城市森林碳汇估算计量*

——以长春市为例

王媛媛[1] 刘可欣[1] 张湘婕[1] 王艺璇[1] 赵俊玮[2] 徐连杰[2]
郭婷婷[3] 王天意[4] 任志彬[5] 代新竹[1]

1 长春市林业科学研究院 长春 130117
2 长春市林业和园林局 长春 130033
3 吉林省林业勘查设计研究院 长春 130022
4 长春市南湖公园 长春 130012
5 中国科学院东北地理与农业生态研究所 长春 130102

摘要：目前，长春市森林碳汇的本底情况仍不清楚，相关评估体系方法不完善，限制了城市向低碳可持续方向发展。运用城市绿地不同类型碳储量估算与郊区林业蓄积量-生物量转化相结合的方法对长春市森林地上及土壤碳储量进行全口径估算，并对不同林型、不同林龄的森林面积及碳储量进行对比分析，以揭示长春市森林植被固碳现状及潜力，为综合提升森林固碳作用提供科学依据。结果表明：1）长春市总森林碳储量为 1 241 万 t，碳密度为 55.03 t·hm^{-2}；目前，长春市中幼龄林面积及碳储量占比较大；乔木林土壤碳储量占比为 89%，其中，阔叶林的土壤碳储量最大。2）长春市森林面积最大的前 5 种林型为杨树林、蒙古栎林、落叶松林、阔叶混交林及樟子松林，碳储量排名相同。3）以杨树、蒙古栎为主的阔叶林碳密度最大，针叶树种中落叶松林、黑松林及樟子松林的碳密度最大，且大部分林型随着林龄增大，碳密度增大。研究结果说明长春市有较大的碳汇潜力，主要林型的碳汇较高，今后应注重多林型搭配，增加针阔混交林的碳密度，加强土壤碳汇，增强长春市森林整体碳汇功能。

关键词：碳汇估算；城市绿地；林型；碳密度；长春市
DOI：10.12169/zgcsly.2024.05.15.0001

Estimation and Measurement of Urban Forest Sink: A Case Study of Changchun City

Wang Yuanyuan[1] Liu Kexin[1] Zhang Xiangjie[1] Wang Yixuan[1] Zhao Junwei[2]
Xu Lianjie[2] Guo Tingting[3] Wang Tianyi[4] Ren Zhibin[5] Dai Xinzhu[1]

(1. Changchun Academy of Forestry Sciences, Changchun 130117, China; 2. Bureau of Forestry and Landscaping, Changchun 130033, China; 3. Jilin Provincial Forest Survey and Design Institute, Changchun 130022, China; 4. South Lake Park, Changchun 130012, China; 5. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: At present, there are no clarifications on the forest sink benchmark in Changchun City, and the unsound scheme and methods to evaluate forest sink have prevented the city towards low-carbon and sustainable development. In this study, different types of carbon storage estimation for urban green spaces

收稿日期：2024-05-15
* 基金项目：吉林省科技厅青年成长项目（20230508130RC）
第一作者：王媛媛（1992-），女，博士，高级工程师，研究方向为森林生态学。E-mail：yuanyuanwang1007@163.com
通信作者：代新竹（1976-），女，硕士，正高级工程师，研究方向为园林植物育种及养护。E-mail：Daixinzhu998@163.com

are used in combination with suburban forest stocks-biomass conversion method to fully estimate forest above-ground and soil carbon storage, and the area and the carbon storage of different forest types and at forest ages are analyzed. It aims to reveal the current status and potential of forest carbon sequestration in Changchun City, and to provide a scientific basis for comprehensively enhancing the carbon sequestration capacity of forests. The results show: 1) The total forest carbon storage in Changchun is 12.41 million t and the carbon density is 55.03 t · ha^{-1}. At present, the area and the carbon storage of young and middle-aged forests are relatively large, while the soil carbon storage in arbor forests accounts for 89%, among which broad-leaved forests have the largest soil carbon storage; 2) The top 5 forest types with the largest area in Changchun are poplar forest, tussah forest, larch forest, broad-leaved mixed forest and camphor pine forest, which are at the same level in terms of carbon storage; and 3) Broad-leaved forests dominated by poplars and tussah have the highest carbon density, and larch, black pine and camphor pine forests have the highest carbon density among conifers. For most forest types, carbon density is increasing with increasing of forest age. The results indicate that Changchun has a large carbon sink potential, and the main forest types have higher carbon sink. In the future, we should pay attention to the combination of forest types, to increase the carbon density of the coniferous and broad-leaved mixed forest and improve the soil carbon sink so as to enhance the carbon sink function of the forests in Changchun.

