

DOI: 10.5846/stxb201807081487

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(9): - .

Liu L, Wang Y F, Yue F X, Li D, Zhao W. Dynamic of forest vegetation carbon storage in Henan Province based on forest inventory data. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化

刘 领¹, 王艳芳^{1,2,*}, 悦飞雪¹, 李 冬¹, 赵 威¹

¹ 河南科技大学农学院, 洛阳 471023

² 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 利用 1994—1998 年、1999—2003 年、2004—2008 年、2009—2013 年河南省 4 期森林资源清查数据, 运用生物量转换因子连续函数法和平均生物量法, 估算了 1998—2013 年河南省森林植被的碳储量和碳密度变化。研究表明, 河南省森林植被碳储量由 1998 年的 45.57 Tg 增加到 2013 年的 107.98 Tg, 年均碳汇量为 4.16 Tg/a。乔木林碳储量和碳密度分别由 1998 年的 33.54 Tg 和 22.39 Mg/hm² 增加到 2013 年的 97.11 Tg 和 31.80 Mg/hm²。乔木林碳储量在所有植被类型中占主体, 4 个森林清查时期乔木林碳储量占森林植被总碳储量的比例分别为 73.60%、79.22%、85.63% 和 89.93%。2013 年森林清查时, 乔木林中杨树和栎类碳储量最大, 分别占总碳储量的 37.61% 和 25.22%, 各龄组乔木林碳密度大小顺序依次为成熟林>近熟林>中龄林>过熟林>幼龄林。阔叶林面积、碳储量、碳密度均高于针叶林, 阔叶林是河南省森林碳汇的主要贡献者。人工林面积、碳储量、碳密度增加幅度都要高于天然林, 人工林碳储量由 1998 年的 9.62 Tg 增加到 2013 年的 55.67 Tg, 占乔木林碳储量总增量的 77.15%, 人工林碳密度由 1998 年的 17.86 Mg/hm² 提高到 2013 年的 32.01 Mg/hm², 人工林在河南省森林碳汇中逐步发挥重要的作用, 逐渐成为河南省森林碳汇的主体, 随着人工林生长为具有较高碳密度的成熟林, 河南省乔木林将具有较大的碳汇潜力。

关键词: 森林; 碳储量; 碳密度; 河南省

Dynamic of forest vegetation carbon storage in Henan Province based on forest inventory data

LIU Ling¹, WANG Yanfang^{1,2,*}, YUE Feixue¹, LI Dong¹, ZHAO Wei¹

¹ College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

² State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Based on the forest resources inventory data of 1994—1998, 1999—2003, 2004—2008, and 2009—2013 in Henan Province, the dynamic changes in forest vegetation carbon storage and density between 1998 and 2013 were estimated by using the continuous biomass expansion factor method and average biomass method. The results showed that the carbon storage of forest vegetation in the Henan Province increased from 45.57 Tg in 1998 to 107.98 Tg in 2013, with an annual carbon sink of 4.16 Tg year⁻¹. The carbon storage and density of arbor forests increased from 33.54 Tg and 22.39 Mg hm⁻² in 1998 to 97.11 Tg and 31.80 Mg hm⁻² in 2013, respectively. The carbon storage of arbor forests comprised the largest proportion of storage for all vegetation types; the proportion of carbon storage of arbor forests to total carbon storage of forest vegetation in the four forest inventory periods was 73.60%, 79.22%, 85.63%, and 89.93%, respectively. In 2013, *Populus* and *Quercus* had the largest carbon storage, accounting for 37.61% and 25.22% of the total carbon storage in arbor forests, respectively. The carbon density of arbor forests in each age group was ranked in the following order: mature forest

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700367); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2016GGJS-062); 河南科技大学学科提升振兴 A 计划项目(13660001, 13660002); 河南科技大学博士科研启动基金(4024-13480081)

收稿日期: 2018-07-08; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyfll977@126.com

> premature forest > middle-aged forest > over-mature forest > young-aged forest. The area, carbon storage and carbon density of broad-leaved forests were higher than those of coniferous forests, and broad-leaved forests were the main contributor to the forest carbon sink in Henan Province. The area, carbon storage and carbon density of the planted forests increased more than the natural forests. The carbon storage of planted forests increased from 9.62 Tg in 1998 to 55.67 Tg in 2013, accounting for 77.15% of the total increment of carbon storage in arbor forests. The carbon density of planted forests increased from 17.86 Mg hm⁻² in 1998 to 32.01 Mg hm⁻² in 2013. The importance of the role of planted forests in the forest carbon sink of Henan Province is gradually emerging. As the planted forests grow into mature forest with a high carbon density, the arbor forests in Henan Province will have greater carbon sequestration potential.

