

基于静力荷载实验的城市树木抗风修剪比例研究

Research on Wind-resistant Pruning Ratios for Urban Trees Based on Static Load Tests

何嘉怡 陈绮楠 张安琪 黄颂谊*

HE Jiayi, CHEN Qinan, ZHANG Anqi, HUANG Songyi*

摘要

我国东南沿海地区台风及强对流天气多发, 近年来不少城市常发生强风导致树木倒伏的事故。为探究城市树木抗风性与其修剪比例的关系, 聚焦于广州市行道树的常见树形卵形和塔形, 选择卵形树种中国无忧花 *Saraca dives*、人面子 *Dracontomelon duperreanum*, 以及塔形树种小叶榄仁 *Terminalia neotaliala*、木棉 *Bombax ceiba* 为研究对象, 基于静力荷载实验, 开展树木形态稳定性分析及不同修剪次数下拉力与角度相关性研究, 以确定城市树木的最佳抗风修剪比例。结果表明: 树越高、树冠越不对称, 树木的稳定性越低; 树木的修剪比例显著影响树木抗风能力, 卵形和塔形树木的城市树木最佳抗风修剪比例为 11%~25%。

Abstract

In China's southeastern coastal areas, typhoons and severe convective weather are frequent, and in recent years, many cities have experienced accidents of tree failure caused by strong winds. To investigate the relationship between urban tree wind resistance and pruning ratio, this study focuses on the common tree shapes found among Guangzhou's street trees—the oval and pyramidal shapes—and selects the oval-shaped species *Saraca dives* and *Dracontomelon duperreanum*, as well as the pyramidal-shaped species *Terminalia neotaliala* and *Bombax ceiba*, as the subjects. Based on static load tests, an analysis of tree morphological stability and a study on the correlation between pulling force and angle under different pruning frequencies are conducted, so as to determine the optimal wind-resistant pruning ratio for urban trees. The results indicate that taller trees and more asymmetrical crowns exhibit lower stability. The pruning ratio significantly affects tree wind resistance, and the optimal pruning ratios for both oval-shaped and pyramidal urban trees fall within the range of 11%~25%.

文章亮点

1) 量化揭示了树高、树冠不对称性显著降低树木稳定性, 明确了树木形态对抗风能力的影响机制。2) 基于静力荷载实验数据提出最佳抗风修剪比例, 为提升城市树木的抗风性能及优化日常养护树木修剪比例提供理论依据。

关键词

城市树木; 抗风性; 静力荷载试验; 拉力试验; 修剪; 树木安全

Keywords

Urban trees; Wind resistance; Static load test; Tension test; Pruning; Tree safety

收稿日期: 2025-11-07

修回日期: 2025-12-26

台风等风灾会对城市树木造成一定损害^[1]。根据我国近 50 年台风登陆的空间分布统计, 登陆地点主要集中在我国的华东和华南地区, 后者尤甚^[2]。2014—2024 年登陆华南地区的近中心最大风力不小于 8 级的台风数量为 48 个^[3~4]。

树木作为城市绿化的骨干材料, 在维持景观结构与生态功能方面具有关键作用。台风造成的树木损伤通常体现在树冠、枝条、树干及根系 4 个主要部位, 任一部位的严重损害均可能引起树木整体结构失衡, 进而构成潜在的安全风险^[5]。

为了有效减少风灾对城市园林树木及人们生命财产安全造成的损失, 学者们围绕影响树木的抗风性因子展开了一系列研究。张德顺等^[6]通过静态拉力实验和树木形态稳定性评价, 对上海常见的 25 种园林树种的抗风性特征进行综合评价, 结果显示各树种的抗拉力矩与抗拉角度呈对数函数关系; 而稳定性指数随树木高度、冠高比、树冠不对称性指标的上升而减小。肖洁舒等^[7]对“韦森特”台风后深圳市主要受风区域的树木倒伏情况进行实地调查, 发现同一树种在修剪与不修剪的情况下, 其抗风能力存在明显差距: 经过修剪的树木在台风中表现出较强的抗风性, 而未经修剪的几乎全部倒伏。此外, 经过修剪的不抗风树种, 其抗风能力甚至优于未经修剪的抗风树种; Kenneth R James 等^[8]对 4 种不同形状的树木进行了数百小时的监测, 频谱分析结果显示树枝、冠层对风中动态树的摇摆影响大于主干, 说明树枝的修剪研究对于提升树木抗风性具有重要意义。

