北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

冬季低温下两个槲栎品种的生理响应及其抗寒性评价

姜雪铭 杨钦淞 李国雷 唐蕊迪

Physiological response and frost hardiness evaluation of two *Quercus aliena* cultivars under low temperature in winter

Jiang Xueming, Yang Qinsong, Li Guolei, Tang Ruidi

引用本文:
姜雪铭, 杨钦淞, 李国雷, 唐蕊迪. 冬季低温下两个槲栎品种的生理响应及其抗寒性评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(6):183–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250359
Jiang Xueming, Yang Qinsong, Li Guolei, Tang Ruidi. Physiological response and frost hardiness evaluation of two *Quercus aliena* cultivars under low temperature in winter[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6):183–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250359

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250359

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

51个蜡梅品种抗寒性鉴定及评价
Identification and evaluation of cold tolerance of 51 *Chimonanthus praecox* cultivars
北京林业大学学报, 2026, 48(3): 178–190. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250305

枣*CML*基因的分子特征及其抗寒性表达模式分析
Molecular characteristics of *CML* genes in Chinese jujube and their expression patterns in resistance to cold stress
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 58–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210334

黄槽竹及其变种自然极端低温后的生理响应特征
Physiological response characteristics of *Phyllostachys aureosulcata* and its varieties after natural extreme low temperature
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 75–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210330

栓皮栎和锐齿槲栎幼苗光合特性对高温胁迫的响应
Photosynthetic response of *Quercus variabilis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* seedlings to high temperature stress
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 25–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210240

映山红亚属内品种间杂交F_1代花色苷种类及定量分析
Types and quantitative analysis of anthocyanins in F_1 hybrid among varieties in *Rhododendron* subgenus *Tsutsusi*
北京林业大学学报, 2022, 44(5): 105–114. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210060

复合种植模式下谷胱甘肽和*GST2*调控活性氧清除增强林下植物抗寒性
Glutathione and *GST2* regulating reactive oxygen species scavenging to enhance cold resistance of understory plants under intercropping patterns
北京林业大学学报, 2026, 48(1): 73–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250186

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250359

冬季低温下两个槲栎品种的生理响应及其抗寒性评价

姜雪铭　杨钦淞　李国雷　唐蕊迪
（北京林业大学栎树研究中心，北京 100083）

摘要:【目的】评价冬季低温下‘秋韵’(红)和‘金榜题名’(黄)两个槲栎品种的生理响应及抗寒性，为槲栎新品种在不同地区的推广应用提供理论参考。**【方法】**采集不同时期北京地区两槲栎品种的枝条和芽，采用电导率法测定枝条抗寒性，盐酸−甲醇法测定枝条和芽的花青苷含量。采用福林酚法测定枝条的总酚含量，PVPP 沉淀法测定非单宁酚类含量，香草醛−盐酸法测定缩合单宁含量(CT)，从总酚含量中减去非单宁酚类物质和 CT 含量获得水解单宁(HT)含量。分析探究槲栎枝条抗寒性与花青苷、HT 之间的关系。**【结果】**(1)2023 年 12 月 19 日时‘秋韵’枝条的半致死温度(LT_{50})为−47.9 ℃，‘金榜题名’为−53.2 ℃；2024 年 1 月 5 日时‘秋韵’品种枝条的 LT_{50} 为−47.8 ℃，‘金榜题名’为−48.4 ℃，均为‘金榜题名’抗寒性高于‘秋韵’。(2)槲栎枝条中的花青苷含量随外界环境温度下降而升高，12 月 19 日最低温时‘秋韵’花青苷含量显著高于‘金榜题名’；芽中的花青苷含量则呈相反趋势。(3)槲栎休眠枝条内的单宁类型主要为 HT。进入休眠期时，‘金榜题名’HT 显著高于‘秋韵’，此时枝条 HT 和抗寒性表型相符。**【结论】**(1)两槲栎品种均具有较强的抗寒性，‘金榜题名’抗寒性略强于‘秋韵’。(2)两槲栎品种抗寒能力差异与休眠初期 HT 相关，槲栎体内高含量的 HT 可能在提高槲栎枝条抗寒性中发挥重要作用。研究首次评价了冬季低温下两个槲栎品种的花青苷和水解单宁响应及其抗寒性，并初步发现休眠期抗寒性与 HT 相关，研究结论对于解析苗木抗寒性状形成机制具有重要意义。

关键词：槲栎；抗寒性；水解单宁；花青苷
中图分类号：S722　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)06−0183−08
引文格式：姜雪铭，杨钦淞，李国雷，等. 冬季低温下两个槲栎品种的生理响应及其抗寒性评价［J］. 北京林业大学学报，2026，48(6)：183−190. Jiang Xueming, Yang Qinsong, Li Guolei, et al. Physiological response and frost hardiness evaluation of two *Quercus aliena* cultivars under low temperature in winter［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6): 183−190.

