

DOI: 10.5846/stxb202101200215

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.

Zhang Y R, Liu X T, Gao W Q, Li H K. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5093-5105.

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

张逸如^{1,2}, 刘晓彤^{1,2}, 高文强^{1,2}, 李海奎^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

2 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091

摘要: 分析近 20 年来天保工程区森林植被碳储量的动态变化及碳汇(源)特征, 以期为我国天然林保护的政策制订和措施实施提供数据支撑。利用天然林资源保护工程区 6—9 次森林资源连续清查数据, 把森林植被划分乔木林、灌木林、竹林、疏林地、散生木、四旁树, 基于行业标准的生物量模型和碳计量参数、采用生物量加权平均法等方法, 估算整个工程区和各省的森林植被总碳储量; 对乔木林分起源、龄组、优势树种(组)估算碳储量和碳密度; 量化森林植被总碳储量和乔木林碳储量随时间变化的消长, 明确其碳汇/源特征。研究结果表明: 6—9 次清查, 天保工程区森林植被总碳储量分别为 2999 TgC、3254 TgC、3585 TgC 和 4097 TgC, 年均增长率为 1.65%、1.96% 和 2.70%; 碳储量集中分布于我国东北和西南区域, 其中四川碳储量最高, 4 期碳储量均占天保工程区总量 20% 以上; 乔木林碳储量是森林植被碳储量的主体, 每期占比均稳定在 80% 以上, 其中天然林比例由 94.67% 下降至 90.28%, 人工林比例稳步上升, 但到 9 次清查时其碳密度仍低于天然林 50%; 不同龄组间, 中龄林碳储量最高, 近熟林碳储量增长最快, 碳密度从幼龄林到过熟林逐渐上升, 4 期趋势一致; 乔木林中纯林碳储量占 60% 以上, 大部分树种(组)碳储量和碳密度随时间推移而增加。7—9 次清查, 天保工程区森林植被总固碳量(当期相对于前期)分别为 255.33 TgC、331.46 TgC 和 511.53 TgC, 对全国森林植被总碳汇量的贡献由 8 次连清的 53.78% 上升到 9 次的 67.46%, 其中, 乔木林对全国乔木林碳汇的贡献为 68.71%; 天保工程区内天然林对乔木林碳汇的贡献为 75.90%; 不同清查期, 乔木林各龄组的碳汇变化较大, 幼龄林和中龄林碳汇占比明显上升, 近熟林和过熟林下降, 9 次清查时各龄组碳汇量大小顺序为: 中龄林>近熟林>幼龄林>成熟林>过熟林; 不同清查期, 各个优势树种的碳汇/源表现不一, 总体上, 混交林的碳汇比例最大, 到 9 次清查时, 阔叶混交林和针阔混交林对乔木林碳汇的贡献分别为 62.59% 和 17.23%, 纯林中柏木碳汇贡献最大, 为 5.43%。天保工程区森林植被总碳储量随时间稳步增长, 乔木林是总碳储量的主体, 天然林是碳汇的主要来源, 天然林保护增强了我国天然林碳汇的碳汇功能, 促进了人工林碳汇作用提升, 未来天保工程区碳汇潜力很大。

关键词: 天然林资源保护工程; 乔木林; 碳储量; 碳汇; 碳源

Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years

ZHANG Yiru^{1,2}, LIU Xiaotong^{1,2}, GAO Wenqiang^{1,2}, LI Haikui^{1,2,*}

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

2 Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: In order to provide data support for policy formulation and measures implementation of natural forest protection in

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020ZD002-1); 国家自然科学基金项目(31770676)

收稿日期: 2021-01-20; **修订日期:** 2021-04-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihk@ifrit.ac.cn

China, the dynamics of carbon storage and carbon sink (source) characteristics of forest vegetation in the natural forest protection project (NFPP) region were estimated and evaluated in the last 20 years. Based on data from 6—9th Chinese National Forest Inventory (CNFI) of the NFPP region, the forest vegetation was divided into arbor forest, shrubbery, bamboo, open forest, scattered trees, and “four-side” trees. By means of tree biomass model and related parameters to carbon accounting from forestry industry standard and biomass conversion and expansion factor from the weighed biomass average method, total carbon storage of forest vegetation were estimated in the NFPP region and provincial level. The carbon storage and carbon density of the arbor forest were evaluated by origins, age groups, and dominant tree species (groups). The changes of total carbon storage of forest vegetation and carbon storage of arbor forest with time were quantified to clarify carbon sink (source) characteristics. The results showed that the total carbon storage of forest vegetation in the NFPP region in 6—9th CNFI was 2999 TgC, 3254 TgC, 3585 TgC, 4097 TgC, respectively, with average annual growth rates of 1.65%, 1.96%, and 2.70%. Carbon storage was concentrated in the regions of northeast and southwest of China, and Sichuan province had the highest carbon storage which accounted for more than 20% of the total amount of NFPP region in 6—9th CNFI. The arbor forest carbon storage was the main body of the forest carbon storage, which accounted for more than 80% of the total forest carbon storage in every inventory with little variation in the proportion. Further, the proportion of natural forest carbon storage in arbor forest decreased from 94.67% to 90.28%. The proportion of plantation forest was gradually increasing, but the carbon density was lower than half of natural forest in the 9th CNFI. Among different age groups, the middle-aged forest had the highest carbon storage, and near-mature forest had the fastest growth rate in carbon storage. The carbon density gradually increased from young-aged forest to over-mature forest and the tendency was the same in 4 periods. Pure forest carbon storage accounted for more than 60% that of arbor forest, and the carbon storage and carbon density of most tree species (groups) increased over time. In the 7—9th CNFI, the total carbon sequestration of forest vegetation in the NFPP region (current period relative to the previous period) were 255.33 TgC, 331.46 TgC, and 511.53 TgC, respectively. They contributed to the total forest carbon sink in China from 53.78% in the 8th CNFI to 67.46% in the 9th CNFI. In particular, arbor forest contributed 68.71% to the national arbor forest carbon sinks while natural forest in the NFPP region contributed 75.90% to arbor forest carbon sinks in the NFPP region. The arbor forest carbon sinks of each age group had relatively great variation with different CNFIs. The proportion of carbon sinks in young-aged forest and middle-aged forest increased significantly while near-mature forest and over-mature forest decreased. The order of carbon sinks in each age group in the 9th CNFI was middle-aged forest > near-mature forest > young-aged forest > mature forest > over-mature forest. The carbon sink (source) performance of every dominant tree species were different in different CNFIs. In general, the mixed forest had the largest proportion of carbon sinks. In the 9th CNFI, the contribution of mixed broad-leaf forest and mixed conifer-broadleaf forest to the carbon sink of arbor forest were 62.59% and 17.23%, respectively. In pure forest, cypress contributed the most to carbon sink, accounting for 5.43%. The total carbon storage of forest vegetation in the NFPP region had steadily increased over time. Arbor forest was the main body of total carbon storage and natural forest was the main source of carbon sinks. The natural forest protection enhances the carbon sink function of natural forest in China, and promotes the carbon sink function of plantation. The carbon sinks in the NFPP region will have great potential in the future.

