

李莹,郭伟珍,孙浩,等.低温胁迫下河北省花椒品种的生理响应及抗寒性评价[J].山西农业科学,2026,54(1):88-95.

LI Y, GUO W Z, SUN H, et al. Physiological response and cold resistance evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* varieties in hebei province under low temperature stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 88-95.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.10

低温胁迫下河北省花椒品种的生理响应及抗寒性评价

李莹¹, 郭伟珍¹, 孙浩², 赵京献¹

(1. 河北省林业和草原科学研究院/河北省林木良种技术创新中心, 河北 石家庄 050061;

2. 河北科技师范学院 园艺科技学院, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 为了解河北省栽培花椒品种的冬季抗寒性, 采集阜平、唐县、平山、涉县、石家庄、广宗等地不同花椒品种的1年生枝条测定相对电导率, 计算半致死温度; 同时以兴隆秋椒、朝仓山椒、白沙椒、冀椒1号、无刺椒1号等5个花椒品种为试材, 设置-5、-10、-15、-20、-25、-30、-35℃等7个温度梯度, 研究不同低温胁迫下各花椒品种枝条丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等生理指标的变化趋势, 并分析各指标间相关性。结果表明, 不同采集地花椒品种间抗寒性存在较大差异, 供试品种中, 抗寒性最强的是广宗的秋椒优树, 抗寒性最差是采自平山的山西老婆椒; 田间前期短时低温对花椒影响不大, 随着低温持续时间的延长, 枝条电导率逐渐升高; 低温胁迫下, 花椒枝条MDA含量、Pro含量与抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT)均呈先上升后下降趋势, 不同品种变化幅度存在差异; 相关性分析结果显示, 不同品种各生理指标间相关性表现不同, MDA与3个抗氧化酶(SOD、POD、CAT)间具有较强的相关性。

关键词: 花椒; 半致死温度; 抗寒机理; 电导率; 抗氧化酶

中图分类号: S573.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2026)01-0088-08

Physiological Response and Cold Resistance Evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* Varieties in Hebei Province under Low Temperature Stress

LI Ying¹, GUO Weizhen¹, SUN Hao², ZHAO Jingxian¹

(1. Hebei Academy of Forestry and Grassland Sciences/Hebei Forest Seed Technology Innovation Center,

Shijiazhuang 050061, China; 2. College of Horticultural Science & Technology, Hebei Normal

University of Science & Technology, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: To investigate the winter cold resistance of cultivated *Zanthoxylum bungeanum* varieties in Hebei province, one-year-old branches of different *Zanthoxylum bungeanum* varieties from Fuping, Tangxian, Pingshan, Shexian, Shijiazhuang, and Guangzong were collected to measure relative conductivity and calculate the half lethal temperature. Additionally, five *Zanthoxylum bungeanum* varieties including Xinglongqiujiao, Zhaochangshanjiao, Baishajiao, Jijiao 1, and Wucijiao 1 were used as test materials. Seven temperature gradients (-5, -10, -15, -20, -25, -30, and -35 °C) were established to study changes of the physiological indicators such as malondialdehyde(MDA), proline(Pro), superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD), and catalase(CAT) in *Zanthoxylum bungeanum* branches under varying low-temperature stress conditions, with an analysis of correlations among the indicators. The results showed that significant differences in cold resistance were observed among *Zanthoxylum bungeanum* varieties from different collection sites, with Qiujiao from Guangzong exhibiting the highest cold resistance and Shanxi Laopojiao from Pingshan exhibiting the lowest. Short-term low temperatures in the field during winter had minimal impact on *Zanthoxylum bungeanum* frost damage, but prolonged exposure led to a cumulative effect, gradually increasing branch conductivity. Under low-temperature stress, MDA and Pro content in *Zanthoxylum bungeanum* branches initially rose and then declined, while antioxidant enzyme activity(SOD, POD, and CAT) followed a similar trend, the

收稿日期: 2025-03-19

基金项目: 河北省高层次人才项目(C20231156); 河北省林果花卉产业发展专家支撑团队(LC2025-14); 河北省林草关键技术创新与示范项目(2403098)

作者简介: 李莹, 高级工程师, 硕士, 主要从事经济林树种育种及栽培研究, E-mail: liying19891120@126.com

通信作者: 郭伟珍, 正高级工程师, 主要从事花椒品种选育及栽培技术研究, E-mail: weizhen1229@163.com

magnitude of variation differed among varieties. The correlation analysis results showed that there were differences in the correlation between physiological indicators of different varieties, and there was a strong correlation between MDA and three antioxidant enzymes(SOD, POD, and CAT).

