

低温胁迫对 4 种绿化幼苗生理的影响

王卓敏¹, 周彤彤¹, 薛立^{1*}, 许建新²

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 深圳 518040)

摘要:以花旗木 *Cassia bakeriana*、海南蒲桃 *Syzygium hainanense*、铁冬青 *Ilex rotunda* 和紫楠 *Phoebe sheareri* 4 种幼苗为试验材料, 利用人工气候箱模拟低温胁迫环境, 对幼苗进行 0 d、2 d、4 d 和 6 d 的 6℃ 的低温处理及自然状态下恢复 2 d 后, 测定幼苗的生理指标, 最后用主成分分析法对其抗寒性进行综合评定。结果表明, 随着胁迫时间的延长, 花旗木的叶绿素含量持续增加, 海南蒲桃先升后降, 铁冬青先降后升, 紫楠呈现降升降的变化; 花旗木和铁冬青的可溶性糖含量趋于上升, 海南蒲桃上升后波动, 而紫楠先升后降; 花旗木、海南蒲桃和铁冬青幼苗的可溶性蛋白含量持续上升, 紫楠小幅变化; 海南蒲桃、花旗木和铁冬青的脯氨酸含量持续下降, 紫楠上升后保持稳定; 海南蒲桃、花旗木、铁冬青和紫楠的 SOD 活性在低温胁迫 2 d 后上升到最大值; 海南蒲桃、花旗木和铁冬青的 MDA 含量先升后降, 紫楠则小幅波动。主成分分析表明, 低温下幼苗的抗寒能力为花旗木 > 紫楠 > 铁冬青 > 海南蒲桃。

关键词: 幼苗; 低温胁迫; 生理指标; 主成分分析

中图分类号: S731

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)02-0209-06

Effect of low temperature stress on physiological characteristics of seedlings of four landscape species

WANG Zhuomin¹, ZHOU Tongtong¹, XUE Li¹, XU Jianxin²

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

2. Shenzhen Techand Ecology & Environment CO., LTD, Shenzhen 518040)

Abstract: Physiological characteristics of seedlings of *Cassia bakeriana*, *Phoebe sheareri*, *Ilex rotunda* and *Syzygium hainanense* were studied after they were exposed to a low temperature stress (6°C) in the Artificial Climate Box. After continuous treatments at 6°C for 0, 2, 4 and 6 days and then a recovery period of 2 days in the nature, the physiological indexes of the seedlings were determined and their cold resistance was evaluated using principal component analysis. The results showed that with increasing low temperature stress time, the chlorophyll content of *C. bakeriana* continuously increased, and that of *S. hainanense* seedlings increased followed by a decrease. In *I. rotunda*, chlorophyll decreased followed by an increase, whereas in *P. sheareri*, it decreased followed by an increase and then decreased. The soluble sugar contents in *C. bakeriana* and *I. rotunda* increased gradually, and that of *S. hainanense* seedlings increased and fluctuated, whereas in *P. sheareri* seedlings, soluble sugar increased followed by a decrease. The soluble protein contents in *C. bakeriana*, *S. hainanense* and *I. rotunda* continuously increased, and in *P. sheareri* it slightly changed. The proline contents in *C. bakeriana*, *S. hainanense* and *I. rotunda* continuously decreased, while that in *P. sheareri* increased and kept steady. The SOD activity in the seedlings of four species reached their maximum levels after a low temperature stress for 2 days. The MDA contents of *C. bakeriana*, *S. hainanense* and *I. rotunda* increased followed by a decrease and that in *P. sheareri* changed slightly. Principal component analysis indicated that the cold resistance ability of the seedlings of four species decreased in the order of *C. bakeriana* > *P. sheareri* > *I. rotunda* > *S. hainanense*.