Key Words: Natural Forest Protection Project; arbor forest; carbon storage; carbon sink; carbon source

1998 年长江和松花江流域的特大洪水,使人们认识到生态环境恶化和森林资源被过度消耗的结果,同年国家开始试点实施天然林资源保护工程,2000 年正式开始建设天保工程。天保工程建设第一期时间为 2000—2010 年,第二期时间为 2011—2020 年,旨在通过在长江上游和黄河上中游全面停止天然林商业性采伐,营造新的公益林,在东北内蒙古林区减少采伐量,同时管护好工程区的森林资源来恢复天然林和生态修复,促进经济社会的可持续发展。

森林碳汇是通过植树造林、森林保护等措施,利用绿色植物的光合作用吸收大气中的二氧化碳并将其固定到森林当中,在当前气候变化的背景下,是增加温室气体吸收,实现碳中和的行之有效的途径^[1],《巴黎协定》中明确了温室气体的汇和库,包括森林等,鼓励发展中国家通过养护、可持续管理森林,增强森林碳汇的作用^[2-3]。《全国森林经营规划》(2016—2050 年),首次把森林碳储量作为重要的指标列出;天保工程第二期工程提出了碳汇目标,即到 2020 年,天保工程第二期预期新增碳汇是 416 TgC(4.16 亿 t)^[4],因此,估算天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态,明确碳汇特征,不仅可以评价天保工程的实施效果,量化天保措施对全国碳汇的贡献,而且可以为更精准的天保措施提供技术支撑和数据支持。

多年来,国内外广泛开展了关于碳储量估算的研究。区域尺度碳储量估算主要有基于森林资源清查的生物量转换法、通量观测法、基于遥感的定量反演法等^[5-7]。国内外学者基于森林资源清查数据,广泛探索了关于清查数据、生物量和碳储量之间的直接或间接关系,逐渐引申出平均生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法等。李海奎等^[8]基于森林清查资料利用生物量经验回归估算出全国森林植被碳储量,并比较了 IPCC 法、生物量经验回归法和转换因子连续函数法的适用性和稳定性^[9];欧强新等^[10]基于决策树模型研究了马尾松生物量转换和扩展因子估算差异的来源,筛选出对其影响最为显著的林分特征因子;Wu 等^[11]利用生物量转换因子连续函数法估算天保工程区植被碳储量并分析时空变化和关键影响因素;基于涡度相关技术进行碳通量观测,成为碳汇(源)特征分析和评估的重要方法^[12-13];随着遥感技术与应用的发展,促进了大尺度区域估算森林碳储量的研究,例如,巫明焱等^[14]利用 Landsat 8 数据估算米亚罗自然保护区森林地上碳储量,Patil 等^[15]研究了结合地面调查和遥感技术估算碳储量的方法等。

1 研究区概况

研究区为整个天然林保护工程区。第一期天保工程区涉及到黄河上中游、长江上游、内蒙古、东北等森林资源丰富,承载着重点国有林区的 17 个省(自治区、直辖市)的 734 个县和 167 个森工局,林业用地总面积 12372 万 hm^2 ,天然林面积 5643 万 hm^2 ^[16],其中:黄河中上游包括山西、甘肃、青海、宁夏、内蒙古、陕西、河南 7 省(自治区、直辖市);长江上游包括西藏、云南、四川、重庆、贵州、湖北 6 省(自治区、直辖市);内蒙古东北等重点国有林区包括吉林、黑龙江、内蒙古、海南、新疆 5 省(自治区、直辖市)。天保工程建设第二期,省(自治区、直辖市)数量不变,新增了丹江口水库的 11 个县(区、市),其中湖北 7 个,河南 4 个。整个工程区覆盖我国东北、西北、西南地区(图 1),面积大,分布广。

2 数据与方法

2.1 数据

数据来源于第 6 次(1999—2003)、第 7 次(2004—2008)、第 8 次(2009—2013)和第 9 次(2014—2018)全国森林资源连续清查天保工程区的统计数据,由于天保工程区区划到县,因此只抽取这 17 个省份中有天保工程区划县(森工局)的样地数据进行研究。森林植被定义为乔木林、疏林地、散生木、四旁树、竹林和特种灌木林。作为森林资源的主体,乔木林分起源、龄组和优势树种在省级尺度上分别统计面积和蓄积量;疏林地按优势树种统计面积和蓄积;散生木和四旁树统计蓄积量;竹林统计面积及株数;灌木林统计面积。

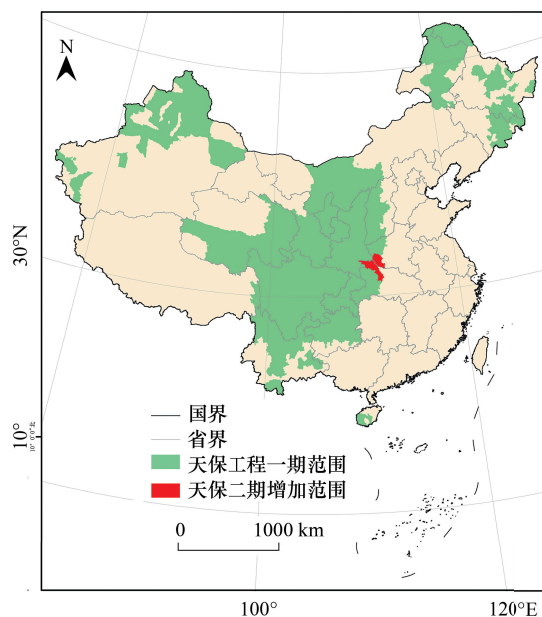


图 1 天保工程区分布图

Fig. 1 Distribution map of Natural Forest Protection Project (NFPP) region

2.2 方法

本研究森林资源碳储量包括地上部分和地下部分生物量碳储量,不包括死木碳储量,枯枝落叶层碳储量和土壤有机碳,基本估算方法兼容第6—9次全国森林植被碳储量的计算方法。

2.2.1 乔木林生物量

使用材积源方法中的生物量加权平均法^[8,17-21],其基本公式为:

$$B_1 = V \times \frac{\sum_{i=1}^n v_i \times \frac{\sum_{j=1}^{m_i} b_{ij}}{m_i}}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (1)$$

式中, B_1 为某省某一优势树种的生物量, V 为该省该优势树种的蓄积量; v_i 为该省该优势树种第*i*个样地的调查材积; b_{ij} 为该省该优势树种第*i*个样地第*j*个径阶的模型生物量; v_{ij} 为该省该优势树种第*i*个样地第*j*个径阶的模型材积,样地模型材积在兼容模型中是利用材积公式获得的,如果不存在兼容模型则利用二元材积公式 $v = a + b \times (D^2H)$ 计算(v 为模型材积, D 为胸径, H 为树高, a 和 b 为参数); m_i 为分省该优势树种第*i*个样地内径阶数; n 为分省该优势树种计算生物量的优势树种样地个数。

分省分优势树种的生物量模型,优先使用行业标准的生物量模型和碳计量参数^[22-34],然后是《中国森林植被生物量和碳储量评估》中模型^[35]。

2.2.2 疏林地、散生木和四旁树生物量

采用同省相同优势树种的一致的生物量转换因子。

2.2.3 竹林生物量

竹林生物量分省,按毛竹和其它竹分别计算,基本公式为:

$$B_2 = B \times N \quad (2)$$

式中, B_2 为某省某一类型竹林总生物量, B 为某类型单株竹生物量, N 为某类型竹总株数,其中 B 采用孙天任(1986)和《竹林经营碳汇项目方法学》中的模型,单株竹胸径采用径阶中值或全省加权平均胸径^[36]。

2.2.4 灌木林生物量

分省灌木林总生物量的计算公式为:

$$B_3 = b \times A \quad (3)$$

式中, B_3 为某省灌木林总生物量, b 为该省灌木林单位面积生物量, A 为该省灌木林总面积。其中关键因子 b 根据之前学者的研究和本省乔木林单位面积生物量综合考虑确定,按照保守的原则进行估算^[37-42]。

