

台风对粤港澳大湾区城市森林群落结构的影响*

陈星澄 宋磊 赵庆 许东先 章驰 钱万惠 唐洪辉

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东广州 510520)

摘要 探索台风灾害与城市森林群落结构特征的关系, 为构建抗逆力强的城市森林生态系统提供科学依据。采用样方调查法, 在粤港澳大湾区的广州、佛山和珠海市共设置 186 个样方, 选取城市森林树种组成、径级、高度级和冠面积等级为指标, 开展台风影响下城市森林群落结构特征差异比较研究。结果表明: 珠海市城市森林树种丰富度均小于广州和佛山市; 广州和佛山市的城市森林径级分布有明显的区位差异; 珠海市城市森林树木的平均胸径比广州和佛山市高, 但平均高度比广州和佛山市小。建议在台风灾害影响多发地的粤港澳大湾区城市森林群落构建中, 选择小径级、低层和小冠层的抗风树种作为城市森林建设的主体, 采用增大平均胸径、降低平均树高、保留适宜林冠层疏透性的群落结构调控策略, 有利于构建抗台风能力强的城市森林生态系统。

关键词 台风; 城市森林; 径级结构; 高度级结构; 粤港澳大湾区

中图分类号: S731.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 02-0012-09

Study on the Influence of Typhoon on Urban Forest Community Structure in Guangdong- Hong Kong -Macao Greater Bay Area

CHEN Xingcheng SONG Lei ZHAO Qing XU Dongxian
ZHANG Chi QIAN Wanhui TANG Honghui

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The relationship between typhoon disaster and urban forest community structure characteristics was explored to provide scientific basis for the construction of urban forest ecosystem with high resistance. A total of 186 quadrats have been set up in Guangzhou, Foshan and Zhuhai in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), and the structure characteristics of forest diameter class, height class and crown area class was selected to study the influence of typhoon on structure characteristics differences of urban forest in three cities. The results indicate that the urban forest species richness in Zhuhai was lower than that in Guangzhou and Foshan. The structure characteristics of urban forest in Guangzhou and Foshan had obvious location difference with the transition from the urban area to the urban fringe area; The average diameter at breast height (DBH) of urban forest trees in Zhuhai was higher than that in Guangzhou and Foshan, but the average height was smaller than that in Guangzhou and Foshan. It is suggested that small-path, low-rise and small canopy trees were selected as the main part of urban forest construction and the community structure regulation strategy of increasing average DBH, reducing average tree height and retaining appropriate canopy permeability is conducive to the construction

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2018KJ CX029、2020KJ CX006)。

第一作者: 陈星澄 (1994—), 女, 助理工程师, 主要从事风景园林研究, E-mail: chenxingcheng@senkegd.cn。

通信作者: 钱万惠 (1989—), 女, 工程师, 主要从事风景园林规划设计、城市林业研究, E-mail: qianwh@sinogaf.cn。

of urban forest ecosystem with strong typhoon resistance in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area affected by typhoon disasters.

Key words typhoon; urban forest; DBH structure; height structure; Guangdong- Hong Kong -Macao Greater Bay Area

在城市化的历史进程中，森林保障了城市的健康发展。作为城市生态系统的重要组成部分——森林，分布在城市的各个区域，与建筑、道路、水体等相互融合，在改善小气候、净化大气、减弱噪音、改善人居环境方面发挥着越来越重要的作用^[1-7]。然而，近年来极端气候频发，城市森林受到持续高温、干旱和台风等自然灾害的影响^[8]。特别是沿海地区，城市森林受到台风的破坏尤为显著，2017年第13号台风“天鸽”在粤港澳大湾区沿海正面登陆，台风最大风力达17级，给城市森林造成严重灾害。据统计，澳门共有50多万株林木受损，森林受灾面积达500多 hm^2 ；珠海市共有60万株林木受损，森林受灾面积1.15万 hm^2 。风灾对城市森林造成的主要问题表现为树木断枝、折干、倒伏、叶全损等，这严重影响了树木的生长。作为树木最基本的生长指标，胸径、树高和冠幅是森林群落结构特征最直接的表征指标^[9-12]。因此，针对台风高发的粤港澳大湾区，开展城市森林树木生长指标的特征研究，为下一步研究应对台风灾害的城市森林树木选择和配置技术提供科学依据。

以往关于台风对森林群落的影响研究较为单一，主要集中在两方面：一方面是台风对森林群

落中树木个体的影响研究，如不同树种的受害类型和毁坏程度等^[13-14]、台风对城市森林群落破坏的损失预测模型研究等^[15]、城市森林树木抗风性研究^[16-18]；另一方面则为台风对森林群落结构的影响，如台风对城市森林树种组成和密度的影响^[19]、台风对改变森林树种多样性演替轨迹的影响研究等^[20]。然而，上述研究均未阐明台风多发区的树木胸径、树高、冠幅等群落结构特征指标，这恰是基于精准优化城市森林群落结构配置策略所亟需的。

