

# 广州市主要园林树种抗风性评价\*

## Evaluation on Wind-resistance of Main Landscape Plants in Guangzhou

张劲嵩 孙龙华 毕可可\*

ZHANG Jin-ai, SUN Long-hua, BI Ke-ke\*

**摘要:** 我国东南沿海地区每年因台风导致的树木毁坏及次生灾害损失严重。通过分析广州市近年来 26 种主要园林植物风害受损和形态学指标数据, 利用层次分析法、综合评价法和模糊隶属函数法分别对风害受损指标和形态学指标进行综合评分, 再根据评分结果进行聚类分析。结果表明, 按受损指标统计和形态学指标评估可分别将 26 种园林植物分成 3 个类群, 14 种植物类别完全一致, 12 种植物类别相近, 没有出现相互矛盾。其中, 抗风性较好的树种有樟 *Cinnamomum camphora*、海南蒲桃 *Syzygium hainanense*、阴香 *Cinnamomum burmannii*、木棉 *Bombax ceiba*、红花羊蹄甲 *Bauhinia × blakeana*、鸡冠刺桐 *Erythrina crista-galli*、高山榕 *Ficus altissima* 和糖胶树 *Alstonia scholaris*。

**关键词:** 园林树木; 抗风性; 层次分析法; 模糊隶属函数法; 聚类分析

**中图分类号:** TU986; S688

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2641 (2021) 02-0019-05

**收稿日期:** 2020-09-21

**修回日期:** 2020-11-26

**Abstract:** The wind disaster activity in our country is frequent and the influence is great. The tree damage and secondary disaster loss caused by typhoon are serious every year. By studying the wind damage and morphological index of 26 main landscape plants in Guangzhou, the comprehensive score of wind damage index and morphological index was carried out by using Analytic Hierarchy Process (AHP), comprehensive evaluation method and fuzzy membership function method, and then cluster analysis was carried out according to the score results. The results showed that 26 plants could be divided into 3 groups, 14 species were identical, 12 species were similar, and there was no contradiction. Among the 26 plants, *Cinnamomum camphora*, *Syzygium hainanense*, *Cinnamomum burmannii*, *Bombax ceiba*, *Bauhinia × blakeana*, *Erythrina crista-galli*, *Ficus altissima* and *Alstonia scholaris* are better wind-resistant plants.

**Key words:** Landscape plants; Wind resistance; Analytic Hierarchy Process; Fuzzy membership function method; Cluster analysis

我国风灾频繁且影响大, 每年台风导致的树木被毁及其产生的次生灾害造成的损失超过百亿元, 给我国国民经济和人民生命财产安全造成巨大损失<sup>[1]</sup>。据统计, 登陆我国沿海的台风平均每年有 9 个, 90% 集中在东南沿海, 如广东、福建、浙江、台湾等地, 多发生在每年 7—10 月<sup>[2-3]</sup>。广州位于中国大陆南部, 濒临南海, 属于亚热带季风气候, 具有温暖多雨、夏季长、台风多发的特点。广州市气象局资料显示, 1998—2019 年入境广州的台风多达 17 个, 其中 2016—2019 年发生的“妮妲”“洛克”和“艾云尼”3 个台风突发性强、破坏力大、影响范围广。此外, 与广州擦肩而过的台风也会带来强风大雨, 如 2018 年的超强台风“山竹”, 曾导致广州

范围内出现狂风暴雨, 多地停水停电, 多处树木倒伏, 给市民的出行带来严重影响。2017 年的台风“天鸽”“帕卡”“玛娃”在 12 d 内连续在广东登陆, 广州等地区出现了超历史实测记录最高潮位, 多地重复受灾。

台风的降临往往会给园林树木造成拦腰折断、连根拔起、倾斜或吹断树枝等不同程度的损害<sup>[4]</sup>, 对树木的健康生长造成威胁。国内部分学者已开展一些沿海地区台风对园林植物影响的研究, 通过对不同树种受损情况进行分级及受损量统计, 将树种抗风性强弱分为不同等级, 分析影响树种抗风能力的因素并提出对策<sup>[5-11]</sup>。国外学者借助静态拉力试验<sup>[12-14]</sup>和动态监测试验<sup>[15-17]</sup>等方法研究树木和风力之间的相互作用