Keywords: *Zanthoxylum bungeanum*; half lethal temperature; cold resistance mechanism; conductivity; antioxidant enzyme

花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)原产于我国,其适应性广^[1],经济价值高^[2-3],且具有一定的药用价值^[4],市场前景广阔。河北太行山区具有悠久的历史花椒栽培历史,花椒是当地主要的经济林树种之一,其主要分布在涉县、磁县、平山、阜平等地,栽培品种主要有本地大红袍、小红椒、白沙椒、枸椒、秋椒等。为适应市场需求,河北各地从陕西等地引进了韩城大红袍、黄盖等一些品质优良的品种,近年来,日本无刺山椒品种(*Zanthoxylum piperitum*)朝仓山椒、琉锦山椒、葡萄山椒等在一些地区进行了引种栽培。

近年来,极端天气频繁出现,给农业生产造成了极大损失。如2021、2023年冬季河北地区均出现了极端低温现象(石家庄种质资源圃实测2021年最低温度为-24.4℃,2023年为-26.8℃),导致一些地区花椒树枝条干枯死亡,造成了严重的经济损失^[5]。何西凤^[6]、杨途熙等^[7]对花椒自然越冬过程中抗寒性的变化进行了研究,明确了花椒枝条在越冬过程中其抗寒性呈现先增强后减弱的变化趋势,在其承受范围内,逐步低温锻炼能增强其抗寒能力。不同研究者对山西、甘肃、河北等地的一些花椒品种抗寒性进行了比较研究,并对其抗寒机理进行了探讨^[8-14],但研究品种较少,且地区差异较大,无法有效为河北地区引种栽培提供依据。

笔者在对河北省栽培的主要花椒品种进行调研的基础上,选取代表性且符合试验条件的种植园采集花椒枝条进行抗寒性研究,旨在为在河北省及相似气候地区的花椒栽培引种及冬季防寒提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

在阜平、唐县、平山、涉县、石家庄、广宗等地选取3~5年生不同品种花椒树为试验材料。广宗的朝仓山椒和石家庄的朝仓山椒、冀椒1号、无刺椒1号均采集于嫁接树,砧木为秋椒。其余品种均为实生树。

1.2 试验方法

2022年12月中旬在花椒树不同方位采集1年生枝条3~4根,混匀后分成7份,于室内进行梯度

降温处理(温度设定为-5、-10、-15、-20、-25、-30、-35℃),以0℃为起点,5℃/h的速率降温,到达设定温度后保持15h,再以同样的速率升温至0℃,测定其相对电导率,计算其半致死温度^[6],每个处理重复3次。6个采集地中,唐县、阜平、平山、涉县均位于太行山区,为传统花椒种植地;广宗采集地为平原地区的黄河故道区,2019年新建花椒园;石家庄采集地位于石家庄市北郊的河北省林业和草原科学研究院花椒种质资源圃(北纬38°08′,东经114°28′),属滹沱河故道的平原区。地理纬度是阜平>唐县>平山>石家庄>广宗>涉县。2023年3月,调查石家庄试点部分品种田间枝条受冻情况。

2023年12月在石家庄试点选取兴隆秋椒、朝仓山椒、白沙椒、冀椒1号、无刺椒1号等5个品种3年生花椒树作为试验品种,树体生长健壮,于不同方位剪取1年生枝条,混匀后分成7份,于室内进行梯度降温处理,处理方法同2022年冬季。

1.3 测定项目及方法

2023年12月采集石家庄试点的5个品种枝条经低温处理后放入液氮速冻,保存在-80℃冰箱,用来测定丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)等相关生理指标。丙二醛(MDA)含量采用紫外光谱法测定,游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮显色法测定^[15]。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用钼酸铵法测定^[16]。每个指标的测定均重复3次。

1.4 数据分析

试验所有原始数据用Excel软件进行统计,用SPSS软件对数据进行比较分析。相对电导率用Excel软件进行计算后,拟合Logistic方程进行回归分析,拐点温度即为低温半致死温度(LT₅₀)。

2 结果与分析

2.1 不同采集地花椒品种的抗寒性比较

由表1可知,不同地区采集的花椒品种LT₅₀存在较大差异。在阜平采集当地品种小红椒的半致死温度较低(-22.68℃),抗寒性较强;在唐县,本地

品种小红椒(-22.34℃)、秋椒(-21.04℃)、伏椒(-19.55℃)抗寒性较强,而引进的韩城大红袍(-18.26℃)、黄盖(-18.34℃)抗寒性较差;在平山,狮子头的抗性最强(-19.25℃),其次为小黄椒、大青椒,平山本地大红袍与引进的山西大红袍抗寒性相近,山西老婆椒抗寒性最差(-14.86℃);在涉县,

抗寒性最强的为伏椒,杨庄无刺的抗寒性相对较差;在广宗,测定的秋椒、枸椒、白沙椒抗寒性较强,引进的韩城大红袍、黄盖等品种抗寒性相对较差;在石家庄河北省林业和草原科学研究院花椒资源圃内,引种的兴隆秋椒的抗寒性最强(-22.35℃),无刺椒1号的抗寒性最差(-17.38℃)。

表1 2022年不同采集地花椒品种抗寒性的比较

Tab.1 Comparison of cold resistance of *Z. bungeanum* varieties from different collection locations in 2022

