白蜡新品种抗寒生理指标变化及综合评价*

周 健[1] 王 霞[1] 李伟波[2] 杨庆山[1]
魏海霞[1] 王莉莉[1] 王建利[3] 李永涛[1]
（1. 山东省林业科学研究院，山东 济南 250014；2. 新泰市林业局，山东 新泰 271200；
3. 寿光国有机械林场，山东 寿光 262700）

摘要 以 6 个白蜡（*Fraxinus* spp.）新品种的 3 a 生枝条为试材，采用人工模拟低温环境的方法，对其低温胁迫下各品种的相对电导率、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）活性及可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛（MDA）含量进行了测定，同时以白蜡枝条各项生理指标作为衡量抗寒性的指标，利用主成分分析、隶属函数和聚类分析对白蜡各品种的抗寒性进行综合评价，旨在研究新选育白蜡新品种的抗寒适应性。结果表明：不同低温胁迫下，相对电导率呈上升趋势，拟合 Logistic 方程得出 6 个白蜡品种的 LT_{50}；各生理指标间表现出不同的变化趋势，其中 SOD 活性、可溶性蛋白、脯氨酸和 MDA 呈现出低 – 高 – 低的单峰曲线，而 POD 活性和可溶性糖含量总体上呈上升趋势。根据抗寒能力（D 值）大小对 6 个白蜡新品种的抗寒性进行综合排序为：鲁蜡 2 号（*Fraxinus velutina* 'Lula Erhao'）> 鲁蜡 1 号（*F. velutina* 'Lula Yihao'）> 鲁蜡 5 号（*F. pennsylvanica* 'Lula Wuhao'）> 鲁蜡 4 号（*F. velutina* 'Lula Sihao'）> 鲁蜡 3 号（*F. velutina* 'Lula Sanhao'）> 鲁蜡 6 号（ *F. pennsylvanica* 'Lula Liuhao'）。

关键词 低温胁迫；白蜡新品种；抗寒性指标；综合评价
中国分类号：S718.43 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-2053(2018)02-0025-07

Physiological Indices of Cold Resistance on New Variety of *Fraxinus* and Its Comprehensive Evaluation

ZHOU Jian[1] WANG Xia[1] LI Weibo[2] YANG Qingshan[1]
WEI Haixia[1] WANG Lili[1] WANG Jianli[3] LI Yongtao[1]
(1. Shandong Academy of Forestry Sciences，Jinan，Shandong 250014,China; 2. Forestry Department of Xintai，Xintai，Shandong 271200,China; 3. Shouguang State-Owned Mechanized Tree Farm，Shouguang, Shandong 262700,China）

Abstract Three-year-old branches of six new variety of *Fraxinus* were used as materials and were controlled in the artificial cryogenic environment. The activity of relative electrical conductivity, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and the content of soluble sugar, soluble protein, proline and malondialdehyde (MDA) were measured, and these physiological indices of branches were used as measurement indices of cold resistance. Principal component analysis, membership function and cluster analysis were applied to evaluating the cold resistance of new species of *Fraxinus*. Results showed that under different cold stresses, the relative electrical conductivity showed a trend of rising, and the LT_{50} of six variety of *Fraxinus* were calculated

* **基金项目**：山东省重点研发计划“耐盐植物对滨海盐碱地改良效应评价体系研究”（2017GNC11113）；山东省重大科技创新工程“黄河三角洲盐碱地林业生态功能提升关键技术研究”(2017CXGC0314)。
第一作者：周健（1982– ），女，工程师，主要从事盐碱地改良、抗逆植物育种等方面的研究，E-mail：zhoujian0533@126.com。
通信作者：李永涛（1984– ），男，工程师，主要从事盐碱地改良、抗逆植物育种等方面的研究，E-mail：llyldx@163.com。

by Logistics; The physiological indices showed different trends, the activity of SOD, soluble protein, proline and MDA showed a low-high-low single-peak curve, but the activity of POD and content of soluble sugar showed a trend of rising as a whole. According to the cold hardiness (D), the comprehensive sequence of cold resistance of six new variety of *Fraxinus* was: Lula Erhao > Lula Yihao > Lula Wuhao > Lula Sihao > Lula Sanhao > Lula Liuhao.

