

自然低温对慈竹和撑绿杂交竹生理特性的影响

张帆¹, 万雪琴², 朱小琼¹, 姜炎圻¹, 高龙¹, 陈其兵¹

(1. 四川农业大学 风景园林学院, 四川 温江 611130; 2. 四川农业大学 林学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 为探讨慈竹 *Neosinocalamus affinis* 耐寒机制, 分析了慈竹与撑绿杂交竹 *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis* 在夏季常温(22 ~ 30 °C)和冬季低温(-2 ~ 4 °C)生理指标的变化情况。结果表明: 随着气温的降低, 慈竹和撑绿杂交竹叶片叶绿素质量分数降低; 可溶性糖、游离脯氨酸、丙二醛质量分数以及电解质渗漏率显著升高($P < 0.01$); 超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性显著上升($P < 0.01$)。在相同低温下, 慈竹游离脯氨酸、可溶性糖、叶绿素、超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性显著高于撑绿杂交竹; 而丙二醛以及电解质渗漏率显著低于撑绿杂交竹。慈竹在自然低温条件下通过生理机能的改变主动适应低温环境, 提高其耐寒性。慈竹抗寒性强于撑绿杂交竹。表3参21

关键词: 植物学; 慈竹; 撑绿杂交竹; 抗寒性

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)01-0017-06

Physiological characteristics of *Neosinocalamus affinis* and *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis* with natural low temperature

ZHANG Fan¹, WAN Xue-qin², ZHU Xiao-qiong¹, JIANG Yan-qi¹, GAO Long¹, CHEN Qi-bing¹

(1. College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan, China; 2. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract: An unusually severe snow disaster occurred in southern China in 2008, which exposed variation in bamboo species. *Neosinocalamus affinis* was highly tolerant to low-temperature damage, but hybrid bamboo (*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*) died out. Why did the phenomenon occur? A study was thereupon conducted to determine the effects of natural low temperature stress on physiological characteristics to compare their chilling tolerance. Leaves of *N. affinis* and the hybrid bamboo were sampled in summer (22–30 °C) and winter (-2 – 4 °C) to study physiological characteristics, such as chlorophyll (Chl) content, membrane permeability, malondialdehyde (MDA), soluble sugar content, free proline content, and electrolyte leakage; along with superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) activities. The age of leaf samples uniforms to ensure the accuracy of experiment. The results showed that Chl contents of both bamboo species gradually decreased with decreasing temperature, whereas membrane permeability, MDA, soluble sugar content, free proline content, and electrolyte leakage increased. Also, SOD, POD, and CAT activities increased. With the same low temperature stress, MDA and electrolyte leakage in the leaves of *N. affinis* were lower ($P < 0.01$) than the hybrid bamboo, whereas free proline content, soluble sugar content, SOD, POD and CAT activities were higher ($P < 0.01$) than the hybrid bamboo. [Ch, 3 tab. 21 ref.]

Key words: botany; *Neosinocalamus affinis*; hybrid bamboo (*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*); cold tolerance

收稿日期: 2011-04-14; 修回日期: 2011-05-20

基金项目: “十一五”四川省科技攻关项目(2006YZGG-10); 四川省教育厅重点项目(08ZA072)

作者简介: 张帆, 副教授, 博士, 从事园林植物遗传育种学和植物生理学研究。E-mail: nolady@163.com; zhangfan113291@yahoo.com.cn