Keywords: carbon sink estimation; urban green space; forest type; carbon density; Changchun City

城市是碳排放强度最高的区域，尽管其面积只占全球陆域总面积的 3%，却承载了超过 1/2 的全球人口，产生了超过 70% 的碳排放[1-2]。城市绿地是城市生态系统的重要组成部分，也是城市中唯一的直接碳汇途径，对其碳汇能力的监测能够直观反映城市绿地的碳中和作用，促进城市低碳发展[3]。碳储量及其动态变化趋势是评估森林固碳能力、结构和生态效益的重要指标，也是评价碳收支的基本参数[4]。城市森林碳储量估算是提升城市森林碳汇能力的基础，也为政府及科研工作者制定解决应对气候变化问题的对策提供科学依据。

《自然》期刊中研究结果显示，我国陆地生态系统碳汇能力被低估，原因与碳汇方法学密切相关，在以往的碳汇推算方法中，一些森林资源未被统计而导致数值低[5]。准确估算森林植被的碳储量及其碳汇潜力是近年来人们关注的焦点。目前估算主要方法如下：1）样地勘测法，该类方法主要通过大规模的样地勘测，通过测试和计算将取得的实测数据转化，最后通过公式推算出研究区域的碳汇量[6-8]；2）同化量法，该类方法通过仪器测定瞬时进出植物叶片的二氧化碳浓度和水分，利用叶面积乘以植物单位时间净光合速率得到植物固碳量[9]；3）微气象学法，该类方法基于对二氧化碳通量的动态测定，然后将相关数据代入计算公式[10-11]；4）遥感估算法，该类方法将遥感影像和数学模型结合，建立植物固碳量和其影响因素的单因子或多因子的关系，从而对大尺度的城市绿地碳汇量进行估算[12]；5）利用碳汇量估算系统，该类方法基于样地勘测提供的树木信息，模拟树木生长或直接建立树木模型，通过输入研究区域植被信息或通过遥感影像对研究区域的植被进行识别，最后对研究区域的碳汇量进行估算[13]。多省市利用森林资源清查数据，运用生物量扩展因子法[14-15]、蓄积量扩展法[16]等对森林资源碳储量进行估算，但缺乏有效统一的计量技术标准体系。

综上，鉴于城市空间布局的复杂性，本研究采用全面、综合的森林碳汇估算方法，将长春市森林碳储量分为城市绿地及郊区林业资源两部分进行估算，并将两种森林资源进行整合，以达到城市森林碳储量全口径估算；基于建成区绿地面积及森林资源档案统计数据与资料，将城市绿地划分为不同类型，利用碳密度（单位面积碳储量）结合各类型的面积计算城市绿地碳储量[17-18]；充分利用森林资源清查档案采用蓄积量-生物量转化法估算郊区林业资源碳储量，并进一步分析不同林型的碳密度以揭示长春市森林植被固碳现状及潜力，为综合提升森林固碳作用提供科学依据。

1 研究区概况

长春市（43°05′—45°15′N，124°18′—127°05′E）位于中国东北松辽平原腹地，地处京哈与珲乌两条交通线交汇处，西邻四平、松原市，东接吉林市，是吉林省的政治、经济、文化中心，总面积约 20 593.5 km^2。截至 2020 年末，长春市总人口 906.69 万人。长春市气候属于温带大陆性半湿润季风气候类型，冬季严寒漫长，春季干旱多风，夏季温暖短促，秋季晴朗温差大。年平均气温 4.8 ℃，最高 39.5 ℃，最低零下 39.8 ℃。年降雨量为 570.3 mm，集中在 6—8 月。

