

# 基于功能性状的亚热带常绿植物抗雨雪冰冻能力评价\*

徐艺露<sup>1,2</sup> 杨晓东<sup>1,2</sup> 许月<sup>1,2</sup> 谢一鸣<sup>1,2</sup> 王良衍<sup>3</sup> 阎恩荣<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>华东师范大学环境科学系, 上海 200062; <sup>2</sup>浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江宁波 315114; <sup>3</sup>浙江鄞州区天童林场, 浙江宁波 315114)

**摘要** 评价常绿植物抗雨雪冰冻能力对于亚热带营林中的树种选择具有重要的指导意义。为筛选优良抗雨雪冰冻常绿树种和研发评估指标体系, 调查了2008年初特大雨雪冰冻灾后宁波地区常见的64种常绿阔叶和针叶植物的比叶面积、干材密度、叶面积、叶干物质分数、叶相对电导率、树皮厚度和枝密度7个功能性状, 并运用层次分析法确定了各物种功能性状的权重值, 建立了宁波地区抗雨雪冰冻和抗机械胁迫能力指标体系。据此筛选出赤皮青冈、云山青冈、浙江新木姜子和米饭树等23个优良的抗寒和抗机械损伤树种。最后分别以7个功能性状作为排序维度, 对64种植物的抗灾能力进行了分级排序, 建立了宁波地区抗雨雪冰冻灾害优良树种名录。

**关键词** 常绿木本植物 植物功能性状 抗冰冻 抗机械损伤 植物筛选 评价指标体系  
**文章编号** 1001-9332(2012)12-3288-07 **中图分类号** S718 **文献标识码** A

**Frost-resistance of subtropical evergreen woody plants: An evaluation based on plant functional traits.** XU Yi-lu<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, XU Yue<sup>1,2</sup>, XIE Yi-ming<sup>1,2</sup>, WANG Liang-yan<sup>3</sup>, YAN En-rong<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; <sup>2</sup>Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Ningbo 315114, Zhejiang, China; <sup>3</sup>Tiantong National Forest Park, Ningbo 315114, Zhejiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(12): 3288-3294.

**Abstract:** Evaluating the frost-resistance of evergreen woody plants is of significance in guiding the species selection in forest management in subtropical region. In this paper, an investigation was made on the functional traits (including specific leaf area, stem wood density, leaf area, leaf dry matter content, leaf relative electrical conductance, and twig wood density) of 64 common evergreen broad-leaved and coniferous woody plant species in the Ningbo region of Zhejiang Province, East China, after a severe snowstorm in early 2008, aimed to select the evergreen woody plants with high ability of freeze-tolerance, and to establish a related evaluation system. By using a hierarchy analysis approach, the weight values of the functional traits of each species were determined, and an index system for evaluating the plants tolerance ability against freeze and mechanical damage was established. Based on this system, 23 evergreen plant species with high tolerance ability against freeze and mechanical damage, such as *Cyclobalanopsis gilva*, *Cyclobalanopsis nubium*, *Neolitsea aurata*, and *Vaccinium mandarinorum*, were selected. In the meantime, on the basis of the ordering with each of the functional traits, the ordering of the tolerance ability of the 64 plant species against freeze and mechanical damage was made, and a list for the frost-resistance ability of the subtropical evergreen woody plant species in Ningbo region was constituted.

**Key words:** evergreen woody plant; plant functional trait; frost-resistance; mechanical damage-resistance; plant selection; evaluation index system.

\* 国家自然科学基金项目(30770365)和宁波市鄞州区农业与社会发展科技项目资助。

\* \* 通讯作者. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

2012-04-16 收稿, 2012-09-25 接受。

雨雪冰冻对森林和区域生态环境可以造成直接或者间接的不良影响,如积雪和冰凌的机械性压迫会导致林木枝条断梢或倒伏,低温会致使林木冻死和冻伤。2008 年初,我国南方雨雪冰冻天气对亚热带森林生态系统造成了严重的影响<sup>[1-2]</sup>。而我国当前营林评估多以林业部门的林木栽植经验为参考,缺少对具有不同抗雨雪冰冻能力的植物种间差异的分析<sup>[3]</sup>。对于森林冰冻灾害损害程度的评估,林业部门也没有制定具体的树种选择和评价标准。因此,在冰冻灾害发生后,难以对以往营林理论进行有效地评估和树种选择。

