

火龙果幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性综合评价

邓仁菊^{1,2,*}, 范建新^{1,3,*}, 王永清^{1,**}, 金吉芬⁴, 刘涛⁴

¹四川农业大学园艺学院, 四川雅安625014; ²贵州省生物技术研究, 贵阳550006; ³贵州省亚热带作物研究所, 贵州兴义562400; ⁴贵州省果树科学研究所, 贵阳550006

摘要: 以野生火龙果量天尺和贵州主栽品种‘紫红龙’、‘晶红龙’、‘粉红龙’扦插幼苗为试材, 人工控温进行抗寒锻炼、低温冷害处理及恢复生长, 以未处理作对照, 测定不同处理下幼苗的电解质渗出率(REC)、可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸和丙二醛(MDA)含量的变化。结果表明, 电解质渗出率随温度降低逐渐增加, 恢复生长后电解质渗出率与对照之间没有显著差别。幼苗中的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸及丙二醛含量在抗寒锻炼和低温处理后升高, 恢复生长后降低。可溶性糖和脯氨酸含量随不同处理变幅较大, MDA和可溶性蛋白随不同处理变幅较小。运用Fuzzy数学中隶属函数法进行抗寒性综合评价, 得出火龙果抗寒性强弱表现为量天尺>‘晶红龙’>‘粉红龙’>‘紫红龙’, 与恢复生长的试验结果基本一致。

关键词: 火龙果; 抗寒性; 可溶性糖; 可溶性蛋白; 脯氨酸; 丙二醛

Physiological Responses of Pitaya (*Hylocereus* spp.) Seedlings to Chilling Stress and Comprehensive Evaluation of Their Cold Resistance

DENG Ren-Ju^{1,2,*}, FAN Jian-Xin^{1,3,*}, WANG Yong-Qing^{1,**}, JIN Ji-Fen⁴, LIU Tao⁴

¹College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China; ²Guizhou Biotechnological Institute, Guiyang 550006, China; ³Guizhou Subtropical Crops Institute, Xingyi, Guizhou 562400, China; ⁴Guizhou Fruit Institute, Guiyang 550006, China

Abstract: The dynamic changes of relative electric conductivity (REC), soluble sugar, soluble protein, proline and malonadehyde (MDA) in cold acclimation, chilling stress and recovery growth were investigated using the pitaya cutting seedlings of a wild type (*Hylocereus undatus* Liangtianchi) and three main cultivars (*Hylocereus polyrhizus* ‘Zihonglong’, *Hylocereus undatus* ‘Jinghonglong’, *Hylocereus monacanthus* ‘Fenhonglong’). The results indicated that REC increased with the temperature decrease, and there was no significant difference between contrast and recovery growth experiment. The contents of soluble sugar, soluble protein, proline and MDA increased in low temperature treatment and decreased in recovery growth in all materials. Furthermore, the variation of soluble sugar and proline contents were remarkable with different treatments, but MDA and soluble protein contents had no apparent changes in the whole processes. By using fuzzy mathematics method, the cold resistance of these pitaya cultivars were evaluated as Liangtianchi>‘Jinghonglong’>‘Fenhonglong’>‘Zihonglong’, which was in agreement with the results of recovery growth experiment.

Key words: pitaya (*Hylocereus* spp.); cold resistance; soluble sugar; soluble protein; proline; MDA

火龙果是仙人掌科多年生攀缘性肉质植物, 原产于巴西、墨西哥等中美洲地区, 果实营养丰富, 含有一般植物少有的植物白蛋白和花青苷(Kirsten等2004; Lim等2010; Jamilah等2011; Yang等2013), 以及丰富的维生素和可溶性膳食纤维(徐慧等2010; Florian等2011; Sengkhampan等2013)。火龙果是热带、亚热带的名优水果之一(Francis等2004)。20世纪90年代初, 我国台湾开始引进试种, 并选育出一些优良品种。目前, 火龙果已在我国的广西、广东、海南、福建、贵州、云南等地进行大面积商业化种植(邓仁菊等2011)。

温度是影响火龙果发展的主要限制因素, 0 °C是大多数栽培品种能忍受的最小阈值。因此, 商业化栽培应尽量避免选择霜冻地区(Thomson 2002)。据报道, 当温度低于5 °C时可能导致火龙果受冻, 其幼芽、嫩枝, 甚至包括部分成熟枝条也能被冻伤

