

武汉市环城林带森林碳储量及其动态变化

陈科屹¹, 刘润华², 张博³, 何友均¹, 谢和生¹

(1.中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091; 2.武汉市林业调查规划设计院有限公司, 武汉 430000; 3.北京林业大学森林资源和环境管理国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了促进城市森林固碳增汇,提升城市森林生态系统功能和价值,基于武汉市环城林带 2008 年和 2018 年的两期森林资源二类调查数据,采用生物量连续转化因子法和含碳系数法,对环城林带的森林碳储量和碳密度进行了估算,对比分析了 10 a 间的动态变化。结果表明:(1) 10 a 间环城林带森林碳储量和碳密度增幅明显,分别由 64 692.413 3 t 和 27.389 7 t/hm² 增长到 119 789.961 3 t 和 47.243 4 t/hm²。到 2018 年,环城林带森林碳储量理论价值约为 987.85 万元;(2) 到 2018 年,森林碳储量最多的区域为江夏区段,但各区段之间的碳储量差异在缩小。森林碳密度最大的区段已由东西湖区段转变为蔡甸区段;(3) 森林碳储量呈现出向少数几个群落类型聚集的趋势,到 2018 年樟树林已成为环城林带碳储量最多的群落类型;(4) 近、成熟林的碳储量和碳密度增幅明显,但是幼龄林依然是环城林带森林碳储量的绝对主体。综上,武汉市环城林带森林碳储量具有较大的增汇潜能,但需要及时开展森林精准抚育,以确保增汇潜能的有效释放并促进碳储量结构平衡。

关键词:碳储量; 碳密度; 生物量扩展因子; 环城林带

中图分类号:S718.56

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0054-06

Forest Carbon Storage and Its Dynamic Changes of the City-Encircling Forest Belt of Wuhan City

CHEN Keyi¹, LIU Runhua², ZHANG Bo³, HE Youjun¹, XIE Hesheng¹

(1.Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2.Wuhan Institute of Forest Inventory and Planning Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3.Key Laboratory of Forest Resources

and Environmental Management, State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to promote the carbon sequestration of urban forest and enhance the function and value of urban forest ecosystem, based on the second-class survey data of forest resources in the city-encircling forest belt of Wuhan in 2008 and 2018, the biomass continuous expansion factor method and carbon coefficient method were adopted to estimate the forest carbon storage and carbon density of the city-encircling forest belt, and its changes in decade were compared. The results showed that: (1) the carbon storage and carbon density had increased significantly in the past 10 years; the carbon storage and carbon density in the city-encircling forest belt had increased from 64 692.413 3 t and 27.389 7 t/hm² to 119 789.961 3 t and 47.243 4 t/hm², respectively; by 2018, the theoretical value of forest carbon storage in the city-encircling forest belt was about 9.878 5 million yuan; (2) by 2018, the section with the largest forest carbon storage was the Jiangxia District, but the carbon storage difference between the sections was narrowing; the section with the highest carbon density had changed from the Dongxi Lake District to the Caidian District; (3) the forest carbon storage showed a trend of gathering to a few community types; by 2018, camphor forest had become the community type with the largest carbon storage in the city-encircling forest belt; (4) the carbon storage and carbon density of near-mature and mature forests increased significantly, but young forests were still most of the carbon storage in city-encircling forest belt. The forest carbon storage in the city-encircling forest belt had great potential for increasing carbon storage, but accurate forest tending should be carried out in time to ensure the

收稿日期:2020-05-11

修回日期:2020-05-25

资助项目:国家林业和草原局林业重大问题研究“长江经济带共抓大保护林业草原政策研究”(500102-1721)

第一作者:陈科屹(1989—),男,四川宜宾人,博士,助理研究员,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:Lowrychen@sina.com

通信作者:何友均(1976—),男,湖北恩施人,博士,研究员,主要从事森林多目标管理与评价研究。E-mail:hyjun163@163.com

effective release of carbon storage potential and promote the structural balance of carbon storage.