现有研究表明, 修剪可在一定程度上提升城市树木的抗风性能, 但如何控制修剪比例与角度等问题尚有待探究。本文以广州市行道树的常见树形卵形和塔形的常见种类为研究对象, 基于静力荷载实验^[9], 开展树木形态稳定性分析, 以及不同冠层密度下拉力与角度相关性研究, 以确定城市树木的最佳抗风修剪比例。研究旨在为提升城市树木的抗风性能及优化日常养护树木修剪比例提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

课题团队于 2018—2020 年对广州市市管的八条主干路及二沙岛范围内约 1.5 万株行道树进行调查评估, 统计得到行道树树形以卵形、塔形最为常见。其中, 卵形树种有樟 *Camphora officinarum*、杧果 *Mangifera indica*、中国无忧花 *Saraca dives*、人面子 *Dracontomelon duperreanum*、白兰 *Michelia × alba*、麻楝 *Chukrasia tabularis*、垂叶榕 *Ficus benjamina*、

海南蒲桃 *Syzygium hainanense* 等; 塔形树种包括木棉 *Bombax ceiba*、小叶榄仁 *Terminalia neotaliala*、美丽异木棉 *Ceiba speciosa* 等^[10]。本文选择卵形树种中国无忧花和人面子, 以及塔形树种小叶榄仁和木棉 4 个较为常见的树种为研究对象, 每个树种选取 5 株 (所有树木均为同一批次种植在开放绿地中超过 5 年时间的个体, 树木长势、根系发育及立地条件均正常), 共选取 20 株树木, 依次编号为 A1~A5、B1~B5、C1~C5、D1~D5 (图 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 树木基础参数测定

本研究利用胸径尺、测距仪、测高仪、叶面积指数测量仪, 测量 20 株树木的树高、胸径 (距地面 130 cm 处测得的树干直径)、地径 (距地面 10 cm 处测得的树干直径)、最低活枝下高、冠幅 (东、西、南、北)、树冠高度等基础特性数据 (表 1)。

1.2.2 树木形态稳定性评价

Aimilia Kontogianni^[11]通过多元回归分析发现, 冠高比 *CR*、树高 *H* 和树冠不对称度 *CAI* 对树木形态稳定



a. 中国无忧花 (编号 A1~A5)



b. 人面子 (编号 B1~B5)



c. 小叶榄仁 (编号 C1~C5)



d. 木棉 (编号 D1~D5)

图 1 部分研究个体情况

Fig.1 Basic characteristics of selected study individuals

性指数影响最显著。本研究参考相关研究^[6, 11]提出的树木形态稳定性赋分标准, 评估树木的稳定性。首先, 对各树木的树冠不对称度 *CAI* 进行赋分 (表 2) :

$$d_1 = |R1 - R2| \tag{1}$$

$$d_2 = |R3 - R4| \tag{2}$$

$$d_3 = |(R1 + R2) - (R3 + R4)| \tag{3}$$

若差值 *d*₁、*d*₂ 不大于 0.2, 则东西冠幅、南北冠幅对称, 否则不对称; 若差值 *d*₃ 不大于 0.5, 则东西冠幅和南北冠幅相互对称, 否则不对称。若树木的 *d*₁、*d*₂、*d*₃ 都在对称范围内, 则树冠不对称度 *CAI* 赋值为 1; 若有 1 个差值呈现不对称则赋值为 2; 若有 2 个差值呈现不对称则赋值为 3; 若 3 个差值都呈现不对称则赋值为 4。接着计算各株树木的形态稳定性指数 *TSI*, 公式如下:

$$TSI = a + bCR + cCAI + dH \tag{4}$$

式中 *a*、*b*、*c*、*d* 为经验系数, 分别取值为 6.362、0.984、1.014、0.388^[12-14]。树木的 *TSI* 越大, 表明树木的稳定性越低。

