

极端低温分布模型在邓恩桉抗寒性 标准定量化应用的研究

郭祥泉¹, 朱会芸², 洪伟³, 郭祥堆⁴, 孙晓冬¹

(1. 三明市林业局, 福建 三明 365000; 2. 永安市气象局, 福建 永安 366000; 3. 福建农林大学
桉树研究中心, 福州 350002; 4. 永安市第六中学, 福建 永安 366000)

摘要: 依据闽北建阳市 1971~2005 年的极端低温资料构建极值分布数学模型, 用电导率指标确定邓恩桉(*Eucalyptus dunnii*)优株的半致死温度, 预测 0~5 年、5~10 年和 10 年以上可能出现的极端临界低温分别是 -7.47°C 、 $-7.47\sim-8.5^{\circ}\text{C}$ 和 -8.68°C 。首次提出利用极端低温分布模型结合电导率指标的方法定量划分林木的抗寒性, 称为“抗寒性极端低温分布法”, 该方法可广泛应用于不同区域、树种的抗寒适应性定量评价和林木个体的抗寒适应性筛选。

关键词: 极端低温分布; 抗寒性; 定量化; 半致死温度; 电导率

中图分类号: S948.112.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2011)01-0051-05

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.01.007

The Quantitative Application of Cold Resistance Standard in *Eucalyptus dunnii* with the Lowest Temperature Distribution Model

GUO Xiang-quan¹, ZHU Hui-yun², HONG Wei³, GUO Xiang-dui⁴, SUN Xiao-dong¹

(1. Forest Bureau of Sanming, Sanming 365000, China; 2. Yong'an Meteorological Bureau, Yong'an 366000, China; 3. Research Centre of *Eucalyptus*, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. The Sixth Middle School of Yong'an, Yong'an 366000, China)

Abstract: On the basis of the lowest temperature data from 1971 to 2005 in Jianyang of Fujian Province, the mathematical model of extreme values distribution was constructed, and the self-mortality temperature of *Eucalyptus dunnii* was determined by conductivity. The lowest temperatures were forecasted as -7.47°C , $-7.47\sim-8.5^{\circ}\text{C}$ and 8.68°C in 0~5 years, 5~10 years and over 10 years, respectively. The extreme low-temperature distribution method of cold resistance was put forward for the first time, which combined the extreme lowest-temperature distribution model with conductivity. The method could widely used in quantitative evaluation and individual selection of the cold resistance for different species and areas.

Key words: Extreme low temperature distribution; Cold resistance; Quantitative; Self-mortality temperature; Conductivity

林木因种的生态习性和适应性的差异,表现出不同的抗寒适应性,如杨树(*Populus* spp.)是北方树种,在北亚热带与温带地区的生长适应性良好,但在更高纬度栽植,仍会受冻^[1-3]。桉属(*Eucalyptus*)大多数种在我国南亚热带和热带地区栽植,适应性良好,但中亚热带地区的极端低温成为主要限制因

子^[4]。有关林木个体的抗寒性研究目前主要集中在生理生化、分子生物学等方面^[5-8],而植物个体对生存环境的适应性研究较少^[4,9]。定量评价某个树种在某一区域的抗寒适应性,及物种在不同区域的抗寒适应能力的定量研究尚未见报道。本文利用闽北建阳市多年极端低温资料构建极值分布模型,

收稿日期: 2010-05-28

接受日期: 2010-08-10

基金项目: 福建省财政厅重大专项基金资助

作者简介: 郭祥泉, 男, 汉族, 高级工程师, 博士, 主要从事林木育种栽培与资源管理, email: gxq19670709@sina.com

本文为第一作者博士论文的部分内容。

以电导率作为指标确定当地新引种邓恩桉 (*E. dunnii*) 的半致死温度, 探讨不同个体的抗寒适应性, 并进行抗寒定量分类与复选^[4], 为林木适应性引种决策与个体区域抗寒适应性筛选提供参考依据。

1 研究区域概况

1.1 自然气候

闽北建阳市为武夷山脉南伸, 地处 27°06′ ~ 27°43′N, 117°31′ ~ 118°38′E, 属中亚热带季风气候,

北部有武夷山为屏障, 能较好地阻挡冬季寒流的南袭, 较强地削弱寒流的冻害威胁。受武夷山脉的影响, 该区域年均温为 15 ~ 19℃, 多年平均降水量为 1700 mm 左右, 年均蒸发量为 779.8 mm, 年均日照时数 1802.7 h, 无霜期达 283 d, 1 月均温为 7.1℃, 7 月均温为 28.1℃, 历史上极端最低温为 -8.7℃, 最高温为 41.3℃。建阳市 1971 ~ 2005 年极端最低气温记录数据详见表 1 (来源于建阳市气象局)。