Key words: seedling; low-temperature stress; physiological characteristics; principal component analysis (PCA)

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 深圳市战略性新兴产业专项资金项目 (GCZX20120618100801416) 资助。

作者简介: 王卓敏, 硕士研究生。

* 通信作者: 薛立, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: forxue@scau.edu.cn

园林绿化树种以其特有的景观功能和环境保护作用在城镇建设中发挥越来越重要的作用。低温是限制绿化树种生长发育和地理分布的重要限制因子。有关研究表明,低温引起细胞膜透性发生变化,胞内溶液外渗^[1],影响叶绿素的合成^[2]。超氧化物歧化酶(SOD)是植物细胞中保护膜系统的清除活性氧的酶,丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终产物,二者是低温胁迫时反映细胞膜伤害程度的重要指标^[3]。植物为了适应低温环境产生一系列生理变化,例如积累可溶性糖和脯氨酸以增强渗透调节的能力^[4],叶绿素和SOD活性增加^[5]。

对于植物的抗寒生理已有较多的研究^[6-10],但是这些研究缺乏对植物生理指标的综合评价,因而难以对不同植物的抗寒能力进行排序。有关研究者用主成分分析综合评价植物抗逆性,探索了评价植物抗逆能力的新途径^[3,11-13]。花旗木(*Cassia bakeriana*)、铁冬青(*Ilex rotunda*)、海南蒲桃(*Syzygium hainanense*)和紫楠(*Phoebe sheareri*)是热带、亚热带地区重要的园林绿化树种。目前对以上树种的研究包括海南蒲桃的光合作用效率^[14]、抗SO₂污染能力^[15],抗臭氧与干旱交叉胁迫^[16]、铁冬青幼苗的重金属铅胁迫^[17]和SO₂胁迫生理^[15,18]、光合生理^[19]、低温胁迫的电导率^[20]以及紫楠栽培技术^[21],尚未见到以上树种抗寒生理比较的研究。作者对这一内容进行研究,并用主成分分析对其抗寒能力进行排序,可以为园林绿化抗寒树种的筛选提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验在华南农业大学校园(处东经113°34',北

纬23°16')进行。试验场所属于南亚热带季风气候,年平均气温21.8℃,年平均降雨量1714.4 mm,4-9月占年降雨量的82%,年均相对湿度79%^[22]。

1.2 材料

试验用幼苗包括花旗木、海南蒲桃、铁冬青和紫楠4种苗木均为来自深圳市铁汉有限公司的1年生实生苗。试验幼苗置于华南农业大学林学与风景园林学院六楼的温室生长30 d后,采集叶片在该学院的林学实验室进行生理指标测定。实验开始时4种幼苗的基本概况如表1。

1.3 方法

1.3.1 幼苗处理 2014年6月初,将一部分幼苗放于室外正常条件下(平均温度为30℃±2℃)生长30 d后作为对照,另一部分苗木放于RXZ智能型人工气候箱(宁波江南仪器厂)内,光照时间为8:00—17:00,光照强度为120 mmol·m⁻²·s⁻¹,相对湿度设为80%~85%,并于(6±0.5)℃低温处理,6℃·h⁻¹降温,当温度降至6℃时,分别在低温处理后的第0天、第2天、第4天和第6天选取每种幼苗5株个体,采集顶叶往下第3~8片成熟叶,擦净叶片表面污物,叶片除去中脉并剪碎混合均匀后制样,测定其生理指标,每个指标做3个重复^[5]。进行苗木生长恢复处理时,将低温处理6 d幼苗移到室外,在自然条件下恢复生长2 d后,采集叶片,测定各项生理指标。

1.3.2 生理指标测定 叶绿素总含量的测定用分光光度法进行^[23],脯氨酸含量用酸性茚三酮法,SOD用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化还原法,丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法测定^[24],可溶性蛋白质含量和可溶性糖含量的测定分别用考马斯亮蓝法和蒽酮比色法^[25]。

表1 4种幼苗的基本情况

Table 1 General characteristic of the seedlings of four species

试验幼苗 Tested seedling	平均地径 Mean ground diameter	平均苗高 Mean height	平均冠幅 Mean crown width
花旗木 <i>Cassia bakeriana</i>	0.38±0.03	30.5±3.2	20.3±3.0
海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i>	0.56±0.20	54.9±1.3	25.9±0.2
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	0.50±0.01	34.5±2.5	14.5±2.6
紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>	0.99±0.06	33.9±2.3	22.9±3.1

注:表中数据为平均值±标准差。Note: the data in the table are average value ± SD.

