深圳建成区城市绿地乔木层碳密度估算及分布特征*

陈永翀 史正军 曾 伟 袁峰均 王雨佳 曾 畅

深圳市仙湖植物园 广东深圳城市生态系统国家定位观测研究站 广东深圳 518004

摘要：为揭示深圳建成区城市绿地乔木层碳密度的空间分布特征及影响因素，基于树木异速生长模型对深圳各行政区不同城市绿地类型及不同龄林碳密度进行估算与分析。结果表明：1）深圳城市绿地乔木层平均碳密度为（4.494±0.345）kg·m^{-2}；不同乔木林龄组碳密度存在较大差异，其中成熟林碳密度最高，近熟林、中龄林次之，幼龄林最低。2）不同类型的绿地乔木层碳密度差异较大，公园绿地乔木层平均碳密度最高（5.436±0.498 kg·m^{-2}），附属绿地次之（2.866±0.323 kg·m^{-2}），广场绿地最低（2.230±0.405 kg·m^{-2}）。3）不同行政区绿地乔木层碳密度也存在较大差异，福田区、宝安区、罗湖区城市绿地乔木层的平均碳密度较高，光明区、龙岗区及龙华区相对较低。4）平均胸径、平均树高、林分密度、郁闭度和平均冠幅对城市绿地的乔木层碳密度影响显著（$P<0.01$），而材积密度与乔木层碳密度之间影响较弱。因此，通过在碳密度较低的绿地内适度增加乔木种植密度和大冠幅乔木，将会有效促进深圳市城市绿地固碳能力的提升。

关键词：城市绿地；乔木层碳密度；生物量模型；深圳市

DOI：10.12169/zgcsly.2024.04.19.0002

Estimation and Distribution Characteristics of Carbon Density in the Arbor Layer of Urban Green Spaces in Shenzhen's Built Area

Chen Yongchong Shi Zhengjun Zeng Wei Yuan Fengjun Wang Yujia Zeng Chang

(Fairylake Botanical Garden/National Positioning Observation and Research Station of Shenzhen Urban Ecosystem, Shenzhen 518004, Guangdong, China)

Abstract: In order to reveal the spatial distribution characteristics of and influencing factors to carbon density in the arbor layer of urban green spaces in Shenzhen's built areas, this study estimates and analyzes the carbon density of the urban green spaces of different types and the forests of different age in different administrative districts of Shenzhen based on the tree anisotropic growth model. The results show that: 1) The average carbon density of the arbor layer in Shenzhen's urban green spaces is 4.494±0.345 kg·m^{-2}, and there are large differences in the carbon density of different age groups of arbor forest, with mature forests having the highest carbon density, followed by near-mature forests and middle-aged forests, and young forests having the lowest; 2) The carbon density of the arbor layer varies greatly among different types of green spaces, with the highest average carbon density in parks (5.436±0.498 kg·m^{-2}), followed by ancillary green spaces (2.866±0.323 kg·m^{-2}), and the lowest in plaza green spaces (2.230±0.405 kg·m^{-2}); 3) There are also large differences in the carbon density of the green space's

收稿日期：2024-04-19

*基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFE0193200）；深圳市科技计划项目（KCXST20221021111211025）；深圳城管科研项目（202018）；仙湖基金项目（FLSF-2021-04）

第一作者：陈永翀（1997-），男，硕士，助理工程师，研究方向为园林园艺、城市绿地碳汇。E-mail：1026362702@qq.com

通信作者：史正军（1976-），男，博士，教授级高级工程师，研究方向为城市生态监测评价及退化生态修复。E-mail：shizhengjun@szbg.ac.cn

arbor layer in different administrative districts, and the average carbon density of the arbor layer in the urban green spaces in Futian, Bao'an, and Luohu districts are higher, while that in Guangming, Longgang, and Longhua districts is relatively lower; and 4) The average diameter at breast height (DBH), average tree height (ATH), stand density (SD), degree of depression (DD) and average crown width (ACS) have a significant effect on the carbon density of the arbor layer in the urban green space ($P<0.01$) whereas timber volume density (TPD) has the lower effect on the carbon density of the arbor layer. Therefore, moderately increasing the planting density of trees and the number of large-canopy trees in green spaces with low carbon density will effectively enhance the carbon sequestration capacity of urban green spaces in Shenzhen.

Keywords: urban green space; carbon density in arbor layer; biomass modeling; Shenzhen

以全球变暖为主要特征的气候变化不断加剧，温室气体排放与温室效应已受到全球各国的关注[1-3]。城市绿地作为城市碳汇的唯一直接途径，在降低城市温室气体、维持城市气候、调节碳平衡及稳定生态系统等方面具有重要作用[4-5]。在当前应对气候变化背景下，城市作为主要的人为碳源而受到广泛关注，然而涉及城市绿地的碳吸存和固碳功能未得到充分的重视[6-8]。