2.2.5 碳储量计算方法

对某一树种,碳储量和生物量之间只相差一个固定的转换系数,即含碳率。某省某一树种的碳储量 C 计算公式为:

$$C = c \times B \quad (4)$$

式中, B 为某省某一优势树种总生物量, c 为该树种的含碳率。其中 c 的选择对13个优势树种采用行业标准,其他树种采用计算公式: $c = \frac{4}{9} \times c_1 + \frac{5}{11} \times c_2 + \frac{41}{50} \times c_3$ (c_1 为纤维素含量, c_2 半纤维素含量, c_3 木质素含量)。

3 结果

3.1 总碳储量

天保工程区第6次至第9次全国森林资源连续清查期间的总碳储量分别为2999、3254、3585 TgC和4097 TgC(图2),期间年均增长率分别为1.65%、1.96%和2.70%,其中:乔木林碳储量分别为2439、2638、2948 TgC

和 3364 TgC, 年均增长率分别为 1.58%、2.25% 和 2.68%;灌木林碳储量分别为 233.05、268.33、295.72 TgC 和 317.86 TgC, 年均增长率为 2.86%、1.96% 和 1.45%;竹林碳储量分别为 87.08、103.16、93.07 TgC 和 144.72 TgC, 总体呈增加趋势;疏林地碳储量分别为 28.26、26.96、25.37 TgC 和 22.55 TgC, 总体呈下降状态, 年均减少分别为-0.94%、-1.20% 和-2.33%;散生木碳储量分别为 168.43、170.84、167.86 TgC 和 178.03 TgC, 相对稳定;四旁树碳储量分别为 42.98、46.74、55.36 TgC 和 69.59 TgC, 增长较快, 年均增长率分别为 1.69%、3.45% 和 4.68%。4 期各种森林植被碳储量占总碳储量比例均相对稳定, 其中:乔木林在 81.07%—82.22% 之间, 灌木林在 8.00% 左右;竹林在 3.00% 左右, 散生木在 5.00% 左右, 四旁树在 1.50% 左右, 疏林地均不足 1.00%。

表 1 列出了天保工程区 4 期总碳储量按地理分布(分省)的状况, 从中可以看到:随着时间的推移, 除西藏碳储量保持相对稳定外, 其他 16 个省(自治区、直辖市)的总碳储量均明显增加, 其中湖北省碳储量年均增长率 5.71%, 增速最高, 贵州、宁夏、山西、河南和重庆年均增长率均在 4.00% 以上, 分别为 5.09%、4.85%、4.63%、4.24% 和 4.20%。天保工程区总碳储量省级尺度上分布差异大, 以 9 次清查为例, 四川的碳储量占整个天保工程区总碳储量约 23.02%, 黑龙江、云南、内蒙古碳储量分别占天保工程区总量的 14.96%、14.02%、13.27%, 这 4 个省份的碳储量约占整个天保工程区总量的 65.26%, 其余 13 个省份仅占 34.74%, 其中西藏、海南和宁夏碳储量占比最小, 均不足 1%。

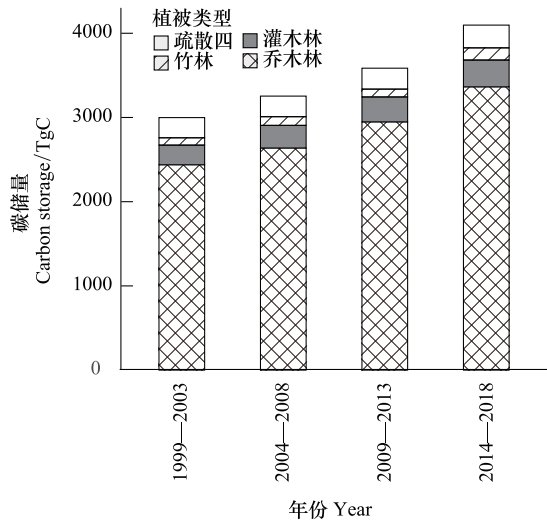


图 2 天保工程区总碳储量(分各种植被类型)
Fig.2 Total carbon storage of different vegetation types in NFPP region

表 1 天保工程区总碳储量的地理分布(分省)
Table 1 Total carbon storage in NFPP region at province level

省份 Province	第 6 次清查 6th CNFI		第 7 次清查 7th CNFI		第 8 次清查 8th CNFI		第 9 次清查 9th CNFI	
	碳储量 Carbon storage/TgC	%	碳储量 Carbon storage/TgC	%	碳储量 Carbon storage/TgC	%	碳储量 Carbon storage/TgC	%
全区 Total	2998.53	100.00	3253.86	100.00	3585.32	100.00	4096.85	100.00
甘肃	44.51	1.48	50.85	1.56	59.58	1.66	72.41	1.77
贵州	77.17	2.57	107.18	3.29	128.96	3.60	162.48	3.97
海南	23.01	0.77	23.96	0.74	27.56	0.77	32.26	0.79
河南	23.12	0.77	29.81	0.92	35.56	0.99	43.09	1.05
黑龙江	496.38	16.55	519.42	15.96	553.42	15.44	613.07	14.96
湖北	59.36	1.98	83.99	2.58	108.03	3.01	136.58	3.33
吉林	256.56	8.56	259.30	7.97	289.86	8.08	308.34	7.53
内蒙古	433.25	14.45	453.05	13.92	503.08	14.03	543.48	13.27
宁夏	3.80	0.13	5.17	0.16	6.60	0.18	7.73	0.19
青海	31.43	1.05	33.70	1.04	39.92	1.11	43.50	1.06
山西	32.07	1.07	38.81	1.19	49.87	1.39	63.28	1.54
陕西	197.12	6.57	222.02	6.82	259.54	7.24	293.53	7.16
四川	697.31	23.26	750.11	23.05	794.36	22.16	942.89	23.02
西藏	35.07	1.17	34.44	1.06	36.08	1.01	35.18	0.86
新疆	72.13	2.41	75.57	2.32	80.69	2.25	90.77	2.22
云南	443.91	14.80	480.19	14.76	508.76	14.19	574.26	14.02
重庆	72.32	2.41	86.28	2.65	103.44	2.89	133.99	3.27

CNFI: 森林资源连续清查 Chinese national forest inventory; NFPP: 天然林资源保护工程 Natural forest protection project

3.2 乔木林分起源、龄组和树种(组)的碳储量和碳密度

4 期清查,天然乔木林碳储量分别为 2308.72、2466.57、2721.10 TgC 和 3036.97 TgC,占同期全区乔木林的比例均超过 90%,总量增加,但占比下降;而人工林碳储量,总量和占比均上升,由于总乔木林碳储量的增加,虽然 9 次连清,人工林的碳储量是 6 次连清的 2.5 倍,但占比从仅 5.33%增加到 9.72%。天然林碳密度在 4 次连清中逐步上升,由 40.2 MgC/hm² 上升到 47.04 MgC/hm²,人工林碳密度呈先略微下降,然后快速上升的趋势,9 次连清时,碳密度为 22.32 MgC/hm²,但仍不到天然林的 50%(图 3)。