随着全球气候变暖,极端天气情况将不可预见地频繁发生。极端天气对全球生态系统的影响是极其深远的,给人类生产和生活带来严重灾难。例如:2008年初发生在中国南方及长江流域的持续冰冻雪灾给当地造成严重的经济损失,严重破坏生态环境。在这场冰雪灾害中,四川竹林遭受了1949年以来最严重的雨雪冰冻灾害,造成直接经济损失超过30亿元,其中泸州、宜宾、达州、巴中、雅安等5市以及甘孜、阿坝、凉山等3州尤其严重^[1-3]。在这次冰冻灾害中,约51种竹类受损,其中14种重要经济竹类(包括撑绿杂交竹 *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*)受损特别严重,初步调查的受灾面积达30万 hm^2 ,直接经济损失达20亿元以上。慈竹 *Neosinocalamus affinis* 在这次冰雪灾害中几乎不受影响。如何减轻多雨雪冰冻等灾害天气的不利影响,促进竹业的可持续发展,是现阶段竹子研究的重点,而选育抗寒的竹子新品种是解决该问题的关键。国内外的学者就低温对植物的影响进行了大量研究,刘学庆等^[4]研究表明,低温胁迫下蝴蝶兰 *Phalaenopsis amabilis* 叶片抗氧化酶(SOD, POD, CAT)活性增加,可溶性糖和游离脯氨酸含量增加。目前,有关低温对植物影响的研究,大多以农作物、蔬菜类、部分园林植物为研究对象,对竹子的抗寒机制方面的研究非常少。迄今为止,大部分学者只是对竹子的冻害做了外观形态的观察^[5],简单了解竹子生长范围,没有从生理指标变化上分析竹子耐冻机理。本研究以慈竹和撑绿杂交竹为对象,研究在自然低温下各生理指标的变化情况,其研究结果对了解慈竹的耐寒机制提供一定的理论依据,同时对于选育抗寒竹品种,促进竹业的可持续发展具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本研究所用材料为慈竹和撑绿杂交竹。撑绿杂交竹是原柳州地区林科所利用撑篙竹 *Bambusa pervariabilis* 为母本,大绿竹 *Dendrocalamopsis grandis* 为父本,用有性杂交的方法选育出的优良新品种。本实验采用慈竹与撑绿杂交竹的同龄叶片,分别于2008年5月18日、6月1日、6月15日、12月20日及2009年1月6日、2月1日采2年生慈竹和撑绿杂交竹同龄枝条,迅速带回实验室,选取相同部位的叶片,混合取样,3次重复,进行各项生理指标的测定。

1.2 实验方法

1.2.1 生理指标的测定 质膜相对透性测定用电导法^[6],采用 DDS-12A 型电导率仪测定。相对电导率 $(L) = (S_1 - S_0) / (S_2 - S_0)$ 。其中: S_0 为空白电导率, S_1 为电导仪测其初电导率, S_2 为沸水浴中 10 min 冷却后测的电导率。丙二醛质量摩尔浓度测定用硫代巴比妥酸比色法^[7]。超氧化物歧化酶活性用 NBT 光还原法测定^[8],其中略有改变:匀浆离心条件为 $3\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,离心 20 min;以抑制氮蓝四唑(NBT)光还原 50% 为 1 个酶活力单位(1 U=16.67 nkat),酶的活性单位以 $16.67\ \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示。过氧化物酶活性用愈创木酚法测定^[9]。酶活性反应体系包括:2.9 mL $0.05\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液(pH 5.5);1.0 mL 体积分数为 2% 的 H_2O_2 ;1.0 mL $0.05\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 愈创木酚和 0.1 mL 酶液。用加热煮沸 5 min 的酶液为对照,反应体系在加入酶液后,立即于 $37\ ^\circ\text{C}$ 水浴中保温 15 min,然后迅速转入冰浴中,并加入 2.0 mL 质量分数为 20% 的三氯乙酸终止反应,在 470 nm 波长下比色,隔 1 min 记录 1 次吸光度值,共记录 4 次。以 1 min 内 A_{470} 变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位(1 U=16.67 nkat)。过氧化氢酶活性用紫外吸收法测定^[7]。过氧化氢酶活性以 1 min 减少 0.1 个值所需的酶量为 1 个活性单位(1 U=16.67 nkat),酶的活性以 $16.67\ \text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示。叶绿素质量分数采用乙醇-丙酮混合液(1:1)浸泡法测定^[9-10]。游离脯氨酸的测定采用磺基水杨酸法^[11]:取 0.1 g 材料,加 5 mL 质量分数为 3% 磺基水杨酸匀浆至加塞试管,沸水中浸提 10 min,冷却,取上清液 2 mL,加 2 mL 冰醋酸、3 mL 显色液,沸水浴中 40 min 显色,再加入 4 mL 甲苯萃取,测 520 nm 处的吸光度值 A_{520} 。

