

魏鑫,王升,王宏光,等.低温胁迫下不同类型蓝莓品种的抗寒性研究[J].江苏农业科学,2023,51(19):131-137.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.020

低温胁迫下不同类型蓝莓品种的抗寒性研究

魏鑫,王升,王宏光,王兴东,杨玉春,刘有春,刘成

(辽宁省果树科学研究所,辽宁营口 115009)

摘要:为研究蓝莓低温胁迫下的抗寒生理机理,筛选抗寒蓝莓品种,以6年生矮丛品种美登、半高丛品种北陆、北高丛品种蓝丰、南高丛品种密斯梯和兔眼品种精华1年生枝为试材,通过人工模拟低温方法(-10、-15、-20、-25、-30、-35、-40℃)对其进行低温处理,分析相对电导率、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性及丙二醛(MDA)、游离脯氨酸含量的影响,并测定可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白、淀粉、纤维素、果糖、葡萄糖、蔗糖、总含水量、自由水含量并计算束缚水含量、自由水含量/束缚水含量。结果表明,随着温度降低,5个蓝莓品种枝条的相对电导率、MDA含量逐渐升高,呈“S”形变化曲线;POD、SOD、CAT活性呈单峰变化趋势;游离脯氨酸含量随处理温度的降低呈逐渐上升趋势;美登、北陆和蓝丰3个品种具有较高的可溶性总糖、还原糖、淀粉、可溶性蛋白、果糖、葡萄糖、蔗糖和纤维素含量;美登、北陆2个品种具有较低的总含水量、自由水含量及自由水含量/束缚水含量;-30℃条件下,美登、北陆和蓝丰3个品种枝条仍具有一定的萌芽率且部分枝条未受低温伤害褐变。综合分析,确定参试5个蓝莓品种的抗寒性由强到弱依次为美登、北陆、蓝丰、精华和密斯梯。美登抗寒性较强的原因是具有较高的POD、CAT、SOD活性,可溶性总糖、淀粉、纤维素和可溶性蛋白含量及较低的枝条总含水量、自由水含量。

关键词:蓝莓;低温胁迫;生理指标;抗寒性;主成分分析

中图分类号:S663.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0131-07

蓝莓学名越橘,杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium*)植物,因果实中富含花青素等营养物质而深受消费者欢迎^[1-2]。蓝莓为浅根性灌木类植物,抗寒性较弱^[3]。而我国北方地区冬季严寒、气候干燥,种植蓝莓时冬季需采取防寒保护措施才能安全越冬,这既增加了生产成本、工作量,同时在防寒过程中易对树体造成损伤,导致减产。低温胁迫导致的冻害是影响蓝莓栽培的重要非生物胁迫之一,严重影响辽宁地区蓝莓产业化发展^[4]。因此,开展蓝莓抗寒生理机理研究对挖掘利用抗寒资源、完善抗寒基础理论、制定适宜的防寒技术措施等均具有重要意义。

抗寒机理研究是鉴定植物抗寒性强弱的生理基础^[5]。蓝莓不同组织器官的生物学性状和基因的差异是影响其抗寒性差异的主要原因^[6-7]。蓝莓的抗寒性强弱与休眠和水分状态变化密切相关,通常休眠越深,束缚水含量越高,其抗寒性越强。抗寒性强的品种具有较高的果糖和葡萄糖含量,受低温胁迫后,相对电导率的变化相对平缓,丙二醛含量积累较低^[1,8-10]。王明洁等通过对越冬期露地栽培条件下枝条受伤情况以及质膜相对透性、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶活性的综合分析,参试蓝莓抗寒性由强到弱依次为美登>齐伯瓦>北蓝>蓝丰>康维尔^[11]。蓝莓抗寒性的强弱除与品种自身特性有关外,还与环境条件、栽培技术、管理水平、植株营养状况等诸多因素有关^[12]。影响蓝莓抗寒性的因素有很多,需要通过系统分析并结合田间冻害情况调查和受冻后的生长恢复情况等加以综合判断。因此,本试验通过人工模拟低温环境的方法,测定5个蓝莓品种1年生枝条的质膜透性、保护酶活性及丙二醛、渗透调节物质、纤维素、总含水量、自由水和束缚水含量等抗寒生理指标,以期阐释蓝莓抗寒生理机理,为研究蓝莓抗寒生理学鉴定方法、挖掘利用蓝莓抗寒特异资源和选育抗寒新品种提供数据基础。

收稿日期:2022-12-16

基金项目:国家现代农业产业技术体系(编号:CARS-29);辽宁省科学事业公益研究基金(编号:20180023);辽宁省重点实验室建设项目(编号:2020JH13/10200051)。

作者简介:魏鑫(1982—),男,河北沧州人,硕士,副研究员,主要从事蓝莓、树莓种质资源鉴定、遗传育种、栽培生理研究与技术推广工作。E-mail:run2010@163.com。