Physiological response and frost hardiness evaluation of two *Quercus aliena* cultivars under low temperature in winter

Jiang Xueming　Yang Qinsong　Li Guolei　Tang Ruidi
(Oak Research Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］To evaluating the physiological response and frost hardiness of two *Quercus aliena* cultivars ‘Qiuyun’ (red) and ‘Jinbangtiming’ (yellow) under low temperature in winter, and provide a theoretical reference for the promotion and application of new cultivars of *Q. aliena* in different regions.［**Method**］Branches and buds of two cultivars of *Q. aliena* from Beijing were collected at different stages. The frost hardiness of branches was determined by the conductivity method, and the anthocyanin content in branches and buds was determined by the hydrochloric acid-methanol method. The total phenolic content in branches was determined by the Folin phenol method, the non-tannin phenolic content was determined by the PVPP precipitation method, and the condensed tannin (CT) content was determined by the vanillin-hydrochloric acid method. The hydrolysable tannin (HT) content was obtained by subtracting the non-tannin

收稿日期: 2025−09−15　**修回日期:** 2026−05−22
基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD2200302)，北京林业大学 5·5 工程科研创新团队项目(BLRC2023B08)。
第一作者: 姜雪铭。主要研究方向：林木种苗培育理论与技术。Email：xmjiang@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 李国雷，教授，博士生导师。主要研究方向：栎树高效繁育与栽培。Email：glli226@163.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

phenolic content and CT content from the total phenolic content. The association between the frost hardiness of branches and anthocyanin and tannin content was analyzed. [**Result**] (1) On December 19, 2023, the semi-lethal temperature (LT_{50}) values of 'Qiuyun' and 'Jinbangtiming' branches were −47.9 ℃ and −53.2 ℃, respectively. On January 5, 2024, the LT_{50} values of 'Qiuyun' and 'Jinbangtiming' branches had shifted to −47.8 ℃ and −48.4 ℃, respectively. These results indicate that 'Jinbangtiming' exhibited higher frost hardiness compared to 'Qiuyun'. (2) The anthocyanin content in *Q. aliena* branches increased as ambient temperatures decreased. On December 19, at the lowest recorded temperature, the anthocyanin content in 'Qiuyun' was significantly higher than in 'Jinbangtiming'. Conversely, the anthocyanin content in buds followed an opposite trend. (3) During dormancy, the predominant type of tannin in *Q. aliena* branches was HT. When 'Jinbangtiming' entered dormancy, its HT was significantly higher than that of 'Qiuyun'. At this stage, the HT and frost hardiness phenotype of the branches are consistent. [**Conclusion**] (1) Both *Q. aliena* cultivars exhibit strong frost hardiness, with 'Jinbangtiming' demonstrating superior cold tolerance compared to 'Qiuyun'. (2) The variation of frost hardiness between two cultivars of *Q. aliena* was associated with HT in the early dormant stage. High levels of HT in *Q. aliena* may play a critical role in enhancing the frost hardiness of branches. This study represents the first evaluation of the response of anthocyanin and hydrolysable tannin, as well as the frost hardiness, of two *Q. aliena* varieties under low winter temperatures. The findings preliminarily contribute significantly to understanding the mechanisms underlying frost hardiness in seedlings.

Key words: *Quercus aliena*; frost hardiness; hydrolysable tannin; anthocyanin

槲栎(*Quercus aliena*)隶属于壳斗科(Fagaceae)栎属(*Quercus*),是我国重要的乡土用材和观赏树种,分布于辽宁、山东、湖北、广西等 20 余个省[1],被列为国家主要栽培珍贵树种[2]。该树种主根发达,根系可深达 5 m 以上,且蒸腾耗水较少,具有较强的耐干旱瘠薄能力[3]。然而,抗寒性和耐涝性是限制栎树分布的主要因子。目前,乡土栎树的抗寒性研究相对匮乏,已有研究主要集中在夏栎(*Q. robur*)、沼生栎(*Q. palustris*)、娜塔栎(*Q. nuttallii*)、双色栎(*Q. bicolor*)和舒玛栎(*Q. shumardii*)等国外引进树种上[4−5]。因此,系统评价槲栎抗寒性,对于乡土栎的育种与栽培具有重要意义。

低温是植物面临的主要非生物胁迫之一,在持续低温环境下,植物细胞膜结构和功能发生改变,细胞内糖类物质和离子渗出,细胞电导率增大,因此可以用电导率值来表示植物受到低温胁迫的程度,相对电导率越大,表明植物抗寒性越弱[6]。花青苷是植物秋季叶片变红的关键色素,其在植物营养器官中的合成和积累在植物适应和抵抗恶劣环境中起到至关重要的作用,可以通过在液泡中结合糖基降低细胞的渗透势从而降低细胞冰点,增强植物对低温等非生物胁迫的抵抗能力[7]。Mckown 等[8]认为植物花青苷合成和抗寒性间存在某种联系。Hernández 等[9]发现阴面的石榴(*Punica granatum*)果实果汁中花青苷含量高于阳面,认为阴面果实夜间受到的冷风诱导花青苷含量增加。4 ℃ 低温处理下,树冠外部发育的红色果皮芒果(*Mangifera indica* 'Shelly')表现出的低温伤害明显低于树冠内部发育的绿色芒果,表明花青苷在红色果皮芒果抵抗低温胁迫中发挥了重要作用[10]。对山桃(*Prunus davidiana*)实生苗进行外源花青苷处理,可以明显提高山桃幼苗对低温的抗性[11]。我们在前期研究中发现,红、黄两槲栎品种秋季叶片的花青苷含量存在差异[12],但是冬季槲栎枝条内的花青苷积累是否与抗寒性有关目前尚不清晰。

