

# 北京地区引种七叶树苗期对低温胁迫的生理响应

刘春和<sup>1</sup>, 冯天爽<sup>1</sup>, 彭祚登<sup>2\*</sup>, 姚妮尔<sup>2</sup>, 张青<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京市黄垆苗圃, 北京

<sup>2</sup>北京林业大学林学院, 北京

Email: 1113410152@qq.com, \*zuodeng@sina.com

收稿日期: 2021年2月25日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月31日

## 摘要

天然生长于我国秦岭地区的七叶树在北京地区栽培存在幼龄期对冬季低温的适应性问题。研究以陕西汉中七叶树1年生幼苗为试验材料, 通过人工模拟温控环境处理试验, 选取七叶树苗木枝条内测定在-20℃~0℃下可溶性蛋白等8个生理指标的变化, 为七叶树幼苗在北京地区冬季越冬防寒措施的制定提供参考依据。结果表明, 七叶树幼苗低温半致死温度为 $LT_{50} = -25.46^{\circ}\text{C}$ ; 随着温度的降低, 相对电导率、丙二醛呈上升趋势; 在低温胁迫下, 七叶树的相对电导率具有  $y = \frac{1}{1 + 2.093e^{-0.0297}}$  的变化规律; 渗透调节系统中的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量随着温度的降低逐渐增加, 脯氨酸含量增幅高达63.87%; 温度在-15℃~0℃之间, 保护酶系统中的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)在-5℃以下低温环境下存在活性减弱甚至失活的变化, 其中超氧化物歧化酶在-5℃以内, 其活性无显著变化, 过氧化氢酶和过氧化物酶在-10℃以内无显著变化。研究表明, 北京地区冬季低温环境对原产秦岭地区的七叶树1年生幼苗具有一定的影响, 冬季苗木户外越冬需要采取防寒措施。

## 关键词

七叶树, 低温胁迫, 抗寒性, 生理响应

## Physiological Response to Low Temperature Stress in Seedling Stage of Introduction of *Aesculus chinensis* in Beijing Area

Chunhe Liu<sup>1</sup>, Tianshuang Feng<sup>1</sup>, Zuodeng Peng<sup>2\*</sup>, Nier Yao<sup>2</sup>, Qing Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Huangfa Nursery, Beijing

\*通讯作者。

文章引用: 刘春和, 冯天爽, 彭祚登, 姚妮尔, 张青. 北京地区引种七叶树苗期对低温胁迫的生理响应[J]. 植物学研究, 2021, 10(2): 184-195. DOI: 10.12677/br.2021.102027

<sup>2</sup>Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing  
Email: 1113410152@qq.com, \*zuodeng@sina.com

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

The adaptation of young age to low temperature in winter in Beijing is a problem in the cultivation of *Aesculus chinensis* Bunge naturally grown in Qinling region of China. The experimental materials is 1-year-old seedling of *Aesculus chinensis* in Hanzhong, Shaanxi Province by artificial simulation of temperature control environment treatment test, the annual dormant shoots of *Aesculus chinensis* was used to measure its physiological response to low temperatures from 0 to  $-20^{\circ}\text{C}$  using eight indices such as soluble protein, etc. The aim is to provide reference for the establishment of winter cold prevention measures for *Aesculus chinensis* seedlings in Beijing. The results are shown that under low temperature stress, the regression equation of relative conductivity of *Aesculus chinensis* Bunge was  $y = \frac{1}{1 + 2.093e^{-0.029t}}$ ; low temperature semi-lethal temperature of seedling of *Aesculus chinensis* LT<sub>50</sub> =  $-25.46^{\circ}\text{C}$ , the relative conductivity and malonaldehyde increased with the decrease of temperature, and the content of soluble sugar, soluble protein and proline in osmotic regulation system increased with the decrease of temperature, and the content of proline increased up to 63.87%. The superoxide dismutase, catalase and peroxidase in protective enzyme system played a certain role at temperatures ranging from  $-15^{\circ}\text{C}$  to  $0^{\circ}\text{C}$ , and at low temperatures below  $-5^{\circ}\text{C}$  there are changes in activity weakening or even deactivation, in which the activity of superoxide dismutase did not change significantly within  $-5^{\circ}\text{C}$ , catalase and peroxidase did not change significantly within  $-10^{\circ}\text{C}$ . It is concluded that the low temperature environment in winter in Beijing area has a certain influence on the annual seedlings of *Aesculus chinensis* in the native Qinling area and winter seedling outdoor overwintering needs to take cold prevention measures.

## Keywords

*Aesculus chinensis* Bunge, Low Temperature Stress, Cold Resistance, Physiological Response

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

植物的抗寒性是物种长期适应低温环境的结果, 具遗传性[1]。抗寒性基因的表达与环境的变化和植物的生理活动息息相关[2]。相关研究表明, 抗寒性与植物的细胞膜和渗透调节物质的含量及酶保护系统的活性等生理活动有关联[3] [4] [5] [6]。植物处于恶劣环境时, 自身能通过保护酶系统和渗透调节系统等来维持细胞内物质的相对平衡, 从而适应或抵抗逆境。故可通过测量生理指标的动态变化来反映植物的抗性大小[7] [8]。目前, 植物的抗寒性一般是通过测定生理生化指标, 观察植物细胞的显微结构和利用分子生物技术对抗寒性基因进行测序等来研究。陈凯等[9]研究望天树幼苗在  $0^{\circ}\text{C}$  低温胁迫不同时间, 观察其外部形态并测定生理指标, 发现  $0^{\circ}\text{C}$  处理 2 d 可作为早期筛选耐寒材料的时间节点, 其幼苗在遭受低温胁迫后具有一定的自我修复机制。伍宝朵等[10]发现低温胁迫时间越长, 胡椒叶片中海绵组织和栅栏组织

