

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201511023

李吉涛, 谢伟玲, 柴胜丰, 等. 五种金花茶组植物的耐寒性比较研究 [J]. 广西植物, 2016, 36(12):1403-1409

LI JT, XIE WL, CHAI SF, et al. Cold tolerance of five species of *Camellia* sect. *Chrysantha* [J]. Guihaia, 2016, 36(12):1403-1409

五种金花茶组植物的耐寒性比较研究

李吉涛, 谢伟玲, 柴胜丰, 唐健民, 韦 霄*

(广西壮族自治区 广西植物研究所, 广西 桂林 541006)
(中 国 科 学 院)

摘 要: 金花茶组植物是世界珍稀、濒危的观赏植物, 具有极高的观赏价值和药用价值。为了比较金花茶组植物的耐寒性, 以五种金花茶组植物为材料, 采用人工模拟低温环境的方法对其 2 年生叶片进行低温胁迫处理, 应用电导法研究五种金花茶种质在 20 °C (常温对照)、8 °C、-2 °C、-7 °C、-12 °C、-17 °C、-22 °C 和 -27 °C 低温下相对电导率的变化, 配合 Logistic 方程, 测定其低温半致死温度 (LT_{50}), 以及叶片中游离脯氨酸、可溶性糖和丙二醛的含量。结果表明: 五种金花茶的低温半致死温度 (LT_{50}) 范围为 -14.58 ~ -12.74 °C, 其中金花茶为 -14.58 °C、龙州金花茶为 -14.27 °C、柠檬黄金花茶为 -13.44 °C、直脉金花茶为 -13.09 °C、东兴金花茶 -12.74 °C。低温半致死温度能反映金花茶种质的耐寒性, 金花茶和龙州金花茶耐寒性强, 其次为柠檬黄金花茶和直脉金花茶, 东兴金花茶耐寒性较弱。在降温过程中, 五种金花茶叶片相对电导率随温度降低呈 S 型上升, 与温度呈负相关; 脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量均呈现先上升后下降的趋势。同一低温条件下, 半致死温度低的花花茶脯氨酸和可溶性糖的含量更高, 而丙二醛含量更低。该研究结果为金花茶组植物耐寒种质选育提供了科学依据, 为人工种植金花茶提供了技术支持。

关键词: 金花茶组, 相对电导率, 半致死温度, 耐寒性

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)12-1403-07

Cold tolerance of five species of *Camellia* sect. *Chrysantha*

LI Ji-Tao, XIE Wei-Ling, CHAI Sheng-Feng, TANG Jian-Min, WEI Xiao*

(Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: *Camellia* sect. *Chrysantha* are world-famous economic and ornamental plants with high ornamental and medicinal values. In order to determine the cold tolerance, to lay a theoretical foundation for cold tolerance breeding and to provide a technical support for artificial cultivation of *Camellia* sect. *Chrysantha*, two-year old leaves of five species were employed as materials and treated under artificially simulated low temperature environment, including *C. nitidissima*, *C. longzhouensis*, *C. limonia*, *C. multipetala* and *C. tunghinensis*. We obtained the changes of electrolyte leakage rates (REC) at 20 °C (normal temperature control), 8 °C, -2 °C, -7 °C, -12 °C, -17 °C, -22 °C and -27 °C by using conductance method, calculated the semi-lethal low temperatures (LT_{50}) based on the changes in electrolyte leakage rates (REC) under different low temperature stresses with the Logistic equation, and also analyzed the contents of free proline, soluble sugar and malondialdehyde (MDA) in leaves. The results showed that the semi-lethal temperature (LT_{50}) of five species was: *C. nitidissima* -14.58 °C, *C. longzhouensis* -14.27 °C, *C. limonia* -13.44 °C, *C. multipetala* -13.09 °C, and *C. tunghinensis* -12.74 °C.

收稿日期: 2015-11-19 修回日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(31160137); 广西自然科学基金(2015GXNSFBA139051, 2016GXNSFAA380122); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 14004) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31160137); the Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNSFBA139051, 2016GXNSFAA380122); the Science Research Foundation of Guangxi Institute of Botany (Guizhiye 14004)].

作者简介: 李吉涛(1980-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事植物分子生物学研究, (E-mail) ljtyouth@163.com.

* 通讯作者: 韦霄, 博士, 研究员, 主要从事生物多样性保育研究, (E-mail) weixiao@gxib.cn.

℃. The cold tolerance of five species *Camellia* sect. *Chrysantha* could be reliably reflected by the semi-lethal temperature. *C. nitidissima* and *C. longzhouensis* had high cold tolerance. *C. limonia* and *C. multipetala* had medium cold tolerance. *C. tunghinensis* had poor cold tolerance. The REC of the five species increased following an S-curve with the temperature drop, and temperature showed highly significant negative correlation to cold tolerance. The contents of free proline, soluble protein and MDA increased first and then decreased. Under the same temperature treatment, *C. nitidissima* with lower LT_{50} temperature had higher contents of free proline, soluble protein and lower contents of MDA. The results provide the information for selection of cold-tolerant germplasm of *Camellia* sect. *Chrysantha*.