单宁也称植物多酚,是植物中重要的次生代谢物。植物中的单宁类物质可以与蛋白质结合,抵御微生物和病毒的侵害[13],还可以保护植物不被动物取食[14],是有效的化学防御物质。根据结构不同,单宁主要可以分为水解单宁(hydrolysable tannin, HT)和缩合单宁(condensed tannin, CT)[15]。植物在受到低温胁迫时会产生应激作用,通过增加多酚合成酶的基因表达和活性,增加酚类化合物积累,来抵御低温胁迫的伤害[16]。例如,金盏花(*Calendula officinalis*)[17]和罗勒(*Ocimum basilicum* 'Genovese')[18]在 4 ℃ 的低温条件下处理 5 d 时,总多酚含量均增加。低温胁迫会诱导植物中活性氧(reactive oxygen species, ROS)合成,ROS 过量积累会导致膜脂过氧化,严重时可使植物组织坏死[19]。单宁作为多酚类物质,具有抗氧化作用,可能通过清除自由基或抑制某些可能产生自由基的酶[20]发挥其抗氧化功能,如刺梨(*Rosa roxburghii*)果渣的多酚提取物对 DPPH、ABTS 和氧自由基均具有较强的清除能力[21]。可溶

性酚酸（如阿魏酸、芥子酸）是苯丙烷代谢途径中合成花青苷及单宁的重要上游前体，研究表明，低温可诱导冬油菜（*Brassica napus*）叶片中可溶性酚酸及花青苷的积累[22]，提示整个苯丙烷代谢通路（包括下游的花青苷和单宁）可能共同参与植物对低温胁迫的响应。目前木本植物中水解单宁与抗寒性关系的研究尚未形成定论。HT 含量在不同栎属植物及不同组织中存在差异[23]。栓皮栎（*Q. variabilis*）的壳斗、叶片、花序、根、种子和茎中均为 HT 占优势[24]，但是槲栎休眠枝条中总单宁含量以及组分目前尚未测定，槲栎枝条中的水解单宁含量可能与其冬季抗寒性有关。

本研究以课题组前期在北京平原地区选育出的秋叶变红和变黄的槲栎新品种（品系）为试验材料，于秋季和冬季分期采集两品种枝条，在不同温度梯度下测定枝条电导率，拟合 Logistic 方程计算半致死温度，评价槲栎抗寒性，并同步测定枝条和芽的花青苷含量及枝条单宁含量，探究两品种在冬季低温下的生理响应差异，为槲栎抗寒新品种选育及栽培推广提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验材料为槲栎‘秋韵’（红叶型）和‘金榜题名’（黄叶型）品种的 3 年生嫁接苗，不同时期的枝条和芽均采自北京市温泉苗圃（40°03′08″N，116°10′32″E）。槲栎原种秋季叶色为黄绿色。‘秋韵’品种的秋叶季相主色为褐红色，在变色期内先由绿色转变为浅棕色，后转变为深红色，变色期花青苷积累量高于槲栎原种；‘金榜题名’品种的秋叶季相主色为黄色，变色期内由绿色稳定转变为黄色。于 2023 年 12 月 19 日、2024 年 1 月 5 日采集样品处理后于 4 ℃ 冰箱保存，用于抗寒性测定。于 2023 年 11 月 19 日、12 月 5 日、12 月 19 日采集样品后立即用液氮冷冻处理并保存于−80 ℃ 冰箱中，用于花青苷和单宁含量测定。

1.2　试验方法

1.2.1　槲栎枝条抗寒性测定

2023 年 12 月 19 日和 2024 年 1 月 5 日，分别选取温泉苗圃槲栎‘秋韵’和‘金榜题名’品种优树 3 ~ 5 棵，挑选健康、芽饱满、生长状况一致的一年生枝条进行采样，每个品种采集 32 个枝条，分为 4 个重复。每个枝条截取中部约 6 cm 长部分，分为 0.5 cm 长的 8 个小茎段，用去离子水冲洗 2 次后置于试管中，4 ℃ 冷藏直至降温处理。根据槲栎的分布范围，参考栓皮栎、蒙古栎（*Q. mongolica*）、麻栎（*Q. acutissima*）等落叶栎类可耐受的极端低温，采用程控降温仪设置 8 个温度梯度：4 ℃（对照）、−5、−10、−15、−20、−30、−40、−50 ℃。每个温度梯度每个重复取 8 个小茎段，降温速率为 5 ℃/h。每降到一个梯度温度值时，保持 30 min，然后将该温度下的样品与试管一同取出置于 4 ℃ 冰箱中缓慢解冻 24 h（−30 ~ −50 ℃ 冷冻的样品先在−20 ℃ 冰箱中解冻，然后再转移到 4 ℃ 完成解冻），其余样品继续降温，直至所有样品达到预设温度处理[25]。整个冻融过程避光进行。解冻后，每个试管中加入 10 mL 去离子水，振荡 24 h 使样品细胞内电解质释放稳定，用电导仪（DDS-307A，上海精密科学仪器有限公司）测定初电导值（E_{C1}），然后将样品在 100 ℃ 水浴 20 min 释放剩余电解质，再次振荡 24 h 后测定终电导值（E_{C2}）。相对电导率（freeze-induced electrolyte leakage，FIEL），即冷冻处理后的苗木茎尖细胞渗透电解质的初电导值与组织细胞中电解质完全释放后的终电导值之比[26]，计算公式如下。

$$\mathrm{FIEL} = (E_{C1} - B_1)/(E_{C2} - B_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中：B_1 与 B_2 分别为空白对照（蒸馏水）的初电导值和终电导值。