表 1 建阳市 1971 ~ 2005 年极端最低气温

Table 1 The lowest temperature from 1971 to 2005 in Jianyang

年份 Year	最低温度 Lowest temperature (°C)	年份 Year	最低温度 Lowest temperature (°C)	年份 Year	最低温度 Lowest temperature (°C)	年份 Year	最低温度 Lowest temperature (°C)
1971	-3.4	1980	-3.2	1989	-1.3	1998	-1.8
1972	-2.0	1981	-3.2	1990	-1.6	1999	-8.0
1973	-8.7	1982	-5.4	1991	-7.7	2000	-4.2
1974	-3.8	1983	-3.4	1992	-3.7	2001	-2.0
1975	-6.2	1984	-5.3	1993	-4.7	2002	-2.0
1976	-6.6	1985	-5.7	1994	-3.3	2003	-4.2
1977	-4.8	1986	-5.5	1995	-4.4	2004	-5.0
1978	-4.7	1987	-3.0	1996	-2.9	2005	-5.7
1979	-4.1	1988	-2.2	1997	-3.4		

1.2 邓恩桉引种概况

建阳市从 2004 年开始引种邓恩桉 (*Eucalyptus dunnii*), 至 2008 年累计栽植达 1700 hm², 多数林分保存良好, 有较好的生长量。该树种在引种区域当年的平均高生长量约为 3.0 m, 2 年生的平均胸径约为 6.3 cm, 平均高生长约为 6.30 m, 4 年生的平均胸径约为 9.3 cm, 平均高生长约为 10.4 m, 最大胸径达 17.4 cm, 最大树高为 17.2 m。引种区为实生苗造林, 个体生长适应性早期分化明显, 抗寒性也表现显著差异, 在出现极端异常低温的年份, 个体受低温危害程度有较大差异, 有的仅受轻微冻害, 生长基本不受影响, 有的当年生未完全木质化新梢被冻, 顶梢受害, 影响生长^[4,9]。这说明在该区域要进一步推广种植, 应进行抗寒速生个体的筛选。

2 研究方法

2.1 极端低温预测模型

对极端低温的预测, Gumbel 和 Brooks 等指出

可用 Fisher-Tippet 第一型极值分布来分析气象要素的极值问题^[4,9]。Fisher-Tippet 第一型极值分布即为 Gumbel 分布, 假设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是总体的 n 个随机观测值, 它们有同一概率分布随机变量。因此可由 Fisher-Tippet 第一型极值分布函数构建极端低温预测数学模型, 具体见前文^[4,9]、Brooks 等和 Gumbel 的方法^[10-11]。

2.2 材料

试验材料是通过 t 检验选择法, 从建阳市 2004 ~ 2008 年所引种的 1400 hm² 邓恩桉林分中筛选的优良单株。不同年度供筛选林分栽植面积, 分别约为 200 hm²、200 hm²、300 hm²、310 hm²、460 hm², 共选择 15 株优良单株, 并分别命名为金山-01 ~ 金山-15, 具体选择方法见前文^[12]。以引种地所筛选的优良单株为试验材料, 剪取植株中上部当年生长良好的带叶枝条, 装入盛有清水的桶并编号带回实验室备用。

2.3 电导率测定

取枝条顶梢下第 4 对后当年生、未受病虫害危害

的成熟功能叶,先用自来水冲洗叶片,再用无离子水漂洗 4 次,用滤纸吸干,装入清洁小纸袋,放入 Sheldon 公司产 SL-2015 型培养箱中低温处理,按 -1°C 、 -4°C 、 -7°C 、 -10°C 、 -13°C 梯度降温,各温度处理 1 h。处理后剪成约 0.8 cm 长的切段,准确称取 0.5 g 装入试管,加入无离子水 20 mL,真空渗入 15 min,振荡 1 次,加塞在 25°C 下静置 3 h,取出再振荡 1 次,静置后用上海华阳电子仪器厂生产的 DDS-11A 型测定电导率,然后沸水浴 15 min,冷却后再测煮沸电导率。每个试验单株按 3 次重复^[4,9-11],
 电解质渗透率 = 处理电导率/煮沸电导率 $\times 100\%$ 。

