

不同绣球品种耐寒性评价及主要指标筛选

陈慧杰¹, 严子桢^{1,2}, 齐香玉¹, 陈双双¹, 冯景¹, 金玉妍¹, 苗艳华¹, 邓衍明^{1,①}

(1. 江苏省农业科学院休闲农业研究所 江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 江苏 淮安 223001)

摘要: 为了明确绣球(*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.)品种的耐寒性及筛选耐寒性评价主要指标,对40个绣球品种的低温半致死温度(LT_{50})进行比较和耐寒性分级,在此基础上,对5℃、0℃、-5℃、-10℃、-15℃、-20℃下耐寒品种‘小町’(‘Komachi’)、‘佳澄’(‘Kasumi’)、‘无尽夏’(‘Endless Summer’)和不耐寒品种‘甜蜜幻想’(‘Sweet Fantasy’)、‘灵感’(‘Inspiration’)、‘你我的情感’(‘You and Me Feelings’)叶的抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)和渗透调节物质含量进行比较,并对这些耐寒指标进行相关性分析和主成分分析。结果表明:供试绣球品种 LT_{50} 的波动较大,变化范围为-36.68℃~-1.87℃,其中,‘小町’的 LT_{50} 最低,‘佳澄’、‘平瓣’(‘Flat’)、‘蒂亚娜’(‘Tijana’)、‘塞尔玛’(‘Selma’)、‘含羞叶’(‘Elbtal’)、‘花手鞠’(‘Stockings’)、‘蓝色多瑙河’(‘Blue Danube’)和‘无尽夏’的 LT_{50} 均低于-20℃。40个绣球品种的耐寒性被分成不耐寒、较耐寒、耐寒和强耐寒4个等级,分别包含13、18、8和1个品种。6个代表品种的过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)和超氧化物歧化酶活性及MDA、脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白质(SP)和可溶性糖含量随温度降低基本呈先升高后降低的变化趋势。相关性分析结果表明PPO活性和Pro含量与 LT_{50} 呈极显著($P<0.01$)负相关。主成分分析结果表明:前4个主成分的累计贡献率为81.212%,说明这4个主成分基本能够反映绣球品种的耐寒性;PPO活性、CAT活性、Pro含量和SP含量的负荷量绝对值分别在第1、第2、第3和第4主成分中最高。研究结果显示:供试绣球品种间的耐寒性差异较大,‘小町’等9个品种的耐寒性较强,能够在冬季温度偏低地区露天栽培,并可作为绣球耐寒品种选育的亲本。PPO活性、CAT活性、Pro含量和SP含量为绣球耐寒性评价的主要指标,尤其是PPO活性和Pro含量。

关键词: 绣球; 耐寒性; 低温半致死温度(LT_{50}); 相关性分析; 主成分分析

中图分类号: Q945.78; Q948.112+.2; S685.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)02-0041-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.05

Evaluation of cold tolerance and screening of main indexes of different cultivars of *Hydrangea macrophylla* CHEN Huijie¹, YAN Zizhen^{1,2}, QI Xiangyu¹, CHEN Shuangshuang¹, FENG Jing¹, JIN Yuyan¹, MIAO Yanhua¹, DENG Yanming^{1,①} (1. Provincial Key Laboratory of Genetics and Improvement of Horticultural Crops, Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Faculty of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(2): 41-49

Abstract: In order to clarify the cold tolerance of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser. cultivars and screen the main indexes for evaluating cold tolerance, the semi-lethal low temperature (LT_{50}) of 40 cultivars of *H. macrophylla* were compared, and the cold tolerance was graded, on the basis, the activities of antioxidant enzymes, and contents of malondialdehyde (MDA) and osmotic adjustment substances in leaves of cold-tolerant cultivars ‘Komachi’, ‘Kasumi’, and ‘Endless Summer’ and cold-intolerant cultivars ‘Sweet Fantasy’, ‘Inspiration’, and ‘You and Me Feelings’ under 5℃, 0℃,

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 国家林业和草原局重点研发计划项目[GLM(2021)86号]; 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(22)2035; CX(23)3062]; 江苏省种业振兴揭榜挂帅项目[JBGS(2021)097]

作者简介: 陈慧杰(1989—),女,河南周口人,博士,助理研究员,主要从事花卉栽培与分子生物学研究。

①通信作者 E-mail: nkstdym@163.com

引用格式: 陈慧杰, 严子桢, 齐香玉, 等. 不同绣球品种耐寒性评价及主要指标筛选[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 41-49.

-5 °C, -10 °C, -15 °C, and -20 °C were compared, and the correlation analysis and principal component analysis of these cold tolerance indexes were conducted. The results show that the fluctuation of LT_{50} of test cultivars of *H. macrophylla* is relatively large, with a variation range of -36.68 °C to -1.87 °C, in which, the LT_{50} of 'Komachi' is the lowest, while the LT_{50} of 'Kasumi', 'Flat', 'Tijana', 'Selma', 'Elbtal', 'Stockings', 'Blue Danube', and 'Endless Summer' are all below -20 °C. The cold tolerance of 40 cultivars of *H. macrophylla* is divided into 4 grades, namely cold intolerant, relatively cold tolerant, cold tolerant, and strongly cold tolerant, containing 13, 18, 8, and 1 cultivars, respectively. The activities of catalase (CAT), polyphenol oxidase (PPO), and superoxide dismutase as well as the contents of MDA, proline (Pro), soluble protein (SP), and soluble sugar of 6 representative cultivars show a tendency to first increase and then decrease in general with the decrease of temperature. The correlation analysis result shows that PPO activity and Pro content show extremely significant ($P < 0.01$) negative correlations with LT_{50} . The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first four principal components is 81.212%, indicating that the four principal components can basically reflect the cold tolerance of cultivars of *H. macrophylla*; the absolute values of loads of PPO activity, CAT activity, Pro content, and SP content are the highest in the first, second, third, and fourth principal components, respectively. It is suggested that there are relatively large differences in cold tolerance among test cultivars of *H. macrophylla*, the cold tolerance of 9 cultivars, such as 'Komachi', are relatively strong, and they can be cultivated outdoors in areas with relatively low temperature in winter, and they can be used as parents for breeding cold-tolerant cultivars of *H. macrophylla*. PPO activity, CAT activity, Pro content, and SP content are main indexes for evaluating cold tolerance of *H. macrophylla*, especially PPO activity and Pro content.

