

“摩羯”台风灾后琼北城镇古树的受损评价及其抗风性分析

Evaluation of Damage to Ancient Trees in Northern Hainan Towns Post-Typhoon Yagi and Analysis of Their Wind Resistance

许凯 钟云芳 宋理桥 刘启畅 杨泽秀*

XU Kai, ZHONG Yunfang, SONG Liqiao, LIU Qichang, YANG Zexiu*

摘要

为进一步强化琼北地区古树的日常精细化养护与台风灾害前置防控管理, 聚焦海南文昌市、澄迈县的古树资源, 系统探究其在台风影响下的受损特征及抗风性能。研究通过实地调查, 结合层次分析法构建台风灾后古树受损评价体系, 并采用斯皮尔曼相关系数评估古树自身指标与抗风性的关系。结果表明: 古树总体受损率为 56.63%, 树势、倾斜程度和根系裸露损伤面积是影响受损程度的主要因素; 古树健康值与树龄、树高、冠幅呈负相关, 与海拔呈正相关, 与胸径无显著相关; 按各指标与古树健康值的相关强度排序, 从高到低依次为树高、冠幅、海拔、树龄、胸径; 按树种抗风性得分排序, 由强到弱依次为见血封喉 *Antiaris toxicaria*、垂叶榕 *Ficus benjamina*、高山榕 *Ficus altissima*、榕树 *Ficus microcarpa*、雅榕 *Ficus concinna*。最后提出修枝整形、加固支撑、加强日常监测及养护、建立风险评估体系等建议。

Abstract

To further enhance the refined daily conservation of ancient trees in northern Hainan and the pre-disaster management of typhoon impacts, this study focuses on the ancient tree resources in Wenchang City and Chengmai County, Hainan Province, systematically investigating their damage characteristics and wind resistance during typhoons. Using field investigations and the analytic hierarchy process (AHP), a post-typhoon damage assessment system for ancient trees was established, and the Spearman correlation coefficient was applied to evaluate the relationship between intrinsic tree indicators and wind resistance. Results indicated that the overall damage rate for ancient trees was 56.63%, with tree vigour, tilt degree, and root exposure area as the primary factors influencing the extent of damage. Tree health value was negatively correlated with tree age, height, and crown width, positively correlated with altitude, and was not significantly correlated with diameter at breast height (DBH). The indicators, ranked by their correlation strength with tree health value, were: tree height, crown width, altitude, tree age, and DBH. The wind resistance of tree species, ranked from strongest to weakest, was: *Antiaris toxicaria*, *Ficus benjamina*, *Ficus altissima*, *Ficus microcarpa*, and *Ficus concinna*. Based on these findings, recommendations such as pruning and shaping, structural support and reinforcement, enhanced daily monitoring and maintenance, and the establishment of a risk assessment system were proposed.

文章亮点

1) 初步探究了琼北城镇古树在台风中的受损情况以及影响其受损的因素。2) 构建了适用于评价琼北地区台风灾后的古树受损评价体系。3) 对琼北地区主要古树树种的抗风能力进行了排序与比较, 为该地区古树的防风保护提供了参考。

关键词

古树; 受损评价; 抗风性; 台风灾害; 层次分析法; 相关性分析

Keywords

Ancient trees; Damage assessment; Wind resistance; Typhoon disaster; Analytic hierarchy process; Correlation Analysis

收稿日期: 2025-06-08

修回日期: 2025-07-27

古树饱经沧桑, 记录着自然与人文的变迁^[1], 享有“活化石”之称, 是大自然赋予的宝贵财富^[2], 具有十分重要的科研、历史、文化、经济等价值^[3]。除此以外, 古树在生物多样性保护方面发挥着重要作用^[4-6]。然而, 世界上的古树正不断减少, 古树保护的重要性不言而喻。台风这一极具破坏力的自然灾害对古树造成了严重威胁。1973 年至 2022 年间, 我国华南地区是台风登陆最频繁的地区, 其中登陆频次最多的是海南省^[7]。台风侵袭会对古树造成直接损伤, 如叶片大量脱落、枝干折断, 甚至树木被连根拔起^[8-10]。

2024 年 9 月 6 日, 2024 年第 11 号台风“摩羯”登陆海南省文昌市, 其中心最大风力达 17 级以上, 风速达 65 m/s^[11]。在海南岛上, 12 级以上风力的覆盖面积为 1 122 km², 13 级以上风力的覆盖面积为 630 km², 14 级以上风力的覆盖面积为 101 km²^[11]。台风“摩羯”对海南省海口市、文昌市、澄迈县等地造成了严重破坏, 许多古树出现枝干严重折断、倒伏等受损情况(图 1)。为调查海南文昌市、澄迈县两地古树在台风影响下的受损情况, 本研究基于层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)构建了古树风灾受损评价体系, 运用斯皮尔曼相关性分析(Spearman correlation)评估不同古树树种的抗风性。研究旨在为该地区古树的防风保护与风险管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象概况

本文以海南省文昌市和澄迈县两地现存的 943 株古树为研究对象, 其中文昌市 481 株, 澄迈县 462 株。文昌市地处海南岛的东北部, 属热带季风海洋性气候, 年平均温度为 23.9 ℃, 雨季集中于 5—10 月, 常受强热带风暴、台风影响; 澄迈县位于海南岛西北部, 属热带季风气候, 高温多雨, 台风频繁^[12]。

1.2 数据测量

本研究对每株古树进行实地调查, 测量并记录古树的生长指标, 测量方式如下: 胸径(cm)利用卷尺测量主干 1.3 m 处周长后换算取得; 树高(m)利用手持机械测高仪和激光测距仪测定; 冠幅(m)通过测量树木东西、南北向宽度的平均值确定; 海拔(m)利用 GPS 等设备记录; 树龄则以古树档案记录的年龄为准。

1.3 研究方法

研究首先运用层次分析法, 根据实地调查中古树的外在受损情况, 选取树势、倾斜程度、损伤叶片占比、断枝程度、树干断裂长度、根系裸露损伤面积 6 个指标建立受损评价体系, 并对古树的受损情况进行评价^[13]。接着划分古树树种的抗风性等级, 计算各树种的抗风性得分。最后采用斯皮尔曼相关性分析评估古树自身指标与抗风性之间的关系。同时运用 JASP、ArcGIS 等软件绘制相关图片。

