

崖柏和侧柏幼苗对自然降温的生理生化反应

朱 莉^{1,2}, 郭泉水^{2*}, 金江群², 刘建锋³, 李志勇¹, 颜 华⁴

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 4. 重庆市开县林业局, 重庆 开县 404500)

摘要: 以崖柏和侧柏幼苗为对象, 研究其叶片在秋冬季节性自然降温过程中抗氧化酶、渗透调节物质和丙二醛 (MDA) 的变化特征, 并比较两树种对低温胁迫的适应能力。结果表明: 在秋冬季节性自然降温过程中, 日最低气温由 12.50 °C 降至 -13.96 °C。崖柏幼苗叶片的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均显著增强, 但过氧化物酶 (POD) 活性基本没有变化, 而侧柏的 SOD 和 POD 活性同时增强; 两树种叶片脯氨酸 (Pro) 含量、可溶性糖含量均显著增加, 但崖柏的增加幅度低于侧柏; 两树种叶片 MDA 含量均极显著增加, 但崖柏增加幅度较大。日最低气温与侧柏的 SOD、POD 和可溶性糖含量均极显著相关, 但仅与崖柏的 SOD 极显著相关, 表明在季节性自然降温过程中, 侧柏比崖柏更能够建立较完善的防御系统进行自身调节以适应低温环境。研究结果可为崖柏迁地保存和栽培管理工作提供参考。

关键词: 崖柏; 侧柏; 自然降温; 生理生化; 反应

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

Physiological and Biochemical Responses of *Thuja sutchuenensis* and *Platycladus orientalis* Seedlings to Natural Cooling

ZHU Li^{1,2}, GUO Quan-shui², JIN Jiang-qun², LIU Jian-feng³, LI Zhi-yong¹, YAN hua⁴

(1. College of Agriculture, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, He'nan, China;

2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

4. Forest Bureau of Kaixian County, Kaixian 404500, Chongqing, China)

Abstract: The paper focused on two species seedlings, *Thuja sutchuenensis* and *Platycladus orientalis*. Their adaptability to low temperature stress was compared by detecting and analyzing the leaves variable characteristics of antioxidant enzymes, osmotic adaptive substances and malondialdehyde (MDA) in the process of seasonal cooling in autumn and winter. The results showed that: during the process of seasonal cooling, the daily minimum air temperature decreased from 12.5 °C to -13.96 °C, the superoxide dismutase (SOD) activity of *T. sutchuenensis* was strengthened significantly, however, the change of Peroxidase (POD) activity was not obvious, and both SOD and POD activities of *P. orientalis* were strengthened. The content of proline (Pro) and soluble sugars in leaves increased significantly in two species, *T. sutchuenensis* was lower than *P. orientalis*. The MDA content in leaves of the two species increased significantly, while *T. sutchuenensis* increased more than *P. orientalis*. The daily minimum air temperature was significantly correlated with the SOD, POD activity and soluble sugar content in *P. orientalis*, but it just correlated with the SOD activity in *T. sutchuenensis*. All these suggest that, during seasonal cool-

收稿日期: 2012-07-17

基金项目: 国家林业局野生动植物保护专项“世界级极危物种崖柏潜在分布和生态适应性研究(2012-4)”;“珍稀濒危物种崖柏野外救护与人工繁育(优化项目)(1691000401)”;中央公益性科研院所专项基金(RIF2010-15)

作者简介: 朱 莉(1988—),女,内蒙古乌海人,硕士研究生. E-mail: zhulizxt@163.com.

* 通讯作者: 郭泉水,男,河北易县人,研究员. E-mail: guoqs@caf.ac.cn.

ing, *P. orientalis* is more adaptive to low temperature stress than *T. sutchuenensis* through establishing better defensive system and conducting self-adjustment. The results of the research can provide reference for the *T. sutchuenensis* ex-situ conservation and cultivation management.