Key words low temperature stress; new variety of *Fraxinus*; cold resistance; comprehensive evaluation

白蜡（*Fraxinus* spp.）系木犀科（Oleaceae）白蜡属树种的总称，由于抗逆性强、耐盐碱、绿化效果好而被广泛栽植，具有较高的生态经济价值[1-3]。随着林业生态的发展和社会需求的提高，研究抗寒性强、适应性广的白蜡品种显得尤为重要。而目前随着白蜡新选育品种的利用与推广，在我国东北、西北等高寒地区的种植面积也日益扩大，但因品种选择利用不当，时常发生冻害现象。

低温是最主要的非生物胁迫因子之一，它限制了许多野生植物和作物的地理分布，降低了生产率，甚至导致植物死亡[4]。而在低温胁迫下，植物的组织形态和生理过程会发生一系列变化，细胞膜透性增大[5]、保护酶活性升高[6-7]、渗透调节物质积累[8-9]、膜脂过氧化产物丙二醛含量升高[10]，以提高对寒害的耐受能力。目前有关白蜡品种（系）抗逆性和繁殖技术方面的研究较多[11-13]，抗寒性研究相对较少。刘晓芳等[14]以新疆地区种植的紫叶白蜡（*Fraxinus autumn*）为研究对象，通过低温处理测定电导率，并拟合Logistic曲线方程求出该树种的半致死温度为–38.9℃。常越霞等[8]以金叶白蜡（*Fraxinus chinensis* 'Jinguan'）的1 a生休眠枝条为试材，对其低温胁迫下的5个生理生化指标进行了测定。而本研究以自主选育的6个白蜡新品种为试材，对人工模拟低温胁迫条件下各品种的抗寒性理化指标进行了测定，同时结合主成分分析法和隶属函数法，对6个白蜡品种抗寒性进行了综合评价，以期为不同白蜡品种在生产中的推广和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择山东省林业科学研究院选育的6个白蜡新品种，分别为鲁蜡1号（*Fraxinus velutina* 'Lula Yihao'）、鲁蜡2号（*F. velutina* 'Lula Erhao'）、鲁蜡3号（*F. velutina* 'Lula Sanhao'）、鲁蜡4号（*F. velutina* 'Lula Sihao'）、鲁蜡5号（*F. pennsylvanica* 'Lula Wuhao'）、鲁蜡6号（*F. pennsylvanica* 'Lula Liuhao'），供试材料的3 a嫁接苗均保存于山东省林业科学研究院国家白蜡良种基地内，该基地位于渤海湾西南岸、寿光市北部（37°9′N，118°40′E），属暖温带大陆性季风气候。年平均气温为12.2 ℃，极端最低气温平均为–21.4 ℃，无霜期211 d。年平均降水量601 mm，其中降水主要集中在7—8月份，占全年降水的60%左右，年蒸发量1 900 mm，是降水量的3.2倍。该地为典型的滨海盐碱地，试验地土壤盐分以氯化钠为主，土壤类型为盐化潮土。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集 2016年12月20日取样，每个品种按照对角线取样法[15]，选择5个样点，各品种每个样点选取生长健壮，长势均一的苗木单株3株，每株选择长势良好、木质化程度一致的1 a生休眠枝条10条，剪成15~20 cm左右的小段，将采集的枝条剪口蜡封，置于0 ℃条件下储存备用。

1.2.2 低温胁迫处理 将供试材料用自来水和蒸馏水多次冲洗后，用滤纸吸干，分6组置于超低温冰箱中低温胁迫处理。降温梯度分别设为–10，–20，–25，–30，–35 ℃共5个处理，3次重复，以0 ℃为对照。降温速度为4 ℃·h^{-1}，冷冻处理24 h，然后以同样的速度升温至0 ℃后进行相关指标测定，每个指标平行测定3次。

1.2.3 测定方法 相对电导率采用电导法测定；超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑光化还原法[16]；过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法[16]；可溶性糖含量的测定采用蒽酮乙酸乙酯法[16]；可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法[16]；脯氨酸的测定采用茚三酮比色法[15]；丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法测定[16]。