用, 评价树木的抗风性, 通过分析大风天气后不同园林树种的形态变化来评价树木抗风性。但目前针对树种生物学特性的抗风性评价研究鲜有报道。本文通过研究广州市主要园林树木的风害受损情况和形态学指标进行抗风性评价, 建立了抗风性形态指标预测体系, 期望为园林树木树种的选择和养护管理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据整理

#### 1.1.1 广州市绿化抢险资料整理

对 2016—2019 年广州市绿化抢险资料<sup>①</sup>进行整理统计, 选择应用较广泛的 26 种园林植物中胸径

\* 基金项目: 广州市林业和园林局财政预算科研项目“广州行道树安全性评估技术研究”(编号: 穗财编[2018]82号)

① 广州市绿化抢险原始数据(2016—2019年)来源于广州市林业和园林科学研究院承担的广州市林业和园林局项目“城区绿化养护日常巡检”。

大于 10 cm 的树木作为分析对象，以 4 种受损形式作为受损评价指标（表 1），计算各受损指标的发生率。

### 1.1.2 树木安全性评估资料整理

对 2016—2019 年树木安全性评估采集的数据<sup>①</sup>进行整理，运用层次分析法对选定的形态指标进行权重计算。参考祖若川<sup>[10]</sup>和张华林<sup>[18]</sup>的方法，结合其他文献资料和树木安全性评估数据<sup>[19]</sup>，确定树木形态学评价指标 7 个（表 2）。树高、胸径、冠幅指标数据为实测值，冠形、叶层状况、根系情况和树木类型为定性指标，其赋值标准见表 2。

## 1.2 数据分析

### 1.2.1 层次分析法

参考高育慧的方法<sup>[7]</sup>，对各受损形式指标和选定的形态指标构建判断矩阵，矩阵一致性检验使用 yaahp 软件进行，当 CR < 0.100 时，则检验通过，确定其权重 W。

### 1.2.2 综合评价法

为消除指标间的数量级差异，在计算综合评价得分前，对各指标受损率进行标准化处理，采用 z-score 标准化方法如下：

$$C_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / SD_j \quad (1)$$

其中， $C_{ij}$  代表  $i$  树种  $j$  指标标准化处理后的数据， $X_{ij}$  代表  $i$  树种  $j$  指标的测定值， $\bar{X}_j$  和  $SD_j$  分别为各树种  $j$  指标测定值的平均值和标准差。

参考祖若川<sup>[10]</sup>的方法计算各风害受损树种的综合评价得分，方法如下：

$$Y = \sum_{j=1}^n W_j \times C_{ij} \quad (2)$$

其中，Y 代表树木风害受损综合评价得分， $W_j$  为各风害指标的权重。Y 值越大树木受损越严重，抗风性越弱。

### 1.2.3 模糊隶属函数法

参考李禄军<sup>[20]</sup>的方法计算园林树木形态学指标隶属函数值，方法如下：

指标与抗风性呈正相关：

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (3)$$

指标与抗风性呈负相关：

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (4)$$

表 1 受损指标含义

目标层	指标层	指标描述
风害受损	枝梢断裂率 (A1)	侧枝断裂的植株占植株总数的百分比
	主干倾斜率 (A2)	主干倾斜角度大于 30° 小于 90° 的植株占植株总数的百分比
	主干倒伏率 (A3)	倒伏植株占植株总数的百分比
	主干断裂率 (A4)	主干断裂植株占植株总数的百分比

表 2 形态性指标含义

目标层	指标层	指标描述	分值
植株形态	树高 (B1)	植株生长高度,指树木从地表面到树冠顶端的距离。	—
	胸径 (B2)	植株胸径是指乔木主干离地表面 1.3 m 处的直径	—
	冠幅 (B3)	植株树冠的南北和东西方向宽度的平均值	—
	冠形 (B4)	1) 圆球	0.25
		2) 伞型	0.5
		3) 圆锥 / 扁圆	0.75
		4) 塔型	1
叶层状况 (B5)	1) 叶层浓密	0	
	2) 叶层密	0.33	
	3) 叶层一般	0.66	
	4) 叶层稀疏	0.99	
根系情况 (B6)	1) 根系不发达,短而稀少	0.2	
	2) 根系欠发达,分布浅	0.4	
	3) 根系一般	0.6	
	4) 主根系发达,扎根深的树木	0.8	
	5) 根系发达粗壮,板根发达的侧根类树木	1	
树木类型 (B7)	1) 速生树种	0	
	2) 中速树种	0.5	
	3) 慢生树种	1	

