

沿海抗台风树种评价体系构建与选择

许秀玉^{1,2}, 肖莉³, 王明怀², 张华新¹

(1. 中国林业科学研究院 国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091; 2. 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 3. 华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642)

摘要: 为了对沿海地区抗台风树种进行合理选择与科学评价, 选取对林木抗台风性能有重要影响的生长形态、根系与材性等 3 大类因素 16 个指标, 利用层次分析法构建沿海抗台风树种评价指标体系, 对沿海地区 10 个主要造林树种(或无性系)进行优选评价。结果表明: 木材材性因子是影响树种抗台风性能的关键因素, 权重为 0.633 3; 生长形态因子次之; 根系因子对树种抗台风性能影响最小, 权重为 0.106 2。木材材性因子中纤维长宽比与木材密度对树种抗台风性能影响最大, 生长形态因子中地上部与地下部鲜质量比对林木抗台风性能贡献率最大, 根系因子中根深所占权重最大, 所构建的抗台风树种评价指标体系为生产实践中抗台风树种的选择利用与评价提供重要参考。10 个树种(或无性系)优选评价排序为木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 无性系 W8>K18>P6>G1>A8>琼崖海棠 *Calophyllum inophyllum*>苦楝 *Melia azedarach*>巨尾桉 *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*>马占相思 *Acacia mangium*>厚荚相思 *A. crassicarpa*。该评价结果与台风过后田间风害调查结果基本一致。表 7 参 25

关键词: 森林生态学; 沿海防护林; 木麻黄; 抗台风; 树种选择; 评价体系; 层次分析法

中图分类号: S718.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)04-0516-07

A comprehensive evaluation system for anti-typhoon performance of trees in coastal areas

XU Xiuyu^{1,2}, XIAO Li³, WANG Minghuai², ZHANG Huaxin¹

(1. Research Centre on Saline and Alkali Lands of State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 3. Faculty of Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: To effectively evaluate and select trees in coastal areas for protection against typhoons, 16 traits from three categories including 1) growth and properties of 2) roots and of 3) wood types were chosen to establish a comprehensive evaluation system using the analytic hierarchy process (AHP). Then 10 trees (*Casuarina equisetifolia* ‘W8’, *Casuarina equisetifolia* ‘K18’, *Casuarina equisetifolia* ‘P6’, *Casuarina equisetifolia* ‘G1’, *Casuarina equisetifolia* ‘A8’, *Calophyllum inophyllum*, *Melia azedarach*, *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, *Acacia mangium*, and *Acacia crassicarpa*) were selected and evaluated using the comprehensive evaluation system. Results of tree performance in resisting typhoons showed that wood property was the key factor with a weight of 0.633 3, growth was second, and root traits had a minimal influence (weight of 0.106 2). Wood property traits of 1) wood density and 2) ratio of fiber length to width had the greatest influence on anti-typhoon performance. For growth traits, the ratio of aboveground to belowground fresh weight had the largest contribution, and for root traits, root depth had the largest weight. The

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2014-12-25

基金项目: 广东省科技创新项目(2013KJCX018-03); “十一五”国家林业科技支撑计划专题项目(2009BADB2B0101)

作者简介: 许秀玉, 高级工程师, 博士研究生, 从事林木遗传育种及森林生态研究。E-mail: 81250908@163.com。通信作者: 张华新, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事植物抗逆育种研究。E-mail: 13601283540@126.com

comprehensive evaluation system ranked the 10 trees as: *Casuarina equisetifolia* ‘W8’ > *Casuarina equisetifolia* ‘K18’ > *Casuarina equisetifolia* ‘P6’ > *Casuarina equisetifolia* ‘G1’ > *Casuarina equisetifolia* ‘A8’ > *Calophyllum inophyllum* > *Melia azedarach* > *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* > *Acacia mangium* > *Acacia crassicarpa*. Evaluation results were consistent with typhoon damage investigations, so this comprehensive evaluation system could provide an important reference when selecting and evaluating trees for anti-typhoon performance. [Ch, 7 tab. 25 ref.]