1.3.3 数据分析 本研究试验结果采用主成分分析方法进行综合评定。主成分分析在抗性综合评价中,不仅可以判断出各品种的抗性强弱,还可以分析出指标对抗寒性的权重或贡献率,同时主成分分析消除共线性后产生彼此不相关的一组新指标(主成分),对新指标可以进一步分析讨论。在运用主成分

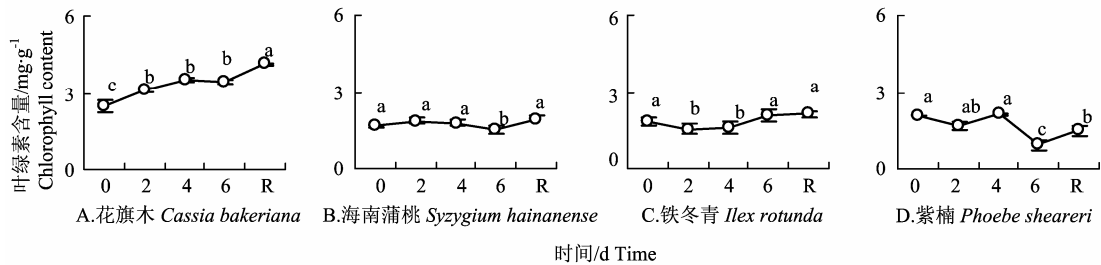
分析法进行综合评价时,首先将生理指标进行数据标准化,其公式为:

$$X = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, X 为标准化后所得数据, x 为某项指标的原始数据, x_{\min} 为某项指标原始数据的最小值, x_{\max}

为某项指标原始数据的最大值。对标准化后的数据进行主成分分析, 当累积贡献率达 85% 以上时确定主成分个数^[26]。根据生理指标与抗寒性的联系, 由主成分的特征向量可计算出每个树种的主成分得分, 各个主成分之间相互独立且有着不同的贡献率, 每个成分的得分就是其加权值, 其中权重就是主成分对应的贡献率。利用得到的因子总得分来对 4 个树种的抗寒性进行对比分析, 得分大的树种其抗寒性强。

数据统计分析和作图由 Microsoft Excel 和 SAS8.1 软件系统完成。



图中 a、b、c 和 d 为多重比较结果, 相同字母表示差异不显著。下同

a, b, c and d are the results of multiple comparisons, and the same letter means no significant difference. The same below

图 1 低温胁迫下对幼苗叶片叶绿素含量的影响

Figure 1 Effect of low temperature stress on the chlorophyll content in seedling leaves of the examined plants

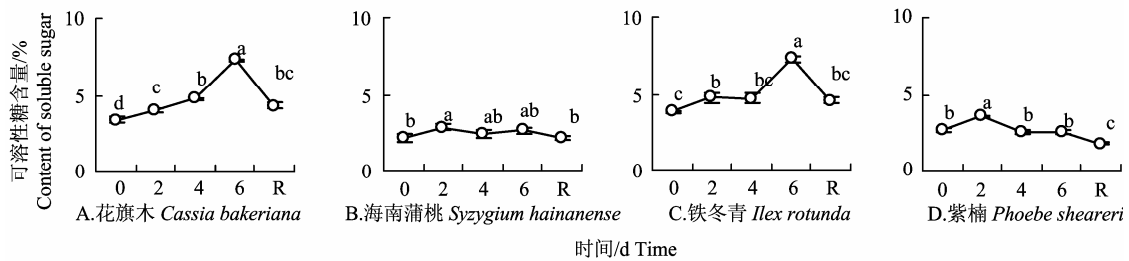


图 2 低温胁迫下对幼苗叶片可溶性糖含量的影响

Figure 2 Effect of low temperature stress on the content of soluble sugar in seedling leaves of the examined plants