利用相对电导率拟合 logistic 方程计算半致死温度 [17]，同时计算各综合指标的隶属函数值 [18]、权重及综合抗寒能力 [19]。计算公式如下：

Logistic 方程：

$$Y = K/(1+ae^{-bx}) \cdots\cdots (1)$$

隶属函数值：

$$u(x_j) = (x_j - x_{min})/(x_{max} - x_{min}) \cdots\cdots (2)$$

权重：

$$w_j = p/\sum_{j=1}^{n} p_j \cdots\cdots (3)$$

综合抗寒能力：

$$D = \sum_{j=1}^{n} [u(x_j)w_j] \ (j = 1,2\cdots\cdots n) \cdots\cdots (4)$$

其中公式（1）中 Y 代表相对电导率；x 代表处理温度，K 为相对电导率饱和值 (令 K=1)，a、b 为方程参数；公式（2）中 x_j 表示第 j 个综合指标；x_{min} 表示第 j 个综合指标的最小值；x_{max} 表示第 j 个综合指标的最大值；公式（3）中 j = 1，2……n，w_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的权重，p_j 为各品种第 j 个综合指标的贡献率；公式 (4) 中 D 值为各品种在低温胁迫条件下用综合指标计算所得的抗寒性综合评价值。

1.3　数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理，数据用均值 ± 标准误 (Mean ± Se) 表示。采用 DPS15.0 软件进行主成分分析和聚类分析。

2　结果与分析

2.1　白蜡新品种相对电导率及半致死温度的确定

低温胁迫下，白蜡不同新品种相对电导率的变化趋势基本相同，均随温度的降低而逐步升高 (表 1)。当胁迫温度在 –20 ℃前，相对电导率增加缓慢，而胁迫温度在 – 20~–30 ℃时，各品种相对电导率增加明显。以相对电导率和温度拟合 Logistic 方程，得出白蜡各新品种的半致死温度 (表 1)，半致死温度拟合曲线方程的相关系数均在 0.900 以上，且拟合度都呈极显著水平，各白蜡新品种半致死温度在 –30~–40 ℃之间，6 个供试品种相对抗寒性的排序为鲁蜡 2 号＞鲁蜡 3 号＞鲁蜡 5 号＞鲁蜡 1 号＞鲁蜡 4 号＞鲁蜡 6 号。

2.2　低温胁迫下白蜡新品种生理生化指标的变化

经低温胁迫后，白蜡各新品种枝条各生理指标间表现出不同的变化趋势（表 2)。其中 SOD 活性、可溶性蛋白、脯氨酸和 MDA 均呈现低 – 高 – 低的单峰曲线，而 POD 活性和可溶性糖含量总体上呈上升趋势。

从各个指标看，低温胁迫下 SOD 活性的变化幅度较大，并在 –30°C 时达到最大值，其中鲁蜡 3 号变化幅度最大，为对照的 10.46 倍，鲁蜡 2 号变化幅度最小，为对照的 3.51 倍。此后，随温度的持续降低，酶活性开始降低；POD 活性与可溶性糖含量的变化趋势一致，均在 –25 ℃或 –30 ℃左右迅速积累，在 –35 ℃时达到最大值，其中 POD

表 1 白蜡各新品种的半致死温度 (LT_{50})

Tab.1 The semilethal temperatures (LT_{50}) of different new variety of *Fraxinus*

品种 Variety	电解质渗出率 Electrolyte leakage/%						回归方程 Logistic equation $Y=K/(1+ae^{-bx})$	拟合度 Fitness(R^2)	LT_{50} /℃
	0 ℃	–10 ℃	–20 ℃	–25 ℃	–30 ℃	–35 ℃			
鲁蜡 1 号 Lula Yihao	21.28 ± 1.84	29.69 ± 2.37	38.61 ± 2.01	40.59 ± 1.47	47.50 ± 3.32	49.64 ± 2.97	$Y=1/(1+3.549e^{-0.037x})$	0.988**	–34.00
鲁蜡 2 号 Lula Erhao	25.91 ± 2.03	32.08 ± 2.06	34.80 ± 2.77	36.79 ± 2.84	44.74 ± 2.70	49.53 ± 3.45	$Y=1/(1+2.957e^{-0.028x})$	0.928**	–39.36
鲁蜡 3 号 Lula Sanhao	29.04 ± 1.56	34.09 ± 2.75	39.00 ± 1.09	41.71 ± 2.90	45.74 ± 2.91	49.76 ± 3.98	$Y=1/(1+2.489e^{-0.025x})$	0.991**	–37.02
鲁蜡 4 号 Lula Sihao	26.07 ± 2.18	26.68 ± 1.08	38.96 ± 1.33	43.56 ± 3.03	49.44 ± 3.17	51.83 ± 4.02	$Y=1/(1+3.223e^{-0.036x})$	0.958**	–32.58
鲁蜡 5 号 Lula Wuhao	27.16 ± 2.30	29.43 ± 2.52	39.14 ± 0.97	42.47 ± 3.27	47.30 ± 2.46	50.39 ± 2.82	$Y=1/(1+2.489e^{-0.025x})$	0.979**	–34.64
鲁蜡 6 号 Lula Liuhao	25.23 ± 1.17	32.03 ± 2.46	34.14 ± 2.05	46.44 ± 2.81	50.17 ± 3.72	51.19 ± 3.14	$Y=1/(1+3.067e^{-0.035x})$	0.927**	–32.49