采集地 Collection location	品种 Variety	Logistic 回归方程 Regression equation	半致死温度(LT ₅₀)/℃ Half lethal temperature	相关系数 Correlation coefficient
阜平 Fuping	小红椒	$y=100/(1+7.079e^{-0.0863x})$	-22.68	0.79
	唐县	$y=100/(1+8.024e^{-0.0932x})$	-22.34	0.70
	Tangxian	$y=100/(1+3.171e^{-0.1030x})$	-21.04	0.86
	伏椒	$y=100/(1+8.967e^{-0.1122x})$	-19.55	0.84
	韩城大红袍	$y=100/(1+7.056e^{-0.1070x})$	-18.26	0.97
平山 Pingshan	黄盖	$y=100/(1+8.276e^{-0.1152x})$	-18.34	0.92
	狮子头	$y=100/(1+12.444e^{-0.1310x})$	-19.25	0.94
	小黄椒	$y=100/(1+8.670e^{-0.1149x})$	-18.80	0.86
	大青椒	$y=100/(1+8.313e^{-0.1168x})$	-18.13	0.94
	大红袍	$y=100/(1+12.231e^{-0.1526x})$	-16.41	0.83
涉县 Shexian	(山西)大红袍	$y=100/(1+16.440e^{-0.1715x})$	-16.32	0.93
	(山西)老婆椒	$y=100/(1+9.851e^{-0.1539x})$	-14.86	0.88
	伏椒	$y=100/(1+6.113e^{-0.0845x})$	-21.42	0.81
	小红椒	$y=100/(1+7.228e^{-0.1035x})$	-19.11	0.89
	大红袍	$y=100/(1+8.031e^{-0.1161x})$	-17.94	0.95
广宗 Guangzong	白沙椒	$y=100/(1+9.024e^{-0.1275x})$	-17.25	0.91
	冀椒1号	$y=100/(1+7.438e^{-0.1236x})$	-16.24	0.92
	二红袍	$y=100/(1+5.869e^{-0.1120x})$	-15.80	0.86
	杨庄无刺	$y=100/(1+13.173e^{-0.1657x})$	-15.56	0.92
	秋椒	$y=100/(1+7.311e^{-0.0805x})$	-24.71	0.75
石家庄 Shijiazhuang	枸椒	$y=100/(1+5.949e^{-0.0766x})$	-23.28	0.81
	白沙椒	$y=100/(1+8.600e^{-0.0970x})$	-22.18	0.90
	韩城大红袍	$y=100/(1+6.288e^{-0.0876x})$	-20.99	0.95
	朝仓山椒	$y=100/(1+8.721e^{-0.1109x})$	-19.53	0.87
	黄盖	$y=100/(1+8.800e^{-0.1208x})$	-18.00	0.93
涉县	(兴隆)秋椒	$y=100/(1+4.719e^{-0.0694x})$	-22.35	0.75
	长把椒	$y=100/(1+6.480e^{-0.0847x})$	-22.06	0.73
	朝仓山椒	$y=100/(1+5.729e^{-0.0797x})$	-21.90	0.82
	白沙椒	$y=100/(1+5.595e^{-0.0807x})$	-21.34	0.71
	(阜平)小红椒	$y=100/(1+8.611e^{-0.1077x})$	-20.00	0.93
涉县	冀椒3号	$y=100/(1+8.045e^{-0.1057x})$	-19.73	0.71
	(涉县)大红袍	$y=100/(1+3.999e^{-0.0742x})$	-18.68	0.95
	枸椒	$y=100/(1+4.280e^{-0.0785x})$	-18.53	0.87
	十月红	$y=100/(1+3.735e^{-0.0729x})$	-18.08	0.86
	冀椒1号	$y=100/(1+7.959e^{-0.1171x})$	-17.71	0.94
涉县	无刺椒1号	$y=100/(1+8.098e^{-0.1203x})$	-17.38	0.97

注:部分品种名称前“()”代表其引种地。下同。

Note: The parentheses "()" before certain variety names indicated their introduction origin. The same as below.

2.2 不同花椒品种田间冻害情况调查

2022—2023年冬季,11月底开始气温逐渐下降,夜间温度低于0℃,12月中旬夜间最低气温降到-13℃左右,第2次低温出现在1月底2月初,最低温度达到-17℃,随后气温逐渐升高。由表2可知,在1月中旬之前,各品种枝条的相对电导率变

化较小,1月底2月初气温的再次下降,导致枝条的相对电导率大幅上升,各品种相对电导率均在50%以上,之后随着温度的上升,采集的成活枝条相对电导率开始下降到正常水平。结合枝条冻害率可以看出,无刺椒1号、冀椒1号、朝仓山椒受冻较为严重。

表2 不同花椒品种冬季田间枝条冻害情况
Tab.2 Frost damage of branches of different *Z. bungeanum* varieties in winter field %