2.4 半致死温度测定

半致死温度(LT₅₀)是指电解质渗透率为 50% 时的温度。测定叶片组织在不同处理温度下的电解质渗透率,由 Logistic 方程 $Y = k/[1 + \exp(a +$

$bx)]$,经回归分析,并求该方程的二阶导数并令其为零,曲线拐点的 t 值(温度)即为个体的半致死温度^[4,9,12-13]。

3 结果和分析

3.1 邓恩桉个体的半致死温度

Lyons 的研究表明,植物在低温逆境中,细胞质膜透性会发生不同程度的变化,引起电解质大量外渗,导致组织无离子水浸提液电导率提高^[4]。低温胁迫在一定范围内,细胞质膜透性可以逆转,在解除胁迫后可恢复正常,但超过临界温度后,植物会死亡。根据这一特性,采用 Sukumaran 的方法^[13],由电导率结合 logistic 方程求得不同个体的半致死温度(表 2)。

表 2 不同无性系半致死温度

Table 2 The lethal temperature of different colons

序号 No.	半致死温度 Lethal temperature ($^{\circ}\text{C}$)	序号 No.	半致死温度 Lethal temperature ($^{\circ}\text{C}$)	序号 No.	半致死温度 Lethal temperature ($^{\circ}\text{C}$)
01	-8.5	06	-10.2	11	-10.3
02	-11.6	07	-9.7	12	-10.4
03	-11.6	08	-8.9	13	-9.6
04	-10.7	09	-11.2	14	-8.2
05	-10.8	10	-9.0	15	-11.0

3.2 模型建立与检验

用 Gumbel 分布拟合建阳市 1971 ~ 2005 年间极端低温分布模型。根据表 1 建立区域极端低温分布模型^[4,9-11]。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i = -147.1/35 = -4.20$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i/n)^2} = 1.8111$$

当 $n = 35$ 时,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i = \sum_i \left\{ -\ln[-\ln(\frac{i}{n+1})] \right\} / n = 0.5401$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i y_i^2 - (\sum_i y_i/n)^2} = 1.1286$$

$$\frac{1}{\hat{\alpha}} = 1.6047, \hat{\alpha} = 0.6231, \hat{\mu} = -5.0667$$

这样,可将函数式写为 $\phi(x) = 1 - \exp(-e^y)$;

$$y = 0.6231 \times (-x - 5.0667)$$

对于建阳市极端低温分布能否用上式的模型描述,用 K-C 检验法进行检验(表 3)。K-C 临界数

值是对 D_n 精确分布的检验,适用于小样本检验。从表 3 可见 $D_n = \max |F(x) - S_n(x)| = 0.016$, 当 $n = 35$, $\alpha = 0.05$ 时, $D_{0.05} = 0.224$, $D_n < D_{0.05}$, 因此,可以认为建阳市年极端低温分布服从 Gumbel 分布。

3.3 不同抗寒能力标准的确定

$$\text{当 } T = 5 \text{ 时, } y = -\ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})] = 1.5001$$

$$x = -(\frac{1}{\alpha}y - \mu) = -(1.6047y + 5.0667) = -7.47$$

从表 4 可以看出,5 年间隔期内建阳市可能出现的极端最低气温为 -7.47°C , 5 ~ 10 年间隔期内可能出现的极端最低气温为 -8.50°C 。由表 1 可知,建阳市极端低温在 -7.47°C 附近的发生概率较频繁,生长在该区域的植物经常要受该临界低温的胁迫,若植物仅能适宜该极端临界低温胁迫,说明其在该区域的抗寒适应能力较差,本研究把它确定为弱抗寒性;在 5 ~ 10 年区间可能出现的极端低温为 $-7.47 \sim -8.50^{\circ}\text{C}$, 大约每相隔 10 年发生 1 次,时间较长,频率较小,但低温强度加强,若植物能适宜

该低温区间生长,说明其抗寒适应能力较强,确定为一般抗寒适应性;预测 10 年或以上该区域可能出现的极端低温临界值为 -8.68°C ,仅几十年发生 1 次的小概率事件,在该临界低温下许多乡土树种也将遭受低温危害,属于不可预测的自然灾害,若植物能适宜此极端低温胁迫,说明其具有强的抗寒适应能力,确定为耐抗寒适应性^[4]。把 -7.47°C 、 -8.50°C 、 -8.68°C 作为定量划分抗寒适应能力的 3