注 : 表中数据为均值 ± 标准误；* 和 ** 分别表示拟合度达显著和极显著水平。

Note: The data were mean ± SE；* and** indicate the significant difference of R^2 at 0.05 and 0.01 level.

表2 低温胁迫下白蜡新品种的生理指标影响

Tab.2 Effect of low temperature stress on physiological and biochemical indexes on new variety of *Fraxinus*

品种 Variety	处理 Treatment/℃	SOD /（U · g^{-1}）	POD /（△ OD_{470} min^{-1} · g^{-1}）	可溶性糖 Soluble sugar/%	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg · g^{-1})	脯氨酸 Proline /(μg · g^{-1})	MDA /(μmol · g^{-1})
鲁蜡1号 Lula Yihao	0（CK_1）	251.06 ± 12.17	16.42 ± 1.03	9.05 ± 0.87	5.30 ± 0.49	18.94 ± 2.27	1.31 ± 0.17
	−10	495.72 ± 18.04	17.58 ± 1.94	10.41 ± 1.02	8.09 ± 0.97	24.35 ± 2.39	1.47 ± 0.29
	−20	898.10 ± 25.55	31.08 ± 3.02	12.58 ± 1.21	23.55 ± 1.72	30.27 ± 2.08	1.96 ± 0.18
	−25	1271.01 ± 42.39	34.75 ± 2.87	14.96 ± 0.98	13.79 ± 1.13	35.43 ± 3.40	2.13 ± 0.74
	−30	1527.86 ± 37.09	40.25 ± 4.04	20.16 ± 2.04	6.37 ± 0.94	46.31 ± 3.92	2.43 ± 0.41
	−35	908.71 ± 30.13	44.58 ± 4.88	22.16 ± 2.12	4.63 ± 0.77	38.79 ± 3.11	1.90 ± 0.20
鲁蜡2号 Lula Erhao	0（CK_2）	425.50 ± 20.01	16.58 ± 1.49	10.79 ± 099	9.42 ± 1.14	7.18 ± 0.87	2.10 ± 0.49
	−10	572.60 ± 19.56	17.42 ± 2.02	13.36 ± 1.44	9.85 ± 0.91	28.49 ± 2.02	2.47 ± 0.35
	−20	1098.28 ± 37.09	23.08 ± 1.75	14.06 ± 2.03	13.00 ± 1.83	35.34 ± 2.11	3.08 ± 0.74
	−25	1298.78 ± 40.22	29.75 ± 2.10	16.13 ± 1.96	14.89 ± 1.47	42.11 ± 3.24	3.43 ± 0.46
	−30	1494.07 ± 48.54	52.42 ± 5.17	17.25 ± 2.07	10.00 ± 1.06	49.73 ± 3.03	3.44 ± 0.31
	−35	540.57 ± 20.07	56.42 ± 5.04	23.49 ± 2.93	6.15 ± 0.77	34.57 ± 2.77	1.99 ± 0.29
鲁蜡3号 Lula Sanhao	0（CK_3）	138.84 ± 9.44	9.08 ± 0.83	5.80 ± 0.47	9.42 ± 1.02	8.90 ± 1.06	0.63 ± 0.03
	−10	276.10 ± 8.71	18.68 ± 1.59	8.74 ± 1.05	8.85 ± 1.09	21.54 ± 2.26	0.85 ± 0.06
	−20	819.85 ± 22.83	25.92 ± 2.04	10.97 ± 0.92	10.00 ± 1.33	25.65 ± 2.19	0.86 ± 0.03