对不同温度下两个槲栎品种的相对电导率进行 Logistic 拟合，计算出两品种的半致死温度（LT_{50}）[27]，拟合方程为

$$Y = k/(1 + a\mathrm{e}^{-bx}) \quad (2)$$

$$\mathrm{LT}_{50} = -\ln a/b \quad (3)$$

式中：Y 为相对电导率；k 为常数，代表电解质渗出的最大量；e 为自然底数；a、b 均为方程参数；x 为处理温度；LT_{50} 为曲线的拐点温度。

1.2.2　槲栎枝条与芽花青苷含量测定

按照文献所述方法[12]，从槲栎枝条和芽中提取并测定花青苷含量。取 2023 年 11 月 19 日、12 月 5 日、12 月 19 日两槲栎品种的枝条和芽样品，将其研磨成粉末，每个重复取 0.1 ~ 0.2 g 样品加入含有 2 mL 1%（*v*/*v*）盐酸−甲醇溶液的离心管中。混合后，将样品置于 4 ℃ 黑暗环境中 24 h，以便进一步提取。随后，将混合物在 4 ℃ 下离心（12 000 r/min，15 min），离心后将上清液吸出，加入等体积 1%（*v*/*v*）盐酸−甲醇溶液稀释，颠倒混匀后，使用 Cary 300 UV-Vis 分光光度计（Agilent Technologies，Santa Clara，CA，USA）在 530 nm 和 657 nm 处测量上清液的吸光度。总花青苷含量（Q_{ta}）以每克鲜质量（F_W）样品中的吸光度值表示，计算如下。

$$Q_{ta} = (A_{530} - 0.25A_{657})/F_W \quad (4)$$

式中：A_{530}、A_{657} 分别为样品在 530 nm 和 657 nm 波

长处的吸光度；F_W 为样品鲜质量(g)。

1.2.3 槲栎枝条单宁含量测定

取 2023 年 11 月 19 日、12 月 05 日、12 月 19 日两槲栎品种的枝条和芽样品，采用课题组前期优化方法测定单宁含量[24]。首先，用福林酚法测定总酚含量：采用 60% 乙醇提取总酚，将 1 mL 总酚提取物与 2 mL 25% 福林酚试剂混合，避光反应 5 min 后，加入 7 mL 10% Na_2CO_3，室温避光反应 30 min 后，以没食子酸为标准，在 765 nm 处测定吸光度。用聚乙烯聚吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone，PVPP)吸附单宁化合物，通过测定沉淀和离心后的上清液得到非单宁酚类物质含量。采用已有研究[28]的香草醛−盐酸法测定 CT 含量：将 1 mL 总酚提取物与 3 mL 浓盐酸(36% ~ 38%)和 6 mL 4% 的香草醛−甲醇溶液混合，避光反应 15 min，以儿茶素为标准，在 500 nm 处测定吸光度。水解单宁(HT)含量由总酚含量减去非单宁酚含量和 CT 含量计算得到。

1.3 统计分析

采用 SPSS 24.0 进行数据处理。采用独立样本 *t* 检验分析品种间的抗寒性差异，采用 Mann-Whitney U 检验非正态分布的数据；采用单因素方差法(one-way ANOVA)及 Duncan 多重比较法分析不同处理间花青苷和单宁含量。所有数据均以平均值 ± 标准差(SD)表示。采用 GraphPad Prism 8 和 Adobe Illustrator 2022 进行图片绘制与处理。

2 结果与分析

2.1 槲栎枝条抗寒性测定

12 月 19 日、1 月 5 日采集的两槲栎品种枝条的相对电导率变化趋势一致(图 1) FIEL 在温度高于 −30 ℃ 时变化平缓，在低于−30 ℃ 时随温度降低而急剧增大，表明枝条在低于−30 ℃ 时细胞膜通透性急剧升高，细胞结构受损加剧。温度 ⩾ −40 ℃ 时，两品种枝条的相对电导率差异显著；当处理温度降低到−50 ℃ 时，二者不存在显著差异，表明此时两品种枝条的细胞膜受损程度相当。

对低温胁迫下两槲栎品种的相对电导率进行 Logistic 方程的拟合(表 1)，在低温胁迫处理下，两槲栎品种的相对电导率和温度之间的关系可以用公式(2)和公式(3)拟合，R^2 为 0.887 ~ 0.943，表明温度和相对电导率之间存在较强的 Logistic 模型拟合关系，拟合结果可靠。12 月 19 日，‘秋韵’和‘金榜题名’的 LT_{50} 分别为−47.9 和−53.2 ℃，1 月 5 日时分别为−47.8 和−48.4 ℃，与两品种相对电导率差异分析相符。从 LT_{50} 的大小可知，‘金榜题名’抗寒性略高于‘秋韵’。