1.2.3 静态拉力实验

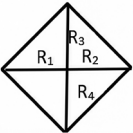
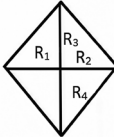
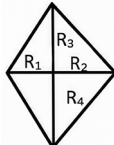
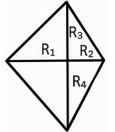
本研究采用树木拉力测试仪 (Tree-Qunite) 开展分级牵拉实验。该仪器为行业内广泛采用的静力荷载测定设备, 能够精确、可靠地测定树木在静力荷载下的承载力, 为研究数据的有效性与实验的可行性提供了重要保障。

本研究对形态稳定性较高的树种进行静态拉力实验, 选择周边空间满足测试条件的单株树木作为样本。实验采用逐级加载方式: 从 0 开始逐渐施加水平拉力至定值, 持续记录拉力施加值与树木形变角度 (即树干倾斜角度), 待树木变形稳定后缓慢卸除荷载, 依据树干倾斜角度是否恢复至初始值 ±0.5° 以内判断其可恢复性; 若可恢复, 则进行修剪并重复上述操作, 其中所有方位测量均以正北方向为正向。每次拉力测试完成后, 随即进行下一轮修剪, 共修剪 5 次, 遵循“保留二级分枝结构”的原则, 即仅对二级以上分枝的冠层枝叶进行修剪。

表 1 树木基础指标数据
Tab.1 Basic indicator data of trees

树种 - 编号	树高 /m	地径 /cm	胸径 /cm	最低活枝 下高 /m	树冠高度 /m	冠幅 /m			
						西 (R1)	东 (R2)	北 (R3)	南 (R4)
中国无忧花 -A1	8.68	24.10	16.70	2.45	5.85	2.60	2.50	2.01	2.80
中国无忧花 -A2	5.88	20.90	14.90	1.75	4.18	2.90	2.60	2.60	3.40
中国无忧花 -A3	8.00	17.50	14.30	2.15	5.90	2.34	2.71	2.29	2.75
中国无忧花 -A4	5.50	17.90	14.00	2.19	3.35	2.78	2.51	2.14	2.82
中国无忧花 -A5	6.50	19.30	14.40	2.37	4.18	2.54	3.06	2.59	2.88
人面子 -B1	7.40	62.17	32.58	3.14	4.66	3.87	4.89	4.10	4.32
人面子 -B2	9.00	55.64	45.61	4.27	4.67	4.60	4.24	2.40	4.47
人面子 -B3	9.10	55.22	43.18	1.84	5.15	5.34	5.09	12.77	5.54
人面子 -B4	9.40	53.54	39.04	2.41	5.50	4.29	5.43	4.42	5.82
人面子 -B5	8.30	58.73	41.97	3.44	5.15	2.18	2.21	3.31	3.84
小叶榄仁 -C1	8.20	25.20	18.20	3.36	5.12	4.20	3.80	2.80	3.60
小叶榄仁 -C2	8.38	24.30	18.30	3.18	5.00	3.10	3.70	3.10	3.06
小叶榄仁 -C3	7.50	23.40	18.61	2.10	5.60	3.17	3.17	3.26	3.12
小叶榄仁 -C4	7.70	27.63	23.71	1.44	5.72	3.59	3.22	3.43	3.09
小叶榄仁 -C5	7.20	23.82	20.95	1.47	5.02	3.72	3.75	3.53	3.40
木棉 -D1	9.20	39.04	28.69	3.67	6.98	2.90	4.23	3.75	3.30
木棉 -D2	8.50	44.52	32.55	4.24	4.39	4.13	5.11	4.97	2.95
木棉 -D3	10.50	48.22	33.18	6.33	5.26	3.66	3.49	3.42	3.89
木棉 -D4	9.00	30.96	23.09	5.25	4.25	3.31	3.57	3.60	2.85
木棉 -D5	9.00	25.32	21.91	5.30	4.64	2.57	2.64	3.00	2.32

表 2 树冠不对称度的赋分标准
Tab.2 Scoring criteria for the crown asymmetry index

CAI 分值	树冠不对称情况	图示
1	$d_1 \leq 0.2, d_2 \leq 0.2, d_3 \leq 0.5$	
2	① $d_1 \leq 0.2, d_2 \leq 0.2, d_3 > 0.5$ ② $d_1 > 0.2$ 或 $d_2 > 0.2, d_3 \leq 0.5$	
3	① $d_1 > 0.2$ 或 $d_2 > 0.2, d_3 > 0.5$ ② $d_1 > 0.2$ 且 $d_2 > 0.2, d_3 \leq 0.5$	
4	$d_1 > 0.2$ 且 $d_2 > 0.2, d_3 > 0.5$;	