Key words: *Camellia* sect. *Chrysantha*, relative electric conductivity, semi-lethal temperature, cold tolerance

金花茶组植物为山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)常绿灌木或小乔木,是世界珍稀的观赏植物与种质资源,是山茶花中唯一具有金黄色花的类群,被誉为“世界珍品、茶族皇后”,亦是培育黄色系山茶新品种的珍贵材料,具有极高的观赏价值和科研价值。其中金花茶已列入国家一级保护植物和国际生物多样性公约附属 II 物种(傅立国,1992;梁盛业,1993)。目前,对于金花茶组植物逆境生理,研究发现干旱胁迫影响金花茶幼苗光合生理特性、抗氧化能力及渗透物质含量(柴胜丰等,2015;邓旭等,2012)。李辛雷等(2006)的研究表明,显脉金花茶、金花茶、贵州金花茶、长柱金花茶和直脉金花茶等 5 个物种属于中度热敏感性物种。赵世伟(1995)进行了金花茶组植物的引种北移试验,探讨了金花茶组植物对低温胁迫的反应及抗寒性鉴定。吴洪明(2004)通过电导法测定从金花茶(*C. nitidissima*)中选育的品种(‘金农推’‘金防城’‘金坛洛’‘金皇后’)、小花金花茶(*C. micrantha*)和从弄岗金花茶(*C. grandis*)中选出的‘金陇瑞’低温条件下叶片的电解质渗出率并初步分析了叶片受冻临界低温范围。大部分金花茶组植物的花期比较长,一般是 11 月至翌年 3 月,期间恰逢“春节黄金周”。花期若遭遇“倒春寒”等低温天气,势必影响其观赏价值。因此,开展金花茶抗寒种质资源评价,对其抗寒性进行评价,探讨其抗寒胁迫生理,筛选出耐寒性强的金花茶种质,对于保护金花茶种质资源、扩大其引种范围、促进产业发展均具有重要意义。

遭受低温胁迫后,植物细胞膜的透性增加,胞内电解质外渗,致使电导率增大。电导率大小与细胞受伤程度呈正相关。电导率越高,说明植物细胞膜受到的伤害越大,植株的抗寒性越弱(Lyons & Raison,1970)。电解质渗出率法是植物抗寒性鉴定中常用且比较可靠的一种方法(Liu et al,2012),其结果与物种的田间冷害症状等基本相符,常被用来

作为植物抗寒性鉴定的理化指标(李刚等,2007;许瑛和陈发棣,2008;王冠群等,2014;王玮等,2015;赵昌琼等,2003)。茶梅、佛手、锦带花、苹果、葡萄等园艺植物的耐寒性评价均采用电解质外渗法(徐康等,2005;郭卫东等,2009;王玲等,2012;时朝等,2013;何伟等,2014)。本研究以五种金花茶种质为实验材料,测定人工模拟低温胁迫下的相对电导率和相关生理指标,分析其耐寒性差异,以为金花茶组植物耐寒种质的选育提供实验依据,为热带起源的金花茶组植物的北移、防寒栽培提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料及低温处理

金花茶组植物种类为金花茶(*Camellia nitidissima*)、龙州金花茶(*C. longzhouensis*)、柠檬黄金花茶(*C. limonia*)、直脉金花茶(*C. multipetala*)和东兴金花茶(*C. tunghinensis*),选取生长势基本一致的健康植株的两年生枝条的中部叶片,采摘后立即装入自封袋,速带回实验室。分别用自来水、蒸馏水冲洗,用吸水纸吸干水分。将每种叶片分成 8 份,置于密封的自封袋中,放入低温培养箱中进行低温处理。根据金花茶种质圃所在地桂林雁山的年均温度(约 20 ℃)、绝对低温(-6 ℃)及油茶、山茶的低温半致死温度(王永红等,2006;韦霄等,2007;曾雯君等,2013),试验设置 7 个处理温度,分别为 8 ℃、-2 ℃、-7 ℃、-12 ℃、-17 ℃、-22 ℃和-27 ℃,以室温(20 ℃)为对照。参考王冠群等(2014)的低温处理程序并做适当调整,当低温培养箱为 8 ℃时,将材料放入缓慢降温,降温速度为 10 ℃·h⁻¹,降至目标温度后维持 3 h。材料取出后,分析测定电解质渗出率,并进行脯氨酸、可溶性糖、丙二醛等生理指标分析及鉴定。实验重复 3 次。