通信作者:刘成,博士,研究员,主要从事蓝莓、树莓种质资源鉴定、遗传育种、栽培生理研究与技术推广工作。E-mail:stevecliu@hotmail.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试品种为:6 年生矮丛品种美登、半高丛品种北陆、北高丛品种蓝丰、南高丛品种密斯梯和兔眼品种精华。供试材料定植于辽宁省果树科学研究所蓝莓资源圃塑料大棚内,采取常规管理措施。

1.2 试验方法

1.2.1 取样与材料处理 于 2015 年 1 月 7 日选取经抗寒锻炼后的 5 个品种植株不同方向、完全木质化直径为 0.3~0.5 cm 的 1 年生枝。先后采用自来水和蒸馏水清洗干净,滤纸吸干,自封袋分装好后备用。一部分用于不同低温处理,处理温度为 -15、-20、-25、-30、-35、-40 ℃、对照(至于冰箱中 4 ℃ 冷藏保存),冷冻时温度下降幅度和解冻时的温度回升幅度均为 5 ℃/h,到达处理所需温度后,维持 24 h,然后解冻。测定相对电导率、保护酶活性、丙二醛和游离脯氨酸含量。一部分烘箱 120 ℃ 杀青 20 min 后,80 ℃ 烘干至恒质量,粉碎成粉末后用于测定可溶性总糖、还原糖、淀粉、可溶性蛋白、糖组分和纤维素含量,一部分用于测定枝条总含水量、自由水含量并计算束缚水含量、自由水含量/束缚水含量,每处理 3 次重复,每次重复 10 个枝条。

1.2.2 测定指标与方法 电解质渗透率采用电导率仪法^[13]测定;丙二醛(MDA)含量采用 TBA 显色法^[14]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[14]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[14]测定;超氧化物酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法^[14]测定;游离脯氨酸含量采用硝基水杨酸^[14]测定;可溶性糖、还原糖、淀粉、纤维素含量采用蒽酮比色法^[14-15]测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝比色法^[14]测定;糖组分采用高效液相色谱法^[16-17]测定;总含水量、自由水和束缚水含量采用烘干称质量法和阿贝折射仪^[14]测定。

1.3 统计分析

用 Excel 2007 软件处理试验数据,用 Origin 2018 软件制图,用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan's 检验差异显著性和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条相对电导率的影响

由图 1 可知,5 个品种在试验低温范围内,相对

电导率随处理温度的降低逐渐升高。5 个品种相对电导率随温度降低变化的速率有所不同。美登、北陆和蓝丰品种相对电导率随温度的降低变化较为平缓。密斯梯和精华 2 个品种在 -25 ℃ 后相对电导率明显提高。-40 ℃ 时,美登、北陆、蓝丰、密斯梯、精华 5 个品种相对电导率较 4 ℃ 时分别增加了 1.18、1.52、1.48、3.45、1.55 倍。

4 ℃ 条件下,5 个品种枝条相对电导率最低,密斯梯相对电导率显著高于美登、北陆、精华,与蓝丰差异不显著。密斯梯、蓝丰、美登和北陆间差异不显著;-40 ℃ 处理下,5 个品种枝条相对电导率均最高,且 5 个品种由高至低依次为密斯梯、精华、蓝丰、北陆、美登,品种间差异均显著($P < 0.05$)。

2.2 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条丙二醛(MDA)含量的影响

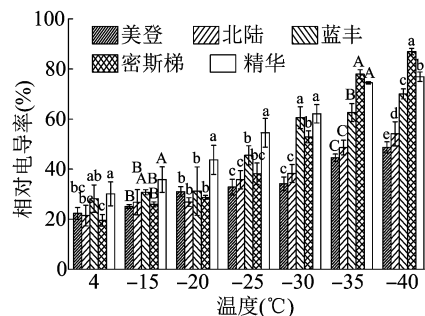
5 个品种在试验低温范围内,由图 2 可知,MDA 含量随处理温度的降低逐渐升高。4 ℃ 时,美登与 -15 ℃ 差异未达显著水平,但显著低于其他温度($P < 0.05$)。-40 ℃ 时显著高于其他温度($P < 0.05$);4 ℃ 时,北陆枝条 MDA 含量与 15、-20 ℃ 差异不显著,但显著低于其他温度($P < 0.05$)。-40 ℃ 时,极显著高于 4、15、-20 ℃ ($P < 0.01$);4 ℃ 时,蓝丰枝条 MDA 含量与 15、-20 ℃ 差异不显著,但显著低于其他温度($P < 0.05$)。-40 ℃ 时,与 -35 ℃ 差异未达显著水平,但显著高于其他温度($P < 0.05$);4 ℃ 时,密斯梯枝条 MDA 含量与 15 ℃ 差异不显著,但极显著低于其他温度($P < 0.01$)。-40 ℃ 时,与 -30、-35 ℃ 差异不显著,但极显著高于其他温度($P < 0.01$);4 ℃ 时,精华枝条 MDA 含量与 15、20 ℃ 差异不显著,但极显著低于其他温度($P < 0.01$)。-40 ℃ 时,与 -30、-35 ℃ 差异不显著,但极显著高于其他温度(数据未显示)。