最后将每次修剪下来的枝叶进行称重并记录，计算得出二级分枝以上原始树冠总重量。

2 结果与分析

2.1 树木形态稳定性评价

研究对 20 株树木进行形态稳定性评估（表 3），分析各株树木形态稳定性分布特征。4 个树种按 *TSI* 均值从大到小排序依次为人面子（13.94）、木棉（13.33）、小叶榄仁（12.69）、中国无忧花（12.55），得出中国无忧花和小叶榄仁的形态稳定性较高。进一步比较得到，两者的树高相对较低，树冠对称性较好，理论上受风害影响的风险相对较小。从树高、树冠不对称度与形态稳定性指数的相关性分析结果可以得出（图 2~3），树越高、树冠形态越不对称，树木的稳定性越低。

2.2 树木的最佳抗风修剪比例

根据上述树木稳定性评价结果，以稳定性较好的中国无忧花和小叶榄仁为研究对象，结合周边空间条件，进而确定以中国无忧花 A2 和小叶榄仁 C1 为对象进行静力荷载实验，探讨不同修剪次数下拉力与树木形变角度之间的关系，并提出最佳修剪比例。

表 3 树木形态稳定性结果

Tab.3 Results of tree morphological stability

树种 - 编号	树高 <i>H</i> /m	冠高比 <i>CR</i>	树冠不对称度 <i>CAI</i>	指数 <i>TSI</i>
中国无忧花-A1	8.68	0.67	2	12.42
中国无忧花-A2	5.88	0.71	3	12.38
中国无忧花-A3	8.00	0.74	3	13.23
中国无忧花-A4	5.50	0.61	3	12.14
中国无忧花-A5	6.50	0.64	3	12.56
人面子-B1	7.40	0.63	3	12.89
人面子-B2	9.00	0.52	4	14.42
人面子-B3	9.10	0.57	4	14.51
人面子-B4	9.40	0.59	4	14.64
人面子-B5	8.30	0.62	3	13.23
小叶榄仁-C1	8.20	0.62	4	14.21
小叶榄仁-C2	8.38	0.60	3	13.24
小叶榄仁-C3	7.50	0.75	1	11.02
小叶榄仁-C4	7.70	0.74	3	13.12
小叶榄仁-C5	7.20	0.70	2	11.87
木棉-D1	9.20	0.76	3	13.72
木棉-D2	8.50	0.52	4	14.22
木棉-D3	10.50	0.50	2	12.96
木棉-D4	9.00	0.47	3	13.36
木棉-D5	9.00	0.52	2	12.39

以树木不发生断裂破坏为前提，结合试验现场树木的形变特征进行综合判定，将对应的施加拉力设定为静态拉力试验的水平拉力定值，中国无忧花 A2 的水平拉力定值为 2 kN，小叶榄仁 C1 的水平拉力定值为 3 kN。

中国无忧花的抗风性能随修剪次数增加呈非线性变化规律（图 4）。随着修剪次数增加，其可承受的最大形变角度呈现先上升后下降的趋势：未修剪、第一次和第二次修剪后的树木能承受的形变角度依次增大，并在第二次修剪中达到

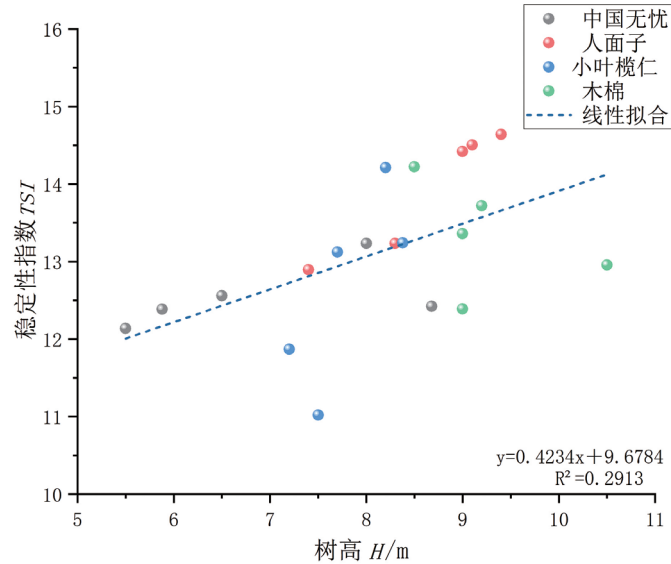


图 2 树高与形态稳定性指数关系
Fig.2 Relationship of tree height with morphological stability index