1.2 叶片电解质渗出率的测定

将对照和处理组叶片拿出后,避开主脉和边缘,

将叶片剪碎,准确称量 1.0 g 放入试管中,加入 20 mL 去离子水,室温震荡浸提 6 h 后静置待测。先用 DDS-11A 型电导仪测定浸提液的电导率 R_1 ,代表低温处理后的叶片电解质的外渗值。再将盛有浸提液的试管置于灭菌锅中,121 °C 处理 10 min,冷却后静置 6 h,测定所有细胞被破坏后浸提液的电导率 R_2 ,代表细胞电解质的总含量。最后用去离子水的电导率 R_{CK} 作为对照,计算相对电导率 (REC) = $[(R_1 - R_{CK}) / (R_2 - R_{CK})] \times 100\%$ 。将电解质渗出率配以 Logistic 回归方程 $y = K / (1 + ae^{-bx})$ 求得拐点温度即半致死温度 (LT_{50})。式中, y 为相对电导率, x 为处理温度, a 、 b 是方程参数, K 是相对电导率饱和值。计算方法参照莫惠栋 (1983) 和刘世红等 (2011) 的方法。

1.3 抗寒生理指标的测定

游离脯氨酸 (Pro)、可溶性糖及丙二醛 (MDA) 含量测定参考李合生 (2000) 的方法,每个指标平行测定 3 次。

1.4 数据处理

所有数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,用 LSD 法检验不同处理间是否具有显著性差异,每个处理重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 低温对叶片细胞相对电导率的影响

从图 1 可以看出,在经一系列低温处理后,五种金花茶种质叶片的相对电导率总体变化趋势均随处理温度的降低而逐渐升高,近似呈 S 型的单峰曲线分布。在降温初期 (8 ~ -12 °C),5 种叶片的相对电导率均表现出不同程度的升高,说明叶片细胞膜损伤加重,膜透性增加,但同一温度不同金花茶叶片的 REC 差异不显著,其原因是植物可能在一定程度上对低温胁迫产生了防御反应,使细胞膜得以修复,说明适时的低温锻炼能够增强金花茶的抗寒性。随着处理温度降至 -12 ~ -17 °C 区间,相对电导率都超过了 50%,说明此时离子渗透已经相当严重。当温度继续下降至 -22 ~ -27 °C 区间,相对电导率变化又趋平缓,说明此时细胞膜已基本被破坏,电解质大都渗透到细胞外。

2.2 金花茶低温半致死温度比较

相对电导率用 Logistic 方程进行拟合后, R_2 在 0.97 以上,说明拟合结果是十分可靠的。从表 1 可

以看出,通过非线性回归分析并结合 Logistic 方程拟合,得到的拐点温度即为各金花茶种质的低温半致死温度 LT_{50} 。五种金花茶种质的低温半致死温度分别为 -14.58 °C、-14.27 °C、-13.44 °C、-13.09 °C 和 -12.74 °C,分布范围为 -12.74 ~ -14.58 °C,均出现在其各自相对电导率骤升的温度区域 (-12 ~ -17 °C) 内。根据低温半致死温度的高低,得出五种金花茶种质耐寒性由强到弱依次为金花茶 > 龙州金花茶 > 柠檬黄金花茶 > 直脉金花茶 > 东兴金花茶。

2.3 低温处理后五种金花茶叶片生理指标的变化

五种金花茶叶片的游离脯氨酸含量变化差异较大,但总体呈现先上升后下降的趋势,达到峰值的温度是 -17 °C,含量分别为 79.71、78.33、74.04、73.90、70.41 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$; 20 °C 和 8 °C 时,不同金花茶叶片的脯氨酸含量发生变化,但是没有达到显著差异;当处理温度降到 0 °C 以下,同一温度下不同金花茶叶片的脯氨酸含量变化差异显著 (表 2), LT_{50} 低的花花茶脯氨酸含量高于 LT_{50} 高的金花茶。

在低温胁迫下,随着处理温度的下降,五种金花茶的可溶性糖含量均呈现先升后降的变化趋势, LT_{50} 低的花茶叶片的可溶性糖的含量更高。当温度降到 -17 °C 时,5 种材料的可溶性糖含量均达到峰值,半致死温度最低的花花茶可溶性糖含量为 35.62 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$,半致死温度最高的东兴金花茶可溶性糖含量为 28.99 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。

在低温胁迫范围内,五种金花茶叶片的 MDA 含量随温度的降低呈现出先上升后下降的趋势,达到峰值的温度均为 -17 °C,但不同材料其 MDA 峰值含量不同,分别为 58.02、59.10、73.24、74.00、82.61 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$, LT_{50} 越低,MDA 峰值越小 (表 2)。由此可知,低温胁迫后,膜脂过氧化程度与 LT_{50} 高低正相关, LT_{50} 低的材料膜脂过氧化程度较低。