收稿 2014-04-14 修定 2014-08-15

资助 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201003073)、贵州省科技重大专项[黔科合重大专项字(2011)6010号]和贵州省农科院创新基金[黔农科合(创新基金)2011009号]

* 同等贡献者。

** 通讯作者(E-mail: yqw14@sicau.edu.cn; Tel: 0835-2882940)。

或冻死。如2008年低温凝冻天气、2010年持续冷害天气和2014年的倒春寒天气造成广西、云南、贵州等地的火龙果大面积受冻,严重影响其产业的健康发展。但目前国内外有关这方面的研究文献相当有限(邓仁菊等2009;高国丽等2014)。因此,本研究通过开展低温胁迫下火龙果的抗寒生理相关研究,并对其抗寒性进行综合评价,旨在为火龙果的抗寒新品种选育及寻找提高抗寒性的新途径提供重要的理论依据和参考价值。

材料与方 法

1 试验材料

供试材料取自贵州省果树科学研究所罗甸试验站火龙果示范园,分别选取栽培管理措施基本相同和生长势基本相近的3个火龙果(*Hylocereus* spp.)主栽品种‘紫红龙’(*H. polyrhizus* Britt. ‘Zihonglong’)、‘晶红龙’(*H. undatus* Britt. ‘Jinghonglong’)、‘粉红龙’(*H. monacanthus* Britt. ‘Fenhonglong’)和1个野生种量天尺(*H. undatus* Britt. Liangtianchi)一年生扦插幼苗各150盆(1株·盆⁻¹)作试验材料,在贵州省农业生物技术重点实验室完成相关指标分析及鉴定。

2 低温处理

首先将材料置于4℃冷库中低温抗寒锻炼7 d,再将温度降至0℃处理7 d,然后取出进行恢复生长,以没有进行低温处理的扦插苗为对照。低温处理的人工降温速度为4℃·h⁻¹,光照时间为8:00~18:00,湿度为75%~85%。当低温处理到达预定时间后,再以4℃·h⁻¹的升温速率升至室温。分别在4℃抗寒锻炼7 d、0℃低温处理7 d、恢复生长20 d后,随机选取5盆取样进行各项生理指标及电解质渗出率的测定。

3 恢复生长

恢复生长时,将不同低温处理下的火龙果幼苗,置于25℃(白天)/20℃(晚上)条件下恢复生长,20 d后观察其成活情况并调查新萌芽数,60 d后统计其成活率和萌芽率。按成活率(%)=(幼苗成活数/幼苗总数)×100%,发芽率(%)=(幼苗新萌芽数/幼苗总数)×100%计算。

4 测定项目及方法

电解质渗出率(REC)参考邓仁菊等(2009)改良

的方法测定。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定(张志良等2009)。可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝G2205染色法测定(周瑞莲和张普金1996)。游离脯氨酸含量参考萧浪涛和王三根(2005)的方法测定。丙二醛(MDA)含量参考刘祖祺和张石诚(1994)的方法测定。

5 综合评价方法

应用Fuzzy数学中隶属函数法(李松岗2002;李轶冰等2009)进行综合评判,其计算公式如下。

与抗寒性呈正相关的参数可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸采用公式:

$$U(X_{ijk}) = \frac{X_{ijk} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

与抗寒性呈负相关的参数REC和MDA采用公式:

$$U(X_{ijk}) = 1 - \frac{X_{ijk} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, $U(X_{ijk})$ 为第*i*个火龙果品种第*j*个温度阶段第*k*项指标的隶属度,且 $U(X_{ijk}) \in [0, 1]$; X_{ijk} 表示第*i*个火龙果品种第*j*个温度阶段第*k*个指标测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 为所有参试种中第*k*项指标的最大值和最小值。