可溶性糖的测定采用苯酚法^[7]:将竹子叶片剪碎,称取 0.5 g,放入刻度试管中,加入 20 mL 蒸馏水,塑料薄膜封口,于沸水中提取 2 次, $30\ \text{min} \cdot \text{次}^{-1}$,提取液过滤入 50 mL 容量瓶中,反复漂洗试管及残渣,定容至刻度。吸取 0.5 mL 样品液于试管中,用蒸馏水补充至 2 mL,测 485 nm 处的吸光度值 A_{485} 。各指标测定时 3 次重复。

1.2.2 数据处理 数据采用 DPS 和 SPSS 11.0 软件统计,多重比较用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 自然低温对慈竹和撑绿杂交竹叶绿素质量分数及比值的影响

在夏季生长季节内，随着自然温度的升高，慈竹及撑绿杂交竹叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素质量分数略有上升，但总体变化不大。随着自然降温，2 竹种叶绿素质量分数均呈显著下降趋势(表 1)，下降幅度在 2 竹种中存在显著差异。由夏季常温(22~30 ℃)过渡到冬季低温(-2~4 ℃)，以(夏季最高值-冬季最低值)/夏季最高值计算，慈竹叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素分别降低 23.9%，28.4%和 25.3%，而撑绿杂交竹叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素分别降低 47.2%，56.2%和 49.3%。以(夏季平均值-冬季平均值)/夏季平均值计算，慈竹叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素质量分数分别降低 15.9%，15.0%和 15.2%，而撑绿杂交竹叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素分别降低 40.1%，43.3%和 41.0%。结果表明撑绿杂交竹对低温尤其是 0 ℃以下低温敏感，低温对撑绿杂交竹的伤害显著大于对慈竹造成的伤害。

在相同的温度下，慈竹叶绿素(叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素)质量分数显著高于撑绿杂交竹。在 0 ℃以下低温胁迫下，慈竹和撑绿杂交竹的叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素质量分数都显著降低。

表 1 低温对慈竹和撑绿杂交竹叶绿素及叶绿素 a/叶绿素 b 的影响

Table 1 Effects of low temperature on the chlorophyll content in leaves of *Neosinocalamus affinis* and *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*

处理	竹种	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/叶绿素 b	总叶绿素/(mg·g ⁻¹)
2008-05-18(22 ℃)	慈竹	4.986 ± 0.03 B	2.052 ± 0.03 B	2.43	7.038 ± 0.06 A
	撑绿杂交竹	3.124 ± 0.01 E	1.123 ± 0.01 D	2.78	4.247 ± 0.02 D
2008-06-01(26 ℃)	慈竹	5.121 ± 0.04 AB	2.131 ± 0.09 AB	2.40	7.252 ± 0.13 A
	撑绿杂交竹	3.224 ± 0.05 E	1.156 ± 0.05 D	2.78	4.380 ± 0.10 D
2008-06-15(30 ℃)	慈竹	5.237 ± 0.11 A	2.258 ± 0.02 A	2.79	7.495 ± 0.26 A
	撑绿杂交竹	3.235 ± 0.09 E	1.162 ± 0.06 D	2.79	4.397 ± 0.15 D
2008-12-20(6 ℃)	慈竹	4.516 ± 0.15 C	1.943 ± 0.10 B	2.32	6.459 ± 0.25 B
	撑绿杂交竹	2.015 ± 0.08 F	0.708 ± 0.02 E	2.84	2.723 ± 0.10 E
2009-01-06(4 ℃)	慈竹	4.489 ± 0.02 C	1.921 ± 0.09 B	2.34	6.410 ± 0.11 B
	撑绿杂交竹	2.017 ± 0.11 F	0.720 ± 0.08 E	2.80	2.737 ± 0.19 E
2009-02-01(-2 ℃)	慈竹	3.986 ± 0.02 D	1.615 ± 0.03 C	2.47	5.601 ± 0.05 C
	撑绿杂交竹	1.708 ± 0.00 G	0.509 ± 0.00 F	3.36	2.217 ± 0.01 F