品种 Variety	不同采样日期下的相对电导率 Relative electrical conductivity at different sampling dates						1年生枝条冻害率 Frost damage rate of 1-year-old branches
	12-15	12-29	01-12	01-26	02-10	02-23	
(兴隆)秋椒 Xinglongqiujiiao	25.01	31.49	29.62	40.10	58.25	32.60	11.11
白沙椒 Bashajiao	30.88	26.90	25.05	41.84	66.62	33.70	52.00
朝仓山椒 Zhaocangshanjiiao	30.26	20.91	26.96	49.24	74.68	36.94	81.34
无刺椒1号 Wucijiao 1	23.24	23.25	25.59	56.02	74.66	44.85	80.15
冀椒1号 Jijiao 1	27.50	22.95	35.07	52.96	77.22	42.93	84.85

2.3 花椒抗寒机理研究

2.3.1 不同花椒品种在低温胁迫下相对电导率的变化 低温胁迫下枝条相对电导率的变化如图1所示。

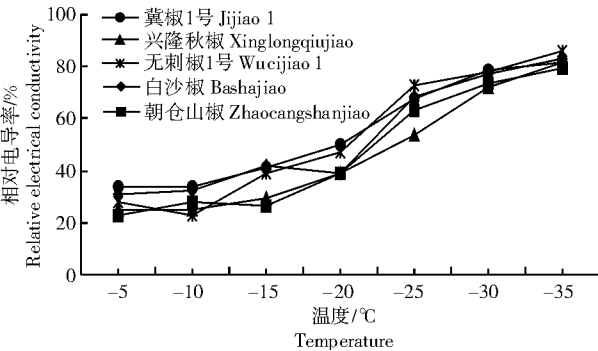


图1 低温胁迫下枝条相对电导率的变化
Fig.1 Changes in relative electrical conductivity of branches under low temperature stress

从图1可以看出,随着低温胁迫的加剧,花椒枝条相对电导率呈上升趋势,其上升速度呈现“缓慢—快速—减缓”的变化,为明显的“S”型曲线模型。不同品种相对电导率变化有一定的差异,其耐低温的能力明显不同。-5~-15℃,各品种的相对电导率变化缓慢;-15~-25℃,各品种的相对电导率变化较快;当温度低于-25℃时,多数品种细胞基本被破坏,相对电导率在70%以上。其中,兴隆秋椒的上升速率较慢,表明其抗寒性较强。

2.3.2 不同花椒品种枝条半致死温度的比较 由表3可知,供试的5个品种中,兴隆秋椒的抗寒性最强(-21.37℃),其次为朝仓山椒,白沙椒与无刺椒1号差异较小,抗寒性最弱的为冀椒1号(-16.84℃)。2023年测定的LT₅₀与2022年相比个别品种抗寒能力排序发生了变化,这可能是由于不同年份树体生长状态差异所致。

表3 2023年不同花椒品种枝条半致死温度的比较
Tab.3 Comparison of half lethal temperature in branches of different *Z. bungeanum* varieties in 2023

品种 Variety	Logistic 回归方程 Regression equation	半致死温度(LT ₅₀)/℃ Half lethal temperature	相关系数 Correlation coefficient
(兴隆)秋椒 Xinglongqiujiiao	$y=100/(1+8.162e^{-0.0919x})$	-21.37	0.92
朝仓山椒 Zhaocangshanjiiao	$y=100/(1+7.443e^{-0.0949x})$	-21.15	0.93
白沙椒 Bashajiao	$y=100/(1+8.275e^{-0.1152x})$	-18.34	0.92
无刺椒1号 Wucijiao 1	$y=100/(1+6.72e^{-0.1049x})$	-18.16	0.94
冀椒1号 Jijiao 1	$y=100/(1+4.04e^{0.0829x})$	-16.84	0.95

2.3.3 低温胁迫下不同花椒品种丙二醛(MDA)含量的变化 从图2可以看出,随着低温胁迫的加剧,5个花椒品种枝条丙二醛含量均呈先升后降的

趋势,在-20~-25℃达到峰值。LT₅₀ 较低的品种上升速率较慢,且含量较低,如兴隆秋椒;LT₅₀ 较高的品种上升速率较快,含量较高,如无刺椒1号、

冀椒 1 号。表明,不同品种花椒枝条在低温胁迫下,会导致MDA大量积累,且MDA含量的高低与其抗寒性强弱表现出较强的一致性。

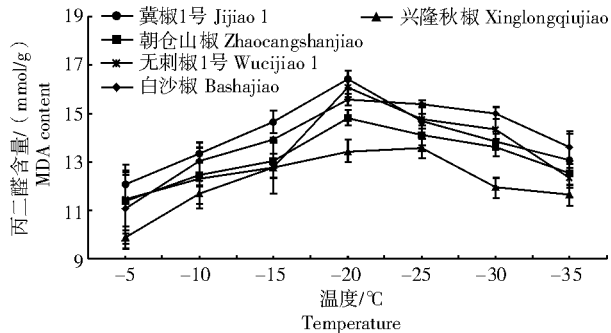


图2 低温对不同花椒品种枝条丙二醛含量的影响

Fig.2 Effect of low temperature on MDA content in branches of different *Z. bungeanum* varieties