个等级分界值,称为“抗寒性极端低温分布法”。从表 4 还可见,上述预测的临界温度为该区域气象站(海拔 196.9 m)观测点的预测临界值,在平原地带可适用;对于山区,不同垂直地带与气象站观测点存在温度差,依气象学原理,海拔上升 100 m 气温降低 $0.65\sim 0.70^{\circ}\text{C}$,不同海拔不同间隔期可能发生的临界低温也不同^[4,9]。

表 3 分布假设检验

Table 3 The distribution tentative test

T ($^{\circ}\text{C}$)	样本频数 Sample frequency	$S_n(x)$	y 值的上限 Up-value of y	$F(x)$	$ F(x)-S_n(x) $
$-\infty\sim -8$	1	0.0286	1.8277	0.0020	0.0266
$-8\sim -7$	2	0.0857	1.2046	0.0356	0.0501
$-7\sim -6$	2	0.1428	0.5815	0.1672	0.0244
$-6\sim -5$	6	0.3143	-0.0416	0.3832	0.0689
$-5\sim -4$	7	0.5143	-0.6647	0.5979	0.0836
$-4\sim -3$	8	0.7429	-1.2878	0.7589	0.016
$-3\sim -2$	3	0.8286	-1.9109	0.8625	0.0339
$-2\sim +\infty$	6	1.000	-2.5340	0.9238	0.0762

表 4 5~10 年间可能出现的极端最低气温($^{\circ}\text{C}$)

Table 4 The propable lowest temperature within 5~10 years at the different elevation

海拔 Altitude (m)	预测年限 Forecast years					
	5	6	7	8	9	10
196.9(气象站 Weather station)	-7.47	-7.80	-8.07	-8.30	-8.50	-8.68
600	-10.1	-10.42	-10.69	-10.92	-11.12	-11.3
800	-11.4	-11.7	-12.0	-12.22	-12.4	-12.6

3.4 抗寒适应性定量标准确定与抗寒优株复选

建阳市为山区,垂直落差大,在上限海拔 600 m 引种邓恩桉,推广栽植面积大,若能适宜上限海拔 800 m,则栽植风险已很小,故以海拔 600 和 800 m 作为研究上限。从表 4 可见,600 m 上限海拔的弱抗寒温度下限为 -10.1°C ;一般抗寒性的温度为 $-10.42\sim -11.1^{\circ}\text{C}$;强抗寒性温度下限为 -11.3°C ,而 800 m 上限海拔分别为 -11.4°C 、 $-11.7\sim -12.4^{\circ}\text{C}$ 和 -12.6°C 。以表 4 为基准,与表 2 的不同个体半致死温度进行比较,确定个体的抗寒适应性,结果表明,在 600 m 上限海拔,金山-02、金山-03 表现强抗寒适应性,金山-04、金山-05、金山-06、金山-09、金山-11、金山-12、金山-15 为一般抗寒适应性;而在 800 m 上限海拔,仅金山-02、金山-03 表现为一般抗寒性,其它属于弱抗寒适应性。可见,金山-02、金山-03 优良个体具有较好的抗寒适应能力。

4 讨论和结论

本文应用极端低温分布模型,预测研究区域在不同间隔年限可能出现低温,首次提出定量划定不同强度低温临界值,把区域出现的极端低温划分为 3 个等级。利用所研究树种的半致死温度,探讨植物在区域不同海拔低温临界温度下的抗寒适应能力。以植物适宜于 5 年间隔期可能发生的极端临界低温,确定为弱抗寒适应性;适宜于 5~10 年间隔期可能发生的极端临界低温,确定为一般抗寒适应性;适宜 10 年以上可能发生的极端临界低温,确定为强抗寒适应性。把间隔期上限临界温度值作为划分不同抗寒性的临界标准值,命名该方法为“抗寒性极端低温分布法”。该方法可定量判断不同抗寒个体在同一区域的抗寒适应性;同样也可定量判断不同树种在不同区域的抗寒适应性,把抗寒