说明：表中各列的值是平均值±标准误。不同字母表示差异极显著(n=3, P<0.01)。

2.2 自然低温对慈竹和撑绿杂交竹内含物及电解质渗漏率的影响

在夏季生长季节内，随着自然温度的升高，慈竹及撑绿杂交竹各生理指标变化不明显。低温对慈竹和撑绿杂交竹叶内含物影响结果见表 2。随着低温的胁迫，慈竹和撑绿杂交竹各细胞内含物和电解质渗漏率增加。在相同的温度下，除可溶性糖和游离脯氨酸质量分数外，慈竹电解质渗漏率、丙二醛质量分数显著低于撑绿杂交竹。由夏季常温(22~30 ℃)过渡到冬季低温(-2~4 ℃)，慈竹和撑绿杂交竹叶片各指标均发生显著变化，特别是在 0 ℃以下低温胁迫下，各指标发生极显著的变化。低温对慈竹和撑绿杂交竹的影响存在显著差异。以(夏季平均值-冬季平均值)/夏季平均值计算，慈竹低温胁迫下叶片电解质渗漏率、丙二醛、游离脯氨酸和可溶性糖分别比夏季增加 28.2%，18.0%，42.3%和 42.4%，而撑绿杂交竹冬季低温胁迫下各指标分别比夏季增加 37.8%，41.4%，20.9%和 28.2%。

2.3 自然低温对慈竹和撑绿杂交竹超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性的影响

植物在逆境下出现的伤害或植物对逆境的不同抵抗能力往往与体内抗氧化酶活性水平有关。由表 3 可见，在冬季低温的胁迫下，竹叶片的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性显著增加。由夏季常温(22~30 ℃)过渡到冬季低温(-2~4 ℃)，慈竹和撑绿杂交竹叶片各指标均发生显著变化，特别是在

表2 低温对慈竹和撑绿杂交竹各生理指标的影响

Table 2 Effects of low temperature on the physiological characteristics in leaves of *Neosinocalamus affinis* and hybrid bamboo (*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*)

处理	竹种	电解质渗漏率/%	丙二醛/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	游离脯氨酸/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性糖/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
2008-05-18(22 °C)	慈竹	0.146 ± 0.002 A	8.502 ± 0.007A	7.514 ± 0.110 D	1.841 ± 0.075 C
	撑绿杂交竹	0.188 ± 0.001 B	10.230 ± 0.035C	5.819 ± 0.113A	1.438 ± 0.025 A
2008-06-01(26 °C)	慈竹	0.137 ± 0.003 A	8.513 ± 0.012 A	7.621 ± 0.108 D	1.836 ± 0.013 C
	撑绿杂交竹	0.179 ± 0.005 B	10.241 ± 0.017 C	5.796 ± 0.117 A	1.416 ± 0.017 A
2008-06-15(30 °C)	慈竹	0.142 ± 0.001 A	8.521 ± 0.011 A	7.563 ± 0.115 D	1.853 ± 0.032 C
	撑绿杂交竹	0.183 ± 0.004 B	10.229 ± 0.015 C	5.824 ± 0.123 A	1.442 ± 0.024 A
夏季平均值(22~30 °C)	慈竹	0.142 ± 0.002 A	8.512 ± 0.010 A	7.557 ± 0.113 D	1.843 ± 0.040 C
	撑绿杂交竹	0.183 ± 0.003 B	10.233 ± 0.022 C	5.813 ± 0.118 A	1.432 ± 0.022 A
2008-12-20(6 °C)	慈竹	0.178 ± 0.009 B	9.774 ± 0.035 B	10.002 ± 0.126 F	2.092 ± 0.001 D
	撑绿杂交竹	0.216 ± 0.006 C	13.759 ± 0.025 D	6.350 ± 0.106 B	1.566 ± 0.003 B
2009-01-06(4 °C)	慈竹	0.181 ± 0.002 B	9.801 ± 0.026 B	10.121 ± 0.221 F	2.123 ± 0.009 D
	撑绿杂交竹	0.223 ± 0.001 C	13.876 ± 0.021 D	6.421 ± 0.132 B	1.573 ± 0.008 B
2009-02-01(-2 °C)	慈竹	0.188 ± 0.003 B	10.552 ± 0.038 C	12.125 ± 0.135 H	3.656 ± 0.013 G
	撑绿杂交竹	0.317 ± 0.015 D	15.786 ± 0.154 F	8.321 ± 0.102 E	2.368 ± 0.024 E
冬季平均值(-2~4 °C)	慈竹	0.182 ± 0.005 B	10.042 ± 0.033 C	10.750 ± 0.161 G	2.624 ± 0.007 F
	撑绿杂交竹	0.252 ± 0.007 C	14.474 ± 0.067 E	7.031 ± 0.113C	1.836 ± 0.012 C