受伤加剧,叶片厚度减小。李瑞雪等[11]发现抗寒性基因激活与表达是影响木兰科植物的重要因素,不同抗寒性的植物在低温胁迫下的应答机制有所差异。

七叶树(*Aesculus chinensis* Bunge)是具有重要观赏价值的园林绿化树种,其天然分布于我国秦岭海拔700 m以下山地[12]。近年来,七叶树在北京市园林绿化中的引种栽培增加,但是由于北方冬季气温低,栽植初期冻害时常发生,大面积推广应用仍具有疑虑,因而有关七叶树冻害适应机理的研究也受到关注。目前七叶树抗寒性研究主要集中在与其他树种的比较上,如缴丽莉等[13]曾以七叶树和马褂木幼树1年生枝条为材料,经低温冷冻后,测定枝条的相对电导率和 $K^+$ 相对渗透率,计算出各树种的半致死温度,结果表明马褂木的抗寒能力较七叶树强。杜艳[14]对比研究了七叶树和红花七叶树(*Aesculus pavia*)1年生实生苗的抗寒性,发现红花七叶树抗寒性较七叶树强。赵媛媛等[15]通过测定低温下日本厚朴、山樱和美国七叶树实生苗的生理指标,发现游离脯氨酸含量与外渗电导率变化明显,认为可作为鉴定日本厚朴、山樱和美国七叶树抗寒性。

观察发现,在北京地区引种栽培的七叶树幼苗冬季冻害首先发生在其1年生枝条上。为了探究七叶树在冬季低温下的生理响应,本研究结合在北京地区引进的陕西汉中地区的七叶树,选取1年生幼苗休眠枝条为材料,根据北京冬季极端低温环境设置低温胁迫控制处理条件,测定其电导率和丙二醛,过氧化氢酶等8个生理指标,分析其变化规律,为七叶树抗寒分子机理、抗寒品种选择及在北京地区栽培制定越冬防寒措施提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 材料

试验材料种源来自陕西汉中。取1年生七叶树优良实生苗木,春季移植在北京市大东流苗圃,苗木平均苗高( $57.78 \pm 5.50$ ) cm,平均地径( $16.00 \pm 1.08$ ) mm。移植分露地若干和15株盆栽苗,常规管理。

### 2.2. 低温处理

温度设置5个水平为0℃(对照)、-5℃、-10℃、-15℃、-20℃,每个处理取15根枝条,重复4次。

2017年2月末进行枝条采集,取当年生枝条若干,粗度在0.5~0.8 cm,剪成10~20 cm长的枝段,用湿报纸和无纺布进行内外包裹。枝条用清水洗净后用负离子水冲洗、晾干表面水分后,用石蜡将两端封口,在湿润情况下用保鲜膜包裹,放入5℃冰箱保存待用[5]。在低温处理时,将所采枝条用滤纸擦干后置于可控低温冰箱进行低温胁迫处理,降温速度设置为4℃/h,降到预设温度后维持24 h,之后再以4℃/h的速度逐渐升温至4℃。

### 2.3. 指标测定

过氧化氢酶活性采用分光光度计法;过氧化物酶活性采用愈创木酚法;超氧化物歧化酶活性采用氮蓝四唑(NBT)法;相对电导率采用电导仪法[16];丙二醛含量采用Adriano的硫代巴比妥酸显色法测定[17];脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定[16];可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定[18]。

半致死温度测定:低温处理对七叶树幼苗的影响试验中,在处理温度保持24 h后取出,待解冻后将枝条剪成小段测定电导率,通过logistic回归拟合曲线方程[19]。

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (1.3.1)$$

式中:

$y$ ——相对电导率;

$t$ ——温度;

$k$ ——相对电导率饱和值, 为 1。

$a, b$ ——待定参数。

求半致死温度时, 对上式求二阶导数, 并令其为 0, 求拐点温度, 化简得:

$$LT_{50} = \frac{\ln a}{b} \quad (1.3.2)$$

此温度即为七叶树幼苗半致死温度。

## 2.4. 数据处理

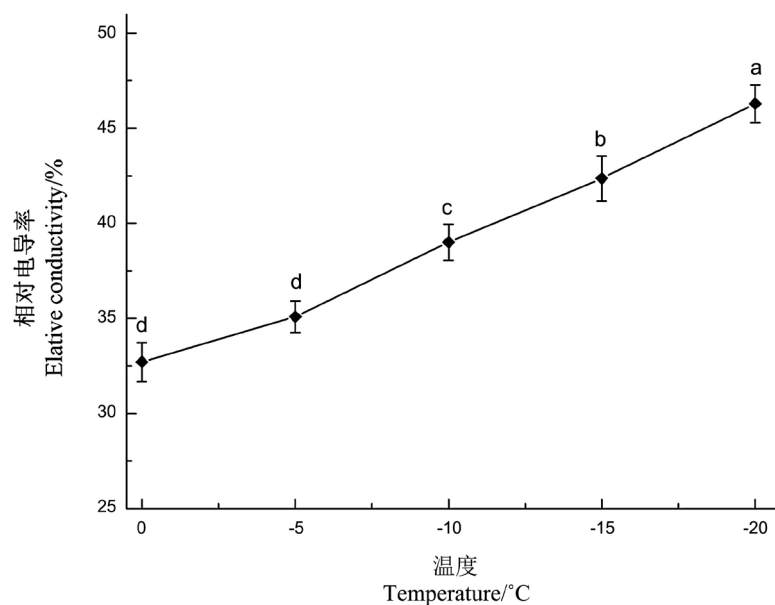
采用 SPSS24.0 进行统计计算和方差分析, 其中相对电导率通过反正弦转换进行方差分析, 差异显著性采用 SPSS24.0 中的方差分析进行检验( $P < 0.05$ ), 多重比较采用邓肯氏新复极差法, 利用 Origin8.0 进行图像绘制。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 低温胁迫对细胞膜透性的影响