Key words: *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.; cold tolerance; semi-lethal low temperature (LT_{50}); correlation analysis; principal component analysis

绣球 [*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.] 又名八仙花、紫阳花等, 为绣球花科 (Hydrangeaceae) 绣球属 (*Hydrangea* Linn.) 多年生灌木, 被广泛应用于园林绿化、家庭盆栽、鲜切花和干花等领域^[1-2], 且相关研究集中在种子萌发^[3]、花色和叶色变异机制^[4-5]、组培快繁^[6-7]、抗旱性^[8]、耐热性^[9]、抗病性^[2, 10]等方面。目前市场上的多数绣球品种仅限在长江流域及以南地区露地栽培, 无法在广大北方地区露地栽培越冬^[11], 因此, 亟需培育出耐寒性强的绣球新品种。中国绣球育种起步晚, 国内市场上的很多绣球品种为国外引进品种, 并且品种间的适应性和抗逆性存在较大差异^[12-13], 因此, 亟需对绣球品种进行耐寒性评价, 筛选适宜绣球耐寒品种选育的亲本。

低温胁迫下, 植物细胞质膜的流动性降低、渗透性增强、结构和组分发生改变, 导致细胞内的电解质出现不同程度的外渗现象, 因此, 相对电导率可作为植物耐寒性评价的重要指标^[14-15]。在实际研究中, 研究者通常将相对电导率与 Logistic 方程相结合, 通过计算低温半致死温度 (LT_{50}) 进行植物耐寒性评价^[16-19]。然而, 植物耐寒性是体内多种物质参与抗逆反应的综合作用结果^[20], 仅通过 LT_{50} 并不能真实反映植物的耐寒性, 已有研究表明过氧化氢酶、超氧

化物歧化酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性以及丙二醛、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量等指标均与植物耐寒性密切相关^[21-23]。因此, 分析低温胁迫下植物的生理生化特征及其与耐寒性的关系对系统、科学评价植物的耐寒性具有重要意义。

本研究以江苏省农业科学院绣球花种质资源中心温室保存的 40 个绣球品种为材料, 采用相对电导率结合 Logistic 方程计算不同绣球品种的 LT_{50} , 基于各品种的 LT_{50} 进行 k-means 聚类分析, 根据聚类结果进行耐寒性分级, 在此基础上, 选取耐寒和不耐寒代表品种各 3 个, 对其在不同低温胁迫下的生理生化指标变化进行分析, 并对这些指标进行相关性分析和主成分分析, 以期明确绣球品种的耐寒性及筛选绣球耐寒性评价主要指标, 为筛选绣球耐寒品种育种亲本以及筛选适合在北方露地栽培的绣球品种提供参考依据, 为绣球种质资源耐寒性综合评价奠定研究基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试 40 个绣球品种均保存于江苏省农业科学院绣球花种质资源中心, 具体品种名及编号见表 1。所

表 1 供试绣球品种及编号

Table 1 Cultivar and number of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser. tested

| 编号 No. | 品种 Cultivar | 编号 No. | 品种 Cultivar | 编号 No. | 品种 Cultivar | 编号 No. | 品种 Cultivar |
|-----------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|----------------|-----------|--------------------------------|
| C1 | 你我的情感 You and Me Feelings | C11 | 棉花糖 Marshmallow | C21 | 小町 Komachi | C31 | 无尽夏新娘 Endless Summer The Bride |
| C2 | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | C12 | 妖精之瞳 Demon's Eye | C22 | 平瓣 Flat | C32 | 花手鞠 Stockings |
| C3 | 鸡尾酒 Cocktail | C13 | 姑娘 Sheila | C23 | 蒂亚娜 Tijana | C33 | 蓝色多瑙河 Blue Danube |
| C4 | 雪舞 Snow Dance | C14 | 马雷夏尔 Marechal Foch | C24 | 塞尔玛 Selma | C34 | 无尽夏 Endless Summer |
| C5 | 你我的浪漫 You and Me Romance | C15 | 水天一色 Shuitianyise | C25 | 红粉佳人 Pink Lady | C35 | 流星红 Meteor Red |
| C6 | 灵感 Inspiration | C16 | 舞子 Maiko | C26 | 革命 Revolution | C36 | 早安 Good-morning |
| C7 | 白色天使 White Angel | C17 | 你我的永恒 You and Me Forever | C27 | 泉鸟 Spring Bird | C37 | 花神 Flora |
| C8 | 爱你的吻 Love Your Kiss | C18 | 爱莎 Ayesha | C28 | 含羞叶 Elbtal | C38 | 红佳 Hongjia |
| C9 | 十字架 Cross | C19 | 佳澄 Kasumi | C29 | 红宝石 Ruby | C39 | 鲜溅 Fresh Splash |
| C10 | 平顶 Musical | C20 | 罗斯 Ross | C30 | 翡翠 Jadeite | C40 | 宝山 Baoshan |

有材料均为 3 年生盆栽苗(株高 40~45 cm, 基径 6~8 mm), 每盆 3 株。3 月 6 日至 3 月 19 日气温波动变化较大, 其中, 3 月 17 日气温最低(4 °C~6 °C); 3 月 19 日气温回升至 8 °C~15 °C。

1.2 方法

1.2.1 相对电导率测定 在 2023 年 3 月 20 日, 每个品种随机选取 20 株样株, 采集植株从上向下第 4 叶位长势基本一致的健康叶片; 自来水冲洗 15 min 后, 用吸水纸吸干表面水分; 避开叶脉, 取直径约 6 mm 的叶圆片, 将同一品种样品充分混匀; 每个品种称取 0.2 g 样品 3 份, 包裹在去离子水浸润的纱布中, 放入离心管内并拧紧盖子, 于 4 °C 冰箱中过夜。次日, 使用 9512 型低温循环仪(美国 PolyScience 公司)进行低温处理, 处理温度分别为 5 °C、0 °C、-5 °C、-10 °C、-15 °C 和 -20 °C, 每个处理均在 30 min 内匀速降温至目标温度, 处理时间为 1 h。处理结束后, 加入 13 mL 去离子水, 室温浸泡 15 h, 使用 DDS-307 电导率仪(雷磁-上海仪电科学仪器股份有限公司)测定煮沸前后的电导率, 煮沸时间为 30 min。根据测定结果计算相对电导率, 计算公式为相对电导率=(煮沸前电导率/煮沸后电导率)×100%^[24]。

1.2.2 低温半致死温度(LT_{50})计算 利用相对电导率拟合 Logistic 方程, 并计算 LT_{50} 。获得的 Logistic 方程为 $y=k/(1+a \cdot e^{-bx})$, 其中, y 为细胞伤害率即相对电导率, x 为处理温度, k 为细胞伤害率的饱和容量, a 和 b 为方程参数, e 为自然常数。为了确定 a 和 b 的值, 按照杨英楠等^[15]的方法对上述方程进行线性化处理, 通过直线方程计算 a 和 b 值, 曲线拐点 [$x =$

$\ln(a/b)$] 即 LT_{50} 。

1.2.3 耐寒性分级 依据不同品种的 LT_{50} 进行 k-means 聚类分析, 根据聚类结果对各品种的耐寒性进行分级, 共 4 个等级: I 级不耐寒, II 级较耐寒, III 级耐寒, IV 级强耐寒。

1.2.4 生理生化指标测定 选取 LT_{50} 从高到低排名前 3 位和后 3 位的品种作为不耐寒和耐寒绣球的代表品种。每个品种随机选取 6 株样株, 采集植株从上向下第 4 叶位长势基本一致的健康叶片; 自来水冲洗 15 min 后, 用吸水纸吸干表面水分; 使用 9512 型低温循环仪进行低温处理, 处理温度及方法同“1.2.1”。处理结束后将材料置于 4 °C 冰箱中待测。