适应性从定性研究上升到定量研究。

植物的抗寒性直接决定栽植范围,从而影响到不同物种的利用。物种的抗寒性研究有很大的应用价值,目前主要集中在植物的生理生化、抗寒机理与分子生物学等方面。随着现代技术的发展,在转基因抗寒与抗冻蛋白诱导等方面虽已取得较大进展,但还未能应用于生产实践,植物的抗寒能力仍然决定着物种分布,抗寒性转基因物种还有待于进一步研究^[1-3,5-8]。植物的半致死温度的研究主要用于了解其抗寒特性^[9,12-13]。区域低温的预测主要用于探讨极端低温对引种决策的可行性与农业生产预报^[4,9-11]。本文通过对区域不同间隔年限可能出现的低温进行预测,并对不同强度低温进行定量分级,结合树种个体抗寒性,探讨栽植树种与区域极端生态环境的适应性,即利用植物生物学特性与生态学习性进行定量探讨树种对环境的适应能力,本研究可定量衡量不同树种在不同区域的抗寒适应能力,适用于林木个体抗寒适应性筛选,对林木抗寒良种选育具有指导作用。

本研究应用极端低温分布数学模型与研究区域的多年极端低温记录建立了数学模型,并对不同优良个体的抗寒适应能力进行复选。结果表明,在该区域金山-02、金山-03在600 m上限海拔表现为强抗寒适应性,在800 m上限海拔表现为一般抗寒性,说明它们具有较好抗寒能力,在我国可能出现相近最低气温以南区域进一步推广种植,具有重要的实践意义^[4,12]。

参考文献

- [1] Lin S Z(林善枝), Zhang Z Y(张志毅). Advances in freezing-resistance of poplars [J]. Chin Bull Bot(植物学通报), 2001, 18(3): 318-324.(in Chinese)
- [2] Lin S Z(林善枝), Zhang Z Y(张志毅). Research on low-temperature-induced chilling- and freezing-tolerance of plants and strategies for improvement of *Populus tomentosa* freezing tolerance [J]. J Beijing For Univ(北京林业大学学报), 2000, 22(6): 89-94.(in Chinese)
- [3] Huang Y H(黄永红), Shen H B(沈洪波), Chen X S(陈学森). A preliminary study on cold resistant physiology of apricot [J]. J Shandong Agri Univ (Nat Sci)(山东农业大学学报:自然科学版), 2005, 36(2): 191-195.(in Chinese)
- [4] Guo X Q(郭祥泉), Hong W(洪伟), Wu C Z(吴承祯). Study on the selection and application of the cold-hardness and rapid-growth elite of *Eucalyptus dunnii* and the decision of appropriate cultivation [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forest University, 2009: 72-88.(in Chinese)
- [5] Lin Y Z(林元震), Zhang Z Y(张志毅), Liu C X(刘纯鑫), et al. *In silico* cloning and analyzing of *PsICE1* from *Populus suaveolens*, a freezing-resistant transcription factor [J]. Mol Plant Breed(分子植物育种), 2007, 5(3): 424-430.(in Chinese)
- [6] Lin S Z(林善枝), Zhang Z Y(张志毅), Lin Y Z(林元震). Antifreeze proteins and molecular genetic improvement in freezing resistance of plants [J]. J Plant Physic Mol Biol(植物生理与分子生物学报), 2004, 30(3): 251-260.(in Chinese)
- [7] Thomashow M F. Plant cold acclimation, freezing tolerance genes and regulatory mechanisms [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1999, 50: 571-599.
- [8] Chinnusamy V, Ohta M., Kanrar S, et al. ICE1: A regulator of cold-induced transcription and freezing tolerance in *Arabidopsis* [J]. Genes Dev, 2003, 17(8): 1043-1054.
- [9] Guo X Q(郭祥泉), Hong W(洪伟), Wu C Z(吴承祯), et al. Studies on the application of electrolyte leakage rate and the distribution of lowest temperature to introduction decision of *Eucalyptus* in the centre of Fujian Province [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2008, 16(4): 328-333.(in Chinese)
- [10] Brooks C E P, Carruthers M. Handbook of Statistical Method in Meteorology [M]. London: Her Majesty's Stationary Office, 1953: 132-156.
- [11] Gumbel E J. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Application [M]. New York: Columbia University Press, 1954: 156-162.
- [12] Guo XQ(郭祥泉), Hong W(洪伟), Wu C Z(吴承祯), et al. Application of "t" determination principle in selection of *Eucalyptus dunnii* elite trees with cold-resistant and rapid-growth genotypes in northern Fujian, China [J]. Chin J Appl Environ Biol(应用与环境生物学报), 2009, 15(3): 385-389.(in Chinese)
- [13] Sukumaran N P, Weiser C J. Method of determining cold hardness by electrical conductivity in potato [J]. Hort Sci, 1972(7): 467-468.
- [14] Lyons M. Chilling injury plants [J]. Ann Rev Plant, 1973, 24: 445-455.