

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 06. 006

低温胁迫对大果榉枝条抗寒性的影响*

陈博¹, 石进朝¹, 李迎春²

(1. 北京农业职业学院 园艺系, 北京 102442; 2. 黄堡苗圃, 北京 102604)

摘要: 为掌握北京地区引种栽培大果榉的抗寒特性, 以垂枝榆为对照, 6年生大果榉为试材, 选取其一年生休眠枝条分别在5℃(CK)、-10℃、-15℃、-20℃、-25℃、-30℃和-35℃下进行低温处理, 测定枝条的相对电导率, 应用 Logistic 方程拟合半致死温度(LT₅₀); 并测定其枝条的丙二醛(MDA)和可溶性糖的含量, 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性, 枝条恢复生长后的萌芽率, 研究低温胁迫下大果榉休眠枝条的抗寒性。结果表明: 随温度降低, 相对电导率整体呈上升趋势; MDA、可溶性糖的含量以及 POD 和 CAT 酶活性均呈现先上升后下降的趋势; 恢复生长率鉴定植物抗寒能力的方法易受到植物扦插成活难易程度的影响; 相关性最高的抗寒指标是相对电导率, 其次是 MDA 和可溶性糖。大果榉和垂枝榆的 LT₅₀ 分别为-33.11℃和-29.83℃, 大果榉的抗寒性高于垂枝榆。

关键词: 大果榉; 垂枝榆; 低温胁迫; 抗寒性

中图分类号: S 792.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2019) 06-0035-06

Cold Resistance of *Zelkova sinica* under Low Temperature Stress

CHEN Bo¹, SHI Jin-chao¹, LI Ying-chun²

(1. Department of Horticulture, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 102442, P. R. China;

2. Huangfa Nursery, Beijing 102604, P. R. China)

Abstract: This paper represents results from a focused test by co-authors for fully understanding the *Zelkova sinica*'s cold resistance properties and inform decision-making regarding introduction of the species for cultivation in Beijing. In the test, a number of one-year-old dormant branches of the *Z. sinica* species and *Ulmus pumila* cv. species (as a frame of reference) were collected for testing under artificial low temperatures (i. e. ,5℃, -10℃, -15℃, -20℃, -25℃, -30℃ and -35℃ respectively), where relative electrical conductivity of the branches and the species' fitting semi-lethal temperatures (LT₅₀) from logistic equation were determined. Also determined in the process were concentrations of malondialdehyde (MDA) and soluble sugar, activity of peroxidase (POD) and catalase (CAT), as well as the species' in-season germination rate. The test in question indicates that the relative electrical conductivity of the *Z. sinica* species increases in general for all time with the decrease of temperature, while the concentrations of MDA and soluble sugar, and the activity of POD and CAT show an increase-and-decrease trend under the same circumstances; Techniques for identifying the plant's levels of resistance to cold are prone to be affected by levels of difficulty involved in the cutting and planting process; Most relevant indicators for the plant's resistance to cold temperatures are relative electrical conductivity and concentrations of MDA and soluble sugar; The *Z. sinica* plant's resistance to cold was stronger than that of the *U. pumila* cv. Pendula's, as exemplified by their LT₅₀ figures (i. e. , -33.11℃ vs. -29.83℃) obtained in the process.

* 收稿日期: 2019-05-20

基金项目: 2018 北京园林绿化增彩延绿科技创新工程科学研究项目 (XM-0000154102180424058)。

第一作者简介: 陈博 (1983-), 女, 讲师, 博士, 主要从事园林植物育种和园林生态研究。E-mail: 335859230@qq.com

通讯作者简介: 石进朝 (1964-), 男, 教授, 硕士, 主要从事园林植物育种与栽培养护研究。E-mail: 60255@bvca.edu.cn

Key words: *Zelkova sinica*; *Ulmus pumila* cv. 'Pendula'; low temperature stress; cold temperature resistance