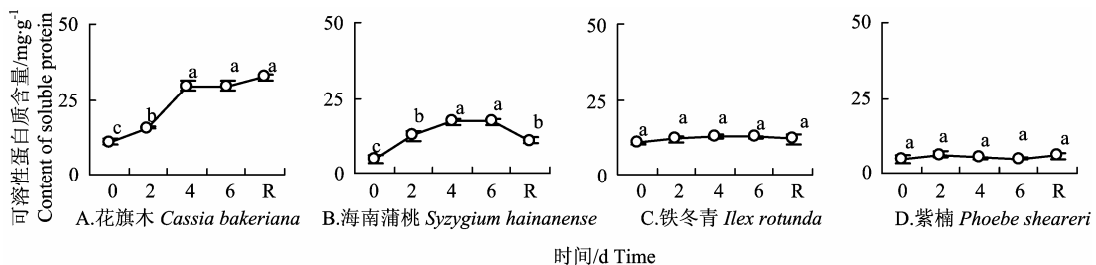


图 3 低温胁迫下对幼苗叶片可溶性蛋白质含量的影响

Figure 3 Effect of low temperature stress on the content of soluble protein in seedling leaves of the examined plants

2.2 低温胁迫对幼苗可溶性糖含量的影响

持续低温胁迫下, 花旗木和铁冬青的可溶性糖含量趋于上升, 海南蒲桃上升后波动, 和紫楠先升后降 (图 2)。低温处理 6 d 时, 花旗木、海南蒲桃和铁冬青幼苗叶片的可溶性糖含量分别比对照增加

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对幼苗叶绿素含量的影响

由图 1 可知, 低温胁迫的花旗木的叶绿素含量持续增加。海南蒲桃先升后降, 铁冬青先降后升, 紫楠呈降升降的变化。低温处理 6 d 时, 花旗木和铁冬青幼苗叶片的叶绿素含量分别比对照增加了 36.6% 和 14.0%, 而海南蒲桃和紫楠分别减少了 8.0% 和 53.9%。进行 2 d 的恢复处理后, 花旗木叶绿素含量比对照增加了 64.4%, 海南蒲桃增加了 18.4%, 铁冬青增加了 17.6%, 紫楠减少了 27.7%。

了 114.9%、21.8% 和 89.0%, 紫楠比对照降低了 7%。恢复处理 2 d 后, 花旗木、海南蒲桃、铁冬青和紫楠分别比对照降低 27.4%、2.2%、19.2% 和 32.7%。

2.3 低温胁迫对幼苗可溶性蛋白含量的影响

随着低温胁迫时间的延长, 花旗木、海南蒲桃

和铁冬青幼苗的可溶性蛋白含量持续上升,紫楠呈小幅变化(图3)。低温处理6d时,花旗木、海南蒲桃、铁冬青和紫楠幼苗叶片的可溶性蛋白含量分别比对照增加了172.6%、275.8%、19.2%和4.2%。恢复处理2d时,花旗木和海南蒲桃幼苗的可溶性蛋白含量显著增加($P<0.05$)。

2.4 低温胁迫对幼苗脯氨酸含量的影响

随着低温胁迫时间的延长,海南蒲桃、花旗木

和的脯氨酸含量持续下降,紫楠上升后保持稳定(图4)。低温处理6d时,花旗木、海南蒲桃和铁冬青紫楠幼苗叶片的脯氨酸含量分别比对照减少了46.3%、86.4%、89.2%和4.2%,而紫楠幼苗叶片增加了629.3%。恢复处理2d后,花旗木的脯氨酸含量显著增加,但是仍然显著小于对照($P<0.05$),铁冬青显著下降,其余幼苗无显著变化。