说明：表中每列的值是平均值±标准误。不同字母表示差异极显著($n=3$, $P<0.01$)。

表3 低温对慈竹和撑绿杂交竹超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响

Table 3 Effects of low temperature on SOD, POD and CAT in leaves of *Neosinocalamus affinis* and hybrid bamboo (*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*)

处理	竹种	超氧化物歧化酶/ ($\times 16.67 \text{ nkat}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	过氧化物酶/ ($\times 16.67 \text{ nkat}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	过氧化氢酶/ ($\times 16.67 \text{ nkat}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
2008-05-18(22 °C)	慈竹	48.280 ± 0.126 C	55.000 ± 0.001 B	32.583 ± 1.271 BC
	撑绿杂交竹	36.142 ± 0.190 A	52.199 ± 0.153 A	30.388 ± 0.873 AB
2008-06-01(26 °C)	慈竹	48.332 ± 0.210 C	54.786 ± 0.322 B	32.476 ± 0.762 BC
	撑绿杂交竹	35.976 ± 0.362 A	52.248 ± 0.426 A	28.124 ± 0.753 A
2008-06-15(30 °C)	慈竹	48.546 ± 0.246 C	55.121 ± 0.124 B	33.572 ± 0.842 C
	撑绿杂交竹	36.342 ± 0.214 A	51.894 ± 0.375 A	31.164 ± 1.218 AB
夏季平均值(22~30 °C)	慈竹	48.386 ± 0.194 C	54.969 ± 0.149 B	32.877 ± 0.958 AB
	撑绿杂交竹	36.153 ± 0.255 A	52.114 ± 0.318 A	29.892 ± 0.948 A
2008-12-20(6 °C)	慈竹	62.208 ± 1.902 E	83.156 ± 0.462 E	45.169 ± 1.271 C
	撑绿杂交竹	46.243 ± 0.324 B	68.369 ± 0.762 C	36.679 ± 0.121 D
2009-01-06(4 °C)	慈竹	64.165 ± 1.246 E	85.103 ± 1.042 EF	52.251 ± 1.032 G
	撑绿杂交竹	46.368 ± 0.428 B	70.218 ± 1.224 C	37.258 ± 1.122 D
2009-02-01(-2 °C)	慈竹	121.208 ± 1.902 G	94.214 ± 1.901 G	65.789 ± 1.128 H
	撑绿杂交竹	63.34 ± 1.497 E	79.281 ± 1.502 D	46.795 ± 0.898 F
冬季平均值(-2~4 °C)	慈竹	82.527 ± 1.683 F	87.491 ± 1.135 F	54.403 ± 1.144 G
	撑绿杂交竹	51.984 ± 0.750D	72.623 ± 1.163 C	40.244 ± 0.796 E

说明：表中每列的值是平均值±标准误。不同字母表示差异极显著($n=3$, $P<0.01$)。

0℃以下低温胁迫下，各指标发生极显著的变化。以(夏季平均值-冬季平均值)/夏季平均值计算，慈竹低温胁迫下叶片超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性分别比夏季增加 70.6%，59.2%和 65.5%，而撑绿杂交竹冬季低温胁迫下各指标分别比夏季增加 43.8%，39.4%和 34.6%。在相同低温下，慈竹叶片超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性远高于撑绿杂交竹。说明在低温胁迫下，竹叶片细胞内产生了较多的负氧离子 O_2^- ，诱导了抗氧化酶活性的增加，提高了自身清除的能力。慈竹清除叶片细胞活性氧的能力强于撑绿杂交竹。

3 结论

低温是影响竹类生长发育和限制其分布的重要环境因子。众多研究表明：植物遭受低温胁迫时，丙二醛和电解质外渗率能反映出低温胁迫细胞膜伤害程度，且抗寒性强的物种细胞膜透性增大的程度较小，而且易于恢复；植物体内保护酶系统中超氧化物歧化酶、过氧化物酶等酶活性发生变化，且各品种间存在明显差异；通过调节可溶性糖、可溶性蛋白质等可提高植物的抗寒性^[12]，这已在多种园林植物如菊花 *Dendranthema × grandiflorum*^[13]，南洋楹 *Paraserianthes falcataria*^[14]，广玉兰 *Magnolia grandiflora*^[15]，红叶石楠 *Photinia serrulata*^[16]，彩色马蹄莲 *Zantedeschia hybrida*^[17]和花叶细辛 *Asarum splendens*^[18]等上得到证实。