6 数据处理及统计分析

试验中每处理均重复3次,所得结果采用DPS软件进行统计分析。

实验结果

1 低温胁迫下火龙果的抗寒生理指标变化

1.1 低温胁迫下火龙果的电解质渗出率变化

从表1可以看出,火龙果幼苗的电解质渗出率随温度降低逐渐增加,进行恢复生长后电解质渗出率又逐渐减小,基本恢复到未处理时的正常水平。不同种类的火龙果对低温的敏感性各不相同,4℃低温抗寒锻炼后,量天尺、‘晶红龙’、‘粉红龙’和‘紫红龙’的电解质渗出率分别比对照增加了5.5%、10.4%、9.1%和14.8%;而0℃低温处理后,电解质渗出率分别比对照增加了22.1%、27.6%、30.7%和39.8%。从表1中还可以看出,无论经过何种处理,量天尺的电解质渗出率都表现最低,而‘紫红龙’的电解质渗出率均表现最高。根据电导率大小与植物抗寒性的关系可知,量天尺的抗寒性最强,‘紫红龙’的抗寒性最弱。

1.2 低温胁迫下火龙果的可溶性糖含量变化

由表2可知, 火龙果幼苗进行抗寒锻炼和低温处理后, 可溶性糖含量均显著升高, 进行恢复生长后, 其含量又显著降低, 但仍高于对照。对于4种不同的火龙果幼苗, 其可溶性糖含量在抗寒锻炼前和抗寒锻炼后均没有显著差异, 当0 °C低温冷害处理后, ‘紫红龙’幼苗的可溶性糖含量与其他3种之间差异明显。

1.3 低温胁迫下火龙果的可溶性蛋白含量变化

不同处理下幼苗的可溶性蛋白质含量变化因火龙果种类而异(表3)。抗寒锻炼前, 以‘紫红龙’幼苗中的可溶性蛋白含量最高, ‘粉红龙’和量天尺次之, ‘晶红龙’幼苗中的可溶性蛋白含量最低。抗寒锻炼后, 量天尺和‘晶红龙’幼苗中的可溶性蛋白含量有所增加, 其中‘晶红龙’增幅达到了显著水平; 而

‘粉红龙’和‘紫红龙’幼苗中的可溶性蛋白含量有所下降, 但与对照之间差异不明显。0 °C低温冷害处理后, 除‘紫红龙’可溶性蛋白含量稍有降低, 其余均呈显著增加趋势, 其中量天尺和‘晶红龙’分别比对照增加了91.4%和79.5%, 比抗寒锻炼后分别增加了64.6%和36.4%。恢复生长20 d后, 除‘紫红龙’略有增加外, 其余均降低, 其中量天尺和‘晶红龙’降幅明显。

1.4 低温胁迫下火龙果的脯氨酸含量变化

从表4中可以看出, 不同处理下火龙果幼苗中的脯氨酸含量呈先升高后降低的变化趋势, 且均在0 °C低温冷害处理后达到最大值。恢复生长20 d后, 幼苗中的脯氨酸含量有所降低, 但仍显著高于抗寒锻炼前的含量。不同处理下, 幼苗的脯氨酸含量均发生了显著变化, 其中, 量天尺变化幅度最大, ‘晶红龙’次之, ‘紫红龙’变化幅度相对较小。

表1 低温处理对火龙果幼苗电解质渗出率的影响

Table 1 Effects of low temperature treatments on REC in pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 电解质渗出率/% | | | |
|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 对照 | 抗寒锻炼(4 °C) | 低温处理(0 °C) | 恢复生长 |
| 量天尺 | 42.285±0.593 ^{Bb} | 44.619±1.014 ^{Bb} | 51.623±1.708 ^{Da} | 43.854±0.934 ^{Cb} |
| ‘晶红龙’ | 45.579±0.721 ^{Ac} | 50.325±0.628 ^{Ab} | 58.168±1.521 ^{Ca} | 45.399±0.873 ^{Bc} |
| ‘粉红龙’ | 47.143±0.473 ^{Ac} | 51.438±1.359 ^{Ab} | 61.604±0.490 ^{Ba} | 45.796±1.005 ^{Bc} |
| ‘紫红龙’ | 46.729±1.238 ^{Ac} | 53.651±1.172 ^{Ab} | 65.331±0.828 ^{Aa} | 48.832±0.562 ^{Ac} |