1.3.1 构建层次分析结构

研究在实地调查的基础上, 结合树木生长规律、相关论文及专家意见^[14-16], 采用层次分析法构建古树受损评价体系(表 1)。指标体系以古树健康值为目标层 A, 以整体、树冠、树干、根系为结构层 B, 以树势、倾斜程度、损伤叶片占比、断枝程度、树干断裂长度、根系裸露损伤面积为指标层 C。其中树势指树木整体生长势; 倾斜程度指树干相对地面的倾斜角度; 损伤叶片占比指损伤叶片占总体树冠叶片之比; 断枝程度指树木折断枝干的数量; 树干断裂长度指主干开裂或断裂的长度, 以主干周长划分断裂程度, 当断裂长度超过主干周长的 2/3 时, 古树易发生整体倒伏; 根系裸露损伤面积指根系裸露区域占总体根系区域之比。结构层主要限定指标层的范围, 不参与权重计算。在 6 项指标中, C1 为定性指标, C2~C6 为定量指标。研究邀请了 3 位专家对各项指标进行两两比较并根据 1~9 标度法打分, 得到判断矩阵的标度值, 以此构建判断矩阵(表 2)。接着运用和积法

表 1 古树受损评价指标体系
Tab.1 Ancient tree damage evaluation index system

目标层 A	结构层 B	指标层 C	评分区间				
			(4.0,5.0]	(3.0,4.0]	(2.0,3.0]	(1.0,2.0]	[0,1.0]
古树健康值 A	整体 B1	树势 C1	轻微受损	存在多处明显受损	受损较重, 存在恢复趋势	受损严重, 无恢复趋势	受损极重, 处于濒危状态
		倾斜程度 C2	≤ 10°	(10° ,20°]	(20° ,30°]	(30° ,40°]	> 40°
	树冠 B2	损伤叶片占比 C3	≤ 5%	(5%,25%]	(25%,50%]	(50%,75%]	> 75%
		断枝程度 C4	少数小枝	多数小枝	少数侧枝	多数侧枝	多于 1 主枝断裂
	树干 B3	树干断裂长度 C5	无明显损伤	≤ 1/8*	(1/8,1/3]*	(1/3,2/3]*	> 2/3*
	根系 B4	根系裸露损伤面积 C6	≤ 5%	(5%,25%]	(25%,50%]	(50%,75%]	> 75%

注: *指断裂长度占树干周长的比例。

计算各指标的权重值 W ，结果显示树势权重值最高 (0.394)，其次为根系裸露损伤面积 (0.216) 与倾斜程度 (0.187)，而树干断裂长度与损伤叶片占比的权重值相对较低 (表 2)。最后计算获得 CR 为 0.0846，小于 0.1，这表明矩阵通过一致性检验，权重结果合理可信。

根据古树健康值 A ，研究将台风后古树受损情况分为轻微受损、一般受损、中度受损、重度受损和濒临死亡 5 级 (表 3)。古树健康值 A 的计算公式如下：

$$A = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 C_i 为各指标评价得分， W_i 为相应指标的权重。古树健康值 A 越大表明古树在台风中所受的损伤越小，同时

也说明古树个体的抗风性较高。

1.3.2 抗风性评价

根据古树健康值 A ，可将古树的抗风性划分为“高抗” ($A \geq 4.5$)、“中抗” ($3 \leq A < 4.5$)、“一般” ($2 \leq A < 3$)、“不抗” ($A < 2$) 4 个等级。

根据相关研究论文权重划分情况^[17]，为各抗风等级分别授予权重系数，高抗、中抗、一般、不抗分别为 5、3、1.5、0.5，各树种抗风性得分 = $5 \times$ 高抗等级占比 + $3 \times$ 中抗等级占比 + $1.5 \times$ 一般占比 + $0.5 \times$ 不抗等级占比。

2 结果与分析

2.1 古树受损评价

台风后调查的 943 株古树包括 26 科 37 属 44 种，株数

表 2 判断矩阵及各指标权重值

Tab.2 Judgment matrix and index weight values

A	C1	C2	C3	C4	C5	C6	W
C1	1	3	6	5	4	2	0.394
C2	1/3	1	5	4	3	1/2	0.187
C3	1/6	1/5	1	1/2	1/4	1/6	0.039
C4	1/5	1/4	2	1	1/2	1/4	0.062
C5	1/4	1/3	4	2	1	1/3	0.102
C6	1/2	2	6	4	3	1	0.216

表 3 古树受损等级评价

Tab.3 Assessment of damage levels to ancient trees

受损等级	评价综合指数	受损状况特征
轻微受损	$A \geq 4.5$	未受损或枝叶脱落及小枝折断不明显，长势良好
一般受损	$3 \leq A < 4.5$	存在叶片脱落或小枝折断的现象，但有自我恢复趋势
中度受损	$2 \leq A < 3$	较多侧枝折断或存在主枝折断情况，生长表现出衰退迹象
重度受损	$1 \leq A < 2$	较多主枝折断或主干折断、劈裂或倾斜，恢复困难
濒临死亡	$A < 1$	树体倒伏或主干由基部折断，濒临死亡



图 1 古树调查现场

Fig.1 Field survey of ancient trees

排名前十的树种如表 4 所示。两地共有 534 株古树出现明显受损，总体上受损率为 56.63%，其中文昌市有 302 株受损古树，澄迈县有 232 株；两地共有 80 株古树直接倒伏（图 1）。受损最严重的科属是桑科榕属，受损最严重的树种是雅榕。

古树受损情况呈现明显的空间分布差异：文昌市内的受损古树密集，受损程度较严重；澄迈县内的受损古树较少，受损程度相对较轻。未受损古树密集分布于澄迈县的西南、西北及中部区域；在受损严重的文昌市也存在部分未受损古树，这说明文昌市和澄迈县古树的抗风能力存在差异（图 2）。

结合调查数据及表 1，研究团队对每株古树各项指标进行打分，并计算获得各古树健康值A，根据表 3 进行等级评价。研究发现，海南文昌市和澄迈县调查古树中轻度受损 457 株、一般受损 328 株、中度受损 38 株、重度受损 32 株、濒临死亡 88 株（表 5）。