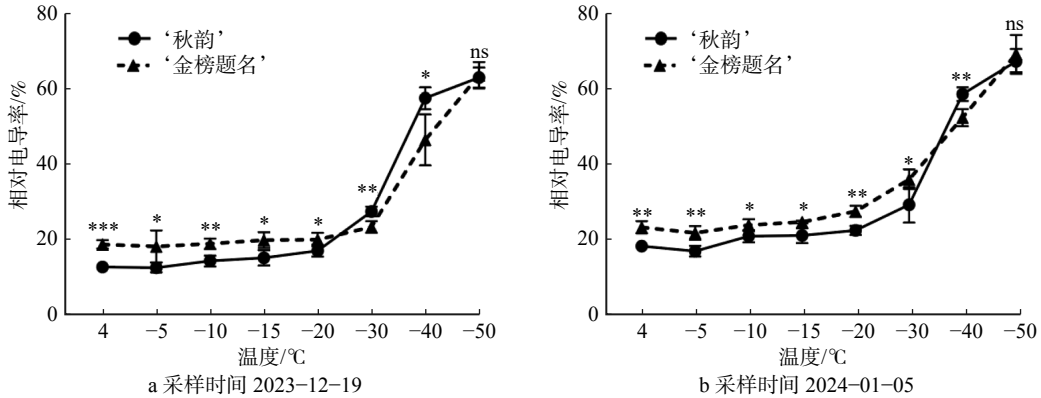
2.2 槲栎枝条与芽花青苷含量

不同时期两槲栎品种枝条和芽的花青苷含量如图 2 所示。槲栎枝条中的花青苷含量随外界环境温度下降而升高，在 12 月 19 日达到最高，且‘秋韵’始终高于‘金榜题名’。11 月 19 日和 12 月 5 日时，两品种的花青苷含量无显著差异，12 月 19 日时‘秋韵’的花青苷含量平均值达到 4.25 μg/g，显著高于‘金榜题名’。

芽中的花青苷含量随外界环境温度下降而降低，在 12 月 19 日达到最低。‘秋韵’的花青苷含量在 11 月 19 日时显著低于‘金榜题名’($P < 0.05$)；12 月 5 日时二者无显著差异；12 月 19 日，‘秋韵’均值达到 1.31 μg/g，显著高于‘金榜题名’($P < 0.05$)。

2.3 槲栎枝条单宁含量与组成

不同时期两槲栎品种单宁含量如图 3 所示。‘秋韵’枝条在 3 个时期的总单宁含量平均值分别为 20.63、15.83 和 23.12 mg/g，分别占同时期总酚含量的 91.43%、90.31% 和 92.45%；‘金榜题名’在 3 个时期的总单宁含量平均值分别为 24.17、16.72 和 21.73 mg/g，分别占同时期总酚含量的 90.17%、90.19% 和



*表示$P < 0.05$；**表示$P < 0.01$；***表示$P < 0.001$；ns表示$P > 0.05$。

图 1 不同低温胁迫对两槲栎品种相对电导率的影响

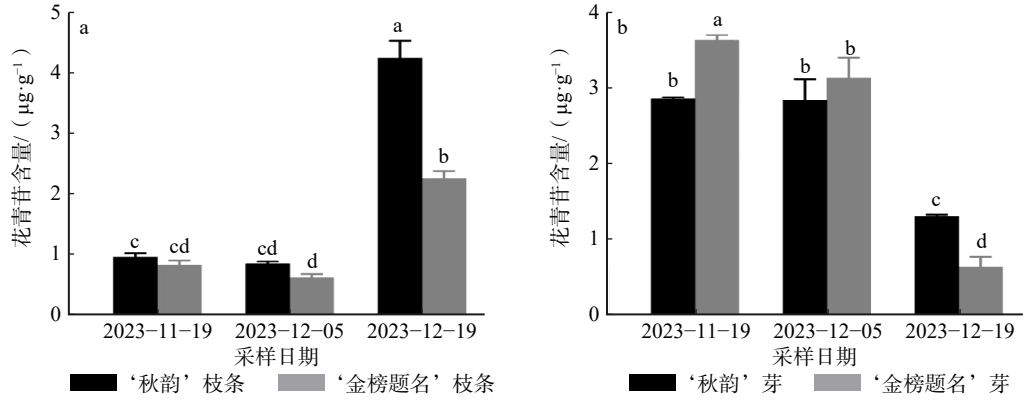
Fig. 1 Effects of different low temperature stress on the relative conductivity of two cultivars of *Q. aliena*

表 1　低温胁迫下两槲栎品种的 LT_{50} 及拟合方程

Tab. 1　LT_{50} and fitting equations of two cultivars of *Q. aliena* under low-temperature stress

品种	采样日期	拟合方程	R^2	t/℃
‘秋韵’	2023−12−19	$Y = 125/(1 + 14.641e^{-0.056x})$	0.942	−47.9
‘金榜题名’	2023−12−19	$Y = 125/(1 + 9.843e^{-0.043x})$	0.887	−53.2
‘秋韵’	2024−01−05	$Y = 125/(1 + 9.436e^{-0.047x})$	0.926	−47.8
‘金榜题名’	2024−01−05	$Y = 125/(1 + 6.600e^{-0.039x})$	0.943	−48.4

注：t为半致死温度（LT_{50}）。



不同字母表示组间存在显著性差异（$P < 0.05$）。下同。

图 2　不同时期下两槲栎品种枝条和芽的花青苷含量

Fig. 2　Anthocyanin contents in shoots and buds of two cultivars of *Q. aliena* at different periods