采用植物超氧化物歧化酶测试盒、植物过氧化氢酶测试盒、多酚氧化酶测试盒、植物丙二醛含量测试盒、脯氨酸含量测试盒、植物可溶性糖含量测试盒、考马斯亮蓝法蛋白质含量测试盒测定相应指标。所有测试盒均购自苏州科铭生物技术有限公司; 每个指标测定设置 3 个生物学重复。

1.3 数据处理与分析

使用 EXCEL 2021 软件整理实验数据, 使用 SPSS 20.0 软件进行差异显著性分析、k-means 聚类分析、相关性分析和主成分分析^[25]。

2 结果和分析

2.1 绣球品种耐寒性差异分析

统计结果(表 2)表明: 在不同低温下, 40 个绣球品种间的相对电导率差异较大; 并且, 各品种的相对

表2 40个绣球品种的耐寒性分析
Table 2 Analysis on cold tolerance of 40 cultivars of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.

| 品种 ¹⁾ Cultivar ¹⁾ | 各低温下的相对电导率/% ²⁾ Relative electrical conductivity under each low temperature ²⁾ ($\bar{X} \pm SE$) | | | | | 回归方程 Regression equation | 拟合度 ³⁾ Fitting degree ³⁾ | $LT_{50}/^{\circ}C$ ⁴⁾ | 耐寒等级 Cold tolerance grade | |
|--|---|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|------------------------------|--------|
| | 5 °C | 0 °C | -5 °C | -10 °C | -15 °C | | | | | -20 °C |
| C1 | 38.47±2.22d | 54.34±4.89c | 65.02±4.36b | 89.68±1.81a | 91.65±1.55a | 93.67±1.33a | $y=100/(1+1.57e^{-0.23x})$ | 0.971 * | -1.98 | I |
| C2 | 32.11±1.33c | 53.41±6.82b | 58.80±1.46b | 95.98±1.92a | 92.26±1.85a | 96.45±0.32a | $y=100/(1+2.01e^{-0.29x})$ | 0.851 ** | -2.44 | I |
| C3 | 15.89±0.29b | 16.51±0.61b | 19.80±1.21b | 48.70±0.93a | 53.25±4.62a | 55.05±3.64a | $y=100/(1+6.51e^{-0.15x})$ | 0.867 * | -12.32 | II |
| C4 | 14.63±0.14d | 43.45±5.99c | 65.06±8.47b | 79.51±7.06ab | 89.29±1.32a | 95.79±2.22a | $y=100/(1+4.23e^{-0.31x})$ | 0.984 ** | -4.69 | I |
| C5 | 11.15±0.38c | 14.66±3.39c | 44.13±3.42b | 46.21±6.82b | 83.93±14.53a | 96.86±0.37a | $y=100/(1+12.95e^{-0.36x})$ | 0.936 ** | -7.11 | I |
| C6 | 15.31±0.36c | 17.15±0.34c | 41.24±11.38b | 70.38±4.05a | 72.62±1.56a | 78.14±2.28a | $y=100/(1+5.97e^{-0.23x})$ | 0.918 * | -1.87 | I |
| C7 | 15.27±0.71e | 15.25±0.83c | 27.83±2.63d | 69.51±0.51c | 77.24±2.45b | 87.08±3.12a | $y=100/(1+8.34e^{-0.27x})$ | 0.936 * | -7.77 | I |
| C8 | 22.14±1.77e | 32.82±1.81d | 42.78±3.97c | 56.04±3.19b | 71.28±3.52a | 75.64±2.32a | $y=100/(1+3.45e^{-0.17x})$ | 0.990 ** | -7.50 | I |
| C9 | 15.80±1.16c | 22.44±0.38b | 25.38±1.00b | 35.69±2.73a | 37.11±0.33a | 37.67±0.92a | $y=100/(1+4.67e^{-0.08x})$ | 0.908 * | -19.02 | II |
| C10 | 22.75±1.32d | 27.62±3.79d | 40.21±1.53c | 46.57±2.70bc | 50.82±3.37b | 68.41±0.53a | $y=100/(1+3.54e^{-0.13x})$ | 0.966 ** | -10.03 | I |
| C11 | 20.36±3.21c | 24.11±2.93c | 26.76±1.34c | 54.61±1.91b | 64.15±0.11b | 83.73±6.46a | $y=100/(1+5.55e^{-0.20x})$ | 0.928 ** | -8.40 | I |
| C12 | 34.60±1.74c | 36.16±1.31c | 39.14±1.33c | 51.82±4.19b | 53.01±6.47b | 68.10±2.42a | $y=100/(1+2.22e^{-0.09x})$ | 0.907 * | -8.77 | I |
| C13 | 26.07±2.03c | 27.71±2.84c | 39.76±2.36b | 40.39±3.47b | 42.12±0.95b | 56.17±5.16a | $y=100/(1+2.94e^{-0.08x})$ | 0.905 * | -13.49 | II |
| C14 | 20.94±1.37c | 22.58±0.93c | 38.30±3.36b | 43.54±1.71b | 45.59±3.65ab | 51.73±0.70a | $y=100/(1+3.70e^{-0.10x})$ | 0.914 * | -13.22 | II |
| C15 | 28.27±2.03d | 39.03±2.36c | 39.07±3.07c | 48.14±2.65b | 52.64±2.58ab | 57.69±3.28a | $y=100/(1+2.30e^{-0.08x})$ | 0.957 ** | -10.71 | II |
| C16 | 39.25±1.25b | 39.30±2.55b | 45.42±2.99ab | 46.31±3.92a | 52.33±4.29a | 54.53±5.43a | $y=100/(1+1.63e^{-0.05x})$ | 0.951 * | -10.91 | II |
| C17 | 19.28±1.37c | 21.01±2.06c | 22.74±1.41c | 35.02±4.04b | 54.70±4.99a | 55.00±4.76a | $y=100/(1+5.22e^{-0.13x})$ | 0.901 * | -13.01 | II |
| C18 | 18.12±1.00d | 19.24±1.68d | 31.78±1.71c | 43.92±2.21bc | 44.43±1.47ab | 45.97±3.02a | $y=100/(1+4.48e^{-0.10x})$ | 0.882 * | -14.42 | II |
| C19 | 16.28±0.35d | 21.52±0.97c | 21.59±0.52c | 27.57±0.45b | 28.76±0.31ab | 30.87±1.60a | $y=100/(1+4.73e^{-0.05x})$ | 0.964 ** | -30.76 | III |
| C20 | 11.82±0.12d | 19.53±1.01c | 22.33±1.16c | 35.51±1.61b | 32.18±0.26b | 57.61±3.67a | $y=100/(1+7.16e^{-0.14x})$ | 0.956 ** | -14.48 | II |
| C21 | 13.00±0.68b | 14.80±1.94b | 20.32±0.71a | 21.02±0.49a | 22.38±0.65a | 23.89±0.05a | $y=100/(1+6.26e^{-0.05x})$ | 0.896 * | -36.68 | IV |
| C22 | 10.01±0.67c | 22.86±0.93b | 23.67±0.14ab | 23.97±0.55ab | 25.20±1.15ab | 25.22±0.38a | $y=100/(1+5.72e^{-0.06x})$ | 0.735 * | -30.60 | III |
| C23 | 12.14±0.44c | 13.69±2.34c | 14.14±0.37c | 24.12±1.34b | 24.59±1.90b | 28.03±1.83a | $y=100/(1+7.72e^{-0.08x})$ | 0.903 * | -26.89 | III |
| C24 | 9.06±0.33e | 12.46±0.57d | 14.26±0.59cd | 15.91±0.69bc | 16.90±0.56b | 22.91±0.33a | $y=100/(1+9.30e^{-0.06x})$ | 0.945 ** | -25.40 | III |
| C25 | 9.09±0.21e | 15.29±0.87d | 22.37±0.82c | 27.66±0.34b | 35.01±0.69a | 36.45±0.48a | $y=100/(1+8.26e^{-0.12x})$ | 0.946 * | -18.04 | II |
| C26 | 10.69±0.59c | 14.97±1.07c | 15.72±0.91c | 29.70±2.89b | 45.32±4.32a | 46.81±1.65a | $y=100/(1+9.23e^{-0.15x})$ | 0.941 * | -15.12 | II |
| C27 | 9.61±0.42d | 9.66±0.85d | 12.14±1.19cd | 22.46±0.67c | 28.52±1.74b | 37.49±1.28a | $y=100/(1+11.87e^{-0.13x})$ | 0.941 * | -4.18 | I |
| C28 | 11.01±0.63c | 13.40±0.94de | 16.38±0.58cd | 18.08±1.28c | 22.86±1.47b | 40.76±1.30a | $y=100/(1+9.10e^{-0.10x})$ | 0.884 * | -21.86 | III |
| C29 | 15.79±0.46d | 17.91±1.49cd | 16.92±0.26c | 32.87±0.87b | 37.32±2.03b | 41.59±2.18a | $y=100/(1+6.14e^{-0.10x})$ | 0.883 * | -17.97 | II |
| C30 | 13.54±0.66d | 13.66±0.73d | 18.54±0.33c | 22.64±0.44c | 39.40±1.63b | 47.24±2.92a | $y=100/(1+7.78e^{-0.12x})$ | 0.932 * | -17.38 | II |
| C31 | 12.53±0.36d | 13.13±1.59d | 15.12±1.72d | 30.10±1.48c | 38.49±1.63b | 43.24±1.37a | $y=100/(1+8.62e^{-0.13x})$ | 0.921 * | -16.70 | II |
| C32 | 16.99±1.60c | 20.12±2.06bc | 22.12±1.18bc | 26.38±1.06b | 29.93±1.09b | 42.86±1.52a | $y=100/(1+5.25e^{-0.08x})$ | 0.931 * | -20.99 | III |
| C33 | 15.09±0.69e | 17.15±1.36de | 20.63±2.07cd | 22.55±2.18bc | 26.26±1.82ab | 30.53±1.00a | $y=100/(1+5.69e^{-0.06x})$ | 0.995 ** | -28.97 | III |
| C34 | 12.95±0.86c | 13.54±0.45c | 13.59±0.67c | 30.29±1.45b | 32.34±1.30b | 44.20±0.72a | $y=100/(1+8.53e^{-0.12x})$ | 0.882 * | -30.72 | III |
| C35 | 20.61±1.62d | 20.97±0.76d | 43.18±3.45c | 71.22±1.80b | 74.48±1.29ab | 78.24±1.99a | $y=100/(1+4.31e^{-0.20x})$ | 0.885 * | -7.24 | I |
| C36 | 13.05±0.43b | 13.07±0.30b | 18.12±1.39b | 38.57±1.33a | 42.95±3.78a | 43.41±1.54a | $y=100/(1+7.80e^{-0.13x})$ | 0.883 ** | -15.33 | II |
| C37 | 18.45±0.70b | 18.58±0.34b | 21.69±0.42b | 32.79±3.19a | 37.66±0.91a | 38.41±2.49a | $y=100/(1+4.96e^{-0.08x})$ | 0.911 * | -19.77 | II |
| C38 | 19.25±0.98e | 20.95±2.03e | 29.69±1.50d | 42.89±3.56c | 51.63±4.44b | 69.71±1.68a | $y=100/(1+5.21e^{-0.15x})$ | 0.965 ** | -10.79 | II |
| C39 | 15.54±1.36d | 20.76±2.06c | 23.54±0.96c | 38.37±1.58b | 39.82±1.10a | 43.70±1.37a | $y=100/(1+5.23e^{-0.10x})$ | 0.939 * | -16.23 | II |
| C40 | 19.83±1.09c | 28.78±0.21c | 41.84±1.80b | 42.70±2.89b | 47.31±4.59b | 76.57±0.77a | $y=100/(1+4.07e^{-0.15x})$ | 0.882 * | -9.62 | I |