2.2 古树抗风性评价

由表 4 可知，部分古树树种的个体数量较少，分析结果

不具有代表性，故研究选择株数排名前五的树种即雅榕、榕树、高山榕、见血封喉、垂叶榕进行分析。见血封喉的高抗比例近 70%，但仍有 10.13% 处于不抗等级；雅榕的高抗比例最低（34.63%），不抗比例最高（18.37%）；垂叶榕、高山榕与雅榕的中抗比例高（大于 30%），并且榕树的中抗比例接近 30%，这表明 5 种古树中榕属古树中抗等级的占比显著高于见血封喉（图 3）。

根据公式计算各树种抗风性得分，见血封喉（4.08 分）是得分最高的树种，余下 4 种古树得分均低于 4 分，雅榕（3.16 分）是得分最低的树种。在 5 种古树中，得分最高的见血封喉具有最高的平均树龄与最小的平均冠幅；而得分最低的雅榕的平均海拔显著低于其他 4 种古树（表 6）。

2.3 古树抗风性分析

2.3.1 总体抗风性分析

在不考虑树种对抗风性影响的情况下，利用斯皮尔曼相

表 4 古树树种统计

Tab.4 Statistics on ancient tree species

序号	树种	数量 / 株	占比 / %
1	雅榕 <i>Ficus concinna</i>	283	30.01
2	榕树 <i>Ficus microcarpa</i>	203	21.53
3	高山榕 <i>Ficus altissima</i>	154	16.33
4	见血封喉 <i>Antiaris toxicaria</i>	79	8.38
5	垂叶榕 <i>Ficus benjamina</i>	67	7.10
6	榄仁 <i>Terminalia catappa</i>	40	4.24
7	荔枝 <i>Litchi chinensis</i>	16	1.70
8	斜叶榕 <i>Ficus tinctoria</i> subsp. <i>gibbosa</i>	9	0.95
9	秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	7	0.74
10	胭脂 <i>Artocarpus tonkinensis</i>	7	0.74

表 5 文昌市和澄迈县古树健康值评价

Tab.5 Health value assessment of ancient trees in Wenchang City and Chengmai County

受损等级	数量 / 株	占比 / %	古树健康值 A		
			最小值	最大值	平均值
轻微受损	457	48.47	4.500 1	4.998 4	4.737 8
一般受损	328	34.78	3.010 5	4.497 8	3.827 5
中度受损	38	4.03	2.175 5	2.995 9	2.693 6
重度受损	32	3.39	1.314 9	1.997 3	1.896 3
濒临死亡	88	9.33	0.205 3	0.499 9	0.432 6

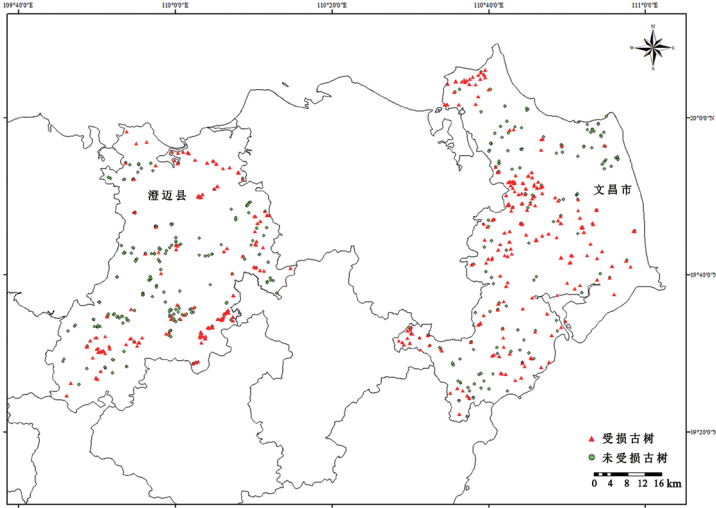


图 2 古树点位分布
Fig.2 Spatial distribution of ancient trees

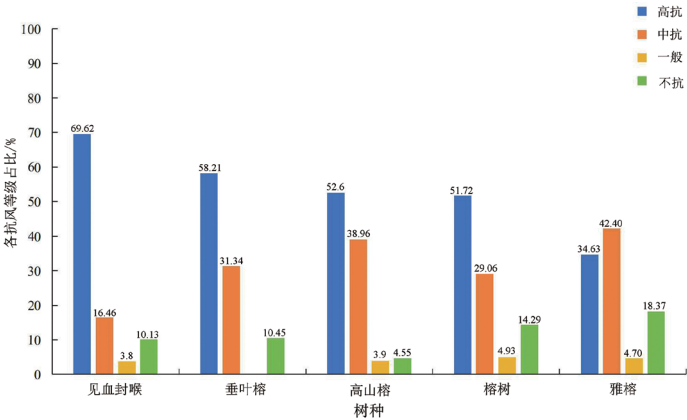


图 3 不同树种抗风等级占比
Fig.3 Proportion of wind resistance classes by tree species

关系数分析古树的树龄、树高、冠幅、胸径、海拔与古树健康值A的关系(表7)。经分析,古树健康值与树龄、树高、冠幅间的相关性系数分别为-0.069、-0.337、-0.160,均呈显著负相关,这表明随着树龄、树高、冠幅的增大,古树健康值会随之降低,即古树的受损程度逐渐提高,抗风性逐渐降低。古树健康值与海拔间的相关性系数为0.139,呈显著正相关,表明随着海拔的增加,古树的受损程度反而降低,抗风性提高。古树健康值与胸径间的相关性系数为-0.014,但相关性不显著(图4)。