Key words: *Thuja sutchuenensis*; *Platycladus orientalis*; seasonal cooling; plant physiology; plant biochemistry; response

低温是制约植物生长、发育和分布的重要环境因子^[1]。一个多世纪以来,低温与植物的关系一直倍受世界各国植物学和植物引种学家的关注,并在低温对植物生理过程影响方面取得了显著的研究成果。现已研究表明,低温胁迫对作物的光合色素含量、光合速率、叶绿素荧光参数、PS II 光化学效率、PSI 和 PS II 功能、光合电子传递速率等生理过程均会产生较明显的抑制作用^[2],持续低温还将导致质膜过氧化作用的最终产物丙二醛(MDA)在体内发生积累。植物感受低温胁迫后,并不是完全被动的去承受,也会积极主动的协调自身的生理活动,以避免或降低低温伤害^[3]。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是植物体酶促系统中最重要的抗氧化酶,可清除因低温胁迫而导致的自由基增多、活性氧水平上升等对植物造成的毒害作用;游离脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质,可通过不断的在体内积累和分解,调节细胞的渗透平衡,缓解低温对植物的伤害,增强植物对低温的耐受能力^[4]。不同植物对低温胁迫的适应能力不同。靳月华等^[5]研究发现,我国东北地区针叶树的SOD活性在越冬期间会显著提高,SOD活性越高的树种耐冻性越强。谢晓金等^[6]研究发现,随着温度降低,常绿阔叶树种叶片内可溶性糖含量增加,可溶性糖含量增加幅度大的树种抗寒能力较强。因此,通过研究低温胁迫下不同植物的生理生化反应特征,可以揭示不同植物对低温胁迫的适应能力和适应机制,在濒危植物迁地保存中,也可作为迁入种对迁入地适宜性评判的理论依据。

崖柏(*Thuja sutchuenensis* Franch.)为中国特有柏科(Cupressaceae)崖柏属(*Thuja* L.)常绿乔木,胸径可达1 m,树高20 m以上。天然分布在大巴山山脉重庆市的城口县和开县山区。水平分布在108°30′~109°15′ E,31°30′~31°50′ N,垂直分布在海拔700~2 200 m。目前,成年崖柏的数量约10 000株。属世界级极危物种^[7]。虽然崖柏分布在气候比较温暖的亚热带地区,但因适宜其生长的地段海拔较高,所以气温相对较低。崖柏集中分布区的极端低温可达-13.2℃,垂直分布上限的极端低温可达

-16℃左右,无霜期213 d^[8],同时还有3个月左右的积雪期^[9],说明崖柏具有一定的抗寒性,并存在“南种北移”迁地保存保护的可能性。目前,对崖柏的研究主要集中在种群生态学^[10-11]、群落生态学^[12-15]、遗传多样性^[16-17]以及光合生理^[18-19]等方面,关于崖柏“南种北移”迁地保存保护以及在引入地季节性自然降温过程中的生理生化反应尚缺乏应有的尝试和研究。侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco)为我国天然分布和人工栽培最广的针叶树种之一。北起内蒙古、吉林,南至广东及广西北部都有分布;人工栽培范围几乎遍及全国。目前对侧柏种群生态学和群落生态学研究比较深入,但对低温胁迫下侧柏的生理生化反应研究较少。江萍等^[20]曾在新疆石河子大学试验站(86°03′ E,44°19′ N)以8年生侧柏幼树为对象,在植株正常生长的情况下,通过套袋和不套袋2种方式处理侧柏叶片,对比研究了其自然降温过程中SOD、POD、CAT活性及MDA含量变化,但在本研究区域尚未见到相关研究报道。

本文以北迁的崖柏和北京本地适生树种侧柏的幼苗为试验材料,通过定期测定秋冬季节性自然降温过程中叶片的渗透调节物质、保护酶及MDA含量的变化,对比分析2个树种在季节性自然降温过程中的生理生化反应特征,揭示崖柏对迁入地秋冬季节性自然降温的适应能力和适应机制,为崖柏北迁异地保存保护策略的制定及引种栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为崖柏和侧柏盆栽的实生苗。栽植盆内径26 cm,高30 cm,基质为草炭土、蛭石、珍珠岩(1:1:1)混合物,每盆栽植1株。平均苗高40 cm,地径7.6 mm。崖柏苗来自崖柏原生地城口县明中乡苗圃。幼苗出圃时苗龄为2 a。移到迁入地之前,曾在中国林业科学研究院科研温室培育1 a;侧柏实生苗来自北京周边苗圃,苗龄3 a。