#### 3.1.1. 低温胁迫对相对电导率影响及半致死温度的确定

低温环境让植物的细胞膜最先受影响, 以致其膜的通透性变大, 引起细胞电解质大量渗出[19]。电解质的外渗, 引起细胞膜内外的渗透势变化, 导致相对电导率(Rec)改变。低温胁迫下, 植物膜内外的渗透势差越大, 其 Rec 变化越大, 说明植物的耐寒性越差。由图 1 可知, 随着温度的降低, 七叶树幼苗 Rec 呈现上升趋势:  $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  上升较为平缓, 差异不显著( $P < 0.05$ ), 表明七叶树在该温度范围内受低温影响较小; 其他各处理下急剧上升, 差异显著。



不同小写字母表示低温胁迫对七叶树幼苗在 0.05 水平下有显著差异, 下同。

**Figure 1.** The changes in Elative Conductivity of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

**图 1.** 低温胁迫对七叶树 Rec 的影响

低温半致死温度(LT<sub>50</sub>)是直观反映植物抗寒性的指标之一, 其值越低, 说明植物的抗寒性越强。通过对七叶树幼苗的相对电导率的计算, 得到 logistic 方程的各参数及 LT<sub>50</sub>。以温度( $t$ )为自变量, 以相对电导率( $y$ )为因变量, 得到七叶树幼苗相对电导率回归方程为:  $y = \frac{1}{1 + 2.093e^{-0.029t}}$ ,  $R^2 = 0.996$ ,  $LT_{50} = -25.46^\circ\text{C}$ 。当温度低于 $-25.46^\circ\text{C}$ 时, 七叶树幼苗受到的伤害将不可恢复。

### 3.1.2. 低温胁迫对丙二醛的影响

丙二醛(MDA)是低温条件下植物膜质的过氧化物产物, 是反映植物抗寒性强弱的指标之一, 其含量的变化趋势与电导率一样。由图 2 可知, 随着温度的降低, 七叶树幼苗 MDA 含量逐渐增加。在  $0\sim 5^\circ\text{C}$  和  $-10^\circ\text{C}\sim -15^\circ\text{C}$  时, MDA 变化较为平稳, 差异均不显著( $P < 0.05$ );  $-5^\circ\text{C}\sim -10^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}\sim -20^\circ\text{C}$  时, 急剧上升, 且差异显著( $P < 0.05$ )。在  $-10^\circ\text{C}$  和  $-20^\circ\text{C}$  处理下, MDA 含量急速增加, 表明在  $-5^\circ\text{C}\sim -10^\circ\text{C}$  的温度范围内, 幼苗开始受到迫害,  $-15^\circ\text{C}\sim -20^\circ\text{C}$  之间, 已经受到严重迫害。

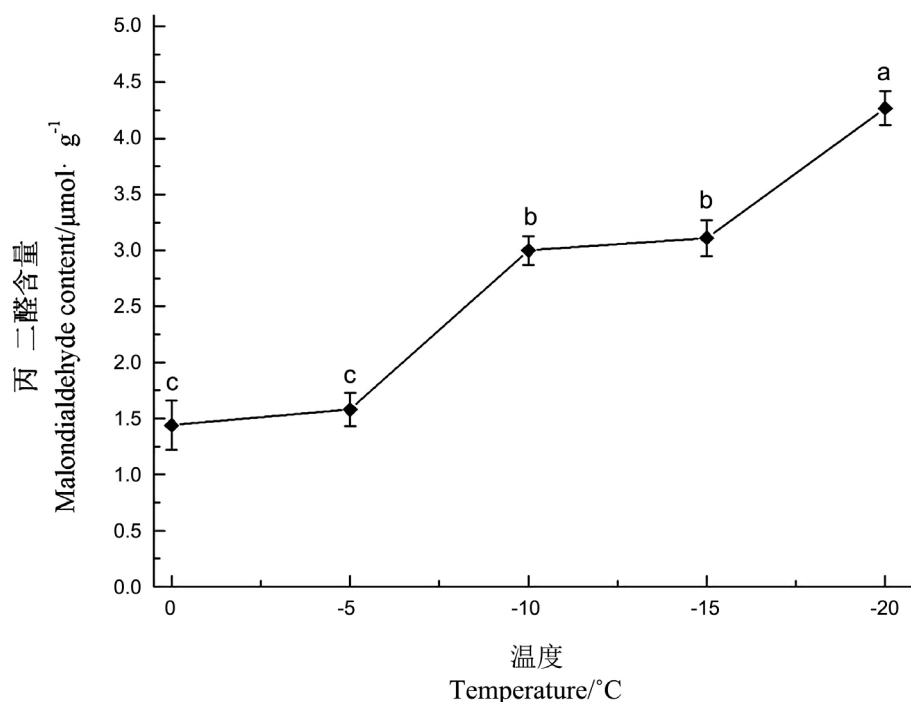


Figure 2. The changes in malondialdehyde contents of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