大果榉 (*Zelkova sinica*) 别名小叶榉, 榆科 (Ulmaceae) 榉属 (*Zelkova*), 是我国特有的树种和珍稀植物^[1], 主要分布于山西南部、河南南部、陕西南部 and 湖北等地。大果榉树形优美, 冠幅大, 新生叶鲜红色或金黄色、秋季叶褐红色, 树皮脱落部位呈黄色, 季相变化明显, 寿命长、根系发达, 是良好的景观生态树种。另外, 民间因“种榉”与“中举”谐音, 喜欢于庭院中栽植大果榉, 榉属植物生长健壮繁茂, 所以有美好的文化寓意^[2]。但是, 榉属植物主要分布和应用于南方, 大果榉在北京未见应用。北京冬季温度较低的气候特点, 在一定程度上制约了许多优良树种的引种和栽培。国内外学者对大果榉的研究主要集中在繁育技术^[3-5]和生物学特性^[6-8]等方面, 抗性研究鲜有报道。目前已有的研究表明, 随着苗龄的增长, 大果榉的抗寒性增强, 3-4年的实生大果榉可在山西太谷地区顺利过冬, 但移栽会降低其抗寒适应性^[9]。

随着北京城市生态建设水平的不断提高, 对新优植物的需求不断加强, 探索大果榉这样具有诸多优点的珍贵植物在北京的生态适应性和发展潜能具有非常重要的意义。在此背景下开展对引种大果榉的抗寒性研究, 为明确其是否适于北京推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以引种栽植于北京市农业职业学院彩林园的6年生大果榉实生植株为研究材料, 以彩林园中栽植于同一小气候环境的同科植物垂枝榆 (*Ulmus pumila* cv. 'Pendula') 为对照材料。垂枝榆生态适应性较强, 在北方地区已大量应用于城乡园林绿化中。于2018年12月从大果榉树冠中部随机采取整齐均匀的当年生休眠枝条若干, 将相同树种的枝条装入同一密封袋中, 贴上标签, 迅速带回实验室。

1.2 方法

1.2.1 材料处理

将采集来的枝条剪成15cm长度, 用自来水清洗干净枝条表面灰尘, 再用去离子水冲洗3次, 用干纱布吸干表面水分, 石蜡封住枝条的剪口。将每种植物材料分成42份, 即42个处理, 每份选取4-6段枝条装入自封袋中, 贴好标签, 置于BDF-40H100

超低温冰箱 (山东博科) 中。设置7个温度梯度: 5℃、-10℃、-15℃、-20℃、-25℃、-30℃、-35℃, 以5℃作为对照处理, 代表未经低温胁迫的情况。其他处理均以5℃/h的速度降到相应的目的温度并保持21h, 冷冻后的材料置于5℃冰箱里解冻12h后, 冷藏保存待测定相关生理指标。测定时每个处理均重复3次^[10]。

1.2.2 指标测定

测定相对电导率、可溶性糖、丙二醛 (MDA)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和水培恢复生长情况6项指标。相对电导率采用STARTER 3100C电导仪 (美国奥豪斯) 进行测定^[11], 将相对电导率拟合成 Logistic 曲线方程测定半致死温度^[12-13]; 可溶性糖含量采用蒽酮法测定^[14]; MDA含量采用硫代巴比妥酸显色法测定^[14]; POD活性采用比色法测定^[14]; CAT活性采用高锰酸钾滴定法测定^[14]。

水培恢复法, 即根据枝条恢复后存活枝的萌芽率 (枝条萌芽率% = 萌芽枝数/水插枝总数 × 100%) 评价树种的抗寒性^[13,15]。将低温处理后的枝条置于三角瓶中水培, 每个温度3个重复处理, 每个处理4段枝条, 容器置于25℃室内, 每隔5d换水, 水培25d后观察芽的萌发情况, 进行统计枝条萌芽率。

1.2.3 数据分析

数据使用 SigmPlot 10.0 进行计算和作图, 用 SPSS 16.0 进行 Logistic 方程拟合计算其低温半致死温度, 同时进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对枝条相对电导率的影响及半致死温度分析

2.1.1 相对电导率变化

低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条的相对电导率见图1。由图1可以看出, 大果榉和垂枝榆的相对电导率随处理温度的下降均呈上升趋势, 说明相对电导率的变化与温度呈负相关关系, 但两个树种随温度的下降其相对电导率的变化阶段和不同阶段的变化幅度均有所不同: 5℃至-10℃, 大果榉和垂枝榆的相对电导率均缓慢增加; -15℃至-20℃下, 大果榉相对电导率出现跃升, 而垂枝榆在-10℃下相对电导率即出现了快速的生长; 温度在-20℃至