Keywords: carbon storage; carbon density; biomass expansion factor; city-encircling forest belt

气候变化早已成为备受世界关注的热点问题,森林在应对全球气候变化过程中所发挥的不可替代的作用早已得到了社会各界的广泛认同^[1]。城市是温室气体排放的重要来源地之一,因此城市也自然成为了应对气候变化的主要场所之一^[2]。环城林带是城市生态系统的重要组成部分,它对于改善城市生态状况、提升人居环境以及美化景观效果皆起着非常重要的作用,尤其是在维持城市生态系统的碳平衡方面具有重大的现实意义^[3]。及时并准确地测算环城林带的森林碳储量,可以了解林分水平的固碳能力、收集碳收支相关参数,客观反映环城林带的森林结构和功能现状,进而为城市及郊区森林资源的可持续经营管理提供重要的理论依据。

我国有关环城林带的研究起于20世纪80年代^[4],目前主要涉及环城林带的规划与设计^[5]、森林资源调查与分析^[6-7]、生态服务功能评价等^[8-9]方面,且多以单一时间节点作为研究背景,然而针对环城林带碳储量的估测及其动态变化规律方面的研究则鲜见报道。武汉市环城林带是武汉市的重点工程项目,从开工至今已有近20 a的经营过程,目前已成为武汉市城区外围重要的绿色生态屏障,其森林生长状况备受社会各界关注。为此,本研究以武汉市环城林带为研究对象,基于2008年和2018年两期森林资源两类调查数据,参照近似立地环境和相同气候区域的实测数据和材积源生物量转换模型,探究武汉市环城林带的碳储量、碳密度、空间分异以及近10 a来的动态变化情况,以期为促进城市森林固碳增汇,提升城市森林多功能经营、精准化经营水平提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况

武汉市环城林带全长188 km、宽度200 m,位于武汉市外环高速公路两侧,介于东经114°1′—114°35′,北纬30°18′—30°53′,林带沿线跨越蔡甸区、东西湖区、江夏区、新洲区、黄陂区和东湖高新区。环城林带地处北亚热带湿润季风性气候区,降水量分配不均,春夏多雨,秋冬多旱。沿线地形地貌涵盖平原、丘陵、岗地,但总体坡度较小,其穿越长江、汉水、武湖、后湖等水系湖泊。沿线土地多农田和旱地,土壤类型主要包括水稻土、潮土、红壤、黄红壤,部分丘陵地区为黄棕壤,局部有黄红壤。主要树种包括香樟(*Cinnamomum camphora*)、水杉(*Metasequoia glyptostrobo-*

ides)、池杉(*Taxodium ascendens*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、柏木(*Cupressus funebris*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等20多个树种。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

采用武汉市环城林带2008年和2018年两期森林资源二类调查数据资料,调查数据以小班作为基本单元,调查内容涵盖地类、面积、植被类型、优势树种(组)、起源、龄级、蓄积等。考虑到森林碳储量估算的基本要求和方法,并结合武汉市环城林带森林资源2类调查数据资料的内容,将沿线植被划分为15组群落类型,分别是樟树、软阔、硬阔、柏树、水杉、柳杉、杉木、马尾松、其他针叶类、阔叶混交林、针叶混交林、针阔混交林、疏林、灌木林、苗圃和竹类(表1)。龄组则按照《国家森林资源连续清查技术规定》(2014)的技术标准进行划分(表2)。

2.2 研究方法

目前,森林碳储量的估算方法包括样地清查、遥感估测和模型模拟等诸多方法^[10-11],其中材积源生物量法(volume-derived biomass)在估算林分生物量方面具有良好的效果,是目前研究森林碳储量的重要方法之一^[12-13]。基于森林资源两类调查数据的特点,本研究采用生物量转换连续函数法计算武汉市环城林带乔木林的生物量,其数学表达式如下:

$$B_{\text{total}} = B \cdot A_{\text{total}} = (a \cdot V + b) \cdot A_{\text{total}} \quad (1)$$