Key Words: forest; carbon storage; carbon density; Henan Province

森林作为陆地生态系统的主体,在维持全球碳平衡和保护生态环境方面发挥着重要的作用,相关研究表明,森林碳储量占陆地植被碳储量的 80%—90%,森林植被每年固定的碳约占整个陆地生态系统的三分之一^[1-3],增加森林面积成为减缓气候变化的有效手段。随着我国改革开放和工业发展,二氧化碳排放有较大幅度增加。20 世纪 90 年代以来,为了遏制生态环境的恶化,我国政府大力推行了一系列诸如退耕还林工程、天然林保护工程等生态恢复工程,这些工程的实施势必引起森林面积的增加和森林生态系统碳储量的提高,从而产生良好的生态效益。

截止目前,许多科学家在全球、国家和一些典型区域尺度上研究了森林生态系统碳库^[4-8]。同时,我国一些学者针对全国^[9-12]和我国典型地区^[13-19]森林碳储量、碳密度和时空分布特征进行了研究,这些研究大多是基于森林清查资料和样地调查进行的森林碳汇能力评估。在国家和省级区域尺度上研究同一省区森林植被碳汇能力存在差异,大多省区在国家尺度下的估算结果明显低于省域尺度^[20],为了获得较为准确的我国森林植被碳储量、碳密度数据,应就省级区域尺度对森林植被碳储量和碳密度进行详细估算。

根据河南省第八次森林资源清查结果,河南省森林面积为 359.07×10⁴ hm²,森林蓄积为 17094.56×10⁴ m³,森林覆盖率为 21.50%。目前,对于河南省森林碳储量的研究较少^[21-22],且为 2003 年时的森林碳储量数据,对于 2003 年后特别是退耕还林工程实施以来河南省森林碳储量的变化缺乏研究。河南省位于黄河中下游,是中华文明的发源地,近年来高度重视森林植被的恢复,特别是 20 世纪 90 年代末实施的退耕还林工程,通过近 20 年的实施,森林植被面积、覆盖度得到了提升,本文通过对 1994—2013 年河南省不同森林类型,不同林龄、不同森林起源的碳储量和碳密度研究,了解河南省森林植被碳储量现状和碳汇动态变化,并为全国森林植被碳汇提供基础数据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

河南省(31°23′—36°22′ N, 110°21′—116°39′ E),土地总面积 16.70×10⁴ km²,约占全国土地总面积的 1.74%。河南省地跨暖温带和北亚热带地区,年均气温在 14℃左右,年均降水量在 600—1200 mm,年均相对湿度为 65%—77%,年均日照时数为 2000—2600 h。全省地貌较为复杂,山地、丘陵、平原、盆地均有发育,主要土壤类型有潮土、棕壤、褐土、黄褐土、砂姜黑土。

1.2 数据来源

森林资源清查是国家掌握森林资源状况,调整林业政策的依据,国家每 5 年要对森林资源进行清查,本研究采用河南省第五期(1994—1998 年);第六期(1999—2003 年);第七期(2004—2008 年);第八期(2009—2013 年)森林清查资料,按照我国森林资源清查资料的划分,森林包括乔木林、经济林和竹林三类,根据方精云等^[9]的研究结果,本文也将疏林、灌木林列入研究范畴。森林清查资料主要包括不同森林类型(乔木林、经济林、竹林、疏林、灌木林)的面积和蓄积量信息,乔木林优势树种不同林龄(幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、

过熟林)、不同森林类型(针叶林和阔叶林),不同林分起源(天然林和人工林)的面积和蓄积信息。河南省不同森林类型面积和蓄积量统计见表 1。

表 1 不同森林资源清查时期、不同植被类型面积和蓄积量
Table 1 Area and volume of various vegetation types in different forest inventory periods

时期 Period	乔木林 Arbor forest		疏林 Open forest		竹林面积 Bamboo forest	经济林面积 Economic forest	灌木林面积 Shrub forest
	面积 Area/ (10 ⁴ hm ²)	蓄积 Volume/ (10 ⁴ m ³)	面积 Area/ (10 ⁴ hm ²)	蓄积 Volume/ (10 ⁴ m ³)	area/(10 ⁴ hm ²)	area/(10 ⁴ hm ²)	area/(10 ⁴ hm ²)
1994—1998		5258.50	13.40	102.09	1.94	57.30	57.78
1999—2003	197.72	8404.64	9.03	80.91	1.78	70.80	59.83
2004—2008	279.51	12862.83	6.44	68.98	2.10	51.13	80.97
2009—2013	305.36	17094.56	3.57	38.59	2.74	50.97	57.74

1.3 研究方法

1.3.1 乔木林碳储量估算

某一森林类型(树种)的生物量(B)乘以含碳量(CF)得到碳储量,一些研究表明,不同森林类型(树种)生物量(B)和蓄积量(v)之间具有良好的线性回归关系,本研究利用生物量转换因子连续函数法^[3]来计算不同树种的生物量,公式为:

$$B = aV + b$$

式中, B 和 V 为某一树种(组)的单位面积生物量(Mg/hm^2)和蓄积量(m^3/hm^2), a 和 b 为将不同树种(组)的蓄积量转换为生物量的参数。

对于上式中蓄积量转换为生物量的参数 a 、 b 取值多采用适合本地的数值,若当地没有进行专门的研究,则可采用相似地区的数值或者采用 Fang 等^[3]拟合的不同森林类型(树种)的生物量与蓄积量之间的转换参数。然而,目前有研究表明,Fang 等^[3]拟合的线性关系存在林龄偏小和样地数量少的不足,导致估算结果的不确定性较大^[23]。Zhang 等^[24]基于 3543 个实测生物量样地数据改进了全国 30 种主要森林类型的生物量与蓄积量转换参数。杨树(*Populus* spp.)、泡桐(*Paulownia*)、落叶松(*Larix* spp.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)蓄积量和生物量的关系在河南省已经进行了研究^[24-27],我们采用现有参数对这些树种进行估算,另外,其他树种转换参数采用 Zhang 等^[24]研究结果,提高计算结果的可信度。不同树种的碳含量(CF)来自文献资料^[25]。表 2 列出了本研究中采用的蓄积量与生物量的转换参数及不同树种的碳含量。