-35℃时，大果榉的相对电导率持续上升，但增幅有所下降，当温度下降到-35℃时，大果榉的相对电导率增加到 40.85%；-20℃至-25℃时垂枝榆的相对电导率出现了下降的趋势，由 47.07% 下降到 44.01%，温度在-25℃至-35℃区间，垂枝榆的相对电导率又有所增加，当温度下降到-35℃时，垂枝榆的相对电导率上升到 50.13%。方差分析表明：相同处理温度时，两种植物材料枝条的相对电导率差异极显著 ($P < 0.01$)，大果榉的相对电导率低于垂枝榆。

2.1.2 低温半致死温度确定

将大果榉和垂枝榆的枝条组织在不同温度处理下的相对电导率进行 Logistic 方程拟合，得出两种植物的低温半致死温度。结果表明：两种植物材料 Logistic 方程的拟合度 R^2 均高于 0.900，达到显著水平。大果榉和垂枝榆的半致死温度分别为-33.11℃和-29.83℃（表 1）。从半致死温度的结果来看，大果榉枝条的抗寒性高于垂枝榆。

表 1 大果榉和垂枝榆的相对电导率 Logistic 方程及半致死温度

Tab. 1 The logistic equation and lethal temperature (LT_{50}) of relative electrical conductivity of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula'

树种	Logistic 方程	拟合度	半致死温度/℃
大果榉 <i>Zelkova sinica</i>	$y = 100 / (1 + 3.520e^{0.0381x})$	0.962	-33.11
垂枝榆 <i>Ulmus pumila</i> cv. 'Pendula'	$y = 100 / (1 + 1.427e^{0.0119x})$	0.912	-29.83

2.2 低温胁迫对枝条丙二醛 (MDA) 含量的影响

不同低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条 MDA 含量见图 2。

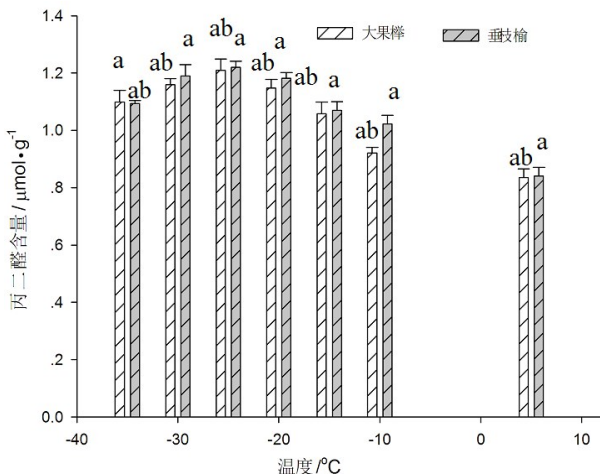


图 2 低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条 MDA 含量的变化

注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，下同。

Fig. 2 Effects of low temperature treatment on MDA content of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula'

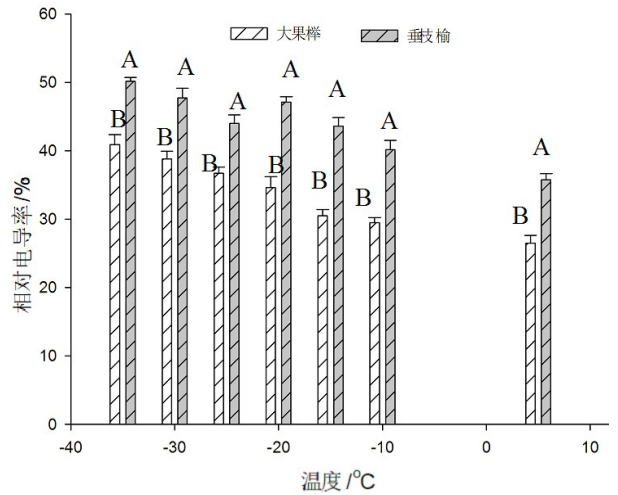


图 1 低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条的相对电导率

注：数据为平均值±标准差，不同大写字母表示在 0.01 水平差异显著，下同。

Fig. 1 Relative electrical conductivity of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula' s branches under low temperature