式中: B 为某一树种(组)的单位面积生物量; V 为某一树种(组)的单位面积蓄积量; A_{total} 为某一树种(组)的总面积; B_{total} 为某一树种(组)的总生物量; a, b 为参数。根据树种(组)的类别,从方精云等^[14-15]、曾伟生^[16]、黄从德^[17]已建立的不同森林类型森林蓄积量表示生物量的转换参数中筛选适合本研究的参考数值,对于缺失对应模型的树种(组),参照近似优势树种(组)参数作为替代(表3)。

由于灌木林、苗圃、竹林与乔木林的特征存在较大差异,因此采用区别于乔木林的生物量估算方法。其中,灌木林、苗圃的生物量采用平均生物量法,参照刘国华等^[18]的方法按19.76 t/hm²进行估算,对于植被盖度不足50%的按9.88 t/hm²进行估算。竹林的生物量参考《全国林业碳汇计量监测技术指南(试

行)》(2011)发布的参数按 10.44 kg/株进行估算,对于竹林平均高不足 5 m 的按 5.22 kg/株进行估算。

表 1 武汉市环城林带主要群落类型

一级地类	二级地类	群落类型	主要树种(组)
林地	有林地	樟树	香樟
		软阔	毛白杨(<i>Populus tomentosa</i>)、垂柳(<i>Salix babylonica</i>)、泡桐(<i>Paulownia fortunei</i>)、苦楝(<i>Melia azedarach</i>)等
		硬阔	楠木(<i>Phoebe zhennan</i>)、榆树(<i>Ulmus pumila</i>)、木荷(<i>Schima superba</i>)、枫香等
		柏树	圆柏(<i>Juniperus chinensis</i>)、刺柏(<i>Juniperus formosana</i>)等
		水杉	水杉
		柳杉	柳杉(<i>Cryptomeria fortunei</i>)
		杉木	杉木(<i>Cunninghamia lanceolata</i>)
		马尾松	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)
		其他针叶类	池杉、湿地松(<i>Pinus elliottii</i>)等
		针叶混交林	马尾松+圆柏、水杉+池杉等
		阔叶混交林	栎树+香樟、栎树+女贞、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)+乌桕(<i>Triadica sebifera</i>)、合欢(<i>Albizia julibrissin</i>)+香樟等
		针阔混交林	水杉+桤木(<i>Alnus cremastogyne</i>)、栎树+湿地松、泡桐+马尾松、池杉+合欢等
		竹类	毛竹(<i>Phyllostachys edulis</i>)等
	疏林地	疏林	栎树、香樟、泡桐、水杉、柳杉、乌桕等
	灌木林地	灌木	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>)、紫叶李(<i>Prunus cerasifera</i>)等
非林地	苗圃地	灌木	石楠(<i>Photinia serratifolia</i>)、桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>)、樱花(<i>Cerasus</i> sp.)、玉兰(<i>Yulania denudata</i>)等
	其他	—	—
	—	—	—

注:“—”代表未发现。

表 2 武汉市环城林带主要树种龄组划分

树种	地区	起源	龄组				
			幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
油松、马尾松	南方	人工	≤10 a	11~20 a	21~30 a	31~50 a	≥51 a
杨树、柳树、泡桐、苦楝	南方	人工	≤5 a	6~10 a	11~15 a	16~25 a	≥26 a
桦树、榆树、木荷、枫香	南方	人工	≤10 a	11~20 a	21~30 a	31~50 a	≥51 a
樟树、楠树	南方	人工	≤20 a	21~40 a	41~50 a	51~70 a	≥71 a
杉木、水杉、柳杉	南方	人工	≤10 a	11~20 a	21~25 a	26~35 a	≥35 a

表 3 武汉市环城林带各树种(组)生物量
方程回归参数及含碳系数

树种(组)	参数		含碳 系数
	<i>a</i>	<i>b</i>	
樟树	1.0357	8.0591	0.4916
其他软阔	0.4754	30.6034	0.4956
其他硬阔	0.7564	8.3103	0.4834
柏树	0.6129	46.1451	0.5034
水杉	0.5168	33.2378	0.5013
柳杉	0.3491	39.8160	0.5235
杉木	0.3999	22.5410	0.5201
马尾松	0.5010	1.0451	0.4596
其他松杉类	0.5168	33.2378	0.5000
阔叶混交林	0.6255	91.0013	0.4900
针叶混交林	0.5894	24.5151	0.5101
针阔混交林	0.8136	18.4660	0.4978