图 2. 低温胁迫对七叶树 MDA 含量的影响

## 3.2. 低温胁迫对保护酶活性的影响

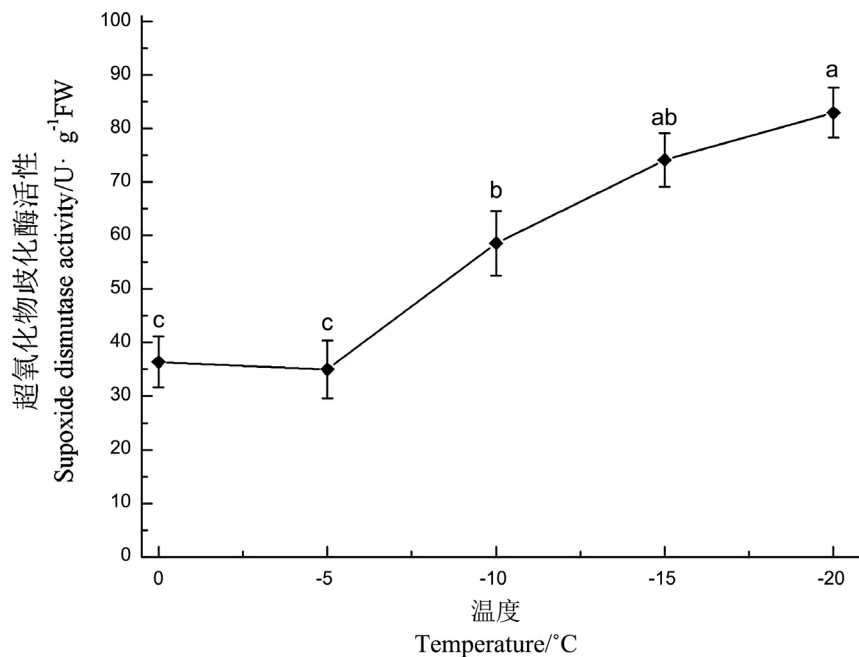
### 3.2.1. 低温胁迫对超氧化物歧化酶活性的影响

低温胁迫下, 植物的细胞膜系统发生变化, 会产生丙二醛等有害物质, 使植物启动保护酶系统来防止这种危害, 超氧化物歧化酶(SOD)可以清除过氧化产物, 通过增强其活性来抵御低温[20]。由图 3 可知, 七叶树幼苗 SOD 活性随温度降低逐渐上升。 $0^\circ\text{C}\sim -5^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}\sim -20^\circ\text{C}$  之间, 其活性差异不显著; 温度降低至  $-10^\circ\text{C}$ , 其活性显著增加, 较  $-5^\circ\text{C}$  增加 67.3%。

### 3.2.2. 低温胁迫对过氧化物酶活性的影响

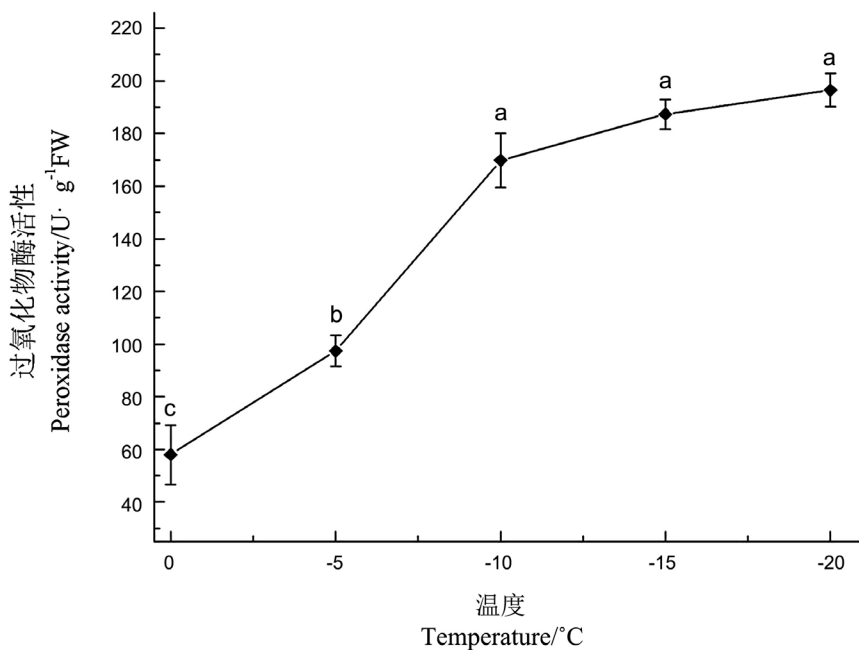
过氧化物酶(POD)是植物保护系统的成分之一, 植物的木质化程度与其紧密相关[21]。植物的木质化

与抗寒性息息相关,木质化程度越高,其抗寒性越强,故 POD 的测定很重要。由图 4 可知,低温胁迫下,七叶树幼苗 POD 活性逐渐增加;0℃~-10℃之间急速增加,活性差异显著,-10℃的活性较对照组增加了 192.67%。温度低于-10℃后,其活性增加缓慢,差异不显著。



**Figure 3.** The changes in SOD activities of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

**图 3.** 低温胁迫对七叶树 SOD 活性的影响



**Figure 4.** The changes in POD activities of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

**图 4.** 低温胁迫对七叶树 POD 活性的影响

### 3.2.3. 低温胁迫对过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶(CAT)是保护酶系统中的重要组成之一, 主要与 SOD 和 POD 协同作用, 分解产生的过氧化氢。由图 5 可知, 低温胁迫下七叶树幼苗 CAT 活性的变化差异显著。随着温度的降低, CAT 活性呈先上升后下降的趋势, 在 $-15^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值(11.89 U/g), 较对照组增加 186.51%。温度低于 $-15^{\circ}\text{C}$ 时, 其活性差异不显著, 说明保护酶系统在一定的温度范围内发挥主要作用, 低于该温度, 保护酶系统的作用就会降低。