1.3.2 经济林、竹林碳储量估算

本研究中,利用平均生物量密度乘以面积来计算不同森林清查时期河南省经济林的生物量,根据方精云等^[9]的研究结果,本研究中经济林平均生物量密度取值 $23.7 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。

利用竹子的平均生物量密度乘以竹林面积来估算竹林的生物量,河南省森林清查资料中只给出了毛竹和其他类竹子的面积,Guo 等^[12]研究我国毛竹和其他竹子的平均生物量密度分别为 $81.9 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 和 $53.1 \text{ Mg}/\text{hm}^2$,本研究利用 Guo 等^[12]的平均生物量密度结果来估算不同森林清查时期河南省竹林的生物量,经济林、竹林含碳系数采用国际上普遍使用的生物量与碳的换算系数 0.50 来进行估算。

1.3.3 疏林、灌木林碳储量估算

方精云等^[9]将全国的疏林、灌木林分为秦岭淮河以南地区、秦岭淮河以北的东部(包括东北、华北)和西北地区(包括甘肃、青海、宁夏和新疆)3 个区域,平均生物量分别取值 19.76 、 $13.14 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 和 $13.9 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。河南省大部分地区位于秦岭淮河以北地区,因此取平均生物量 $13.14 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 进行近似估算,疏林和灌木林的总生物量由平均生物量乘以总面积求得,疏林、灌木林的含碳系数取 0.50。由于疏林和灌木林面积、蓄积在整个森林植被中所占比例较小,使用该方法估算是可行的。

表 2 优势树种生物量转换参数和碳含量

Table 2 Biomass conversion parameter and carbon content of dominant tree species

优势树种 Dominant tree species	a	b	R ²	参考文献 References	碳含量 CF Carbon fraction
柏木 <i>Cupressus</i> sp.	0.4904	30.4270	0.96	[24]	0.5034
落叶松 <i>Larix</i> spp.	0.5442	16.1235	1.00	[26]	0.5211
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.7709	8.8631	0.93	[24]	0.5207
火炬松 <i>Pinus taeda</i>	0.8136	7.0371	0.98	[24]	0.5361
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.6632	7.2656	0.79	[24]	0.4596
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	0.6217	12.9600	0.90	[24]	0.5146
华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.5856	18.7435	0.91	[25]	0.5225
其他松类和针叶树种 Other pines and conifer forests	0.5168	33.2378	0.94	[25]	0.5101
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.5371	11.9858	1.00	[27]	0.5201
栎类 <i>Quercus</i> spp.	0.7848	16.7150	0.95	[24]	0.5004
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.7564	8.31030	0.98	[24]	0.5161
硬阔类 Hardwood forests	0.8918	28.4410	0.81	[24]	0.4834
杨树 <i>Populus</i> spp.	0.9810	0.0040	0.99	[28]	0.4956
泡桐 <i>Paulownia</i>	0.8956	0.0048	0.99	[29]	0.4695
软阔类 Softwood forests	0.8918	28.4410	0.81	[24]	0.4956
针叶混 Mixed conifer forests	0.7442	26.8060	0.70	[24]	0.5101
阔叶混 Mixed broadleaf forests	0.7393	43.2100	0.73	[24]	0.4900
针阔混 Mixed conifer and broadleaf forests	0.4385	52.9050	0.72	[24]	0.4978

2 结果与分析

2.1 不同植被类型的碳储量和碳密度

由表 3 可知,河南省森林碳储量由 1998 年森林清查时期的 45.57 Tg 增加到 2013 年森林清查时期的 107.98 Tg,增量为 62.41 Tg,年均碳汇量为 4.161 Tg/a,总体来说,河南省森林碳储量呈增加趋势,碳汇能力逐渐增强。不同时期和不同植被类型的碳储量存在较大差异。从 1998 年到 2013 年森林清查时,作为森林植被主体的乔木林碳储量和碳密度均呈增加趋势,乔木林碳储量在所有植被类型中占绝对优势,1998 年、2003 年、2008 年和 2013 年乔木林碳储量占森林植被总碳储量的比例分别为 73.60%、79.22%、85.63%和 89.93%,碳密度由 1998 年的 22.39 Mg/hm²增加到 2013 年的 31.80 Mg/hm²,年平均碳汇量为 4.238 Tg/a。经济林碳储量在 2003 年最高,为 8.39 Tg,年平均碳汇量为-0.051 Tg/a,碳储量占森林植被总碳储量的 5.58%—14.90%;竹林、疏林、灌木林碳储量较低,分别占森林植被碳储量的 0.73%—1.23%、0.21%—1.93%、3.51%—8.34%。可见乔木林在固碳释氧、维持区域的碳平衡、减少大气中 CO₂等温室气体浓度上升方面发挥着重要的作用。