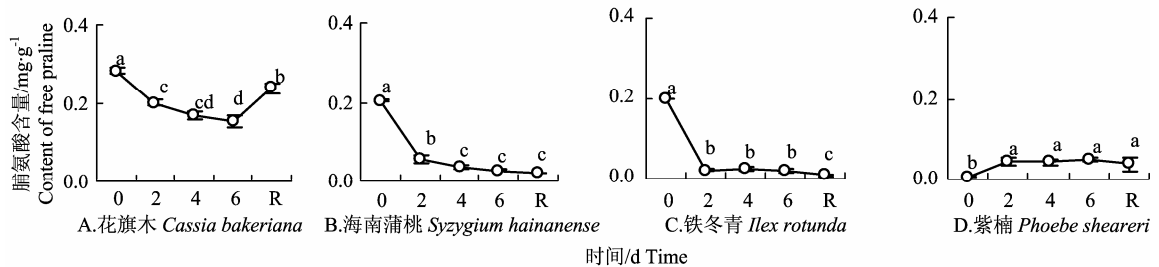


图4 低温胁迫对幼苗叶片脯氨酸含量的影响

Figure 4 Effect of low temperature stress on the content of free proline in seedling leaves of the examined plants

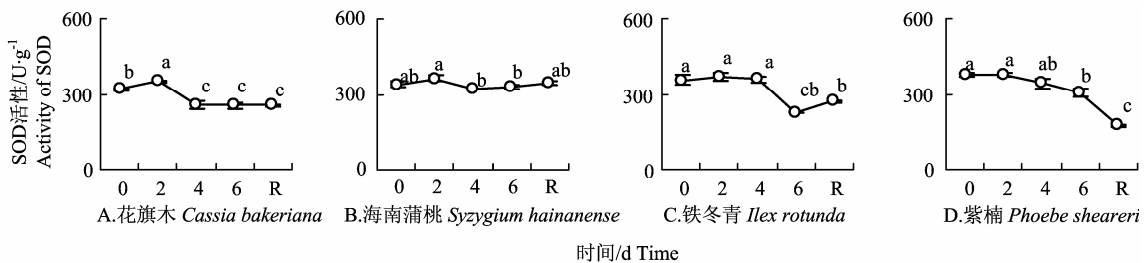


图5 低温胁迫下对幼苗叶片SOD含量的影响

Figure 5 Effect of low temperature stress on the activity of SOD in seedling leaves of the examined plants

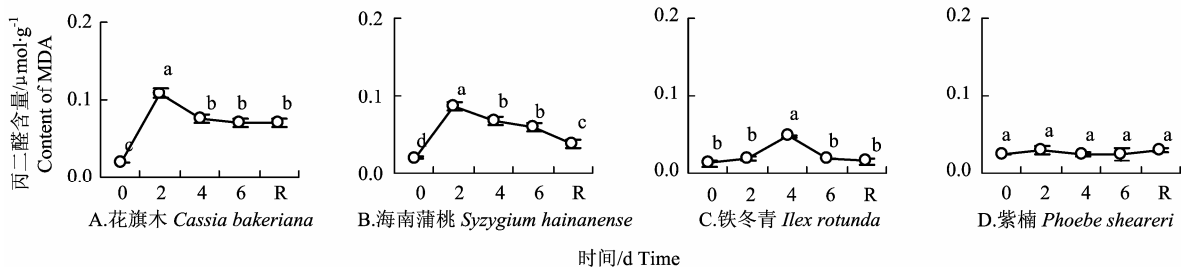


图6 低温胁迫下对幼苗叶片丙二醛含量的影响

Figure 6 Effect of low temperature stress on the content of MDA in seedling leaves of the examined plants

表2 低温胁迫下4种幼苗生理指标主成分分析

Table 2 Principal component result of physiological indicators for seedlings under temperature stress

项目 Item	花旗木 <i>Cassia bakeriana</i>	紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>	铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i>
主成分分析得分 Score by principal component	3.15	1.48	1.41	1.29
抗寒位次 Order for cold resistance	1	2	3	4