不同大写字母表示不同种类火龙果之间差异性显著($P<0.05$), 不同小写字母代表不同处理之间差异性显著($P<0.05$)。下表同此。

表2 低温处理对火龙果幼苗可溶性糖含量的影响

Table 2 Effects of low temperature treatments on soluble sugar contents in pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 可溶性糖含量/% | | | |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 对照 | 抗寒锻炼(4 °C) | 低温处理(0 °C) | 恢复生长 |
| 量天尺 | 1.336±0.259 ^{Ad} | 1.743±0.315 ^{Ab} | 2.223±0.175 ^{Aa} | 1.562±0.380 ^{Ac} |
| ‘晶红龙’ | 1.258±0.108 ^{Ad} | 1.779±0.436 ^{Ab} | 2.009±0.401 ^{Aa} | 1.541±0.192 ^{Ac} |
| ‘粉红龙’ | 1.324±0.332 ^{Ac} | 1.609±0.160 ^{Ab} | 2.208±0.542 ^{Aa} | 1.498±0.125 ^{Ab} |
| ‘紫红龙’ | 1.111±0.071 ^{Ac} | 1.651±0.309 ^{Ab} | 1.853±0.247 ^{Ba} | 1.273±0.200 ^{Bc} |

表3 低温处理对火龙果可溶性蛋白含量的影响

Table 3 Effects of low temperature treatments on soluble protein contents in pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 可溶性蛋白含量/mg·g ⁻¹ (FW) | | | |
|-------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 对照 | 抗寒锻炼(4 °C) | 低温处理(0 °C) | 恢复生长 |
| 量天尺 | 0.325±0.013 ^{Bc} | 0.378±0.079 ^{Bc} | 0.622±0.054 ^{Aa} | 0.538±0.004 ^{Ab} |
| ‘晶红龙’ | 0.244±0.042 ^{Cc} | 0.321±0.051 ^{Bb} | 0.438±0.069 ^{Ba} | 0.340±0.053 ^{Cb} |
| ‘粉红龙’ | 0.339±0.008 ^{Ba} | 0.281±0.022 ^{Cb} | 0.361±0.036 ^{Ca} | 0.312±0.048 ^{Ca} |
| ‘紫红龙’ | 0.475±0.027 ^{Aa} | 0.428±0.007 ^{Aa} | 0.398±0.013 ^{Ca} | 0.454±0.081 ^{Ba} |

1.5 低温胁迫下火龙果的MDA含量变化

不同处理下火龙果幼苗中MDA含量的变化规律不近一致(表5)。从表中可以看出,仅‘粉红龙’幼苗的MDA含量随处理不断增加,其余均呈先增加后降低的趋势,并在0℃低温处理后其含量最大。另外,抗寒锻炼前,以‘紫红龙’幼苗中的MDA含量最高,‘粉红龙’幼苗中的MDA含量最低,二者之间差异明显;抗寒锻炼和低温冷害处理后进行恢复生长,MDA含量仍然以‘紫红龙’幼苗最高,而量天尺幼苗中的MDA含量则表现最低,但不同品种之间MDA含量差异不显著。

2 抗寒性综合评价

根据前人研究结果,运用隶属函数法,综合评价植物的抗寒性比采用单个指标进行评价更为准确、可靠。通过方法中公式(1)、(2)求出不同品种火龙果各指标参数的隶属函数值,再将各项指标

的隶属函数值累加起来求其平均值得其综合评价价值,综合评价价值越大,表明抗寒性越强,反之则弱。表6为4种不同类型火龙果5项抗寒参数的综合评判结果,由此得出其抗寒性强弱顺序为量天尺>‘晶红龙’>‘粉红龙’>‘紫红龙’。

3 火龙果的恢复生长情况

火龙果为肉茎植物,经低温处理后,其外部形态特征与田间正常生长的枝条没有明显区别,当室温恢复生长10~15 d后,细胞受到伤害的火龙果枝条开始不同程度的泛黄,直接导致其死亡或因抵抗力下降出现病斑,渐而腐烂(邓仁菊等2009)。由表7可以看出,恢复生长后,野生种量天尺的存活率和萌芽率均显著高于其他3个品种,其次是‘晶红龙’,‘紫红龙’的存活率和萌芽率最低。由此表明,火龙果的抗寒力大小表现为量天尺>‘晶红龙’>‘粉红龙’>‘紫红龙’,这与电导法鉴定火龙果抗