本研究中，从夏季常温过渡到冬季低温，慈竹和撑绿杂交竹叶片叶绿素质量分数降低，电解质渗漏率、丙二醛、游离脯氨酸和可溶性糖质量分数增加，超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性增加。相同低温下慈竹电解质渗漏率、丙二醛质量分数显著低于撑绿杂交竹，而游离脯氨酸、可溶性糖质量分数，超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性远高于撑绿杂交竹。结果表明：慈竹细胞膜稳定性强于撑绿杂交竹，膜质过氧化程度小于撑绿杂交竹，表现出较强的抗寒性。由此可知，在越冬的过程中，慈竹表现出了自身的协调能力，包括了细胞膜透性、保护酶活性、渗透调节物质的变化。

在竹子的抗寒性研究中，田海涛等^[19]利用叶绿素荧光技术测定了夜间低温胁迫后 7 种箬竹 *Indocalamus ssp.* 叶绿素荧光参数的日变化。结果表明，箬竹抗寒性与叶绿素荧光值呈显著正相关，初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m)值大的抗低温能力强。黄耀华等^[20]对 4 个绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami* 地理种源的抗寒性进行研究。结果表明：脯氨酸、半致死温度和过氧化物酶活性与抗寒性有较为密切的正相关，过氧化物酶活性、丙二醛质量摩尔浓度和脯氨酸质量分数均随着温度的升高而呈现不同程度的增加。应叶青等^[21]研究了自然低温对红秆寒竹 *Chimonobambusa marmorea f. variegata* 生理特性的影响。研究结果表明：超氧化物歧化酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白与红秆寒竹抗寒能力关系密切。本研究结果与上述研究结果比较，虽然个别指标随低温变化趋势上存在一定差异，但从总的生理指标看，结果是一致的，即随着自然温度降低，抗寒能力强的竹种能主动调节细胞膜透性，保护酶活性和渗透调节物质含量，适应自然低温，增强其抗寒性。

参考文献：

- [1] 蒋俊明, 李本祥, 蒋南青, 等. 2008 年南方雪灾对川南丛生竹的影响[J]. 林业科学, 2008, **44** (11): 141 - 144.
JIANG Junming, LI Benxiang, JIANG Nanqing, et al. Impact of the snow disaster occurred in 2008 in south China to the clump bamboo in south Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (11): 141 - 144.
- [2] 熊国辉, 张小明, 楼浙辉, 等. 毛竹林冰雪危害调查及灾后重建技术组装[J]. 江西林业科技, 2008 (6): 28 - 32, 40.
XIONG Guohui, ZHANG Xiaoming, LOU Zhehui, et al. Investigation of snow and ice hazard of *Phyllostachys pubescens* stands and assembly of reconstruction technologies after disaster [J]. *J Jiangxi For Sci Technol*, 2008 (6): 28 - 32.
- [3] 杨灌英, 徐小林, 杨朗生, 等. 2008 年初冰雪灾害对四川毛竹林的危害及其重建措施[J]. 林业科学, 2008, **44** (11): 96 - 100.
YANG Guanying, XU Xiaolin, YANG Langsheng, et al. Bamboo forest damage caused by snow storm in Sichuan Province in 2008 and silvicultural reestablishment measures [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (11): 96 - 100.
- [4] 刘学庆, 宋来庆, 杨永杰, 等. 低温胁迫对不同蝴蝶兰品种生理特性的影响[J]. 山东科学, 2008, **21** (5): 31 - 35.