植物功能性状是指物种对环境变化适应的形态和生理表现形式,如叶片特征(叶面积、叶氮含量和叶寿命等),种子特征(种子大小种子扩散模式)等<sup>[4-9]</sup>。它具有直接或间接地解释环境胁迫的作用<sup>[10-11]</sup>。如在长期的寒冷条件下,植物体内会产生抗寒促进因子,使叶片含水量降低<sup>[12]</sup>。同样,当植物的干材密度增加、叶面积减小和叶片含水量降低时,也将增大植物抗冰冻和机械支持的能力<sup>[13-14]</sup>。因此,选择合适的植物功能性状指标,可在一定程度上反映植物本身具有的抗雨雪冰冻能力。

本研究以浙江宁波地区森林灾后林木的功能性状作为调查对象,通过对常绿针阔叶植物的抗冰冻和机械损伤相关的功能性状的调查评估,探索亚热带常绿树种对冰冻雨雪灾害影响的指示功能与森林管理的关系,开发常绿植物抗雨雪冰冻灾害的评估指标和评价体系,筛选优良的抗雨雪冰冻灾害常绿树种,为营造健康、安全和可持续的抗雨雪冰冻灾害森林生态系统提供理论依据和技术支持,也为今后营林和森林选种、育种提供科学依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究地区概况与植物种类选择

研究地位于浙江省宁波市天童林场(29°48' N, 121°47' E)和周边的盘山、北仑、东钱湖地区。该地区属亚热带季风气候区,年均气温 16.2 °C,全年无霜期 237.8 d,≥10 °C 的活动积温 5166.2 °C<sup>[15]</sup>,年平均降雨量 1374.7 mm。土壤主要为山地黄红壤。研究区域的地带性植被主要为常绿阔叶林<sup>[16]</sup>。在冬季,常绿植物受冰冻雨雪灾害的影响最为严重。

本研究主要选择该地区常见的常绿阔叶和针叶植物作为研究对象。2008 年 3 月,在对该地区冰冻雨雪灾后森林受损状况实地调查后,针对植物的不同受损程度,于当年 7 月选择主要常绿林木测定植

物功能性状。共选择常绿针阔叶植物种类 64 种,植物名录如表 1 所示。

在野外,每个种类选取典型且健康的植株 3~8 株,每株从树冠四周及顶端 5 个方向依次选取生长旺盛的健康枝条,用高枝剪剪下,选择完好的叶片装入自封袋中,带回浙江天童森林生态系统国家野外站实验室,测定叶片的功能性状。此外,对以上取样个体,获取一定断面积的树干,进行干材密度测量。将样品带回实验室后,在 12 h 内用去离子水冲洗干净叶片,剪成大小相近的正方形。为了模拟 2008 年初当地的低温,将每份 2 g 样品(3 份平行样)分别置于 0 °C 和 -5 °C 条件下进行冷胁迫处理,1 h 后加入 20 mL 去离子水,再置摇床震荡 2 h (80 次·min<sup>-1</sup>),用电导率仪测得电导率  $R_1$ ; 样品在 20 min 的恒温水浴之后,冷却至室温测得电导率  $R_2$ 。相对电导率 =  $(R_1/R_2) \times 100$  (%)。叶面积使用 LI-3050C 型叶面积仪测定,然后,将叶片置于 80 °C 的烘箱中 48 h,烘干至恒量后测定干质量,最后利用单位干质量的叶面积反映比叶面积(mm<sup>2</sup>·mg<sup>-1</sup>)。枝密度和树干密度利用排水法测定,每份样品测定 3 次。在体积测量后,将供测样品置于烘箱中烘干 72 h,至恒量后测定干质量,计算每个树枝和树干的密度(g·mL<sup>-1</sup>)。

### 1.2 评价指标选取和评价体系建立

针对植物在雨雪冰冻灾害环境下功能性状的指示作用,在选择功能性状指标时,以最能集中反映植物抗冰冻和抗机械损伤两方面,且易于收集测量的功能性状作为测量指标。在选择植物抗机械胁迫能力指标时,主要选择反映植物承载雨雪量能力的指标,包括单叶面积、比叶面积、干物质分数、枝密度和干材密度;而在抗冰冻低温方面,主要考虑低温对植物叶片细胞结构的破坏作用,以叶片电导率和树皮厚度作为评价指标。