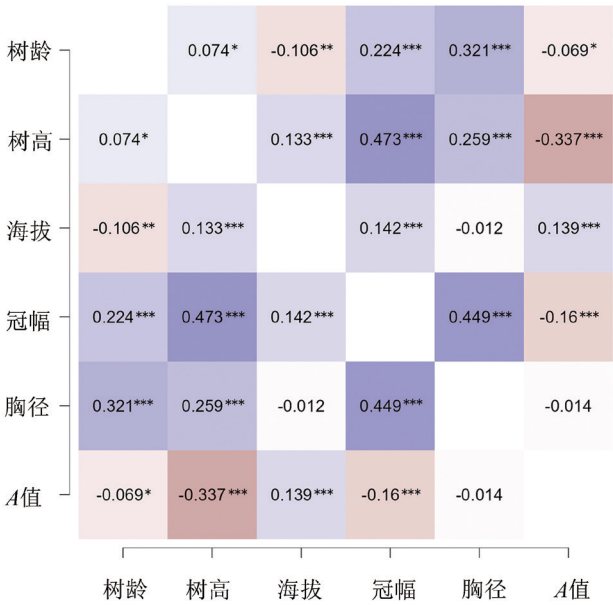
2.3.2 古树自身指标与健康值的相关性

研究采用斯皮尔曼相关性分析,评估见血封喉、垂叶榕、高山榕、榕树、雅榕5种古树各指标与古树健康值A间的关系。

见血封喉各项指标与古树健康值的相关性均不明显(表8)。该种古树的受损可能与自身原有健康问题相关,在调查中发现,出现受损的见血封喉通常存在树体中空、根系腐烂等情况(图5),这些问题可能导致了树体抵抗力下降,抗风能力变弱。

垂叶榕的树高、冠幅与古树健康值呈显著负相关,相关性系数分别为-0.376、-0.269,其他指标的相关性不明显(表8)。这表明垂叶榕古树的树高、冠幅越大,古树健康值会越低,即受损程度越高,抗风性越差。垂叶榕古树健康值集中在4~5分,也存在一定的低分。垂叶榕古树的树高以12~14 m为主,冠幅以15~25 m为主(图6)。

高山榕的古树健康值与树高呈显著负相关,相关性系数



注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示较显著相关 ($P<0.01$), ***表示极其显著相关 ($P<0.001$)。

图4 斯皮尔曼相关系数热图
Fig.4 Spearman rank correlation heatmap

为-0.380;与海拔呈显著正相关,相关性系数为0.188,其他指标的相关性不明显(表8)。这表明高山榕古树的树高越高,其古树健康值评分会越低,受损程度越高,抗风性越低。其海拔越高,健康值评分越高,受损程度越低,抗风性越高。高山榕古树中健康值在4.5分以上的较多,3.5~4.5分的古树也有一定数量,0~3.5分的古树数量较少。高山榕古树的树高以10~20 m为主(图7)。

榕树的树高、冠幅与古树健康值呈显著负相关,相关性系数分别为-0.371、-0.239,其他指标的相关性不明显(表

表6 5种古树的树种抗风性得分
Tab.6 Wind resistance score table of 5 kinds of ancient trees

树种	平均树龄 /年	平均树高 /m	平均胸径 /cm	平均冠幅 /m	平均海拔 /m	抗风性 得分
见血封喉	157	16.11	142.36	18.15	60.17	4.08
垂叶榕	126	13.22	163.49	21.10	82.59	3.90
高山榕	142	16.82	185.57	25.59	55.74	3.88
榕树	127	13.72	148.10	21.34	65.44	3.60
雅榕	137	13.40	157.65	18.34	15.27	3.16

表7 古树自身指标与古树健康值的相关性分析
Tab.7 Correlation analysis between intrinsic indicators and health value of ancient trees

类别	平均值	相关系数	P
树龄	137/年	-0.069*	0.035
树高	14.40/m	-0.337***	<0.001
海拔	43.28/m	0.139***	<0.001
冠幅	19.89/m	-0.160***	<0.001
胸径	151.07/cm	-0.014	0.665

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), ***表示极其显著相关 ($P<0.001$), 下同。

表8 5种古树指标与古树健康值的相关性分析
Tab.8 Correlation analysis between intrinsic indicators and health value of five ancient tree species

树种	斯皮尔曼相关系数				
	树龄	树高	海拔	冠幅	胸径
见血封喉	-0.044	-0.137	0.052	-0.084	-0.017
垂叶榕	-0.067	-0.376**	0.140	-0.269*	-0.232
高山榕	-0.041	-0.380***	0.188*	-0.143	0.071
榕树	5.268×10^{-4}	-0.371***	0.054	-0.239***	0.110
雅榕	-0.200***	-0.491***	-0.082	-0.272***	-0.043

8)。这表明榕树古树的树高、冠幅越大，健康值评分会越低，即受损程度越高，抗风性越低。榕树古树评分主要集中在4.5分以上，0~1.5分、3.5~4.5分的古树也有一定数量，0.5~3.5分的古树较少。榕树古树的树高以10~15 m为主，冠幅以15~25 m为主（图8）。

雅榕的树龄、树高、冠幅与古树健康值呈显著负相关，相关性系数分别为-0.200、-0.491、-0.272，其他指标的相关性不明显（表8）。这表明雅榕古树的树龄、树高、冠幅越大，健康值评分越低，即受损程度越高，抗风性越低。雅榕古树的树高跨度较大，但以10~15 m为主；冠幅以