注：叶层状况的划分标准参考祖若川<sup>[10]</sup>的方法；根系情况的划分标准参考张华林<sup>[18]</sup>的方法；树木类型划分参考广州市地方标准《园林树木安全性评价技术规范》（DB4401/T 17-2019）。

式中  $Z_{ij}$  为  $i$  树种  $j$  指标的抗风性隶属函数值； $X_{ij}$  为  $i$  树种  $j$  指标的测定值； $X_{imin}$  和  $X_{imax}$  分别为各树种该指标值的最小和最大的测定值。

将每个树种各指标的抗风性隶属函数值累加起来，计算方法如下：

$$Z = \sum_{i=1}^n W_j \times Z_{ij} \quad (5)$$

其中，Z 代表抗风性隶属函数总值， $W_j$  代表抗风性指标的权重。各形态指标中，树高和冠幅与抗风性呈负相关，其余呈正相关。抗风隶属函数总值越小，树木受损越严重，抗风性越弱。

### 1.2.4 聚类分析法

通过 SPSS 21 软件分别对植物的风害受损指标综合评价得分 (Y 值)

和形态指标抗风性隶属函数总值 (Z 值) 进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要园林树木的损害情况

#### 2.1.1 风害对受损指标影响的层次分析

由层次分析法结果可知（表 3），CR = 0.026 5，其值小于 0.1，获得很好的一致性，说明分析结果可靠。在所测定的指标中，权重值较高的是主干断裂 (A4) 和主干倒伏 (A3)，权重值较低的是枝梢断裂 (A1) 和主干倾斜 (A2)，说明风害受损指标中对园林树木危害较大的是主干断裂和主干倒伏，其余两者对植株的危害较小。

① 树木安全性评估原始数据（2016—2019 年）来源于广州市林业和园林科学研究院在广州市内日常做的树木评估数据。

### 2.1.2 风害对各受损指标影响的综合评价

从对广州市 26 种主要园林树种的风害受损综合评价结果 (表 4) 可知, 糖胶树、高山榕、阴香、马占相思 4 个树种受风害影响较其他树种小, 其主干倾斜率和主干断裂率基本接近 0, 即只有非常少量树木出现主干倾斜或主干断裂。白兰的风害受损最严重, 各受损指标发生率均较高, 其次是南洋楹和宫粉羊蹄甲。综合评分表明, 糖胶树的抗风能力最强, 其次是高山榕, 而白兰的抗风能力最弱。本文计算的各指标受损率值较小, 是由于单个树种在全市的树木基数大,

有几万株到几十万株, 1% 风害受损率的实际受损量也达到几百到上千株。

### 2.2 风害对树木形态指标的影响

#### 2.2.1 形态指标的层次分析

由层次分析法结果可知 (表 5),  $CR = 0.004 0$ , 其值小于 0.1, 获得很好的一致性, 说明分析结果可靠。胸径 (B2)、根系 (B6)、冠幅 (B3)、树高 (B1)、冠形 (B4)、树木类型 (B7) 6 个指标的权重值较高, 说明其对植株的抗风性影响较大; 叶层状况 (B5) 的权重值最低, 其影响较小。

#### 2.2.2 形态指标的模糊隶属函数法分析

26 种主要园林树木的形态学指标加权隶属函数总值 (表 6) 介于

0.432 1~0.632 3, 差异明显。其中, 海南蒲桃的隶属函数总值最大, 石栗的最小, 表明从形态指标分析评价结果来看, 海南蒲桃的抗风性较强。

### 2.3 树木抗风性强弱聚类分析

对风害受损综合评分及隶属函数总值分别进行聚类分析, 可将研究的广州 26 种主要园林树木分为 3 个类群: I 级的抗风性最好, II 级的居中, III 级的抗风性最差。在风害受损情况综合评价得分聚类结果中, I 级树种有 14 种, II 级树种有 9 种, III 级树种有 3 种 (图 1); 在形态学指标隶属函数总值聚类分析结果中, I 级有 10 种, II 级有 13 种, III 级有 3 种 (图 2)。2 种聚类分级结果中有 14 种园林植物的分类结果完全一致, 12 种园林植物分类相近 (图 3), 没有出现相互矛盾。