密斯梯品种在 -35 ℃ 时,枝条 MDA 含量显著高于精华($P < 0.05$),极显著高于其他 3 个品种($P < 0.01$)。其他各温度处理条件下时,均极显著高于其他 4 个品种($P < 0.01$);美登品种在 4、-20、-35 ℃ 时,与北陆、蓝丰间差异不显著,但显著低于密斯梯、精华($P < 0.05$)。-40 ℃ 时,与北陆间差异不显著,但显著低于蓝丰、密斯梯、精华($P < 0.05$)。

2.3 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条过氧化物酶(POD)活性的影响

由图 3 可知,5 个品种在试验温度范围内均成单峰变化趋势,但出峰温度有所不同。密斯梯和精

华 2 个品种在 -25°C 时, POD 活性达最高, 极显著高于其他温度 ($P < 0.01$)。美登、北陆和蓝丰 3 个品种在 -30°C 时, POD 活性达到最高, 美登和蓝丰显著高于其他温度 ($P < 0.05$), 北陆与 -35°C 差异未达显著水平, 但显著高于其他温度 ($P < 0.05$)。 4°C 时, 美登、密斯梯枝条 POD 活性极显著低于其他温度 ($P < 0.01$), 北陆、蓝丰、精华 3 个品种枝条 POD 活性与 -40°C 差异不显著, 但显著低于其他温度 (数据未显示)。



图中的差异性均为同一温度下不同时间处理间的比较, 小写字母和大写字母分别表示差异性呈显著和极显著水平 ($P < 0.05$; $P < 0.01$)。下同

图1 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条相对电导率的影响

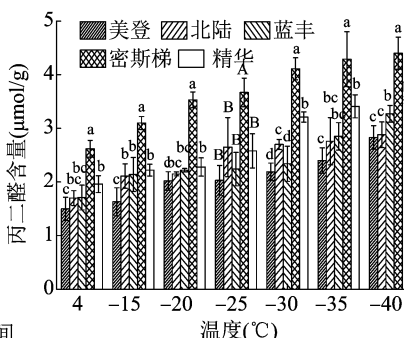


图2 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条丙二醛含量的影响

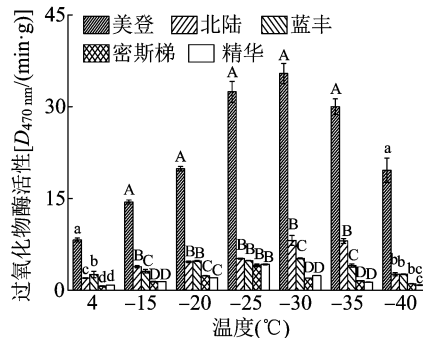


图3 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条过氧化物酶活性的影响

2.4 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响

由图 4 可知, 5 个品种在试验温度范围内均成单峰变化趋势, 但出峰温度有所不同。密斯梯、精华 2 个品种在 -25°C 时, CAT 活性达最高, 均极显著高于其他温度 ($P < 0.01$); 美登、北陆和蓝丰 3 个品种在 -30°C 时, CAT 活性达最高, 均极显著高于其他温度 ($P < 0.01$); 4°C 时, 蓝丰、精华 2 个品种极显著低于其他温度 ($P < 0.01$)。美登品种与 -15°C 差异未达显著水平, 但极显著低于其他温度 ($P < 0.01$)。北陆显著低于 -15°C ($P < 0.05$), 极显著低于其他温度 ($P < 0.01$)。密斯梯品种与 -15°C 、 -40°C 差异未达显著水平, 极显著低于其他温度 (数据未显示)。

在 -25°C 条件下, 美登 CAT 活性极显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.01$), 其他品种间差异未达显著水平; 在 -30°C 条件下, 美登 CAT 活性极显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.01$)。北陆、蓝丰极显著高于密斯梯、精华 ($P < 0.01$), 精华显著高于密斯梯 ($P < 0.05$); -40°C 时, 北陆与美登未达显著水平, 极显著高于其他 3 个品种 ($P < 0.01$)。美登与蓝丰差异未达显著水平, 均极显著高于密斯梯、精华

在 4°C 和 -40°C 温度下, 美登枝条 POD 活性显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$), 在其他温度条件下, 极显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.01$); 4°C 和 -30°C 条件下, 北陆、蓝丰均显著高于密斯梯、精华 ($P < 0.05$), 北陆和蓝丰差异达显著水平 ($P < 0.05$), 密斯梯、精华差异不显著; -40°C 条件下, 北陆、蓝丰显著高于精华 ($P < 0.05$), 北陆、蓝丰和密斯梯及密斯梯和精华间差异不显著。