1.2 试验设计

2011年10月5日,选择生长较一致的崖柏和侧柏幼苗各15株,带盆移植于中国林业科学研究院绿化苗圃,株行距50 cm×50 cm,每行5株,行间混交栽植。栽植后按苗木常规管理方法对幼苗进行管理。为了监测季节性自然降温过程中苗圃地的气温变化,幼苗移植时,在苗圃地安装了1台智能便携式数据记录仪(型号RC-DT618B,产地:杭州),监测距地面30 cm处的气温,每1 h记录1次气温。

幼苗移入苗圃近1个月后将开始观测。每次供试植株选择均为随机抽取。每个树种3株,即3个重复。叶片样品取自供试植株中部侧枝顶端发育良好的当年生鳞状叶。上午10:00—12:00取样。样品采集后,分别装入自封袋并标记树种名称、供试植株编号以及采样时间,然后带回实验室,置于超低温冰箱(-80℃)中保存备用。本研究共进行了5次采样,当崖柏叶片出现卷曲,有明显的冻害症状时,则采样终止。具体采样日期为:2011年11月3日、21日、30日,12月16日和2012年1月9日。

1.3 测定指标和方法

测定指标包括叶片的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、游离脯氨酸(Pro)、可溶性糖和丙二醛(MDA)。

测定方法参照文献[21]的要求进行。POD采用愈创木酚法,SOD活性采用NBT法,Pro含量采用茚基水杨酸法,可溶性糖含量采用蒽酮法,MDA含量采用硫代巴比妥酸法。测定分析工作在中国林科院森林生态环境与保护研究所测试分析中心完成。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0多变量相关性分析程序进行日最低气温与生理生化指标的相关性分析;用单因素方差分析和多重比较(LSD)法对同一树种不同测定时间以及不同树种间各生理生化指标间的差异进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 试验期间苗圃地的气温变化

由图1可以看出:从2011年11月份开始苗圃地的气温出现持续下降。日平均气温由13.77℃下降到-7.77℃(2012年1月22日),日最低气温由12.5℃下降到-13.96℃(2012年1月22日)。日平均气温首次出现0℃以下的时间为2011年11月

24日,日最低气温达到0℃以下的时间为2011年11月14日。5次采样当天的日平均气温分别为12.87、3.18、1.41、-6.40、-3.30℃,日最低气温分别为9.27、-2.80、-3.96、-10.46、-9.28℃。

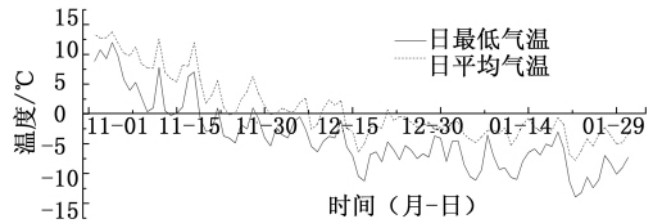


图1 2011年11月—2012年1月苗圃气温的变化

2.2 崖柏和侧柏幼苗叶片形态变化

截至2011年11月底崖柏叶片一直为深绿色,进入2012年1月后,部分叶片卷曲,出现明显地冻害症状。2月份,大部分叶片枯萎但未脱落,而树干和侧枝受害症状不明显。4月份气温回暖后,在枝节间又重新萌发出许多新芽。幼苗存活率达100%。北京本地适生种侧柏的叶片在11月中下旬开始由深绿色变成灰绿色,2月份以后,叶片又重新变为鲜绿色,在季节性自然降温过程中,侧柏幼苗的叶片未出现受害症状。

2.3 崖柏和侧柏幼苗叶片抗氧化酶活性的变化

2.3.1 POD活性的变化

在季节性自然降温过程中,崖柏和侧柏幼苗叶片POD活性的变化有所不同(图2),侧柏叶片POD活性随着季节性自然降温而持续升高。从测定初期(2011年11月3日)到测定终期(2012年1月9日)2个多月的时间里,POD活性由 $943.69 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 提高到 $2083.72 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,增加了120.81%。而在此期间崖柏叶片的POD活性没有大的变化,基本上是在 $356.13 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 上下波动。

对同一树种不同测定时间POD活性的差异显著性检验的结果(图2)表明:不同测定时间崖柏叶片POD活性无显著性差异;侧柏首次测定(11月3日)值与其它各次的测定值间均存在显著差异($P < 0.05$),第5次(1月9日)与第2次(11月21日)存在显著差异($P < 0.05$),与第3次(11月30日)达到极显著差异水平($P < 0.01$)。