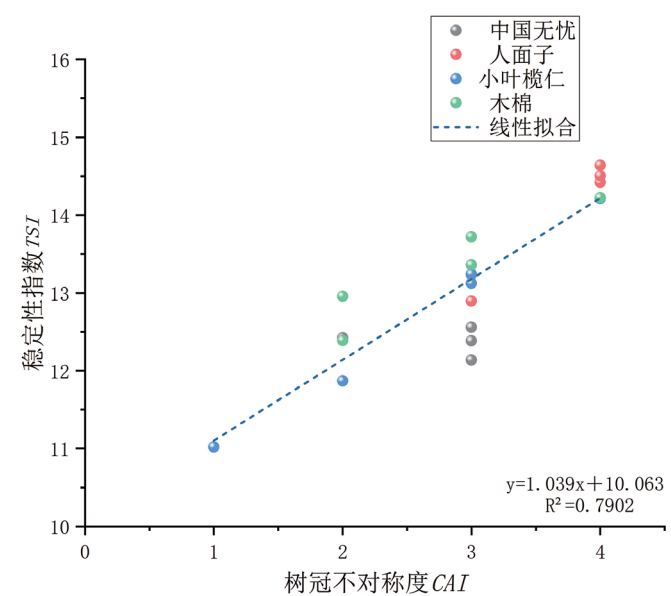


图 3 树冠不对称度与形态稳定性指数关系
Fig.3 Relationship between crown asymmetry index and morphological stability index

最大值，即在拉力接近 2 kN 时形变角度达到 4.5°；而第三次和第四次修剪后可承受角度减小。这表明适度修剪可提升树体在风荷载下的结构柔性，增强其抗拉能力，而过度修剪会导致结构承载力减弱。

小叶榄仁的抗风性能同样受修剪次数的显著影响（图 5），其在第二次修剪时达到最大可承受角度值，即在

拉力约为 3 kN 时形变角度达到 3°；第三次、第四次修剪后可承受角度减小。此外，在第一次和第五次修剪中，随着拉力增大，树木的形变角度变化幅度很小，该现象可能与小叶榄仁的树冠结构特征有关：其各级分枝间差异较大，一、二级分枝较重，三级分枝较轻。第一次修剪的枝叶重量占比较小，因此角度变化与未修剪时差别较

小；而第五次修剪时，其可承受角度变化减小，表明过度修剪导致其抗风能力减弱。

综上，中国无忧花和小叶榄仁的最佳修剪比例在第二次修剪范围内。中国无忧花第一次、第二次修剪质量占比分别为 11.10% 和 12.15%；小叶榄仁第一次、第二次修剪质量占比分别为 10.95% 和 13.76%（表 4），由此计算得出 2 个树种的最佳修剪比例为 10.95% ~ 24.71%。

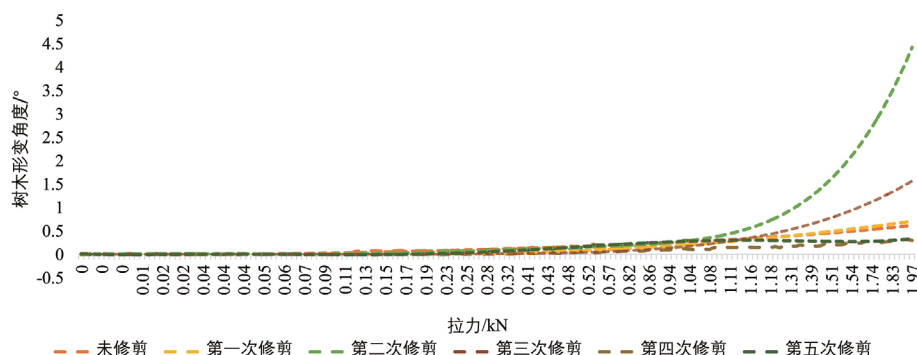


图 4 中国无忧花不同修剪次数下拉力与角度的关系

Fig.4 Relationship between pulling force and angle under different pruning frequencies of *Saraca dives*