2.3.4 低温胁迫下不同花椒品种脯氨酸(Pro)含量的变化 由图3可知,随着低温胁迫的加剧,5个花椒品种枝条脯氨酸含量整体上均呈先升后降的趋势,在-25~-30℃达到峰值,但整体上脯氨酸含量变化较小。无刺椒1号的含量最低,冀椒1号和朝仓山椒的含量较高。白沙椒整体含量变化较小。表明,低温胁迫下,细胞可能会通过增加脯氨酸含量来抵御伤害,但其含量高低与抗寒性强弱未表现出相关性。

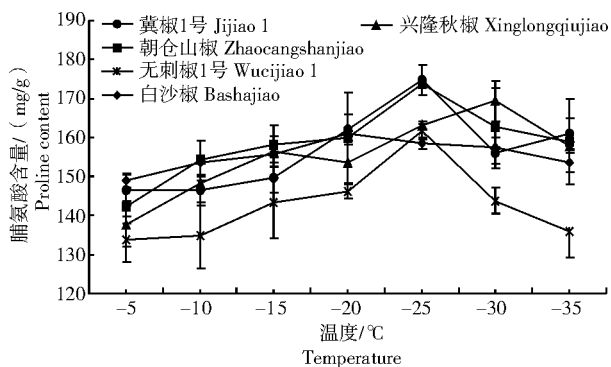


图3 低温对不同花椒品种枝条脯氨酸含量的影响

Fig.3 Effect of low temperature on proline content in branches of different *Z. bungeanum* varieties

2.3.5 低温胁迫下不同花椒品种超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化 从图4可以看出,随着低温胁迫的加剧,SOD活性整体上均呈先上升后下降的趋势。所测品种在-20℃达到最大值。各品种上升速率差异较小,但兴隆秋椒的SOD活性较高,而冀椒1号、无刺椒1号的SOD活性较低。表明,低

温胁迫下,花椒枝条会通过增强SOD活性消除活性氧对细胞造成的伤害,且抗寒性越强的品种,SOD活性越高。

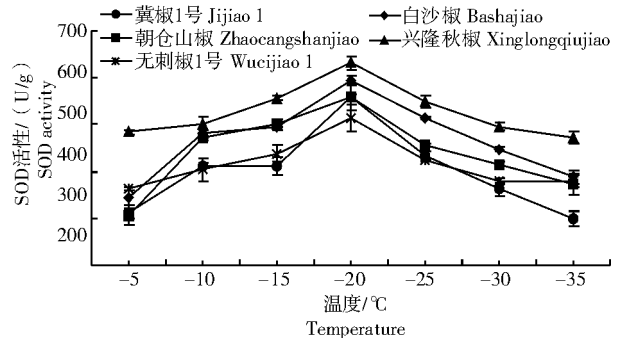


图4 低温对不同花椒品种枝条SOD活性的影响

Fig.4 Effect of low temperature on SOD activity in branches of different *Z. bungeanum* varieties

2.3.6 低温胁迫下不同花椒品种过氧化物酶(POD)活性的变化 由图5可知,随着低温胁迫的加剧,POD活性整体上均呈先上升后下降的趋势。兴隆秋椒、白沙椒在-25℃时达到最高,冀椒1号、无刺椒1号、朝仓山椒在-20℃达到最大。且兴隆秋椒、朝仓山椒的POD活性上升速率较快,活性较高,而冀椒1号、无刺椒1号整体变化较小,活性较低。表明,低温胁迫下,花椒枝条会通过增强POD活性消除活性氧对细胞造成的伤害,且抗寒性越强的品种,POD活性越高。

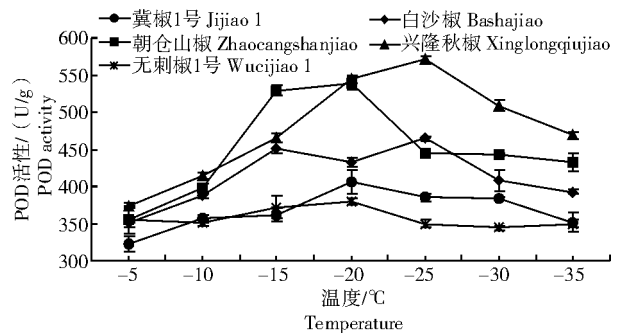


图5 低温对不同花椒品种枝条POD活性的影响

Fig.5 Effect of low temperature on POD activity in branches of different *Z. bungeanum* varieties

2.3.7 低温胁迫下不同花椒品种过氧化氢酶(CAT)活性的变化 由图6可知,随着低温胁迫的加剧,CAT活性整体上均呈先上升后下降的趋势。兴隆秋椒在-30℃时达到最高,冀椒1号、白沙椒在-25℃时达到最高,无刺椒1号、朝仓山椒在-20℃达到最大。表明,低温胁迫下,花椒枝条会通过增