近年来，针对城市绿化碳储量及不同树种的固碳能力的研究逐渐增多[9-11]。然而，针对不同城市类型和城市绿地管理水平的乔木层碳储量研究，尤其是对园林绿化优势树种碳储量研究仍需加强[12-14]。此外，城市绿地群落的乔木所占比重、郁闭度、林分结构等指标均不同于传统森林，被广泛应用于传统林业碳储量计算的材积法估算城市绿地乔木层碳储量可能存在一定的局限性。本研究基于异速生长模型估算深圳城市绿地乔木层碳储量，对比分析不同行政区域、不同绿地类型、不同乔木林龄组类型乔木碳密度等指标，探究城市绿地乔木林碳密度的空间分布特征及其影响因素，以便为深圳城市绿地的管理与发展提供理论支撑。

1 研究区概况

广东省深圳市（113° 46′—114° 37′ E，22°27′—22°52′N）位于北回归线以南，总面积 1 997.47 km^2[15]，属于南亚热带海洋性季风气候，全年气候温和，日照时间长[16]。常年平均气温 22.4 ℃，最低气温为 0.2 ℃，最高气温为 38.7 ℃。雨量充沛，年降雨量为 1 933.3 mm，年相对湿度 74%[17-18]。该地区原生带性植被类型为热带季雨林型，园林绿化植物多为南亚热带季风常绿阔叶植物[19]。研究区为深圳市下辖的 9 个行政区和 1 个新区（福田区、罗湖区、盐田区、南山区、宝安区、龙岗区、龙华区、坪山区、光明区及大鹏新区）的园林绿地（公园绿地、附属绿地及广场绿地）。

2 研究方法

2.1 样地选取与调查

根据城市绿地的不同使用性质，深圳城市建成区典型园林绿地主要包括公园绿地（含城市公园、社区公园及自然公园）、附属绿地（含居民区附属绿地、道路附属绿地及单位附属绿地）及广场绿地（广场用地）。通过分层随机抽样选取具有一定代表性的绿地植被群落作为调查样地。

在初选的城市绿地中，选择植被覆盖较好、且较为连续的区域，在该区域所在的 100 m×100 m 范围内选取 3 块 25 m×25 m 样地（绿地覆盖面积应不少于 70%）。样地原则上从西南角顶点开始，顺时针连续选择 3 块（可横排、竖排或折线排列，图 1）。于 2022 年 7—8 月，按照每木调查方法记录各样地内乔木的树种、数量、树高（*H*）、胸径（*DBH*）等指标。

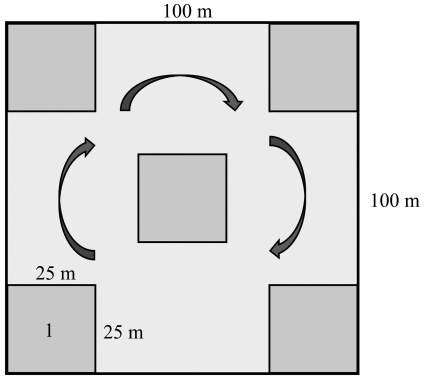


图 1 城市绿地调查样地设置

2.2　城市绿地乔木层碳密度计算方法

2.2.1　城市绿地不同树种的生物量估算

乔木碳储量是由其积累的生物量决定的，选择合适的生物量估算模型对于乔木碳储量的核算至关重要。本研究基于异速生长模型估算乔木生物量[20-23]，即：

$$W = aD^b \quad (1)$$

$$\text{或 } W = a(D^2H)^b \quad (2)$$

式（1）~（2）中：W 表示整株或某器官的生物量（kg）；D 表示胸径（cm）；H 为树高（m）；a 表示与乔木密度相关的系数；b 表示与生长环境相关的系数。

梳理现有的生物量相关研究，筛选出适宜深圳地区的相关乔木树种方程构建其生物量模型（表 1），若无相应的参考生物量模型，则采用软阔或硬阔类树种（表 2）通用生物量模型。