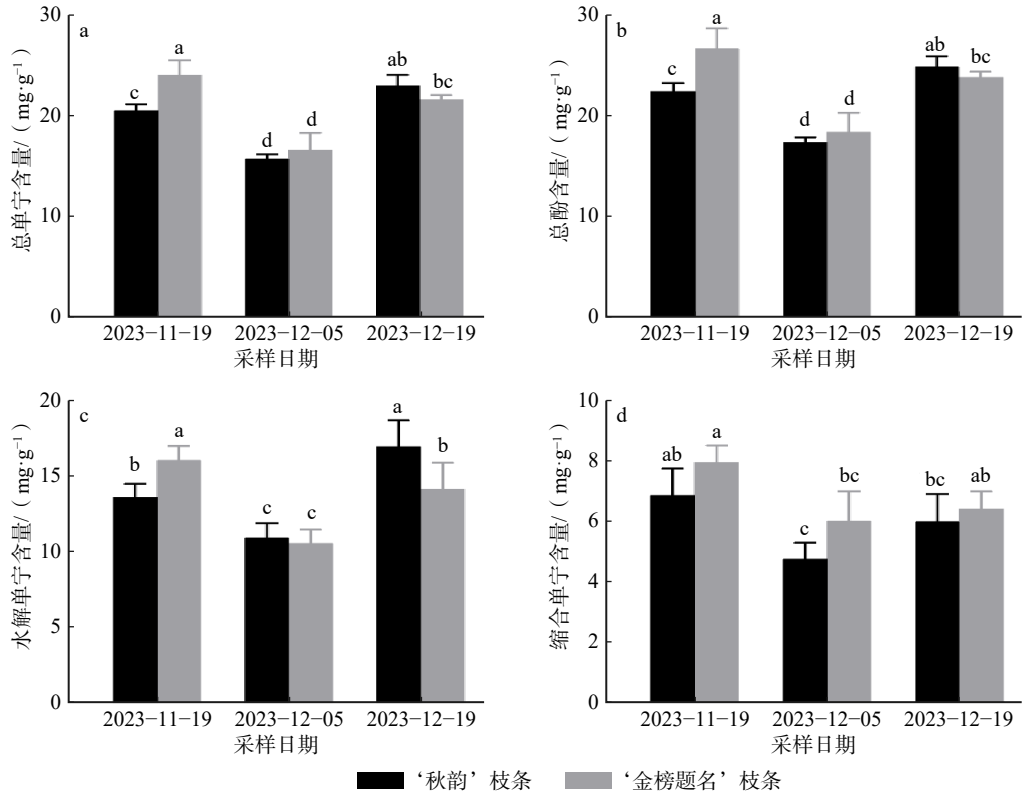


图 3　不同时期下两槲栎品种单宁含量

Fig. 3　Tannin content of two cultivars of *Q. aliena* in different periods

90.67%。冬季槲栎休眠枝条内酚类物质主要为单宁，且不同品种槲栎的总单宁含量差异较小，均为 15 ~ 25 mg/g。总酚和总单宁的变化趋势相似，均为先降低后升高，同一品种 3 个时期差异明显；二者的显著性表现也相同，只有 11 月 19 日时两品种差异显著。‘金榜题名’的总单宁和总酚含量显著高于‘秋韵’。

‘秋韵’枝条在 3 个时期的水解单宁(HT)平均值分别为 13.75、11.05 和 17.11 mg/g，占同时期总单宁含量的 66.65%、69.84% 和 74.01%；而‘金榜题名’在 3 个时期的 HT 分别占总单宁含量的 67.04%、63.92% 和 65.71%。HT 是槲栎休眠枝条的主要单宁成分。同一品种 HT 随外界温度降低呈先降后升的趋势，11 月 19 日，‘金榜题名’枝条内 HT 含量达到 16.21 mg/g，显著高于‘秋韵’。对于缩合单宁(CT)，同一时期两个品种间差异均不显著。‘秋韵’休眠枝条在 3 个时期的 CT 平均值分别为 6.88、4.77 和 6.01 mg/g，‘金榜题名’平均值分别为 7.97、6.03 和 7.45 mg/g。

3 讨 论

3.1 槲栎抗寒性评价以及品种间差异

在植物抗寒性研究中，电导率法配合 Logistic 方程求拐点温度可以比较准确地估算出植物的 LT_{50}，在多种植物上已有应用[29]，被认为是测定植物抗寒性最简单常用的方法[30]，在栎属抗寒性研究中也有较多应用[4-5]。LT_{50} 表示植物抗寒能力的极限，值越低，植物抗寒性越强[31]。本研究应用电导率法配合 Logistic 方程发现，槲栎具有较强的抗寒性，两槲栎品种在 12 月份的 LT_{50} 均在−47 ℃ 以下，枝条的相对电导率随温度降低呈现增加的趋势，与低温胁迫下夏栎的细胞膜通透性表现一致[4]。张臣[32]对蓝莓(*Vaccinium* spp.)休眠期枝条进行研究发现，自然休眠解除时，与抗寒性正相关的脯氨酸和 ABA 含量达到峰值，此时枝条抗寒性最强。课题组前期研究发现槲栎休眠解除日期为 12 月 19 日前后，故本研究选取 12 月 19 日后槲栎解除休眠时进行抗寒性测定。姜恒等[4]通过拟合 Logistic 方程计算了普通夏栎、速生夏栎、裂叶夏栎和垂枝夏栎的半致死温度，表明 4 种夏栎的 LT_{50} 为−41.9 ~ −38.2 ℃；杨振亚等[5]以休眠枝为材料研究了 4 个引种栎类的抗寒性，得出沼生栎、娜塔栎、双色栎和舒玛栎的 LT_{50} 分别为 −28.42、−25.11、−24.78 和−22.42 ℃。本研究的结果表明，槲栎具有较强的抗寒能力，强于夏栎等 5 种引种栎类，这与其广泛分布于辽宁、河北、北京等省份的现象相符[1]。槲栎的自然分布区包括中国、日本、朝鲜等国家，范围约从 23°N ~ 40°N，北界辽宁东南部最冷月平均温度在−10 ~ −20 ℃ 之间，极端低温可达−30 ℃，相对电导率变化也表明枝条在低于−30 ℃ 时细胞膜通透性明显升高，受损更严重。本研究得到的两品种槲栎 LT_{50} 均在−47 ℃ 以下，为槲栎向北方引种奠定了理论基础，但实际推广还需通过后续的引种试验和地区实际情况判断。在品种间差异上，温度低于−30 ℃ 时两品种的细胞膜通透性均明显增大，但‘秋韵’细胞膜受到的结构损伤程度大于‘金榜题名’，结合 LT_{50} 的大小可知，‘金榜题名’抗寒性略强于‘秋韵’。