基于上述林分生物量的计算结果,根据对应的含碳系数计算林分碳储量,表达式如下:

$$C_{total} = B_{total} \cdot C_c \tag{2}$$

式中: C_{total} 为某一树种(组)的总碳储量; C_c 某一树种(组)的含碳系数。武汉市环城林带各类乔木树种的

含碳系数参照李海奎等^[19]的研究结果,而竹林、疏林、灌木林、苗圃林则统一采用常数 0.5 作为含碳系数。另外,需特别指出的是,本文所研究的环城林带森林碳储量是指林分中活立木的碳储量,不包含下木层、草本层、枯木层、土壤层的碳储量。碳密度即为单位面积的碳储量。

年变化率是反映动态变化的重要指标,基于森林碳储量和森林碳密度的测算结果,计算两者的年变化率,计算公式如下:

$$C_r = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{C_{t2}}{C_{t1}} \tag{3}$$

式中: C_r 为森林碳储量或碳密度年变化率; C_{t1} 、 C_{t2} 分别为在 t_1 、 t_2 时的森林碳储量或碳密度。

3 结果与分析

3.1 碳储量总体概况及其动态

由表 4 可知,截至 2018 年,武汉市环城林带森林总碳储量为 119 789.961 3 t,是 2008 年 64 692.413 3 t

的 1.85 倍,10 a 间净增汇 55 097.548 0 t,年均增长率为 6.35%。2018 年,环城林带森林碳密度为 47.243 4 t/hm²,是 2008 年 27.389 7 t/hm² 的 1.72 倍,10 a 间每 hm² 单位面积净增汇 19.853 7 t,年均增长率为 5.60%。根据湖北碳排放权交易中心发布的数据显示,2018 年湖北省碳排放交易平均价格为每吨 CO₂ 22.47 元。参照此标准概算可知,2018 年武汉市环城林带森林共计固定 439 629.862 0 t CO₂,总碳储量理论价值约为 987.85 万元。

3.2 碳储量空间分布及其动态

从武汉市环城林带森林碳储量的空间分布来看(表 5),2008 年森林碳储量最多和最少的区域分别是江夏区(25 830.036 2 t)和东湖高新区(4 015.255 0 t),最高者与最低者的碳储量相差 6.43 倍。其余 4 个区域

的碳储量位列其间,具体排序为:东西湖区>黄陂区>蔡甸区>新洲区。相比之下,2018 年森林碳储量最多的区域仍然是江夏区(27 392.526 2 t),但是其碳储量占比已从 2008 年的 39.93% 下降到 2018 年的 22.87%;森林碳储量最少的区域转变为新洲区(12 022.250 4 t),但是其碳储量占比则有所增加。其余 4 个区域的森林碳储量排序为:东湖高新区>黄陂区>蔡甸区>东西湖区。

表 4 武汉市环城林带森林总碳储量和平均碳密度

年份	总碳储量/t	平均碳密度/(t·hm ⁻²)
2008 年	64692.4133	27.3897
2018 年	119789.9613	47.2434
年均增长量	5509.7548	1.9854
年均增长率/%	6.35	5.60

表 5 武汉市环城林带不同区域森林碳储量和碳密度

区域	2008 年			2018 年		
	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)
蔡甸区	9340.0338	14.44	28.9320	17726.5095	14.80	49.2859
东湖高新区	4015.2550	6.21	31.0762	24364.1313	20.34	48.7183
东西湖区	10338.1518	15.98	32.0262	15565.0333	12.99	46.8085
黄陂区	9391.1697	14.52	23.1172	22719.5107	18.97	43.2559
江夏区	25830.0362	39.93	27.7549	27392.5262	22.87	48.7031
新洲区	5777.7669	8.93	23.0925	12022.2504	10.04	47.0313