2.2 不同林龄乔木林碳储量与碳密度

由图 1 所示,不同森林清查时期河南省幼龄林、中龄林的面积和碳储量均最大,幼龄林面积占乔木林面积的 49.02%—69.39%,中龄林面积占乔木林面积的 21.99%—34.00%,河南省幼龄林和中龄林面积占乔木林总面积的 83.01%—91.38%,碳储量占乔木林总碳储量的 76.59%—83.24%。特别是在 2003—2008 年期间,幼龄林面积和碳储量大幅度提高,2008 年森林清查时,幼龄林面积较 2003 年提高了 73.19%,幼龄林碳储量较 2003 年提高了 56.05%。中龄林碳储量和碳密度均在 2013 年森林清查时最大,分别为 2008 年森林清查时中龄林碳储量的 3.15 倍和中龄林碳密度的 3.96 倍。

1998—2013 年,不同林龄、不同森林清查时期乔木林的碳密度存在差异,总体来说,幼龄林碳密度在所有清查期均最小,过熟林碳密度在 2003 年和 2008 年高于近熟林和成熟林碳密度,其他清查期均低于近熟林和

成熟林,2013 年各龄组乔木林碳密度大小顺序依次为成熟林>近熟林>中龄林>过熟林>幼龄林(图 1)。过熟林碳密度降低幅度较大,仅高于幼龄林,可能是由于 2008—2013 年期间过熟林遭到了破坏,导致林分质量下降,单位面积蓄积量大幅度下降,造成过熟林碳密度下降。随着幼龄林生长为具有较高碳密度近熟林和成熟林,河南省森林将具有较强的碳汇潜力。

表 3 不同植被类型碳储量和碳汇

Table 3 Carbon storage and carbon sink under different forest types							
时期 Period	整个森林 All forests		乔木林 Arbor forests			经济林 Economic forests	
	碳储量 Carbon storage/Tg	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)	碳储量 Carbon storage/Tg	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)
1998	45.57		33.54	22.39		6.79	
2003	64.62	3.810	51.19	25.89	3.530	8.39	0.320
2008	86.45	4.366	74.03	26.49	4.568	6.06	-0.466
2013	107.98	4.306	97.11	31.80	4.616	6.03	-0.006
1998—2013		4.161			4.238		-0.051

时期 Period	竹林 Bamboo forests		疏林 Open forests		灌木林 Shrub forests	
	碳储量 Carbon storage/Tg	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)	碳储量 Carbon storage/Tg	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)	碳储量 Carbon storage/Tg	年均碳汇量 Average annual carbon sink/ (Tg/a)
1998	0.56		0.88		3.80	
2003	0.52	-0.008	0.59	-0.058	3.93	0.026
2008	0.63	0.022	0.42	-0.034	5.31	0.276
2013	0.82	0.038	0.23	-0.038	3.79	-0.304
1998—2013		0.017		-0.043		-0.001

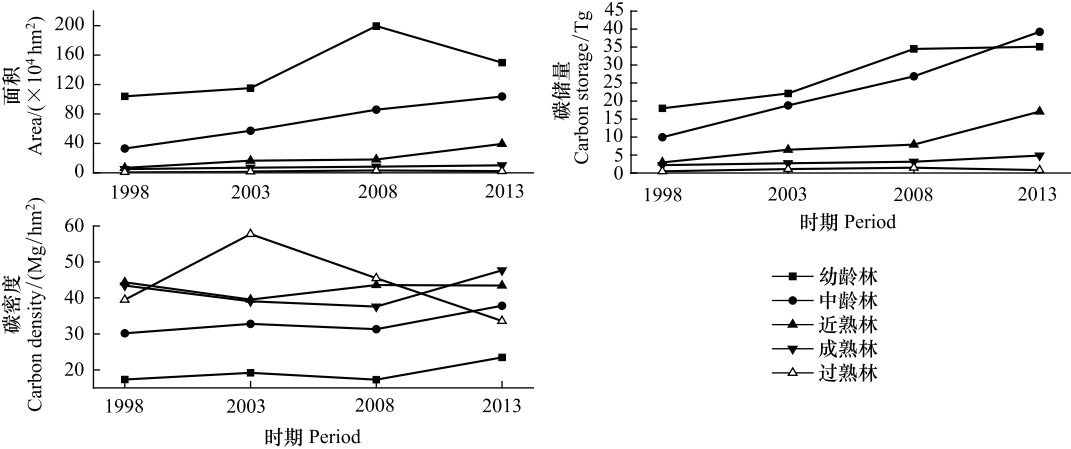


图 1 1998—2013 年河南省不同林龄乔木林面积、碳储量和碳密度变化

Fig.1 Area, carbon storage and carbon density of Henan Province's arbor forest among different age classes between 1998 and 2013