图5 见血封喉受损情况
Fig.5 Damage assessment of *Antiaris toxicaria*

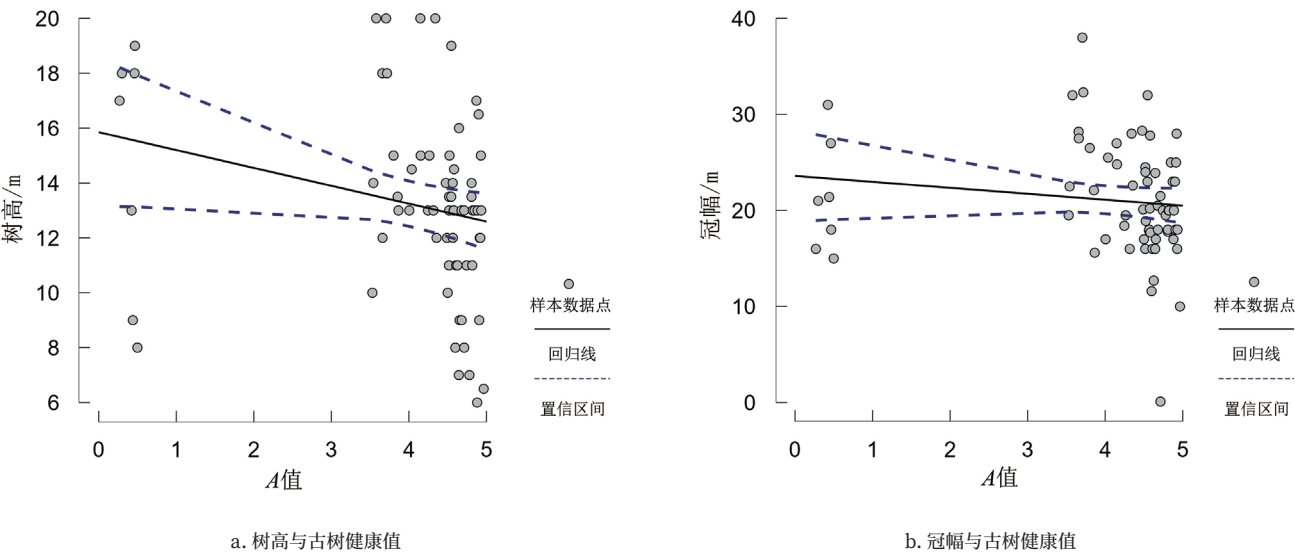


图6 垂叶榕自身指标与古树健康值的相关性分析
Fig.6 Correlation between intrinsic indicators of *Ficus benjamina* and health value

15~25 m 为主, 树龄以 100~150 年为主 (图 9)。

3 讨论与建议

有关学者研究 2016 年 1614 号台风对厦门地区树木的影响, 其调查包含的 6 种榕属树木的风害率均较高^[18]。本文同样发现, 在受损古树中, 桑科榕属的占比较高, 这在一定程度上反映出这些榕属树木存在抗风缺陷, 这可能与不同树种的抗风策略有关。与榕属古树相比, 见血封喉的木质更坚硬, 枝条粗壮, 根系也相对更深, 可能是通过健壮的枝条及深根来抗风。榕属古树往往根系较浅, 其抗风更多依赖气生根形成的新支柱根。而本次调查的榕属古树周围多为硬

化铺装, 还存在人为修剪气生根的情况, 这使得气生根无法扎入地面, 造成了根冠比失调^[19]。同时, 调查的榕属古树存在较多主干空腐及树体被附生、绞杀的情况, 这些情况导致了榕属古树在台风中受损的概率更高^[13] (表 9)。另一方面, 文昌市和澄迈县两地现存古树多为桑科榕属 (占比达 76.25%), 该类古树个体数量多, 受损概率也就更大。此外, 调查发现在倒伏的 80 株古树中, 有 53 株古树存在主根腐烂、主干空洞、根系土壤石块较多等情况。古树树干的腐烂会降低树体枝干强度, 而根系周围石块多则会阻碍根系深扎, 导致古树的抓地力不足, 这可能导致古树倒伏^[20]。

在古树受损评价中, 树势、根系裸露损失面积 2 个指标

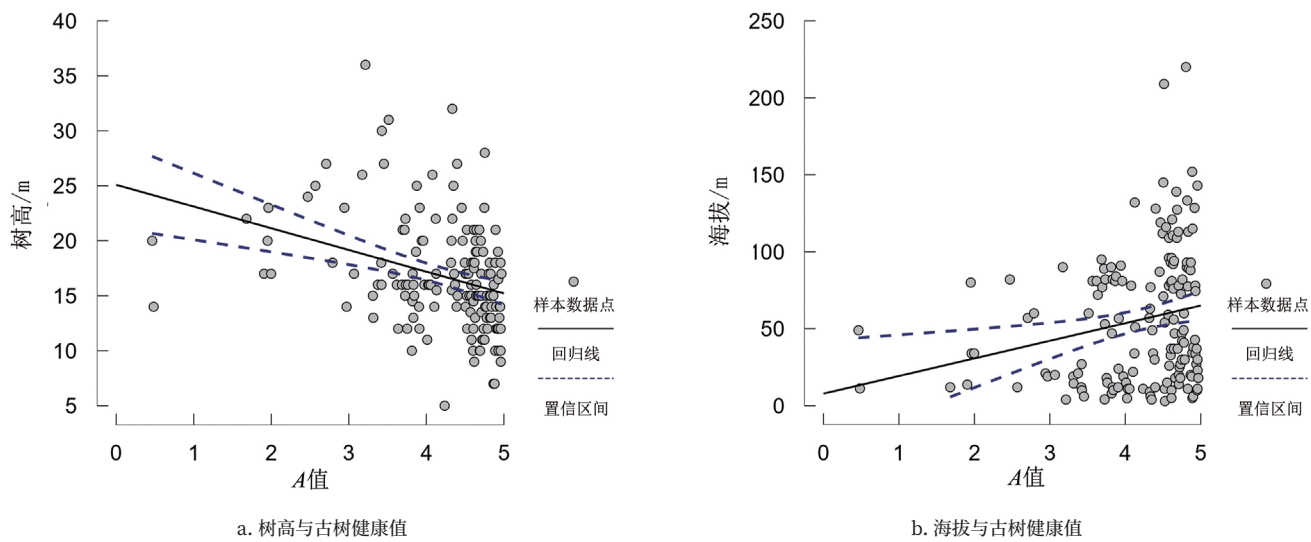


图 7 高山榕自身指标与古树健康值的相关性分析
Fig.7 Correlation between intrinsic indicators of *Ficus altissima* and health value