在森林碳密度方面,2008 年森林碳密度最大和最小的区域分别是东西湖区(32.026 2 t/hm²)和新洲区(23.117 2 t/hm²),两者相差 1.39 倍。其余各个区域森林碳密度排序为:东湖高新区>蔡甸区>江夏区>新洲区。然而到 2018 年,碳密度最大和最小的区域已分别转变为蔡甸区(49.285 9 t/hm²)和黄陂区(43.255 9 t/hm²),两者相差 1.14 倍,经过 10 a 的生长演替,最大值与最小值之间的差距在缩小。其余各个区域的森林碳密度排序为:东湖高新区>江夏区>新洲区>东西湖区。此外,从各个区域的时间序列变化来看,无论是森林碳储量还是森林碳密度都呈现出显著的增长。

3.3 主要群落类型碳储量及其动态

3.3.1 不同群落碳储量及其动态 从群落类型来看(表 6),2008 年武汉市环城林带森林碳储量排在前 3 位的群落类型分别是阔叶混交林(20 082.403 4 t)、樟树(16 670.578 0 t)和针阔混交林(8 550.328 9 t),三者之和占森林总碳储量的比例为 70.03%。森林碳储量排在最末三位的群落类型分别是竹类(6.214 9 t)、灌木(44.620 1 t)和针叶混交林(111.405 5 t),三者之和仅占森林总碳储量的 0.25%。相比之下,到 2018 年森林碳储量排在前三位的群落类型已转变为樟树

(50 487.256 9 t)、阔叶混交林(29 060.583 4 t)和软阔(12 477.379 9 t),且三者之和占森林总碳储量的比例已高达 76.83%,其中樟树的碳储量比例更是达到了 42.15%。从变化趋势来看,在环城林带所划分的 15 个群落类型中,仅樟树、水杉和苗圃 3 个群落类型的碳储量占比呈正向变化,其余类型除竹类的碳储量占比保持持平以外,11 个群落类型均呈负向变化(图 1)。可见,近 10 a 内环城林带森林碳储量正向少数几个群落类型聚集。

在碳密度方面,2008 年森林碳储量排在前三位的群落类型分别是阔叶混交林(62.372 6 t/hm²)、针阔混交林(32.184 1 t/hm²)和柏树(27.307 9 t/hm²),排名最末的是竹类(0.574 2 t/hm²),仅为针阔混交林碳密度的 0.92%。相比之下,到 2018 年森林碳储量排在前三位的群落类型已转变为阔叶混交林(69.919 4 t/hm²)、樟树(52.529 4 t/hm²)和针阔混交林(42.336 2 t/hm²)。碳密度最低的仍然是竹类(0.959 0 t/hm²),仅为针阔混交林碳密度的 1.37%。从变化趋势来看,各群落类型碳密度的变化趋势与上述碳储量比例的变化趋势相反。在 15 个群落类型中,仅针叶混交林的碳密度呈下降变化,其余 14 个群落类型的碳密度均在增加,其中涨幅最大的是樟树(31.958 2 t/hm²)。

表 6 武汉市环城林带不同群落类型碳储量和碳密度

群落类型	2008 年			2018 年		
	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)
柏树	686.4445	1.06	27.3079	283.1814	0.24	33.4062
灌木	44.6201	0.07	4.9400	55.0296	0.05	8.5321
阔叶混交林	20082.4034	31.04	62.3726	29060.5834	24.26	69.9194
马尾松	500.5438	0.77	9.6365	670.8072	0.56	18.8950
苗圃	—	—	—	42.7115	0.04	9.0222
其他松针类	1368.3833	2.12	21.8471	538.4164	0.45	35.6345
软阔	7037.2155	10.88	24.6898	12477.3799	10.42	37.3339
杉木	115.6201	0.18	17.4854	28.7900	0.02	21.4291
疏林	964.4432	1.49	14.3605	1177.9818	0.98	26.0345
水杉	3728.3260	5.76	24.7342	10744.4748	8.97	37.9913
硬阔	4825.8861	7.46	16.6261	5453.8433	4.55	26.6758
樟树	16670.5780	25.77	20.5712	50487.2569	42.15	52.5294
针阔混交林	8550.3289	13.22	32.1841	8662.9524	7.23	42.3362
针叶混交林	111.4055	0.17	24.5533	95.8967	0.08	20.1118
竹类	6.2149	0.01	0.5742	10.6561	0.01	0.9590