2.3 不同森林类型乔木林碳储量和碳密度

由图 2 可知,1998—2013 年,阔叶林面积由 1998 年的 $113.13\times10^4\text{ hm}^2$ 增加到 2008 年的 $278.02\times10^4\text{ hm}^2$,而在 2013 年面积小幅下降,面积为 $267.99\times10^4\text{ hm}^2$ 。阔叶林碳储量呈增加趋势由 1998 年的 28.17 Tg 增加到 2013 年的 89.84 Tg,增加了 2.19 倍。不同森林清查时期阔叶林面积分别占乔木林总面积的 75.54%、82.22%、89.04%、83.90%,碳储量占同期乔木林总碳储量的 83.99%、89.00%、91.81%、92.52%。不同森林清查时期阔

叶林碳密度分别为 24.90、28.03、24.85、33.53 Mg/hm²,均高于同期针叶林碳密度。

1998—2013 年,不同森林清查时期针叶林面积分别占乔木林总面积的 24.46%、17.78%、10.96%、16.10%,碳储量占同期乔木林总碳储量的 16.01%、11.00%、8.19%、7.48%。针叶林碳密度分别为 14.66、16.01、18.02、14.13 Mg/hm²。阔叶林面积、碳储量、碳密度均高于针叶林,可知阔叶林是河南省森林碳汇的主要贡献者。

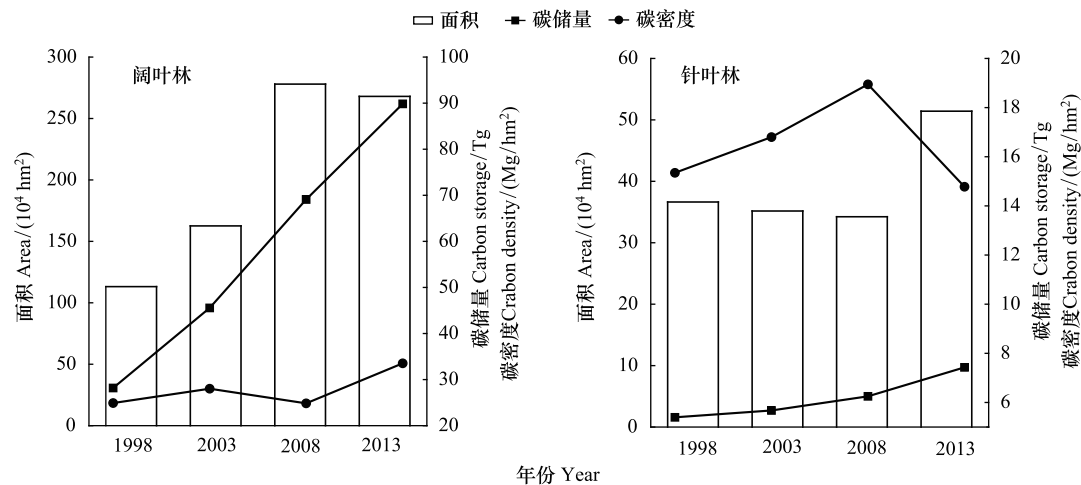


图 2 1998—2013 年河南省针叶林和阔叶林面积、碳储量和碳密度变化

Fig.2 Area, carbon storage and carbon density of conifer forest and broad-leaved forest between 1998 and 2013 in Henan Province

2.4 不同林分起源乔木林的碳储量和碳密度

根据林分起源的不同,乔木林被分为天然林和人工林两类。由表 4 可知,1998—2013 年河南省天然林和人工林的面积、碳储量和碳密度均呈增加趋势。天然林面积由 1998 年的 95.92×10⁴ hm²增加到 2013 年的 131.47×10⁴ hm²;碳储量由 1998 年的 23.92 Tg 增加到 2013 年的 41.44 Tg;碳密度由 24.94 Mg/hm²增加到 31.52 Mg/hm²。天然林面积占同时期乔木林总面积的 28.68%、44.69%、53.96%、57.33%;天然林碳储量占同时期乔木林总碳储量的 71.32%、55.31%、46.04%、42.67%。相对于天然林而言,人工林面积、碳储量、碳密度增加幅度都要高于天然林,1998 年森林清查时期人工林面积只有天然林面积的 56.14%,2003 年达到天然林面积的 84.35%,在 2008 年、2013 年人工林面积已高于天然林面积,分别是天然林面积的 135.44%和 132.23%。主要是由于 1999—2013 年期间河南省实施了退耕还林这项人工造林工程,造成人工林面积大幅度提升。同时,人工林碳储量由 1998 年的 9.62 Tg 增加到 2013 年的 55.67 Tg,占乔木林碳储量总增量(155.59 Tg)的 77.15%,人工林碳密度由 1998 年的 17.86 Mg/hm²提高到 2013 年的 32.01 Mg/hm²,人工林逐渐成为河南省森林碳汇的主体,随着退耕还林工程所造林木生长为具有较高碳密度的成熟林,河南省乔木林将具有较大的碳汇潜力。

表 4 1998—2013 年河南省天然林和人工林面积、碳储量和碳密度

Table 4 Area, carbon storage and carbon density of natural forest and planted forest between 1998 and 2013 in Henan Province						
时期 Period	人工林 Planted forest			天然林 Natural forest		
	面积 Area/ (10 ⁴ hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	面积 Area/ (10 ⁴ hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
1998	53.85	9.62	17.86	95.92	23.92	24.94
2003	90.47	22.88	25.29	107.25	28.32	26.41
2008	160.79	39.95	24.85	118.72	34.09	28.71
2013	173.89	55.67	32.01	131.47	41.44	31.52