表 1　城市绿地多乔木树种生物量模型

树种	地上生物量	地下生物量	全树生物量	建模地区
菠萝蜜（*Artocarpus heterophyllus*）[24]	$W_S=0.184D^{1.810}H^{0.427}$ $W_B=0.473D^{0.934}H^{0.473}$ $W_L=0.270D^{0.738}H^{0.701}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.201D^{1.399}H^{0.563}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	海南
大叶相思（*Acacia auriculiformis*）[25]	$W_S=127.883(D^2H)^{-0.919}$ $W_B=493.034(D^2H)^{-0.148}$ $W_L=961.596(D^2H)^{-0.241}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=300.40736(D^2H)^{-0.103}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	福建
杜英（*Elaeocarpus decipiens*）[26]	$W_{地上}=1.5\times10^{-4}(D^2H)^{1.288}$	$W_{地下}=0.01504(D^2H)^{1.101}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	上海
枫香树（*Liquidambar formosana*）[27]	$W_{地上}=0.089D^{2.256}H^{0.304}$	$W_{地下}=0.12052D^{2.42178}H^{-0.404}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	全国
荔枝（*Litchi chinensis*）[24]	$W_S=0.184D^{2.170}H^{0.078}$ $W_B=0.473D^{2.672}H^{-1.764}$ $W_L=0.270D^{3.831}H^{-3.450}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.201D^{3.227}H^{-1.989}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	海南
龙眼（*Dimocarpus longan*）[28]	$W_{地上}=0.541D^{1.327}H^{0.927}$	$W_{地下}=0.049D^{0.811}H^{2.092}$	$W=0.576D^{1.121}H^{1.238}$	海南
窿缘桉（*Eucalyptus exserta*）[29]	$W_S=0.039(D^2H)^{0.900}$ $W_B=0.069(D^2H)^{1.004}$ $W_L=0.007(D^2H)^{0.798}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$		$W=0.049(D^2H)^{0.895}$	广东
马占相思（*Acacia mangium*）[30]	$W_{地上}=0.014D^{2.530}H^{0.554}$	$W_{地下}=0.159D^{2.086}H^{-0.211}$	$W=0.043D^{2.431}H^{0.360}$	海南
木姜子（*Litsea pungens*）[31]	$W_S=0.107+0.025(D^2H)$ $W_B=-0.013(D^2H)^{0.9054}$ $W_L=5.456\times10^{-4}(D^2H)^{1.666}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.014(D^2H)^{0.861}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	云南
山乌桕（*Triadica cochinchinensis*）[32]	$W_S=0.855(D^2H)^{0.973}$ $W_B=0.916(D^2H)^{1.014}$ $W_L=0.957(D^2H)^{0.803}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.930(D^2H)^{0.953}$	$W=0.900(D^2H)^{0.961}$	广东
杉木（*Cunninghamia lanceolata*）[23]	$W_S=0.047(D^2H)^{0.825}$ $W_B=0.018(D^2H)^{0.742}$ $W_L=0.067(D^2H)^{0.519}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.330(D^2H)^{0.409}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	广东
尾叶桉（*Eucalyptus urophylla*）[33]	$W_S=0.013(D^2H)^{1.034}$ $W_B=2.650\times10^{-4}(D^2H)^{1.208}$ $W_L=1.430\times10^{-4}(D^2H)^{1.157}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.006(D^2H)^{0.916}$	$W=0.020(D^2H)^{1.018}$	广西
无瓣海桑（*Sonneratia apetala*）[34]	$W_S=1.186(D^2H)^{1.038}/1000$ $W_B=0.761(D^2H)^{1.115}/1000$ $W_L=1.886(D^2H)^{0.283}/1000$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.818(D^2H)^{1.077}/1000$	$W=1.563(D^2H)^{1.038}/1000$	广东
樟（*Camphora officinarum*）[23]	$W_S=0.063(D^2H)^{0.863}$ $W_B=0.009(D^2H)^{0.910}$ $W_L=0.069(D^2H)^{0.506}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L+W_P$	$W_{地下}=1.000\times10^{-4}(D^2H)^{1.4835}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	湖南

表 1(续)

树种	地上生物量	地下生物量	全树生物量	建模地区
紫薇(*Lagerstroemia indica*)[35]	$W_S=2.067+0.020(D^2H)$ $W_B=1.035+0.008(D^2H)$ $W_L=0.393+0.001(D^2H)$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=1.401+0.006(D^2H)$	$W=0.895+0.035(D^2H)$	贵州
醉香含笑(*Michelia macclurei*)[36]	$W_S=0.0135(D^2H)^{0.771}$ $W_B=4.962\times10^{-5}(D^2H)^{1.539}$ $W_L=6.760\times10^{-5}(D^2H)^{1.352}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.006(D^2H)^{1.014}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	广西
软阔类[23]	$W_S=0.070(D^2H)^{0.825}$ $W_B=0.027(D^2H)^{0.721}$ $W_L=0.013(D^2H)^{0.618}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.036\ (D^2H)^{0.753}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	全国
硬阔类[23]	$W_S=0.055(D^2H)^{0.863}$ $W_B=0.016(D^2H)^{0.874}$ $W_L=0.015(D^2H)^{0.744}$ $W_{地上}=W_S+W_B+W_L$	$W_{地下}=0.031(D^2H)^{0.827}$	$W=W_{地上}+W_{地下}$	全国

注：W_S表示地上部分的树干生物量；W_B表示地上部分的枝生物量；W_L表示地上部分的叶生物量；$W_{地上}$表示地上部分生物量；$W_{地下}$表示地下部分生物量；W 表示整株生物量。