注：“—”代表未发现。

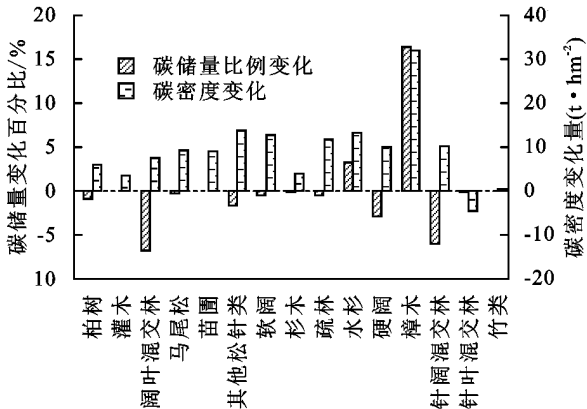


图 1 武汉市环城林带不同群落碳储量和碳密度的变化

3.3.2 不同龄组林分碳储量及其动态 从不同龄组

表 7 武汉市环城林带不同龄组碳储量和碳密度

龄组	2008 年			2018 年		
	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)	碳储量/t	比例/%	碳密度/(t·hm ⁻²)
成熟林	5.8352	0.01	0.5742	18100.9475	15.11	45.4385
近熟林	0.3797	0.00	0.5742	4702.5569	3.93	52.9392
幼龄林	48619.0616	75.15	26.3049	79826.9831	66.64	49.5691
中龄林	16067.1368	24.84	31.9543	17159.4739	14.32	39.1784

在碳密度方面,2008 年碳密度最大的龄组为中龄林(31.954 3 t/hm²),是近熟林和成熟林碳密度的 55.65 倍。相比之下,到 2018 年时各龄组碳密度的情况已发生巨大变化。碳密度最大的龄组已转变为近熟林(52.939 2 t/hm²)。而在 2008 年时碳密度最大的中龄林已成为碳密度相对最小的龄组(39.178 4 t/hm²),其碳密度约为近熟林碳密度的 74%。从变化趋势来看,不同龄组的碳密度均呈现显著增长,其中近熟林和成熟林的碳密度涨幅相对较大。

的情况来看(表 7),2008 年武汉市环城林带森林碳储量主要分布于幼龄林(48 619.061 6 t)和中龄林(16 067.136 8 t),两者之和占总碳储量的 99.99%。近熟林和成熟林中存在的极少量的碳主要是由生长较快的竹类所固定,其碳储量比例极小。到 2018 年时,幼龄林仍然是环城林带中面积最大的龄组,估算结果显示森林碳储量最多龄组的依然是幼龄林。但是,近熟林和成熟林的碳储量已分别增长至 4 702.556 9,18 100.947 5 t,其中成熟林的碳储量比重(15.11%)已经超过中龄林的比重(14.32%)。虽然幼龄林和中龄林的碳储量也呈现显著增长,但其比例则有所下降。

4 讨论

研究测算结果显示,2008 年和 2018 年武汉市环城林带森林碳储量分别为 64 692.413 3,119 789.961 3 t,碳密度分别为 27.389 7,47.243 4 t/hm²。这与李海奎等^[19]基于全国第七次(2004—2008 年)森林资源连续清查数据测算得出的湖北省全省森林碳密度结果(23.76 t/hm²)较为相近。与国内同纬度带的杭州(30.25 t/hm²)^[20]、南京(38.69 t/hm²)的森林碳密

度^[21],以及全国的平均森林碳密度(41.32 t/hm^2)^[22]相比,均处于同一数量级上,表明估算的结果具有一定的科学性。而各研究结果之间存在的偏差部分可能源于以下单个或多个原因的叠加。一是基础数据源的差异,包括估算所使用的数据在统计方式和调查时间节点上的差异;二是研究方法的差异,包括估算方法的差异,以及即便在同一方法下,模型和参数的选择也会存在的差异;三是统计内容的差异,即估算森林碳储量时是否包含林下层、枯落物、根系、土壤等要素。

