C C, Vogt K A, Keyes M R, Edmonds R L. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature Abiesamabilis zone ecosystems of the Washington Cascades. Canadian Journal of Forest Research, 1981, 11(1): 155-167.

[13] Woodwell G M. The global carbon cycle. Science, 1988, 241(4874): 1736-1737.

[14] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global Change Biology, 1995, 1(1): 77-91.

[15] Leavit S W. Biogeochemistry, an analysis of global change. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1998, 79(2): 20.

[16] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. Forest Ecology and Management, 1999, 123(1): 81-90.

[17] Hughes R F, Kauffman J B, Jaramillo V J. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of méxico. Ecology, 1999, 80(6): 1892-1907.

[18] 王万同, 唐旭利, 黄玫. 中国森林生态系统碳储量-动态及机制. 北京: 科学出版社, 2018.

[19] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.

[20] 兰秀, 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 刘永贤, 范稚莲, 张家涌. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(6): 2043-2053.

[21] Wang Z Q, Hu Y X, Wang R, Guo S L, Du L L, Zhao M, Yao Z H. Soil organic carbon on the fragmented Chinese Loess Plateau: combining effects of vegetation types and topographic positions. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 1-5.

[22] Köhl M, Lasco R, Cifuentes M, Jonsson Ö, Korhonen K T, Mundhenk P, de Jesus Navar J, Stinson G. Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO global forest resource assessment. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 21-34.

[23] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.

[24] Xu B, Guo Z D, Piao S L, Fang J Y. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: a prediction based on forest biomass-age relationships. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 776-783.

[25] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, Zhang Y J, Xu Z H. Carbon carry capacity and carbon sequestration potential in China based on an integrated analysis of mature forest biomass. Science China Life Sciences, 2014, 57(12): 1218-1229.

[26] Guo Z D, Hu H F, Li P, Li N Y, Fang J Y. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. Science China Life Sciences, 2013, 56(7): 661-671.

[27] 刘领, 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 赵威. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化. 生态学报, 2019, 39(3): 864-873.

[28] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.

[29] 任德智, 廖兴勇, 肖前刚, 赖长鸿, 宋放, 孟思淼, 彭雪芹. 成都市森林植被碳储量及空间分布格局. 西部林业科学, 2021, 50(3): 74-81.

[30] 刘兆丹, 李斌, 方晰, 项文化, 田大伦, 闫文德, 雷丕锋. 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征. 生态学报, 2016, 36(21): 6897-6908.

[31] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[32] Liu S Q, Bian Z, Xia C Z, Ahmad B, Zhang M, Chen J, An T Y, Zhang K B. Forest biomass carbon pool dynamics in Tibet Autonomous Region of China: inventory data 1999-2019. PLos One, 2021, 16(5): e0250073.

[33] 唐学君, 肖舜祯, 王伟峰, 张旭东. 中亚热带典型杉阔混交林碳储量分配特征. 地域研究与开发, 2019, 38(4): 111-114, 121.

[34] Poorter L, van der Sande M T, Thompson J, Arets E J M M, Alarcón A, Álvarez-Sánchez J, Ascarrunz N, Balvanera P, Barajas-Guzmán G, Boit A, Bongers F, Carvalho F A, Casanoves F, Cornejo-Tenorio G, Costa F R C, de Castilho C V, Duivenvoorden J F, Dutrieux L P, Enquist B J, Fernández-Méndez F, Finegan B, Gormley L H L, Healey J R, Hoosbeek M R, Ibarra-Manríquez G, Junqueira A B, Levis C, Licona J C, Lisboa L S, Magnusson W E, Martínez-Ramos M, Martínez-Yrizar A, Martorano L G, Maskell L C, Mazzei L, Meave J A, Mora F, Muñoz R, Nytch C, Pansonato M P, Parr T W, Paz H, Pérez-García E A, Rentería L Y, Rodríguez-Velazquez J, Rozendaal D M A, Ruschel A R, Sakschewski B, Salgado-Negret B, Schietti J, Simões M, Sinclair F L, Souza P F, Souza F C, Stropp J, ter Steege H, Swenson N G, Thonicke K, Toledo M, Uriarte M, van der Hout P, Walker P, Zamora N, Peña-Claros M. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(11): 1314-1328.

[35] Durán S M, Sánchez-Azofeifa G A, Rios R S, Gianoli E. The relative importance of climate, stand variables and liana abundance for carbon storage in tropical forests. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(8): 939-949.

[36] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2881-2890.

[37] 戴巍, 赵科理, 高智群, 刘康华, 张峰, 傅伟军. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征. 生态学报, 2017, 37(22): 7528-7538.

[38] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 黄志霖, 潘磊, 曾立雄. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量. 生态学报, 2009, 29(1): 97-107.

[39] 步巧利, 谭正洪, 张一平. 中国西南地区热带森林演替序列碳动态. 生态学报, 2020, 40(15): 5258-5265.

[40] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, et al.Spatio temporal variation of carbon storage in forest vegetation in Sichuan Province.Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(12):2687-2692.

[41] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:Volume 4 Agriculture, forestry, and other land use (Vol. 4, pp. 7-4.34). Published the Institute for Global Environment Strategies (IGES), Hayama, Janpan on behalf of the IPCC. Printed in Japan. 2006.

[42] Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry (Vol. 35, pp: 219- 225). Tokyo: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, Institute for Global Environmental Strategies/Japan Press. 2003.

[43] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.

[44] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质. 北京: 中国林业出版社, 1982.

[45] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 李海奎. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.

[46] 郭焱, 周旺明, 于大炮, 周莉, 谷晓萍, 吴志军, 吴胜男, 王晓雨, 代力民. 长江上游天然林资源保护工程区森林植被碳储量研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 221-228.

[47] 李海奎. 碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展. 中国地质调查, 2021, 8(4): 79-86.