表 2 软阔类与硬阔类树种分类

树种类型	树种
软阔类树种	澳洲鸭脚木(*Schefflera macrostachya*)、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)、垂叶榕(*Ficus benjamina*)、垂枝红千层(*Melaleuca viminalis*)、大果直叶桐(*Attalea macrocarpa*)、对叶榕(*Ficus hispida*)、高山榕(*Ficus altissima*)、光荚含羞草(*Mimosa bimucronata*)、海杧果(*Cerbera manghas*)、海桑(*Sonneratia caseolaris*)、红花玉蕊(*Barringtonia acutangula*)、黄葛树(*Ficus virens*)、黄金香柳(*Melaleuca bracteata* 'Revolution Gold')、幌伞枫(*Heteropanax fragrans*)、鸡蛋花(*Plumeria rubra*)、鸡冠刺桐(*Erythrina crista-galli*)、蓝花楹(*Jacaranda mimosifolia*)、楝(*Melia azedarach*)、楝叶吴萸(*Tetradium glabrifolium*)、罗汉松(*Podocarpus macrophyllus*)、旅人蕉(*Ravenala madagascariensis*)、毛萼紫薇(*Lagerstroemia balansae*)、美丽异木棉(*Ceiba speciosa*)、木棉(*Bombax ceiba*)、南洋楹(*Falcataria falcata*)、菩提树(*Ficus religiosa*)、朴树(*Celtis sinensis*)、秋枫(*Bischofia javanica*)、散尾葵(*Dypsis lutescens*)、水石榕(*Elaeocarpus hainanensis*)、糖胶树(*Alstonia scholaris*)、铁冬青(*Ilex rotunda*)、土蜜树(*Bridelia tomentosa*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)、异叶南洋杉(*Araucaria heterophylla*)、银合欢(*Leucaena leucocephala*)、银桦(*Grevillea robusta*)、印度榕(*Ficus elastica*)、钟花樱(*Prunus campanulata*)、竹叶榕(*Ficus stenophylla*)
硬阔类树种	白兰(*Michelia × alba*)、白千层(*Melaleuca cajuputi*)、大花紫薇(*Lagerstroemia speciosa*)、大王椰(*Roystonea regia*)、吊瓜树(*Kigelia africana*)、非洲楝(*Khaya senegalensis*)、佛肚竹(*Bambusa ventricosa*)、凤凰木(*Delonix regia*)、复羽叶栾(*Koelreuteria bipinnata*)、宫粉羊蹄甲(*Bauhinia variegata*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、海南蒲桃(*Syzygium hainanense*)、海枣(*Phoenix dactylifera*)、红花羊蹄甲(*Bauhinia × blakeana*)、红枝蒲桃(*Syzygium rehderianum*)、狐尾椰子(*Wodyetia bifurcata*)、黄花风铃木(*Handroanthus chrysanthus*)、黄槐决明(*Senna surattensis*)、黄槿(*Taliparitilia tiliaceum*)、黄皮(*Clausena lansium*)、火焰树(*Spathodea campanulata*)、假槟榔(*Archontophoenix alexandrae*)、江边刺葵(*Phoenix roebelenii*)、金黄栉铃木(*Tabebuia aurea*)、腊肠树(*Cassia fistula*)、榄仁(*Terminalia catappa*)、龙柏(*Juniperus chinensis* 'Kaizuca')、龙血树(*Dracaena draco*)、栾(*Koelreuteria paniculata*)、麻楝(*Chukrasia tabularis*)、杧果(*Mangifera indica*)、毛果杜英(*Elaeocarpus rugosus*)、木樨(*Osmanthus fragrans*)、柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)、女王椰子(*Syagrus romanzoffiana*)、蒲葵(*Livistona chinensis*)、蒲桃(*Syzygium jambos*)、槭叶瓶干树(*Brachychiton acerifolius*)、秋茄树(*Kandelia obovata*)、人面子(*Dracontomelon duperreanum*)、珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)、水翁蒲桃(*Syzygium nervosum*)、丝葵(*Washingtonia filifera*)、斯里兰卡天料木(*Homalium ceylanicum*)、台湾相思(*Acacia confusa*)、桃花心木(*Swietenia mahagoni*)、铁刀木(*Senna siamea*)、小叶榄仁(*Terminalia neotaliala*)、小叶紫薇(*Lagerstroemia parviflora*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)、银叶树(*Heritiera littoralis*)、印度黄檀(*Dalbergia sissoo*)、鱼尾葵(*Caryota maxima*)、红花黄钟木(*Tabebuia rosea*)、竹节树(*Carallia brachiata*)、紫花风铃木(*Handroanthus impetiginosus*)、紫檀(*Pterocarpus indicus*)

2.2.2 城市绿地不同树种碳储量和碳密度核算

根据《森林生态系统碳储量计量指南》(国家林业和草原局)中林分生物质碳库的碳储量计量方法进行城市绿地乔木层碳储量的核算[37]。乔木层各树种的总碳储量计算公式为：

$$C_{总}=C_{地上}+C_{地下} \quad (3)$$

式(3)中：$C_{总}$表示城市绿地样地乔木总碳储量(t)；$C_{地上}$表示城市绿地样地乔木地上部分生物质碳储量(t)；$C_{地下}$表示城市绿地样地乔木地下部分生物质碳储量(t)。

乔木层碳储量按照城市绿地样地各乔木树种的单位面积生物量、乔木树种含碳率及绿地样地单位面积进行核算，乔木树种含碳率采用《森林生态系统碳储量计量指南》（国家林业和草原局）中树种含碳率测定的结果，若结果中无该乔木树种，则为联合国政府间气候变化专门委员会的缺省值 50.0%[37]（表 3）。计算公式为：

$$C = B \times CF \times S \tag{4}$$

式（4）中：C 表示城市绿地样地地上部分或地下部分生物质碳储量（t）；B 表示城市绿地样地中乔木树种的单位面积生物量（$t \cdot m^{-2}$）；CF 表示乔木树种的含碳率（%）；S 表示城市绿地样地面积（m^2）。