	−25	1057.31 ± 43.92	29.75 ± 1.88	12.00 ± 1.38	10.28 ± 0.96	31.33 ± 3.03	0.97 ± 0.09
	−30	1452.94 ± 45.09	30.42 ± 2.39	14.59 ± 1.77	10.26 ± 1.44	34.07 ± 3.00	1.84 ± 0.33
	−35	801.97 ± 28.77	35.75 ± 3.44	16.30 ± 2.11	6.37 ± 0.73	30.36 ± 2.89	1.80 ± 0.21
鲁蜡4号 Lula Sihao	0（CK_4）	202.83 ± 11.03	8.52 ± 0.77	7.21 ± 0.83	7.44 ± 0.91	16.86 ± 1.44	0.67 ± 0.06
	−10	400.16 ± 15.14	9.25 ± 1.01	10.73 ± 1.30	8.92 ± 0.87	19.50 ± 1.72	1.04 ± 0.08
	−20	812.92 ± 27.39	19.75 ± 1.74	11.72 ± 2.01	10.93 ± 1.14	34.17 ± 3.05	1.30 ± 0.10
	−25	951.87 ± 38.07	22.08 ± 2.20	13.28 ± 1.84	15.08 ± 1.30	39.25 ± 2.97	1.54 ± 0.21
	−30	1305.57 ± 42.28	42.92 ± 4.03	13.49 ± 1.41	8.06 ± 0.88	46.55 ± 3.45	1.91 ± 0.19
	−35	938.74 ± 36.73	43.15 ± 3.85	18.11 ± 1.75	6.63 ± 0.90	31.27 ± 2.08	1.19 ± 0.17
鲁蜡5号 Lula Wuhao	0（CK_5）	227.95 ± 10.30	15.42 ± 1.57	8.62 ± 1.04	5.08 ± 0.90	17.06 ± 1.55	1.06 ± 0.09
	−10	473.93 ± 12.63	23.41 ± 2.08	10.36 ± 097	8.95 ± 0.71	18.94 ± 2.02	1.09 ± 0.11
	−20	876.10 ± 21.07	42.75 ± 4.11	13.55 ± 1.71	12.45 ± 1.22	35.01 ± 3.11	1.19 ± 0.20
	−25	1199.90 ± 33.05	52.42 ± 3.92	14.23 ± 2.14	19.16 ± 1.49	38.83 ± 3.80	1.43 ± 0.24
	−30	1288.75 ± 30.59	68.58 ± 5.44	14.93 ± 1.08	6.63 ± 0.89	44.93 ± 2.91	1.67 ± 0.37
	−35	1090.36 ± 37.20	69.08 ± 6.29	15.26 ± 1.40	4.99 ± 0.70	38.81 ± 2.49	1.76 ± 0.29
鲁蜡6号 Lula Liuhao	0（CK_6）	220.48 ± 10.02	13.58 ± 1.72	8.29 ± 0.88	5.08 ± 0.47	10.18 ± 1.07	0.70 ± 0.05
	−10	332.50 ± 14.39	17.92 ± 1.32	9.01 ± 0.93	5.25 ± 0.93	13.16 ± 1.18	0.77 ± 0.08
	−20	480.27 ± 18.07	19.75 ± 2.08	9.88 ± 1.17	9.19 ± 1.07	22.88 ± 1.76	1.08 ± 0.13
	−25	1013.65 ± 31.10	24.25 ± 2.67	11.04 ± 1.37	9.71 ± 0.86	30.48 ± 2.13	1.11 ± 0.12
	−30	1453.56 ± 40.27	40.92 ± 4.73	14.41 ± 1.22	14.77 ± 1.21	37.07 ± 3.20	1.33 ± 0.15
	−35	498.82 ± 14.55	43.90 ± 6.11	14.52 ± 1.50	5.96 ± 0.73	29.24 ± 2.87	1.19 ± 0.17

注：表中数据为均值 ± 标准误。Note:The data were mean ± SE.