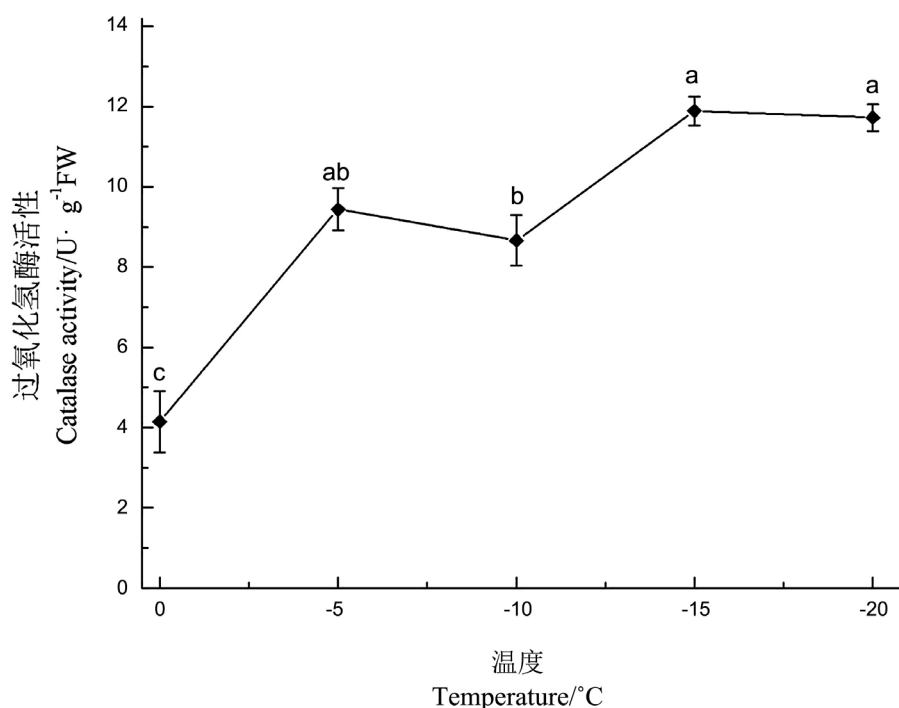


Figure 5. The changes in CAT activities of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

图 5. 低温胁迫对七叶树 CAT 活性影响

## 3.3. 低温胁迫对细胞渗透调节物质的影响

### 3.3.1. 低温胁迫对可溶性蛋白的影响

低温条件下, 可溶性蛋白(Sp)含量增加, 促进下游物质的合成, 为植物的生存提供物质和能量, 是保障植物存活的重要物质[22]。由图 6 可知, 随着温度降低, 七叶树幼苗的 Sp 含量呈现上升趋势, 在 $-5^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 的上升趋势平缓, 差异不显著; 在 $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 和 $-15^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 之间急速上升,  $-20^{\circ}\text{C}$ 与其他处理差异显著。表明温度低于 $-15^{\circ}\text{C}$ 时 Sp 可增强七叶树的抗寒力。

### 3.3.2. 低温胁迫对可溶性糖的影响

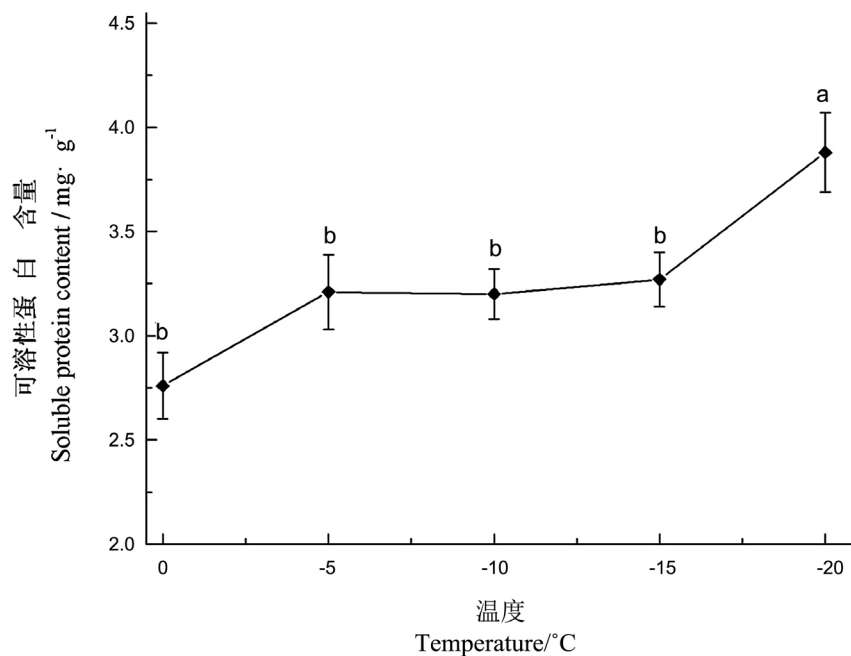
低温条件下, 可溶性糖(Ss)含量增加会提高细胞的渗透势, 对植物组织起到保护作用[23]。由图 7 可知, 七叶树幼苗的 Ss 含量随温度降低呈现上升趋势。温度达 $-20^{\circ}\text{C}$ 时, 与其他处理差异显著, 且较对照组增加 52.71%。其他各处理之间差异不显著。