## 3 结论与讨论

通过整理 2016—2019 年广州市

表 3 判断矩阵及各风害受损指标权重

A	A1	A2	A3	A4	权重 W
A1	1	2	1/2	1/3	0.167 1
A2	1/2	1	1/2	1/3	0.118 2
A3	2	2	1	1/2	0.261 6
A4	3	3	2	1	0.453 1

表 4 广州 26 种主要园林树木风害受损综合评分

序号	树种	枝梢断裂率 (%)	主干倾斜率 (%)	主干倒伏率 (%)	主干断裂率 (%)	综合评分 Y	排序
1	白兰 <i>Michelia × alba</i>	0.817 5	0.554 7	0.992 7	0.175 2	1.402 7	1
2	白千层 <i>Melaleuca cajuputi</i> subsp. <i>cumingiana</i>	0.920 2	0.076 7	2.223 9	0.076 7	0.560 0	5
3	黄葛树 <i>Ficus virens</i>	1.101 6	0.288 2	1.115 0	0.107 7	0.726 3	4
4	非洲楝 <i>Khaya senegalensis</i>	0.871 8	0.265 7	0.937 1	0.055 9	0.155 9	8
5	凤凰木 <i>Delonix regia</i>	2.752 1	0.905 5	3.462 4	0.017 8	0.366 4	6
6	高山榕 <i>Ficus altissima</i>	0.321 5	0.032 5	0.145 4	0	-0.600 0	25
7	宫粉羊蹄甲 <i>Bauhinia variegata</i>	2.033 8	5.546 8	4.952 5	0.013 2	1.037 6	3
8	海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i>	2.677 3	0.268 7	0.597 2	0.010 0	-0.259 6	14
9	红花羊蹄甲 <i>Bauhinia × blakeana</i>	0.334 1	0.055 7	0.327 2	0	-0.566 8	22
10	鸡冠刺桐 <i>Erythrina crista-galli</i>	0.953 5	0.086 7	1.647 0	0	-0.309 4	15
11	马占相思 <i>Acacia mangium</i>	0.459 6	0	0.183 8	0	-0.589 2	23
12	芒果 <i>Mangifera indica</i>	0.502 1	0.044 5	0.289 4	0	-0.564 3	21
13	美丽异木棉 <i>Ceiba speciosa</i>	0.290 4	0.090 8	1.769 7	0.063 5	0.316 2	7
14	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	2.546 8	0.374 5	1.573 0	0	-0.195 7	13
15	木棉 <i>Bombax ceiba</i>	0.501 7	0.208 0	0.807 5	0	-0.460 9	18
16	南洋楹 <i>Falcataria falcata</i>	14.731 4	0.173 3	6.932 4	0	1.383 5	2
17	大琴叶榕 <i>Ficus lyrata</i>	1.897 3	0	0	0	-0.534 6	20
18	秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	0.667 2	0.140 1	0.7939	0.053 4	0.080 2	9
19	人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>	1.231 3	0.676 0	2.824 7	0	-0.033 8	11
20	石栗 <i>Aleurites moluccanus</i>	4.978 7	0.640 1	1.280 2	0	-0.071 0	12
21	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	0.823 0	0.411 5	1.234 6	0	-0.349 1	16
22	糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	0.072 4	0	0.004 8	0	-0.641 5	26
23	榕树 <i>Ficus microcarpa</i>	1.144 9	0.134 5	0.513 4	0.047 5	0.002 4	10
24	樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.870 3	0.208 3	0.565 3	0	-0.479 0	19
25	小叶榄仁 <i>Terminalia neotaliala</i>	0.231 8	0.136 7	0.665 8	0.011 9	-0.387 5	17
26	阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	0.343 3	0.052 0	0.156 0	0	-0.594 8	24