Key words: forest ecology; coastal protection forest; *Casuarina equisetifolia*; anti-typhoon performance; tree species selection; evaluation system; analytic hierarchy process (AHP)

中国是世界上少数受台风严重影响的国家之一, 平均有台风或热带气旋 7 个·a⁻¹ 在华南沿海地区登陆。在台风和暴雨袭击下, 林木大面积风倒风折, 有些甚至拦腰折断或连根拔起, 造成严重的林业经济损失。木麻黄 *Casuarina equisetifolia*, 巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, 马占相思 *Acacia mangium*, 厚荚相思 *A. crassicarpa*, 苦楝 *Melia azedarach* 和琼崖海棠 *Calophyllum inophyllum* 等树种在中国华南沿海地区生长快, 适应性强, 栽植面积大, 也是该地区主要造林树种。但是, 不同品种的桉树、木麻黄与相思等抗台风性能有所不同, 有些树种或无性系抗风性强, 有的则较易风倒或风折。如何评价树种的抗台风性能及如何选择抗台风树种是沿海城市林业建设及城市绿化亟待解决的问题。目前, 学者从生长指标、形态性状、林带结构、木材纤维、木材性质等方面开展了林木抗风机制的相关研究^[1-6], 形成了若干关于林木风倒机理的模型^[7-11]及风灾模拟评估、预测体系^[12-13], 但影响树种抗台风性能的因素众多, 如何综合考虑林木生长形态因子、根系因子、材性因子等构建一个较为完善的综合指标评价体系对林业生产实践有重要的指导意义。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)将决策有关的元素分解成目标层、准则层、指标层等层次, 比较合理地解决了定性问题定量化的处理过程。近年来, 在植物材料选育^[14-16]、林业生态工程^[17-18]、生态环境评价^[19-20]及园林景观比较评价^[21]等领域都已得到广泛应用。本研究利用层次分析法, 将以人主观判断为主的定性分析进行量化, 对树种抗台风性能评价指标要素进行综合判断, 确定评价指标要素的相对权值、综合权值的大小, 并构建抗台风树种评价模型, 为沿海地区抗台风树种的合理选择提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省湛江市东海岛, 为典型的季风气候, 年降水量为 1 500.0 mm, 其中 75% 以上的降水集中在 4-9 月; 年平均气温为 25.0 °C, 最低气温在 1 月为 2.0 °C, 最高气温在 7 月为 38.0 °C; 年均相对湿度为 80%, 土壤为海滨潮积沙土。苦楝、马占相思、琼崖海棠、巨尾桉、厚荚相思和木麻黄 K18, G1, W8, P6, A8 等 5 个无性系在试验地上随机区组排列, 40 ~ 50 株·小区⁻¹, 4 次重复。试验林为 2005 年造林。

1.2 评价指标的选取

根据层次分析法的要求和抗台风树种选择的特点, 在参考相关研究资料的基础上^[2-9], 以专家座谈和个别咨询结合的方法, 确定了以树种的生长形态因子、根系因子、材性因子等 3 个因子为评价主要特性, 相应地选择树高、胸径、冠幅、冠高与树高比值、一级分枝长度、总叶量、地上部与地下部鲜质量比、根总长、根总表面积、根深、根幅、绝干密度、纤维长宽比、顺纹剪切强度、冲击韧性、抗弯强度等 16 个指标作为综合评价的依据。

1.3 标准木的选取

2012 年 13 级强台风“启德”过后, 在初植密度为 2.0 m × 2.5 m 的木麻黄、苦楝、马占相思、琼崖海棠、巨尾桉、厚荚相思等试验林中开展每木调查, 根据各树种(或无性系)平均树高与平均胸径, 选取 3 株·树种⁻¹ 具代表性的标准木并进行各项指标的调查, 取其平均值后用于统计分析。

1.4 评价指标的调查

1.4.1 生长形态指标的调查 将标准木砍倒, 分别测其树高、胸径、冠幅、冠高与树高的比值、一级分

枝平均长度等指标。总叶量及根系鲜质量的测定采用“直接收获法”，实测单株叶片鲜质量并将其根系全部挖出，实测标准木地上部与地下部的鲜质量，并计算其鲜质量比。

1.4.2 根系指标的调查 根系调查是通过人工挖根后再进行根深、根幅、根直径和根系数量大小分布等方面的详细调查。采用 LA-S 型多功能根系测量与分析系统对每株标准木的所有根系进行扫描分析，测定每株标准木的根总长、根总表面积。