活性最大的为鲁蜡 5 号，为 69.08 $min^{-1} \cdot g^{-1}$，最小的为鲁蜡 3 号，为 35.75 $min^{-1} \cdot g^{-1}$；可溶性蛋白含量在 –25 或 –30 ℃左右达到最大值，此后随着温度降低，可溶性蛋白含量开始快速下降，而当胁迫温度在 –35 ℃时，除鲁蜡 6 号外，其它白蜡品种可溶性蛋白含量均略低于 0 ℃对照；脯氨酸与 MDA 含量均呈先升高后降低的规律性变化，且均在 –30 ℃左右达到最大值，而在 –35 ℃时略有降低。低温胁迫下，白蜡各新品种的 6 个生理指标均出现不同程度的提高或降低，说明不同白蜡品种对低温的抵抗能力存在差异。

2.3　白蜡新品种抗寒生理指标的主成分分析

对白蜡 6 个新品种枝条的相对电导率（X_1）、SOD 活性（X_2）、POD 活性（X_3）、可溶性糖（X_4）、可溶性蛋白（X_5）、脯氨酸（X_6）和 MDA（X_7）含量 7 项抗寒生理指标进行主成分分析（表 3），前 3 项综合指标的贡献率分别为 62.537%、17.644%、9.803%，累积贡献率为 89.984 %。理论上，当各主成分累积贡献率 >85% 时，即可反映系统的变异信息的条件。由表 4 可以看出，对第一主成分影响较大的有相对电导率、SOD、POD、可溶性糖、脯氨酸和 MDA，在评价抗寒特性中占有主要地位。第二主成分中，占有较大载荷指标的为可溶性蛋白。在第三主成分上具有较高的载荷指标的为 MDA，这说明 3 个综合指标基本上涵盖了 7 项抗寒生理指标的全部信息，因此可选取这 3 个综合指标对白蜡新品种的抗寒性进行综合分析。

2.4　白蜡新品种抗寒性综合评价

2.4.1　*隶属函数值和权重的确定*　根据公式（2），采用隶属度函数综合各项指标求出隶属度值 (表 4)。同时，根据 3 个主成分贡献率的大小（62.537%、17.644%、9.803%），利用公式（3）求得 3 个综合指标的权重分别为 0.695、0.196 和 0.109 (表 5)。

2.4.2　*综合评价*　根据公式（4）计算白蜡各品种的综合抗寒能力 *D* 值，从表 5 中可以看出，鲁蜡 2 号最高（0.934），鲁蜡 6 号最低（0.013），这表明鲁蜡 2 号的综合抗寒性最强，鲁蜡 6 号相对较弱。根据抗寒能力（*D* 值）大小对 6 个白蜡新品种的抗寒性进行综合排序为：鲁蜡 2 号、鲁蜡 1 号、鲁蜡 5 号、鲁蜡 4 号、鲁蜡 3 号和鲁蜡 6 号。

采用最大距离法对 6 个白蜡品种抗寒能力（*D* 值）进行聚类分析（图 1），将 6 个白蜡新品种划

表 3 白蜡新品种抗寒性指标的主成分特征值

Tab.3 Principal component eigenvalues of new variety of *Fraxinus*

主成分 Component	特征向量 Characteristic vector		
	特征根 Eigenvalue	贡献率 Variance /%	累积贡献率 Cumulative rate /%
1	4.378	62.537	62.537
2	1.235	17.644	80.181
3	0.686	9.803	89.984

表 4 白蜡新品种抗寒性指标的标准化特征向量值

Tab.4 Characteristic vector of cold resistance physiological indexes on new variety of *Fraxinus*

项目 Item	第一主成分 Prin1	载荷 Loading	第二主成分 Prin2	载荷 Loading	第三主成分 Prin3	载荷 Loading
X_1	0.409	0.855	–0.286	–0.318	0.342	0.283
X_2	0.426	0.892	0.219	0.244	0.141	0.117
X_3	0.402	0.842	–0.281	–0.312	0.213	0.177
X_4	0.416	0.870	–0.209	–0.233	–0.258	–0.213
X_5	0.107	0.224	0.797	0.886	0.400	0.331
X_6	0.451	0.944	0.077	0.085	0.051	0.042
X_7	0.319	0.667	0.325	0.362	–0.767	–0.636

表5 白腊各品种的权重、$u(x_j)$、D 值及综合评价

Tab. 5 The value of each variety index weight, $u(x_j)$,value D, and comprehensive valuation