3 讨论与结论

低温是热带、亚热带植物生长过程中遭遇的主要非生物限制因子之一 (邓仁菊等,2014)。本研究中,五种金花茶种质叶片经一系列低温处理后相对电导率总体变化趋势均随处理温度的降低而逐渐升高,近似呈 S 型的单峰曲线分布,这与朱根海等 (1986) 的研究结果一致。植物的抗寒能力的强弱并非单一因素所决定的,而是一个复杂的生理生化过程 (Levitt et al, 1980)。经过低温锻炼,许多植物

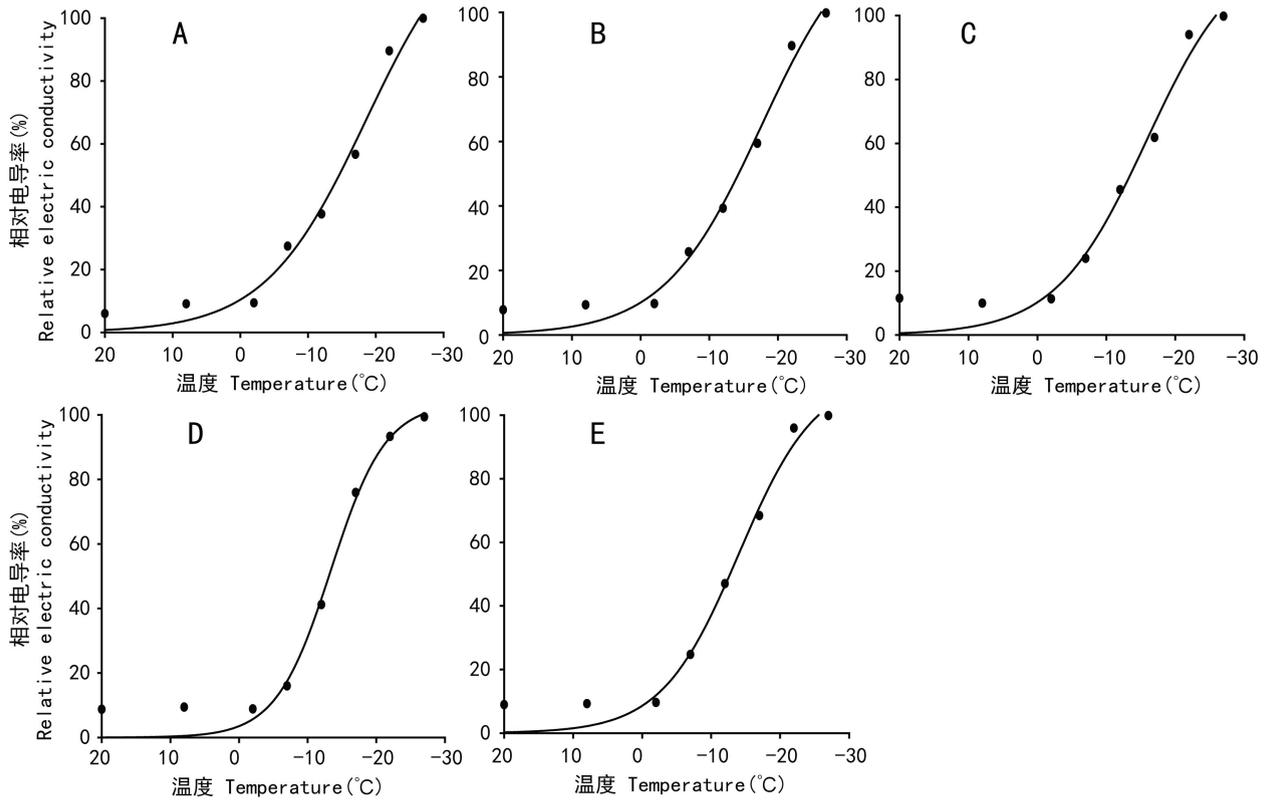


图 1 五种金花茶相对电导率随温度变化的 Logistic 曲线 A. 金花茶; B. 龙州金花茶; C. 柠檬黄金花茶; D. 直脉金花茶; E. 东兴金花茶。

Fig. 1 Logistic curve of relative electric conductivity to temperature of five species of *Camellia* sect. *Chrysantha*

A. *C. nitidissima*; B. *C. longzhouensis*; C. *C. limonia*; D. *C. multipetala*; E. *C. tunghinensis*.

表 1 不同低温处理下五种金花茶相对电导率 Logistic 回归方程及半致死温度 (LT_{50})

Table 1 Relative conductivity Logistic regression equations and semilethal temperature (LT_{50}) of five species of *Camellia* sect. *Chrysantha* under low temperature treatments

种名 Species	回归方程 Regression equation	半致死温度 Semi-lethal temperature ($^{\circ}C$)	拟合度 Fitting degree
金花茶 <i>Camellia nitidissima</i>	$Y = 134.794\ 3 / (1 + 11.942\ 351\ 64e^{0.134x})$	-14.58	0.983 7
龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	$Y = 129.121\ 5 / (1 + 11.846\ 868\ 04e^{0.141x})$	-14.27	0.984 7
柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	$Y = 122.132\ 6 / (1 + 10.938\ 988\ 33e^{0.151x})$	-13.44	0.974 4
直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	$Y = 103.730\ 2 / (1 + 28.529\ 765\ 12e^{0.25x})$	-13.09	0.972 9
东兴金花茶 <i>C. tunghinensis</i>	$Y = 112.801\ 5 / (1 + 12.125\ 592\ 3e^{0.178x})$	-12.74	0.975 6

注: X 表示所对应的温度 ($^{\circ}C$), Y 表示相对电导率 (%).