近 10 a 间武汉市环城林带森林碳储量增幅明显,在碳收支循环过程中扮演“汇”的作用。其森林碳储量和森林碳密度的年均增幅可达 6.35% , 5.60% , 远高于安徽省皖南山区 4.76% , 2.72% 的增长率^[23], 以及江苏、浙江、江西等省份的平均增长率^[24]。这与不同地区森林的龄组分布情况有很大关系,由于环城林带中绝大部分为中、幼龄林,碳储量和碳密度的原始基数较小,因此目前所呈现出的高增长率包含有阶段性特征,这种情况并不一定能长期保持。另外,高增长率与环城林带所采取的集约经营模式也有直接关系。在环城林带的养护监管方面,武汉市林业主管部门组建了专门的管理机构,在资金投入、科技支撑、人力资源配备方面均有较强的保障,为环城林带的持续健康生长创造了客观条件。

从数据显示的结果看,经过 10 a 的生长发育,环城林带各区域间的森林碳储量差异在缩小。究其原因,各区域间在群落类型上的组成差异是 10 a 间森林碳储量比例发生变化的主要原因。如森林碳储量比例涨幅明显的蔡甸区和新洲区,其主要贡献是由于区域范围内存在相对较多的软阔类植被群落,此类树种(组)在水热条件适宜的情况下生长相对较快,对林分碳储量的增长贡献较大。另一方面,群落类型的组成差异也是造成碳储量与碳密度变化幅度不一致的重要原因。除此以外,人为外部干扰因素也造成了统计上的差异,即由于东湖高新区和江夏区的区划范围的变化,使得两者前后两期森林资源二调数据的统计范围也相应有所变动,致使其森林碳储量比例出现了相对剧烈的变化。

虽然武汉环城林带森林碳密度已经取得较大幅度的增长,但与世界平均碳密度(86 t/hm^2)^[18]相比还存在较大差距。根据目前环城林带森林碳储量的龄组分布来看,中、幼龄林的碳储量超过总碳储量的 $4/5$ 。随着林分的逐渐生长以及未成林地、疏林地、无林地陆续转变为森林,环城林带的碳汇水平还将进一步提高。由此可推测,环城林带还处于快速生长发育的阶段,在理论层面还具备较大的固碳潜力。但是,

目前碳储量向少数几个群落类型集中的趋势表明林分质量的稳定性面临一定风险,有必要及时开展森林质量精准提升措施,特别需要加强对中幼龄林的抚育,促进林木生长;另外,在阔叶纯林和阔叶混交林中可以适度补植含碳率更高的针叶树种。对于在剩余宜林荒地新开展的植树造林应该选取合适树种营造针阔混交林,这既能提高环城林带混交林的比重,又能进一步丰富物种多样性,提高林带稳定性。同时,还要继续协调好环城林带沿线的森林碳储量的空间分布,进而有效释放整个环城林带森林的固碳潜能。

5 结 论

经过最近 10 a 的自然生长和持续的人工管护培育,武汉市环城林带森林碳储量和森林碳密度增幅明显。到 2018 年时,森林碳储量和森林碳密度已分别为 $119\,789.961\,3 \text{ t}$ 和 $47.243\,4 \text{ t/hm}^2$,森林碳储量理论价值约为 987.85 万元。10 a 后,环城林带森林碳储量最多的区段一直是江夏区,但各区段之间的差异在进一步缩小。森林碳密度最大的区段已由东西湖区转变为蔡甸区。碳储量存在向少数几个群落类型聚集的趋势,目前樟树的碳储量已在环城林带中占据绝对主体地位。近、成熟林的碳储量和碳密度增幅明显,但是幼龄林依然是环城林带碳储量的主体。综合来看,有必要及时开展森林精准抚育,促进林木生长,进一步释放环城林带的森林固碳潜能,提升环城林带的综合效益。

参考文献:

- [1] 国家林业局.应对气候变化林业行动计划[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [2] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems [J]. Ecological Modelling, 2008, 216(2): 107-113.
- [3] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [4] 祁舒展,姜卫兵,魏家星.我国环城绿带的发展:问题、对策与展望[J].中国城市林业,2017,15(3):11-15.
- [5] 欧阳志云,王如松,李伟峰,等.北京市环城绿化隔离带生态规划[J].生态学报,2005,25(5):965-971.
- [6] 孙诗雨,王云.上海环城绿带百米林带植物群落特征调查[J].上海交通大学学报:农业科学版,2018,36(6):8-14.
- [7] 禹艺娜,王中美.基于 GIS 和 AHP 的贵阳市环城林带生态敏感性评价[J].中国岩溶,2017,36(3):359-367.
- [8] 常二梅,张彦广,张素娟,等.保定市环城林带生态效益分析[J].安徽农业科学,2009,37(1):103,123.

- 酶活性的影响[J].土壤,2017,49(1):19-26.
- [15] 徐学池,苏以荣,王桂红,等.秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J].环境科学,2019,40(6):2912-2919.
- [16] 张浪,周玲红,魏甲彬,等.冬季种养结合对双季稻生长与土壤肥力的影响[J].中国水稻科学,2018,32(3):226-236.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业科学出版社,1999.
- [18] 吕国红,周广胜,周莉,等.土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J].气象与环境学报,2006,22(2):51-55.
- [19] 刘合明,杨志新,刘树庆.不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J].生态环境,2008,17(5):2046-2049.
- [20] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [21] 许轲,唐磊,张洪程,等.不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响[J].农业工程学报,2014,30(13):43-52.
- [22] 章星传,黄文轩,朱宽宇,等.施氮量对不同水稻品种氮肥利用率与农艺性状的影响[J].作物杂志,2018,34(4):69-78.
- [23] 张巍巍,柴永山,孙玉友,等.密度及插秧株数对水稻品种牡丹江 32 生长及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):70-74.
- [24] 徐国伟,陆大克,王贺正,等.干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1225-1237.
- [25] 苏卫,冯跃华,许桂玲,等.秸秆还田与施氮量对喀斯特地区杂交水稻干物质积累和产量的影响[J].核农学报,2019,33(9):1856-1864.
- [26] 汪军,王德建,张刚,等.连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J].水土保持学报,2010,24(5):40-44.
- [27] 袁新民,王周琼.硝态氮的淋洗及其影响因素[J].干旱区研究,2000,17(4):46-52.
- [28] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等.稻草高茬—紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J].农业工程学报,2017,33(23):157-163.
- [29] 侯贤清,李荣,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J].农业机械报,2018,49(9):238-246.
- [30] 王士超,闫志浩,王瑾瑜,等.秸秆还田配施氮肥对稻田土壤活性碳氮动态变化的影响[J].中国农业科学,2020,53(4):782-794.

(上接第 59 页)

- [9] 沈沉沉.上海市环城绿带生态系统服务功能评价及其价值评估[D].上海:华东师范大学,2011.
- [10] 张小全,朱建华,侯振宏.主要发达国家林业有关碳源汇及其计量方法与参数[J].林业科学研究,2009,22(2):285-293.
- [11] 曾伟生,陈新云,蒲莹,等.基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J].林业科学研究,2018,31(1):66-71.
- [12] 胡砚秋,苏志尧,李佩媛,等.林分生物量碳计量模型的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):84-88.
- [13] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J].中国环境科学,2018,38(12):4678-4686.
- [14] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.
- [15] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(6):804-812.
- [16] 曾伟生.云南省森林生物量与生产力研究[J].中南林业调查规划,2005,24(4):1-3.
- [17] 黄从德.四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D].四川雅安:四川农业大学,2008.
- [18] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):734-739.
- [19] 李海奎,雷渊才.中国森林植被生物量和碳储量评估[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [20] Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(4):807-813.
- [21] 王祖华,刘红梅,关庆伟,等.南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(4):18-22.
- [22] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors[J]. Climatic Change,2006,74(1/3):175-189.
- [23] 毛行元,徐志扬.皖南山区森林碳储量及其动态变化[J].森林与环境学报,2018,38(2):185-190.
- [24] 张春华,居为民,王登杰,等.2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J].生态学报,2018,38(5):1739-1749.