2 研究方法

本研究采用 2019—2022 年森林资源清查资料，包含森林面积及森林蓄积量资料及住建部城建信息平台长春市建成区绿地面积，数据来源于长春市林业和园林局。

2.1 城市绿地分类方法及碳储量计算

依据 CJJ/T85—2017《城市用地分类与规划建设用地标准》的分类标准，将城市建设用地内的绿地分为公园绿地、防护绿地、附属绿地及广场绿地 4 类；结合长春市建成区不同的绿地类型组成，仅包含公园绿地、防护绿地及附属绿地 3 种。对于长春市建成区城市绿地碳储量的估算，运用不同绿地类型的平均碳密度与绿地面积乘积估算得出，其中，各绿地类型碳密度参考长春市不同类型碳储量以往研究[19]及团队实地调查样地计算得出的碳密度为准，即附属绿地碳密度为 47.2 t · hm^{-2}，公园绿地 54.1 t · hm^{-2}，防护绿地 43.3 t · hm^{-2}。城市绿地碳储量计算公式如下：

$$CSL = \sum_{i=1}^{m} Cd_i \times Fc_i \qquad (1)$$

式（1）中 CSL 为城市建成区内城市绿地总碳储量，单位为 t；Cd_i 为第 i 类型的平均碳密度，单位为 t · hm^{-2}；Fc_i 为第 i 类型城市森林绿地面积，单位为 hm^2，m 为城市建成区绿地类型的数量。

2.2 郊区林业资源碳储量计算

森林资源档案统计数据包含植被类型、龄组、林木蓄积、面积等。郊区林业碳储量的估算主要依据森林资源调查数据，根据不同森林类型运用蓄积量与生物量转化法进行计算，碳含量乘以系数 0.5，参考公式如下：

$$CSF = \sum_{i=1}^{n} (V_i \times a_i + b_i) \times 0.5 \qquad (2)$$

式（2）中，CSF 表示郊区林业资源碳储量，单位为 t；V_i 为第 i 种林分的单位面积蓄积量，单位为 m^3 · hm^{-2}；a_i、b_i 为第 i 种林分的转换因子参数，无量纲；n 为森林类型的数量。

灌木林碳储量计算利用碳密度与森林面积的乘积获得，其中，灌木林碳密度参考方精云等[20]对秦岭淮河以北东部（东北地区）的平均碳密度值 6.57 t · hm^{-2}进行估算。

2.3 土壤碳储量计算

参考中华人民共和国林业行业标准（LY/T 2988—2018）森林生态系统碳储量计量指南中不同森林类型土壤碳密度值，城市绿地参考针阔混交林土壤碳密度值（表 1）。

表 1 不同森林类型土壤碳密度 t · hm^{-2}

森林类型	碳密度
落叶阔叶林	65.5
落叶针叶林	37.9
针阔混交林	62.5
常绿针叶林	67.9
灌木林	33.3

2.4 数据统计分析

利用 Excel 软件进行数据的整理和分析，使用 Origin 2018 软件制图。

3 结果与分析

3.1 城市森林碳汇计量

本研究将城市森林碳储量的评估分为城市绿地、乔木林及灌木林 3 大类。长春市总森林碳储量为 1 241 万 t，碳密度为 55.03 t · hm^{-2}。长春市绿地类型主要包含附属绿地、公园绿地及防护绿地 3 种，长春市建成区绿地总碳储量为 95 万 t，其中，附属绿地、公园绿地和防护绿地分别占比为 48%、32%和 20%。

郊区林业资源分为乔木林及灌木林，其中乔木林总碳储量为 1 142 万 t，是灌木林碳储量的 253 倍；乔木林碳密度均值为 57.34 t · hm^{-2}，是灌木林碳密度的 8.7 倍。乔木林中幼龄林的面积最大，随着龄级增大，森林面积越小，但乔木林

中中龄林及过熟林的碳储量占比较大，合计为48%；其次是近熟林及成熟林，占比 18%～19%；幼龄林的碳储量占比最小，仅为 14%。各龄组碳密度随着林龄增加而增大，过熟林碳密度最大。

表 2　长春市森林面积及碳储量

类别	类型	面积/hm^2	面积占比/%	碳储量/万 t	碳储量占比/%	碳密度/ t · hm^{-2}
城市绿地	附属绿地	9 591. 41	49	45	48	47. 20
	公园绿地	5 688. 63	29	31	32	54. 10
	防护绿地	4 358. 45	22	19	20	43. 40
	合计	19 638. 49		95		48. 36
乔木林	幼龄林	54 235. 21	27	164	14	30. 21
	中龄林	50 647. 10	26	274	24	54. 02
	近熟林	36 270. 63	18	220	19	60. 65
	成熟林	30 043. 55	15	210	18	69. 21
	过熟林	27 911. 52	14	276	24	99. 04
	合计	199 108. 01		1 142		57. 34
灌木林	灌木林地	6 826. 01		4. 5		6. 57
总计		225 572. 51		1 241		55. 03