Note: X and Y indicate temperature ($^{\circ}C$) and relative electric conductivity (REC, %), respectively.

的抗寒能力明显增强,但抗寒力的增强幅度因植物种类而异。半致死温度(LT_{50})是评价植物抗寒性强弱的一个重要且比较准确的指标(刘慧民等, 2014)。本研究从金花茶 LT_{50} 入手,并结合生理生化指标比较金花茶种质的耐寒性,方法简便且准确

性较高,可以作为耐寒金花茶种质筛选的一个量化指标;而低温半致死温度(LT_{50})也可作为金花茶低温抗寒分子生物学研究的处理温度。通过对收集的金花茶组植物资源进行耐寒性评价,筛选出适合向亚热带季风气候区北缘推广种植的优良种质,扩大

表 2 不同低温处理下五种金花茶叶片游离脯氨酸、可溶性糖及 MDA 含量的变化
Table 2 Changes of proline, soluble sugar and MDA content in the leaves of five species of
Camellia sect. *Chrysantha* under low temperature treatments

温度 Temperature (°C)	种名 Species	游离脯氨酸含量 Proline content (ng · g ⁻¹ FW)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (mg · g ⁻¹ FW)	丙二醛含量 MDA content (nmol · g ⁻¹ FW)
20	金花茶 <i>Camellia nitidissima</i>	11.15 ± 0.25a	8.20 ± 0.99a	9.17 ± 0.60a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	11.29 ± 0.89a	7.80 ± 0.98a	8.92 ± 0.56a
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	11.61 ± 1.45a	7.27 ± 1.01a	9.29 ± 0.65a
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	11.08 ± 0.85a	7.09 ± 0.79a	9.88 ± 0.70a
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	11.31 ± 0.95a	6.87 ± 0.31a	9.75 ± 0.39a
8	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	12.46 ± 1.09a	11.63 ± 0.96a	12.74 ± 0.45a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	12.56 ± 0.98a	11.49 ± 1.19ac	13.19 ± 0.90abc
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	12.17 ± 0.98a	10.51 ± 0.99a	14.31 ± 0.87b
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	12.40 ± 0.96a	10.04 ± 0.42b	14.29 ± 0.79b
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	12.64 ± 1.18a	9.49 ± 0.39bd	15.60 ± 0.66b
-2	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	18.98 ± 1.01a	14.32 ± 0.75a	20.78 ± 0.80a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	17.36 ± 0.95a	13.83 ± 0.71a	21.27 ± 0.77a
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	15.65 ± 1.11b	12.30 ± 0.79b	23.18 ± 0.97b
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	14.76 ± 0.96bc	12.57 ± 0.81b	23.99 ± 0.37b
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	13.37 ± 0.58c	11.94 ± 0.98b	26.07 ± 0.55c
-7	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	31.92 ± 1.02a	22.85 ± 0.93a	29.33 ± 0.31a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	26.64 ± 2.07b	22.37 ± 0.57a	30.98 ± 0.73b
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	25.72 ± 1.94b	18.67 ± 0.63b	34.79 ± 0.75c
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	24.26 ± 0.94bc	17.67 ± 0.69b	36.09 ± 0.64d
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	20.13 ± 1.23c	15.35 ± 0.78c	42.52 ± 0.39e
-12	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	45.67 ± 2.02a	29.88 ± 0.69a	47.45 ± 0.46a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	41.83 ± 0.92b	29.42 ± 0.45a	49.69 ± 0.42b
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	38.43 ± 1.05c	26.19 ± 0.48b	60.31 ± 0.37c
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	37.12 ± 1.95cd	25.88 ± 0.99b	59.18 ± 0.96c
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	34.85 ± 1.85d	21.30 ± 0.79c	68.32 ± 0.80d
-17	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	79.71 ± 2.04a	35.62 ± 0.70a	58.02 ± 1.01a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	78.33 ± 2.72a	35.20 ± 0.98a	59.10 ± 0.91a
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	74.04 ± 2.01b	31.76 ± 0.79b	73.24 ± 0.86b
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	73.90 ± 2.02b	31.56 ± 0.71b	74.00 ± 0.60b
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	70.41 ± 1.06b	28.99 ± 0.59c	82.61 ± 0.69c
-22	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	49.61 ± 1.36a	26.56 ± 1.01a	56.19 ± 0.96a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	49.41 ± 1.13ac	25.97 ± 0.49a	56.90 ± 1.03a
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	47.15 ± 0.14bd	24.04 ± 0.69b	65.28 ± 0.99b
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	47.14 ± 0.96d	23.97 ± 0.68b	67.90 ± 0.97c
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	44.89 ± 0.97e	21.49 ± 0.79c	79.52 ± 0.44d
-27	金花茶 <i>C. nitidissima</i>	31.50 ± 1.05a	22.87 ± 0.97a	52.87 ± 0.89a
	龙州金花茶 <i>C. longzhouensis</i>	30.33 ± 0.95a	21.74 ± 0.79a	53.52 ± 0.67a
	柠檬黄金花茶 <i>C. limonia</i>	28.76 ± 0.88b	19.72 ± 0.75b	58.11 ± 0.92b
	直脉金花茶 <i>C. multipetala</i>	29.18 ± 2.01b	19.70 ± 0.69b	63.63 ± 0.76c
	东兴金花茶 <i>C. tungchinensis</i>	26.29 ± 0.98c	15.38 ± 0.74c	70.06 ± 0.98d