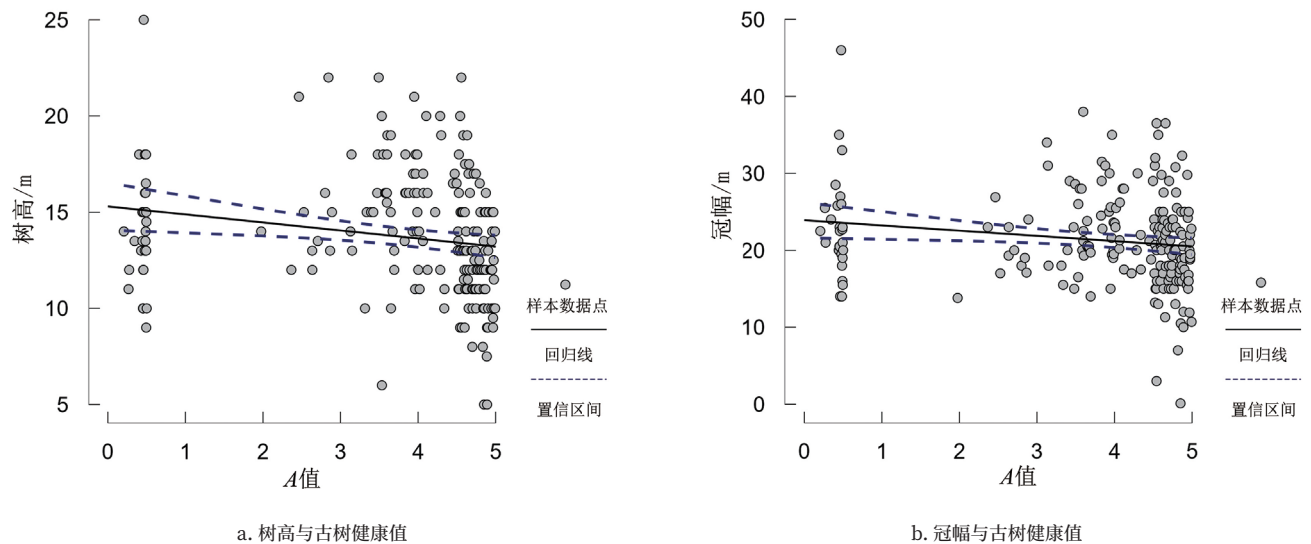
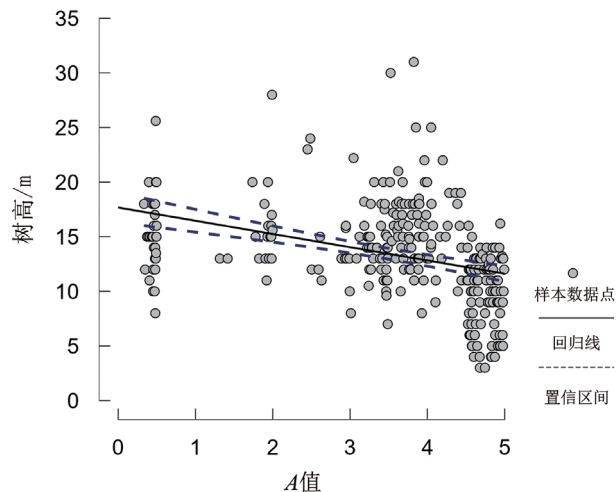
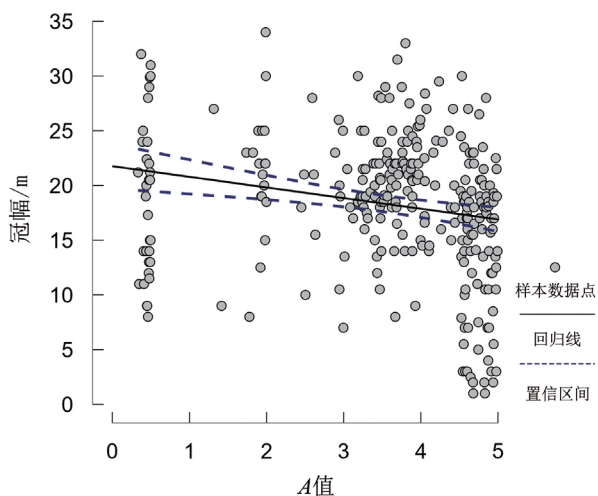


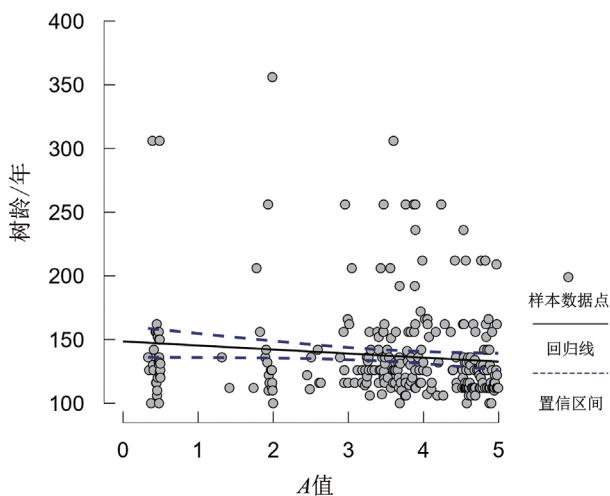
图 8 榕树自身指标与古树健康值的相关性分析
Fig.8 Correlation between intrinsic indicators of *Ficus microcarpa* and health value



a. 树高与古树健康值



b. 冠幅与古树健康值



c. 树龄与古树健康值

图9 榕榕自身指标与古树健康值的相关性分析

Fig.9 Correlation between intrinsic indicators of *Ficus concinna* and health value

表9 树种的特性对比

Tab.9 Comparison of characteristics among tree species

树种特性	见血封喉	榕属
木质密度	较高	相对较低
根系类型	深根性	通常浅根性，有气生根
树冠结构	枝条粗壮，韧性较强	通常冠幅大，枝叶密集
特殊抗性	具有有毒成分，可防虫	易被附生植物绞杀

的权重最高，断枝程度、损伤叶片占比两个指标的权重最低，这与一般古树评价的研究存在差异^[21]。这主要是由于本文的评价体系是为台风中受损的古树而构建，更侧重于对古树存活影响较大的指标。部分古树虽然枝条、叶片受损严重，但仍能存活；而部分古树被台风连根拔起，若不进行抢救复壮，几乎没有存活的可能。因此，在本研究中树势、根系的权重更高。