### 3.3.3. 低温胁迫对脯氨酸的影响

游离脯氨酸(Pro)含量增加会降低细胞的渗透势, 从而增加植物的自身抗寒性[24] [25]。由图 8 可知,

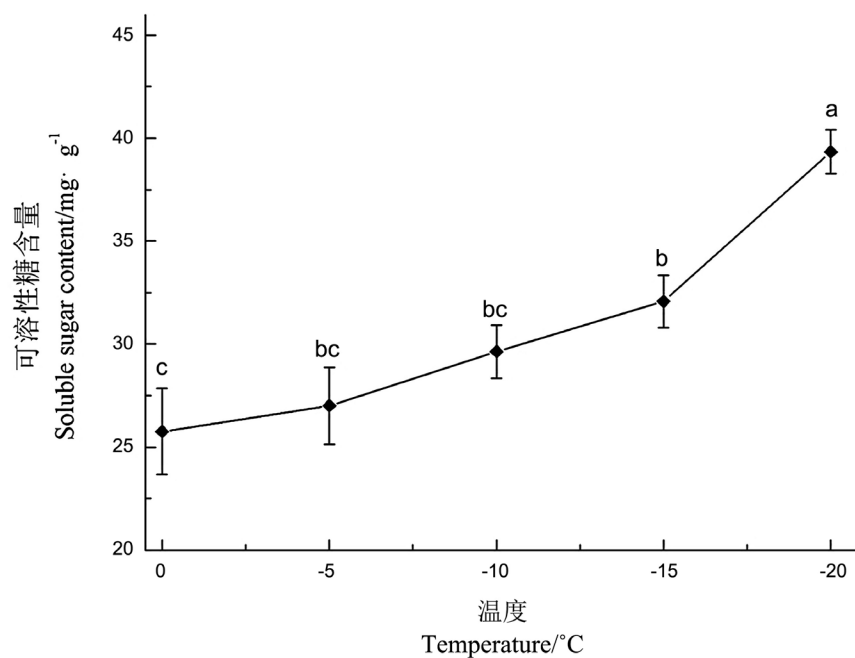


温度降低致使七叶树幼苗体内的游离 Pro 含量逐渐增加。0℃~-15℃之间，其各处理差异不显著；温度在-20℃时，较对照组增加 63.87%。三种渗透调节物质随着温度的降低，七叶树体内的含量均呈现上升趋势，且 Pro 增幅高达 63.87%。



**Figure 6.** The changes in soluble protein contents of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

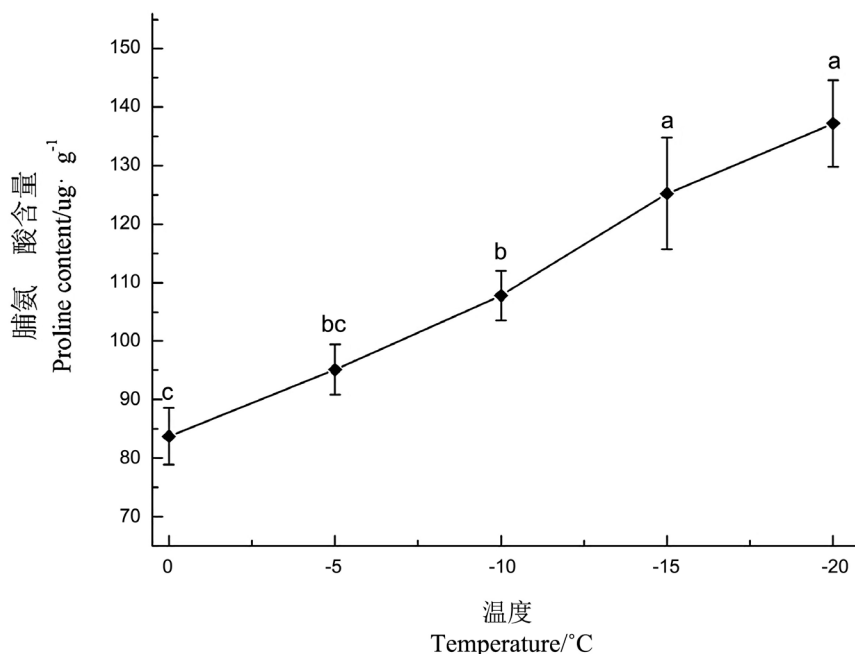
**图 6.** 低温胁迫对七叶树 Sp 含量的影响



**Figure 7.** The changes in soluble sugar contents of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

**图 7.** 低温胁迫对七叶树 Ss 含量的影响





**Figure 8.** The changes in proline contents of *Aesculus chinensis* Bunge under low temperature treatments

**图 8.** 低温胁迫对七叶树 Pro 含量的影响

#### 4. 讨论与结论

低温胁迫下,最先受损伤的是植物的细胞膜[26] [27] [28]。低温会加剧细胞膜的膜脂过氧化作用,破坏质膜系统,使细胞电解质外渗,电导率升高[29]-[34]。丙二醛(MDA)作为膜脂氧化的最终产物,其含量增加阻碍细胞内的蛋白质合成,致使细胞膜变性,严重时细胞会受损、衰老甚至死亡[35] [36] [37]。本研究表明,七叶树幼苗的低温半致死温度(LT<sub>50</sub>)为-25.46℃;其电导率和丙二醛含量均随着处理温度的降低缓慢升高,说明其细胞膜正在受到伤害且损伤逐渐加剧,温度降低到-25.46℃时,其细胞组织会迅速结冰改变生理代谢,导致冻害发生,使植物的损伤无法恢复。这与小麦幼苗[38]、豆梨[39]等的研究有相似结果。