基于以上问题，本文通过调查广州市、佛山市和珠海市等3个粤港澳大湾区典型城市的森林群落样地，分析在台风影响下不同城市区位的森林树木胸径、树高、冠幅等群落结构因子的变化，以期构建抗台风力强的粤港澳大湾区城市森林提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

粤港澳大湾区由香港、澳门两个特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市9个珠江三角洲城市组成，总面积5.6万 km^2 ，是中国开放

表1 近10年来影响粤港澳大湾区城市强台风
Tab.1 Strong typhoons landed in the GBA during nearly 10 year

强台风名 Name of strong typhoon	登陆时间 Time of landfall	登陆城市 Landfall city	登陆风力级 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Wind scale of landfall	最大风力级 Maximum wind level	登陆点距离广州 /km Distance between landfall and Guangzhou	登陆点距离佛山 /km Distance between landfall and Foshan	登陆点距离珠海 /km Distance between landfall and Zhuhai
200814 黑格比	9月24日 6:00时	茂名市	48	15	288	265	270
201311 尤特	8月14日 15:00时	阳江市	42	14	243	220	215
201319 天兔	9月22日 19:00时	汕尾市	45	14	240	250	207
201510 莲花	7月9日 12:00时	汕尾市	35	12	266	280	240
201604 妮妲	8月2日 3:00时	深圳市	42	14	154	162	106
201622 海马	10月21日 13:00时	汕尾市	42	14	195	209	172
201713 天鸽	8月23日 12:00时	珠海市	45	14	100	95	0
201822 山竹	9月16日 17:00时	江门市	50	15	173	158	110

程度最高、经济活力最强的区域之一，与美国纽约湾区、旧金山湾区、日本东京湾区并称为世界四大湾区，在国家发展大局中具有重要战略地位。

粤港澳大湾区属南亚热带海洋性季风气候，雨热充沛，干湿分明，2019年年均气温为23.5℃，年均降水量2164.1mm^[21]。粤港澳大湾区常年受台风影响，其中近10a年间直接登陆或间接影响的强台风就有8次（中心附近风力为14~15级）^[22]，上述8次强台风登陆时的台风中心距离上述3个城市的距离均小于300km（表1）。本研究在广州市、佛山市和珠海市按照不同区位选取了3个城市森林群落作为研究区，分别在城市核心区（Core urban area, CUA）选择了广州市发展公园（23°11' N, 113°30' E）、佛山市千灯湖公园（23°02' N, 113°08' E）、珠海市梅华城市公园（23°17' N, 113°32' E）；在城市次核心区（Semi urban area, SUA）选择广州市华南农业大学（23°16' N, 113°35' E）、佛山市文华公园（23°00' N, 113°07' E）、北京理工大学珠海学院（23°22' N, 113°33' E）；在城市近郊区（Urban fringe area, UFA）选择广州市火炉山（23°19' N, 113°39' E）、佛山市平洲公园（23°04' N, 113°21' E）、珠海市尖峰山公园（23°18' N, 113°31' E）作为研究点。

1.2 研究方法

1.2.1 研究区抽样和类型划分 采用随机抽样研究方法，综合考虑调查时间和经济成本，参照周红敏等人^[23]的研究成果，每个群落设置样方大小为30m×30m，每1万m²抽取4个样方以满足抽样的合理性和可行性，共调查186个样方，调查时间为2017年9月—2019年10月期间。所有样方在满足随机选取的前提下，均互不相邻，同时水面、建筑、草地占比面积小于1/3。样方进行每木检尺，记录胸径DBH≥5.0cm的树种名称、胸径、树高、冠幅、活枝下高、健康状况等指标。

1.2.2 径级、高度级和冠面积等级的划分 根据统计学原理，样方乔木的径级（DBH）、高度级（H）和冠面积等级（CD）均采用上限排外法划分^[24]，当5cm≤DBH<10cm时为第1径级，每5cm为1个递增单位，10cm≤DBH<40cm时，每10cm为1个递增单位；40cm≤DBH<100cm时，每20cm为1个递增单位；DBH≥100cm以上时，为1个径级；其中，5cm≤DBH<20cm为小径级，20cm≤DBH<40cm为中径级，DBH≥40cm

为大径级。高度级的划分方法：当3m≤H<5m为第1高度级，5m≤H<7m为第2高度级，每2m为1个递增单位，11m≤H<20m时，每3m为1个递增单位；H≥20m以上时，每4m为1个递增单位；其中，3m≤H<7m为低层，7m≤H<11m为中层，H≥11m为高层。冠面积等级的划分方法：当0m²≤CD<4m²时为第1等级，4m²≤CD<16m²为第2等级，16m²≤CD<36m²为第3等级，36m²≤CD<64m²为第4等级，64m²≤CD<100m²为第5等级，100m²≤CD<144m²为第6等级，144m²≤CD<196m²为第7等级，CD≥196m²以上时，为第8等级；其中，0m²≤CD<16m²为小冠面积乔木，16m²≤CD<64m²为中冠面积乔木，CD≥64m²为大冠面积乔木。