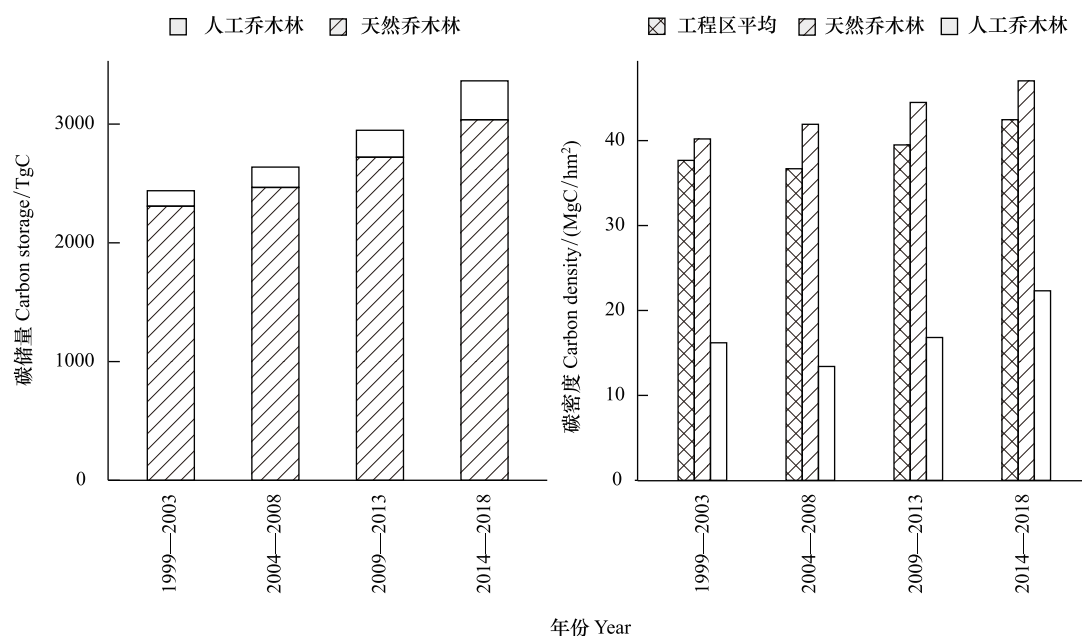


图3 全区乔木林按起源的碳储量和碳密度统计图

Fig.3 Carbon storage and density of arbor forest by origins in NFPP region

幼龄林到过熟林的 5 个龄组在 4 次连清中,碳储量均有明显增加(图 4),年均增长率分别为 2.70%、2.28%、2.91%、1.90%和 1.19%,其中近熟林增长最快,幼龄林、中龄林和近熟林碳储量增长速度均大于全区平均增长率(2.17%)。近 20 年来的 4 次清查中,近熟林占全区乔木林碳储量比重逐步上升,成熟林占比略微减少,过熟林碳储量占比减少明显,由 6 次清查的 19.21%降低到 9 次清查的 16.63%。9 次清查中,幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林分别占乔木林碳储量的 11.26%、29.61%、20.41%、22.08%、16.63%,中龄林碳储量占全区乔木林碳储量最多,幼龄林占比最少;6 次清查到第 7 次清查每个龄组碳密度均有所下降,其中近熟林碳密度降低 3.13 MgC/hm²,降幅最大,7 次清查至第 9 次清查过熟林碳密度保持稳定,其余龄组均上升(图 4),9 次清查时幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林碳密度分别为 19.07、37.73、50.69、61.14 MgC/hm²和 77.11 MgC/hm²;幼龄林到过熟林,碳密度逐渐上升,过熟林的碳密度最大,是幼龄林碳密度的 4 倍。

从 6 次清查到 9 次清查,林分优势树种的划分更为详细,例如:6 次清查,东北地区的三大硬阔树种水曲柳、胡桃楸和黄菠萝通称水胡黄,到 9 次清查时已详细区分。以 9 次清查为例:乔木林中碳储量混交林占比 36.03%,纯林 63.97%;碳储量最大的优势树种(组)分别是阔叶混、栎类、落叶松、针阔混、白桦、冷杉,这 6 个优势树种(组)的比例均超过乔木林总碳储量的 5.00%,其中阔叶混最高,超过 1/4,合计占比超过 2/3。纯林中栎类比例最高,为 11.83%,栎类、落叶松、白桦、冷杉这 4 个树种的总碳储量占乔木林总碳储量的 33.49%,占纯林的比例超过 50.00%,樟树、其他松类、木荷、枫香、赤松、泡桐、水胡黄、水杉、国外松、黄菠萝、相思、檫木、湿地松、楝树、黑松等 15 个树种(组)占全区碳储量均不到 0.1%,合计占比仅 0.58%。天保工程区乔木林平均碳密度在四次森林资源清查中分别为 37.67、36.17、39.49 MgC/hm²和 42.46 MgC/hm²,总体呈上升趋势。

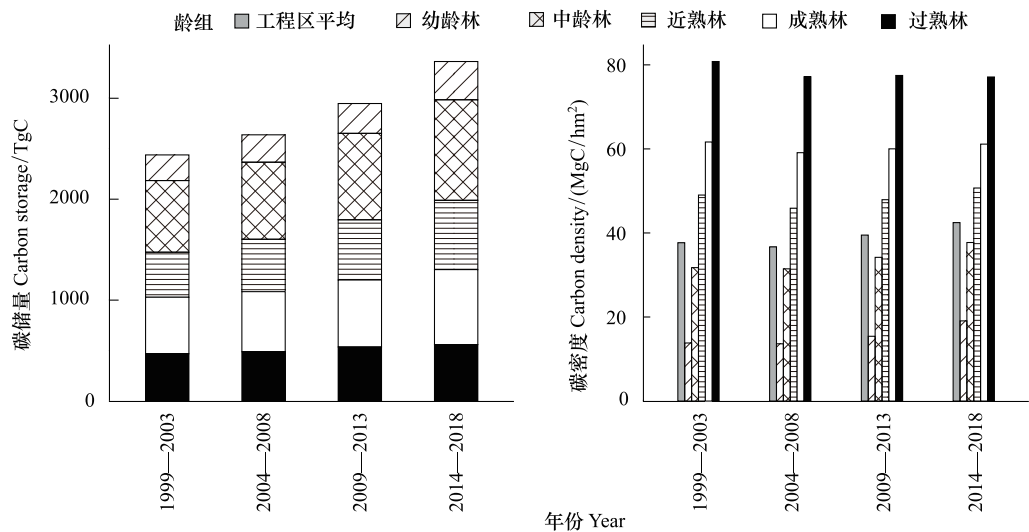


图 4 全区乔木林按龄组的碳储量和碳密度统计
Fig.4 Carbon storage and density of arbor forest by age groups in NFPP region

9 次清查中,碳密度最高的几个优势树种为赤松、冷杉、黄菠萝,其值为 119.35、86.84 MgC/hm²和 86.31 MgC/hm²,均超过平均碳密度的一倍;杨树、水杉、湿地松碳密度最低,仅为全区平均碳密度的 50%左右。表 2 列出了天保工程区乔木林分优势树种统计的碳储量和碳密度。

表 2 天保工程区乔木林分优势树种的碳储量和碳密度
Table 2 Carbon storage and density of arbor forest by tree species in NFPP region