1.4.3 木材性质的测定 将选定的标准木伐倒，截取原木试材。具体方法参考国家标准 GB/T 1927-1991《木材物理力学试材采集方法》。试样的截取参考国家标准 GB/T 1929-1991《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》。试样制作、含水率的调整、试验结果的计算等参考国家标准 GB/T 1928-1991《木材物理力学试验方法总则》。参考国家相应标准^[22]，测定各树种绝干密度、纤维长宽比、顺纹抗剪强度、冲击韧性、抗弯强度等 5 个材性指标。

1.5 评价指标标准化

由于指标间量纲不统一，缺乏可比性，故采用隶属函数法对指标数值进行标准化。指标与目的性状正相关，则 $s_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ ；如指标与目的性状负相关，则 $s_i = 1 - (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ 。其中： s_i 为参评因子标准化值， x_i 为参评因子实测值， x_{\max} 为实测最大值， x_{\min} 为实测最小值^[18]。

1.6 评价指标权重的确定

采用层次分析法(AHP)构造判断矩阵后，用高斯迭代法求解各层次上的评价因子判断矩阵的最大特征根以及对应的特征向量，各矩阵经一致性检验后，得到各层次指标的权重值。确定评价指标权重时，只有当构造的判断矩阵的总体随机一致性比率(R_{CR})小于 0.10 时，才满足层次分析法的一致性检验要求，矩阵计算的权重才具有实际意义，否则应重新构建判断矩阵。 $R_{CR} = I_{CI} / I_{RI}$ ，其中 I_{CI} 为一一致性指标， I_{RI} 为平均随机一致性指标， $I_{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ ，所构造的各层判断矩阵通过 SAS 系统软件运算。

1.7 树种综合评价方法

根据树种调查情况，得出各树种评价因子标准化值(s_i)，再利用得到的各指标权重 w_i 计算出各参选树种综合评价值 $N = \sum_{i=1}^m W_i \times S_i$ (i 为测定指标编号)，最后根据选择指标综合评价值对参选树种进行排序，并与之前报道的抗风调查结果^[23-25]比较、验证综合评价方法的有效性。

2 结果与分析

2.1 评价指标体系的建立

根据筛选的 16 个指标，利用 AHP 的基本原理和各评价因子之间的支配关系，将评价指标体系划分成目标层(A)，准则层(B)和指标层(C)等 3 个层次，形成了抗台风树种评价的递阶层次结构(表 1)。

2.2 指标权重的确定

根据递阶层次，用 1~9 标度法对上级指标与下属指标的重要性进行两两比较，分别构造第 1 层次判断矩阵和第 2 层次判断矩阵(表 2~表 5)。1, 3, 5, 7, 9 分别表示 2 个因素具有同等重要性、稍微重要、明显重要、强烈重要和极端重要，2, 4, 6, 8 则表示上述两相邻判断的中值。各指标的重要性标度根据调研数据、文献资料及专家意见综合权衡后得出。各层次判断矩阵构建后求解矩阵最大特征根 λ_{\max} 及其对应向量，各矩阵经一致性检验后，得到各层次指标的权重值。

表 2 是准则层对目标层的权重，其中 $\lambda_{\max} \leq 3.038 7$ ， $I_{CI} = 0.019 4$ ，A 层和 B 层评价因子的判断矩阵总体随机一致性比率 $R_{CR} = 0.033 4$ ， $R_{CR} < 0.10$ ，判断矩阵具有满意的一致性，可以用于权重的计算。计算结果表明：木材材性指标是影响树种抗台风性能的关键因素，权重为 0.633 3；生长形态因子权重为 0.260 5；根系指标对树种抗台风性能影响最小，权重为 0.106 0。

表 3 是指标层对生长形态因子的权重，其中 $\lambda_{\max} = 7.324 6$ ， $I_{CI} = 0.054 1$ ， $R_{CR} = 0.041 0$ ， $R_{CR} < 0.10$ ，满足层次分析法的一致性检验要求，可以用于权重的计算。在影响树木抗台风性能的生长形态因子中，地上部与地下部鲜质量比权重最大，为 0.382 9；其次是树高与冠高比，分别为 0.189 1 和 0.185 0；叶总量对其影响最小，权重为 0.025 3。

表 1 沿海抗台风树种评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation system of anti-typhoon trees in coastal areas