2.5 2013 年乔木林各树种不同林龄碳储量和碳密度

以 2009—2013 年河南省第八次森林清查资料作为河南省森林资源现状,对作为森林主体的乔木林碳汇能力进行研究。由表 5 可知,乔木林碳储量、碳密度与林龄关系密切,该时期不同林龄的乔木林总碳储量大小为:中龄林>幼龄林>近熟林>成熟林>过熟林。河南省乔木林碳储量以幼龄林和中龄林为主,两者碳储量占总碳储量的 76.58%,主要是由于幼龄林和中龄林面积较大。近、成熟和过熟林的碳储量仅占总碳储量的 23.42%。不同林龄乔木林的碳密度大小为:成熟林>近熟林>中龄林>过熟林>幼龄林。

由表 5 可知,同一龄组不同树种的碳储量、碳密度存在差异,幼龄林中栎类和阔叶混碳储量最大,分别占同一龄组碳储量的 51.88%和 29.37%;中龄林中杨树碳储量最大,为 21.74 Tg,占同龄组碳储量的 55.36%;近熟林中杨树碳储量最大,为 10.92 Tg,占同龄组碳储量的 64.05%;成熟林中杨树碳储量最大,为 2.14 Tg,占同龄组碳储量的 44.03%;过熟林种刺槐碳储量最大,为 0.49 Tg,占同龄组碳储量的 60.49%。总的来说,杨树和栎类碳储量最大,分别占总碳储量的 37.61%和 25.22%,主要是由于杨树和栎类面积和碳密度较高,杨树和栎类是河南省森林碳汇的主要贡献者。幼龄林中阔叶混碳密度最大,中龄林中柳树碳密度最大,近熟林中栎类碳密度最大,成熟林针叶混碳密度最大,过熟林泡桐碳密度最大。

3 结论与讨论

河南省森林植被面积由 1998 年的 $280.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 提高到 2013 年的 $420.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$,提高了 50.39%,碳储量由 1998 年的 45.57 Tg 提高到 2013 年的 107.98 Tg,提高了 136.95%。河南省乔木林碳储量由 1998 年的 33.54 Tg 增加到 2013 年的 97.11 Tg,乔木林碳密度由 1998 年的 22.39 Mg/hm^2 增加到 2013 年的 31.80 Mg/hm^2 ,说明河南省乔木林质量明显提高,这与河南省乔木林树种组成、林龄结构及不同树种面积构成比例有关。Zhang 等^[24]研究的全国森林植被碳储量为 6896.33 Tg,碳密度为 41.90 Mg/hm^2 ,河南省 2013 年森林植被碳储量占同时期全国森林植被碳储量的 1.41%,森林植被碳密度低于全国水平,表明河南省森林植被质量低于全国森林植被质量平均水平,需要加强抚育和管理,提高河南省森林的碳汇能力。

Friedlingstein 等^[30]研究表明:2013 年全球的二氧化碳排放量再创历史新高,达到 36100 Tg 左右,其中,中国排放二氧化碳 10000 Tg,占全球总排放量的 27.70%。河南省 2013 年森林植被碳储量为 107.98 Tg,相当于 2013 年中国碳排放量的 1.08%,根据全国第八次森林清查资料统计,河南省森林面积占全国森林面积的 1.73%,蓄积占全国森林蓄积的 1.13%。虽然河南省从 1999 年开始实施了退耕还林工程,人工林面积、蓄积、碳储量提升较多,但还是低于全国水平,但是,随着这些人工林生长为较高碳密度的成熟林,将发挥较大的碳汇潜力。

河南省乔木林碳储量明显高于其他植被类型的碳储量,乔木林在河南省森林碳汇中发挥着重要作用。2013 年乔木林中杨树、栎类和阔叶混的碳储量最高,三者之和达到乔木林总碳储量的 84.36%,其中杨树碳储量最高,占乔木林总碳储量的 37.61%。杨树、栎类和阔叶混是河南省森林碳汇的主要贡献树种,应对其加强抚育和管理,提高森林蓄积量,增强碳汇能力。

森林碳汇能力与森林面积、树种组成和林龄结构紧密相关^[31]。一些学者认为碳储量存在差异的主要原因是不同树种的森林面积和森林蓄积量存在差异,森林蓄积量的差异主要是由于不同树种的生长特性存在差异、不同的气候状况、地理条件、不同的管理目标和人类活动造成的^[32-33]。本研究中,不同森林清查时期河南省幼、中龄林的碳储量均最大,主要是由于幼龄林和中老龄林的面积和蓄积量较大(图 1)。不同森林清查时期阔叶林碳储量均高于针叶林,主要是由于阔叶林面积和碳密度均高于针叶林,人工林碳储量在 1998 年和 2003 年森林清查时低于天然林碳储量,而在 2008 年和 2013 年森林清查时高于天然林碳储量,主要是由于人工造林工程的实施造成人工林面积的增加,同时政府加强对人工林的抚育管理,生长较好,碳密度较高。

森林碳密度不仅与森林面积相关,而且与树种、林龄、种植密度、气候、地理等条件密切相关,而且,这些影响因子的作用程度也不相同。本研究中,1998 年、2003 年、2008 年,河南省天然林碳密度均高于人工林碳密