($P < 0.01$)。

2.5 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条超氧化物酶 (SOD) 活性的影响

由图 5 可知, 5 个品种在试验温度范围内均成单峰变化趋势, 但出峰温度有所不同。北陆、密斯梯和精华 3 品种在 -25°C 时, SOD 活性达最高, 北陆品种与 -30°C 差异不显著, 但极显著高于其他温度 ($P < 0.01$)。密斯梯品种显著高于 4°C 、 -40°C ($P < 0.05$), 与其他温度差异不显著; 精华品种极显著高于其他温度 ($P < 0.05$)。美登、蓝丰 2 个品种在 -30°C 时, SOD 活性达最高。美登品种与 -25°C 差异未达显著水平, 显著高于其他温度 ($P < 0.05$); 蓝丰品种极显著高于其他温度。 4°C 时, 各品种均表现为极显著低于其他温度 (数据未显示)。

4°C 条件下, 美登、北陆和蓝丰 SOD 活性显著高于密斯梯, 北陆和蓝丰显著高于精华 ($P < 0.05$), 美登、北陆、蓝丰, 美登、精华间及密斯梯、精华间差异不显著; -25°C 条件下, 北陆显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$), 精华与密斯梯差异未达显著水平, 但显著低于另外 3 个品种 ($P < 0.05$)。美登显著高于密斯梯 ($P < 0.05$), 但与蓝丰差异不显著; -30°C 、 -35°C 、 -40°C 条件下, 美登、北陆和蓝丰显著高于

密斯梯、精华($P < 0.05$),美登、北陆、蓝丰间差异不显著,精华显著高于密斯梯($P < 0.05$)。

2.6 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条渗透调节物质的影响

由图 6 可知,5 个品种在试验低温范围内,游离脯氨酸含量随处理温度的降低呈逐渐上升的变化趋势。美、北陆、蓝丰、密斯梯 4 个品种游离脯氨酸含量随温度升高含量极显著升高,精华品种除 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 差异未达显著水平外,其他温度

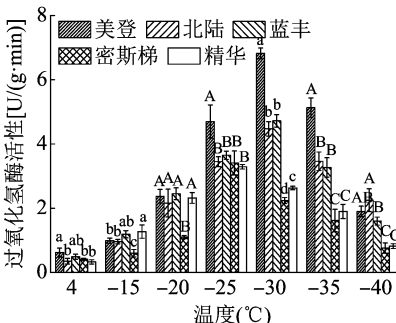


图4 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条过氧化氢酶活性的影响

由表 1 可知,北陆可溶性总糖含量极显著高于其他 4 个品种($P < 0.01$)。美登与蓝丰差异不显著,极显著高于密斯梯和精华($P < 0.01$);蓝丰显著高于密斯梯($P < 0.05$),与精华差异不显著。北陆还原糖含量极显著高于其他 4 个品种,美登极显著高于其他 3 个品种($P < 0.01$),蓝丰显著高于密斯梯($P < 0.05$),精华分别与蓝丰和密斯梯差异均不显著。北陆、美登、蓝丰 3 品种的淀粉含量极显著高于密斯梯和精华,北陆、美登、蓝丰间差异达极显著水平($P < 0.01$);精华显著高于密斯梯($P < 0.05$)。北陆、美登、蓝丰 3 品种的蛋白质含量显著高于密斯梯和精华,北陆、美登、蓝丰间差异达到显著水平($P < 0.05$);密斯梯与精华间差异未达显著水平。北陆果糖含量极显著高于其他 4 个品种,美登极显著

间差异均达显著水平(数据未显示)。

$4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,美登游离脯氨酸含量极显著高于其他 4 个品种($P < 0.01$),密斯梯极显著低于其他 4 个品种($P < 0.05$); $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,美登、北陆、蓝丰 3 个品种差异达极显著水平($P < 0.01$),且均极显著高于密斯梯、精华($P < 0.01$); $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,5 个品种由高到低依次为美登、北陆、蓝丰、精华、密斯梯,品种间差异均达显著水平($P < 0.05$)。

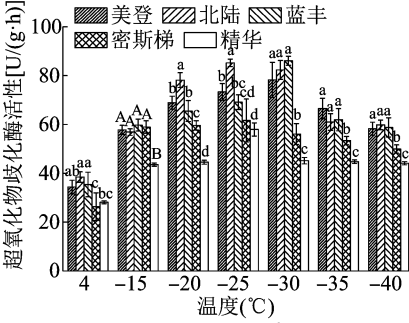


图5 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条超氧化物歧化酶活性的影响

高于其他 3 个品种($P < 0.01$);蓝丰与精华差异不显著,但极显著高于密斯梯,精华($P < 0.01$),显著高于密斯梯($P < 0.05$)。美登、北陆 2 个品种的葡萄糖含量差异未达显著水平,但均极显著高于蓝丰、密斯梯和精华($P < 0.01$),蓝丰、精华间差异未达显著水平,均显著高于密斯梯($P < 0.05$)。北陆蔗糖含量极显著高于其他 4 个品种,美登极显著高于其他 3 个品种($P < 0.01$);蓝丰与精华差异不显著,但均极显著高于密斯梯(部分数据未显示)。