¹⁾ C1: ‘你我的情感’ ‘You and Me Feelings’; C2: ‘甜蜜幻想’ ‘Sweet Fantasy’; C3: ‘鸡尾酒’ ‘Cocktail’; C4: ‘雪舞’ ‘Snow Dance’; C5: ‘你我的浪漫’ ‘You and Me Romance’; C6: ‘灵感’ ‘Inspiration’; C7: ‘白色天使’ ‘White Angel’; C8: ‘爱你的吻’ ‘Love Your Kiss’; C9: ‘十字架’ ‘Cross’; C10: ‘平顶’ ‘Musical’; C11: ‘棉花糖’ ‘Marshmallow’; C12: ‘妖精之瞳’ ‘Demon's Eye’; C13: ‘姑娘’ ‘Sheila’; C14: ‘马雷夏尔’ ‘Marechal Foch’; C15: ‘水天一色’ ‘Shuitianyise’; C16: ‘舞子’ ‘Maiko’; C17: ‘你我的永恒’ ‘You and Me Forever’; C18: ‘爱莎’ ‘Ayesha’; C19: ‘佳澄’ ‘Kasumi’; C20: ‘罗斯’ ‘Ross’; C21: ‘小町’ ‘Komachi’; C22: ‘平瓣’ ‘Flat’; C23: ‘蒂亚娜’ ‘Tijana’; C24: ‘塞尔玛’ ‘Selma’; C25: ‘红粉佳人’ ‘Pink Lady’; C26: ‘革命’ ‘Revolution’; C27: ‘泉鸟’ ‘Spring Bird’; C28: ‘含羞叶’ ‘Elbtal’; C29: ‘红宝石’ ‘Ruby’; C30: ‘翡翠’ ‘Jadeite’; C31: ‘无尽夏新娘’ ‘Endless Summer The Bride’; C32: ‘花手鞠’ ‘Stockings’; C33: ‘蓝色多瑙河’ ‘Blue Danube’; C34: ‘无尽夏’ ‘Endless Summer’; C35: ‘流星红’ ‘Meteor Red’; C36: ‘早安’ ‘Good-morning’; C37: ‘花神’ ‘Flora’; C38: ‘红佳’ ‘Hongjia’; C39: ‘鲜溅’ ‘Fresh Splash’; C40: ‘宝山’ ‘Baoshan’.