由图 2 可以看出，两种植物枝条中 MDA 含量都随温度的下降而出现先升高后降低的趋势。MDA 含量在-10℃至-25℃发生明显的增加，-10℃至-15℃时，大果榉 MDA 含量的增加幅度较快，在-15℃至-20℃时，垂枝榆 MDA 含量有较大幅度的增长。-25℃以后两种植物 MDA 的含量均开始下降。不同温度情况下，大果榉枝条 MDA 含量大多低于垂枝榆，表明抗寒性较强的品种受到低温胁迫时植物受伤害的程度较轻，MDA 含量的增量相对较低，这与齐延巧等^[15]对两种枸杞 (*Lycium chinense*) 的抗寒性以及马艳芝等^[16]对柴胡 (*Bupleurum chinense*) 幼苗的抗寒性研究结果一致。

2.3 低温胁迫对枝条可溶性糖含量的影响

低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条的可溶性糖含量见图 3。由图 3 可见，2 个树种枝条中可溶性糖含量均随温度的降低呈现先上升后下降的规律。5℃时，大果榉和垂枝榆枝条可溶性糖的含量分别为 4.28% 和 3.98%；-25℃时，2 种供试材料可溶性糖含量上升到最高点，分别达到 6.24% 和 5.98%。在

5℃至-25℃的温度区间,垂枝榆枝条可溶性糖含量的增幅较大,比大果榉的增量高出近5%。方差分析表明:相同处理温度时,2种植物材料可溶性糖的含量差异显著 ($P<0.05$),表现为大果榉高于垂枝榆。

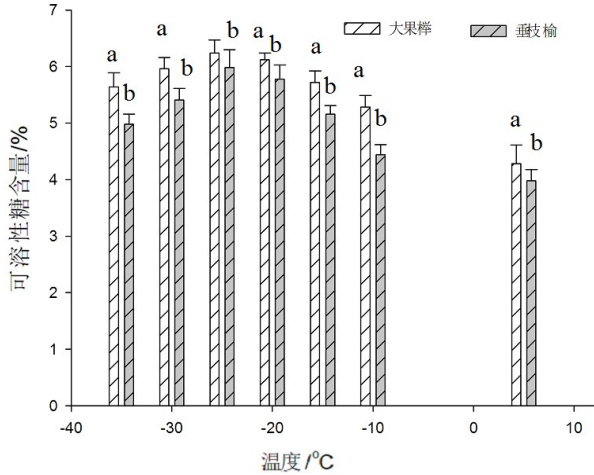


图3 低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条的可溶性糖含量的变化

Fig. 3 Effects of low temperature treatment on soluble sugar content of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula'

2.4 低温胁迫对枝条酶活性的影响

低温胁迫下大果榉和垂枝榆的枝条 POD 和 CAT 活性见图 4。由图 4a 可知,与对照温度下枝条过氧化物酶 (POD) 活性相比,随着温度的降低大果榉枝条 POD 活性呈现先升后降的趋势,而垂枝榆枝条 POD 活性呈现降-升-降的趋势。在-15℃低温胁迫时,2种植物 POD 酶活性明显增强,-25℃时大果榉枝条的 POD 活性达到最大值,-20℃时垂枝榆枝条的 POD 活性达到最大值。大果榉枝条的 POD 活性峰值与对照相比增加了 1.07 倍,垂枝榆 POD 活性峰值与对照相比增加了 95.67%,表明大果榉枝条的 POD 活性增幅更大。

从图 4b 可以看出,不同温度处理下两种供试植物材料的过氧化氢酶 (CAT) 活性变化表现出相似的趋势,整体表现为先升高再下降。5℃至-20℃,

CAT 活性持续升高,-20℃时达到 CAT 活性的峰值,之后 CAT 活性出现下降的趋势。不同温度处理下,大果榉枝条 CAT 活性均明显高于垂枝榆的活性。方差分析表明:相同处理温度时,对于 POD 和 CAT 活性两个生理指标,大果榉和垂枝榆差异极显著 ($P<0.01$),表现为大果榉高于垂枝榆。