评价指标体系的建立采用层次分析法,共设置 3 个层次:1) 目标层,反映抗雨雪冰冻和抗机械损伤的综合性;2) 准则层,分别反映抗机械胁迫和抗冻性;3) 指标层(表 2)。

### 1.3 数据标准化

对于选择的 7 个指标,由于测量值的单位和极值的大小幅度不同,采用极差法对 3 级指标值进行标准化,使其值介于 0~1 之间。假设指标值越大,表明植物越能抵挡雨雪冰冻天气的不良影响(式 1); 当指标值越小,表明植物易形成抵御抗寒和压折机制(式 2)。其标准化公式设定为:

表 1 宁波地区 64 种常绿植物名录及其抗雨雪冰冻能力

Table 1 Plant species list and frost-resistance ability for 64 subtropical evergreen woody plants in Ningbo region, Zhejiang Province

乔木 Tree	抗雨雪冰冻能力值 Value of frost-resistance ability	灌木/小乔木 Shrub/small tree	抗雨雪冰冻能力值 Value of frost-resistance ability
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	0.37	连蕊茶 <i>Camellia fraterna</i>	0.40
栲树 <i>Castanopsis fargesii</i>	0.54	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	0.27
苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	0.58	细齿柃 <i>Eurya nitida</i>	0.42
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.37	细枝柃 <i>Eurya loquaiana</i>	0.45
杨桐 <i>Cleyera japonica</i>	0.39	隔药柃 <i>Eurya muricata</i>	0.40
赤皮青冈 <i>Cyclobalanopsis gilva</i>	0.62	柃木 <i>Eurya japonica</i>	0.41
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	0.54	窄基红褐柃 <i>Eurya rubiginosa</i>	0.39
青栲 <i>Cyclobalanopsis myrsinaefolia</i>	0.54	梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	0.41
云山青冈 <i>Cyclobalanopsis nubium</i>	0.73	披针叶茴香 <i>Illicium lanceolatum</i>	0.40
褐叶青冈 <i>Cyclobalanopsis stewardiana</i>	0.54	皱柄冬青 <i>Ilex kengii</i>	0.36
交让木 <i>Daphniphyllum macropodum</i>	0.30	檵木 <i>Loropetalum chinensis</i>	0.53
杨梅叶蚊母树 <i>Distylium myricoides</i>	0.40	榄绿粗叶木 <i>Lasianthus lancilimbus</i>	0.42
薯豆 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	0.33	笔罗子 <i>Meliosma rigida</i>	0.39
杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>	0.24	杨梅 <i>Myrica rubra</i>	0.51
红叶树 <i>Helicia cochinchinensis</i>	0.27	石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.47
大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>	0.48	山黄皮 <i>Randia cochinchinensis</i>	0.67
冬青 <i>Ilex purpurea</i>	0.50	石斑木 <i>Raphiolepis indica</i>	0.50
石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	0.51	马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	0.42
长叶石栎 <i>Lithocarpus harlandii</i>	0.60	映山红 <i>Rhododendron simsii</i>	0.47
豹皮樟 <i>Litsea coreana</i>	0.37	羊舌树 <i>Symplocos glauca</i>	0.38
黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	0.48	花榈木 <i>Ormosia henryi</i>	0.32
华东楠 <i>Machilus leptophylla</i>	0.44	光叶石楠 <i>Photinia glabra</i>	0.61
红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	0.49	光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	0.44
浙江新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i>	0.53	披针叶山矾 <i>Symplocos lancilimba</i>	0.33
华东木犀 <i>Osmanthus cooperi</i>	0.56	黄牛奶树 <i>Symplocos laurina</i>	0.24
紫楠 <i>Phoebe shearerii</i>	0.49	四川山矾 <i>Symplocos setchuensis</i>	0.45
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.71	老鼠矢 <i>Symplocos stettaris</i>	0.35
木荷 <i>Schima superba</i>	0.66	山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	0.33
红皮树 <i>Styrax suberifluis</i>	0.47	赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	0.50
黑山山矾 <i>Symplocos heishanensis</i>	0.27	狗骨柴 <i>Tricalysia dubia</i>	0.26
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.26	乌饭 <i>Vaccinium bracteatum</i>	0.35
		米饭 <i>Vaccinium mandarinorum</i>	0.51
		刺毛越橘 <i>Vaccinium trichocladum</i>	0.46

$$F(P_i) = \frac{P_{i \max} - P_i}{P_{i \max} - P_{i \min}} \quad (1)$$

$$F(P_i) = \frac{P_i - P_{i \min}}{P_{i \max} - P_{i \min}} \quad (2)$$

表 2 常绿植物抗雨雪冰冻和抗机械损伤评价指标体系

Table 2 Index system for evaluating frost- and mechanic-resistance of subtropical evergreen woody plants