²⁾ 同行中的不同小写字母表示在不同低温间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant ($P<0.05$) differences between different low temperatures.

³⁾ * : $P<0.05$; ** : $P<0.01$.

⁴⁾ LT_{50} : 低温半致死温度 Semi-lethal low temperature.

电导率基本上随着温度降低而升高。基于相对电导率获得的 Logistic 方程的拟合度均达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 水平。

由表 2 可见:不同绣球品种的低温半致死温度 (LT_{50}) 波动较大,变化范围为 $-36.68\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中,‘小町’(‘Komachi’)的 LT_{50} 最低,‘佳澄’(‘Kasumi’)、‘无尽夏’(‘Endless Summer’)和‘平瓣’(‘Flat’)的 LT_{50} 较低(均低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$),‘蒂亚娜’(‘Tijana’)、‘塞尔玛’(‘Selma’)、‘含羞叶’(‘Elbtal’)、‘花手鞠’(‘Stockings’)和‘蓝色多瑙河’(‘Blue Danube’)的 LT_{50} 也较低(均低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而‘灵感’(‘Inspiration’)的 LT_{50} 最高。供试绣球品种的耐寒性被分成 4 个等级,其中, I 级不耐寒,包含 13 个品种; II 级较耐寒,包含 18 个品种; III 级耐寒,包含 8 个品种; IV 级强耐寒,仅‘小町’1 个品种。

2.2 不同低温下绣球代表品种生理生化指标分析

2.2.1 抗氧化酶活性分析

选取‘小町’、‘佳澄’和‘无尽夏’作为耐寒绣球代表品种,选取‘你我的情感’(‘You and Me Feelings’)、‘灵感’和‘甜蜜幻想’(‘Sweet Fantasy’)作为不耐寒绣球代表品种,对不同低温下这 6 个品种叶的过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)和超氧化物歧化酶(SOD)活性进行分析,结果见表 3。结果表明:‘小町’的 CAT 活性随温度降低持续显著 ($P < 0.05$) 升高;‘佳澄’和‘无尽夏’的 CAT 活性则随温度降低呈先升高后降低的趋势,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下最高,且在各温度间的差异基本上显著。‘甜蜜幻想’、‘灵感’和‘你我的情感’的 CAT 活性随温度降低呈先升高后降低的趋势,其中,‘甜蜜幻想’和‘灵感’的 CAT 活性在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下最高,且显著高于其他温度;‘你我的情感’的 CAT 活性在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下最高,

表 3 不同低温下耐寒和不耐寒绣球代表品种叶的抗氧化酶活性分析 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Analysis on antioxidant enzyme activities of leaves of representative cultivars of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser. with cold tolerance and cold intolerance under different low temperatures ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature | 不同品种的过氧化氢酶活性/ $(\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$ Catalase activity of different cultivars | | | | | |
|---------------------------------------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 3.36±0.02f | 5.86±0.03e | 2.53±0.01f | 2.18±0.05e | 1.85±0.03e | 3.79±0.02d |
| 0 | 6.34±0.14e | 6.84±0.11d | 3.41±0.00e | 8.05±0.18b | 9.96±0.01b | 6.35±0.03c |
| -5 | 8.30±0.01d | 7.75±0.04c | 6.88±0.02c | 12.52±0.01a | 10.24±0.15a | 11.55±0.82a |
| -10 | 12.56±0.27c | 9.54±0.10b | 10.28±0.19b | 7.93±0.08b | 7.78±0.03c | 11.59±0.17a |
| -15 | 15.10±0.05b | 18.17±0.40a | 12.82±0.13a | 7.25±0.16c | 6.56±0.07d | 8.70±0.02b |
| -20 | 16.25±0.02a | 7.81±0.08c | 5.18±0.02d | 6.15±0.00d | 6.49±0.05d | 2.76±0.01e |
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature | 不同品种的多酚氧化酶活性/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$ Polyphenol oxidase activity of different cultivars | | | | | |
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 164.68±4.41d | 70.76±1.34de | 58.12±1.51f | 46.20±0.61d | 46.04±0.70e | 34.68±0.43e |
| 0 | 248.56±5.86c | 75.28±2.03d | 118.28±2.91c | 48.12±1.30d | 53.96±1.32d | 62.96±1.42b |
| -5 | 277.80±4.84b | 139.12±4.29b | 133.64±1.24b | 123.32±3.80a | 128.28±2.24a | 66.36±0.80a |
| -10 | 316.52±8.83a | 240.88±9.29a | 145.16±2.48a | 62.12±0.55c | 79.60±1.98b | 46.28±0.74c |
| -15 | 182.60±3.94d | 92.76±2.31c | 98.40±2.73d | 68.12±1.10b | 78.76±1.20b | 46.64±0.48c |
| -20 | 172.08±4.06d | 60.20±1.87e | 89.08±4.08e | 56.92±0.50c | 69.80±3.00c | 37.60±0.32d |
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature | 不同品种的超氧化物歧化酶活性/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$ Superoxide dismutase activity of different cultivars | | | | | |
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 160.07±2.78b | 177.11±5.53c | 190.09±2.75c | 148.60±1.20b | 154.85±7.20b | 138.61±2.69a |
| 0 | 169.69±1.34b | 205.96±2.44b | 203.29±3.80b | 205.96±5.80a | 185.09±6.29a | 123.25±1.52b |
| -5 | 170.41±4.57b | 226.31±6.48a | 219.33±4.55a | 123.83±1.37c | 119.23±4.23c | 88.00±1.04c |
| -10 | 194.89±6.52a | 94.86±3.21d | 227.23±5.70a | 101.33±3.32d | 73.81±2.57d | 45.35±0.31d |
| -15 | 127.76±1.57c | 49.57±1.05e | 119.72±2.31d | 58.77±1.09e | 63.22±1.61d | 27.79±0.38e |
| -20 | 110.58±4.19d | 19.39±0.67f | 26.40±0.56e | 13.96±0.12f | 35.44±0.48e | 21.77±0.08f |

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同低温间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different low temperatures.