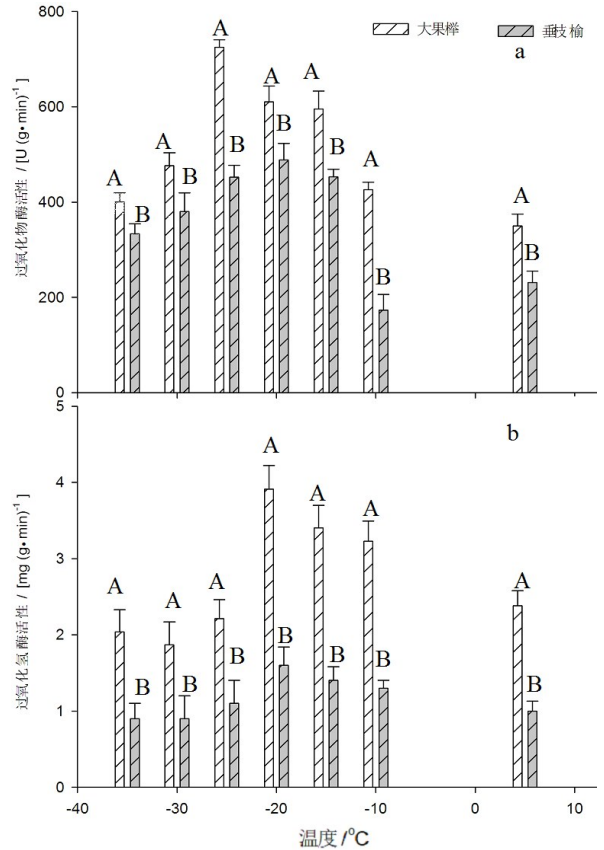


图4 低温胁迫下大果榉和垂枝榆枝条 POD 和 CAT 活性的变化

Fig. 4 Effects of low temperature treatment on POD and CAT activity of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula'

2.5 低温胁迫对枝条恢复生长的影响

水插试验结果表明,低温处理后,随着温度的降低,大果榉和垂枝榆枝条的萌芽率均呈现不同程度下降趋势 (表 2)。

表 2 不同低温处理下大果榉和垂枝榆枝条萌芽率的变化

Tab. 2 Influences of low-temperature treatment on germination rate of *Zelkova sinica* and *Ulmus pumila* cv. 'Pendula' of branches

树种	处理温度							%
	5℃ (CK)	-10℃	-15℃	-20℃	-25℃	-30℃	-35℃	
大果榉	75.00	50.00	25.00	25.00	0.00	0.00	0.00	
垂枝榆	100.00	100.00	75.00	50.00	25.00	0.00	0.00	

从表2可以看出：大果榉在温度不低于-20℃处理时均有枝条成活，从-25℃起枝条萌发率为0，枝条开始变褐色甚至发霉腐烂；垂枝榆在温度不低于-25℃处理时均有枝条成活，从-30℃起枝条萌发率为0，枝条开始变褐色。在相同温度处理下均表现出大果榉枝条的萌发率明显低于垂枝榆的枝条萌发率，从恢复枝条萌发率的指标来看大果榉的抗寒性低于垂枝榆。但是，不同树种由于其生理特性不同，在相同的环境条件下枝条的萌发率本身就存在差异。大果榉枝条在水插过程中会分泌大量的粘液，其中具有生根阻碍物质，容易引起枝条腐烂，

降低枝条扦插的成活率^[17]。

2.6 抗寒性与不同抗寒指标相关性分析

通过 Pearson 相关性分析，研究供试植物枝条不同抗寒指标和抗寒性关联程度^[17]。将不同树种的抗寒指标的测定值和不同处理温度视为一对变量进行分析（表3）。从表3可以看出，各指标测定值与温度的相关系数均在0.600以上，表明二者具有较强的相关性；从P值检验结果可以看出，两种植物的抗寒性与相对电导率达到极显著相关、与MDA和可溶性糖显著相关、与POD和CAT活性的相关性不显著。

表3 抗寒性与5个生理生化指标的 Pearson 相关性分析

Tab. 3 The Pearson correlation analysis of physiological and biochemical indexes and cold resistance