3.2 槲栎抗寒性与花青苷及水解单宁关系

在自然界中，秋季低温诱导树木花青苷积累可以提高植物休眠时的低温抗性[33]。苹果(*Malus pumila*)抗寒性与花青苷含量关系的研究结果表明，抗寒性强的品种枝条中花青苷含量更高[34]。然而，在本研究检测的两个槲栎品种中，尽管同时期‘秋韵’枝、芽内的花青苷含量均高于‘金榜题名’，但其枝条的抗寒性略低于‘金榜题名’。原因在于，植物体内花青苷含量变化可能是对外界环境变化的一种响应，抗寒性低的槲栎品种受到低温胁迫后，枝条内花青苷含量增加，以减少低温胁迫伤害。

本研究首次发现 HT 可能在提高植物抗寒性中扮演重要角色。单宁的抗氧化能力与其酚羟基个数有关，酚羟基越多的单宁对自由基的抑制作用越强，抗氧化能力也越强[35]。Gu 等[36]从柿子(*Diospyros kaki*)果肉中提取出高分子量 CT，测定其羟自由基的清除活性和超氧阴离子清除活性，发现高分子量 CT 在柿子中起到抗氧化剂的作用。HT 的酚羟基个数多于 CT，本研究证实槲栎枝条进入休眠期时，两槲栎品种枝条内的 HT 与抗寒性表型相符，HT 可能帮助槲栎枝条抵御外界低温，这一发现在栎树中是否具有普适性还需进一步研究。

需要说明的是，1 月初时可供采集的槲栎枝条数量较少，因此未测定该时期花青苷和 HT 含量，后续研究可以继续探究休眠期槲栎的物候特性，进一步验证槲栎体内 HT 与抗寒性的关系，为槲栎育种与栽培提供参考。

4 结 论

本研究首次评价了乡土栎树槲栎的离体枝条抗寒性，结果表明槲栎具有较强的抗寒性，两槲栎品种冬季枝条的 LT_{50} 均可达到−47 ℃，‘金榜题名’的抗寒性略强于‘秋韵’，花青苷含量高的槲栎品种，抗寒性不一定强。槲栎休眠枝条内单宁主要为 HT，槲栎体内高含量的 HT 可能在提高槲栎枝条抗寒性中发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第二十二卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 230−231.
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China: Volume 22 [M]. Beijing: Science Press, 1998: 230−231.

[2] 国家林业和草原局. 主要栽培珍贵树种参考名录 (2022 年)[Z]. 2022.
National Forestry and Grassland Administration. Reference list of major cultivated precious tree species (2022)[Z]. 2022.

[3] Fan Y, Miguez-Macho G, Jobbágy E G, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(40): 10572−10577.

[4] 姜恒, 张志刚, 杨建军, 等. 4 种夏栎对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2024, 44(4): 406−413.
Jiang H, Zhang Z G, Yang J J, et al. Physiological response and cold resistance evaluation of four species of *Quercus robur* to low temperature stress [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 406−413.

[5] 杨振亚, 台秀国, 曹振玉, 等. 4 个引种栎类树种苗期抗寒性初步研究 [J]. 山东大学学报 (理学版), 2016, 51(5): 43−47,60.
Yang Z Y, Tai X G, Cao Z Y, et al. A preliminary study on cold resistance of four introduced oaks seedlings [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2016, 51(5): 43−47,60.

[6] 赵雪辉, 陈双建, 成继东, 等. 3 个桃品种抗寒性分析研究 [J]. 果树资源学报, 2020, 1(6): 14−19.
Zhao X H, Chen S J, Cheng J D, et al. Analysis of cold resistance on three peach cultivars [J]. Journal of Fruit Resources, 2020, 1(6): 14−19.

[7] Liu Y, Tikunov Y, Schouten R E, et al. Anthocyanin biosynthesis and degradation mechanisms in *Solanaceous* vegetables: a review [J]. Frontiers in Chemistry, 2018, 6: 52.

[8] Mckown R, Kuroki G, Warren G. Cold responses of *Arabidopsis* mutants impaired in freezing tolerance [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(12): 1919−1925.

[9] Hernández F, Melgarejo P, Tomás-Barberán F A, et al. Evolution of juice anthocyanins during ripening of new selected pomegranate (*Punica granatum*) clones [J]. European Food Research and Technology, 1999, 210(1): 39−42.

[10] Sivankalyani V, Feygenberg O, Diskin S, et al. Increased anthocyanin and flavonoids in mango fruit peel are associated with cold and pathogen resistance [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 132−139.

[11] Leng P, Qi J X. Effect of anthocyanin on David peach (*Prunus davidiana* Franch) under low temperature stress [J]. Scientia Horticulturae, 2003, 97(1): 27−39.

[12] Yang X, Yang N, Zhang Q, et al. Anthocyanin biosynthesis associated with natural variation in autumn leaf coloration in *Quercus aliena* accessions [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(20): 12179.