优势树种 Dominant tree species	碳储量 Carbon storage/TgC				碳密度 Carbon density/(MgC/hm ²)			
	第 6 次 清查	第 7 次 清查	第 8 次 清查	第 9 次 清查	第 6 次 清查	第 7 次 清查	第 8 次 清查	第 9 次 清查
	6th CNFI	7th CNFI	8th CNFI	9th CNFI	6th CNFI	7th CNFI	8th CNFI	9th CNFI
合计 Total	2438.73	2637.83	2947.93	3364.10	37.67	36.17	39.49	42.46
冷杉 <i>Abies</i>	207.32	199.66	197.50	202.33	86.95	87.90	88.18	86.84
云杉 <i>Picea</i>	149.03	152.89	154.22	159.12	58.18	61.52	63.54	61.61
铁杉 <i>Tsuga</i>	14.76	15.46	15.22	13.88	69.05	71.73	74.37	80.04
油杉 <i>Keteleeria</i>	4.59	5.16	5.03	6.43	19.87	20.47	24.32	33.61
落叶松 <i>Larix</i>	245.08	253.55	260.50	284.93	28.34	29.27	31.13	33.57
红松 <i>Pinus Koraiensis</i>	9.41	7.04	8.98	9.26	41.16	42.21	49.40	56.66
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	23.92	24.86	26.33	29.48	65.76	63.86	67.37	72.29
赤松 <i>Pinus densiflora</i>	0.60	1.23	1.40	1.53	93.74	96.39	109.03	119.35
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	0.07	0.02	0.02	—	21.96	5.64	4.98	—
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	21.19	26.00	31.52	30.95	20.59	23.32	25.85	28.32
华山松 <i>Pinus armandii</i>	13.20	16.92	20.80	25.46	19.70	24.61	28.69	37.01
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	48.50	59.30	71.91	79.94	16.55	21.85	26.85	33.05
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	73.10	75.68	82.74	90.92	20.82	22.87	25.54	29.42
思茅松 <i>Pinus kesiya</i> var. <i>langbianensis</i>	7.30	9.25	8.75	7.85	38.98	45.12	44.45	45.44
高山松 <i>Pinus densata</i>	34.34	35.74	38.01	40.87	49.99	52.06	56.15	59.94
国外松 Foreign pine	—	0.85	0.14	0.65	—	32.60	21.98	77.62
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	—	0.13	0.53	0.31	—	8.87	19.30	12.06
其他松类 Other pines	—	1.20	3.67	3.11	—	23.44	42.20	55.14
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	22.04	28.77	36.52	42.52	13.95	19.15	21.59	25.43

续表

优势树种 Dominant tree species	碳储量 Carbon storage/TgC				碳密度 Carbon density/(MgC/hm ²)			
	第 6 次 清查 6th CNFI	第 7 次 清查 7th CNFI	第 8 次 清查 8th CNFI	第 9 次 清查 9th CNFI	第 6 次 清查 6th CNFI	第 7 次 清查 7th CNFI	第 8 次 清查 8th CNFI	第 9 次 清查 9th CNFI
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	5.45	8.18	8.94	18.11	27.87	25.87	21.32	29.38
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	0.21	0.65	0.65	1.01	22.11	39.97	19.24	22.29
柏木 <i>Cupressus</i>	59.71	70.08	89.55	109.93	27.16	31.99	35.00	42.55
栎类 <i>Quercus</i>	398.26	373.62	391.15	398.03	43.48	40.56	47.11	52.49
桦木 <i>Betula</i>	284.59	56.26	53.70	52.84	32.66	34.84	36.21	42.48
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	—	207.22	243.93	241.41	—	32.24	36.45	39.09
枫桦 <i>Betula costata</i>	0.14	2.41	3.96	5.70	31.89	49.14	46.43	28.46
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i> , 胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i> , 黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i>	20.02	5.20	—	1.08	50.15	65.70	—	84.09
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	—	2.96	3.05	6.34	—	53.98	52.94	78.23
胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	—	1.77	4.75	7.42	—	27.42	53.68	57.66
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i>	—	0.39	0.43	0.55	—	60.29	66.85	86.32
樟木 <i>Cinnamomum camphora</i>	1.50	1.05	1.37	3.17	35.89	29.75	37.11	25.22
楠木 <i>Phoebe</i>	3.11	1.20	3.55	3.85	60.22	46.28	47.23	53.46
榆树 <i>Ulmus</i>	—	3.30	8.23	6.05	—	26.95	38.08	29.64
木荷 <i>Schima superba</i>	—	1.91	2.57	3.01	—	131.82	75.98	77.70
枫香 <i>Liquidambar</i>	—	0.87	1.73	2.98	—	29.91	29.85	33.11
其他硬阔类 Other hard broad leaf	207.91	156.80	102.85	70.83	58.07	52.50	45.85	43.22
椴树 <i>Tilia</i>	27.50	21.73	20.53	14.57	53.37	51.69	63.29	74.77
檫木 <i>Sassafras</i>	0.27	0.25	0.16	0.34	27.38	40.66	16.56	35.13
杨树 <i>Populus</i>	71.26	75.70	50.84	62.37	25.92	27.65	23.22	23.90
柳树 <i>Salix</i>	—	4.50	5.58	6.99	—	23.97	27.66	37.58
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	0.89	0.63	0.53	1.35	22.11	23.04	14.18	30.16
桉树 <i>Eucalyptus</i>	0.94	1.73	5.44	10.71	13.45	9.05	13.89	27.13
相思 <i>Acacia</i>	—	0.08	0.20	0.40	—	13.12	28.09	55.84
楝树 <i>Melia azedarach</i>	—	0.02	0.97	0.08	—	2.13	30.04	26.24
其他软阔类 Other soft broad leaf	60.30	93.43	100.00	93.45	28.85	36.65	35.25	37.89
针叶混 Mixed coniferous	35.61	60.42	67.52	86.72	33.18	36.89	41.12	40.19
阔叶混 Mixed broad leaf forest	273.06	409.31	620.86	852.23	45.84	44.83	51.17	49.90
针阔混 Mixed conifer-broadleaf forest	113.56	162.48	191.13	273.01	43.05	40.83	45.89	43.42

3.3 碳汇/源及其特征

6 次清查到 9 次清查的 3 个间隔期,天保工程区新增碳储量分别为 255.33、331.46 TgC 和 511.53 TgC,表现为明确的碳汇功能,且碳汇能力不断增强,其中乔木林 9 次清查新增固碳量为第 7 次清查的 2 倍,四旁树为 3.7 倍;灌木林每次清查新增固碳量有所减少;散生木和竹林 9 次清查新增固碳量明显上升,超过 7 次清查新增固碳量的 3 倍,而这两类植被在 8 次清查表现为碳源(新增固碳量分别为-2.99、-10.09 TgC);疏林地每次清查新增固碳量都为负,分别为-1.30、-1.58、-2.82 TgC,疏林地排放的碳有上升的趋势,碳源特征明显。疏散四合计数新增固碳量增长明显。

乔木林和灌木林为天保工程区碳汇的主力,第 8 次清查后竹林对全区碳汇的贡献超过了灌木林。图 5 为全区碳汇/碳源统计图。

天保工程区乔木林在 3 个清查间隔中新增固碳量分别为 199.10、310.10 TgC 和 416.16 TgC。天然林和人

工林在 3 个清查间隔中,都有很强的固碳能力,固碳效率也越来越高,第 9 次清查新增固碳量为第 7 次清查新增固碳量的 2 倍,天然林碳汇年平均增长率为 7.18%,人工林为 9.29%,天然林碳储量大,每期固碳量多,增长速度略慢于人工林。天保工程区中,三次清查天然林新增固碳量占全区乔木林新增固碳量的 79.28%、82.08%、75.90%,是全区碳汇的主力,人工林固碳增长很快,对全区碳汇的贡献由 20.72%上升到 24.10%。图 6 为天保工程区乔木林碳汇/源按起源的分配统计图。