1.3 指标计算方法

1.3.1 重要值分析 用以下公式计算确定研究区的优势树种。

相对多度（RA）= 某个种的株数 / 全部种的总株数.....(1)

相对频度（RF）= 某个种的频度 / 所有种的频度总和.....(2)

相对显著度（RD）= 某个种的断面积 / 全部种的总断面积.....(3)

重要值（IV）=（RA+RD+RF）/3.....(4)

1.3.2 径级、高度级和冠面积等级比重 根据划分规则，统计同一径级、高度级和冠面积等级的所有树木数量，归一化处理后，得到所占比重。

径级比重 = 某个径级的个体数 / 全部径级的个体数 × 100%.....(5)

高度级比重 = 某个高度级的个体数 / 全部高度级的个体数 × 100%.....(6)

冠面积等级比重 = 某个冠面积等级的个体数 / 全部冠面积等级的个体数 × 100%.....(7)

1.3.3 树高和胸径关系

树高和胸径的关系可以反映随着年龄的增长，乔木树高的变化情况，以及人为干预对森林群落发展的影响^[25]。本研究针对树木的胸径—树高生长曲线进行拟合，探讨应对台风影响下树木胸径和树高之间的关系。

1.3.4 统计方法 研究借助R（Version 3.4.4）的ggplot2包进行数据分析并绘制相关图标，其中对于树高和胸径关系的拟合采用局部加权多项式

(loess 曲线) 模型。

2 结果与分析

2.1 群落组成结构

根据 186 个样方的调查数据, 对 3 个城市群落的树木种数、种植密度、优势树种占比进行分析, 结果见表 2。广州市和佛山市的城市森林群落

随着由核心区向近郊区过渡, 其树木种数和种植密度逐渐变大, 而优势树种 (重要值 ≥ 0.05 的树种) 重要值总和逐渐变小; 珠海市则相反, 城市森林群落随着由核心区向近郊区过渡, 其树木种数逐渐变少, 而优势树种 (重要值 ≥ 0.05 的树种) 重要值总和逐渐变大。

表 2 广州、佛山和珠海市城市森林群落组成结构分析

Tab.2 Analysis on the composition and structure of tree species in urban forest community of Guangzhou, Foshan and Zhuhai

城市 City	区位 Location	地点 Site	树木 种数 Species	种植密度/ (株/hm ²) Density	优势树种重要值总和 Sum of important values of dominant species	优势树种 Dominant species	树种重要值 Species with important value
广州市	核心区	广州发展公园	29	135	0.55	小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	0.19
						非洲楝 <i>Khaya senegalensis</i>	0.17
						火焰木 <i>Spathodea campanulata</i>	0.10
	次核心区	华南农业大学	52	220	0.45	大花紫薇 <i>Lagerstroemia speciosa</i>	0.09
						阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i>	0.14
						麻楝 <i>Chukrasia tabularis</i>	0.13
						宫粉紫荆 <i>Bauhinia variegata</i>	0.12
						大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	0.06
						红花羊蹄甲 <i>Bauhinia blakeana</i>	0.18
近郊区	火炉山公园	54	298	0.39	凤凰木 <i>Delonix regia</i>	0.11	
					美丽异木棉 <i>Ceiba speciosa</i>	0.10	
					非洲楝	0.22	
佛山市	核心区	千灯湖公园	30	171	0.63	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.13
						杧果 <i>Mangifera indica</i>	0.09
						小叶榕	0.07
	次核心区	文华公园	60	262	0.21	木棉	0.06
						羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i>	0.06
						木棉	0.09
						秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	0.06
						小叶榄仁 <i>Terminalia neotaliala</i>	0.06
						小叶榕	0.06
近郊区	平洲公园	64	274	0.17	高山榕 <i>Ficus altissima</i>	0.06	
					盆架子 <i>Alstonia scholaris</i>	0.05	
					小叶榕	0.18	
珠海市	核心区	梅华城市公园	45	230	0.36	窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	0.08
						黄花风铃木 <i>Handroanthus chrysanthus</i>	0.05
						宫粉紫荆	0.05
						木棉	0.10
						美丽针葵 <i>Phoenix canariensis</i>	0.08
						非洲楝	0.08
	次核心区	北理工 珠海学院	29	190	0.48	荔枝 <i>Litchi chinensis</i>	0.08
						小叶榕	0.07
						樟树	0.07
						黄花风铃木	0.22
						樟树	0.14
						宫粉紫荆	0.08
近郊区	尖峰山公园	27	459	0.56	秋枫	0.07	
					白兰 <i>Michelia alba</i>	0.05	
					小叶榕	0.18	
					窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	0.08	
					黄花风铃木 <i>Handroanthus chrysanthus</i>	0.05	
					宫粉紫荆	0.05	

注: 重要值 ≥ 0.05 的树种为优势树种。Note: the important value ≥ 0.05 are the dominant tree species.