长春市森林土壤碳储量为 1 388 万 t。其中，89%为乔木林土壤碳储量，是城市绿地土壤碳储量的近 10 倍；灌木林土壤碳储量占比最小，仅为 2%。乔木林土壤碳储量以阔叶林为主，占比为 69%，是针叶林的 5. 75 倍，是落叶针叶林的 11. 5 倍，是针阔混交林的 34. 5 倍（图 1）。

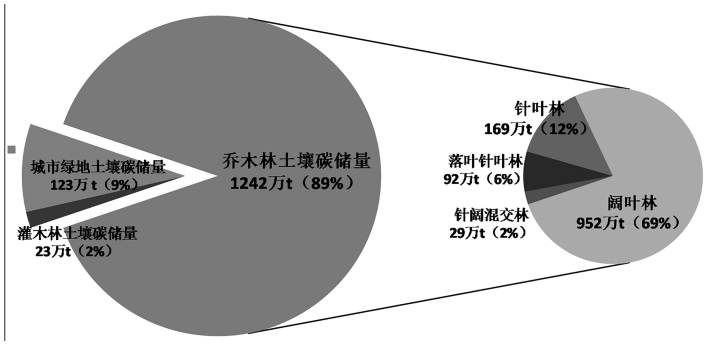


图 1　不同类型森林土壤碳储量及占比

3. 2　不同林型及龄组的森林面积及碳储量

长春市郊区不同林型的森林面积差异较大，面积排名前 5 种林型合计占比为 90. 9%。其中，杨树林面积占比近一半，为 45. 3%，其次是蒙古栎林及落叶松林，占比 12. 2%～14. 8%；阔叶混交林及樟子松林的面积占比接近 10%；针阔混交林占比 2. 3%，其余林型面积占比较小，均在 2%以下（图 2A）。

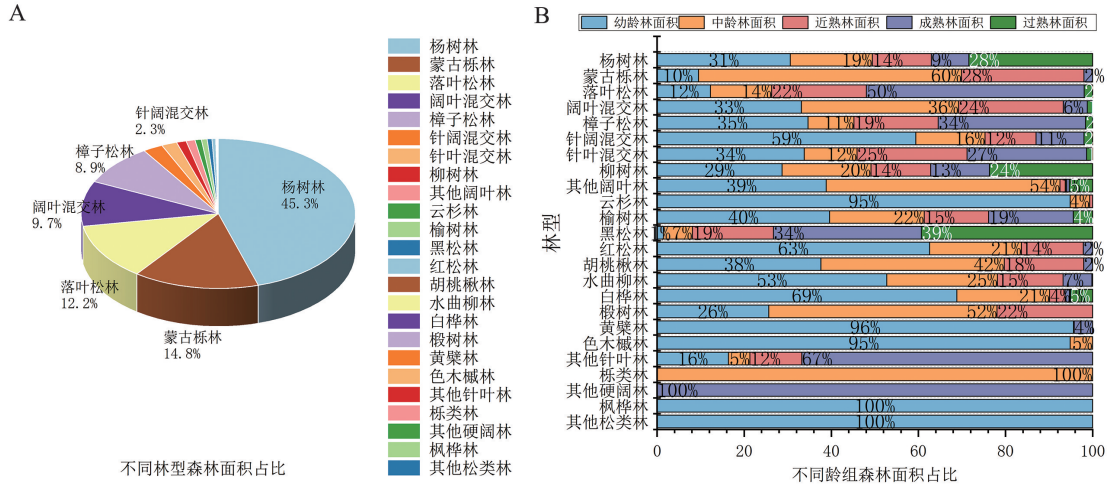


图 2　不同林型及龄组森林面积占比

郊区林业资源各林型不同龄组中幼龄林的森林面积占比较大；除蒙古栎林、落叶松林、黑松林、其他针叶林、栎类林及其他硬阔林外，其他林型的幼龄林面积占比均为 26%以上，其中，针阔混交林、红松林、水曲柳林、白桦林的幼龄林占比均为 50%以上，云杉林、黄檗、色木槭林、枫桦林及其他松树林主要为幼龄林，占比在 95%以上。蒙古栎林、其他阔叶林、椴树林以中龄林为主，占比 50%～60%，栎树林均为中龄林。各林型的近熟林占比均较小，为 10%～28%（部分林型无近熟林）。落叶松林及其他针叶林的成熟林占比 50%～67%，其他硬阔林均为成熟林。各林型中过熟林面积占比 39%以下。杨树林以幼龄林及过熟林为主，阔叶混交林以幼龄林及中龄林为主，樟子松林以幼龄林及成熟林为主（合计占比>50%）（图 2B）。