且与-5℃的差异不显著,但显著高于其他温度。在-15℃下,耐寒品种的CAT活性明显高于不耐寒品种。

总体来看,6个代表品种的PPO活性总体上随温度降低呈先升高后降低的趋势,其中,耐寒品种的PPO活性在-10℃下最高,而不耐寒品种的PPO活性在-5℃下最高。各品种的PPO活性在不同低温胁迫下多存在显著差异,并且,各低温胁迫下耐寒品种的PPO活性基本上明显高于不耐寒品种。

‘小町’、‘佳澄’、‘无尽夏’、‘甜蜜幻想’和‘灵

感’的SOD活性随温度降低呈先升高后降低的趋势,其中,‘小町’和‘无尽夏’的SOD活性在-10℃下最高,‘佳澄’的SOD活性在-5℃下最高,‘甜蜜幻想’和‘灵感’的SOD活性在0℃下最高;‘你我的情感’的SOD活性则随温度降低持续下降。各品种的SOD活性在不同温度间多存在显著差异,耐寒和不耐寒品种间的SOD活性差异不明显。

2.2.2 丙二醛和渗透调节物质含量分析 对上述6个绣球代表品种在不同低温下叶中丙二醛(MDA)和渗透调节物质的含量进行分析,结果见表4。结果

表4 不同低温下耐寒和不耐寒绣球代表品种叶中丙二醛和渗透调节物质含量分析($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 4 Analysis on contents of malonaldehyde and osmotic adjustment substances in leaves of representative cultivars of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser. with cold tolerance and cold intolerance under different low temperatures ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 温度/℃ Temperature | 不同品种的丙二醛含量/(nmol·g ⁻¹) Malonaldehyde content in different cultivars | | | | | |
|---------------------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 26.39±0.59b | 45.71±0.59b | 30.75±1.24d | 46.54±1.82b | 34.09±1.41c | 54.73±0.74b |
| 0 | 41.54±1.09a | 54.14±0.64a | 77.92±0.68a | 91.91±2.70a | 81.99±1.93a | 100.40±0.94a |
| -5 | 21.16±0.45c | 25.89±0.84c | 39.90±0.85b | 29.03±1.01c | 38.17±1.45b | 37.32±0.87c |
| -10 | 15.43±0.39d | 24.13±0.56c | 33.32±0.26c | 19.23±0.35d | 18.80±0.49d | 30.86±0.93d |
| -15 | 14.50±0.50d | 20.88±0.43d | 28.33±0.48e | 15.51±0.39de | 14.37±0.33e | 22.96±0.92e |
| -20 | 12.13±0.15e | 20.66±0.49d | 16.86±0.42f | 12.25±0.24e | 9.33±0.13f | 18.06±0.51f |
| 温度/℃ Temperature | 不同品种的脯氨酸含量/(μg·g ⁻¹) Proline content in of different cultivars | | | | | |
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 121.13±3.32b | 110.70±4.44a | 102.68±0.80a | 40.63±0.65d | 71.00±1.97c | 48.74±1.17d |
| 0 | 147.05±6.64a | 118.57±2.75a | 104.29±1.82a | 85.56±2.84a | 90.99±3.13a | 87.66±2.59a |
| -5 | 89.61±2.82c | 94.76±1.92b | 95.95±2.80b | 70.00±1.68b | 93.69±0.49a | 76.41±1.74b |
| -10 | 71.01±1.04d | 66.34±2.78c | 83.46±1.08c | 57.05±0.83c | 83.60±0.97b | 56.06±1.46c |
| -15 | 59.92±1.96e | 64.65±1.51c | 58.57±1.21d | 53.07±0.95c | 58.38±2.43d | 45.79±0.43de |
| -20 | 55.05±1.35e | 51.11±2.13d | 44.12±0.93e | 31.38±0.29e | 45.19±0.99e | 41.11±1.45e |
| 温度/℃ Temperature | 不同品种的可溶性蛋白质含量/(mg·g ⁻¹) Soluble protein content in different cultivars | | | | | |
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 6.92±0.08d | 8.19±0.10c | 7.00±0.13c | 7.39±0.21a | 8.02±0.29a | 9.03±0.03a |
| 0 | 7.41±0.14c | 8.97±0.14b | 7.26±0.19c | 6.52±0.04b | 8.30±0.18a | 6.79±0.03b |
| -5 | 8.10±0.12b | 9.06±0.16b | 8.13±0.19b | 6.53±0.22b | 6.65±0.11b | 6.78±0.16b |
| -10 | 9.09±0.27a | 9.58±0.13a | 8.81±0.23a | 6.89±0.19b | 6.45±0.15b | 6.17±0.09c |
| -15 | 5.05±0.04e | 3.53±0.05d | 6.74±0.20c | 2.69±0.01c | 2.97±0.11c | 2.25±0.02d |
| -20 | 3.58±0.01f | 1.62±0.05e | 1.94±0.05d | 1.49±0.03d | 0.56±0.01d | 0.23±0.00e |
| 温度/℃ Temperature | 不同品种的可溶性糖含量/(mg·g ⁻¹) Soluble sugar content in different cultivars | | | | | |
| | 小町 Komachi | 佳澄 Kasumi | 无尽夏 Endless Summer | 甜蜜幻想 Sweet Fantasy | 灵感 Inspiration | 你我的情感 You and Me Feelings |
| 5 | 0.83±0.02e | 0.82±0.01e | 1.72±0.03f | 1.21±0.02e | 0.72±0.01f | 1.15±0.00e |
| 0 | 2.69±0.03d | 1.52±0.03d | 2.49±0.03e | 1.86±0.05d | 1.47±0.00e | 2.91±0.04d |
| -5 | 6.43±0.10c | 5.25±0.11c | 4.86±0.04d | 4.91±0.11c | 4.19±0.08d | 4.75±0.10b |
| -10 | 8.39±0.21a | 7.61±0.27a | 6.89±0.09a | 6.39±0.01a | 6.63±0.16a | 5.61±0.09a |
| -15 | 8.00±0.20a | 7.11±0.10b | 6.39±0.08b | 5.45±0.23b | 5.84±0.15b | 4.84±0.07b |
| -20 | 7.43±0.12b | 6.82±0.79b | 5.38±0.01c | 5.42±0.14b | 5.04±0.11c | 4.40±0.04c |

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同低温下差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different low temperatures.

表明:随着温度降低,6 个代表品种的 MDA 含量呈先升高后降低的趋势,并且,这 6 个品种的 MDA 含量均在 0 °C 下最高。各品种的 MDA 含量在不同温度间多存在显著差异,耐寒和不耐寒品种间的 MDA 含量差异不显著。

随着温度降低,6 个代表品种的脯氨酸(Pro)含量也呈先升高后降低的趋势,其中,‘灵感’的 Pro 含量在-5 °C 下最高,但与 0 °C 的差异不显著;其余 5 个品种的 Pro 含量在 0 °C 下最高,且显著高于其他温度。在不同温度间,耐寒品种的 Pro 含量多高于不耐寒品种。

随着温度降低,3 个耐寒品种的可溶性蛋白质(SP)含量呈先升高后降低的趋势,且在-10 °C 下最高,而 3 个不耐寒品种的 SP 含量总体上持续下降。各品种的 SP 含量在不同温度间多存在显著差异;在-5 °C、-10 °C、-15 °C 和-20 °C 下,耐寒品种的 SP 含量明显高于不耐寒品种。

随着温度降低,6 个代表品种的可溶性糖(SS)含

量呈先升高后降低的趋势,并且,这 6 个品种的 SS 含量在-10 °C 下最高。各品种的 SS 含量在不同温度间多存在显著差异;在-10 °C、-15 °C 和-20 °C 下,耐寒品种的 SS 含量明显高于不耐寒品种。