各次测定的侧柏叶片POD活性均高于崖柏,且两树种间叶片POD活性存在极显著差异($P < 0.01$)。

2.3.2 SOD活性的变化

在季节性自然降温过程

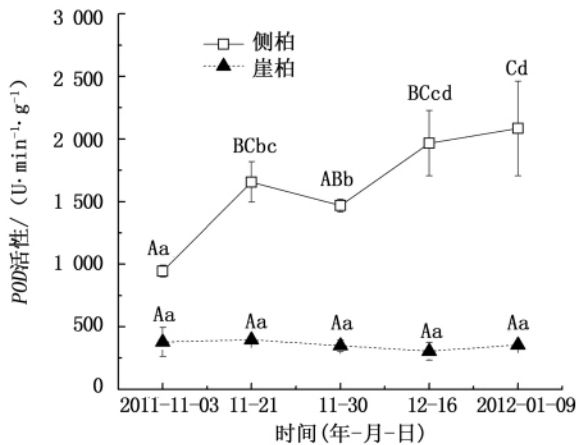


图 2 自然降温过程中不同树种叶片 POD 活性的变化(同一曲线上不同大写字母表示在 0.01 水平上显著差异,不同小写字母表示在 0.05 水平上显著差异,下同)

中,崖柏和侧柏叶片的 SOD 活性总体变化呈增加趋势(图 3),但在同一低温条件下,不同树种增加的幅度不同。11 月 3 日至 11 月 21 日,日平均气温为测试期间降温幅度最大的时段,在此期间,崖柏叶片 SOD 活性由 74.54 U·g⁻¹ 骤增到 289.68 U·g⁻¹,增加了 288.62%,11 月 30 日出现峰值(324.15 U·g⁻¹)。在此之后变化幅度减小。侧柏叶片 SOD 活性由 59.50 U·g⁻¹ 增加到 11 月 30 日的 187.44 U·g⁻¹,增加了 215.03%。崖柏和侧柏幼苗叶片 SOD 活性的峰值均出现在 11 月 30 日,在此之后变化幅度减小。

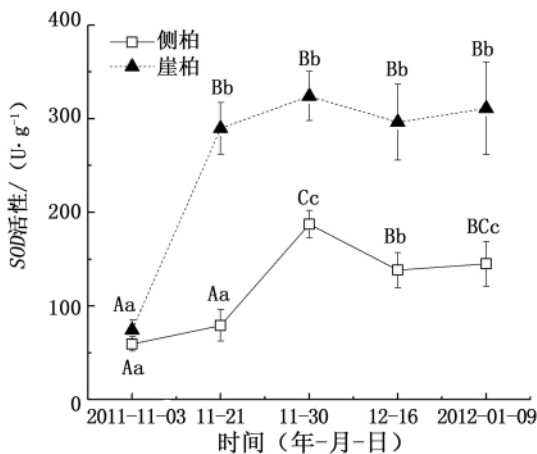


图 3 自然降温过程中不同树种叶片 SOD 活性的变化

对同一树种不同测定时间叶片的 SOD 活性的差异显著性检验的结果(图 3)表明:崖柏第 2 次的测定值显著高于首次,并达到极显著水平($P < 0.01$),在此之后,各次测定值间未出现显著差异;侧柏首次与第 2 次的测定值间未出现差异显著,其它各次的

测定值间均显著高于前 2 次,并达到极显著水平($P < 0.01$)。

各次测定的崖柏叶片 SOD 活性均高于侧柏,且两树种间叶片 SOD 活性的差异极显著($P < 0.01$)。

2.4 崖柏和侧柏幼苗叶片渗透调节物质含量的变化

2.4.1 Pro 含量的变化 在季节性自然降温过程中,崖柏和侧柏幼苗叶片 Pro 含量的变化趋势相似(图 4),即 11 月 30 日之前,两树种的叶片 Pro 含量均呈缓慢下降趋势,11 月 30 日之后,随着气温降低,Pro 含量逐渐升高,总体变化呈增加趋势。崖柏幼苗叶片 Pro 含量的峰值为 22.51 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,出现时间为 2012 年 1 月 9 日,侧柏幼苗叶片 Pro 含量峰值为 129.87 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,出现时间为 2011 年 12 月 16 日。