2.7 5 个蓝莓品种枝条纤维素含量的差异

北陆纤维素含量显著高于美登,极显著高于其他 3 个品种($P < 0.01$);美登与蓝丰差异不显著,极显著高于密斯梯和精华($P < 0.01$);蓝丰显著高于精华,与密斯梯差异不显著;密斯梯与精华间差异

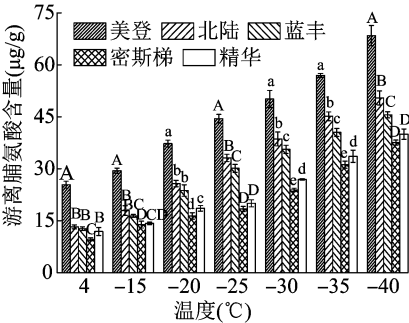


图6 低温胁迫对 5 个蓝莓品种枝条游离脯氨酸含量的影响

表 1 5 个蓝莓品种枝条渗透调节物质及纤维素含量差异

品种	可溶性总糖含量 (%)	还原糖含量 (%)	淀粉含量 (%)	可溶性蛋白含量 (mg/g)	果糖含量 (mg/g)	葡萄糖含量 (mg/g)	蔗糖含量 (mg/g)	纤维素含量 (%)
美登	8.23 ± 0.23b	15.09 ± 0.25b	1.40 ± 0.02b	4.22 ± 0.08b	17.70 ± 1.67b	17.96 ± 1.58a	27.48 ± 0.49B	4.03 ± 0.08b
北陆	10.57 ± 1.34a	18.98 ± 0.61a	1.77 ± 0.07a	4.41 ± 0.04a	24.18 ± 1.89a	18.43 ± 1.10a	33.44 ± 1.75A	4.30 ± 0.10a
蓝丰	7.49 ± 0.50bc	13.04 ± 0.56c	1.14 ± 0.03c	3.80 ± 0.06c	13.74 ± 1.54c	9.51 ± 0.97b	23.88 ± 1.48C	3.87 ± 0.04bc
密斯梯	5.69 ± 0.54d	12.05 ± 0.26d	0.93 ± 0.02e	3.64 ± 0.03d	9.09 ± 1.31d	6.65 ± 0.80c	15.28 ± 1.65D	3.65 ± 0.18cd
精华	6.24 ± 0.39cd	12.46 ± 0.22cd	1.03 ± 0.03d	3.62 ± 0.10d	12.93 ± 0.91c	9.20 ± 1.19b	21.63 ± 0.56C	3.51 ± 0.17d

注:同列数据后不同小写字母、大写字母分别表示差异性呈显著($P < 0.05$)、极显著水平($P < 0.01$)。

不显著(部分数据未显示)。

2.8 5 个蓝莓品种枝条含水量的差异

由图 7 可知,密斯梯品种枝条总含水量显著高于蓝丰,极显著高于另 3 个品种($P < 0.01$)。蓝丰、精华极显著高于北陆和美登($P < 0.01$);蓝丰、密斯梯、精华 3 个品种枝条自由水含量极显著高于美登、北陆($P < 0.01$),蓝丰、密斯梯和精华及美登和北陆之间差异不显著;5 个品种束缚水含量差异未达显著水平;蓝丰、密斯梯自由水含量/束缚水含量极显著高于美登($P < 0.01$),显著高于北陆($P < 0.05$),与精华差异不显著。精华显著高于美登($P < 0.05$),与北陆间差异未达显著水平。