表 5 2013 年乔木林各种不同林龄碳储量和碳密度

Table 5 Carbon storage and carbon density of different age groups under various tree species in 2013

树种 Tree species	总碳储量 Total carbon storage/Tg	平均碳密度 Mean of carbon density/ (Mg/hm ²)		幼龄林 Young-aged		中龄林 Middle-aged		近熟林 Premature		成熟林 Mature		过熟林 Over mature	
		碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	0.17	26.18	17.37	0.03	17.37	0.05	29.94	0.09	28.63	0.00	0.00	0.00	0.00
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	1.62	22.48	10.57	0.20	10.57	0.83	23.64	0.55	34.24	0.04	21.26	0.00	0.00
华山松 <i>Pinus amandii</i>	0.04	24.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	24.24	0.00	0.00	0.00	0.00
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	2.30	17.16	13.80	0.73	13.80	0.91	17.64	0.48	19.89	0.17	35.08	0.00	0.00
落叶松 <i>Larix</i> spp.	0.03	19.13	0.00	0.00	0.00	0.03	19.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i>	0.05	29.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	29.20	0.00	0.00	0.00	0.00
火炬松 <i>Pinus taeda</i>	0.41	23.24	0.04	0.04	13.34	0.37	25.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他松类 Other pine	0.10	21.77	0.03	0.03	19.21	0.04	23.98	0.04	22.13	0.00	0.00	0.00	0.00
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.41	14.83	0.08	0.08	7.04	0.19	16.91	0.14	28.20	0.00	0.00	0.00	0.00
柏木 <i>Cupressus</i> sp.	1.69	20.52	0.93	0.93	18.62	0.48	21.13	0.28	28.98	0.00	0.00	0.00	0.00
栎类 <i>Quercus</i> spp.	24.49	25.90	18.21	18.21	22.20	4.17	47.92	1.43	55.92	0.68	52.44	0.00	0.00
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1.96	19.05	0.13	0.13	6.66	0.34	15.04	0.41	18.16	0.60	24.56	0.49	33.94
樟木 <i>Cinnamomum longepaniculatum</i>	0.03	18.92	0.03	0.03	18.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.05	29.89	0.00	0.00	0.00	0.05	28.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他阔叶类 Other hardwood	1.24	26.56	0.92	0.92	24.90	0.25	31.45	0.06	40.26	0.00	0.00	0.00	0.00
杨树 <i>Populus</i> spp.	36.52	41.25	1.54	1.54	20.34	21.74	39.77	10.92	49.10	2.14	60.15	0.18	36.69
柳树 <i>Salix babylonica</i>	0.19	39.02	0.03	0.03	19.49	0.10	62.54	0.00	0.00	0.06	35.03	0.00	0.00
泡桐 <i>Paulownia</i>	1.45	18.72	0.24	0.24	9.15	0.82	21.20	0.26	26.88	0.07	44.07	0.06	40.42
楸树 <i>Melia azedarach</i>	0.03	20.86	0.02	0.02	14.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他阔叶类 Other softwood	0.47	19.51	0.21	0.21	16.75	0.09	19.33	0.08	49.18	0.06	18.85	0.02	13.75
针叶混 Mixed conifer	0.24	19.01	0.12	0.12	18.13	0.09	19.78	0.03	20.25	0.00	0.00	0.00	0.00
阔叶混 Mixed broadleaf	20.91	39.44	10.31	10.31	32.79	7.72	47.95	1.85	48.24	0.96	66.48	0.05	33.76
针阔混 Mixed conifer and broadleaf	2.70	39.14	1.29	1.29	32.05	0.98	47.09	0.35	54.45	0.09	53.20	0.00	0.00
合计 Total	97.11	31.80	35.10	23.45	37.83	39.27	37.83	17.05	43.45	4.86	47.69	0.81	33.58

度,2013 年人工林碳密度高于天然林,2013 年人工林碳密度升高的主要原因是从 1999 年开始河南省实施退耕还林工程,该工程种植杨树、泡桐树种较多,这些树木经过近 20 年的生长,已经达到具有较高碳密度的近熟、成熟林阶段,另外,人工林种植后政府积极引导,加大对林木的养护管理,林木质量较高。随着新一轮退耕还林工程的实施,人工林管理水平的提高,人工林的碳汇能力将会逐步加强。

在国家尺度上研究省级区域森林植被碳汇能力与在省级区域尺度上研究森林植被碳汇能力存在较大差异,且在国家尺度上评估省级森林碳汇数据较为简单,未就不同树种、林龄、林种、林分起源类型等进行森林植被碳汇能力的详细估算,本研究就河南省森林植被碳汇进行了较为准确和详尽的评估。王效科等^[34]利用第三次全国森林清查资料(1984—1988 年),得到河南省乔木林碳储量为 20.14 Tg,赵敏和周广胜^[35]在全国尺度上利用第四次森林清查资料(1989—1993 年)评估河南省乔木林碳储量为 25.21 Tg,吴庆标等^[36]利用第六次全国森林清查资料(1998—2003 年),得到河南省乔木林碳储量为 37.82 Tg,本研究中河南省(1998—2003 年)乔木林植被碳储量 51.19 Tg,高于在国家尺度上的评估,这与刘兆丹等^[20]提出的在国家尺度下森林植被碳汇的估算结果明显低于省域尺度的结论一致。因此,需要在省级区域尺度上对森林植被碳储量进行详细估算,提高我国森林植被碳汇的评估精度,并为全国森林植被碳汇提供较为精确的基础数据。