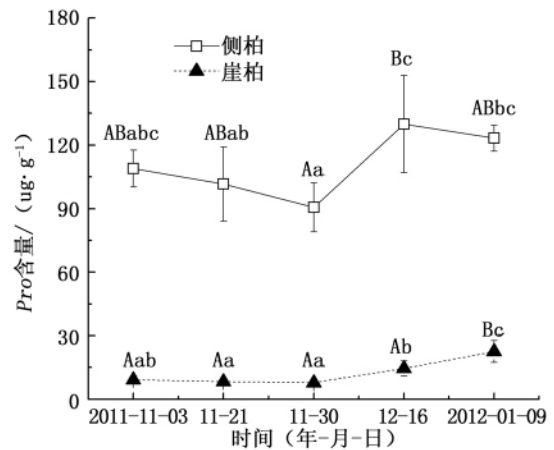


图 4 自然降温过程中不同树种叶片脯氨酸(Pro)含量的变化

对同一树种不同测定时间叶片的 Pro 含量差异显著性检验的结果(图 4)表明:崖柏的前 3 次测定值间未出现显著差异,第 5 次极显著($P < 0.01$)高于前 4 次;侧柏第 4 次测定(12 月 16 日)值与第 2 次和第 3 次均存在显著($P < 0.05$)和极显著差异($P < 0.01$),其它各次测定值间差异不显著。

各次测定的侧柏叶片 Pro 含量均高于崖柏,且两树种间叶片的 Pro 含量的差异极显著($P < 0.01$)。

2.4.2 可溶性糖含量变化 在季节性自然降温过程中,崖柏和侧柏叶片可溶性糖含量总体变化呈增加趋势(图 5)。11 月 30 日前,崖柏叶片可溶性糖含量小幅减少,之后随着气温的下降迅速上升,1 月 9 日,可溶性糖含量达到 47.651 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,较测定初期(11 月 3 日)的 37.312 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加了 27.71%;侧柏叶片可溶性糖含量在气温达到最低的 12 月 16 日

出现最高点,为 $60.138 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 较首次测定(11月3日)的 $29.557 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加了 103.46%。

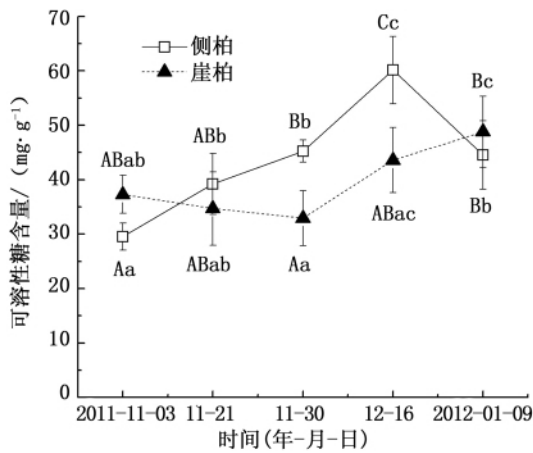


图5 自然降温过程中不同树种叶片可溶性糖含量的变化

对同一树种不同测定时间叶片的可溶性糖含量的差异显著性检验的结果(图5)表明:崖柏前4次测定间不存在显著差异,第5次测定显著高于前3次;侧柏首次测定值显著($P < 0.05$) 低于其他各次测定值,第4次极显著高于其它各次。

两树种间可溶性糖含量的差异不显著。

2.5 崖柏和侧柏幼苗叶片MDA含量的变化

随着季节性自然降温,两树种叶片MDA含量均基本呈增加趋势(图6),但崖柏叶片MDA的含量始终高于侧柏。测定初期(11月3日-11月21日),崖柏叶片中MDA含量由 $9.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 迅速升至 $18.20 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,增加幅度达 95.91%。随着气温的降低,曾出现小幅下降,但到2012年1月9日又再次升至 $17.91 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。侧柏叶片中MDA含量随着气温降低呈现缓慢升高的变化趋势。峰值出现在11月30日,为 $13.47 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 较测定初期(11月3日)的 $9.04 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加了 49.00%。