注: 同列数据后标注的不同小写字母, 表示在 5% 水平上不同种金花茶在同一温度下差异显著。

Note: The lower case after the figure in the same column indicate the same temperatures under different species had significant difference at 5% level.

引种范围,有利于更好地保护金花茶组植物种质资源。

脯氨酸与可溶性糖是植物细胞内两种重要的渗透调节物质。当遇到逆境胁迫时,植物体内脯氨酸与可溶性糖的积累可以降低细胞渗透势和保持细胞膜的稳定性,从而减轻低温胁迫对细胞的伤害(王忠,2000;Mo et al, 2011)。本研究中,受低温胁迫后,五种金花茶叶片的脯氨酸与可溶性糖含量随着处理温度的降低呈先上升后下降的趋势。可能是由于细胞在低温胁迫初期失水,同时胞内的可溶性糖和游离脯氨酸的积累,促使细胞液的浓度增加和渗透势降低,从而保持细胞质膜的稳定性。但当温度继续下降到一定程度,细胞内的抗氧化系统遭到破坏,保护性酶活性丧失,导致可溶性糖和游离脯氨酸的合成减少,含量下降。但是在相同的胁迫温度条件下,LT₅₀低、耐寒性强的金花茶种质合成渗透调节物质的能力可能更强,积累较多的可溶性糖和游离脯氨酸,更有利于减轻低温胁迫对植株的伤害。

MDA 是膜脂过氧化的产物,可与细胞膜蛋白等结合,破坏细胞膜的稳定性;还会造成细胞膜内不饱和脂肪酸的过氧化,导致细胞膜破裂(庞金安等,2000)。MDA 含量的变化可以反映低温胁迫后植物细胞膜的过氧化程度。当 MDA 大量增加时,表明植物细胞膜受到的破坏较严重(王树刚等,2011)。本研究中,金花茶叶片内 MDA 含量随胁迫温度降低而呈先上升后下降的趋势,与岳海等(2010)在热带起源的经济植物澳洲坚果中的研究结果一致。随着胁迫温度的降低,叶片中 MDA 含量逐渐升高,表明细胞膜脂发生了过氧化;当温度继续降低,MDA 含量大幅上升达到峰值,膜脂过氧化加剧,叶片细胞受到严重伤害;之后 MDA 含量下降,但下降幅度不大,可能是可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质降低了细胞膜脂不饱和脂肪酸的过氧化程度,减缓了 MDA 的合成,对叶片细胞的保护作用增强(王冠群等,2014)。

本研究结果表明,金花茶和龙州金花茶耐寒性最强,柠檬黄金花茶和直脉金花茶的耐寒性次之,东兴金花茶的耐寒性最差。本研究是在模拟低温条件下进行金花茶种质耐寒性比较,但在实际生产中遭遇低温胁迫时可能还会伴随水分等胁迫,其生理变化会更复杂,相关研究仍需进一步深入。

参考文献:

CHAI SF, TANG JM, WANG ML, et al, 2015. Photosynthetic and

physiological characteristics of *Camellia petelotii* seedlings under drought stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 35(2): 322-328. [柴胜丰,唐健民,王满莲,等,2015.干旱胁迫对金花茶幼苗光合生理特性的影响[J].西北植物学报,35(2): 322-328.]

DENG RJ, FAN JX, WANG YQ, et al, 2014. Semilethal temperature of Pitaya under low temperature stress and evaluation on their cold resistance [J]. *Plant Physiol J*, 50(11): 1742-1748. [邓仁菊,范建新,王永清,等,2014.低温胁迫下火龙果的半致死温度及抗寒性分析[J].植物生理学报,50(11): 1742-1748.]