可溶性蛋白,可溶性糖,脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质。低温胁迫下,渗透调节物质维持细胞膜内外的物质平衡,提高植物的渗透调节能力[40]。本研究发现,低温下,七叶树幼苗体内可溶性蛋白(Sp)、可溶性糖(Ss)和脯氨酸(Pro)的含量随着温度的降低逐渐升高。受低温环境刺激,Sp和Ss含量增加,说明在冷刺激下七叶树幼苗可以增加细胞液的浓度降低冰点,使细胞的代谢活动快速变化,恢复生物合成和碳水化合物的代谢平衡,适应冷环境,从而提高其在低温环境的存活率[41] [42]。高浓度的脯氨酸是增强植物抗寒性的重要因素之一[42]。植物通过增加游离的Pro含量来降低渗透势保护植物的空间结构不受伤害,提高抗寒性,起到对植物的保护作用[43]。与前人在毛白杨[25]、蓝靛果忍冬[32]等的研究上得到相似结果。

保护酶中的超氧化物歧化酶(SOD),过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)组成抗氧化防御系统协同响应低温环境[44]。低温胁迫下活性氧大量积累,打破活性氧产生与清除的平衡,SOD可将活性氧歧化成过氧化氢和氧气,CAT和POD协同将过氧化氢转化为水和氧气,减轻对细胞伤害。本研究表明,七叶树幼苗的3种保护酶活性在处理温度下总体表现为上升趋势。说明在0℃~-15℃发挥一定的作用;SOD在-5℃以内,其活性无显著变化;POD和CAT在-10℃以内无显著变化。结合渗透调节物质的变化趋势,

细胞体内的渗透物质在 $-15^{\circ}\text{C}$ 以后出现显著增加,说明在该温度之前主要依靠保护酶系统作用,之后主要依靠渗透物质作用。其中,在 $-5^{\circ}\text{C}$ 时,主要靠 POD 和 CAT 发挥作用;在 $-5^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ ,三种保护酶协同响应提高植物的抗寒性,保护植物正常生理活动的进行。本研究结果与 6 种木兰科植物[11]、周建等[44]研究的广玉兰有相似规律。

植物本身的抗寒机制复杂多样,影响因素也很多,单一的指标未能全面评判植物的抗寒能力。本文研究了北京地区七叶树幼苗休眠枝条在低温胁迫下的生理响应,发现寒冷环境下,植物通过积累较高水平渗透性调节物质和提高酶系统的活性等来适应环境。研究发现,七叶树的低温半致死温度为 $-25.46^{\circ}\text{C}$ ,在温度低于 $-25.46^{\circ}\text{C}$ 后,七叶树所受伤害将是不可逆转的。在实验设置的梯度范围内,七叶树表现出一定的抗寒性,可以作为北方地区的园林绿化树种。

本研究在一定程度上丰富了七叶树适应低温的生理机制,对于以后进行抗寒育种抗寒措施等具有一定的参考价值。随着生物技术的快速发展,要全面了解七叶树的生理变化,可以通过观察细胞的显微结构和利用分子生物技术研究其细胞水平和基因水平的抗寒机制,对其抗寒基因的表达模式等进行深入探究。

## 基金项目

北京市园林绿化局项目“北京园林绿化落叶乔木优良品种选育及栽培技术”(GEG-2015-01-01);北京市园林绿化局项目“北京园林绿化增彩延绿植物资源收集、快繁与应用技术研究”(GEG-2016-01)。

## 参考文献

- [1] 陈立松,刘星辉.果树逆境生理[M].北京:中国农业出版社,2003:31-35.
- [2] Lütz, C. (2010) Cell Physiology of Plants Growing in Cold Environments. *Protoplasma*, **244**, 53-73. <https://doi.org/10.1007/s00709-010-0161-5>
- [3] Bajguz, A. and Hayat, S. (2009) Effects of Brassinosteroids on the Plant Responses to Environmental Stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, **47**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
- [4] Mohammadian, M.A., Largani, Z.K. and Sajedi, R.H. (2012) Quantitative and Qualitative Comparison of Antioxidant Activity in the Flavedo Tissue of Three Cultivars of Citrus Fruit under Cold Stress. *Australian Journal of Crop Science*, **6**(3).
- [5] 何若韞.植物低温逆境生理[M].北京:中国农业出版社,1995:12-15.
- [6] 江锡兵,宋跃朋,马开峰,等.低温胁迫下美洲黑杨与大青杨杂种无性系若干生理指标变化研究[J].北京林业大学学报,2012(1):58-63.
- [7] Munne-Bosch, S. and Alegre, L. (2003) Drought-Induced Changes in the Redox State of Alpha-Tocopherol, Ascorbate, and the Diterpene Carnosic Acid in Chloroplasts of Labiatae Species Differing in Carnosic Acid Contents. *Plant Physiology*, **131**, 1816-1825. <https://doi.org/10.1104/pp.102.019265>
- [8] 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.
- [9] 陈凯,江秀章,马松亚,程飞,杨梅.望天树苗期叶片对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J].西北林学院学报,2019,34(3):67-73.
- [10] 伍宝朵,范睿,胡丽松,杨建峰,郝朝运.低温胁迫对胡椒叶片生理生化及显微结构的影响[J].热带作物学报,2018,39(8):1519-1525.
- [11] 李瑞雪,金晓玲,胡希军,汪结明,罗峰,张方静.低温胁迫下6种木兰科植物的生理响应及抗寒相关基因差异表达[J].生态学报,2019,39(8):2883-2898.
- [12] 李汉友.七叶树的生物学特性与应用开发[J].安徽农学通报,2010,16(7):92-93.
- [13] 缴丽莉,翟士勇.七叶树与马褂木抗寒性比较分析[J].安徽农业科学,2013(25):10323-10324,10348.
- [14] 杜艳.七叶树种子耐脱水性和苗木抗寒性研究[D]:[硕士学位论文].南京:南京林业大学,2004.
- [15] 赵媛媛,刘明国,赵伟浩.3种外来树种抗寒性生理指标的比较[J].安徽农业科学,2007,35(5):1298-1299.
- [16] 曹颖颖,王燕凌,魏雅君,等.两个黑加仑品种耐NaCl胁迫的比较研究[J].新疆农业大学学报,2014(4):