对同一树种不同测定时间叶片MDA含量的差异显著性检验的结果(图6)表明:崖柏首次测定值极显著($P < 0.01$) 低于其它各次测定值;除第5、3次

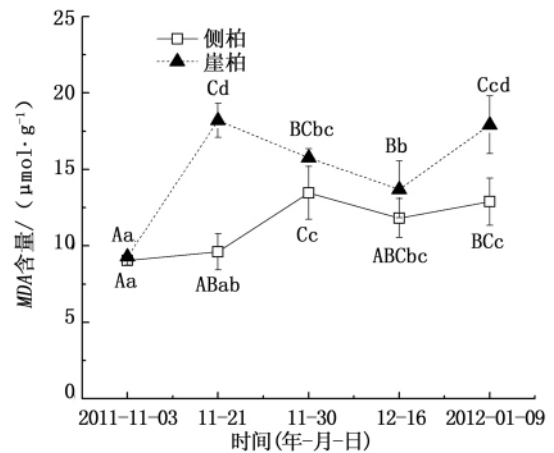


图6 自然降温过程中不同树种叶片丙二醛(MDA)含量的变化

外,第2次与其它各次间也均存在显著差异($P < 0.05$)。侧柏第3次测定值与前2次存在极显著差异($P < 0.01$) 在此之后的各次测定间差异不显著。

各次测定的崖柏叶片MDA含量始终高于侧柏,且两树种间的叶片MDA平均含量的差异极显著($P < 0.01$)。

2.6 日最低气温与崖柏和侧柏不同生化指标的相关性分析

从表1可以看出:日最低气温与崖柏幼苗叶片的SOD活性和MDA含量呈极显著负相关($P < 0.01$) 与Pro含量呈显著负相关($P < 0.05$) ,即随着气温的降低,崖柏叶片中SOD活性和MDA含量极显著增加,Pro含量显著增加。SOD活性与MDA,可溶性糖含量与Pro呈极显著正相关($P < 0.01$);其他指标间均未达到差异显著水平。

表2表明:除Pro含量外,日最低气温与其他指标间均呈显著($P < 0.05$) 或极显著负相关($P < 0.01$);SOD活性与MDA极显著正相关($P < 0.01$),与可溶性糖显著正相关($P < 0.05$);POD活性与可溶性糖含量极显著正相关($P < 0.01$),与MDA含量显著正相关($P < 0.01$),其它指标间未达到显著相关水平。

表1 日最低气温与崖柏不同生化指标的相关性

生化指标	日最低气温	SOD	POD	可溶性糖	Pro
超氧化物歧化酶(SOD)	-0.860**				
过氧化物酶(POD)	0.312	-0.198			
可溶性糖	-0.420	0.177	-0.069		
脯氨酸(Pro)	-5.41*	0.317	-0.204	0.709**	
丙二醛(MDA)	-0.652**	0.819**	0.006	0.103	0.363

注: * 表示在 0.05 水平相关性显著; ** 表示在 0.01 水平相关性极显著。

表 2 日最低气温与侧柏不同生化指标的相关性

生化指标	日最低气温	<i>SOD</i>	<i>POD</i>	可溶性糖	<i>Pro</i>
超氧化物歧化酶(<i>SOD</i>)	-0.648**				
过氧化物酶(<i>POD</i>)	-0.880**	0.408			
可溶性糖	-0.810**	0.520*	0.645**		
脯氨酸(<i>Pro</i>)	-0.346	-0.015	0.356	0.253	
丙二醛(<i>MDA</i>)	-0.609*	0.827**	0.603*	0.483	-0.050