强CAT活性消除活性氧对细胞造成的伤害。

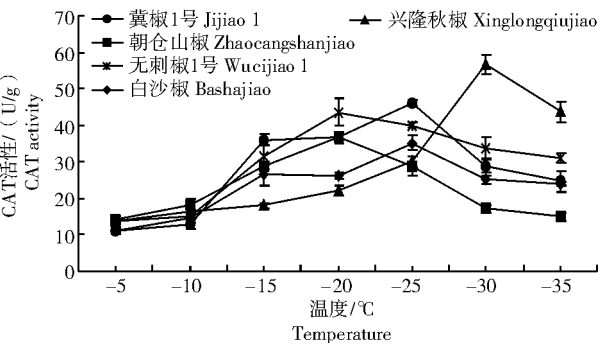


图6 低温对不同花椒品种枝条CAT活性的影响
Fig.6 Effect of low temperature on CAT activity in branches of different *Z. bungeanum* varieties

2.3.8 相关性分析 由表4可知,兴隆秋椒的MDA含量与SOD、POD活性具有显著或极显著的正相关;Pro含量与POD、CAT活性呈显著正相关($P<$

0.05),3个保护酶活性间相关性均不显著。朝仓山椒的MDA含量与其他4个指标均呈显著正相关($P<0.05$),Pro含量与3个保护酶活性相关性均不显著,SOD、POD、CAT这3个保护酶活性之间均呈显著正相关($P<0.05$)。白沙椒的MDA含量与其他指标间呈显著或极显著正相关,Pro含量与其他指标间呈显著或极显著正相关,SOD活性与POD活性呈显著正相关($P<0.05$),POD活性与CAT活性呈极显著正相关($P<0.01$)。无刺椒1号的MDA含量与CAT活性呈极显著正相关($P<0.01$),SOD活性与POD活性呈显著正相关($P<0.05$),其余指标间相关性均不显著。冀椒1号的MDA含量与3个保护酶活性呈显著或极显著正相关,Pro含量与CAT活性呈显著正相关($P<0.05$),SOD活性与POD活性呈显著正相关($P<0.05$),POD活性与CAT活性呈显著正相关($P<0.05$)。

表4 各生理指标的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis of changes in various physiological indicators

品种	Variety	指标	Index	MDA	Pro	SOD	POD	CAT
(兴隆)秋椒	Xinglongqiujiiao	MDA		1				
		Pro		0.620	1			
		SOD		0.767*	0.112	1		
		POD		0.889**	0.765*	0.609	1	
		CAT		0.105	0.804*	-0.320	0.428	1
朝仓山椒	Zhaocangshanjiao	MDA		1				
		Pro		0.771*	1			
		SOD		0.787*	0.484	1		
		POD		0.761*	0.466	0.831*	1	
		CAT		0.820*	0.484	0.869*	0.847*	1
白沙椒	Bashajiao	MDA		1				
		Pro		0.976**	1			
		SOD		0.788*	0.885**	1		
		POD		0.817*	0.808*	0.759*	1	
		CAT		0.870*	0.800*	0.575	0.911**	1
无刺椒1号	Wucijiao 1	MDA		1				
		Pro		0.718	1			
		SOD		0.752	0.442	1		
		POD		0.360	0.069	0.831*	1	
		CAT		0.879**	0.749	0.654	0.348	1
冀椒1号	Jijiao 1	MDA		1				
		Pro		0.500	1			
		SOD		0.915**	0.319	1		
		POD		0.906**	0.630	0.795*	1	
		CAT		0.776*	0.791*	0.538	0.758*	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上极显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。
Note: ** indicated extremely significant correlation at the 0.01 level(bilateral), * indicated significantly correlation at the 0.05 level(bilateral).

3 结论与讨论

本试验通过对不同采集地花椒品种的 LT_{50} 进行比较,初步判断不同品种间的抗寒能力,试验中测得的 LT_{50} 与他人试验测得数据存在差异,可能是试验方法不同,或试验材料来源差异所致^[5]。本试验中,供试品种 LT_{50} 最低的品种为广宗花椒园的秋椒(-24.71°C),该园的枸椒和白沙椒 LT_{50} 也较低,表现出较强的抗寒性。广宗花椒园处于黄河故道内,冬季气温远低于周边区域,且风速较大,2021 年冬季极端低温(-24.4°C)导致部分花椒树大量抽条死亡,本试验所采集的秋椒、枸椒和白沙椒(均为抗寒优树)为历经 2021 年低温时未受冻的花椒树,可作为抗寒种质进行持续研究。其他地区 LT_{50} 较低的品种有兴隆的秋椒、阜平的小红椒、唐县的小红椒等,这些品种均处于或来源于纬度较高的地区,在长期的栽培过程中,对当地环境形成了良好的适应性。这与付豪^[17]的研究结果“引种地纬度与花椒抗寒性的相关性最高,随引种地纬度的上升,花椒种质抗寒性更好”的结论一致。连年试验中发现,朝仓山椒的 LT_{50} 与其田间表现相反, LT_{50} 较低,但田间受冻率较高。朝仓山椒为日本山椒品种,引进我国北方后,一直存在越冬困难的问题。推测可能是由于其原产地气候温暖湿润,而我国北方冬季干旱、多风、寒冷,容易导致枝条失水,甚至干枯死亡。而室内试验仅测试低温条件下其生理变化,这可能导致其与田间复杂气候下表现不同,其具体原因有待进一步研究。另外,本试验中,同一品种在不同地区 LT_{50} 不同,可能与繁殖材料来源有关。毕君等^[18]在对北方花椒种质考察中发现,传统花椒品种的分类与命名多采用历史沿袭下来的俗名,不同地区如秋椒、伏椒、小红椒等根据其成熟期或颜色性状命名的品种可能并非同一品种,因而抗寒性存在差异。