目标层	准则层	指标层	权重
树 种 抗 风 性 能 (A)	生长形态因子(B_1)0.260 5	树高(C_1)	0.049 3
		胸径(C_2)	0.011 3
		冠幅(C_3)	0.022 7
		冠高/树高(C_4)	0.048 2
		一级分枝长度(C_5)	0.022 7
		总叶量(C_6)	0.006 6
	根系因子(B_2)0.106 2	地上部与地下部鲜质量比(C_7)	0.099 7
		根总长(C_8)	0.008 4
		根总表面积(C_9)	0.026 5
		根深(C_{10})	0.056 9
		根幅(C_{11})	0.014 5
	材性因子(B_3)0.633 3	绝干密度(C_{12})	0.165 8
		纤维长宽比(C_{13})	0.263 6
		顺纹剪切强度(C_{14})	0.039 5
		冲击韧性(C_{15})	0.102 0
		抗弯强度(C_{16})	0.062 4

表 4 是指标层对根系因子的权重，其中 $\lambda_{\max} \leq 4.073 0$ ， $I_{CI}=0.024 3$ ， $R_{CR}=0.027 0$ ， $R_{CR} < 0.10$ ，可用于权重的计算。结果表明：根总长、根总表面积、根深和根幅等 4 个因子中，根深对树种抗台风性能影响最大，权重为 0.535 6；根总表面积次之，权重为 0.249 4；根总长影响最小，权重为 0.078 7。

表 2 A~B 层判断矩阵权重

Table 2 Weight of determining matrix of A layer to B layer

A	B_1	B_2	B_3	w_i	R_{CR}
B_1	1	3	1/3	0.260 5	0.033 4
B_2	1/3	1	1/5	0.106 2	
B_3	3	5	1	0.633 3	

表 3 $B_1 \sim C$ 层判断矩阵权重

Table 3 Weight of determining matrix of B_1 layer to C layer

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	w_i	R_{CR}
C_1	1	5	3	1	3	7	1/3	0.189 1	0.041 0
C_2	1/5	1	1/3	1/5	1/3	3	1/7	0.043 4	
C_3	1/3	3	1	1/3	1	5	1/5	0.087 2	
C_4	1	5	3	1	3	6	1/3	0.185 0	
C_5	1/3	3	1	1/3	1	5	1/5	0.087 2	
C_6	1/7	1/3	1/5	1/6	1/5	1	1/8	0.025 3	
C_7	3	7	5	3	5	8	1	0.382 9	

表 5 是指标层对材性因子的权重，其中 $\lambda_{\max}=5.068 3$ ， $I_{CI}=0.017 1$ ， $R_{CR}=0.015 3$ ， $R_{CR} < 0.10$ ，可用于权重的计算。结果表明：材性因子中木材纤维长宽比对树种的抗台风性能影响最大，权重为 0.416 2；其次是绝干密度，权重为 0.261 8；顺纹剪切强度、冲击韧性及抗弯强度等木材力学指标对树种抗台风性能影响较小。

表 4 $B_2 \sim C$ 层判断矩阵权重

Table 4 Weight of determining matrix of B_2 layer to C layer

B_2	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	w_i	R_{CR}
C_8	1	1/4	1/5	1/2	0.078 7	0.027 0
C_9	4	1	1/3	2	0.249 4	
C_{10}	5	3	1	4	0.535 6	
C_{11}	2	1/2	1/4	1	0.136 4	

各判断矩阵的 R_{CR} 均小于 0.10，通过一致性检验。

表 1 为根据结果构建出的抗台风树种综合评价体系。可以看出：材性因子的权重最大，生长形态因子次之，最后为根系因子。表明选择抗台风树种时，首先考虑树种的材性因子，特别是纤维长宽比与木材密度；其次考虑树种地上部与地下部鲜质量比及根系分布深度等因子。各评价指标具体权重见表 1。

2.3 树种优选综合评价结果与分析

2.3.1 参试树种性状调查 选择苦楝、马占相思、琼崖海棠、巨尾桉、厚荚相思，木麻黄 K18, G1, W8, P6, A8 等 5 个无性系等树种作为调查对象，具体数据见表 6。