2.9 5 个蓝莓品种枝条低温处理后的恢复情况

由图 8 可知,5 个品种在试验低温范围内,萌芽率随处理温度的降低呈逐渐下降的变化趋势。4 ℃

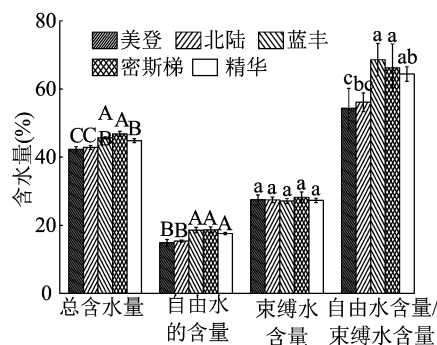


图7 5个蓝莓品种枝条含水量的差异

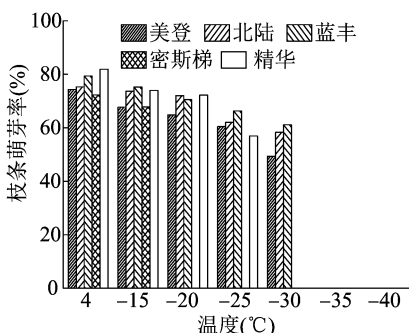


图8 不同低温处理对蓝莓品种萌芽率的影响

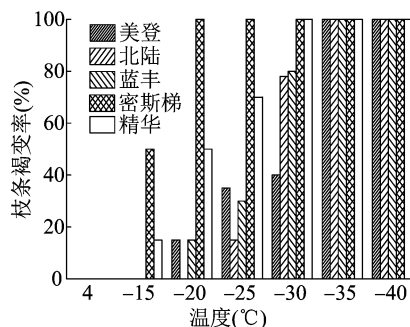


图9 不同低温处理对蓝莓品种枝条褐变率的影响

2.10 5 个蓝莓品种抗寒性的主成分分析

由表 2、表 3 可知,对 5 个蓝莓品种 1 年生枝条 MDA 含量、POD、SOD 活性等 18 个抗寒生理指标进行主成分分析,依据特征值 > 1 的原则,提取了 3 个主成分,累计方差贡献率 94.979%,表明前 3 个主成分可反映 5 个品种抗寒生理指标的大多数信息。其中,第 1 主成分的代表指标为葡萄糖含量(0.989)、蛋白质含量(0.976)、淀粉含量(0.940)、蔗糖含量(0.937),特征值为 13.515,方差贡献率 75.085%;第 2 主成分的代表指标为 POD 活性(-0.685)、游离脯氨酸含量(-0.480),特征值为 1.95,贡献率为 10.836%;第 3 主成分的代表指标为束缚水含量(0.895)、自由水含量/束缚水含量(0.485)、MDA 含量(0.485),特征值为 1.630,贡献率为 9.058%。

由表 4 可知,3 个主成分的特征值比所提取的主成分总特征值之和作为权重计算主成分分值,具体如下:

条件下,美登、北陆、蓝丰、密斯梯和精华枝条萌芽率分别为 74.33%、75.29%、79.37%、72.30% 和 81.90%;-15 ℃ 条件下,5 个品种枝条萌芽率分别下降了 6.60%、1.61%、4.15%、4.54% 和 7.95%;密斯梯在 -20 ℃ 条件下,枝条萌芽率为 0,精华在 -30 ℃ 条件下枝条萌芽率为 0,美登、北陆、蓝丰在 -35 ℃ 条件下枝条萌芽率为 0。

由图 9 可知,5 个品种在试验低温范围内,枝条褐变程度随处理温度的降低呈逐渐上升的变化趋势。4 ℃ 条件下,美登、北陆、蓝丰、密斯梯和精华枝条褐变率均为 0;-15 ℃ 条件下,5 个品种枝条萌芽率分别为 0、0、0.50% 和 15%;密斯梯在 -20 ℃ 条件下,枝条褐变率为 100%,精华在 -30 ℃ 条件下枝条褐变率为 100%,美登、北陆、蓝丰在 -35 ℃ 条件下枝条褐变率为 100%。

表 2 5 个蓝莓品种抗寒生理指标的主成分分析

主成分	特征值	方差贡献率 (%)	累计方差贡献率 (%)
1	13.515	75.085	75.085
2	1.951	10.836	85.921
3	1.630	9.058	94.979
4	0.904	5.021	100.000

主成分值 1: $F_1 = -0.214x_1 + 0.177x_2 + 0.214x_3 + 0.228x_4 - 0.245x_5 + 0.228x_6 + 0.265x_7 + 0.256x_8 + 0.249x_9 + 0.242x_{10} + 0.250x_{11} + 0.253x_{12} + 0.269x_{13} + 0.255x_{14} - 0.254x_{15} - 0.249x_{16} - 0.098x_{17} - 0.238x_{18}$;

主成分值 2: $F_2 = 0.273x_1 - 0.490x_2 + 0.108x_3 - 0.344x_4 + 0.009x_5 - 0.369x_6 + 0.128x_7 + 0.239x_8 + 0.215x_9 + 0.319x_{10} + 0.258x_{11} + 0.221x_{12} - 0.013x_{13} + 0.132x_{14} + 0.13x_{15} + 0.095x_{16} + 0.185x_{17} + 0.063x_{18}$;

主成分值 3: $F_3 = 0.38x_1 + 0.255x_2 - 0.003x_3 -$

表 3 5 个蓝莓品种抗寒生理指标主成分载荷矩阵

指标	荷载		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
MDA 含量	-0.787	0.381	0.485
POD 活性	0.649	-0.685	0.325
SOD 活性	0.785	0.151	-0.004
CAT 活性	0.839	-0.480	-0.124
相对电导率	-0.899	0.012	-0.378
游离脯氨酸含量	0.839	-0.515	0.119
蛋白质含量	0.976	0.179	0.121
淀粉含量	0.940	0.334	-0.043
纤维素含量	0.917	0.300	0.039
还原糖含量	0.891	0.445	0.012
可溶性总糖含量	0.920	0.361	-0.147
果糖含量	0.929	0.308	-0.150
葡萄糖含量	0.989	-0.018	0.076
蔗糖含量	0.937	0.185	-0.283
总含水量	-0.935	0.182	0.003
自由水含量	-0.915	0.132	-0.214
束缚水含量	-0.359	0.259	0.895
自由水含量/束缚水含量	-0.787	0.381	0.485