根据城市绿地各样地乔木组成、总碳储量及样地面积等属性参数计算样地碳密度。计算公式为：

$$D = C_{总} \times 1\,000 / S \tag{5}$$

式（5）中：D 表示城市绿地各样地碳密度（$kg \cdot m^{-2}$）；$C_{总}$表示城市绿地样地乔木总碳储量（t）；S 表示城市绿地样地面积（m^2）。

表 3　研究区城市绿地乔木树种含碳率

树种	含碳率/%	来源
尾叶桉	52.5	LY/T 2988-2018[37]
龙柏	51.0	
枫香树	49.7	
银桦	49.1	
麻楝	48.5	
非洲楝	48.5	
楝	48.5	
其他树种	50.0	

2.3　数据处理

利用 SPSS 26.0 中的 Spearman 模块分析各乔木特征指标（平均胸径、平均树高、材积密度、平均冠幅、样地郁闭度及林分密度）与样地碳密度的相关性。

3　结果与分析

3.1　深圳城市绿地乔木层碳密度分布特征

深圳市城市绿地乔木层平均碳密度为（4.494±0.345）$kg \cdot m^{-2}$。深圳市 10 个区的城市绿地乔木层平均碳密度差异很大（图 2），其中福田区（7.986 $kg \cdot m^{-2}$）和宝安区（6.743 $kg \cdot m^{-2}$）碳密度较高，罗湖区（5.809 $kg \cdot m^{-2}$）与南山区（4.274 $kg \cdot m^{-2}$）次之，盐田区（3.271 $kg \cdot m^{-2}$）、坪山区（3.231 $kg \cdot m^{-2}$）、大鹏新区（3.021 $kg \cdot m^{-2}$）、光明区（2.584 $kg \cdot m^{-2}$）、龙岗区（2.489 $kg \cdot m^{-2}$）、龙华区（2.239 $kg \cdot m^{-2}$）相对较小。这说明福田区乔木层碳密度最高，龙华区最低，且福田区乔木层碳密度是龙华区的近 4 倍。

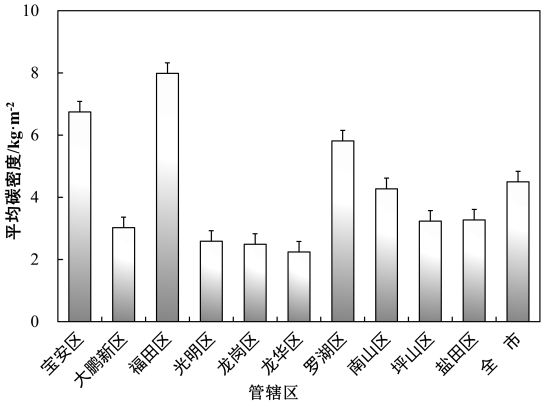


图 2　深圳市各区城市绿地乔木层平均碳密度

3.2　不同绿地类型乔木层碳密度差异

不同绿地类型的乔木层碳密度存在较大差异（图 3）：公园绿地（5.436±0.498 $kg \cdot m^{-2}$）与另外两个绿地存在显著差异（$P<0.01$）；附属绿地（2.866±0.323 $kg \cdot m^{-2}$）和广场绿地（2.230±0.405 $kg \cdot m^{-2}$）之间差异不显著，且公园绿地乔木层平均碳密度是广场绿地的近 2.5 倍。造成 3 种类型城市绿地平均碳密度差异的主要原因可能是公园绿地的乔木树种占据了较大比例，而广场绿地乔木树种所占比例较小。宝安区、龙岗区、罗湖区、南山区、大鹏新区、福田区、光明区及盐田区均以公园绿地的乔木层平均碳密度为最高，而仅龙华区和坪山区分别以广场绿地和附属绿地乔木层平均碳密度为最高，造成各区不同绿地类型平均碳密度差异的主要原因是各区绿地类型内乔木树种构成和树龄不同。

在各区公园绿地中，宝安区的乔木层平均碳密度（9.347 $kg \cdot m^{-2}$）最高，龙华区（2.231 $kg \cdot m^{-2}$）最低，且宝安区公园绿地乔木层平均碳密度是龙华区的 4 倍。在各区附属绿地中，福田区的乔木层平均碳密度（4.514 $kg \cdot m^{-2}$）最高，大鹏新区（1.593 $kg \cdot m^{-2}$）最低，且福田区乔木层平均碳密度是大鹏新区的近 3 倍。在各区广场绿地中，