DENG X, DONG C, ZHANG GM, 2012. The effects of drought stress on the antioxidant resistance and osmotic adjusting substances content of two varieties seedling of *Camellia nitidissima* [J]. *Chin J Trop Crops*, 33(6): 1034-1039. [邓旭,董晨,张广明,2012.干旱对两种金花茶幼苗抗氧化能力及渗透物质含量的影响[J].热带作物学报,33(6): 1034-1039.]

FU LG, 1992. China plant red data book [M]. Beijing: Science Press. [傅立国,1992.中国植物红皮书[M].北京:科学出版社.]

GUO WD, ZHANG ZZ, JIANG XW, et al, 2009. Semi-lethal temperature of *Fingered citron* (*Citrusmedica* var. *sarcodactylis* Swingle) under low temperature stress and evaluation on their cold resistance [J]. *Acta Horti Sin*, 36(1): 81-86. [郭卫东,张真真,蒋小韦,等,2009.低温胁迫下佛手半致死温度测定和抗寒性分析[J].园艺学报,36(1): 81-86.]

HE W, AI J, YANG YM, et al, 2014. Study on the semi-lethal temperature of germplasm resources of *Vitis amurensis* branches [J]. *N Horti*, 21: 19-22. [何伟,艾军,杨义明,等,2014.山葡萄种质资源枝条的低温半致死温度研究[J].北方园艺,21: 19-22.]

LEVITT J, 1980. Responses of plants to environmental stress [M]. New York: Academic Press: 533-568.

LIANG SY, 1993. *Camellia nitidissima* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. [梁盛业,1998.金花茶[M].北京:中国林业出版社.]

LI G, JIANG WB, WENG ML, et al, 2007. A preliminary study on cold resistance of six *Magnolia* species seedlings [J]. *Acta Horti Sin*, 34(3): 783-786. [李刚,姜卫兵,翁忙玲,等,2007.木兰科6种常绿树幼苗抗寒性的初步研究[J].园艺学报,34(3): 783-786.]

LI HS, 2000. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press. [李合生,2000.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社.]

LIU HM, ZHANG Q, SU Q, et al, 2014. Studies on evaluation and screening of cold resistance during seedling stage in eighteen species or varieties of *Spiraea* [J]. *Acta Horti Sin*, 41(12): 2427-2436. [刘慧民,仇茜,苏青,等,2014.18种绣线菊苗期抗寒性评价与筛选[J].园艺学报,41(12): 2427-2436.]

LIU SH, TIAN YH, WEI LP, et al, 2011. Semi-lethal low temperatures and impact of low temperature on antioxidant system of 30 varieties of rubber trees in Xishuangbanna [J]. *Plant Physiol J*, 47(5): 505-511. [刘世红,田耀华,魏丽萍,等,2011.西双版纳30个橡胶树品种的低温半致死温度及低温对抗氧化系统的影响[J].植物生理学报,47(5): 505-511.]

LIU WP, SU SC, LIU X, et al, 2012. Comparison of different cultivars of blueberry overwintering ability in Qingdao of China