- 306-310.
- [17] Sofo, A., Dichio, B., Xiloyannis, C. and Masia, A. (2004) Effects of Different Irradiance Levels on Some Antioxidant Enzymes and on Malondialdehyde Content during Rewatering in Olive Tree. *Plant Science*, **166**, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.09.018>
- [18] 李合生. 高等教育出版社[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-200.
- [19] 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, 9(3): 11-16.
- [20] 胡曼筠, 金晓玲, 曾雯, 等. 华中冬青雌雄株抗寒生理指标筛选及评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(5): 65-70.
- [21] 沈静, 杨青川, 曹致中, 等. 低温胁迫对野牛草细胞膜和保护酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2010, 32(2): 98-102.
- [22] 殷亚方, 姜笑梅. 细胞壁中过氧化物酶的分布对杨树木质化过程的影响[J]. 电子显微学报, 2007, 26(1): 49-54.
- [23] Wang, D., Xuan, J.P., Zhu, X.C., et al. (2010) Relationships of Freezing Tolerance and the Contents of Carbohydrates, Proline, Protein in Centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro.) Hack.). *Acta Agrestia Sinica*, **15**, 7893-7906.
- [24] Pocięcha, E. and Dziurka, M. (2015) *Trichoderma* Interferes with Cold Acclimation by Lowering Soluble Sugars Accumulation Resulting in Reduced Pink Snow Mould (*Microdochium nivale*) Resistance of Winter Rye. *Environmental and Experimental Botany*, **109**, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.07.009>
- [25] 林善枝, 李雪平, 张志毅. 低温锻炼对毛白杨幼苗抗冻性和总可溶性蛋白质的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 137-141.
- [26] 杨克彬, 孟凡志, 郭先锋. 七个切花红掌品种对低温胁迫的生理响应及耐低温能力评价[J]. 植物生理学报, 2017, 53(9): 1609-1618.
- [27] 岳海, 李国华, 李国伟, 等. 澳洲坚果不同品种耐寒特性的研究[J]. 园艺学报, 2016, 37(1): 31-38.
- [28] 刘艳阳, 李俊周, 陈磊, 崔党群. 低温胁迫对小麦叶片细胞膜脂质过氧化产物及相关酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 26(4): 70-73.
- [29] 孙碧徽, 李荣全, 段小春. 多年生黑麦草叶片形态与低温胁迫的生理响应[J]. 草业科学, 2016, 33(3): 450-458.
- [30] 王运涛, 于林清, 李景柱, 等. 低温胁迫对5份苜蓿品种根系形态特征的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 101-106.
- [31] 刘锦, 王挺, 黎念林, 等. 电导法配合 Logistic 方程测定樱花抗寒性研究[J]. 江苏林业科技, 2016, 43(5): 25-27, 31.
- [32] 张富玮, 张东亚, 李建贵. 低温胁迫对蓝靛果忍冬抗寒性的影响[J]. 经济林业研究, 2017, 35(4): 222-225, 247.
- [33] Lyons, J.M. (1973) Chilling Injury in Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, **24**, 445-466. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002305>
- [34] Peng, Y.L., Wang, Y.S., Fei, J., et al. (2015) Ecophysiological Differences between Three Mangrove Seedlings (*Kandelia obovata*, *Aegiceras corniculatum*, and *Avicennia marina*) Exposed to Chilling Stress. *Ecotoxicology*, **24**, 1722-1732. <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1488-7>
- [35] 王志昊, 叶冬梅, 何炎红, 等. 5种沙生植物丙二醛、脯氨酸和2种氧化物酶比较[J]. 分子植物育种, 2018, 16(11): 3727-3731.
- [36] Santini, J., Giannettini, J., Pailly, O., et al. (2013) Comparison of Photosynthesis and Antioxidant Performance of Several *Citrus* and *Fortunella* Species (Rutaceae) under Natural Chilling Stress. *Trees (Berlin)*, **27**, 71-83. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0769-5>
- [37] Campos, P.S., Quartin, V.N., Ramalho, J.C. and Nunes, M.A. (2003) Electolyte Leakage and Lipid Degradation Account for Cole Sensitivity in Leaves of *Coffea* sp. Plants. *Journal of Plant Physiology*, **160**, 283-292. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00833>
- [38] 李杨洋. 5种小麦主要性状相关分析与抗寒能力初探[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [39] 李清亚, 路斌, 赵佳伟, 栗浩, 李艳, 苗胜越, 路丙社. 不同豆类品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 86-94, 110.
- [40] 赵明明, 周余华, 彭方仁, 等. 低温胁迫下冬青叶片细胞内  $Ca^{2+}$  水平及可溶性糖含量的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 1-5.
- [41] Nasef, I.N. (2018) Short Hot Water as Safe Treatment Induces Chilling Tolerance and Antioxidant Enzymes, Prevents Decay and Main Tains Quality of Cold-Stored Cucumbers. *Post Harvest Biology and Technology*, **138**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.005>

- 
- [42] Lyons, J.M. and Raison, J.K. (1970) Oxidative Activity of Mitochondria Isolated from Plant Tissues Sensitive and Resistant to Chilling Injury. *Plant Physiology*, **45**, 386-389. <https://doi.org/10.1104/pp.45.4.386>
- [43] 周建, 尤扬, 袁德义. 低温胁迫对广玉兰生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 38-42.
- [44] 叶艳然, 王文莉, 郑成淑, 等. 四种野生苔草属植物的耐寒性评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 89-95.