树种	指标	相对电导率	MDA	可溶性糖	POD	CAT
大果榉	温度	0.973**	0.851*	0.800*	0.624	0.635
垂枝榆	温度	0.953**	0.824*	0.797*	0.703	0.643

注：*表示 $P<0.05$ 的显著水平；**表示 $P<0.01$ 的显著水平。

3 讨论与结论

植物抗寒能力是生理生化特征及其他因素的综合表现^[18]。本研究发现，在相对电导率测定中，随着处理温度降低，相对电导率整体呈逐渐升高的趋势，这与王珊珊等^[10]、李桂荣等^[19]的研究结果一致。相对电导率增加与植物细胞膜因低温胁迫而透性增大有关^[20-21]。MDA含量的测定中，随着温度的降低，MDA含量出现先升高后降低的趋势。MDA是膜脂过氧化的最终分解产物，植物在遭受逆境胁迫时，细胞膜受到伤害，植物体内正常代谢失衡。当温度降低时，两种植物的细胞膜发生脂过氧化作用，过氧化产物增加，致使植物枝条内MDA含量上升；当降到一定低温时，植物部分细胞死亡，丧失生理功能，代谢产物减少，因而MDA含量有所下降^[15]。抗性强的植物其相对电导率和MDA含量较低^[16]，因而从相对电导率和MDA两个指标上可以看出大果榉的抗寒性高于垂枝榆。在可溶性糖的测定中，其含量随着处理温度的降低出现先升高后降低的趋势，抗寒性强的的大果榉其含量较高，主要是由于低温使原生质的浓度增加，以提高枝条组织细胞的抗寒能力^[22]，这与齐延巧等^[15]对2种枸杞（*Lycium chinense*）抗寒性的研究结果相一致。在POD和CAT2种酶活性的测定中，

随着处理温度的下降，酶活性呈现先上升后下降的规律，这与吉琴^[18]和鲁金星等^[23]对睡莲（*Nymphaea tetragona*）和葡萄（*Vitis vinifera*）抗寒性研究结果一致。温度开始降低时，不同酶保护系统性能增强，提高组织的抗寒性，但是降低到一定温度后，细胞膜受到严重伤害，酶的活性开始降低^[24]。通常来说，抗寒性越强的植物其可溶性糖的含量越高，酶的活性越强。

恢复生长试验是鉴定植物抗寒能力的一种方法，通过观察植物受到冻害后的存活情况及发芽率来了解植物的抗寒能力^[25]。在本研究中，由于大果榉扦插成活较垂枝榆困难，不同温度处理下的萌芽率相对较低，根据恢复试验数据得出的结果与其他几个生理指标得出的结果相反。以上情况表明：恢复生长试验鉴定植物抗寒能力的方法不适合扦插成活特别困难的植物；植物的抗寒性是许多数量或质量遗传基因综合作用的结果，单一指标评价植物抗寒性较片面^[26-27]。

研究表明，与大果榉和垂枝榆相关性最高的抗寒指标是相对电导率，其次是MDA和可溶性糖。大果榉的 LT_{50} 低于垂枝榆，分别为-33.11℃和-29.83℃。大果榉的抗寒性高于垂枝榆，在北京常规防护即可安全过冬。

参考文献:

[1] 陈博, 范继红, 韩振芹, 等. 中国榉属植物研究与利用现状[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(8): 9-13, 16.

[2] 乔虹, 白晋华, 张芸香, 等. 珍稀乡土树种大果榉研究现状与展望[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8): 1421-1424, 1428.

[3] 张若晨. 不同生根剂处理对大果榉光合特性的影响[J]. 山西林业科技, 2013, 42(4): 34-36.

[4] 乔虹, 王雪珂, 白晋华, 等. 基质种类对大果榉硬枝扦插生根的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(12): 2037-2039.

[5] 张若晨, 王良民. 大果榉组织培养研究[J]. 山西农业科学, 2019, 47(3): 304-306, 341.

[6] Wang Y F, David K F, Rinhard Z. Leaf architecture and epidermal characters in *Zelkova*, Ulmaceae [J]. Botanical Journal Linnean Society, 2001, 136: 255-265.

[7] 陈莲芸, 张若晨, 王良民, 等. 大果榉结实、种子和幼苗特性研究[J]. 山西农业大学学报, 2010, 30(4): 350-352.