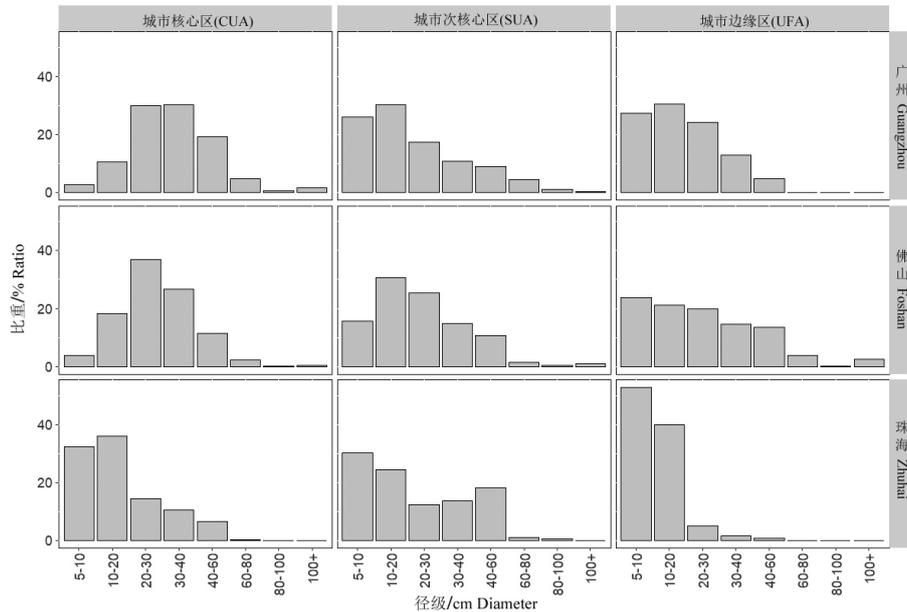


图1 广州、佛山和珠海市城市森林群落径级结构特征

Fig. 1 Diameter class of urban forests in Guangzhou, Foshan and Zhuhai

2.2 径级结构

图1展示了3个城市不同区位的城市森林群落径级结构,结果表明:广州市和佛山市的城市核心区森林群落径级呈现出类似“正态分布”的格局,群落构成均以中径级乔木($20\text{ cm} \leq \text{DBH} < 40\text{ cm}$)为主(广州市60.50%,佛山市63.64%);随着向城市近郊区过渡,城市森林群落的群落构成逐渐趋向于以小径级乔木($5\text{ cm} \leq \text{DBH} < 20\text{ cm}$)为主的“正偏态分布”格局(广州市次核心区56.44%,近郊区58.06%;佛山市次核心区46.30%,近郊区45.20%),逐步趋向于天然森林群落较为稳定的径级“反J型”结构(reverse J type)^[26-27]。不同于广州市和佛山市,珠海市的城市森林群落径级结构呈现出“前大后小”分布格局,3个区位的城市森林群落均为以小径级乔木为主的“正偏态分布”格局(核心区68.40%,次核心区54.75%,近郊区92.95%)。

森林群落树种的径级分布决定群落状态,当径级分布呈反“J”型时,径级主要分布在较低级别,森林群落更新旺盛;当径级结构分布呈现“两头少,中间多”的正态分布时,表明此时的森林群落还处于相对稳定阶段;当径级结构分布呈“前小后大”的“J型”分布时,表明此时的森林群落已呈现衰退趋势^[28-30],不利于抵御台风袭击。在3个城市中,仅佛山市和广州市的核心区径级

结构呈现“正态分布”,处于较为稳定的状态,同时随着向城市次核心区、近郊区过渡,其径级结构逐渐呈现反“J”型分布。而作为台风影响最大的珠海市(尤以尖峰山公园受害最重),3个区位的城市森林径级结构均受到较大的自然和人为干扰。在台风的强烈作用下,大量大径级树木被损坏,通过人为的生态修复,配置了大量的小径级树木,并占据了绝对优势,使径级结构呈现出反“J”型分布。

2.3 高度级结构

针对3个城市不同区位的城市森林高度级分布来看(图2):广州市的城市核心区森林群落构成以高层乔木($H \geq 11\text{ m}$)为主(57.69%);佛山市的城市核心区森林群落构成以中层乔木($7\text{ m} \leq H < 11\text{ m}$)为主(47.44%);随着向城市近郊区过渡,广州市的城市森林群落构成逐渐趋向于以低层乔木($3\text{ m} \leq H < 7\text{ m}$)为主(广州市次核心区33.65%,近郊区65.82%);佛山市的城市森林群落构成仍以中层乔木为主(次核心区46.30%,近郊区45.20%)。不同于广州市和佛山市,珠海市的城市森林群落构成均以低层乔木为主(核心区66.30%,次核心区61.54%,近郊区89.44%)。