本研究中,我们估算了 1998—2013 年河南省森林植被碳库,将会产生一些误差。首先,误差来源于森林清查资料和采用的蓄积量转换为生物量的公式中一些相关参数(参数 a, b)。本研究中使用的河南省森林清查资料精度较高,因为在森林资源清查中森林面积和蓄积量的调查要求精度>90%;另外,多数优势树种使用的蓄积量转换为生物量的方程 R^2 值均大于 0.9,因此,本研究中使用的数据和方法具有相对较高的可靠性。但是,为了提高蓄积量转换为生物量公式所采用的参数具有更高的可靠性,需要针对不同的地区开展研究,采用适合当地条件的生物量转换参数。

对于经济林、竹林、疏林和灌木林,误差来源于森林清查资料 and 平均生物量密度的运用,但主要误差来源于平均生物量密度。本研究中,生物量平均密度采用的是文献中的数值,由于不同地区气候条件、地理位置和管理措施的不同,我们采用的平均生物量密度在估算生物量时会产生一些不确定性,例如,高估环境条件差的地区森林的碳储量,低估生长条件良好地区的森林碳储量。因此,需要进一步对不同地区经济林、竹林、疏林和灌木林的生物量密度进行研究,以提高碳储量估算结果的准确度。

参考文献 (References):

- [1] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A Large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [2] 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. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 - Velázquez J, Rozendaal D M A, Ruschel A R, Sakschewski B, Salgado - Negret B, Schiatti 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邓蕾, 上官周平. 秦岭宁陕县森林植被碳储量与碳密度特征. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2310-2320.
- [14] 张春华, 居为民, 王登杰, 王希群, 王昕. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值. 生态学报, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [15] Ren H, Chen H, Li L J, Li P H, Hou C M, Wan H F, Zhang Q M, Zhang P X. Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, Southern China. Plant and Soil, 2013, 363(1/2): 123-138.
- [16] Ren H, Li L J, Liu Q, Wang X, Li Y D, Hui D F, Jian S G, Wang J, Yang H, Lu H F, Zhou G Y, Tang X L, Zhang Q M, Wang D, Yuan L L, Chen X B. Spatial and temporal patterns of carbon storage in forest ecosystems on Hainan Island, Southern China. PLoS One, 2014, 9(9): e108163.
- [17] Ren Y, Wei X H, Zhang L, Cui S H, Chen F, Xiong Y Z, Xie P P. Potential for forest vegetation carbon storage in Fujian Province, China, determined from forest inventories. Plant and Soil, 2011, 345(1/2): 125-140.
- [18] 葛立雯, 潘刚, 任德智, 杜玉婕, 郑祥蕾. 西藏林芝地区森林碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 2013, 24(2): 319-325.
- [19] 李士美, 杨传强, 王宏年, 盖力强. 基于森林资源清查资料分析山东省森林立木碳储量. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2215-2220.
- [20] 刘兆丹, 李斌, 方晰, 项文化, 田大伦, 闫文德, 雷丕鋒. 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.
- [21] 光增云. 河南森林植被的碳储量研究. 地域研究与开发, 2007, 26(1): 76-79.
- [22] 光增云. 河南省森林碳储量及动态变化研究. 林业资源管理, 2006, (4): 56-60, 48-48.
- [23] Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, Hom J, Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. Climatic Change, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [24] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, Zan M, Li D Q, Zhou Y L, Wang X Q. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008. Climatic Change, 2013, 118(3/4): 933-948.
- [25] 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.
- [26] 赵体顺, 光增云, 赵义民, 刘国伟. 日本落叶松人工林生物量及生产力的研究. 河南农业大学学报, 1999, 33(4): 350-353.
- [27] 王其吉. 河南杉木. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [28] 赵体顺. 林农复合生态系统物质循环的研究 I. 农田林网杨树生物量的研究. 农村生态环境, 1989, (2): 1-5.
- [29] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 农林业系统结构和功能. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [30] Friedlingstein P, Andrew R M, Rogelj J, Peters G P, Canadell J G, Knutti R, Luderer G, Raupach M R, Schaeffer M, Van Vuuren D P, Le Quéré C. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. Nature Geoscience, 2014, 7(10): 709-715.
- [31] McKenney D W, Yemshanov D, Fox G, Ramlal E. Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada. Forest Policy and Economics, 2004, 6(3): 345-358.
- [32] Zhang X P, Wang M B, Liang X M. Quantitative classification and carbon density of the forest vegetation in Lüliang Mountains of China. Plant Ecology, 2009, 201(1): 1-9.
- [33] Herrero C, Bravo F. Can we get an operational indicator of forest carbon sequestration?: A case study from two forest regions in Spain. Ecological Indicators, 2012, 17: 120-126.
- [34] 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.
- [35] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [36] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 517-524.