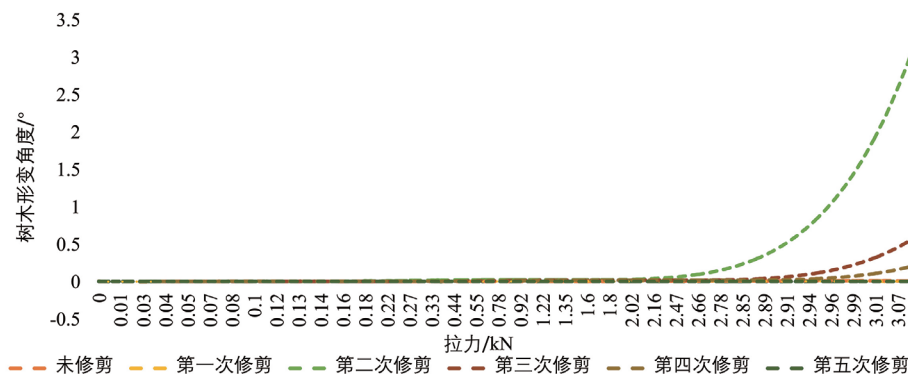


图 5 小叶榄仁不同修剪次数下拉力与角度的关系

Fig.5 Relationship between pulling force and angle under different pruning frequencies of *Terminalia neotaliala*

表 4 不同修剪次数的修剪重量数据

Tab.4 Pruning quality data under different pruning frequencies

实验对象	第一次修剪重量/kg (占比)	第二次修剪重量/kg (占比)	第三次修剪重量/kg (占比)	第四次修剪重量/kg (占比)	第五次修剪重量/kg (占比)	总重量/kg
中国无忧花 A2	8.4 (11.10%)	9.2 (12.15%)	19.0 (25.10%)	17.0 (22.46%)	22.1 (29.19%)	75.7
小叶榄仁 C1	7.4 (10.95%)	9.3 (13.76%)	12.9 (19.08%)	13.4 (19.82%)	24.6 (36.39%)	67.6

3 讨论

实验结果表明，中国无忧花与小叶榄仁的抗风性能与修剪次数呈显著的非线性关系。在未修剪至第二次修剪阶段，树木的荷载应力分布得到优化，最大可承受形变角度随修剪次数增加而递增，并于第二次修剪后达到峰值。这表明适度修剪可通过调整冠层结构、降低风压中心高度，更有效地分散风荷载产生的弯曲应力。然而，在第三、四次修剪后，可承受角度下降，推测是过度修剪导致冠层生物量不足，削弱了树木的惯性阻尼效应，同时可能引发应力集中，降低了树木整体结构韧性。因此，中国无忧花与小叶榄仁的最佳修剪比例在第一次和第二次修剪范围内，为 10.95% ~ 24.71%，结合国内外相关研究^[15-16]，取并集得出卵形和塔形的城市树木最佳抗风修剪比例为 11% ~ 25%。适度修剪可使树木抗风性达到最优，而过度修剪并不能进一步增强其抗风能力。同时，修剪作业对树木，特别是对成熟大树的影响较大，过度修剪造成的大面积切口易成为病虫害的入侵位点。此外，树冠枝叶量的急剧减少可能导致光合作用不足，进而引起树体衰弱，这种影响在生长缓慢、恢复能力较弱的树种中尤为突出，应当在树木管理实践中予以足够的重视。

4 结论

本文以广州市行道树常见的卵形（中国无忧花、人面子）和塔形（小叶榄仁、木棉）树种为研究对象，基于静力荷载实验，开展树木形态稳定

性分析，以及不同冠层密度下拉力与角度相关性研究。研究发现，树越高、树冠越不对称，树木的稳定性越低；树木的抗风性能受到修剪次数的显著影响，提出卵形和塔形的城市树木的最佳抗风修剪比例为 11%~25%。