表4 低温处理对火龙果脯氨酸含量的影响

Table 4 Effects of low temperature treatments on proline contents in pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 脯氨酸含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW) | | | |
|-------|---|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 对照 | 抗寒锻炼(4℃) | 低温处理(0℃) | 恢复生长 |
| 量天尺 | 53.258±3.018 ^{Ad} | 67.423±2.258 ^{Ac} | 101.165±5.652 ^{Aa} | 78.577±1.886 ^{Ab} |
| ‘晶红龙’ | 48.145±1.532 ^{Ac} | 53.858±3.579 ^{Bc} | 80.796±2.954 ^{Ba} | 63.381±4.267 ^{Bb} |
| ‘粉红龙’ | 45.010±3.721 ^{Ac} | 63.371±4.105 ^{Ab} | 81.273±2.157 ^{Ba} | 68.442±3.191 ^{Bb} |
| ‘紫红龙’ | 42.046±0.983 ^{Ac} | 50.449±2.774 ^{Bb} | 65.385±4.306 ^{Ca} | 47.497±1.953 ^{Cb} |

表5 低温处理对火龙果MDA含量的影响

Table 5 Effects of low temperature treatments on MDA contents in pitaya seedlings

| 火龙果品种 | MDA含量/ $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW) | | | |
|-------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 对照 | 抗寒锻炼(4℃) | 低温处理(0℃) | 恢复生长 |
| 量天尺 | 0.416±0.072 ^{Bb} | 0.507±0.035 ^{Ba} | 0.543±0.048 ^{Ca} | 0.512±0.097 ^{Aa} |
| ‘晶红龙’ | 0.504±0.013 ^{Ab} | 0.521±0.021 ^{Aa} | 0.607±0.069 ^{Ba} | 0.537±0.042 ^{Aa} |
| ‘粉红龙’ | 0.483±0.046 ^{Aa} | 0.502±0.089 ^{Ba} | 0.579±0.027 ^{Ca} | 0.585±0.073 ^{Aa} |
| ‘紫红龙’ | 0.527±0.028 ^{Ac} | 0.618±0.066 ^{Ab} | 0.642±0.033 ^{Aa} | 0.610±0.018 ^{Ab} |

表6 不同火龙果幼苗抗寒性的综合评价分析

Table 6 Comprehensive evaluation of cold resistance character of different pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 隶属函数值 | | | | | 综合评价 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | REC | 可溶性糖 | 可溶性蛋白 | 脯氨酸 | MDA | |
| 量天尺 | 0.856 | 0.544 | 0.542 | 0.559 | 0.653 | 0.631 |
| ‘晶红龙’ | 0.671 | 0.482 | 0.205 | 0.330 | 0.441 | 0.426 |
| ‘粉红龙’ | 0.600 | 0.493 | 0.124 | 0.380 | 0.436 | 0.407 |
| ‘紫红龙’ | 0.507 | 0.275 | 0.463 | 0.157 | 0.261 | 0.333 |

表7 火龙果幼苗恢复生长情况

Table 7 Recovery growth of pitaya seedlings

| 火龙果品种 | 恢复生长数/盆 | 成活数/盆 | 存活率/% | 萌芽数/盆 | 萌芽率/% |
|-------|---------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| 量天尺 | 138 | 130 | 94.203±3.512 ^a | 112 | 81.159±4.041 ^a |
| ‘晶红龙’ | 138 | 123 | 89.130±2.517 ^b | 101 | 73.188±3.215 ^b |
| ‘粉红龙’ | 138 | 120 | 86.957±3.000 ^b | 104 | 75.362±2.517 ^b |
| ‘紫红龙’ | 138 | 108 | 79.261±1.732 ^c | 87 | 63.043±2.082 ^c |

不同小写字母表示不同品种之间差异性显著($P<0.05$)。

寒性强弱以及火龙果抗寒性的综合评价结果基本一致。

讨 论

多数研究表明,植物在低温胁迫下,细胞质的膜透性发生不同程度的增大,表现为组织电解质外渗,电导率升高,这已成为低温伤害的重要标志(陈星等1999)。本研究表明,火龙果的电解质渗出率随温度降低而逐渐升高,但恢复生长后,电解质渗出率与对照之间并无显著差别,说明该过程是可逆的,作物代谢已基本恢复正常。另外,整个处理过程中,野生火龙果幼苗的电解质渗出率始终低于其他3个栽培品种,说明其抗寒力最强,而‘紫红龙’幼苗的电解质渗出率最高,表明其抗寒力最差,这与恢复生长试验的结果基本保持一致。