[8] Gredor K, Douglas G, Fan H. Conservation of threatened relict trees through living ex situ collections: lessons from the global survey of the genus *Zelkova* (Ulmaceae) [J]. Biodivers Conserv, 2012, 21(3): 671-685.

[9] 李静. 大果榉和大叶榉苗木生长及抗寒特性研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015.

[10] 王姗姗, 樊保国. 十个落叶乔木树种的抗寒性研究[J]. 北方园艺, 2016(9): 87-93.

[11] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[12] 雷帅, 蒋倩, 汉梅兰. 五种花灌木对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(5): 35-41.

[13] 朱海根. 应用 Logistic 方程确定植物组织半致死温

度的研究[J]. 南京农业大学学报, 1986(3): 11-16.

[14] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017.

[15] 齐延巧, 耿文娟, 周伟权, 等. 两种枸杞的抗寒性研究[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(12): 2203-2209.

[16] 马艳芝, 客绍英. 柴胡幼苗越冬抗寒性及其相关生理指标筛选[J]. 西北植物学报, 2014, 34(4): 786-791.

[17] (日本) 森下义郎, 大山浪雄. 植物扦插理论与技术[M]. 李云森译. 北京: 中国林业出版社, 1985: 134-135.

[18] 吉琴. 低温胁迫对不同热带睡莲品种抗寒生理的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(5): 114-118.

[19] 李桂荣, 连艳会, 程珊珊, 等. 低温胁迫下不同无核葡萄品种抗寒性的分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2399-2406.

[20] 郁万文, 曹福亮, 汪贵斌. 银杏抗寒优良无性系选育[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(12): 132-138.

[21] Lyons J M. Chilling injury in plants [J]. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1973, 24: 445-446.

[22] 崔帅, 赵兰勇, 李承水, 等. 卫矛属 3 种常绿阔叶树木抗寒性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 17-20.

[23] 鲁金星, 姜寒玉, 李唯. 低温胁迫对砧木及酿酒葡萄枝条抗寒性的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(6): 1040-1046.

[24] 钟海霞, 潘明启, 张付春, 等. 葡萄砧木枝条的抗寒性比较[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(2): 261-269.

[25] 赵蕾. 野生澳洲李抗寒性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.

[26] 古丽尼沙·卡斯木, 木合塔尔·扎热, 古再丽努尔·沙吾提, 等. 11 个引进无花果品种抗寒性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 98-105.

[27] 田星, 樊军锋, 张锦梅. 8 种美洲黑杨无性系抗寒性评价[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(3): 80-86.

(编辑: 胡光辉)

[上接第 34 页]

[19] 赵宏伟, 萨日娜. 寒地粳稻耐盐愈伤组织生理特性及再分化研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(1): 24-28.

[20] 李振侠, 徐继忠, 邵建柱. 苹果砧木耐盐变异体的生理生化及分子生物学分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 39(17): 10227-10228, 10243.

[21] 邱国金, 胡卫霞, 孙其松, 等. 盐胁迫对紫薇 3 个新品种的生长与生理特性的影响[J]. 西部林业科学, 2017, 46(4): 50-55.

[22] 陈丽, 董举文, 唐寅, 等. EMS 诱变处理定向筛选杨树耐盐突变体研究[J]. 上海农业学报, 2007, 23(3): 86-91.

[23] 毛桂莲, 许兴. 枸杞耐盐突变体的筛选及生理生化

分析[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 275-280.

[24] 周玉丽, 崔广荣, 胡能兵, 等. 甜叶菊甲基磺酸乙酯离子体诱变及耐盐变异体的 SRAP 检测[J]. 中草药, 2014, 45(24): 3612-3617.

[25] 杨宇, 李东, 张乾. ⁶⁰Co γ 辐射对马铃薯耐盐愈伤组织诱导的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6140-6141.

[26] 郑文娟, 石佳, 任广炼, 等. EMS 诱变越橘的研究[J]. 西南师范大学学报, 2012, 37(2): 102-108.

[27] 薛惠丹, 李周岐. 花椒愈伤组织 EMS 诱变及变异研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 98-101.

(编辑: 成伶俐)