2.3.2 树种优选综合评价结果 计算出各参选树种综合评价值 N ，然后根据综合评价值对参选树种进行排序，排序值反映了树种抗台风性能

的好坏。排序值越前，说明该树种的抗台风性能越高。运用层次分析法模型对 10 树种(或无性系)进行排序(表 7)，排序值依次为木麻黄无性系 W8, K18, P6, G1, A8, 琼崖海棠, 苦楝, 巨尾桉, 马占相思和厚荚相思。此结论与沿海地区台风过后田间风害调查结果相一致^[23]，也表明利用 AHP 法对林木生长形态、根系、材性等 16 个指标构建的评价指标体系是有效可靠的。

3 结论与讨论

本研究从树种生长形态特征、根系特征和材性特征等 3 个方面选取树高、一级分枝长度、叶总量、地上部与地下部鲜质量比、根总长、根总表面积、根深、木材绝干密度、木材纤维长宽比、冲击韧性等 16 个指标构建沿海抗台风树种评价指标体系，建立树种抗台风综合评价数学模型，对沿海地区主要造林树种的抗台风性能进行量化评价。马占相思、厚荚相思、巨尾桉、苦楝、琼崖海棠和木麻黄作为为中国东南沿海地区主要造林树种，抗台风性能从强到弱依次为木麻黄无性系 W8>K18>P6>G1>A8>琼崖海棠>苦楝>巨尾桉>马占相思>厚荚相思。该评价结果与台风过后田间风害调查结果基本一致^[23]，与王志洁等^[24]研究发现木麻黄抗台风的能力强于各种相思树种、陈胜^[25]研究发现厚荚相思抗强风能力较

表 5 B_3 ~ C 层判断矩阵权重

Table 5 Weight of determining matrix of B_3 layer to C layer

B_3	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	w_i	R_{CR}
C_{12}	1	1/2	4	2	3	0.261 8	0.015 3
C_{13}	2	1	5	3	4	0.416 2	
C_{14}	1/4	1/5	1	1/3	1/2	0.062 4	
C_{15}	1/2	1/3	3	1	2	0.161 1	
C_{16}	1/3	1/4	2	1/2	1	0.098 6	

表 6 参试树种性状调查

Table 6 Investigation for 16 indexes of five species and five *Casuarina equisetifolia* clones

树种或无性系	树高/m	胸径/cm	冠幅/m	冠高/树高	一级分枝长度/m	总叶量/kg	地上部鲜质量/地下部鲜质量	根总长/m
K18	10.30	11.2	6.85	0.89	2.84	20.41	2.95	599.27
G1	9.05	8.5	3.10	0.98	2.18	15.41	2.57	743.02
W8	7.85	7.2	3.65	0.94	1.45	15.24	2.02	1 269.60
P6	9.28	9.8	4.95	0.97	1.71	28.39	2.58	1 164.86
A8	8.53	9.2	3.70	0.98	1.52	25.23	3.02	937.70
苦楝	10.50	12.8	4.70	0.44	1.70	13.64	2.49	333.92
马占相思	9.50	11.1	3.10	0.69	1.30	7.72	2.40	382.60
琼崖海棠	6.60	14.3	5.95	0.69	2.64	25.48	3.45	159.70
巨尾桉	15.70	10.9	2.75	0.36	1.08	3.14	4.34	332.90
厚荚相思	10.73	11.9	3.05	0.51	0.92	7.88	4.43	1 682.80

树种或无性系	根总表面积/m ²	根深/m	根幅/m	绝干密度/(g·cm ⁻³)	纤维长宽比	顺纹抗剪强度/MPa	冲击韧性/(kJ·m ⁻²)	抗弯强度/MPa
K18	6.13	1.55	16.0	0.803 8	59.049	18.688	158.409	124.537
G1	6.06	1.50	18.0	0.751 4	55.051	16.328	119.575	132.633
W8	6.86	1.35	16.0	0.790 1	62.060	17.213	135.359	120.700
P6	11.23	1.50	13.5	0.720 6	58.980	16.355	95.521	114.085
A8	6.16	2.55	11.0	0.677 6	53.769	14.251	124.952	92.192
苦楝	5.63	1.70	13.2	0.410 3	38.059	7.835	35.557	61.247
马占相思	4.76	1.80	16.5	0.381 8	35.495	8.950	24.655	58.559
琼崖海棠	5.21	2.60	7.7	0.572 6	52.897	14.285	64.467	94.503
巨尾桉	4.06	2.30	14.1	0.545 3	42.570	10.748	45.267	85.991
厚荚相思	6.71	0.31	11.6	0.336 6	32.349	11.664	28.733	59.059