抗风性评分最高的见血封喉具有冠幅小、海拔较高的特征。古树的冠幅越小，其在台风中所受风力也越小；而高海拔的古树可能利用地形遮挡等削弱风力的影响，或因高海拔坡地排水更快、土壤更稳固等优势提升了古树的抗风性。但见血封喉的抗风性与各项指标均无显著相关，这表明影响见血封喉抗风性的主要指标可能不是树高、冠幅等5项指标。见血封喉可能是通过发达的根系与粗壮的枝干抵抗强风。调研发现，倒伏古树在根部区域多存在问题，这可能破坏了见血封喉应对风力的模式，进而造成10.13%的见血封喉处于不抗等级。前文分析抗风性强的古树可能具有低受风面积、高海拔优势，其在垂叶榕和榕树上也有所体现。抗风性较强的垂叶榕古树具有树高较低、冠幅小、海拔高的特征，抗风性较弱的榕树古树各项指标均处于中等状态，符合这一分析。抗风性中等的高山榕虽然树高、冠幅的平均值最大，但抗风性优于榕树和雅榕，这说明树种的固有特性可能起主导作用。高山榕的抗风性仅与树高、海拔显著相关也反映了这一点。相比于榕树和雅榕，高山榕的木质更加坚韧，气生根稀疏而粗壮，这使其在台风中有更好的抗风表现。抗风性最弱的雅榕虽然树高、冠幅中等，但平均海拔最低，多位于风力更强的开阔地带，因此受损严重。但海拔对古树的影响机制较为复杂，影响风力的环境因子也呈现多样化特征。例如，古树通常分布于居民区周边，其周边的建筑物可能显著改变局地风场条件。因此，仅凭现有数据尚难以准确评估海拔对古树抗风能力的影响，该问题仍需通过更系统的研究加以探讨。

在整体相关性分析中，古树健康值与树龄呈显著负相关，这可能是由于树龄越大，古树出现枯枝、断枝、腐烂等问题的概率越高，树体的结构越脆弱，越容易受损，抗风性越低。此外，也可能与受风面积增大有关。斯皮尔曼相关性分析发现树龄与树木的树高、冠幅呈正相关（图4），这说明树龄越大，树高、冠幅也越大，符合树木生长的一般规律。然而，

在后续的分析中仅有雅榕的健康值 A 与树龄显著相关, 这可能存在多种原因。一方面, 古树的生长时间跨度大, 面临各种灾害、人为干扰等, 其树体出现损坏的概率高, 进而导致其相关性不明显; 另一方面, 雅榕的样本数量最多, 而其他 4 种古树相对较少, 可能不足以体现出这种相关性。

在整体及单一树种分析中, 古树健康值与胸径均无显著相关性, 这可能是由于古树胸径的测量存在一定偏差。见血封喉古树往往生长出巨大板根, 胸径的测量存在一定难度, 而其他榕属古树通常生长气生根、板根, 易导致古树胸径模糊, 测量不准确。

总体来说, 古树的抗风性可能与树种特性、生长状态、生长环境等有关, 这符合相关学者的研究结果, 即强风对树木的影响主要与树种生物学特性、健康状况、风力等相关^[22~24]。

海南省是台风高发省份, 强台风易对古树造成严重的损伤。另外, 古树往往生长于居民聚居区^[25~26], 台风中折断、倒伏的古树也会给居民安全带来巨大隐患^[27]。因此, 深入了解古树受台风影响下的受损情况, 并在古树的日常养护和防灾管理工作中制定和落实各项有针对性的措施, 对于保护古树及其周边的市民的生命财产安全具有重要意义。建议如下:

1) 修枝整形。针对榕树、雅榕等根系相对较浅且枝叶密集的古树, 尤其是生长在低海拔开阔地带的古树, 应在台风登陆前对其中树高、冠幅较大的树木进行适当修枝整形, 修剪部分枯腐、病弱的枝条, 减小古树的受风面积, 进而降低古树在台风中受损的程度。

2) 加固支撑。应重视古树可能存在的主根腐烂、主干空洞、根系较浅等情况, 评估古树的树干强度、抓地力等因素, 分析其抗风性, 并考虑是否设置支撑架等对树体进行加固保护, 以减少古树倒伏情况的发生^[28]。

3) 加强日常监测及养护。古树的病虫害、枯腐、中空等情况容易造成树体枝干强度下降, 这为古树在台风灾害中受损埋下隐患, 在日常监测中应多加关注。例如, 见血封喉的根系健康问题是其抗风弱点; 垂叶榕、高山榕等古树木质疏松、枝干易空腐, 在日常养护中应加强监测。由于古树数量较多且生长位置分散, 日常监测难度大, 建议开发相应的古树实时监测系统, 以便及时发现并解决问题。

4) 建立风险评估体系。为更好地预防台风灾害, 应建立相关的古树风险评估体系, 提升古树的风险管理水平, 通过综合评估古树的整体情况, 对古树的安全现状进行分级, 预测其在台风中可能出现的受损情况, 并提前采取应对措施, 以更好地保护古树及周围居民的安全^[29~31]。

4 结论

研究发现, 在古树台风灾后受损评价体系中, 权重值较高的是树势、根系裸露损伤面积、倾斜程度, 权重值较低的是树干断裂长度、断枝程度、损伤叶片占比。在调查的 943 株古树中, 轻度受损 457 株, 一般受损 328 株, 中度受损

38 株, 重度受损 32 株, 濒临死亡 88 株。总体上, 古树的 健康值 A 与树龄、树高、冠幅呈显著负相关, 而胸径与健康值无显著相关性。不同古树树种具有不同的抗风性, 按抗风性得分排序, 从高到低依次为见血封喉、垂叶榕、高山榕、榕树、雅榕。其中, 见血封喉的健康值与各项指标相关性均不显著; 高山榕的健康值与树高呈显著负相关, 与海拔呈显著正相关; 垂叶榕、榕树的健康值与树高、冠幅呈显著负相关; 雅榕的健康值与树高、冠幅、树龄呈显著负相关。

目前关于园林树木抗风性的研究已较为丰富, 但针对古树抗风性的研究仍相对欠缺。古树树龄较大, 在生长期受影响较多, 其抗风性也受到多方面的影响, 因而园林树木的相关研究结果不能简单、直接地应用于古树。本文对古树进行抗风性分析, 系统构建了适用于台风灾后古树的受损评价体系, 并结合斯皮尔曼相关分析, 初步探讨了古树形态指标与抗风性之间的相关性。研究对琼北地区主要古树树种的抗风能力进行了排序与比较, 为该地区古树的防风保护提供参考。