2.5 低温胁迫对幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

由图5知,海南蒲桃、花旗木、铁冬青和紫楠的幼苗叶片的SOD活性在低温胁迫2d时上升到最大值,此后下降。低温处理6d时,4种幼苗叶片

的SOD活性分别比对照减少了20.4%、2.9%、37.1%和19.1%。恢复处理2d后,除了海南蒲桃外,均显著小于对照($P<0.05$)。

2.6 低温胁迫对幼苗丙二醛含量的影响

由图6知,随着低温胁迫时间的延长,海南蒲

桃、花旗木和铁冬青幼苗叶片的 MDA 含量均先升后降, 紫楠则小幅波动。低温处理 6 d 时, 4 种幼苗叶片的 MDA 含量分别比对照增加了 258.7%、203.5%、52.4% 和 0.7%。恢复处理 2 d 后, 海南蒲桃下降, 其余幼苗变化不大, 海南蒲桃和花旗木幼苗的 MDA 含量显著大于对照 ($P < 0.05$)。

2.7 主成分分析法对 4 种幼苗抗寒性的综合评价

在低温胁迫的环境下, 植物的抗逆反应是一个复杂的生理生化和生态过程, 根据所有生理生化指标的综合表现才能对其抗寒性的强弱作出全面且准确的评价, 所以主成分综合评价因其全面性、可比性、合理性和可行性^[27] 常被用作评价林木抗寒性的方法之一^[28]。由表 2 的 4 种幼苗的主成分得分可知, 幼苗抗寒性为花旗木 > 紫楠 > 铁冬青 > 海南蒲桃。

3 讨论

3.1 植物抗寒性与叶绿素含量的关系

叶绿素作为光合作用中重要的色素分子, 决定植物光合作用的强弱, 进而影响植物生长和代谢。在本研究中, 花旗木幼苗叶片的叶绿素含量呈增加趋势, 说明其对低温的适应性。海南蒲桃在低温胁迫前 4 d 高于对照, 说明其短时期内表现出对低温的适应性, 而紫楠幼苗叶片的叶绿素含量在低温胁迫 6 d 后与均显著低于对照, 说明此时可能受到低温伤害, 这与陆新华等^[29]的研究结果一致, 原因可能是低温加剧了叶绿体的降解且抑制其合成^[8]; 低温胁迫下叶绿素合成受阻, 或者叶绿体功能紊乱加速叶绿素的分解和损害叶绿体形态结构^[9]。花旗木和铁冬青在低温胁迫 6 d 时的叶绿素含量的上升, 说明幼苗一定时期对低温的适应。恢复处理 2 d 后, 4 种幼苗的叶绿素含量比低温胁迫 6 d 均增加, 说明花旗木以外的幼苗叶绿素含量变化是可逆的, 低温解除后有一定的恢复能力。

3.2 植物抗寒性与可溶性糖含量的关系

可溶性糖与植物在逆境胁迫下渗透调节有关, 是冷害和冻害条件下的细胞内保护物质, 其含量与植物的抗冷性之间成正相关^[5]。在本试验中, 低温处理 2 d 时 4 种幼苗的可溶性糖含量均上升, 原因可能是植物在不同环境条件下, 合成可溶性糖供体的酶受到光和代谢物两者的调节影响, 不能正常合成可溶性糖, 而是低温下部分淀粉转化为可溶性糖。随着低温胁迫的延长, 花旗木和铁冬青幼苗的可溶性糖含量呈上升。植物体内的可溶性糖可以提高细胞液浓度, 降低水势, 增加保水能力, 降低冰点, 避免细胞遇冷凝固, 维持膜的正常功能, 保护原生

质、冻敏感蛋白、偶联因子等, 从而提高植物的抗寒能力^[30]。可溶性糖含量的增加使细胞的原生质浓度增大, 避免了细胞遇冷凝固, 增加了其抗冷性。

3.3 植物抗寒性与可溶性蛋白质含量的关系

可溶性蛋白是低温胁迫下重要的渗透调节物质之一。花旗木幼苗的可溶性蛋白质含量呈上升趋势的原因可能是由于可溶性蛋白质降解速率下降或合成速率的加强所致, 可溶性蛋白质可以增强细胞的持水力和束水性, 避免了原生质结冰而致死, 从而提高了植物的抗寒性。海南蒲桃幼苗的可溶性蛋白质含量先上升后趋于平缓, 说明在低温胁迫初期可溶性蛋白质含量的增加缓解了低温带来的伤害。铁冬青和紫楠幼苗的可溶性蛋白质含量变动不显著, 表明其可溶性蛋白质对低温胁迫反应不敏感。