弱等的研究结果基本一致，可为沿海抗台风树种的选择利用提供重要的参考，评价指标体系和模型在该地区具有普适性，可运用到生产实践中。

研究表明：材性因子是影响树种抗台风性能的关键因素，其次是生长形态因子、根系因子。材性因子中纤维长宽比、绝干密度所占权重最大，生长形态因子中地上部与地下部鲜质量比所占权重最大，根系因子中根深对树种抗台风性能影响最大。在生产实践中选择抗台风树种时，应首先考虑树种木材纤维长宽比与绝干密度等材性因子，其次是地上部与地下部鲜质量比、树高、冠高比、根深等因子。

4 参考文献

- [1] 郑兴峰, 陶忠良, 邱德勃, 等. 巴西橡胶树抗风品系木材纤维的解剖特征[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, **24**(1): 47 - 49.
ZHENG Xingfeng, TAO Zhongliang, QIU Debo, *et al.* Anatomical characteristics of wood fibers of cultivars of *Hevea brasiliensis* with different wind-resistance [J]. *J South China Agric Univ Nat Sci Ed*, 2003, **24**(1): 47 - 49.
- [2] 朱成庆. 雷州半岛桉树无性系抗风性的研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(4): 532 - 536.
ZHU Chengqing. Study on the wind-resistance traits of *Eucalyptus* clones in Leizhou Peninsula [J]. *For Res*, 2006, **19**(4): 532 - 536.
- [3] 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.
WU Zhihua, LI Tianhui, ZHANG Hualin, *et al.* Studies on growth and wind-resistance traits of *Casuarina* and *Acacia* stands from coastal protection forest [J]. *Acta Pratac Sin*, 2010, **19**(4): 166 - 175.
- [4] 李国旗, 安树青, 张纪林. 海岸带防护林 4 种树木的风压应力分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1999, **23**(4): 76 - 80.
LI Guoqi, AN Shuqing, ZHANG Jilin. The bending stress analysis of 4 species of woods caused by wind pressure in coastal shelter forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 1999, **23**(4): 76 - 80.
- [5] 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]. 华南热带农业大学学报, 2000, **6**(1): 15 - 17.
LI Huixian, XIN Wenhai. Coastal city of southern China green wind resistance of tree species selection and precautions [J]. *J South China Trop Agric*, 2000, **6**(1): 15 - 17.
- [6] 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(1): 25 - 28.
ZHU Weihua, XIE Liangsheng. Effect of typhoon disasters to urban landscape trees and typhoon disaster-reducing strategies in Shenzhen City [J]. *Guangdong Landscape Arch*, 2001(1): 25 - 28.
- [7] RUEL J C, PIN D, SPACEK L, *et al.* The estimation of wind exposure for windthrow hazard rating: comparison between Strongblow, MC2, Topex and a wind tunnel study [J]. *Forestry*, 1997, **70**(3): 253 - 266.
- [8] ENGLAND A H, BAKER D J, SAUNDERSON S E T. A dynamic analysis of windthrow of trees [J]. *Forestry*, 2000, **73**(3): 225 - 238.
- [9] BENOIT R, DESCAGNE M, PELLERIN P, *et al.* The Canadian MC₂: A semi Lagrangian, semi-implicit wide band atmospheric model suited for finescale process studies and simulation [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, **125**(10): 2382 - 2415.
- [10] VALINGER E, FRIDMAN J. Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce, birch forests in Sweden [J]. *Environ Manage*, 1999, **24**(2): 209 - 217.
- [11] 王琳. 云杉风倒动力学模型的建立与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Lin. *Building and Analysis of Dynamic Model for Windthrow of Spruce* [D]. Harbin: Harbin Institute of

表 7 树种(或无性系)综合评价计算结果

Table 7 Calculating results of each evaluating indexes weight for tree species (or clones)

树种或无性系	综合分值	综合排序值	
K18	0.840 3	2	
G1	0.752 3	4	
木麻黄	W8	0.851 2	1
	P6	0.765 1	3
	A8	0.678 3	5
苦楝		0.333 8	7
马占相思		0.258 3	9
琼崖海棠		0.582 0	6
巨尾桉		0.285 1	8
厚荚相思		0.090 1	10