在3个城市中,佛山市和广州市的城市森林高度级结构呈现随着核心区、次核心区、近郊区

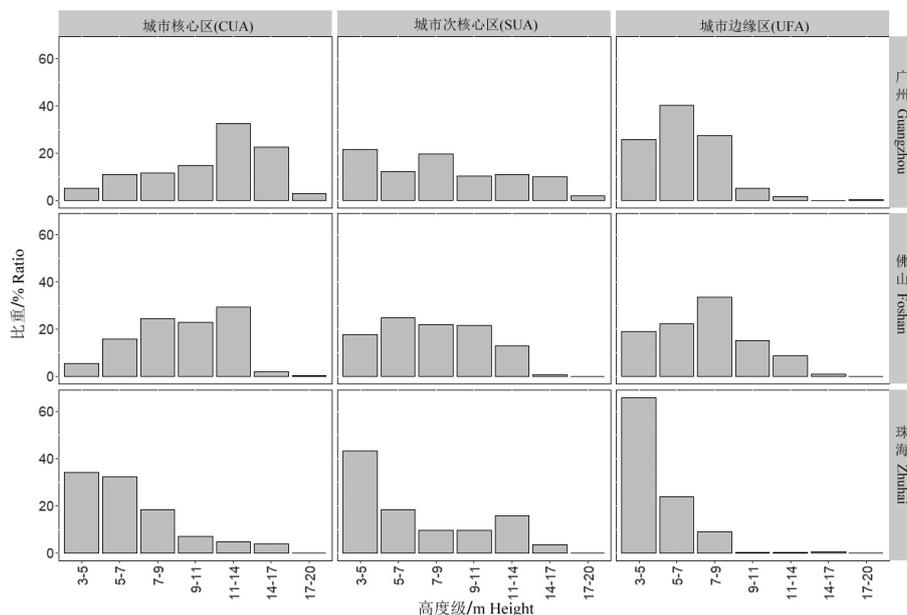


图2 广州、佛山和珠海市城市森林高度级结构特征

Fig. 2 Height class of urban forests in Guangzhou, Foshan and Zhuhai

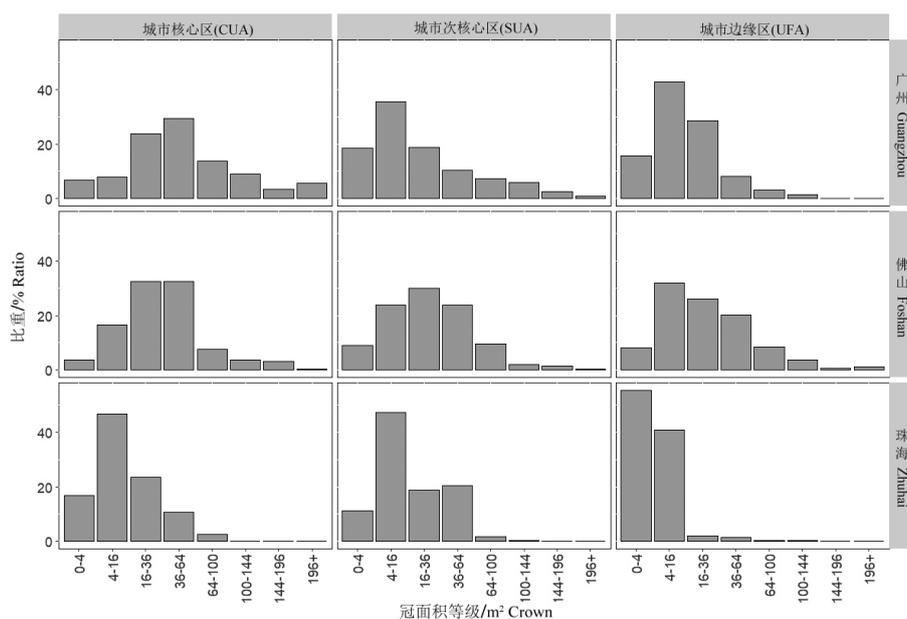


图3 广州、佛山和珠海市城市森林冠面积等级结构特征

Fig. 3 Crown class of urban forests in Guangzhou, Foshan and Zhuhai

的过渡，逐渐转向低层树木占优势。而作为台风影响最大的珠海市，3个区位的城市森林高度级结构均受到较大的自然和人为干扰，均以低层树木为主。在台风的强烈作用下，一方面大量高层树木发生倒伏、折干等，降低了树木的高度，另一方面通过人为的生态修复，配置了大量的低层树木，并占据了绝对优势，使高度级结构呈现出以低层树木占优势的现象。

2.4 冠面积等级结构

针对3个城市不同区位的城市森林冠面积等级分布来看（图3）：广州市和佛山市的城市核心区森林群落均以中冠面积乔木（ $16\text{ m}^2 \leq \text{CD} < 64\text{ m}^2$ ）为主（广州市53.41%，佛山市64.94%）；随着向城市近郊区过渡，广州市的森林群落构成逐渐趋向于以小冠面积乔木（ $0\text{ m}^2 < \text{CD} < 16\text{ m}^2$ ）为主（次核心区54.16%，近郊区58.57%），佛山市