3.4 植物抗寒性与脯氨酸含量的关系

植物体内脯氨酸是重要的渗透调节物质, 其含量的增加可以避免低温胁迫对细胞膜的伤害。本研究中, 花旗木、海南蒲桃和铁冬青幼苗各胁迫时间的脯氨酸含量均低于对照, 且在低温胁迫 2 d 后脯氨酸含量明显下降, 说明其幼苗对低温适应性较差。低温胁迫解除 2 d 后, 花旗木幼苗的脯氨酸含量上升, 紫楠幼苗稳定, 海南蒲桃和铁冬青继续下降, 说明花旗木幼苗的恢复能力较强, 海南蒲桃和铁冬青的抗寒能力和恢复能力弱。

3.5 植物抗寒性与超氧化物歧化酶活性的关系

植株体内的抗氧化酶 SOD 是存在于植物细胞中清除植物体内过量活性氧的酶之一, 在维持活性氧代谢平衡、保护膜结构, 保护植物抵抗低温逆境胁迫时发挥重要作用^[6], 其活性的高低与植物的抗寒性强弱有密切的关系^[31]。与对照相比, 4 种幼苗在受到低温胁迫 2 d 的 SOD 活性都有不同程度的上升, 说明其细胞内活性氧含量超出正常水平, 可以加强清除自由基的能力, 减缓细胞内多余的自由基对细胞伤害的速度与程度。随着胁迫时间持续, 4 种幼苗的 SOD 活性显著下降, 表明其细胞体内的自由基产生速度加快, 清除活性氧和自由基的功能随之下降, 幼苗受到低温伤害加剧, 这与陈星^[32]和滕开琼等^[33]的研究结果相似。

3.6 植物抗寒性与丙二醛的关系

MDA 作为植物膜脂过氧化作用的产物, 损害质膜, 引起对酶和膜的严重损伤, 最终破坏膜结构及植物生理的完整性^[34], 常被用来作为植物逆境的指标之一。随着低温胁迫时间的延长, 紫楠的 MDA 含量稳定, 可能是其具有一定抵御膜脂过氧化作用的能力。其他幼苗都呈先上升后下降的趋势。花旗木

和海南蒲桃幼苗的MDA含量在低温处理2d时上升至最高,而铁冬青幼苗在4d时达到最大值,可能是对低温胁迫的适应性反应,也有可能是细胞内产生了缓解膜质过氧化物质,减弱了膜脂过氧化作用^[35]。

3.7 植物抗寒性的综合评价

在漫长的进化过程中,植物对低温抗逆反应逐渐形成了一套适应低温逆境的生理生化机制。对4种不同幼苗抗寒性的各指标测定中发现,有些幼苗的某些指标显示其抗寒能力强,但在另一些指标中,却表现出抗寒能力不突出。所以,单一指标很难准确地评价某一树种的抗寒能力,而用主成分分析可以综合评价植物抗性。何跃君等^[5]和邵怡若等^[3]成功地将主成分分析用于植物抗寒生理指标的评价,冯慧芳等^[11]、谭雪红等^[12]和卢广超等^[13]成功地将主成分分析用于植物抗旱生理指标的评价。在本研究运用主成分分析对测定的6个生理指标进行综合评定,结果表明4个树种的抗寒性为花旗木>紫楠>铁冬青>海南蒲桃,该顺序与幼苗的大多数生理指标的表现相同,再次表明了主成分分析作为评价植物抗逆生理指标的有效性。

参考文献:

- [1] 黄永红,沈洪波,陈学森. 杏树抗寒生理研究初报[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 191-195.
- [2] 任向荣,薛立,谢腾芳,等. 低温对6种绿化树种幼苗生理过程的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(6): 56-60.
- [3] 邵怡若,许建新,薛立,等. 低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4237-4247.
- [4] 徐燕,薛立,屈明. 植物抗寒性的生理生态学机制研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 88-94.
- [5] 何跃君,薛立,任向荣,等. 低温胁迫对六种苗木生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 524-531.
- [6] 刘慧英,朱祝军,吕国华. 低温胁迫对嫁接西瓜耐冷性和活性氧清除系统的影响应用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 659-662.
- [7] 龚月桦,周永学,樊军锋,等. 美国黄松、班克松和油松的抗寒性比较[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1389-1392.
- [8] 杜永吉,于磊,孙吉雄,等. 结缕草3个品种抗寒性的综合评价[J]. 草业学报, 2008, 17(3): 6-16.
- [9] 张志,王世发,徐洪国,等. 低温胁迫对高羊茅生长影响的研究[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 185-188.
- [10] 郝强,张睿鹏,冷平生,等. 北海道黄杨叶片应答低温胁迫的蛋白质组分析[J]. 园艺学报, 2011, 38(11): 2169-2179.
- [11] 冯慧芳,薛立,任向荣,等. 4种阔叶幼苗对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 371-382.
- [12] 谭雪红,高艳鹏,郭小平,等. 五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5076-5086.
- [13] 卢广超,许建新,薛立,等. 干旱胁迫下4种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7872-7881.
- [14] 黄娟,吴彤,孔国辉,等. 油页岩废渣地12种木本植物光合作用的季节变化[J]. 植物生态学报, 2006, 32(4): 666-674.
- [15] 张卫强,甘先华,殷祚云,等. 二氧化硫胁迫对园林植物幼苗生理生态特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 34(6): 247-253.
- [16] 郝云亭,林敏,薛立,等. 臭氧与干旱胁迫对海南蒲桃和盆架子幼苗光合生理的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(2): 193-197.
- [17] 胡仲义,李修鹏. 铅胁迫对全缘冬青幼苗生长与生理的影响[J]. 江苏林业科技, 2008, 28(1): 19-22.
- [18] 温达志,陆耀东,旷远文,等. 39种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 27(4): 341-347.
- [19] 王利英,楼炉煊,王慧,等. 3种冬青气体交换参数及叶绿素荧光特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7104-7106.
- [20] 毛志滨,谢晓金,汤庚国. 7种冬青树种耐低温能力比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 15(1): 33-36.
- [21] 刘伟,陈正金,李因刚,等. 3个阔叶树种容器育苗轻型基质配方探讨[J]. 浙江林学院学报, 2010, 32(5): 803-808.
- [22] 薛立,张柔,奚如春,等. 华南地区6种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 123-134.
- [23] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 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.
- [25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 195-197, 2000.
- [26] 区靖祥,邱健德. 多元数据的统计分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [27] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2003.
- [28] 张柔,许建新,薛立,等. 低温胁迫和解除对4种阔叶幼苗生理特征的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(3): 419-425.
- [29] 陆新华,孙光明,叶春梅. 低温胁迫对菠萝幼苗膜透性·丙二醛和叶绿素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(16): 8374-8375.
- [30] 沈漫,王明麻,黄敏仁. 植物抗寒机理研究进展[J]. 植物学通报, 1997, 14(2): 1-8.
- [31] 周瑞莲,赵哈林. 高寒山区草本植物的保护酶系统及其在低温生长中的作用[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 566-573.
- [32] 陈星,李俊全,王君玲,等. 低温下棕榈某些生理变化及低温锻炼对棕榈耐寒性的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1999, 35(2): 257-260.
- [33] 滕开琼,杨秋生,戴钢,等. 低温胁迫对黑壳楠幼苗生理效应及脂质过氧化作用的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 151-154.
- [34] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84-90.
- [35] 霍君生,佟代言,刘彩莉,等. 鸭梨果心褐变过程中膜质过氧化及细胞内膜微粘度的变化[J]. 园艺学报, 1995, 22(3): 221-224.