由图 3 可知，不同森林类型中杨树林碳储量占比最大，为 45.6%，是蒙古栎林、落叶松林、阔叶混交林及樟子松林的 3.2～5.5 倍。碳储量排名前 5 种林型合计占比为 92.6%，且排名顺序与森林面积排名顺序一致。部分林型幼龄林的碳储量占比较大，如云杉林、色木槭林、黄檗林，占比为 77%～90%；其他松类林及枫桦林均为幼龄林。蒙古栎林、椴树林及白桦林中龄林碳储量占比 54%～55%，栎类林均为中龄林。落叶松林及其他针叶林的成熟林碳储量占比 57%～67%，其他硬阔林均为成熟林。杨树林及黑松林的过熟林碳储量占比接近一半，为 47%～49%。

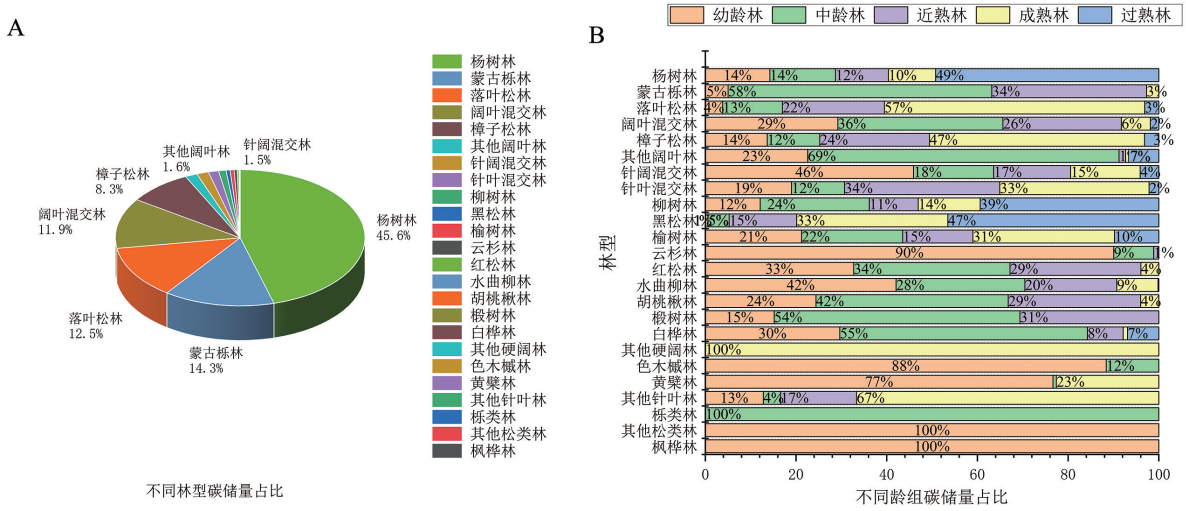


图 3 不同林型及龄组森林碳储量占比

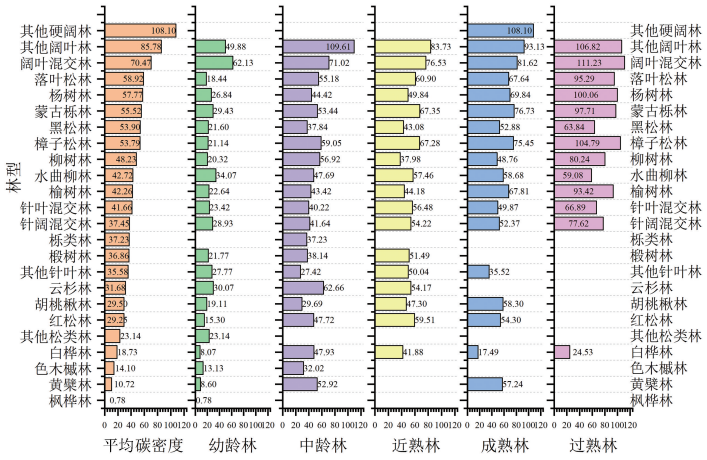


图 4 不同林型及龄组森林碳密度/（t·hm^{-2}）

3.3 不同林型及龄组的碳密度

由图 4 可知，不同林型森林碳密度存在显著差异，总的来看，硬阔林碳密度最高，为 108.1 t·hm^{-2}（以成熟林为主）；阔叶混交林及

其他阔叶林的碳密度均高于 70 t · hm^{-2}。阔叶林中杨树林及蒙古栎林，针叶林中落叶松林、黑松林及樟子松林的碳密度均在 50~60 t · hm^{-2}；其次是柳树林、水曲柳林、榆树林等阔叶林及针叶混交林碳密度为 40~50 t · hm^{-2}。从阔叶混交林到针阔混交林的各林型均表现为随着龄组越大，碳密度越高的形势。