可溶性糖、可溶性蛋白质及脯氨酸是植物细胞内重要的渗透调节物质,是植物抗寒性鉴定的生理指标之一(徐燕等2007)。牛锦凤等(2006)研究表明,糖在植物抗寒生理中,可以提高细胞液浓度、降低冰点,可以缓和细胞质过度脱水,保持细胞不致遇冷凝固,从而提高植物抗寒性。可溶性蛋白亲水性较强,能增加细胞的保水能力,从而提高植物抗寒性,其含量与植物抗寒性呈显著正相关(林善枝等2002;杨玉珍等2007)。而脯氨酸作为衡量植物抗寒性的重要生理生化指标,目前观点尚不统一(陈雅君等1996;冯昌军等2005;王小华和庄南生2008)。本研究表明,火龙果幼苗中的可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸含量均在抗寒锻炼和0℃低温处理后有所增加,而进行恢复生长后,其含量又有所降低。整个处理过程中,可溶性糖和脯氨酸含量增降幅较为明显,恢复生长后其含量仍显著高于对照,表明幼苗中的可溶性糖和脯氨酸含量受温度胁迫反应较为敏感,对火龙果的抗

寒性具有重要的调节作用。

MDA含量变化是质膜损伤程度的重要标志之一(刘祖祺和张石诚1994)。当MDA含量大量增加时,表明体内细胞受到较严重的破坏。因此,植物的抗寒性与MDA含量呈负相关(陈少裕1991;郭卫东等2009)。本研究中,MDA含量仍随温度降低有逐渐增加的趋势,且抗寒锻炼前及恢复生长后均以‘紫红龙’中的MDA含量最高,这可能与‘紫红龙’本身抗寒性较差有关。

植物的抗寒性是受其生理生化特征综合作用的遗传表现,因此,单一抗寒指标难于判断植物对寒冷的综合适应能力。张文辉等(2004)、黎燕琼等(2007)和李轶冰等(2009)分别运用Fuzzy数学隶属函数综合评价了不同植物的抗旱性和抗寒性,均取得了满意结果。本研究运用此方法,对REC、可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸及MDA含量5个生理生化指标进行综合分析,得出火龙果幼苗的抗寒性顺序为量天尺>‘晶红龙’>‘粉红龙’>‘紫红龙’,该结果与单独运用REC评价火龙果的抗寒性结果相似,也与恢复生长结果基本一致,说明该方法作为火龙果抗寒性评价指标较为可靠。

综上,火龙果为热带亚热带肉质茎多浆植物,体内含有大量的粘液,生理分析过程较其他植物相对困难,加上受区域限制,国内外目前有关这方面的研究相当少见。本研究针对目前产业发展实际需要,开展低温胁迫下火龙果的抗寒性生理相关研究并对其进行综合评价,为下一步火龙果的抗寒新品种选育及探讨火龙果的抗寒机理提供理论依据。