南山区的乔木层平均碳密度（3.678 kg·m^{-2}）最高，龙岗区（0.452 kg·m^{-2}）最低，且南山区乔木层平均碳密度是龙岗区的 8 倍。

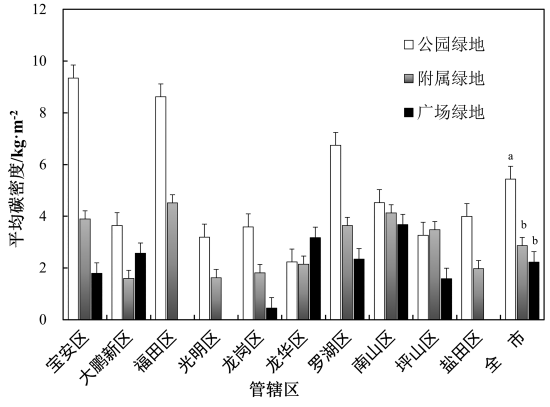


图 3 深圳市各区不同城市绿地类型平均碳密度分布

3.3 不同龄林碳密度分布特征

深圳城市绿地不同龄林碳密度也存在较大差异（图 4），表现为成熟林碳密度（5.924 ± 0.639 kg·m^{-2}）>近熟林（5.297±0.762 kg·m^{-2}）>中龄林（2.682±0.285 kg·m^{-2}）>幼龄林（1.806± 1.143 kg·m^{-2}）。

分析深圳市各区城市绿地不同龄林碳密度（图 4）发现：罗湖区（10.948 kg·m^{-2}）和福田区（10.051 kg·m^{-2}）城市绿地成熟林平均碳密度最高，龙华区（2.507 kg·m^{-2}）最低，且罗湖区和福田区成熟林平均碳密度是龙华区的 4 倍；各区近熟林平均碳密度中，宝安区（9.382 kg·m^{-2}）最高，龙岗区（1.518 kg·m^{-2}）最低，且宝安区近熟林平均碳密度是龙岗区的 6 倍；各区中龄林平均碳密度中，福田区（5.159 kg·m^{-2}）最高，光明区（0.602 kg·m^{-2}）最低，且福田区中龄林平均碳密度是光明区的超 8 倍。

罗湖、福田、宝安等区城市绿地的林分相对成熟稳定，幼龄林较少；在样地选择随机抽样中只有大鹏新区、龙华区及光明区存在幼龄林，其中光明区城市绿地乔木层的平均碳密度（5.200 kg·m^{-2}）最高，龙华区（0.908 kg·m^{-2}）次之，大鹏新区（0.209 kg·m^{-2}）最低，且光明区幼龄林平均碳密度是大鹏新区的 24 倍。

3.4 城市绿地乔木层碳密度影响因素的相关性

分析城市绿地样地碳密度与乔木林生长指标的相关性（表 4）发现：城市绿地乔木层碳密度

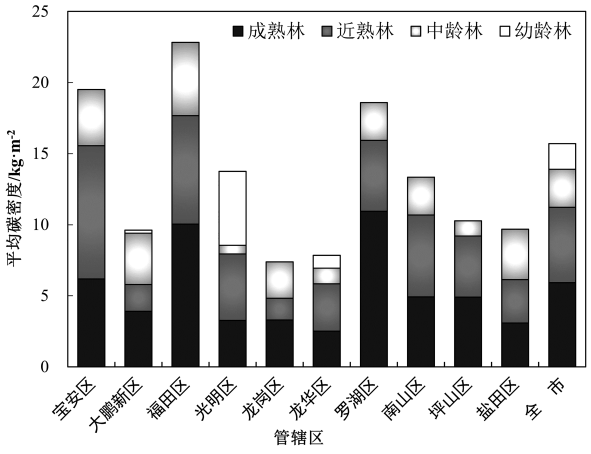


图 4 深圳市各区城市绿地不同龄林平均碳密度分布

与乔木平均胸径、平均树高具有较为显著的正相关性（P<0.01）；城市绿地乔木层的林分密度、平均冠幅及郁闭度对乔木层碳密度也存在正向影响（P<0.01），但其影响效益小于平均胸径与平均树高。此外，材积密度与乔木层碳密度之间相关性较弱。

表 4 乔木层碳密度与乔木林生长指标的相关性分析

生长指标	Spearman 相关系数
平均胸径	0.559 **
平均树高	0.552 **
材积密度	0.299 **
平均冠幅	0.331 **
样地郁闭度	0.407 **
林分密度	0.408 **

注：** 表示 0.01 水平上极显著相关。

4 讨论

4.1 深圳城市绿地乔木层碳密度特征

城市绿地在固碳和改善城市环境方面具有重要的意义，而乔木林作为城市绿地碳汇的主要贡献者，研究其在不同绿地类型的固碳能力尤为迫切。研究表明，2005 和 2010 年深圳市乔木层平均碳密度分别为 2.162 kg·m^{-2}和 2.442 kg·m^{-2}，而本研究得出 2022 年深圳城市绿地乔木层平均碳密度为 4.494 kg·m^{-2}，比 2010 年的研究结果增加了 84.02%，其增幅远高于全国乔木林（12.02%）[12,38]。这表明深圳市乔木层碳密度增长较为迅速，且乔木还大多处于中龄林与近熟林阶段，因此，深圳市城市绿地乔木林固碳能力存在巨大的潜力。