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer
抗雨雪冰冻和 机械损伤能力 Ability of frost- and mechanic- resistance	抗机械胁迫性 Mechanical damage-resistance	干材密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 叶片面积 ( $\text{mm}^2$ ) 比叶面积 ( $\text{mm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ) 叶干物质分数 (%) 枝密度 ( $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
	抗冻性 Frost-resistance	-5 °C 叶片的相对电导率 (%) 树皮厚度 (mm)

式中:  $F(P_i)$  表示 3 级指标标准化之后的值 ( $i=1, 2, \dots, 7$ );  $P_i$  表示评价指标体系中各 3 级指标因子的实际测量值;  $P_{i \max}$  和  $P_{i \min}$  分别表示第  $i$  项评价指标因子在各个功能性状指标中的最大值和最小值。

#### 1.4 分层指标权重计算

常绿植物大致可分为乔木和灌木或小乔木 2 种类型. 由于空间分布和生长时间的差异, 其受冰冻和雨雪带来的机械损伤程度不同(表 3). 对于一个结构完整的群落, 在冰冻雨雪天气条件下, 乔木层往往会比下木层的灌木和小乔木承受更多的机械压力, 所以在层次分析法的准则层判断矩阵中, 将机械损

表 3 宁波地区优良抗雨雪冰冻灾害常绿阔叶植物功能性状指标划分

Table 3 Classification of plant functional traits for subtropical evergreen woody species in Ningbo region, Zhejiang Province

生境类型 Type of habitat	抗机械胁迫性 Mechanical damage-resistance					抗冻性 Frost-resistance	
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
	山顶 Peak	>0.71	<1464.39	<6.46	>47.6	>0.55	0.5±0.07
坡面中性生境 Mesophytic area	>0.63	<3644.88	<7.34	>44.2	>0.41	0.6±0.11	>0.51
沟谷 Gully	>0.52	<7289.76	<12.23	>37.1	>0.32	0.7±0.07	>0.48

P<sub>1</sub>: 干材密度 Stem wood density (g · cm<sup>-3</sup>); P<sub>2</sub>: 叶面积 Leaf area (mm<sup>2</sup>); P<sub>3</sub>: 比叶面积 Specific leaf area (mm<sup>2</sup> · mg<sup>-1</sup>); P<sub>4</sub>: 叶干物质分数 Leaf dry matter content (%); P<sub>5</sub>: 枝密度 Twig wood density (mg · mm<sup>-3</sup>); P<sub>6</sub>: -5 °C 叶片的相对电导率 Leaf relative electrical conductance at -5 °C (%); P<sub>7</sub>: 树皮厚度 Bark thickness (mm). 下同 The same below.

伤和低温冻害置于同等重要的水平, 将重要性的标度设定为 1 : 1; 而对于灌木或小乔木层, 上层乔木的掩蔽作用使机械损伤对其的影响程度较低, 因而将抗机械损伤和低温冻害重要性的标度设定为 1 : 3.

### 1.5 植物抗雨雪冰冻灾害能力的定量判断

筛选优良抗雨雪冰冻灾害植物, 需要经过层次分析法计算出某物种对抵抗冰冻雨雪不良环境因子的能力值, 计算方法为:

$$IE = \sum_{i=1}^n F(P_i) WP_i \quad (3)$$

式中:  $IE$  表示物种抗雨雪冰冻机械损伤的评价值;  $F(P_i)$  表示标准化之后的指标值, 由式(1)和(2)在实测值的基础上得到;  $WP_i$  表示判断矩阵得到的指标权重(表 4). 最后计算各物种  $IE$  值, 依据乔木和灌木、小乔木的生活型区分为 2 类.