4　讨论

4.1　城市森林碳储量计量

以往林业资源碳汇估算采用以大量森林资源清查数据为依据估算森林生态系统碳储量的方法[21]，且多以乔木林为主，本研究中不仅体现乔木林的生物量碳储量，也将灌木林及土壤碳储量考虑进去。研究表明灌木林地碳储量较少，仅为乔木林碳储量的 1/253，碳密度也仅占乔木林的近 1/9，固碳能力有限。但有研究表明，我国灌木林地面积处于不断增长的过程中[5]，灌木地上枝条再生能力强，且耐性较强，易繁殖、生长快，对于森林固碳有一定作用[22]。

本研究区别于以往的城市碳汇估算，不仅有郊区林业资源碳储量，也将城市内绿地碳储量进行评估。我国不同地区的乔木林碳储量及碳密度大小存在明显差异，这是与其区域面积、气候条件、地理分布以及林业政策和社会发展状况的不同有关。本研究结果表明，长春市森林碳储量 1 241 万 t，森林碳密度为 55.03 t · hm^{-2}，参考李奇等[23]对中国乔木林碳储量的计算结果，长春市碳密度略低于吉林省平均碳密度（57.26 t · hm^{-2}），但高于全国平均水平（31.90 t · hm^{-2}）。本研究在计算地上碳储量的同时，也考虑到土壤碳储量做到全口径的森林碳储量评估。研究表明，城市森林土壤碳储量为 1 388 万 t，土壤碳储量高于森林地上碳储量，说明土壤碳汇是森林碳汇的重要组成部分，值得更加深入研究。乔木林地土壤碳储量远高于城市绿地及灌木林地土壤碳储量，且以阔叶林为主，未来应加强对于乔木阔叶林的森林管理。

4.2　不同类型森林碳汇能力

本研究表明，郊区林业资源中以杨树林、蒙古栎林为主的阔叶林及阔叶混交林面积及碳储量占比高达 70%。针叶林中落叶松林及樟子松林的碳储量较高，占比 20.8%。碳储量排名前 5 的森林类型与森林面积的排序一致，说明森林碳储量主要受森林面积的影响，而碳密度更能反映树种的固碳能力[16]。本研究表明，硬阔林，阔叶林及阔叶混交林的固碳能力最强，以杨树林及蒙古栎林为主。阔叶树种的高固碳能力可能与其叶片有较高的光合生产力有关，随着复叶面积增大，其水分传导率（茎水力导度和整枝水力导度）显著增加使得光合同化速率增大[24]。本研究中的高固碳能力树种与樊登星等[25]及陈晓凤[26]对北京市森林固碳的研究结果一致，符合乔木树种的碳汇能力排序，即阔叶树>针叶树，落叶树>常绿树，速生树>慢生树的规律[27]，但 zhang 等[28]对浙江省 4 种生态公益林碳储量估算的结果表明，常绿阔叶林较针叶林更具有抵消二氧化碳排放的巨大潜力，说明南北方不同地区可能存在差异。

本研究表明，中龄林及幼龄林的面积占比达到 53%，近熟林到过熟林随着龄级增大面积减小，占比从 18%降到 14%；符合我国森林资源以幼龄林为主，处于高生长阶段的基本情况[29]。但以往对于不同龄级的碳密度研究存在争议，有学者认为林龄越大碳密度越高[25]，也有学者认为老龄林的碳汇能力较弱[5,30]。本研究中成熟林较中幼龄林的碳密度高，这可能与成熟林具有较多的大乔木且蓄积量大有关。但森林的碳汇能力是有限度的，不可能持续增长[31]，而是在达到峰值后随林龄增加衰退明显[32]。幼、中龄林的固碳速率相对较快[33]，随着幼、中龄林不断发育成熟向成熟林及过熟林发展，森林的碳储量及碳密度也随之提高。

5　结论

长春市森林碳密度位于全国前列，森林资源以幼龄林为主，处于高生长阶段，具有较大的森林碳汇潜力。以杨树林及蒙古栎林为主的阔叶林是城市森林碳储量的主要贡献者，且随着林龄增大，森林碳储量随之升高。城市森林土壤碳储量是森林碳汇的重要组成部分，未来应予以重视。

参考文献

[1]DIBBLE A C, WHITE R H, LEBOW P K. Combustion

characteristics of north-eastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus non-invasive plants[J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(4): 426.