的城市森林群落构成仍以中冠面积乔木为主(次核心区 53.95%, 近郊区 46.12%)。不同于广州市和佛山市, 珠海市的城市森林群落构成均以小冠面积乔木为主(核心区 63.49%, 次核心区 58.70%, 近郊区 96.12%)。

在3个城市中, 佛山市和广州市的城市森林冠面积等级结构呈现随着核心区、次核心区、近郊区的过渡, 逐渐转向小冠面积等级占优势。珠海市3个区位的城市森林冠面积等级结构均受到较大的自然和人为干扰, 在台风的强烈作用下, 一方面冠层较大的树木由于枝繁叶茂, 在台风影响下, 受风力较大, 容易倒伏、折干、断枝等, 另一方面通过生态修复, 配置了大量的小冠幅、树冠舒展疏透的树木, 如黄花风铃木(重要值为0.22), 使冠面积等级结构呈现出以小冠层树木占优势的现象。

2.5 树高和胸径关系

针对城市森林径—高关系分析(图4): 广州市城市森林表现出更明显的高生长趋势; 在胸径5~40 cm(中、小径级)的区间内, 广州市城市森林高层乔木($H \geq 11$ m)的平均树高为13.4 m,

平均胸径为28.0 cm; 佛山市城市森林高层乔木树高为12.0 m, 平均胸径为29.8 cm; 珠海市城市森林高层乔木的平均树高为11.6 m, 平均胸径为32.0 cm。珠海市城市森林的径—高关系与广州市和佛山市不同, 其平均胸径比广州市和佛山市高, 但平均高度却比广州市和佛山市小, 有利于城市森林更好的抵御台风。

针对城市森林径—高关系数量分布密度上看: 珠海市城市森林的树木分布集中区均在 $DBH < 40$ cm和 $H < 7$ m的范围内, 属于中、小径级和低层乔木的范畴; 而广州市城市和佛山市的城市森林树木分布集中区位于 $DBH < 40$ cm和 $H > 7$ m的范围, 属于中、小径级和中、高层乔木的范畴。3个城市相比, 珠海市的城市森林径—高关系的集中分布区处在低层乔木的范围, 这种分布形式在一定程度上能减轻台风对城市森林的破坏。珠海市城市森林的径—高关系的分布形式与高度级结构特征形成呼应, 进一步表明了珠海市城市森林配置符合台风多发地区的现实特点。

在城市森林群落中, 由胸径和树高的关系变化(图4)表明, 距台风登陆点的距离是城市森林

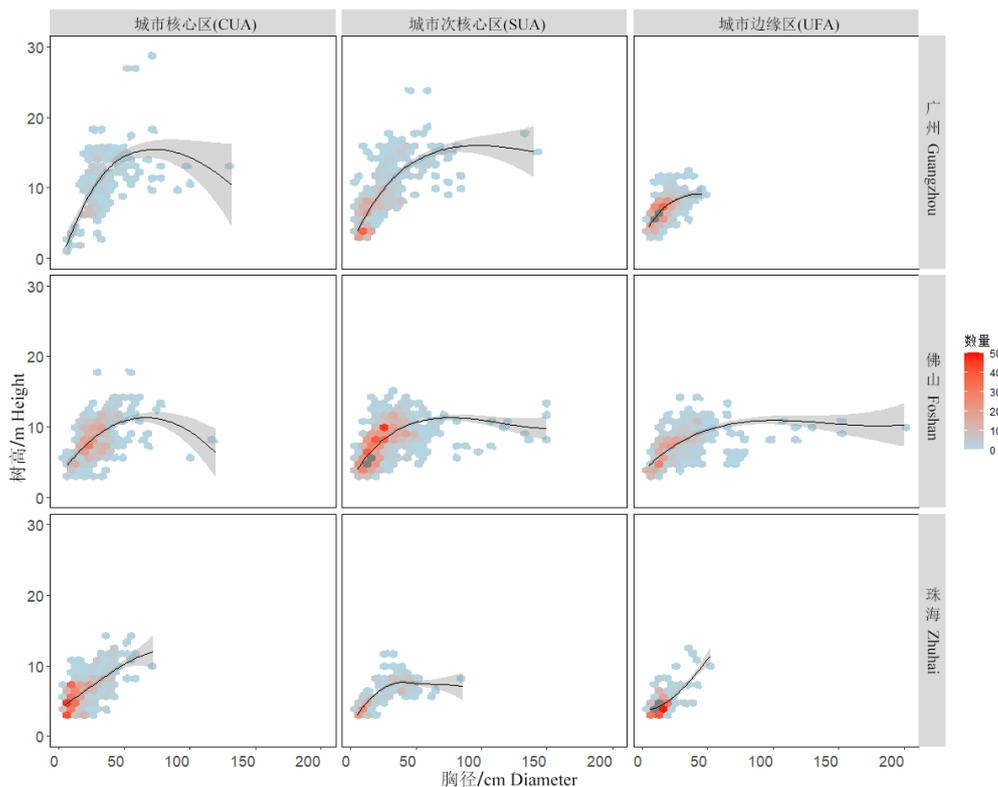


图4 广州、佛山和珠海市城市森林树高和胸径关系

Fig. 4 Height and diameter relationship of urban forests in Guangzhou, Foshan and Zhuhai