研究得到 2022 年深圳城市绿地乔木层平均碳密度为（4.494±0.345）kg·m^{-2}，高于广东省珠三角地区乔木林（2.995 kg·m^{-2}）[39]、安徽省乔木林（3.720 kg·m^{-2}）[40]、湖北省大冶市乔木林（2.366 kg·m^{-2}）[41]、全国乔木林(3.728 kg·m^{-2})[12]，但相对黑龙江大庆市乔木林（10.122 kg·m^{-2}）[14]、青海省乔木林（7.654 kg·m^{-2}）[42]及福建省乔木林（7.624 kg·m^{-2}）[43]则低得多，表明深圳城市绿地乔木层碳密度较高，且存在较大的提升空间。各地植被分布的地带性气候、森林管理措施、绿地空间、人为活动等因素影响城市绿地乔木树种、结构、森林覆盖率、乔木资源的体量和质量，进而造成各城市绿地乔木层碳密度差异较大。因此，今后还需要加强对城市绿地固碳能力的关注和研究，提升城市绿地碳密度。

4.2　深圳各区城市绿地碳密度动态变化

刘伟玲等[44]利用 2005 年深圳市森林资源二类调查更新数据进行深圳市森林植被碳储量和碳密度的估算研究发现，盐田区、福田区及罗湖区的乔木层碳密度较高，龙岗区、宝安区及南山区的乔木层碳密度较低。本研究各区城市绿地乔木层碳密度较高为福田区、宝安区及罗湖区，而光明区、龙岗区及龙华区的碳密度较低。可见，经过生态风景林营建等一系列林业工程后，深圳各区城市绿地结构在近 20 年内发生了较大的变化，城市绿地乔木层碳密度整体水平较高，但各区不同绿地分布不均匀，城市绿地碳密度仍存在较大的优化空间。

4.3　深圳城市绿地乔木层碳密度的影响因子

王大睿[45]就厦门市城市森林的碳储量和碳密度展开研究发现，相较于幼龄林和中龄林，近熟林、成熟林和过熟林展现出显著更高的碳密度。李奇等[12]通过预测中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力得出，不同林龄组的乔木林碳密度存在显著差异，表现为：过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。上述研究结果与本研究结果一致，均说明了随着树龄增长，乔木林碳密度也随之增大。因此，加快乔木林生长、提升城市绿地中树龄较大的乔木林比例，是增加城市绿地碳密度的重要措施。此外，在深圳各区城市绿地不同乔木龄组中，宝安区、福田区和罗湖区各龄林的平均碳密度均高于其他地区，这是因为老城区的乔木林树龄普遍要高于其他地区，而龙岗区和龙华区各年龄组乔木层平均碳密度较低，表明这两个地区的乔木林树龄组成以中、幼龄林偏多，其森林固碳仍有很大的提升空间。

5　结论

深圳城市绿地的平均碳密度为（4.494±0.345）kg·m^{-2}，各区及不同绿地类型平均碳密度的空间分布差异较大，以福田区、宝安区及罗湖区城市绿地乔木层的固碳能力较高，而光明区、龙岗区及龙华区则较低。各区不同绿地类型碳密度也分布不均匀，公园绿地平均碳密度最高，而附属绿地略高于广场绿地，且公园绿地平均碳密度远高于其他两个城市绿地类型，其中在 3 个绿地类型中宝安区、龙岗区及罗湖区的平均碳密度差异较大，而南山区平均碳密度最为均衡。

城市绿地不同乔木龄组的平均碳密度大小依次为：成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。在各区城市绿地乔木层中，宝安区、福田区和罗湖区不同乔木龄组的平均碳密度高于其他地区，而龙岗区和龙华区各年龄组的平均碳密度较低。

城市绿地乔木层平均胸径、平均树高、林分密度、郁闭度、平均冠幅直径、材积密度对乔木层碳密度具有显著影响。

参考文献

[1]MOSA A,MANSOUR MM,SOLIMAN E,et al.Biochar as a soil amendment for restraining greenhouse gases emission and improving soil carbon sink:current situation and ways forward[J].Sustainability,2023,15(2):1206.

[2]王方邑,赵智聪,王沛,等.中国自然保护地碳中和贡献的初步评估及三个关键研究课题[J].中国园林,2023,39(3):6-13.

[3]谢力生.木材资源利用与气候变化[J].东北林业大学学报,2010,38(9):116-117,124.

[4]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.

[5]石铁矛,李沛颖,汤煜.碳中和背景下城市碳汇功能及提升策略:以沈阳核心区为例[J].中国园林,2022,38(3):78-83.

[6]汤煜,石铁矛,卜英杰,等.城市绿地碳储量估算及空间分布特征[J].生态学杂志,2020,39(4):1387-1398.

[7]张伟畅,盛浩,钱奕琴,等.城市绿地碳库研究进展[J].南方农业学报,2012,43(11):1712-1717.