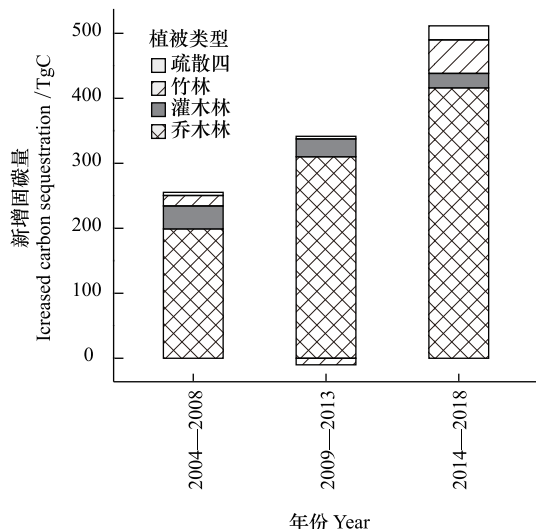


图 5 全区碳汇/源变化情况

Fig.5 Changes of carbon sink/source by forest vegetation types in NFPP region

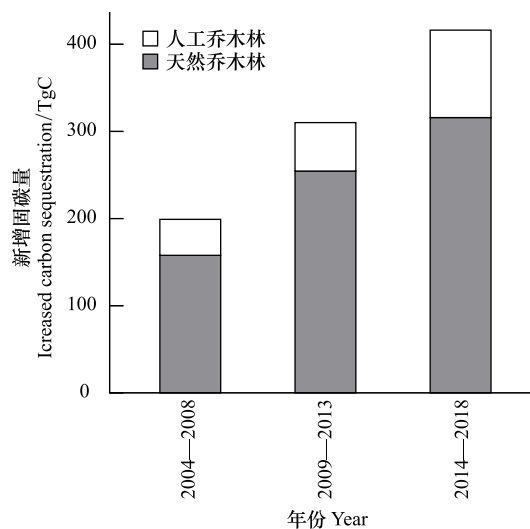


图 6 乔木林碳汇/源按起源分配情况

Fig.6 Carbon sink/source of arbor forest by origins in NFPP region

在 3 次清查间隔中,各个龄组都发挥了碳汇功能,除了过熟林在第 9 次清查新增固碳量较于前一次清查新增量有所降低,幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林每次清查新增固碳量都明显上升,说明碳汇能力提升。近 20 年来,中龄林和幼龄林碳汇效果显著,每期固碳效率有所提高,幼龄林对全区乔木林碳汇的贡献由 8.75% 增长到了 20.01%,中龄林对碳汇的贡献由 26.76% 增长至 33.66%;相比之下,近熟林、过熟林对碳汇贡献有所降低。第 7 次清查,近熟林新增固碳量对碳汇的贡献最大,占全区乔木林新增固碳量的 36.61%,而第 8 次、第 9 次清查显示全区乔木林碳汇贡献最大的是中龄林,占比分别为 29.95%、33.66%。图 7 为乔木林碳汇/源按龄组的分配情况统计图。

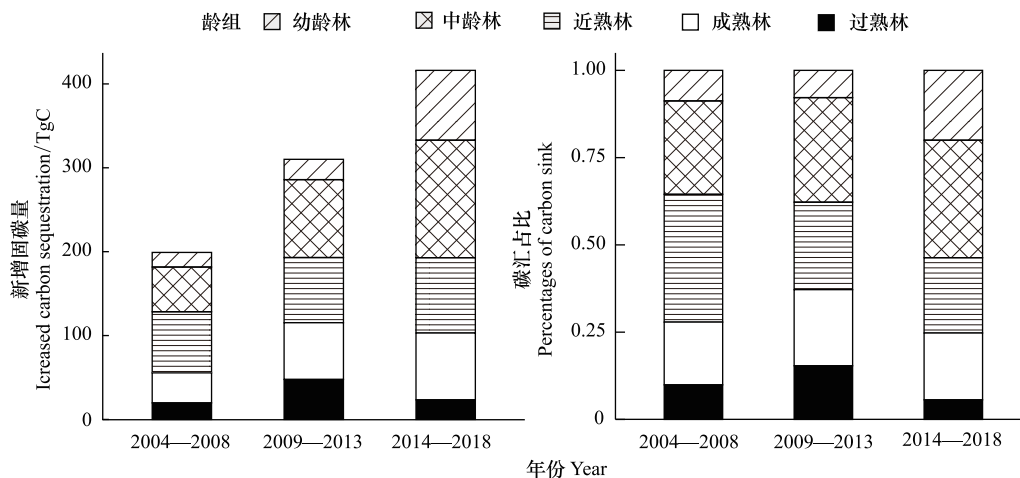


图 7 乔木林碳汇/源按龄组的分配情况

Fig.7 Carbon sink/source of arbor forest by age groups in NFPP region

表3为天保工程区乔木林碳汇/源按优势树种分布情况。表3显示:大部分树种每次清查间隔总固碳量大于0,且第9次清查新增固碳量较第7次清查新增固碳量有明显增长。阔叶混和针阔混第6次清查至第9次清查总新增固碳量为579.18、159.45 TgC,分别占全区乔木林总固碳量的62.59%、17.23%。柏木、落叶松、马尾松、杉木等树种固碳能力较强,每次清查间隔期都能保持稳定的固碳量,自第6次清查至第9次清查,柏木总新增固碳量为50.22 TgC,占天保工程区乔木林总新增固碳量的5.43%,落叶松总固碳量为39.86 TgC,占全区总固碳量的4.31%,马尾松为31.44 TgC,占全区3.4%,杉木为20.48 TgC,占全区2.21%。对于树组如其他硬阔类、其他软阔类、针阔混、阔叶混等,由于每次清查,每个省份(直辖市、自治区)对树种划分不统一,树组包含树种类别与数量有差别,因此碳汇/源特征变化较大,这也是导致其他硬阔类每次清查间隔期的固碳量为负的原因。

表3 全区乔木林碳汇/源按优势树种分布情况

Table 3 Carbon sink/source of arbor forest by tree species in NFPP region

优势树种 Dominant tree species	总固碳量 Total carbon sequestration (CS)/TgC	第7次新增固碳量 Increased CS of 7th CNFI/TgC	第8次新增固碳量 Increased CS of 8th CNFI/TgC	第9次新增固碳量 Increased CS of 9th CNFI/TgC
合计 Total	925.36	199.10	310.10	416.16
冷杉 <i>Abies</i>	-4.99	-7.66	-2.16	4.83
云杉 <i>Picea</i>	10.09	3.86	1.33	4.90
铁杉 <i>Tsuga</i>	-0.88	0.69	-0.23	-1.34
油杉 <i>Keteleeria</i>	1.84	0.57	-0.13	1.40
落叶松 <i>Larix</i>	39.86	8.47	6.95	24.43
红松 <i>Pinus Koraiensis</i>	-0.15	-2.37	1.93	0.29
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	5.56	0.94	1.47	3.15
赤松 <i>Pinus densiflora</i>	0.93	0.63	0.16	0.13
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	-0.07	-0.05	-2.1 * 10 ⁻³	-0.02
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	9.76	4.82	5.52	-0.57
华山松 <i>Pinus armandii</i>	12.26	3.71	3.89	4.66
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	31.44	10.80	12.60	8.03
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	17.82	2.58	7.06	8.18
思茅松 <i>Pinus kesiya</i> var. <i>langbianensis</i>	0.55	1.95	-0.50	-0.90
高山松 <i>Pinus densata</i>	6.53	1.41	2.27	2.85
国外松 Foreign pine	-0.20	—	-0.72	0.51
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	0.18	—	0.40	-0.22
其他松类 Other pines	1.91	—	2.47	-0.56
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	20.48	6.72	7.76	5.99
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	12.66	2.73	0.76	9.17
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	0.79	0.43	4.58 * 10 ⁻³	0.36
柏木 <i>Cupressus</i>	50.22	10.37	19.47	20.38
栎类 <i>Quercus</i>	-0.23	-24.64	17.54	6.88
桦木 <i>Betula</i>	-231.75	-228.33	-2.56	-0.86
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	34.20	—	36.71	-2.52
枫桦 <i>Betula costata</i>	5.56	2.28	1.55	1.74
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	3.37	—	0.09	3.29
胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	5.66	—	2.98	2.68
黄菠萝 <i>Phellodendrom amurense</i>	0.17	—	0.04	0.12
樟木 <i>Cinnamomum camphora</i>	1.67	-0.45	0.32	1.80
楠木 <i>Phoebe</i>	0.74	-1.91	2.34	0.30
榆树 <i>Ulmus</i>	2.75	—	4.93	-2.17