群落结构的重要调控因子，距离越远，其组成城市森林群落树木的平均胸径越小，而树高则越大，反之亦然。

3 讨论与结论

在3个城市中，珠海市作为受台风影响最大的城市，除了核心区外，树种丰富度均小于等于其他城市，而优势树种重要值总和大于其他城市。由于2017年天鸽台风在珠海市金湾区和斗门区正面登陆，位于近郊区的尖峰山公园受到强台风影响最大，抗风性较差的树种均受到损害，台风过后立即选择少数抗风能力较强的树种进行人工生态修复，如根系发达的樟树、秋枫、白兰，属于小乔木且树冠较为通透的宫粉紫荆和黄花风铃木，使其总体树种丰富度低，优势树种较为集中。这种人工生态修复的措施对抵御台风，降低台风对城市森林的破坏起到了一定的作用。2018年山竹台风袭击时，其对尖峰山公园研究区的破坏程度不到2017年天鸽台风的十分之一，达到了较好的抵御台风效果。

众多研究表明，树木会改变原有的生长趋势以应对城市台风多发的情况。相关学者曾开展过2003年袭击弗吉尼亚州的最大、最具破坏性的伊莎贝尔飓风对城市森林影响的研究，发现胸径大小是影响树木损坏的重要因素，DBH<10 cm的树木受台风直接损害的几率最低，这表明在城市森林中增加一定比例的小径级乔木能有效应对城市的台风多发问题^[31-32]。同时，Van等人^[33]研究发现树木的小冠幅现象与台风高发密切相关。以上结论与本研究结果相似，在3个城市中，珠海市受到台风影响最大，自1961年有气象资料以来，平均每年严重影响珠海市的台风约有1到2个，历史上直接登陆或擦肩而过的台风，均给珠海市造成了严重影响。因此，在面对台风高发的实际问题上，珠海市城市核心区、次核心区和近郊区均选用了以小径级、低层和小冠层乔木作为城市森林建设的主体，以减少台风事件中树木损害的风险。

Ruiz等人^[34]指出在台风影响下，树木高度损伤与DBH级的增加呈正相关。本研究中3个城市森林树木的胸径—树高拟合曲线表现出一定的差异，广州市的城市森林与佛山市和珠海市相比表现出更为明显的高生长趋势；珠海市城市森林的

径—高关系，在中、小径级的范围内，平均胸径分别比广州市和佛山市高14.3%和7.4%，而平均树高比广州市和佛山市低13.4%和3.3%。在自然状态下，树木高度随着DBH的增加而增高，其受到台风损伤的风险更大；同时，受台风影响越大的城市，其城市森林的树木高度将向变低的趋势发展^[35]。珠海市属于典型滨海城市，受到台风的危害比广州市和佛山市更大，因此，珠海市的城市森林建设在面对台风高发的实际问题上，应充分考虑选用抗风能力强的树种，选择增大树木平均胸径、降低平均高层树木高度的策略，这有利于降低台风对城市森林群落的破坏。

珠海市城市森林树木的生长指标特征与广州市和佛山市的城市森林相比表现出一定的差异。广州市和佛山市的生长指标特征均呈现区位的差异：随着区位由城市核心区向次核心区和近郊区过渡，径级、高度级和冠面积等级趋向于更小的等级；而珠海市城市森林树木的生长指标特征并不随区位的变化而变化，均处在较小的等级，这是一种应对台风灾害高发、减轻城市森林损害的策略。采用增大平均胸径、降低平均树高的群落结构策略，有利于减轻台风对城市森林群落带来的损失，最大程度发挥城市森林生态系统的服务功能。

参考文献

- [1] 汪永英, 孔令伟, 李雯, 等. 哈尔滨城市森林小气候状况及对人体舒适度的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(7): 90-93.
- [2] 徐文铎, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林小气候特征的研究[J]. 应用生态学报, 2005(9): 1650-1654.
- [3] 吴泽民, 吴文友, 高健, 等. 合肥市区城市森林景观格局分析[J]. 应用生态学报, 2003(12): 2117-2122.
- [4] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 123: 87-95.
- [5] KONG F, YIN H, JAMES P, et al. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 128: 35-47.
- [6] NEUENSCHWANDER N, HAYEK U W, GRÊT-RE-GAMEY A. Integrating an urban green space typology