- LIU Xueqing, SONG Laiqing, YANG Yongjie, *et al.* Effects of low temperature stress on the physiologic characteristic of five different *Phalaenopsis* cultivars [J]. *Sandong Sci*, 2008, **21** (5): 31 – 35.
- [5] 马光良, 李呈翔, 王光剑, 等. 川南不同海拔地段麻竹抗寒性分析[J]. 四川林业科技, 2009, **30** (2): 58 – 59, 90
MA Guangliang, LI Chengxiang, WANG Guangjian, *et al.* An analysis of cold resistance of *Dendrocalamus latiflorus* Munro at different altitudes [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2009, **30** (2): 58 – 59, 90.
- [6] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 101 – 105.
- [7] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 274 – 277.
- [8] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 126 – 138.
- [9] 白宝璋, 汤学军. 植物生理学(II)测试技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 778 – 784.
- [10] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes [J]. *Methods Enzymol*, 1987, **148**: 350 – 382.
- [11] 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, 1999: 167 – 169, 260 – 261.
- [12] 王建华, 刘鸿先, 徐同. 超氧化物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用[J]. 植物生理学通报, 1989 (1): 1 – 7
WANG Jianhua, LIU Hongxian, XU Tong. The role of super oxygen content dismutase (SOD) in plant adversity and the aging physiology [J]. *Plant Physiol Bull*, 1989 (1): 1 – 7
- [13] 李娜, 房伟民, 陈发棣, 等. 低温下2个寒菊品种不同开放期舌状花生理指标变化及其抗寒性差异[J]. 江西农业学报, 2009, **21** (11): 36 – 39.
LI Na, FANG Weimin, CHEN Fadi, *et al.* Effect of low temperature on physiological indexes of ray florets in winter chrysanthemum at different flowering stages [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2009, **21** (11): 36 – 39.
- [14] 韦如萍, 胡德活, 王润辉, 等. 自然低温条件下南洋楹抗寒生理研究[J]. 广东林业科技, 2008, **24** (1): 10 – 15.
WEI Ruping, HU Dehuo, WANG Runhui, *et al.* Study on physiological resistance to the cold of *Paraserianthes falcataria* under the situation of naturally low temperature [J]. *J Guangdong For Sci Technol*, 2008, **24** (1): 10 – 15.
- [15] 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.
ZHOU Jian, YOU Yang, YUAN Deyi. Effect of low temperature stress on physiological characteristics of *Magnolia grandiflora* [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, **23** (6): 38 – 42.
- [16] 杨静, 王华田, 宋承东, 等. 持续低温胁迫对红叶石楠抗寒生理生化特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007, **29** (6): 988 – 992.
YANG Jing, WANG Huatian, SONG Chengdong, *et al.* Effect of low temperature on physiological and biochemical characteristics of *Photinia glabra* var. *rubens* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2007, **29** (6): 988 – 992.
- [17] 阙生, 胡丹, 张燕. 低温胁迫对彩色马蹄莲生理生化特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, **37** (2): 486 – 487.
QUE Sheng, HU Dan, ZHANG Yan. Low temperature stress on color horse physiological and biochemical characteristics influence [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, **37** (2): 486 – 487.
- [18] 蔡仕珍, 潘远智, 陈其兵, 等. 低温胁迫对花叶细辛生理生化及生长的影响[J]. 草业学报, 2010, **19** (1): 95 – 102.
CAI Shizhen, PAN Yuanzhi, CHEN Qibing, *et al.* Effects of low temperatures on physiological and biochemical indexes and growth of *Asarum splendens* [J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2010, **19** (1): 95 – 102.
- [19] 田海涛, 高培军, 温国胜. 7种箬竹抗寒特性比较[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (6): 641 – 646.
TIAN Haitao, GAO Peijun, WEN Guosheng. Comparative study of cold resistance characteristics in seven *Indocalamus* spp. [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (6): 641 – 646.
- [20] 黄耀华, 郑蓉, 邵继锋, 等. 4个绿竹地理种源的抗寒性[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (2): 188 – 195.
HUANG Yaohua, ZHENG Rong, SHAO Jifeng, *et al.* Cold resistance in *Dendrocalamopsis oldhami* from four different geographical provenances [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (2): 188 – 195.
- [21] 应叶青, 魏建芬, 郭璟, 等. 自然低温对红杆寒竹生理特性的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2010, **29** (3): 10 – 14.
YING Yeqing, WEI Jianfen, GUO Jing, *et al.* Physiological characteristics of *Chimonobambusa marmorea* f. *variegata* under natural cooling condition [J]. *J Bamboo Res*, 2010, **29** (3): 10 – 14.