[2]张桂莲,仲启铖,张浪.面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究[J].风景园林,2022,29(5):12-16.

[3]张桂莲,邢璐琪,张浪,等.城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J].园林,2022,39(1):4-9,49.

[4]张峰,彭祚登.北京市森林碳储量和碳汇经济价值研究[J].林业资源管理,2021(6):52-58.

[5]WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586(7831): 720-723.

[6]聂道平,徐德应,王兵.全球碳循环与森林关系的研究:问题与进展[J].世界林业研究,1997,10(5):33-40.

[7]李意德,曾庆波,吴仲民,等.我国热带天然林植被 C 贮存量的估算[J].林业科学研究,1998,11(2):156-162.

[8]王迪生.基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D].北京:北京林业大学,2010.

[9]董延梅.杭州花港观鱼公园 57 种园林树木固碳效益测算及应用研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.

[10]刘允芬,宋霞,孙晓敏,等.千烟洲人工针叶林 CO_2 通量季节变化及其环境因子的影响[J].中国科学(D 辑:地球科学),2004,34(S2):109-117.

[11]王文杰,祖元刚,王辉民,等.基于涡度协方差法和生理生态法对落叶松林 CO_2 通量的初步研究[J].植物生态学报,2007,31(1):118-128.

[12]孙成明,孙政国,刘涛,等.基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型[J].生态学报,2015,35(4):1079-1085.

[13]殷利华,杭天,徐亚如.武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J].南方建筑,2020(3):41-48.

[14]罗玉兰,张冬梅,张浪,等.基于“双碳”目标的城市绿化树种筛选及配置研究:以上海世博公园为例[J].园林,2022,39(1):25-32.

[15]燕腾,彭一航,王效科,等.西南 5 省市区森林植被碳储量及碳密度估算[J].西北林学院学报,2016,31(4):39-43.

[16]任云卯,温志勇,王敏男,等.北京市森林碳汇能力评价[J].北京林业大学学报,2023,45(12):108-119.

[17]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.

[18]LIU C F, LI X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(2): 121-128.

[19]张丹.城市化背景下城市森林结构与碳储量时空变化研究:以长春市为例[D].哈尔滨:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2015.

[20]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.

[21]马学威,熊康宁,张俞,等.森林生态系统碳储量研究进展与展望[J].西北林学院学报,2019,34(5):62-72.

[22]曹嘉瑜,刘建峰,袁泉,等.森林与灌丛的灌木性状揭示不同的生活策略[J].植物生态学报,2020,44(7):715-729.

[23]李奇,朱建华,冯源,等.中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J].气候变化研究进展,2018,14(3):287-294.

[24]郑兴波,于大炮,王安志,等.长期监测与野外控制试验揭示温带典型森林结构、功能及演变规律[J].中国科学院院刊,2019,34(8):948-961.

[25]樊登星,余新晓,岳永杰,等.北京市森林碳储量及其动态变化[J].北京林业大学学报,2008,30(S2):117-120.

[26]陈晓凤.北京市乔木林碳储量及其固碳潜力研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[27]王敏,石乔莎.城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究[J].中国城市林业,2015,13(4):1-5.

[28]ZHANG J, GE Y, CHANG J, et al. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 245(1/2/3): 64-75.

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

[30]徐浩,岳超,朴世龙.科学规划植树造林把握森林碳汇对“碳中和”战略的服务窗口期[J].中国科学:地球科学,2023,53(12):3010-3014.

[31]BALDOCCHI D, PENUELAS J. The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems[J]. Global Change Biology, 2019, 25(4): 1191-1197.

[32]朴世龙,岳超,丁金枝,等.试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J].中国科学:地球科学,2022,52(7):1419-1426.

[33]李轶涛.山西省森林生态系统碳汇特征及提升措施[J].山西林业,2022(4):10-11.