- into procedural 3D visualization for collaborative planning[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 48: 99-110.
- [7] KABISCH N. Ecosystem service implementation and governance challenges in urban green space planning—The case of Berlin, Germany[J]. *Land Use Policy*, 2015, 42: 557-567.
- [8] ANTONIO D C, GUILLEM S O, Carlos J C, et al. Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 467: 118-156.
- [9] 韩文娟, 张文辉, 何景峰, 等. 不同坡向油松人工林建群种种群结构及群落特征分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(3): 47-55.
- [10] 郝建锋, 王德艺, 唐永彬, 等. 人为干扰对江油地区马尾松人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 729-735.
- [11] 余义亮, 丁彦芬, 朱贵珍, 等. 扬州地区乡村绿化植物群落的结构特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(3): 541-549.
- [12] 芦建国, 景蕾. 南京市公园绿地苔藓植物多样性及特点[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(3): 486-493.
- [13] STAUDHAMMER C L, FRANCISCO E, CHRISTOPHER L, et al. Technical note: patterns of urban forest debris from the 2004 and 2005 Florida hurricane seasons[J]. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2009, 4: 4.
- [14] 魏玉晗, 魏丹, 文才臻, 等. 台风灾害对广州市宫粉紫荆等绿化树种的影响分析: 以台风“山竹”为例[J]. *林业与环境科学*, 2020, 36(3): 86-91.
- [15] THOMPSON B K, ESCOBEDO F J, STAUDHAMMER C L, et al. Modeling hurricane-caused urban forest debris in Houston, Texas[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 101(3): 286-297.
- [16] 王良睦, 王中道, 许海燕. 9914#台风对厦门市园林树木破坏情况的调查及对策研究[J]. *中国园林*, 2000, 16(4): 65-68.
- [17] 肖洁舒, 冯景环. 华南地区园林树木抗台风能力的研究[J]. *中国园林*, 2014, 30(3): 115-119.
- [18] 高育慧, 毛君竹, 曾鹏飞, 等. 基于层次分析法的深圳市绿化树种抗风性评价: 以台风“山竹”为例[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(4): 97-105.
- [19] FORAN C M, BAKER K M, NARCISI M J, et al. Susceptibility assessment of urban tree species in Cambridge, MA, from future climatic extremes[J]. *Environment Systems & Decisions*, 2015, 35(3): 389-400.
- [20] XI W, PEET R K, LEE M T, et al. Hurricane disturbances, tree diversity, and succession in north carolina piedmont forests, USA[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1): 223-235.
- [21] 广东省气象局. 2019年粤港澳大湾区气候监测公报[R]. 广州, 2020.
- [22] 陈文想. 2008-2018年强台风对珠江口—横门及其上游的憎水影响分析[J]. *广东水利水电*, 2019(3): 28-31
- [23] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 森林结构调查中最适样方面积和数量的研究[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(4): 482-495.
- [24] 缪三华, 郑德祥, 蔡杨新, 等. 闽北闽粤栲天然林高度级结构分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(6): 45-50.
- [25] Gómez-García E, FONSECA T F, CRECENTE-CAMP O F, et al. Height-diameter models for maritime pine in Portugal: a comparison of basic, generalized and mixed-effects models[J]. *iForest*, 2015, 9: 72-78.
- [26] 李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林的群落结构特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 1997, 5(1): 18-26.
- [27] 丁晖, 杨云方, 徐海根, 等. 武夷山典型常绿阔叶林物种组成与群落结构[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 1142-1154.
- [28] 吴邦利, 龙翠玲, 秦随涛. 茂兰喀斯特常绿阔叶混交林群落组成和优势种更新类型[J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(6): 651-660.
- [29] 李茗蕊, 崔爽, 郑海峰, 等. 长春南湖公园油松林物种组成与结构[J]. *生态学杂志*, 2019, 306(1): 80-88.
- [30] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 等. 伏牛山自然保护区森林生态系统乔木层优势种种群动态[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(4): 14-20.
- [31] WIERSMA Y F, DAVIS T L, EBERENDU E C, et al. Hurricane Igor impacts at northern latitudes: factors influencing tree fall in an urban setting[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2012, 38(3): 92-98.
- [32] KRIBEL J R G, WARE S. Hurricane-caused tree loss on permanent plots in a temperate hardwood forest[J]. *Castanea*, 2014, 79(1): 1-7.
- [33] VAN B S J, MURPHY P G, LUGO A E. A link between hurricane-induced tree sprouting, high stem density and short canopy in tropical dry forest[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(3): 475-480.
- [34] RUIZ J, FANDINO M C. The impact of hurricane Beta on the forests of Providencia Island, Colombia, Southwest Caribbean[J]. *Caldasia*, 2010, 32(2): 425-434.
- [35] GOUVENAIN R C D, SILANDER J A. Do tropical storm regimes influence the structure of tropical lowland rain forests? [J]. *Biotropica*, 2003, 35(2): 166-180.