续表				
优势树种 Dominant tree species	总固碳量 Total carbon sequestration (CS)/TgC	第 7 次新增固碳量 Increased CS of 7th CNFI/TgC	第 8 次新增固碳量 Increased CS of 8th CNFI/TgC	第 9 次新增固碳量 Increased CS of 9th CNFI/TgC
木荷 <i>Schima superba</i>	1.10	—	0.66	0.44
枫香 <i>Liquidambar</i>	2.11	—	0.86	1.25
其他硬阔类 Other hard broad leaf	-137.08	-51.12	-53.95	-32.02
椴树 <i>Tilia</i>	-12.92	-5.77	-1.20	-5.96
檫木 <i>Sassafras</i>	0.08	-0.02	-0.09	0.18
杨树 <i>Populus</i>	-8.89	4.44	-24.86	11.53
柳树 <i>Salix</i>	6.99	4.50	1.08	1.41
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	0.72	—	-0.10	0.82
桉树 <i>Eucalyptus</i>	9.77	0.79	3.70	5.27
相思 <i>Acacia</i>	0.32	—	0.12	0.20
楝树 <i>Melia azedarach</i>	0.07	—	0.95	-0.89
其他软阔类 Other soft broad leaf	33.15	33.12	6.57	-6.54
针叶混 Mixed coniferous	51.12	24.82	7.10	19.20
阔叶混 Mixed broad leaf forest	579.18	136.25	211.55	231.37
针阔混 Mixed conifer-broadleaf forest	159.45	48.92	28.65	81.89

4 讨论

天然林资源保护工程实施以前,天然林资源的过度采伐和利用,导致我国森林面积增长缓慢,质量不高,生态环境建设形势严峻^[16];天保工程开始实施后,天然林得到有效保护。近二十年来,天保工程区总碳储量一直呈上升趋势,增长的幅度越来越大,期间年均增长率分别为 1.65%、1.96% 和 2.70%,增长速度越来越快,其原因是自天保工程实施以来,通过营造林方式,封山禁牧、休牧、生态移民等措施,有效地保护并增加了天然林资源^[43-44]。自第 7 次清查至第 9 次清查,天保工程区总碳储量占全国森林植被总碳储量的比重分别为 41.65%、42.54%、44.60%,天保工程区碳储量在全国所占比重呈上升趋势。第 8 次清查天保工程区碳汇占全国总碳汇的 53.78%,9 次清查时已占全国同期总碳汇的 67.46%,原因是天保工程区通过一系列措施保护和发展森林资源,而非天保工程区的森林资源承担着我国市场需求,增长较慢;9 次清查天保工程区新增固碳量 511.53 TgC,远超过天保工程二期碳汇目标 416 TgC。由此可见,天保工程区是我国森林碳汇稳定的压舱石和强大的推动力。

自 7 次清查至 9 次清查,天保工程区乔木林碳储量占全国乔木林碳储量的 39.59%、41.35%、44.41%,占比越来越高。8、9 两次清查,工程区内乔木林碳汇占全区碳汇的 86.15%,占全国同期总碳汇的 52.84%,其中工程区内天然林碳汇占工程区内乔木林碳汇的 78.54%,天保工程乔木林碳汇主要源于天然林。第 8 次清查天保工程区天然林碳汇占全国碳汇的 41.30%,第 9 次清查工程区占全国碳汇的 41.66%。方精云等^[45]研究了上世纪 70 年代至 1998 年碳储量增加主要由人工林造林导致,本研究得出 2004—2018 年,天然林碳汇贡献大于人工林,此结果反映出天然林保护对于碳汇的促进作用。

从地理分布来看,天保工程区中四川省的总碳储量最高,约占全区碳储量的 23%左右,一方面因为四川省碳密度高出全区水平 20%左右,另一方面是四川省森林面积大,其乔木林面积在天保工程区中仅次于黑龙江,这和长江上游地区天然林保护工程区的研究是一致的^[46]。四川省灌木林碳储量占全区碳储量 40%左右,竹林碳储量占全区的 55%以上,其中竹林增长速度很快,年均增长率为 5.19%。我国西南四川、云南、贵州三地碳储量约占整个天保工程区碳储量 41%,我国东北黑龙江、内蒙古、吉林三地碳储量约占全区 35%;碳储量在我国西南、东北分布比较集中。湖北、贵州、宁夏、山西、河南、重庆碳储量年均增长率高,均超过 4%,是全区年均增长率(2.10%)的 2 倍。六次清查以来,四川、云南、黑龙江、内蒙古固碳量最多,分别占全工程区的

22.36%、11.87%、10.62%和 10.04%;碳汇增长最快的是吉林和海南,而宁夏的碳汇效率有下降趋势。

天保工程区中天然林分布广泛,4 次连清中,天然林碳储量占全区乔木林总碳储量的 90%以上,碳密度是人工林的 2 倍以上,碳储量和碳密度在天然林保护工程实施后,都得到了增长,碳储量年均增长率分别为 1.33%、1.98%、2.22%,而碳密度的年均增长率则小于碳储量的年均增长率,分别为 0.84%、1.20%、1.12%,天然林面积年均增长率为 0.85%、0.64%、1.09%,除第 7—6 次清查间隔期以外,碳密度的增长率大于天然林面积增长率,碳密度和天然林面积的增长都促进了天然乔木林的碳汇表现,相比之下,碳密度的促进作用更大。张春华等^[6]研究黑龙江省森林碳储量变化,在天然林资源保护工程实施以前,黑龙江省森林表现为强碳源,主要原因是天然林面积的减少,天保工程实施后表现为碳汇,这与本研究结果是一致的。

20 年来的四次清查,人工乔木林碳储量占乔木林总碳储量分别为 5.33%、6.49%、7.69%和 9.72%,人工林碳汇的贡献占乔木林的 20.72%、17.92%和 24.10%,人工乔木林碳储量增长速度快,人工林碳储量年均增长率为 5.67%、5.78%和 7.60%,碳密度年均增长率为-3.71%、4.64%和 5.82%,除了第 7—6 次清查间隔碳密度有所下降,其余时期碳储量和碳密度都保持着较高的增长率。人工林面积年均增长率为 10.13%、0.96%和 1.68%,第 6 次至第 7 次清查间隔期间碳储量的提高完全依赖于面积的增长,之后面积年均增长速度下降,碳密度增长速度上升,此时碳密度对人工林碳汇的推动作用更加明显。

幼龄林、中龄林和近熟林碳储量的快速增长,从侧面说明了营造林方式有效推动了森林碳汇。近 20 年来,天保工程区乔木林碳密度稳定提升,其中幼龄林、中龄林碳密度明显提升,近熟林、成熟林碳密度比较稳定,过熟林碳密度略有下降;整体而言,碳密度随着林龄的增加逐渐增大,这和之前学者对于东北天然林保护区碳储量的研究是一致的^[47],不过全区幼龄林碳储量占乔木林总碳储量比重有所提升。由图 7 可以看出,幼龄林和中龄林对碳汇的贡献越来越大,7 次清查之后,中龄林取代近熟林成为碳汇贡献最大的龄组,幼龄林碳汇增强主要源于碳密度的快速提高,中龄林主要源于面积和碳密度的共同增长。

落叶松、马尾松、杉树、柏木等碳储量大,碳汇作用都较强,碳密度增长较快。由于每次森林资源连续清查每个地区关于优势树种的分类不统一,还有一些树种的碳汇/源特征无法表现。