研究选取了广州地区具有代表性的卵形和塔形树种，采用力学实验方法，揭示了树木形态和修剪比例对抗风能力的影响机制，提出了最佳抗风修剪比例，实现了从理论机制探究到具体管理参数输出的跨越，对提升华南地区城市树木的抗风安全性和养护科学性具有重要的理论与实践价值。但本研究尚存在一定局限性：首先，在理论分析中，风荷载的计算主要基于经典力学公式，这些公式在理想条件下成立，但在实际复杂风环境中的适用性可能受到一定限制，未来研究可通过更深入的试验对相关理论模型进行验证与修正。其次，在研究对象方面，尚未涵盖该地区所有常见树形且实验对象数量有限，后续将扩大范围，开展深入研究。

注：图片均由作者自摄自绘。

参考文献：

[1] 黄颂谊, 陈崢, 黄桂莲, 等. “山竹”台风对广州市滨江园林树木的影响——以临江大道及带状公园为例 [J]. 中国园林, 2020, 36 (11) : 27-132.

[2] 马运佳, 颜小龙, 张婧, 等. 近 50 年我国台风登陆的时空分布特征分析 [J]. 城市与减灾, 2023 (5) : 48-53.

[3] M YING, W ZHANG, H YU, et al. An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31 (2) : 287-301.

[4] LU X, YU H, YING M, et al. Western North Pacific Tropical Cyclone Database Created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38 (4) : 690-699.

[5] 李婷. 城市道路绿地树木健康与安全评价研究：以马鞍山市主城区为例 [D]. 安徽：安徽农业大学, 2020.

[6] 张德顺, 李科科, 李玲璐, 等. 上海滨海地区 25 种园林树种的抗风性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42 (7) : 122-130.

[7] 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.

[8] JAMES K R, HARITOS N, ADES P K. Mechanical stability of trees under dynamic loads[J]. American Journal of Botany, 2006, 93 (10) : 1522-1530.

[9] 吴貽军, 王福利, 邵卓平. 树木抗风能力测试新方法 [J]. 广东园林, 2023, 45 (3) : 90-93.

[10] 贾益兴, 雷杰, 黄颂谊. 广州市环市路行道树木安全风险评估与管理探析 [J]. 广东园林, 2021, 43 (4) : 93-96.

[11] KONTOGIANNI A, TSITSONI T, GOUDELIS G. An index based on silvicultural knowledge for tree stability assessment and improved ecological function in urban ecosystems[J]. Ecological Engineering, 2011, 37 (6) : 914-919.

[12] 小泉章夫. 樹冠の抗力係数と樹形計測に基づいた緑化樹木の耐風性診断 [R/OL]. (2025-05-08) [2025-11-07]. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-21580169/21580169seika.pdf>.

[13] 陶山正憲. 台風による樹木の風倒・折損機構 [J]. 水利科学, 1993, 37 (1) : 25-53.

[14] 小泉章夫. 緑化樹の耐風性評価 [J]. 日本緑化工学会誌, 2022, 47 (3) : 378-383.

[15] GREENING, LANDSCAPE AND TREE MANAGEMENT SECTION DEVELOPMENT BUREAU. Handbook on Tree Management[R/OL]. [2025-11-07]. <https://www.greening.gov.hk/sc/tree-care/information-about-tree-maintenance-for-private-pro/handbook-on-tree-management/index.html>.

[16] Huntingdonshire District Council. Tree Guidance Note 2: Guidance for Tree Management in Huntingdonshire[R]. Huntingdon: Huntingdonshire District Council, 2012.

作者简介：

何嘉怡/2001 年生 / 女 / 广东江门人 / 硕士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 仲恺农业工程学院园林景观研究所 (广州 510225) / 专业方向为园林植物与观赏园艺

陈绮楠/2000 年生 / 女 / 广东广州人 / 硕士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 仲恺农业工程学院园林景观研究所 (广州 510225) / 专业方向为风景园林

张安琪/2000 年生 / 女 / 广东揭阳人 / 硕士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院 (广州 510225) / 专业方向为水土保持与荒漠化防治

黄颂谊 (* 通信作者) /1982 年生 / 女 / 广东广州人 / 博士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 仲恺农业工程学院园林景观研究所 (广州 510225) / 园林正高级工程师 / 研究方向为园林植物安全性和观赏性的理论研究与技术应用 /E-mail: huangsongyi@hotmail.com