品种 Variety	$u(x_1)$	$u(x_2)$	$u(x_3)$	D	排序 Sequence
鲁蜡1号 Lula Yihao	0.776	0.946	0.309	0.759	2
鲁蜡2号 Lula Erhao	1.000	1.000	0.397	0.934	1
鲁蜡3号 'Lula Sanhao	0.010	0.383	0.031	0.085	5
鲁蜡4号 Lula Sihao	0.183	0.428	0.000	0.211	4
鲁蜡5号 'Lula Wuhao	0.223	0.809	1.000	0.422	3
鲁蜡6号 'Lula Liuhao	0.000	0.000	0.116	0.013	6
权重 Index weight	0.695	0.196	0.109		

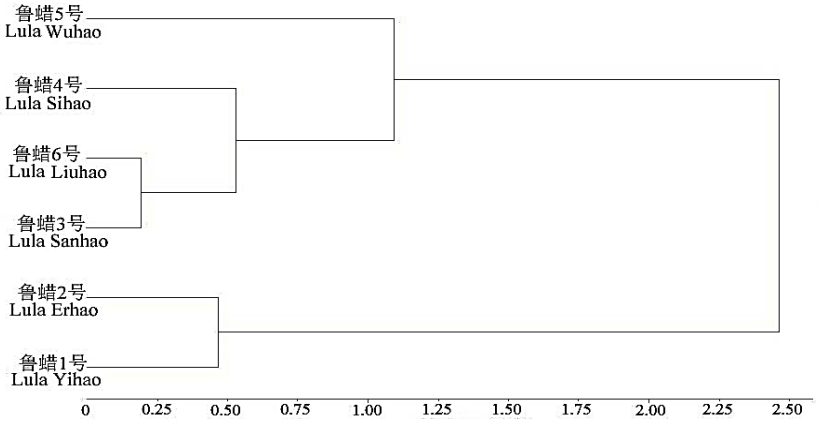

图1 白蜡各新品种D值聚类分析图

Fig. 1 Clustering chart on value D of new *Fraxinus* varieties

分为3类，其中鲁蜡2号、鲁蜡1号聚为一类，抗寒性相对最强；鲁蜡5号单独为一类，抗寒性中等；鲁蜡4号、鲁蜡3号、鲁蜡6号聚为一类抗寒性相对较弱。

3 结论与讨论

半致死温度是目前广泛用于植物抗寒性强弱评价的一个重要指标[20]。本研究表明，经低温胁迫后，白蜡各新品种相对电导率均呈逐渐升高的趋势，但变化幅度各有不同。配合logistic方程得到各新品种半致死温度在–30~–40 ℃之间，表明半致死温度下细胞膜系统破坏，电导率增加，各品种间抗寒性存在一定差异，这与常越霞等[8]、刘晓芳等[14]人的研究结果相一致。

抗寒性被认为是植物自身生理生化综合作用的遗传表现，植物对于低温综合适应能力的判断往往需要多种指标的结合[21]。本研究表明，低温胁迫下各新品种SOD活性、可溶性蛋白、脯氨酸和MDA均表现出先升高后降低的趋势。这与李萍萍等[6]、李艰等[22]人在海棠（*Malus spectabilis*）、竹柳（*Salix* sp.）树上的研究结果相似。当低温胁迫温度在0~–30 ℃时，4个指标持续升高，–30 ℃以后开始下降。这表明，在低温胁迫下白蜡各新品种可通过增加体内的酶活性和渗透物质含量来提高其抗寒适应性，而当胁迫温度超出其所能承受的范围，酶活性和部分渗透物质开始快速降低，体内细胞组织受到破坏[23]。同时，本研究中POD活性和可溶性糖含量总体上呈上升趋势。这表明

0~–35 ℃的低温胁迫环境未对白蜡细胞组织造成伤害，并对逆境胁迫具有一定的防御作用，说明白蜡各新品种对低温胁迫产生了一定的抗性。这与王娜等 [24] 人在 4 种阔叶树种上研究结果较为一致。

抗寒性是多基因控制或多因素相互作用的结果，采用多指标综合评价才较为可靠 [25]。

而本研究选择低温胁迫条件下与抗寒性密切相关的 7 项指标，利用主成分分析和聚类分析对其抗寒性进行了综合评价得出，鲁蜡 2 号和鲁蜡 1 号抗寒能力最强，鲁蜡 5 号抗寒性中等，鲁蜡 4 号、鲁蜡 3 号、鲁蜡 6 号抗寒性相对较弱。同时本研究发现，通过主成分分析和隶属函数法综合评价白蜡新品种抗寒性的结果与低温半致死温度反映的结果并不完全一致。说明仅采用电导率拟合 Logistic 方程这单一指标来评价抗寒性具有一定的片面性，需采用多个指标并同时根据各自贡献率的大小进行综合评价才能准确反映其抗逆性。