天保工程区灌木林和竹林对碳汇贡献不容忽视。近 20 年来,灌木林碳储量年均增长率为 2.09%,对全区碳汇的贡献为 7.72%,从 7 次清查新增固碳量 35.28 TgC 至 9 次清查新增固碳量 22.14 TgC,灌木林的碳汇效率呈下降趋势。近 20 年来,竹林碳储量年均增长率为 3.44%,由第 6 次清查 87.08 TgC 增长至 9 次清查 144.72 TgC,竹林对全区碳汇的贡献为 5.25%;竹林作为一种特殊的森林资源,竹林的生态、经济价值都很高,我国竹林面积每年以 3%的速度增长,竹林的碳汇作用将会越来越重要^[48-49]。

5 结论

天保工程区碳储量集中分布于我国东北和西南两大区域,碳储量超过全区的 70%;乔木林碳储量占全区碳储量的 80%以上,碳汇占全区 75%以上,乔木林是全区碳汇的主体,天然林碳汇年均增长率达到 4%以上,碳汇作用明显。天保工程区碳汇对全国森林植被总碳汇量的贡献由 8 次连清的 53.78%上升到 9 次的 67.46%,对全国森林植被碳汇的贡献巨大,且仍有潜力,但省际间分布不平衡;森林碳密度稳定上升,森林质量的提高是天然林碳汇增加的主要因素,人工林的碳汇作用也开始显现,但碳密度仍不足天然林碳密度的 50%,碳汇潜力较大。

参考文献 (References):

- [1] 曹吉鑫,田赞,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.
- [2] Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [3] 巢清尘,张永香,高翔,王谋. 巴黎协定——全球气候治理的新起点. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 61-67.
- [4] 刘永红,倪巍. 天保工程二期政策及相关问题解读. 林业经济, 2011, (9): 45-50.
- [5] Liu W, Zhang X L, Ma J. Application of remote-sensing technology to forest carbon storage estimate//Proceedings of 2011 International Conference

- on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing, China; IEEE, 2011; 3858-3860.
- [6] 张春华, 王莉媛, 宋茜薇, 陈晓凤, 高慧, 王希群. 1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4678-4686.
- [7] 马学威, 熊康宁, 张俞, 赖佳丽, 张仕豪, 季传泽. 森林生态系统碳储量研究进展与展望. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 62-72.
- [8] 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. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [9] 李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较. 林业科学, 2012, 48(5): 44-52.
- [10] 欧强新, 李海奎, 雷相东, 杨英. 基于清查数据的福建省马尾松生物量转换和扩展因子估算差异解析——3 种集成学习决策树模型的比较. 应用生态学报, 2018, 29(6): 2007-2016.
- [11] Wu S N, Li J Q, Zhou W M, Lewis B J, Yu D P, Zhou L, Jiang L H, Dai L M. A statistical analysis of spatiotemporal variations and determinant factors of forest carbon storage under China's Natural Forest Protection Program. Journal of Forestry Research, 2018, 29(2): 415-424.
- [12] 纪小芳, 鲁建兵, 杨军, 姜姜, 王丹, 何雪凯, 方万力. 凤阳山针阔混交林碳通量变化特征及其影响因子. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 49-55.
- [13] 王杰帅. 基于涡度法的西南丘陵区森林碳通量观测研究——以重庆缙云山为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [14] 巫明焱, 董光, 王艺积, 熊瑞东, 李悦, 程武学, 付志玺, 范曙峰. 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算. 生态学报, 2020, 40(2): 621-628.
- [15] Patil V, Singh A, Naik N, Unnikrishnan S. Estimation of mangrove carbon stocks by applying remote sensing and GIS techniques. Wetlands, 2015, 35(4): 695-707.
- [16] 庄作峰. 中国天然林资源保护工程——世纪之交的重大生态工程. 世界林业研究, 2001, 14(3): 47-54.
- [17] Brandeis T J, Delaney M, Parresol B R, Royer L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. Forest Ecology and Management, 2006, 233(1): 133-142.
- [18] Djomo A N, Ibrahima A, Saborowski J, Gravenhorst G. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. Forest Ecology and Management, 2010, 260(10): 1873-1885.
- [19] Fournier R A, Luther J E, Guindon L, Lambert M C, Piercey D, Hall R J, Wulder M A. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information; test cases in Newfoundland and Quebec. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(10): 1846-1863.
- [20] 薛春泉, 徐期瑚, 雷渊才, 李海奎, 等. 广东省阔叶林生物量模型及碳计量. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [21] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 孙文娟, 胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. 中国基础科学, 2015, 17(3): 20-25.
- [22] 国家林业局. LY/T 2655—2016 立木生物量模型及碳计量参数——云杉. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [23] 国家林业局. LY/T 2654—2016 立木生物量模型及碳计量参数——落叶松. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [24] 国家林业局. LY/T 2659—2016 立木生物量模型及碳计量参数——桦树. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [25] 国家林业局. LY/T 2661—2016 立木生物量模型及碳计量参数——枫香. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [26] 国家林业局. LY/T 2660—2016 立木生物量模型及碳计量参数——木荷. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [27] 国家林业局. LY/T 2656—2016 立木生物量模型及碳计量参数——冷杉. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [28] 国家林业局. LY/T 2658—2016 立木生物量模型及碳计量参数——栎树. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [29] 国家林业局. LY/T 2657—2016 立木生物量模型及碳计量参数——柳杉. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [30] 国家林业局. LY/T 2260—2014 立木生物量模型及碳计量参数——油松. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [31] 国家林业局. LY/T 2261—2014 立木生物量模型及碳计量参数——湿地松. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [32] 国家林业局. LY/T 2262—2014 立木生物量模型及碳计量参数——云南松. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [33] 国家林业局. LY/T 2263—2014 立木生物量模型及碳计量参数——马尾松. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [34] 国家林业局. LY/T 2264—2014 立木生物量模型及碳计量参数——杉木. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [35] 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.
- [36] 孙天任, 唐礼俊, 魏泽长, 武大字, 王希荣, 张德惠, 刘年贵. 水竹(*Phyllostachys heteroclada*)人工林生物量结构的研究. 植物生态学报, 1986, 10(3): 190-198.
- [37] 万里强, 李向林, 苏加楷, 白静仁. 长江三峡地区灌木生物量及产量估测模型. 草业科学, 2001, 18(5): 5-10, 15-15.
- [38] 陈遐林, 马钦彦, 康峰峰, 曹文强, 张国华, 陈宗伟. 山西太岳山典型灌木林生物量及生产力研究. 林业科学研究, 2002, 15(3): 304-309.
- [39] 刘国华, 马克明, 傅伯杰, 关文彬, 康永祥, 周建云, 刘世梁. 岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究. 生态学报, 2003, 23(9): 1757-1764.
- [40] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰. 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544.
- [41] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. 生态学报, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [42] 郑绍伟, 唐敏, 邹俊辉, 慕长龙. 灌木群落及生物量研究综述. 成都大学学报: 自然科学版, 2007, 26(3): 189-192.
- [43] 洪加凤, 梅浩, 戴前石. 天然林保护工程中森林管护存在的问题及对策. 中南林业调查规划, 2011, 30(4): 15-17.
- [44] 王春梅, 王汝南, 简照兰. 提高碳汇潜力: 量化树种和造林模式对碳储量的影响. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2501-2505.
- [45] 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.
- [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(Z1): 221-228.
- [47] 魏亚伟, 周旺明, 于大炮, 周莉, 方向民, 赵伟, 包也, 孟莹莹, 代力民. 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量. 生态学报, 2014, 34(20): 5696-5705.
- [48] 武金翠, 周军, 张宇, 余晓燕, 石雷, 漆良华. 毛竹林固碳增汇价值的动态变化: 以福建省为例. 林业科学, 2020, 56(4): 181-187.
- [49] 陈茂铨, 金晓春, 吴林森, 陈伟祥, 柴红玲. 竹林碳汇功能及其影响因子研究进展. 竹子研究汇刊, 2010, 29(3): 5-9.