花椒在自然越冬过程中,体内会响应一系列生理生化反应适应气温变化。何西凤^[6]的研究显示,越冬过程中,花椒的抗寒性呈现出先增强后减弱的变化趋势,与半月平均最低温度呈显著正相关。本试验中,前期花椒枝条的相对电导率变化较小,到后期抗寒性较差的品种相对电导率急剧升高。这是因为前期低温时间较短,植株体内通过调节代谢进行自我调节,细胞未受到明显伤害,因而其电解质外渗率变化较小,后期低温时间延长,抗寒性减弱,抗寒性较差的品种细胞结冰死

亡,导致相对电解质外渗率急剧上升。毕君^[12]的研究也显示,冬季短时间的低温对花椒冻害影响不大,随着低温持续时间的延长,低温累积效应促使相对电导率逐渐升高。春季枝条冻害率调查中,兴隆秋椒的相对电导率最低,田间冻害率也最低,仅为 11.11%,表明其抗寒性较强。

MDA 是植物在逆境条件下体内膜脂过氧化代谢产物之一,可在一定程度上表示细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[19]。Pro 作为渗透调控物质,其含量的增加可提高胞内细胞液浓度而发挥保护作用,也可以促进抗氧化酶的活性^[20]。本试验中,随着温度的降低,供试品种 MDA 含量呈先上升后下降趋势,这与刘玲^[10]、陈政等^[13]的研究结果不一致,但是与冯康安等^[8-9,14]的研究结果基本一致,可能是由于胁迫温度不同所致,从 0°C 以上降温多呈现先降低后升高的趋势;Pro 含量呈现先上升后下降趋势,这与他人对不同树种抗寒性的研究结论基本一致^[21-23]。SOD、POD、CAT 等抗氧化酶能够清除活性氧,进而保护细胞组织结构^[24]。本试验中,抗氧化酶活性均呈现先上升后下降的趋势,这与毕君^[12]、杨复康等^[23]的研究结果一致。相关性分析表明,不同品种在应对低温胁迫时,各生理指标的响应方式存在一定差异,但整体上,与膜脂过氧化有关的生理指标(MDA、SOD、POD、CAT)具有一定的协同响应。

综上所述,河北省栽培的花椒品种抗寒性存在较大差异,供试品种中,广宗种植园的秋椒(抗寒优树)的抗寒性最强,可作为抗寒种质进一步研究。低温胁迫下,花椒枝条细胞产生胁迫应激响应,MDA 含量大量积累,Pro 含量升高,SOD、POD、CAT 保护酶活性上升,其响应变化在一定程度上反映植株的抗寒能力。

参考文献:

- [1] 董小强,王玉明.花椒习性与栽培技术[J].科技视界,2019(1):232-233.
DONG X Q, WANG Y M. Habits and cultivation techniques of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Science & Technology Vision, 2019(1):232-233.
- [2] 黄鹏,黄东杰.花椒籽的研究及开发利用现状[J].现代农业科技,2018(23):231-232.
HUANG P, HUANG D J. Research and utilization status of prickly ash seeds[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(23):231-232.
- [3] 邓振义,孙丙寅.花椒嫩芽主要营养成分的分析[J].西北林学院学报,2005,20(1):179-180.
DENG Z Y, SUN B Y. Analysis of the main nutritional label-