[13] 石蕾, 严善春, 金虎. 杂种落叶松子代针叶内单宁质量分数及防御性酶活性的变化 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 100−105.
Shi L, Yan S C, Jin H. Changes of tannin and defensive enzymes in filial generations of hybrid larch needles [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(1): 100−105.

[14] Xie P, Shi J Y, Tang S Y, et al. Control of bird feeding behavior by *Tannin1* through modulating the biosynthesis of polyphenols and fatty acid-derived volatiles in sorghum [J]. Molecular Plant, 2019, 12(10): 1315−1324.

[15] Niemetz R, Gross G G. Enzymology of gallotannin and ellagitannin biosynthesis [J]. Phytochemistry, 2005, 66(17): 2001−2011.

[16] Sharma A, Shahzad B, Rehman A, et al. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress [J]. Molecules, 2019, 24(13): 2452.

[17] Jan N, Majeed U, Andrabi K I, et al. Cold stress modulates osmolytes and antioxidant system in *Calendula officinalis* [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(4): 73.

[18] Jakovljević D, Momcilović J, Bojović B, et al. The short-term metabolic modulation of basil (*Ocimum basilicum* L. cv. 'Genovese') after exposure to cold or heat [J]. Plants, 2021, 10(3): 590.

[19] Dong H, Wu C, Luo C G, et al. Overexpression of *MdCPK1a* gene, a calcium dependent protein kinase in apple, increase tobacco cold tolerance via scavenging ROS accumulation [J]. PLoS ONE, 2020, 15(11): e0242139.

[20] Cotelle N. Role of flavonoids in oxidative stress [J]. Current Topics in Medicinal Chemistry, 2001, 1(6): 569−590.

[21] Huang D S, Li C, Chen Q, et al. Identification of polyphenols from *Rosa roxburghii* Tratt pomace and evaluation of *in vitro* and *in vivo* antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131922.

[22] Solecka D, Boudet A, Kacperska A. Phenylpropanoid and anthocyanin changes in low-temperature treated winter oilseed rape leaves [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1999, 37(6): 491−496.

[23] Yang X, Zhang Q, Yang N, et al. Traits variation of acorns and cupules during maturation process in *Quercus variabilis* and *Quercus aliena* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 196: 531−541.

[24] Yang Q S, Chen X N, Li J J, et al. HB26, a member of HD-Zip I subfamily, is involved in the regulation of hydrolysable tannin biosynthesis in the cupules of *Quercus variabilis* by transactivation of *UGT84A13* [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 200: 116866.

[25] Pietsch G M, Anderson N O, Li P H. Cold tolerance and short day acclimation in perennial *Gaura coccinea* and *G. drummondii* [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120(3): 418−425.

[26] Bigras F J, Ryyppö A, Lindström A, et al. Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifer seedlings[M]//Bigras F J, Colombo S J. Conifer Cold Hardiness. Dordrecht: Springer, 2001: 57-88.

[27] 刘晓东, 任伟嘉, 何淼. 苦水玫瑰和冷香玫瑰抗寒性 [J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 28−30,34.
Liu X D, Ren W J, He M. Cold resistance of *Rosa rugosa* 'kushui' and *Rosa rugosa* 'lengxiang' [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(11): 28−30,34.

［28］ 尹艺凝, 张文辉, 何景峰, 等. 四种类型栓皮栎栲胶含量 [J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2954−2962.
Yin Y N, Zhang W H, He J F, et al. The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2954−2962.

［29］ 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究 [J]. 南京农业大学学报, 1986, 9(3): 11−16.
Zhu G H, Liu Z Q, Zhu P R. A study on determination of lethal temperature with logistic function [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1986, 9(3): 11−16.

［30］ 李文明, 辛建攀, 魏驰宇, 等. 植物抗寒性研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 6−11.
Li W M, Xin J P, Wei C Y, et al. Progress in the study of plant cold resistance [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 6−11.

［31］ 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.
Wang Z Y, Tian Q H, Chang R F, et al. Physiological response and evaluation of different peach varieties under low temperature stress [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(2): 66−77.

［32］ 张臣. 几个蓝莓品种休眠期抗寒性的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
Zhang C. Study on cold resistance of several blueberry varieties during dormancy[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.

［33］ 付全娟, 魏国芹, 孙杨, 等. 花青苷在果树抗逆中的作用研究进展 [J]. 落叶果树, 2015, 47(6): 21−24.
Fu Q J, Wei G Q, Sun Y, et al. Research progress on the role of anthocyanins in stress resistance of fruit trees [J]. Deciduous Fruits, 2015, 47(6): 21−24.

［34］ 刘国君, 仵春涛, 徐斌. 小苹果休眠期枝条花青素和叶绿素的含量变化与抗寒关系 [J]. 北方园艺, 2002(5): 58−59.
Liu G J, Wu C T, Xu B. Relationship between the changes of anthocyanin and chlorophyll contents in branches of small apples during dormancy and cold resistance [J]. Northern Horticulture, 2002(5): 58−59.

［35］ Sieniawska E. Activities of tannins - from *in vitro* studies to clinical trials [J]. Natural Product Communications, 2015, 10(11): 1877−1884.

［36］ Gu H F, Li C M, Xu Y J, et al. Structural features and antioxidant activity of tannin from persimmon pulp [J]. Food Research International, 2008, 41(2): 208−217.

（责任编辑 赵田芸 孟 瑶
责任编委 马履一）