表 4 5 个蓝莓品种主成分得分及综合评价

品种	F_1	F_2	F_3	F	抗寒性排序
美登	13.86	9.61	-5.36	11.54	1
北陆	12.07	28.19	-14.31	11.39	2
蓝丰	-6.65	24.07	-19.25	-4.35	3
密斯梯	-16.21	24.69	-16.00	-11.52	5
精华	-14.08	23.87	-19.96	-10.31	4

$$0.097x_4 - 0.296x_5 + 0.093x_6 + 0.095x_7 - 0.034x_8 + 0.031x_9 + 0.009x_{10} - 0.115x_{11} - 0.117x_{12} + 0.06x_{13} - 0.222x_{14} + 0.002x_{15} - 0.168x_{16} + 0.701x_{17} - 0.275x_{18};$$

以所选取的第 1~3 主成分的特征值和主成分值构建综合评价模型： $F = (13.515F_1 + 1.951F_2 + 1.630F_3) / (13.515 + 1.951 + 1.630)$ ，其中， F 为综合得分值，利用主成分分析综合得分值评价 5 个品种抗寒性强弱，得分值越高则抗寒性越强。因此，5 个蓝莓品种的抗寒性由强到弱依次为美登>北陆>蓝丰>精华>密斯梯。

3 讨论

温度是影响植物生存、分布、生长发育的重要因素^[18-19]。植物在低温胁迫过程中，发生了一系列涉及生物膜性质变化、代谢酶活性降低及活性氧、渗透调节物质和胁迫响应蛋白积累的生理生化和

基因的变化以适应低温环境^[20]。细胞膜系统是植物受低温伤害的原发部位，低温胁迫可引起胞内电解质外渗，相对电导率增大，MDA 含量升高，因此，细胞膜破坏程度通过作为鉴定植物抗寒性强弱的重要参考指标^[21-22]。本研究发现，在试验低温范围内，5 个品种枝条相对电导率和 MDA 含量随处理温度的降低而升高，但变化的速率有所不同。美登、北陆和蓝丰相对电导率和 MDA 含量升高的速率相对平缓，而密斯梯和精华明显升高，受害程度较高。

低温胁迫可引起细胞内活性氧产量升高，膜脂过氧化作用加剧，造成植株受损。SOD 可清除超氧阴离子自由基($O_2^- \cdot$)^[23]，CAT 和 POD 能促进降解 H_2O_2 ^[24]，防止脂膜过氧化，维持细胞膜的稳定，对植物抵御低温胁迫发挥着重要作用^[25-26]。本研究发现，在试验低温范围内，5 个品种枝条 POD、SOD、CAT 活性随处理温度降低呈单峰变化趋势，但出峰温度有所不同。总体上看，密斯梯、精华枝条酶活性的变化较另 3 个品种更为平稳，-25℃ 时，活性达最高。美登枝条酶活性的变化较另 4 个品种更为迅速，在 -30℃ 时，活性达最高，可快速清除自由基，减缓细胞膜受害程度，进而来维持细胞的稳定。

植物在低温胁迫条件下，可通过提高渗透调节物质的质量分数，降低细胞液渗透势、水分含量和冰点，从而提高抗寒性^[27-28]。游离脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖是植物重要的渗透调节物质^[29]。低温胁迫下，它们的积累不但可提高细胞的保水能力，还能防止活性氧对蛋白质和膜脂的过氧化，缓解或抵御低温伤害的发生，其含量可作为抗寒性鉴定的生理指标^[30-31]。本研究发现，美登、北陆和蓝丰 3 个品种具有较高的游离脯氨酸、可溶性总糖、还原糖、淀粉、可溶性蛋白、果糖、葡萄糖、蔗糖和纤维素含量。美登、北陆 2 个品种具有较低的总含水量、自由水含量和自由水含量/总束缚水含量。当低温逆境来临时，美登、北陆 2 个品种能够快速调节自身的渗透调节物质含量来应对逆境低温伤害。恢复生长法是评价植物抗寒性的最直观和可靠的方法，枝条遭受低温伤害的程度，主要通过芽对低温的敏感性反映出来，通过统计低温胁迫后枝条的萌芽率和褐变程度，可以直接确定枝条抗寒性强弱^[32]。-30℃ 条件下，美登、北陆、蓝丰 3 个品种枝条仍达 49% 以上的萌芽率，同时部分枝条未受低温伤害而褐变。

4 结论

通过人工模拟低温环境的方法,测定、计算 5 个蓝莓品种 1 年生枝条的 18 个与抗寒性相关的生理指标,同时结合主成分分析,结果显示,供试 5 个蓝莓品种的抗寒性由强到弱依次为:美登、北陆、蓝丰、精华和密斯梯。美登抗寒性较强的原因是具有较高的 POD、SOD、CAT 活性,可溶性总糖、淀粉、纤维素和可溶性蛋白含量及较低的枝条总含水量和自由水含量。

参考文献:

- [1] 顾 烟,贺善安. 蓝浆果与蔓越橘[M]. 北京:中国农业出版社, 2001:3.
- [2] 李亚东,盖禹含,王 芳,等. 2021 年全球蓝莓产业数据报告 [J]. 吉林农业大学学报,2022,44(1):1-12.
- [3] 勾天兵,崔铁花,邹建军,等. 吉林省白山地区蓝莓不同品种 1 年生基生枝抗寒能力调查研究[J]. 吉林林业科技,2021,50(6): 11-13,28.
- [4] 魏 鑫,刘 成,王兴东,等. 6 个高丛越橘品种低温半致死温度的测定[J]. 果树学报,2013,30(5):798-802.
- [5] 李美茹,刘鸿先,王以柔. 植物抗冷性分子生物学研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2000,8(1):70-80.
- [6] 吴 林,李亚东,张志东,等. 高丛、半高丛和矮丛越橘越冬冻害研究[J]. 果树学报,2004,21(4):341-345.
- [7] 裴嘉博,康立敏,李亚东,等. 蓝莓的冻害调查[J]. 落叶果树, 2013,45(3):8-11.
- [8] Zhao X, Zhan L P, Zou X Z. Improvement of cold tolerance of the half-high bush Northland blueberry by transformation with the LEA gene from *Tamarix androssowii*[J]. Plant Growth Regulation, 2011, 63(1):13-22.
- [9] 魏 鑫,魏永祥,郭 丹,等. 低温处理后 4 个越橘品种部分生理指标的比较及其抗寒性分析[J]. 植物资源与环境学报,2016,25(2):72-79.
- [10] Lee J I, Yu D J, Lee J H, et al. Comparison of mid-Winter cold-hardiness and soluble sugars contents in the shoots of 21 highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) cultivars[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2013, 88(6):727-734.
- [11] 王明洁. 5 个蓝莓品种的越冬期间抗寒性比较[J]. 中国林副特产, 2018(1):23-24,28.
- [12] 魏 鑫,魏永祥,刘 成,等. 蓝莓抗寒性研究进展及越冬防寒措施[J]. 上海农业学报,2015,31(3):147-151.
- [13] 郝建军,刘延吉. 植物生理学实验技术[M]. 2 版. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2001.
- [14] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.
- [15] 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,2000:211-212.
- [16] 胡桂兵,山尾正实. 用 HPLC 分析柑橘结果母枝中糖的种类和含量[J]. 热带农业科学,2000,20(4):39-41.
- [17] 段敏杰,伊洪伟,杨 丽,等. 不同砂梨品种果实糖酸组分及含量分析[J]. 南方农业学报,2020,51(9):2236-2244.
- [18] Pearce R S. Plant freezing and damage[J]. Annals of Botany, 2001,87(4):417-424.
- [19] Wisniewski M, Bassett C, Arora R. Distribution and partial characterization of seasonally expressed proteins in different aged shoots and roots of 'Loring' peach (*Prunus persica*) [J]. Tree Physiology, 2004,24(3):339-345.
- [20] 梁坤伦,贾存智,孙金豪,等. 高寒地区垂穗披碱草种质对低温胁迫的生理响应及其耐寒性评价[J]. 草业学报,2019,28(3): 111-121.
- [21] 刘杜玲,张博勇,孙红梅,等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价[J]. 园艺学报,2015,42(3):545-553.
- [22] 李瑞雪,金晓玲,胡希军,等. 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.
- [23] 姜 慧,徐迎春,李永荣,等. 香橼不同品系耐寒性的研究[J]. 园艺学报,2012,39(3):525-532.
- [24] 杨华庚,林位夫. 低温胁迫下油棕幼苗的某些生理生化特性 [J]. 热带作物学报,2008,29(3):326-332.
- [25] Rubio M C, James E K, Clemente M R, et al. Localization of superoxide dismutases and hydrogen peroxide in legume root nodules [J]. Molecular Plant - Microbe Interactions, 2004, 17(12): 1294-1305.
- [26] 张 旭,朱珍珍,孙鲁龙,等. 陇东地区不同矮化中间砧对‘长富 2 号’苹果抗寒性的影响[J]. 果树学报,2020,37(7):985-996.
- [27] 赵红星,耿 攀,杨 勇. 39 份柿属种质资源的抗寒性综合评价[J]. 西北农业学报,2010,19(12):128-133.
- [28] 曹燕燕,葛昌斌,齐双丽,等. 不同冬小麦品种(系)拔节期低温胁迫生理反应及抗寒性评价[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):59-66.
- [29] Koehler G, Wilson R C, Goodpaster J V, et al. Proteomic study of low-temperature responses in strawberry cultivars (*Fragaria × ananassa*) that differ in cold tolerance[J]. Plant Physiology, 2012, 159(4):1787-1805.
- [30] 蒋景龙. 外源 H₂O₂ 对低温胁迫下柑橘叶片抗寒性的影响[J]. 西北植物学报,2016,36(3):499-505.
- [31] 任 惠,王小娟,刘业强,等. 应用电导率法和 Logistic 方程测定杨桃枝条抗寒性的研究[J]. 西南农业学报,2016,29(3): 662-667.
- [32] 王召元,田启航,常瑞丰,等. 桃不同品种对低温胁迫的生理响应及评价[J]. 中国农业大学学报,2022,27(2):66-77.