- ing in the tender bud of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(1): 179-180.
- [4] 王秋亚, 景晓卉. 花椒精油化学成分、提取方法及抑菌活性研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(12): 187-190.
WANG Q Y, JING X H. Research progress of the chemical compositions, extraction methods and antibacterial activities of essential oil from *Zanthoxylum bungeanum*[J]. China Condiment, 2018, 43(12): 187-190.
- [5] 李莹, 秦素洁, 郭伟珍, 等. 花椒越冬抗寒机理研究进展[J]. 河北林业科技, 2024(1): 53-56.
LI Y, QIN S J, GUO W Z, et al. Research progress on the cold resistance mechanism of *Zanthoxylum bungeanum* during overwintering[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2024(1): 53-56.
- [6] 何西凤. 自然越冬过程中花椒抗寒性的发育与机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
HE X F. A study on the development and mechanism of *Zanthoxylum bungeanum* maxim. cold resistance during natural overwintering[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [7] 杨途熙, 魏安智, 李晓, 等. 越冬过程中花椒抗寒性与组织水和渗透调节物质的变化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(6): 579-582.
YANG T X, WEI A Z, LI X, et al. Changes of cold resistance and tissue water and osmoregulation substances of *Zanthoxylum bungeanum* maxim. during winter[J]. Plant Physiology Communications, 2010, 46(6): 579-582.
- [8] 冯康安, 朱宝才. 低温胁迫下不同花椒品种的生理响应及其抗寒性评价[J]. 山东农业科学, 2024, 56(12): 26-32.
FENG K A, ZHU B C. Physiological response of different *Zanthoxylum bungeanum* varieties to low temperature stress and their cold resistance evaluation[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(12): 26-32.
- [9] 刘冰. 花椒抗寒性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
LIU B. Cold resistance characteristics of *Zanthoxylum bungeanum*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005.
- [10] 刘玲. 花椒抗寒抗旱性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
LIU L. Research on cold and drought resistance of *Zanthoxylum bungeanum*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [11] 孙丙寅, 刘淑明. 不同种源花椒抗寒性比较研究[J]. 陕西林业科技, 2010, 38(2): 1-3.
SUN B Y, LIU S M. Comparison of cold tolerance of *Zanthoxylum bungeanum* among different provenances[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2010, 38(2): 1-3.
- [12] 毕君. 山椒栽培机理及关键技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
BI J. Study on mechanism and key technology of cultivation of *Zanthoxylum piperitum* de Candolle[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [13] 陈政, 李佩洪, 唐伟, 等. 日本无刺花椒抗寒性的初步研究[J]. 现代园艺, 2020(9): 12-15.
CHEN Z, LI P H, TANG W, et al. Preliminary study on cold resistance of Japanese prickly ash[J]. Modern Horticulture, 2020(9): 12-15.
- [14] 刘胜元, 张明忠, 王华田, 等. 3个主栽花椒品种的抗寒性评价[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 388-395.
LIU S Y, ZHANG M Z, WANG H T, et al. Evaluation of the cold resistance capability of three different cultivars of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(4): 388-395.
- [15] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1995: 322-328.
PAN R C. Plant physiology[M]. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 1995: 322-328.
- [16] 彭建, 王丹英, 徐春梅, 等. 钼酸铵法测定水稻过氧化氢酶活性[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 61-64.
PENG J, WANG D Y, XU C M, et al. Ammonium molybdate method for detecting the activities of rice catalase[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(16): 61-64.
- [17] 付豪. 引种地生态地理因素对花椒种质资源表型性状及抗寒性的影响[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
FU H. The influence of ecological and geographical factors in the introduction site on the phenotypic traits and cold resistance of Sichuan pepper germplasm resources[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023.
- [18] 毕君, 王春荣, 赵京献, 等. 北方花椒主产区种质资源考察报告[J]. 河北林果研究, 2003, 18(2): 165-168.
BI J, WANG C R, ZHAO J X, et al. Investigation of *Zanthoxylum bungeanum* species and resource in north producing area[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2003, 18(2): 165-168.
- [19] 吕小军, 杨途熙, 何小红, 等. 冬季低温对花椒抗寒性生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(7): 143-148.
LÜ X J, YANG T X, HE X H, et al. Influence of low temperature stress on the cold-resistance physiological indexes of *Zanthoxylum bungeanum* in winter[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2013, 22(7): 143-148.
- [20] 王小华, 庄南生. 脯氨酸与植物抗寒性的研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 398-402.
WANG X H, ZHUANG N S. Advances in research on proline and cold resistance of plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(11): 398-402.
- [21] 孙浩, 李大勇, 郭伟珍. 不同花椒品种抗早霜能力测定[J]. 河北林业科技, 2024(2): 6-11.
SUN H, LI D Y, GUO W Z. Determination of early frost resistance of different *Zanthoxylum bungeanum* varieties[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2024(2): 6-11.
- [22] 郝丽叶, 路琦, 阿力木·阿木提, 等. 低温胁迫对扁桃优株生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2024, 52(1): 68-78.
HAO L Y, LU Q, A LIMU AMTI, et al. Effect of low temperature on physiological characteristics of *Almond strains*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 68-78.
- [23] 杨复康, 杨燕君, 宋永宏, 等. 不同杏品种抗寒性及生理指标[J]. 北方园艺, 2021(3): 27-32.
YANG F K, YANG Y J, SONG Y H, et al. Cold resistance and physiological indexes of different apricot cultivars[J]. Northern Horticulture, 2021(3): 27-32.
- [24] 祁伟亮, 孙万仓, 马骊. 活性氧参与调控植物生长发育和胁迫响应机理的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 69-81.
QI W L, SUN W C, MA L. Research progress of reactive oxygen species involved in regulating plant growth and development and the mechanisms of stress response[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 69-81.