[8]武文婷,夏国元,包志毅.杭州市城市绿地固碳释氧价值量评估[J].中国园林,2016,32(3):117-121.
[9]郭婷婷,朱思瑾,楼一蕾,等.城市公园常见植物固碳能力评估[J].中国城市林业,2024,22(2):113-120.
[10]张青云,吕伟娅,徐炳乾.华北地区城市绿地固碳能力测算研究[J].环境保护科学,2021,47(1):41-48.
[11]袁旸洋,郭蔚,汤思琪,等.城市蓝绿空间格局对碳固存的影响测度及关键指标[J].中国城市林业,2023,21(6):6-16.
[12]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.
[13]葛之葳,周丹燕,郝雨杉,等.徐州城市绿地乔木层碳储量现状分析[J].林业科技开发,2013(6):30-34.
[14]王宁,富丰珍,程浩天,等.大庆市城市森林公园乔木林生物量及碳储量估算[J].黑龙江八一农垦大学学报,2019,31(3):9-14.
[15]何海珊,赵宇豪,吴健生.低碳导向下土地覆被演变模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2021,41(21):8352-8363.
[16]文伟,谭一凡,史正军,等.深圳市经济林生物量与碳储量及其空间分布[J].西部林业科学,2015,44(3):90-96.
[17]张银凤,蔡洪月,彭金根,等.深圳城市公园不同栽植环境对毛棉杜鹃生长的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):197-204.
[18]李建,庄春晓,杨芳芳,等.深圳市建成区入侵植物特点及其对植物多样性的影响[J].生态学杂志,2024,43(8):2295-2303.
[19]陈勇,孙冰,廖绍波,等.深圳市主要植被群落类型划分及物种多样性研究[J].林业科学研究,2013,26(5):636-642.
[20]TER-MIKAELIAN M T,KORZUKHIN M D.Biomass equations for sixty-five North American treespecies[J].Forest Ecology and Management,1997,97(1):1-24.
[21]ZIANIS D,MENCUCCINI M.On simplifyingallometric analyses of forest biomass[J].Forest Ecology and Management,2004,187(2/3):311-332.
[22]PILLI R,ANFODILLO T,CARRER M.Towards a functional and simplifiedallometry for estimating forest biomass[J].Forest Ecology and Management,2006,237(1/2/3):583-593.
[23]周国逸,尹光彩,唐旭利,等.中国森林生态系统碳储量-生物量方程[M].北京:科学出版社,2018.
[24]陈毅青,陈宗铸,陈小花,等.海南地区菠萝蜜和荔枝单木相容性生物量模型的构建[J].经济林研究,2020,38(4):82-90.
[25]李周坤.福建东南沿海滨海沙地4年生相思类树种生物量分配格局及树种选择[J].福建林业科技,2012,39(3):15-18,62.
[26]王哲,韩玉洁,康宏樟,等.黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量[J].生态学杂志,2012,31(8):1930-1935.
[27]国家林业局.立木生物量模型及碳计量参数:枫香:LY/T 2661—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
[28]杨众养,陈宗铸,陈小花,等.海南岛北部3种经济林树种的生物量、碳储量及其分配特征[J].经济林研究,2018,36(3):62-68.
[29]郑海水,翁启杰,黄世能.窿缘桉生物量表的编制[J].广东林业科技,1995,11(1):41-46.
[30]陈毅青,杨众养,陈宗铸,等.海南岛马占相思生物量模型构建方法研究[J].中南林业科技大学学报,2019,39(1):86-91,107.
[31]冯志立,唐建维,郑征,等.西双版纳热带森林次生演替初期山黄麻先锋群落生物量动态[J].生态学杂志,1999,18(5):1-6.
[32]陈富强,罗勇,李清湖.粤东地区森林灌木层优势植物生物量估算模型[J].中南林业科技大学学报,2013,33(2):5-10.
[33]叶绍明,龙滔,蓝金宣,等.尾叶桉与马占相思人工复层林碳储量及分布特征研究[J].江西农业大学学报,2010,32(4):735-742,758.
[34]朱可峰,廖宝文,章家恩.广州市南沙红树植物无瓣海桑、木榄人工林生物量的研究[J].林业科学研究,2011,24(4):531-536.
[35]贺红早,黄丽华,段旭,等.贵阳二环林带主要树种生物量研究[J].贵州科学,2007,25(3):33-39.
[36]熊江波.南亚热带五种人工林生物量和碳储量的研究[D].南宁:广西大学,2015.
[37]国家林业和草原局.森林生态系统碳储量计量指南:LY/T 2988—2018[S].北京:中国标准出版社,2019.
[38]谭一凡,彭友贵,史正军,等.深圳市森林碳储量及其动态变化[J].西南林业大学学报,2013,33(4):17-24.
[39]李康杰,胡中岳,刘萍,等.广东省珠三角乔木林生物量碳储量评估[J].林业资源管理,2022(4):54-60.
[40]胡建全,徐志扬.安徽省森林碳储量及碳密度特征研究[J].林业调查规划,2018,43(3):6-9,33.
[41]付甜,杨佳伟,陈明震,等.基于森林资源二类调查数据的大冶市森林植被碳储量和碳密度测算[J].湖北林业科技,2023,52(3):1-5,42.
[42]陈科宇,字洪标,阿的鲁骥,等.青海省森林乔木层碳储量现状及固碳潜力[J].植物生态学报,2018,42(8):831-840.
[43]肖君.福建省天然乔木林碳储量动态变化及增汇策略[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):27-32.
[44]刘伟玲,张林波,叶有华.深圳市森林植被碳储量特征及其空间分布[J].生态科学,2012,31(2):144-154.
[45]王大睿.厦门城市森林碳储量和碳密度时空变化特征[J].福建林学院学报,2013,33(1):12-17.