- Technology, 2006.
- [12] GARDINER B, PELTOLA H, KELLOMAKI S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees [J]. *Ecol Mod*, 2000, **129**(1): 1 – 23.
- [13] VALINGER E, LUNDQVIST L, BONDESSON L. Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics [J]. *Forestry*, 1993, **66**(3): 249 – 260.
- [14] 朱积余, 刘秀, 蒋燧, 等. 苍梧县珠江生态经济型防护林体系的优良造林树种选择研究[J]. 西部林业科学, 2009, **38**(4): 16 – 20.
ZHU Jiuyu, LIU Xiu, JIANG Yi, *et al.* Excellent tree options for protection forestation with ecological and economical significance along Zhujiang River in Cangwu County, Guangxi Province [J]. *J West China For Sci*, 2009, **38**(4): 16 – 20.
- [15] 杨斌, 杨国州, 张延东. 运用层次分析法优选临夏北塬农田防护林树种[J]. 林业科学, 2006, **42**(6): 49 – 55.
YANG Bin, YANG Guozhou, ZHANG Yandong. Selecting optimum tree species of farmland protection forest in Linxia Beiyuan by analytical hierarchy process [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(6): 49 – 55.
- [16] 柳新红, 王章荣. 浙西南速生工业原料林阔叶树种评价与选择研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(4): 497 – 513.
LIU Xinhong, WANG Zhangrong. Evaluation and selection of broad leaved tree species for fast-growing industrial plantation in Southwest Zhejiang [J]. *For Res*, 2006, **19**(4): 497 – 513.
- [17] 雷孝章, 王金锡, 彭沛好, 等. 中国生态林业工程效益评价指标体系[J]. 自然资源学报, 1999, **14**(2): 175 – 182.
LEI Xiaozhang, WANG Jinxi, PENG Peihao, *et al.* The benefit evaluation index of ecological forest engineering of China [J]. *J Nat Res*, 1999, **14**(2): 175 – 182.
- [18] 杨东, 万福绪. 上海海岸防护林树种选择综合评价体系的构建和应用[J]. 广东农业科学, 2014(4): 223 – 226.
YANG Dong, WAN Fuxu. Construction and application of comprehensive evaluation system in tree species selection for Shanghai coastal protection forest [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2014(4): 223 – 226.
- [19] 李恺. 层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(2): 183 – 185.
LI Kai. Application of analytical hierarchy process to integrate evaluation of eco-environment [J]. *Environ Sci & Technol*, 2009, **32**(2): 183 – 185.
- [20] 陆吐布拉·依明, 赛皮娅古丽·艾比布力, 热汗古丽·吾买尔. 基于层次分析法(AHP)的阿克苏地区生态环境综合评价[J]. 现代农业科技, 2010(10): 259 – 260, 262.
YIMING Lutubula, AIBIBULI Saipiyaguli, WUMAIER Rehanguli. Comprehensive evaluation of eco-environment by analytic hierarchy process (AHP) in Ake-su region [J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2010(10): 259 – 260, 262.
- [21] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价[J]. 林业科学, 2011, **47**(1): 135 – 142.
PENG Shunlei, WANG Dexiang. Naturalness assessment of the main forest communities in Qinling Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(1): 135 – 142.
- [22] 中国标准出版社第一编辑室. 木材工业标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 21 – 58.
- [23] 许秀玉, 王明怀, 仲崇禄, 等. 不同树种木材性质及其抗台风性能[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(5): 751 – 757.
XU Xiuyu, WANG Minghuai, ZHONG Chonglu, *et al.* Wood properties and anti-typhoon performance in selected trees [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(5): 751 – 757.
- [24] 王志洁, 叶功富, 谭芳林, 等. 相思树种在沿海沙质立地环境中的抗逆性研究[J]. 福建林业科技, 2005, **32**(4): 35 – 38.
WANG Zhijie, YE Gongfu, TAN Fanglin, *et al.* The study on stress resistance of *Acacia* tree species in coastal sandy site [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2005, **32**(4): 35 – 38.
- [25] 陈胜. 沿海防护林优良适生树种造林效果研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, **29**(4): 91 – 95.
CHEN Sheng. Growth performance of fine adaptive tree species for coastal protection forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **29**(4): 91 – 95.