然而, 本研究受限于两地古树种类, 所分析的古树多为桑科榕属, 这可能造成一定偏差; 而且古树抗风性受多方面因素影响, 文中分析的因素较为单一。古树历经百年仍巍然挺立, 这说明了其本身具有较好的抗逆性。然而, 在台风中出现古树主干折断、倒伏等较为严重的受损情况, 可能存在多种原因, 如树木自身存在病虫害侵袭、树干中空、根系腐烂等情况, 以及人为活动如施工建设、堆积杂物等, 这些都可能影响古树的生长状态, 进而影响其抗风性, 这一方面仍有待进一步探究。另外, 树木的折枝也可能是自身抗风机制, 古树的抗风性仍需要长期的跟踪观测。

注: 图 2 底图的审图号为 GS (2024) 0650 号, 其余均由作者自摄自绘。

参考文献:

- [1] 钱万惠, 赵庆, 胡柔璇, 等. 佛山市南海区古树资源特征分析与利用规划设计 [J]. 林业与环境科学, 2021, 37 (6): 58-67.
- [2] 唐蒲霞, 刘畅, 王冬梦, 等. 郑州市中心城区古树资源特征分析及保护对策 [J]. 林业调查规划, 2024, 49 (2): 132-139.
- [3] 刘鹏, 徐立, 吴盛德, 等. 湖北省城区古树资源现状及保护对策 [J]. 南方林业科学, 2019, 47 (2): 35-40.
- [4] LINDENMAYER D B, LAURANCE W F. The ecology, distribution, conservation and management of large old trees [J]. Biological Reviews, 2017, 92 (5): 1434-1458.
- [5] LINDENMAYER D B. Conserving large old trees as small natural features [J]. Biological Conservation, 2017, 211: 51-59.
- [6] SEIWA K, SASAKI T, MASAKA K. Important role of a few large-diameter tree species in basal area and its increase in an old-growth deciduous broadleaf forest in Japan [J]. Trees, Forests and People, 2023, 13: 100421.
- [7] 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.
- [8] 张德顺, 刘鸣, 姚驰远, 等. 气候变化背景下滨海地区园林树种抗风性研究进展 [J]. 风景园林, 2021, 28 (11): 68-73.
- [9] SHANG X, ZHANG P, LI X, et al. Key traits influencing the

resistance of *Eucalyptus camaldulensis* to wind damage in coastal areas of South China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1433670.

[10] ZHOU Z, FU J, XIAO Y. Risk of wind destruction to urban trees: Prediction workflow and relative importance of influencing factors[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 112: 105600.

[11] 王振国, 逯敬一, 康煜杰, 等. 风能模拟的台风“摩羯”致灾危险性评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(3): 438-446.

[12] 王豪, 杨小波, 吕晓波, 等. 海南岛东北和西北部自然红树林群落特征比较[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(2): 146-154.

[13] 黄义钧, 何国强, 张建华, 等. 园林树木形态因子与树种抗风能力关系探讨[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(5): 69-79.

[14] 严朝东, 苏纯兰, 孔爱冬, 等. 东莞市古树名木无损诊断和健康评价[J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(6): 155-162.

[15] 梁政锦, 乐笑玮, 李小双. 基于层次分析法的上海市古银杏健康评价指标体系研究[J]. *林业与环境科学*, 2023, 39(2): 89-96.

[16] 朱炫熹, 谭广文, 毛伟才. “山竹”台风对深圳前海片区5个公园园林树木的影响[J]. *广东园林*, 2022, 44(3): 81-84.

[17] 罗冠勇, 宋希强, 杨冬华, 等. 海南10种园林乔木生物学特性与抗风性关联性分析[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(2): 263-267.

[18] 郭子燕, 柯雨沁, 李海燕, 等. 基于台风危害的厦门地区园林树木受损原因研究[J]. *中国园林*, 2020, 36(1): 122-127.

[19] 王仙芝. 闽南沿海地区园林绿化防台风应对策略[J]. *闽南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(2): 72-78.

[20] 刘瑞雪, 任少蕾. 台风灾害下城市绿地园林树木风灾损伤及影响因素[J]. *中国城市林业*, 2023, 21(2): 76-82.

[21] 苏纯兰, 陈葵仙, 胡秋艳, 等. 基于层次分析法构建东莞市古树名木健康评价体系[J]. *林业与环境科学*, 2016, 32(2): 57-62.

[22] 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.

[23] 吴贻军, 姚剑飞, 吴俊, 等. 基于ABAQUS有限元法的空洞树干强度分析[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 205-210.

[24] 张德顺, 姚鳗卿, 陈陆琪瑶, 等. 基于有限元模型的上海市常见园林树种抗风性研究[J]. *中国园林*, 2024, 40(5): 125-131.

[25] LIU J, LINDENMAYER D B, YANG W, et al. Diversity and density patterns of large old trees in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 655: 255-262.

[26] ZHANG H, LAI P Y, JIM C Y. Species diversity and spatial pattern of old and precious trees in Macau[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 56-67.

[27] JUDICE A, GORDON J, ABRAMS J, et al. Community Perceptions of Tree Risk and Management[J]. *Land*, 2021, 10(10): 1096.

[28] 韩梦梦, 罗忻武, 粟春青, 等. 沿海地区园林树木抗台风研究进展[J]. *浙江林业科技*, 2024, 44(6): 117-122.

[29] CHAU N L, JIM C Y, ZHANG H. Species-specific holistic assessment of tree structure and defects in urban Hong Kong[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 55: 126813.

[30] DUDKIEWICZ M, DURLAK W. Sustainable Management of Very Large Trees with the Use of Acoustic Tomography[J]. *SUSTAINABILITY*, 2021, 13(21): 12315.

[31] 叶锴, 黄天来, 梁谢恩. 古树强度缺陷和安全防护[J]. *温带林业研究*, 2023, 6(1): 68-72.

作者简介:

许凯/2001年生/男/河南信阳人/海南大学热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林植物与应用

钟云芳/1977年生/女/海南海口人/博士/海南大学热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南大学热带农林学院(海口 570100)/副教授/研究方向为园艺、生物学

宋理桥/1995年生/男/海南临高人/海南大学热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为热带雨林生物资源及利用

刘启畅/2000年生/男/广东揭阳人/海南大学热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为古树风险评估

杨泽秀(*通信作者)/1970年生/男/海南东方人/本科/海南省珠峰林业生态研究所(海口 570100)/高级项目经理师、林业助理工程师/专业方向为林业/E-mail: 80240104@qq.com