注: * 表示在 0.05 水平相关性显著; ** 表示在 0.01 水平相关性极显著。

3 结论与讨论

在崖柏迁入地季节性自然降温过程中,崖柏叶片的 *SOD* 活性和侧柏叶片的 *POD*、*SOD* 活性逐渐增强。这是崖柏和侧柏幼苗共有的积极协调自主的生理活动,以避免或降低低温伤害的一种内在机制。低温胁迫可导致植物体内自由基代谢失调,活性氧水平上升,产生膜脂过氧化危害^[22]。*SOD* 作为植物抗氧化系统中的第一道防线,在清除细胞中过量的超氧阴离子(O_2^-) 将 O_2^- 歧化产生 H_2O_2 和 O_2 从而消除 O_2^- 的伤害等方面发挥着重要作用。*POD* 的主要作用是清除线粒体及胞浆中所产生的 H_2O_2 ^[4]。植物体如果能够保持 *POD*、*SOD* 等保护酶的高活性水平,即可有效避免活性氧等各种自由基的大量积累,减轻膜脂过氧化,降低细胞膜受破坏程度。本研究中侧柏叶片的 *POD*、*SOD* 活性以及崖柏叶片的 *SOD* 活性随自然降温呈现出的变化规律与高东东等^[23]对蝴蝶兰及杨轶因等^[24]对天女木兰幼苗低温胁迫的研究结果相一致,但低温胁迫并没有增强崖柏幼苗叶片 *POD* 活性,这也许会影响到崖柏清除活性氧自由基的能力,并成为崖柏耐寒性低于侧柏的原因之一。

植物受到低温胁迫时,细胞外的水势会突然下降,细胞质的水通过渗透作用穿过脂膜而导致细胞脱水^[4]。此时植物往往主动形成渗透调节物质,通过增加细胞内溶质浓度、降低细胞溶液的结冰点、防止细胞质凝固以及过度失水等方式,保护细胞免受低温的伤害^[25]。Cai 等^[26]通过对假俭草匍匐茎的研究发现,在越冬之前匍匐茎内 *Pro* 含量的增加可能是其抗寒性增强的原因之一。Priscila^[27]通过对不同种源桉树的研究发现,随着可溶性糖含量的增加,植物可以适应更低的温度环境。本试验中,随着气温的下降,崖柏和侧柏叶片中 *Pro* 含量和可溶性糖含量均显著增加,但侧柏叶片中可溶性糖含量增加幅度较大,且 *Pro* 含量始终明显高于崖柏。这说明在季节性自然降温过程中侧柏比崖柏保护细胞

免受低温伤害的能力更强。

MDA 是质膜过氧化作用的最终产物,也是膜系统受伤害的重要标志之一^[28]。正常情况下,植物体内的 *MDA* 含量极少。在低温胁迫过程中,温度的降低和时间的延续都会引起 *MDA* 含量的增加^[29],进而引起细胞膜透性增大,膜伤害程度增大^[30],植物代谢失调;因此, *MDA* 含量的多少是植物组织受损伤的程度和膜稳定性的表现^[31]。本研究发现在秋冬季自然降温过程中,崖柏和侧柏叶片中 *MDA* 含量均极显著增加,但是崖柏叶片 *MDA* 含量增幅较大,而侧柏叶片中 *MDA* 含量增幅较小,这表明在崖柏迁入地秋冬季节自然降温过程中崖柏的细胞膜系统损伤较为严重。

从日最低气温与叶片生化指标的相关分析结果(表 1、表 2)可以看出:在秋冬季节性自然降温过程中,侧柏的 *SOD*、*POD* 和可溶性糖含量与日最低气温均达到极显著相关,而崖柏仅有 *SOD* 与日最低气温达到极显著相关。由此可见,本地适生种侧柏比引入种崖柏更能够建立较完善的防御系统进行自身调节,以避免或降低低温胁迫造成的伤害。

通过获取植物原始群体的繁殖材料进行有性和无性繁殖,在原境以外适宜的生态环境中进行林分重建是保护严重濒危植物的一种方法^[32]。在这方面我国已有不少成功的先例,也有不少失败的教训。导致迁地保存和引种栽培不成功的原因很多,但对“南种北移”的树种而言,冬季低温起着很大的制约作用。崖柏幼苗的叶片在迁入地的深冬表现出明显的冻害症状,并与当地适生种侧柏形成鲜明对照,为了保证崖柏幼苗在迁入地安全越冬,须采取必要的防寒措施。随着崖柏苗龄的增加,对迁入地低温的适应能力是否会有所增强,仍有待继续观测和深入研究。

参考文献:

- [1] XIN Z, BROWSE J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 23:

- 893-902
- [2] 杨再强,张波,张继波,等.低温胁迫对番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].自然灾害学报,2012,21(4):169-174
- [3] 曹慧明,史作民,周小波,等.植物对低温环境的响应及其抗寒性研究[J].中国农业气象,2010,31(2):310-314
- [4] 王明洁,张贺,徐娜.植物季节性变化与抗寒性关系的研究进展[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2011,37(5):73-76
- [5] 靳月华,陶大力.沈阳五种针叶树的抗冻性、色素与超氧化物歧化酶[J].植物学报,1990,32(9):702-706
- [6] 谢晓金,郝日明,孙纪林.常绿阔叶树种的耐低温特性及其生态学评价[J].生态学报,2004,24(11):2671-2677
- [7] FARJON A, PAGE C N. Conifers Status survey and conservation action plan[M]. IUCN-SSC Conifer Specialist Group. Gland, Switzerland and Cambridge: IUCN, 1999
- [8] Xiang Q P, Farjon A, Li Z Y, et al. *Thuja sutchuenensis*: a rediscovered species of the Cupressaceae [J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2002, 139(3): 305-310
- [9] 王祥福,郭泉水,郝建玺,等.世界级极危物种——崖柏球果特征与出种量的研究[J].林业科学研究,2007,20(5):673-677
- [10] 刘建锋,肖文发,郭志华,等.珍稀濒危植物—崖柏种群结构与动态初步研究[J].江西农业大学学报,2004,26(3):378-380
- [11] 刘建锋,江泽平,肖文发,等.极度濒危植物—崖柏种群空间格局[J].江西农业大学学报,2005,27(5):708-712
- [12] 郭泉水,王祥福,巴哈尔古丽,等.崖柏群落维管束植物生活型组成、叶子性状及层次层片结构[J].应用生态报,2009,20(9):2057-2062
- [13] 王祥福,郭泉水,巴哈尔古丽,等.崖柏群落优势乔木种群生态位[J].林业科学,2008,44(4):6-13
- [14] 郭泉水,王祥福,巴哈尔古丽,等.崖柏群落优势乔木树种间关系[J].生态学杂志,2007,26(12):1911-1917
- [15] 王祥福,郭泉水,刘正宇,等.崖柏群落种子植物区系组成分析[J].林业科学研究,2007,20(6):755-762
- [16] 刘建锋,肖文发.濒危植物崖柏遗传多样性的 RAPD 分析[J].江西农业大学学报,2008,30(1):68-72
- [17] 张仁波,袁全丽,何平,等.濒危植物崖柏遗传多样性研究[J].广西植物,2007,27(5):687-691
- [18] 刘建锋,杨文娟,江泽平,等.遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].生态学报,2011,31(20):6000-6004
- [19] 刘建锋,杨文娟,史胜青,等.崖柏与侧柏光合特性和叶绿素荧光参数的比较研究[J].西北植物学报,2011,31(10):2071-2077
- [20] 江萍,石健,牛攀新,等.自然降温对侧柏叶抗氧化酶活性及MDA含量的影响[J].石河子大学学报:自然科学版,2009,27(1):30-33
- [21] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006
- [22] 王宝山.逆境植物生物学[M].北京:高等教育出版社,2010:5,180
- [23] 高东东,谭艳玲,马关喜,等.蝴蝶兰叶片对低温胁迫的生理响应[J].浙江大学学报,2011,37(5):509-515
- [24] 杨轶因,林玉梅,任军,等.低温胁迫对天女木兰某些生理指标的影响[J].吉林农业大学学报,2008,30(6):805-807,816
- [25] 李春燕,陈思思,徐雯,等.苗期低温胁迫对扬麦16叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J].作物学报,2011,3(12):2293-2298
- [26] Cai Q S, Wang S Z, Cui Z P, et al. Change in freezing tolerance and its relationship with the contents of carbohydrates and proline in overwintering centipede grass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.) [J]. Plant Production Science, 2004, 7(4): 421-426
- [27] Priscila M S, Escobar R, Sofia V A. Resistance to freezing in three *Eucalyptus globules* Labill subspecies [J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2006, 9(3): 310-314
- [28] 张保青,杨丽涛,李杨瑞.自然条件下甘蔗品种抗寒生理生化特征的比较[J].作物学报,2011,3(3):496-505
- [29] 何开跃,李晓储,黄利斌,等.福建柏抗寒生理指标变化的研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2002,26(5):10-14
- [30] 孙清鹏,许煌灿,张方秋,等.低温胁迫对大叶相思和马占相思某些生理特性的影响[J].林业科学研究,2002,15(1):34-40
- [31] 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
- [32] 顾万春,王棋,游天应,等.森林遗传资源学概论[M].北京:中国科学技术出版社,1998