由于条件和时间的限制，本研究仅对 6 个白蜡品种 3 a 生幼苗进行了人工低温模拟下的抗寒性初步研究，未必能够全面反映出个别品种在自然生长环境下的抗寒性，尚需以后在引种区结合田间观察，为全面评价其抗寒能力提供可靠的依据。

参考文献

[1] 张美珍, 邱莲卿.中国植物志: 第61卷[M].北京: 科学出版社, 1992: 38.

[2] 刘恩贺.盐碱区园林绿化的好树种——绒毛白蜡[J].国土绿化, 1997(6): 45.

[3] 王性炎, 杜香莉.我国经济林产品的发展现状及开发利用对策[J].林业科学研究, 1997, 10(2): 199-205.

[4] 乌凤章, 王贺新, 徐国辉, 等.木本植物低温胁迫生理及分子机制研究进展[J].林业科学, 2015, 51(7): 116-128.

[5] 郭亚男, 李仕裕, 木楠, 等. 4种珍稀濒危植物的半致死温度研究[J].林业与环境科学, 2016, 32(6): 20-24.

[6] 李萍萍, 李菡, 杨克强, 等.观赏海棠抗寒品种(系)的选择研究[J].山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 211-219.

[7] 黄华蓉, 冼丽铧, 柯碧英, 等.5个南洋楹种源的抗寒性初步研究[J].广东林业科技, 2012, 28(6): 51-57.

[8] 常越霞, 路斌, 郭智涛, 等.低温胁迫对金叶白蜡5个生理生化指标的影响[J].河北林果研究, 2013, 28(4): 373-377.

[9] 杨凤翔, 金芳, 颜霞, 等.不同草莓品种抗寒性综合评价[J].果树学报, 2010, 27 (3): 368-372.

[10] 杨春祥, 李宪利, 高东升, 等.低温胁迫对油桃花器官膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J].果树学报, 2005, 22(1): 69-71.

[11] 刘桂民, 尹国良, 王振猛, 等.白蜡优良无性系的抗逆性能评价[J].中国农学通报, 2012, 28(28): 34-38.

[12] 杜振宇, 董海凤, 井大炜, 等.黄河三角洲长期人工林地对土壤有机碳库的影响[J].水土保持通报, 2016, 36(5): 56-61.

[13] 孔冬梅, 谭燕双, 沈海龙.白蜡树属植物的组织培养和植株再生[J].植物生理学通讯, 2003, 39(6): 677-680.

[14] 刘晓芳, 李萍, 帕提古丽.紫叶白蜡抗寒性研究[J].防护林科技, 2008, 86(5): 1-5.

[15] 李合生.植物生理生化原理和技术[M].北京: 高等教育出版社, 2000.

[16] 陈建勋, 王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州: 华南理工大学出版社, 2002.

[17] 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁.应用Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究[J].南京农业大学学报, 1986(3): 11-16.

[18] 白志英, 李存东, 孙红春, 等.小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J].中国农业科学, 2008, 41 (12): 4264-4272.

[19] 王树刚, 王振林, 王平, 等.不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J].生态学报, 2011, 31(4): 1064-1072.

[20] 张绿萍, 蔡永强, 金吉林, 等.莲雾不同种的低温半致死温度及抗冷适应性[J].果树学报, 2012, 29(2): 291-295.

[21] 李轶冰, 杨顺强, 任广鑫, 等.低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J].生态学报, 2009, 29(3): 1341-1347.

[22] 李艰, 周广柱.低温胁迫下3 种竹柳品系的抗寒性[J].江苏农业科学, 2016, 44(6): 307-310.

[23] 沈洪波, 陈学森, 张艳敏.果树抗寒性的遗传与育种研究进展[J].果树学报, 2002, 19(5): 292-297.

[24] 王娜, 王奎玲, 刘庆华, 等.四种常绿阔叶树种的抗寒性[J].应用生态学报, 2016, 27(10): 3114-3122.

[25] 柳新红, 何小勇, 苏冬梅, 等.翅荚木种源抗寒性综合评价体系的构建与应用[J].林业科学, 2007, 43(10): 45-50.