### 1.6 优良抗雨雪冰冻灾害植物筛选

根据植物适应雨雪冰冻灾害天气条件下的特征性状, 利用层次分析评价得到各物种的  $IE$  值, 依据  $IE$  值大小排序, 并根据各物种出现的  $IE$  值频度, 对物种的  $IE$  加和(式 4). 并依据这一计算值, 从 64 个物种中挑选出  $IE$  值频度加和值  $\geq 80\%$  的物种, 然后根据其生长生境及性状结果, 按照每个物种的 7 个功能性状进行排序, 选取不同生境中排序轴前 80% 的物种的功能性状数值作为划分山顶(海拔 500 m 以上)、中性生境(海拔 200 ~ 500 m)和沟谷(海拔 200 m 以下)生境条件下功能性状指标的依据(表 3). 从而筛选出不同地形下的抗雨雪冰冻灾害物种.

$$\frac{\sum_{i=1}^{66} x_{1IE} + x_{2IE} + x_{3IE} + \dots + x_{xIE}}{Y} \geq 80\% \quad (4)$$

式中:  $x_{1IE}$  表示  $IE$  最大的物种数;  $x_{2IE}$  表示  $IE$  次大的物种数; 其余  $x_{xIE}$  逐次递减;  $Y$  为总物种数.

## 2 结果与分析

### 2.1 评价体系各分层指标的权重

研究表明, 植物枝条强度越大, 其可承载的冰凌和积雪量越大, 越有利于其在雨雪灾害天气中生存. 由表 4 可以看出, 枝条干物质含量作为反映植物抗机械损伤能力的重要指标, 权重值分别为 0.21 和 0.33, 均大于其他表示抗机械损伤能力功能性状的权重. 表明枝条物质含量在反映植物抗雨雪冰冻胁迫能力有着重要的指示作用. 同样是反映植物抗机械胁迫的功能性状, 比叶面积的权重值仅次于枝条干物质含量, 比叶面积大小也可指示植物的抗雨雪冰冻灾害能力. 比叶面积越小, 单位质量叶面积越小, 其所承载的冰凌和雨雪量越少, 其下枝条所受到的胁迫也就越小.

树皮厚度是反映植物抗冻性能力的重要指标. 树皮越厚, 越能保护其内部的韧皮部细胞运输水分

表 4 宁波地区常绿树木抗雨雪冰冻和抗机械胁迫能力指标的权重值

Table 4 Weight of evaluation indicators of subtropical evergreen tree species in Ningbo region, Zhejiang Province

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	权重 Weight ( $WI_i$ )	指标层 Indicator layer	权重 Weight ( $WP_i$ )
乔木 Tree	抗机械胁迫性 Mechanical damage-resistance	0.50	P <sub>1</sub>	0.08
			P <sub>2</sub>	0.11
			P <sub>3</sub>	0.16
			P <sub>4</sub>	0.33
			P <sub>5</sub>	0.07
灌木/小乔木 Shrub/small tree	抗机械胁迫性 Mechanical damage-resistance	0.25	P <sub>6</sub>	0.05
			P <sub>7</sub>	0.20
			P <sub>1</sub>	0.05
抗冻性 Frost-resistance	0.75	P <sub>2</sub>	0.07	
		P <sub>3</sub>	0.11	
		P <sub>4</sub>	0.21	
		P <sub>5</sub>	0.04	
		P <sub>6</sub>	0.08	
		P <sub>7</sub>	0.42	

和营养,抵御寒冷低温的侵害.此外,本研究在设置准则层权重时,灌木的抗冻性能力与抗机械胁迫能力的比值是3:1,而乔木的比值则为1:1,因而灌木叶片电导率的权重值略大于乔木.

## 2.2 常绿植物的抗雨雪冰冻灾害能力

通过层次分析法计算各物种的IE值,得到不同物种抗冰冻雨雪灾害能力值(表1).青冈属常绿物种的叶片对较低温度有较好的忍受力,不会在低温状态下过快的死亡.以乔木为例,云山青冈(*Cyclobalanopsis nubium*)、赤皮青冈(*Cyclobalanopsis gilva*)和木荷(*Schima superba*)等抵抗雨雪冰冻灾害的能力较高;而在灌木和小乔木中,赤楠(*Syzygium buxifolium*)、短梗冬青(*Ilex buergeri*)和大叶冬青(*Ilex latifolia*)等在低温雨雪天气中更具有存活优势.实地调查的数据和层次分析法所得结果能够相互印证.例如,亚热带常绿阔叶树种赤皮青冈有着典型的厚革质叶片.调查中发现,赤皮青冈的叶面积为1374.15 mm<sup>2</sup>,低于64个物种的平均叶面积(1960.98 mm<sup>2</sup>),累积在赤皮青冈叶片上的雨雪量少于其他物种,从而减轻了对枝干的机械压力;赤皮青冈的干材密度为0.60 g·cm<sup>-3</sup>,比叶面积为10.84