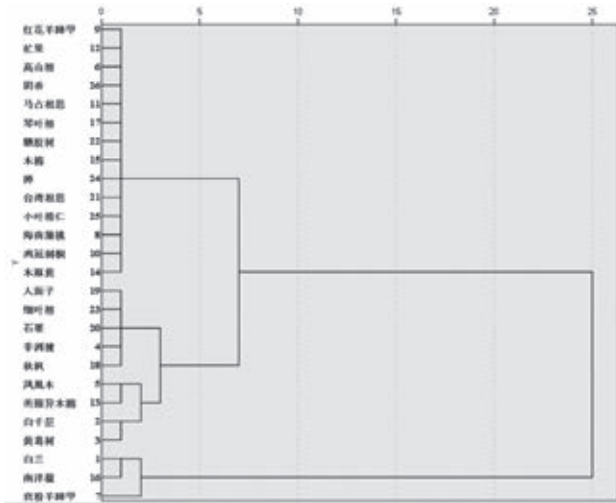


图1 树木风害受损情况综合评分聚类分析

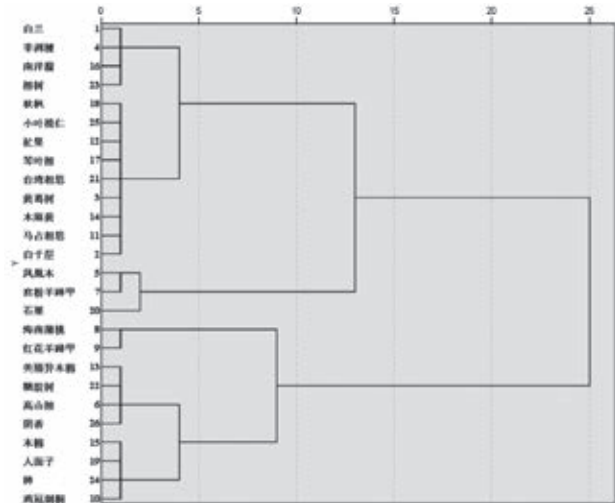


图2 树木抗风性隶属函数总值聚类分析

表5 判断矩阵及指标权重值

B	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	权重 W
B1	1	1/2	1	1	3	1/2	1	0.121 6
B2	2	1	2	2	5	1	2	0.236 9
B3	1	1/2	1	1	4	1/2	1	0.126 7
B4	1	1/2	1/2	1	3	1/2	1	0.121 6
B5	1/3	1/5	1/4	3	1	1/4	1/3	0.042 3
B6	2	1	2	2	4	1	2	0.229 5
B7	1	1/2	1	1	3	1/2	1	0.121 6

表6 广州26种主要园林树木抗风性隶属函数总值排序

树种	平均树高 /m	平均胸径 /cm	平均冠幅 /m	冠形	叶层状况	根系	树木类型	隶属函数总值 Z	排序
白兰	17.61	50.90	11.49	0.75	0	0.8	0	0.485 1	22
白千层	12.44	64.46	6.38	0.5	0.33	0.4	0.5	0.507 2	19
黄葛树	11.34	63.17	10.33	0.75	0	0.8	0	0.515 8	17
非洲楝	15.98	62.98	11.00	0.75	0	0.8	0	0.484 4	23
凤凰木	14.36	48.6	10.53	0.75	0	0.6	0	0.456 8	25
高山榕	5.85	53.18	7.18	0.75	0	1	0	0.562 9	8
宫粉羊蹄甲	9.75	35.76	6.94	0.75	0.33	0.4	0	0.457 5	24
海南蒲桃	14.78	41.32	8.65	0.75	0.33	0.8	1	0.632 3	1
红花羊蹄甲	13.33	41.51	10.67	0.75	0.33	0.8	0.5	0.623 1	2
鸡冠刺桐	6.93	40.59	6.57	0.75	0.67	0.8	0.5	0.606 0	3
马占相思	17.7	49.88	7.54	0.75	0.33	0.8	0	0.521 0	16
杧果	14.6	50.16	6.97	0.75	0.33	0.8	0	0.529 2	14
美丽异木棉	13.11	53.23	10.33	0.75	0.67	0.6	0	0.557 4	9
木麻黄	17.32	47.66	7.72	0.75	0.33	0.8	0	0.512 7	18
木棉	17.66	62.48	10.4	0.75	0.67	0.8	0.5	0.586 9	6
南洋楹	15.76	63.55	15.16	0.75	0.33	0.6	0	0.494 9	21
大琴叶榕	12.68	52.23	10.04	0.75	0.33	0.8	0	0.530 8	13
秋枫	13.05	38.25	10.02	0.75	0	0.8	0	0.533 0	12
人面子	13.34	47.339	10.54	0.75	0	1	0	0.587 8	5
石栗	16.63	57.73	10.88	0.75	0	0.4	0	0.432 1	26
台湾相思	13.93	44.63	12.68	0.75	0.67	0.8	0	0.526 2	15
糖胶树	14.72	55.87	8.19	0.75	0.33	0.8	0.5	0.552 1	10
榕树	15.39	51.64	9.37	0.75	0	0.8	0	0.500 6	20
樟	12.26	68.46	11.17	0.75	0	0.8	0.5	0.592 5	4
小叶榄仁	11.30	33.82	8.48	1	0.67	0.8	0	0.535 0	11
阴香	8.92	30.17	6.87	0.75	0.33	0.8	0.5	0.572 1	7