2.3 绣球代表品种耐寒指标间的相关性分析

相关性分析结果(表 5)表明:7 个生理生化指标中,多酚氧化酶(PPO)活性和脯氨酸(Pro)含量与低温半致死温度(LT_{50})呈极显著($P<0.01$)负相关;Pro 含量还与过氧化氢酶(CAT)活性和可溶糖(SS)含量分别呈显著($P<0.05$)和极显著负相关,与超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量和可溶性蛋白质(SP)含量呈显著正相关。此外,SOD 活性与 CAT 活性和 SS 含量呈极显著负相关,与 SP 含量呈显著正相关;SS 含量与 CAT 活性呈极显著正相关,与 MDA 含量、Pro 含量和 SP 含量呈极显著负相关。

2.4 绣球代表品种生理生化指标的主成分分析

主成分分析结果(表 6)表明:前 4 个主成分的累计贡献率为 81.212%,说明前 4 个主成分基本可以反

表 5 绣球代表品种耐寒指标间的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis between cold tolerance indexes of representative cultivars of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.¹⁾

| 指标 Index | 不同指标间的相关系数 Coefficient of correlation between different indexes | | | | | | | |
|-------------|--|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | LT_{50} | CAT | PPO | SOD | MDA | Pro | SP | SS |
| LT_{50} | 1.000 | | | | | | | |
| CAT | -0.047 | 1.000 | | | | | | |
| PPO | -0.567 ** | 0.014 | 1.000 | | | | | |
| SOD | 0.183 | -0.520 ** | -0.016 | 1.000 | | | | |
| MDA | 0.048 | -0.320 | -0.003 | 0.238 | 1.000 | | | |
| Pro | -0.428 ** | -0.351 * | 0.099 | 0.402 * | 0.335 * | 1.000 | | |
| SP | 0.103 | -0.110 | 0.050 | 0.585 ** | 0.326 | 0.386 * | 1.000 | |
| SS | 0.079 | 0.465 ** | 0.016 | -0.615 ** | -0.508 ** | -0.474 ** | -0.424 ** | 1.000 |

¹⁾ LT_{50} : 低温半致死温度 Semi-lethal low temperature; CAT: 过氧化氢酶活性 Catalase activity; PPO: 多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity; SOD: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; MDA: 丙二醛含量 Malonaldehyde content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content; SP: 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表 6 绣球代表品种生理生化指标的主成分分析¹⁾

Table 6 Principal component analysis on physiological and biochemical indexes of representative cultivars of *Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.¹⁾

| 主成分 Principal component | 指标负荷量 Load of indexes | | | | | | | 特征值 Eigenvalue | 贡献率/% Contribution rate | 累计贡献率/% Cumulative contribution rate |
|----------------------------|--------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------------------|----------------------------|---|
| | CAT | PPO | SOD | MDA | Pro | SP | SS | | | |
| 1 | -0.125 | -0.546 | 0.208 | 0.281 | -0.270 | 0.092 | -0.287 | 3.056 | 38.199 | 38.199 |
| 2 | 0.472 | 0.088 | 0.246 | -0.030 | 0.024 | -0.086 | -0.010 | 1.722 | 21.526 | 59.725 |
| 3 | 0.113 | 0.369 | 0.062 | -0.034 | 0.726 | 0.334 | -0.073 | 0.915 | 11.435 | 71.160 |
| 4 | 0.439 | 0.338 | 0.009 | -0.006 | 0.326 | 0.465 | -0.455 | 0.804 | 10.052 | 81.212 |

¹⁾ CAT: 过氧化氢酶活性 Catalase activity; PPO: 多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity; SOD: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; MDA: 丙二醛含量 Malonaldehyde content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content; SP: 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content.

映供试绣球品种的耐寒性。第1主成分的贡献率为38.199%,该主成分中多酚氧化酶活性的负荷量绝对值最大;第2主成分的贡献率为21.526%,该主成分中过氧化氢酶活性的负荷量绝对值最大;第3主成分的贡献率为11.435%,该主成分中脯氨酸含量的负荷量绝对值最大;第4主成分的贡献率为10.052%,该主成分中可溶性蛋白质含量的负荷量绝对值最大。说明这4个生理生化指标与绣球耐寒性密切相关。

3 讨论和结论

采用低温半致死温度(LT_{50})进行植物耐寒性评价是目前很多植物耐寒性评价的常用方法,具有一定的科学性和合理性,且操作简单,能够快速完成植物耐寒性初步鉴定^[16]。相关研究表明:植物不同器官的耐寒性存在明显差异,通常情况下地下部比地上部的耐寒性更强^[26]。叶片是绣球的一个重要观赏部位,由于其直接裸露在环境中,因此,叶片对低温胁迫的敏感性较根部更强,研究绣球叶片的耐寒性具有更现实的意义。本研究对40个绣球品种进行了 LT_{50} 比较和耐寒分级,其中,‘你我的情感’、‘泉鸟’、‘雪舞’、‘灵感’、‘甜蜜幻想’等13个品种的 LT_{50} 较高(均在 $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),说明这些绣球品种均不耐寒,不适宜在冬季温度偏低的地区露天栽培;相对耐寒的绣球品种有27个,其中,较耐寒品种有18个,耐寒品种有8个,强耐寒品种有1个,‘佳澄’、‘小町’、‘平瓣’、‘蒂亚娜’、‘塞尔玛’、‘含羞叶’、‘花手鞠’、‘蓝色多瑙河’、‘无尽夏’的 LT_{50} 均低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明这9个绣球品种的耐寒性较强,可以优先考虑露天种植在苏北等冬季温度偏低的地区,此外,这些品种还可作为绣球耐寒品种选育的亲本材料。

在低温下,植物体的正常活性氧代谢受到抑制,体内的抗氧化防御机制被激活^[27]。植物的抗氧化防御机制由许多抗氧化酶及非酶抗氧化物质组成^[28]。低温胁迫下,玉米(*Zea mays* Linn.)^[29]、水稻(*Oryza sativa* Linn.)^[30]的超氧化物歧化酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶等抗氧化酶的活性均随温度降低呈先上升后下降的变化趋势,本研究也得到类似的研究结果,说明低温能够提高绣球体内抗氧化酶的活性,以缓解低温对植株的伤害,但随着低温水平加剧,绣球的抗氧化防御系统遭到破坏,抗氧化酶活性降低,致使细胞膜脂过氧化作用增强,植株受到的低温伤害加重。

此外,植物在应对低温胁迫时,细胞会失水,同时体内积累各种物质,从而降低细胞渗透势,避免细胞过度失水,使细胞液维持在一定的渗透水平^[20]。植物的主要渗透调节物质包括脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质、 K^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 等^[31]。本研究结果显示:随着温度降低,3个不耐寒代表品种的可溶性蛋白质含量总体上不断下降,而3个耐寒代表品种的可溶性蛋白质含量以及这6个代表品种的可溶性糖含量和可溶性糖含量均先升高后降低,说明为了维持细胞代谢平衡,绣球在低温条件下体内会产生大量的脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖,但随着低温水平加剧,植株受到严重伤害,导致这些物质的合成受阻,因此,含量下降^[32]。