mm<sup>2</sup>·mg<sup>-1</sup>,干物质含量46.9%,枝密度0.54 mg·mm<sup>-3</sup>,均高于或接近于64个物种的平均值,高干材密度和高干物质含量均有助于增强植物的机械抗性和忍受低温的能力.当气温在-5℃时,赤皮青冈电导率为0.56%,低于平均值0.63%,说明赤皮青冈的叶片对低温有更好的耐受力,因而可以作为山顶生境优先选择的抗雨雪冰冻树种.

## 2.3 优良抗雨雪冰冻常绿树种的筛选

以表4和式(4)为基础,结合表1中各物种抗冰冻和抗机械胁迫能力值.将物种IE加和值≥80%的物种划分到3个生境中,得到23种抵抗冰冻雨雪灾害的优良亚热带常绿阔叶植物(表5).

## 3 讨论

### 3.1 抗雨雪冰冻林木指标体系的有效性

以2008年冰冻灾后未受损伤的常绿树种为调查对象,通过测定宁波地区64种常绿植物的叶片、枝条和干材的功能性状特征,采用层次分析法,依据物种抗机械损伤程度和抗冻性大小,构建了宁波地区常绿树种的抗冰冻和抗机械损伤指标体系.以往的研究中,为评价植物抗雨雪冰冻的能力,常采用室内测定<sup>[17-18]</sup>或应力试验<sup>[19]</sup>等方法,分析植物在不同温度条件下的抗低温能力及在不同应力条件下的抗机械能力,筛选出具有较强抗低温及机械能力的小叶榕(*Ficus microcarpa*)和竹柏(*Nageia nagi*)等物种<sup>[20]</sup>,用于指导森林抚育过程.但此过程耗时较长,无法及时用于大量的林业生产中.

植物功能性状是植物长期适应环境过程中形成的一系列特征,与植物生存的环境紧密相关<sup>[10-11]</sup>.在本研究中,叶片的干物质分数、枝密度、比叶面积、叶面积、干材密度、电导率、树皮厚度等指标均能较好地反映植物抗机械支持及雨雪冰冻的能力.其结果与张金环等<sup>[21]</sup>对宝鸡常绿植物受低温冻害影响的调查结果一致.

以往对植物抗冰冻能力常常是通过叶片的电解质渗透率<sup>[22]</sup>、水分利用效率<sup>[23]</sup>、可溶性蛋白含量<sup>[24]</sup>,或者是直接用电导率来反映<sup>[25]</sup>.本文中,干材密度、树皮厚度、干物质分数和枝密度的植物抗雨雪冰冻能力权重较高,说明植物在适应环境的过程中,往往采取多头下注的策略来获取最大的生活效益<sup>[26-27]</sup>.因此,选择较多的性状指标,可如实地反映植物在自然条件下的抗雨雪冰冻能力.

阎恩荣等<sup>[17]</sup>对浙江天童地区2008年雨雪冰冻灾害后,植物的受损情况研究结果表明,木荷的抗雨

表5 宁波地区23种优良抗雨雪冰冻常绿植物筛选表

Table 5 List of 23 frost-resistance subtropical evergreen woody plants in Ningbo region, Zhejiang Province

生境类型 Habitat type	生活型 Life form	物种 Species	排序号 Order	
山顶 Peak	乔木 Trees	云山青冈	1	
		马尾松	2	
		木荷	3	
		赤皮青冈	4	
		长叶石栎	5	
坡面中性生境 Mesophytic area	灌木/小乔木 Shrub/small tree	山黄皮	1	
		光叶石楠	2	
	乔木 Trees	华东楠	1	
		披针叶茴香	2	
		杨梅叶蚊母树	3	
		杨桐	4	
		灌木/小乔木 Shrub/small tree	米饭	1
		杨梅	2	
		赤楠	3	
		石斑木	4	
石楠	5			
沟谷 Gully	乔木 Trees	交让木	1	
		黑山山矾	2	
	灌木/小乔木 Shrub/small tree	笔罗子	孙	
		窄基红褐柃	2	
		羊舌树	3	
		乌饭	4	
		山矾	5	