绿化抢险树种数据 and 安全性评估树种数据,对广州市26种主要园林植物进行风害受损指标统计和形态学指标评估,根据结果进行抗风性聚类分析。26种植物接受损指标统计和形态学指标评估分别分成3个类群,有14种植物的风害受损指标分类结果和形态指标分类结果完全一致,有12种植物类别相近,没有出现相互矛盾。在分类结果相同的植物中,抗风性I级树种有8种,为樟、海南蒲桃、阴香、木棉、红花羊蹄甲、高山榕、鸡冠刺桐和糖胶树;II级树种有5种,为非洲楝、榕树、黄葛树、秋枫和白千层,III级树种有1种,为宫粉羊蹄甲。相近分类的植物主要是人面子、凤凰木、白兰等。结果表明,抗风性最好的树种有樟、海南蒲桃、阴香、木棉、红花羊蹄甲、鸡冠刺桐、高山榕和糖胶树8种;介于抗风性最好和中等之间的有木麻黄、杧果、小叶榄仁、大琴叶榕、台湾相思、马占相思、美丽异木棉和人面子8个树种;抗风性居中的有白千层、榕树、非洲楝、秋枫和黄葛树5种;介于抗风性居中和最差的有凤凰木、石栗、南洋楹和白兰4种;抗风性最差的是宫粉羊蹄甲。

黄义钧等<sup>[6]</sup>构建形态指标抗风模型评价结果表明,宫粉羊蹄甲、南洋楹、石栗等树种抗风能力较差,小叶榄仁、木麻黄等树种抗风能力较好;





图3 2种聚类分析结果的对比分析

张东颖等<sup>[8]</sup>对珠海市园林树木台风后受损调查结果表明,白兰、宫粉羊蹄甲、黄葛树等树种抗风能力较差;祖若川<sup>[10]</sup>利用模糊隶属函数法评价海口市公园植物树种抗风性,结果表明樟、阴香、鸡冠刺桐等树种抗风能力强,白兰、宫粉羊蹄甲等树种抗风能力弱;张华林<sup>[18]</sup>利用层次分析法构建形态指标判断矩阵对不同树种进行抗风性综合评价结果表明,南洋楹、石栗、非洲楝、马占相思等树种抗风能力较弱。本研究结果与上述研究结果基本一致,也表明抗风性强弱与树木形态学因子有较强的关联性。

树木风害受损的原因很多,归结为内因和外因,内因包括树木种类、高矮、树冠形状、木材材性、根系类型等树木自身特点,外因包括风向、风力、树木的种植形式、长势、立地环境及栽培管理水平等因素<sup>[21-22]</sup>。吴志华等<sup>[23]</sup>利用综合评价法和灰色关联度法建立的模型对湛江绿化树种抗风性进行评价,结果表明芒果、白千层等树种抗风性能较好,樟、石栗等树种抗风性较差。本研究结果与该研究结果差异较大,这可能与评价树种所在位置不同时承受风力的差异有关。本研究选择的形态学指标基本涵盖影响树木抗风能力的内在因素,其中树木类型、叶层状况、冠形、根系为植物特定指标,树高、胸径、冠幅3个指标在植物生长的不同阶段是可变的。因此,本研究中各树种的抗风级别划分可能只代表该生长阶段下

树种相互之间的抗风等级关系。但是上述形态学指标便于采集,不需要借助大型仪器设备,适合快速评价树木的抗风能力。目前研究的树种抗风性形态指标预测体系集中在比较有限的几个树种,尚处于起步探索阶段,未建立系统的树种抗风性能评价标准。本研究利用层次分析法和模糊隶属函数法构建的树木形态学指标评价模型,可为今后深入开展树种抗风性能预测提供理论参考和技术支持。