参考文献

- 陈少裕(1991). 膜脂过氧化对植物细胞的伤害. 植物生理学通讯, 27(2): 84-90
- 陈星, 李俊全, 王君玲, 陈玉岭(1999). 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. 北京师范大学学报(自然科学版), 35 (2): 257~260
- 陈雅君, 崔国文, 富象乾(1996). 低温对苜蓿品种幼苗体内游离脯氨酸含量的影响. 中国草地, (6): 46~47, 50
- 邓仁菊, 范建新, 蔡永强(2011). 国内外火龙果研究进展及产业发展现状. 贵州农业科学, 39 (6): 188~192
- 邓仁菊, 范建新, 王彬, 蔡永强(2009). 火龙果抗寒性检测初探. 植物生理学通讯, 45 (10): 1023~1026
- 冯昌军, 罗新义, 沙伟, 王凤国(2005). 低温胁迫对苜蓿品种幼苗SOD、POD活性和脯氨酸含量的影响. 草业科学, 22 (6): 29~32
- 高国丽, 张冰雪, 乔光, 刘涛, 彭志军, 王彬, 蔡永强, 文晓鹏(2014). 火龙果种质资源的耐寒性综合评价. 华中农业大学学报, 33 (3): 26~32
- 郭卫东, 张真真, 蒋小韦, 陈民管, 郑建树, 陈文荣(2009). 低温胁迫下佛手半致死温度测定和抗寒性分析. 园艺学报, 36 (1): 81~86
- 李松岗编著(2002). 实用生物统计. 北京: 北京大学出版社
- 李轶冰, 杨顺强, 任广鑫, 冯永忠, 张强, 李鹏(2009). 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较. 生态学报, 29 (3): 1341~1347
- 黎燕琼, 刘兴良, 郑绍伟, 陈泓, 岳永杰, 慕长龙, 刘军(2007). 岷江上游干旱河谷四种灌木的抗旱生理动态变化. 生态学报, 27 (3): 870~878
- 林善枝, 李雪平, 张志毅(2002). 低温锻炼对毛白杨幼苗抗冻性和总可溶性蛋白质的影响. 林业科学, 38 (6): 137~141
- 刘祖祺, 张石诚(1994). 植物抗性生理学. 北京: 中国农业出版社
- 牛锦凤, 王振平, 李国, 平吉成(2006). 几种方法测定鲜食葡萄枝条抗寒性的比较. 果树学报, 23 (1): 31~34
- 王小华, 庄南生(2008). 脯氨酸与植物抗寒性的研究进展. 中国农学通报, 24 (11): 398~402
- 徐慧, 王秋玲, 韦刚, 莫建光(2010). 火龙果的保健功效及其研究进展. 广西科学院学报, 26 (3): 383~385
- 萧浪涛, 王三根(2005). 植物生理学试验技术. 北京: 中国农业出版社
- 徐燕, 薛立, 屈明(2007). 植物抗寒性的生理生态学机制研究进展. 林业科学, 43 (4): 88~93
- 杨玉珍, 王列富, 彭方仁(2007). 蛋白质的变化与植物抗寒性的关系研究进展. 生物技术通讯, 18 (4): 711~714
- 张文辉, 段宝利, 周建云, 刘祥君(2004). 不同种源栓皮栎幼苗叶片水分关系和保护酶活性对干旱胁迫的响应. 植物生态学报, 28 (4): 483~490
- 张志良, 瞿伟菁, 李小方主编(2009). 植物生理学实验指导. 第4版. 北京: 高等教育出版社
- 周瑞莲, 张普金(1996). 春节高寒草地牧草根中营养物质含量和保护酶活性的变化及其生态适应性研究. 生态学报, 16 (4): 402~407
- Francis Z, Chung-Ruey Y, Melvin N (2004). Pitaya (dragon fruit, strawberry pear). Fruit Nuts, 9: 1~3
- Florian CS, Andreas S, Reinhold C (2001). Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. Eur Food Res Technol, 212: 396~407
- Herbach KM, Stintzing FC, Carle R (2004). Thermal degradation of betacyanins in juices from purple pitaya [*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose] monitored by high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometric analyses. Eur Food Res Technol, 219: 377~385
- Jamilah B, Shu CE, Kharidah M, Dzulkifly MA, Noranizan A (2011). Physico-chemical characteristics of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel. Intern Food Res J, 18: 279~286
- Lim HK, Tan CP, Karim R, Ariffin AA, Bakar J (2010). Chemical composition and DSC thermal properties of two species of *Hylocereus* cacti seed oil: *Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*. Food Chem, 119 (4): 1326~1331
- Mizrahi Y, Nerd A, Nobel PS (1997). Cacti as crops. Hort Rev, 18: 291~320
- Sengkhampan N, Chanshotikul N, Assawajitpukdee C, Khamjae T (2013). Effects of blanching and drying on fiber rich powder from pitaya (*Hylocereus undatus*) peel. Intern Food Res J, 20 (4): 1595~1600
- Thomson P (2002). Pitahaya (*Hylocereus* species), a Promising New Fruit Crop for Southern California. Bonsall: Bonsall Publications
- Yang X, Yang Y, Shi M, Wang Y, Zhang Z, Lu Y (2013). Optimisation of anthocyanin extraction from purple pitaya and verification of antioxidant properties, antiproliferative activity and macrophage proliferation activity. Intern J Biol, 5 (3): 19~29