雪冰冻能力明显优于红楠 (*Machilus thunbergii*); 而本研究中, 木荷与红楠的抗雨雪冰冻排序位置一致。说明这一评价体系能真实地反映不同树种间的抗冰冻和抗机械损伤能力。此外, 分布于天童太白山山顶的云山青冈和赤皮青冈等在灾害发生时基本未受损<sup>[17]</sup>, 在评价体系中也表现出极强的抗严寒和抗机械压力胁迫能力。

与通常的评估指标分级量值法相比, 本研究中各项评价指标的取值均来源于实地观察测定数据, 评价结果更接近于实际情况。因此可以作为常绿阔叶林营林时选择物种的依据, 也为森林的抗冰冻雨雪灾害能力的评估提供评价指标。

### 3.2 优良抗雨雪冰冻树种的筛选

植物在环境胁迫下具有自然适应力。根据植物功能性状适应雨雪冰冻灾害的特征, 利用排序方法对 64 种常绿植物的抗灾害能力进行分级排序, 针对不同生境类型(山顶、中性生境、沟谷), 筛选出 23 个物种作为宁波地区优先推广的优良抗雨雪冰冻树种, 并建立了相应的指标体系。相对于以往的植物防寒措施<sup>[28]</sup>, 本研究结果更为全面, 且通过直接联系环境的植物功能性状筛选物种, 弥补了当前亚热带林业生产中常绿树种抗冰冻能力筛选知识的不足。

由于常绿树种抗冰冻能力的强弱受季节变化的影响较大<sup>[29-30]</sup>, 且亚热带常绿阔叶林类型多样、分布广泛, 本文提出的指标体系主要针对浙江宁波地区。虽然 2008 年的自然灾害对本研究结果进行了自然验证, 但对其适用范围及有效性仍需进行深入的研究, 并对相应的指标体系和物种选择依据进一步加以修订。

**致谢** 野外采样和室内测量工作中, 郭明、仲强和周武等同学给予了帮助, 谨致谢忱。

### 参考文献

- [1] Lu C-F (卢存福), Jian L-C (简令成), Kuang T-Y (匡廷云). Freezing hardiness in alpine plants. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 1998, **15**(3): 17-22 (in Chinese)
- [2] State Forestry Bureau (国家林业局). Forestry science and techniques on recent frost catastrophe area in the south China. *Hunan Forestry Science & Technology* (湖南林业), 2008(3): 16-19, 22-24 (in Chinese)
- [3] Forestry Department of Zhejiang Province (浙江省林业厅). Detailed rules for the implementation of the study forest resources loss during recent frost catastrophe in Zhejiang. 2008 (in Chinese)
- [4] Ackerly DD, Dudley SA, Sultan SE, et al. The evolution of plant ecophysiological traits: Recent advances