注:图1~2为SPSS 21软件聚类分析结果输出图,作者添加标注;图3为作者自绘。

#### 参考文献:

[1] 吴志华,李天会,张华林,等.沿海防护林树种木麻黄和相思生长和抗风性状比较研究[J].草业学报,2010,19(4):166-175.  
 [2] 黄颂谊,沈海岑,陈峥.台风“山竹”对粤港澳大湾区城市园林树木的影响调查[J].广东园林,2020,42(2):27-31.  
 [3] 林恒毅,邢竟,王文静,等.基于大数据技术的广州市台风负荷影响分析和预测[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2019,564(1):154-156.  
 [4] 朱伟华,谢良生.台风灾害对深圳城市园林树木的影响和对策——以9910号台风为例[J].广东园林,2001,23(1):25-28.  
 [5] 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.  
 [6] 黄义钧.园林树木形态因子与树木抗风能力关系探讨[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(5):69-79.  
 [7] 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):94-105.  
 [8] 张东颖.台风灾害对滨海城市园林树木的影响和对策[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.  
 [9] 辛如如,彭剑华,肖泽鑫,等.粤东滨海城市

绿化树种抗风性评价与筛选[J].林业与环境科学,2017,33(2):29-35.

[10] 祖若川.海口市公园抗风园林植物的选择与应用[D].海口:海南大学,2016.  
 [11] 祖若川,罗立娜,刘晶,等.滨海公园棕榈类植物抗风性调查与评价分析[J].北方园艺,2016,356(5):89-94.  
 [12] JONSSON M J, FOETZKI A, KALBERER M, et al. Natural Frequencies and Damping Ratios of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) Growing on Subalpine Forested Slopes[J]. Trees, 2007, 21(5): 541-548.  
 [13] SUGDEN M J. Tree Sway Period—a Possible New Parameter for Crown Classification and Stand Competition[J]. The Forestry Chronicle, 1962, 38(3): 336-344.  
 [14] MOORE J R, MAGUIRE D A. Natural Sway Frequencies and Damping Ratios of Trees: Concepts, Review and Synthesis of Previous Studies[J]. Trees, 2004, 18(2): 195-204.  
 [15] HASSINEN A, LEMETTINEN M, PELTOLA H, et al. A Prism-based System for Monitoring the Swaying of Trees under Wind Loading[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 90(3): 187-194.  
 [16] PELTOLA H, KELLOMÄKI S. A Mechanistic Model for Calculating Windthrow and Stem Breakage of Scots Pines at Stand Age[J]. Silva Fennica, 1993, 27(2): 99-111.  
 [17] HOLBO H R, CORBETT T C, HORTON P J. Aeromechanical Behavior of Selected Douglas-fir[J]. Agricultural Meteorology, 1980, 21(2): 81-91.  
 [18] 张华林.雷州半岛主要树种抗风性研究和评价[D].北京:中国林业科学研究院,2010.  
 [19] 秦寿康.综合评价原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2003.  
 [20] 李禄军,蒋志荣,李正平,等.3树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J].水土保持研究,2006(6):253-254.  
 [21] 杨莉莉.浙江省沿海城市行道树抗风能力调查研究[D].杭州:浙江大学,2006.  
 [22] 李慧仙,信文海.华南沿海城市绿化抗风树种选择及防风措施[J].热带生物学报,2000,6(1):15-21.  
 [23] 吴志华,李天会,张华林,等.广东湛江地区绿化树种抗风性评价与分级选择[J].亚热带植物科学,2011,40(1):18-23.

**作者简介:**  
 张劲涛/1987年生/女/广东广州人/硕士/广州市林业和园林科学研究院(广州510405)/林业工程师/主要从事园林植物保护领域的研究  
 孙龙华/1976年生/男/湖南常德人/博士/广州市林业和园林科学研究院(广州510405)/高级工程师/主要从事园林植物保护领域的研究和技术服务  
 (\*通信作者)毕可可/1981年生/男/山东青岛人/硕士/广州市林业和园林科学研究院(广州510405)/植物保护高级工程师/从事古树大树健康与安全评估研究/E-mail:53584150@qq.com