- [J]. *Am J Plant Sci*, 3: 391-396.
- LI XL, LI JY, FAN MH, et al, 2006. Heat tolerances of major *Camellia* species [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 26(9): 1803-1810. [李辛雷, 李纪元, 范妙华, 等, 2006. 山茶属主要物种耐热性研究 [J]. *西北植物学报*, 26(9): 1803-1810.]
- LYONS JM, RAISON JK, 1970. Oxidative activity of mitochondria isolated from plant tissues sensitive and resistant to chilling injury [J]. *Plant Physiol*, 45: 386-389.
- MO HD, 1983. Logistic equation and its application [J]. *J Jiangsu Agric Col*, 4 (2): 53-57. [莫惠栋, 1983. Logistic 方程及其应用 [J]. *江苏农学院学报*, 4 (2): 53-57.]
- MO Y, LIANG G, SHI W, et al, 2011. Metabolic responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) leaves to low and high temperature-induced stresses [J]. *Afr J Biotechnol*, 10(7): 1117-1124.
- PANG JA, MA DH, HUO ZR, et al, 2000. Effect of salicylic acid on chilling resistance of cucumber seedlings [J]. *Acta Agric Boreal-Sin*, 15(1): 112-115. [庞金安, 马德华, 霍振荣, 等, 2000. 水杨酸预处理对提高黄瓜幼苗耐低温能力的影响 [J]. *华北农学报*, 15(1): 112-115.]
- SHI C, WANG YZ, LIU GJ, 2013. Application of Logistic equation on determination of the semi-lethal temperature of five different varieties of apple branches [J]. *North Hortic*, 2: 36-38. [时朝, 王亚芝, 刘国杰, 2013. 应用 Logistic 方程确定五种苹果枝条的半致死温度的研究 [J]. *北方园艺*, 2: 36-38.]
- WANG GQ, LI DQ, ZHANG JP, et al, 2014. Comparison of cold tolerance within 6 cultivars of *Iris germanica* [J]. *Acta Hortic Sin*, 41(4): 773-780. [王冠群, 李丹青, 张佳平, 等, 2014. 德国鸢尾 6 个品种的耐寒性比较 [J]. *园艺学报*, 41 (4): 773-780.]
- WANG L, WANG CL, MA XJ, et al, 2012. Cold resistance of new weigela varieties [J]. *J NE For Univ*, 40(12): 43-46. [王玲, 王春雷, 马喜娟, 等, 2012. 锦带花新品种抗寒性 [J]. *东北林业大学学报*, 40(12): 43-46.]
- WANG SG, WANG ZL, WANG P, et al, 2011. Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 31 (4): 1064-1072. [王树刚, 王振林, 王平, 等, 2011. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价 [J]. *生态学报*, 31 (4): 1064-1072.]
- WANG W, LI HX, ZHAO MX, et al, 2015. Study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for seven pear cultivars [J]. *J Fruit Sci*, 32(5): 860-865. [王玮, 李红旭, 赵明新, 等, 2015. 7 个梨品种的低温半致死温度及耐寒性评价 [J]. *果树学报*, 32(5): 860-865.]
- WANG YH, LI JY, TIAN M, et al, 2006. Influences of low temperature stress on *Camellia* species' two physiological index related to resistance to coldness [J]. *For Res*, 19 (1): 121-124. [王永红, 李纪元, 田敏, 等, 2006. 低温胁迫对山茶物种 2 个抗寒性生理指标的影响 [J]. *林业科学研究*, 19(1): 121-124.]
- WANG Z, 2000. *Plant physiology* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press. [王忠, 2000. *植物生理学* [M]. 北京: 中国农业出版社.]
- WEI X, JIANG YS, WEI JQ, et al, 2007. Investigation on the geographical distribution and habitat of *Camellia nitidissima* [J]. *Ecol Environ*, 16(3): 895-899. [韦霄, 蒋运生, 韦记青, 等, 2007. 珍稀濒危植物金花茶地理分布与生境调查研究 [J]. *生态环境*, 16(3): 895-899.]
- WU HM, 2004. Study and evaluation of germplasm resources for sect. *Chrysanthemum* Chang in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [吴洪明, 2004. 福建金花茶组植物种质资源研究与评价 [D]. 福州: 福建农林大学.]
- XU K, XIA YP, XU BY, et al, 2005. Measurement of cold tolerance based on REC and the Logistic equation in *Camellia hiemalis* 'Shishi Gashira' [J]. *Acta Hortic Sin*, 32(1): 148-150. [徐康, 夏宜平, 徐碧玉, 等, 2005. 以电导法配合 Logistic 方程确定茶梅 '小玫瑰' 的抗寒性 [J]. *园艺学报*, 32 (1): 148-150.]
- XU Y, CHEN FD, 2008. The LT_{50} and cold tolerance adaptability of chrysanthemum during a natural drop in temperature [J]. *Acta Hortic Sin*, 35(4): 559-564. [许瑛, 陈发棣, 2008. 菊花 8 个品种的低温半致死温度及其抗寒适应性 [J]. *园艺学报*, 35(4): 559-564.]
- YUE H, LI GH, LI GW, et al, 2010. Studies on cold resistance of different macadamia cultivars [J]. *Acta Hortic Sin*, 37(1): 31-38. [岳海, 李国华, 李国伟, 等, 2010. 澳洲坚果不同品种耐寒特性的研究 [J]. *园艺学报*, 37(1): 31-38.]
- ZENG WJ, JIANG ZP, CHEN W, et al, 2013. The research of semi-lethal temperature and cold tolerance of *Camellia oleifera* cultivars clones in Guangxi [J]. *Chin Agric Sci Bul*, 29(4): 23-25. [曾雯珺, 江泽鹏, 陈伟, 等, 2013. 广西油茶主栽无性系低温半致死温度与耐寒性研究 [J]. *中国农学通报*, 29(4): 23-25.]
- ZHAO CQ, LU ZG, PANG YZ, et al, 2003. Semi-lethal low temperature and low temperature adaptability of tow *Taxus media* species [J]. *J Chongqing Univ*, 26 (6): 86-88. [赵昌琼, 芦站根, 庞永珍, 等, 2003. 曼地亚红豆杉的半致死温度与对低温的适应性 [J]. *重庆大学学报*, 26 (6): 86-88.]
- ZHAO SW, 1995. Study on cold tolerance and introduction of *Camellia nitidissima* [D]. Beijing: Beijing Forestry University. [赵世伟, 1995. 金花茶抗寒性与引种北移研究 [D]. 北京: 北京林业大学.]
- ZHU GH, LIU ZQ, ZHU PR, 1986. A study on determination of lethal temperature with logistic function [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 3: 11-16. [朱根海, 刘祖祺, 朱培仁, 1986. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度研究 [J]. *南京农业大学学报*, 3: 11-16.]