植物耐寒性相关生理生化指标较多,若选取所有指标进行植物耐寒性评价势必工作量巨大,且评价结果复杂、多样,因此,在实际生产中宜采用相关性分析和主成分分析方法筛选少量的关键指标,利用筛选的关键指标进行耐寒性评价能大幅减少工作量,并可得到客观、可靠的评价结果^[33]。 LT_{50} 能够反映植物的耐寒性,其数值越大,表示植物的耐寒性越弱^[15]。相关性分析结果表明:绣球的多酚氧化酶活性和脯氨酸含量与 LT_{50} 呈极显著负相关,因此,可将多酚氧化酶活性和脯氨酸含量作为绣球耐寒性评价的主要指标。主成分分析结果表明:前4个主成分的累计贡献率较高,能够基本反映绣球品种的耐寒性;多酚氧化酶活性、过氧化氢酶活性、脯氨酸含量和可溶性蛋白质含量分别为第1、第2、第3和第4主成分的关键指标,与绣球耐寒性关系密切,可作为绣球耐寒性评价的主要指标。

需要注意的是,本研究的低温胁迫为采用低温循环仪进行的匀速降温,与自然环境中的低温条件明显不同,这必然会导致本研究检测的相关指标与实际情况存在一定差异,另外,本研究采用离体叶片进行低温处理,得到的研究结果与完整植株也会存在一定差异。因此,还需要对自然低温下绣球品种完整植株的耐寒性进行研究。

参考文献:

- [1] QIN Z, CHEN S, FENG J, et al. Identification of aluminum-activated malate transporters (ALMT) family genes in hydrangea and functional characterization of *HmALMT5/9/11* under aluminum stress [J]. Peer J, 2022, 10: e13620.
- [2] 邓衍明, 韩勇, 齐香玉, 等. 绣球属植物种质资源分析及其花

- 色可调和叶斑病抗性比较[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 90-100.
- [3] 冯 景, 邓衍明, 齐香玉, 等. 圆锥绣球‘石灰灯’种子形态及萌发特性研究[J]. 江苏林业科技, 2022, 49(3): 9-14.
- [4] CHEN S, QI X, FENG J, et al. Biochemistry and transcriptome analyses reveal key genes and pathways involved in high-aluminum stress response and tolerance in hydrangea sepals [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 185: 268-278.
- [5] QI X, CHEN S, WANG H, et al. Comparative physiology and transcriptome analysis reveals that chloroplast development influences silver-white leaf color formation in *Hydrangea macrophylla* var. *maculata* [J]. BMC Plant Biology, 2022, 22: 345.
- [6] 孙晓波, 苏家乐, 陈双双, 等. 大花绣球‘无尽夏’组培苗叶片再生植株的研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(16): 67-72.
- [7] 秦紫艺, 陈双双, 王华娣, 等. 绣球属植物组织培养研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 45-50.
- [8] 蔡建国, 章 毅, 孙欧文, 等. 绣球抗旱性综合评价及指标体系构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3175-3182.
- [9] 苗艳华, 祝 燕, 李吉春, 等. 56 个绣球品种耐热性评价[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(8): 159-162.
- [10] 陈慧杰, 邓衍明, 齐香玉, 等. 绣球叶斑病原鉴定及其生物学特性[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(7): 106-111.
- [11] 任倩倩, 郑建鹏, 张京伟, 等. 绣球属抗逆性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(11): 26-28.
- [12] 曾 奕, 杨伟权, 郁书君. 绣球花的育种研究进展[J]. 广东农业科学, 2018, 45(6): 36-43.
- [13] 乔 谦, 王江勇, 陶吉寒. 绣球属植物研究进展[J]. 农学学报, 2020, 10(4): 60-64.
- [14] 马娟娟, 赵 斌, 陈 颖, 等. 4 个北美冬青品种苗对低温胁迫的生理响应及抗寒性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 34-40.
- [15] 杨英楠, 徐婷婷, 马 杰, 等. 以相对电导率研究菊花舌状花抗寒性遗传变异及其分子标记[J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 275-284.
- [16] 段美红, 杨 益, 李庆卫. 电导法结合 Logistic 方程鉴定嫁接繁殖梅花的抗寒性[J]. 中国园林, 2020, 36(增刊): 67-70.
- [17] 刘 冰, 曹 莎, 周 泓, 等. 杜鹃花品种耐寒性比较及其机制研究[J]. 园艺学报, 2016, 43(2): 295-306.
- [18] 范军强, 路晓明, 王会文, 等. 低温胁迫下甘蓝型冬油菜抗寒性与叶片技术含量的关联性[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 15-21.
- [19] 王宏辉, 顾俊杰, 方伟民, 等. 10 个红掌品种的抗寒性与耐热性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 40-47.
- [20] 权 威, 薛文通, 赵天瑶, 等. 植物对低温胁迫的响应机制研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(2): 14-22.
- [21] 全怡吉, 樊 仙, 李如丹, 等. 不同甘蔗品种对低温胁迫的生理响应及耐寒性综合评价[J]. 热带作物学报, 2020, 41(1): 63-68.
- [22] 迟明宏, 程 哲, 杨志娟, 等. 50 份热带睡莲材料的耐寒性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(1): 39-49.
- [23] 原慧芳, 谢 江, 周会平, 等. 不同橡胶树品种耐寒性指标比较及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 72-80.
- [24] DENG Y, CHEN S, CHEN F, et al. The embryo rescue derived intergeneric hybrid between chrysanthemum and *Ajania przewalskii* shows enhanced cold tolerance[J]. Plant Cell Reports, 2011, 30: 2177-2186.
- [25] 刘 冰, 曹 莎, 周 泓, 等. 杜鹃花品种耐寒性比较及其机制研究[J]. 园艺学报, 2016, 43(2): 295-306.
- [26] 唐 敏. 持续低温胁迫下大花蕙兰不同组织器官耐寒响应[J]. 北方园艺, 2015(3): 84-87.
- [27] 朱鹏锦, 庞新华, 梁 春, 等. 低温胁迫对甘蔗幼苗活性氧代谢和抗氧化酶的影响[J]. 作物杂志, 2018(4): 131-137.
- [28] 杨雯一. 不同胁迫对各种植物体内抗氧化酶系统的影响综述[J]. 化工管理, 2021(1): 92-93.
- [29] 杨德光, 孙玉珺, ALI R I, 等. 低温胁迫对玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(5): 1-8.
- [30] 郭 慧, 李树杏, 孙平勇, 等. 不同基因型水稻苗期抗氧化系统对低温胁迫的响应[J]. 植物科学学报, 2019, 37(1): 63-69.
- [31] 王 芳, 王 淇, 赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(15): 5144-5153.
- [32] 黄丽芳, 李金芹, 龙宇宙, 等. 低温胁迫下不同咖啡生理生化指标的变化及耐寒性评价[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 1941-1947.
- [33] 金 明, 刘旭升, 逢洪波, 等. 水稻芽期耐寒性综合评价及耐寒指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 25-35.

(责任编辑: 佟金凤)