- and future directions. *BioScience*, 2000, **50**: 979-995
- [5] Díaz S, Cabido M. Plant functional types and ecosystem function in relation to global change. *Journal of Vegetation Science*, 1997, **8**: 463-474
- [6] Reich PB, Wright IJ, Cavender-Bares J, et al. The evolution of plant functional variation: Traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Science*, 2003, **164**: 143-164
- [7] Cornelissen JHC, Lavorel S, Garnier E, et al. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, **51**: 335-380
- [8] Jin L, Du XG, Hou FJ, et al. Effects of hillside slopes on plant community succession of re-natural farm land in the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2007, **24**: 66-71
- [9] Liu G-F (刘贵峰), Zang R-G (臧润国), Liu H (刘华), et al. Geographic variation of seed morphological traits of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* in Tianshan Mountains, Xinjiang of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(6): 1455-1461 (in Chinese)
- [10] Meziane D, Shipley B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: Effects of irradiance and nutrient availability. *Plant, Cell & Environment*, 1999, **22**: 447-459
- [11] Wright IJ, Reich PB, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, **428**: 821-827
- [12] Liu H-Y (刘红雨), Zhang J-L (张吉立), Li X (李新), et al. Influences of low temperature on biofilm and endogenous hormone in landscape plants. *Hunan Agricultural Sciences* (湖南农业科学), 2011(5): 111-113 (in Chinese)
- [13] Yelenosky G, Guy CL. Freezing tolerance of citrus, spinach, and petunia leaf tissue. I. Osmotic adjustment and sensitivity to freeze induced cellular dehydration. *Plant Physiology*, 1989, **89**: 444-451
- [14] Curran TJ, Gersbach LN, Edwards W, et al. Wood density predicts plant damage and vegetative recovery rates caused by cyclone disturbance in tropical rainforest tree species of north Queensland, Australia. *Austral Ecology*, 2008, **33**: 442-450
- [15] Hu X-M (胡星明), Cai Y-L (蔡永立), Li K (李凯), et al. Spatial and temporal pattern of *Castanopsis fargesii* seed rain in evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park of Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 815-819 (in Chinese)
- [16] Wang X-H (王希华), Huang J-J (王建军), Yan E-R (阎恩荣). A study on leaf nutrient resorption of some trees in Tiantong National Forest Park. *Guihaia* (广西植物), 2004, **24**(1): 81-85 (in Chinese)
- [17] Yan E-R (阎恩荣), Zhong Q (仲强), Zhou W (周武), et al. Mechanical damage in relation to tree characteristics after a catastrophic freeze in Tiantong Region, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2010, **27**(3): 360-366 (in Chi-

- nese)
- [18] Feng X-B (冯献宾), Dong Q (董倩), Wang J (王洁), *et al.* Effects of low temperature on cold resistance of *Pistacia chinensis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2011, **27**(8): 23–26 (in Chinese)
- [19] Zhao L-B (赵丽兵), Zhang B-G (赵宝贵). Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(9): 7–12 (in Chinese)
- [20] Zhu L-Q (朱丽清), Liu D-Y (刘德源). Study on cold resistance of the main garden plants in Liuzhou City. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37**(26): 12514–12518, 12520 (in Chinese)
- [21] Zhang J-H (张金环), Gao M-Y (高梦莹). Hazards and precautions of evergreen plants in low temperature and snow weather. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences* (陕西农业科学), 2008, **54**(4): 146–147 (in Chinese)
- [22] Dong L (董丽), Huang Y-G (黄亦工), Jia M-E (贾麦娥), *et al.* Freezing tolerance and methods of evaluation of introduced evergreen broad-leaf plants in open gardens in Beijing of China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2002, **24**(3): 70–73 (in Chinese)
- [23] Li W (李伟), Gui X-L (桂晓蕾), Zhang Z-X (张振贤). Effects of temperature regime on low-light tolerance of *Cucumis sativus* seedling leaves in their photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2643–2650 (in Chinese)
- [24] Gao Q-H (高清海), Wu Y (吴燕), Xu K (徐坤), *et al.* Responses of grafted eggplant seedling roots to low temperature stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(3): 390–394 (in Chinese)
- [25] Fang J-G (房经贵), Liu L-G (刘立攻), Zhang Z (章镇), *et al.* Studies on sampling for testing electric conductivity of fruiting-plum branches. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology* (江苏林业科技), 2001, **28**(4): 29–31 (in Chinese)
- [26] Meyers LA, Bull JJ. Fighting change with change: Adaptive variation in an uncertain world. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, **17**: 551–557
- [27] Venable DL. Bet hedging in a guild of desert annuals. *Ecology*, 2007, **88**: 1086–1090
- [28] Bi H-C (毕绘蟾), Sun Z-J (孙醉君), Gu-Y (顾姻), *et al.* Screening for freezing resistant germplasms of *Osmanthus fragrans* Lour. varieties and its mechanism of freezing resistance. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境), 1996, **5**(1): 18–22 (in Chinese)
- [29] Xie X-J (谢晓金), Hao R-M (郝日明). Dynamic changes of cold hardiness in winter in twelve evergreen broad-leaved species from Nanjing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(4): 2149–2154 (in Chinese)
- [30] Xie X-J (谢晓金), Hao R-M (郝日明), Zhang J-L (张纪林). Low-temperature tolerance characteristic and ecological evaluation of broad-leaved evergreen tree species. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(11): 2671–2677 (in Chinese)

---

作者简介 徐艺露,女,1987年生,硕士研究生.主要从事植被和代谢生态学研究. E-mail: echo0912@gmail.com

责任编辑 李凤琴

---