

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.003

论文标题： 亚低温冷冻对蒙古栎和麻栎种子生活力及生理特性的影响

作　　者： 魏 俊，周永红，曲悦慈，等

收稿日期： 2025-05-16

引文格式： 魏俊,周永红,曲悦慈,等.亚低温冷冻对蒙古栎和麻栎种子生活力及生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):22-28.

WEI J, ZHOU Y H, QU Y C, et al. Effect of subzero temperature on seed viability and physiological characteristics of *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):22-28.

相关论文推荐

Recommended articles

蒙古栎种子贮藏过程内源激素变化及显微结构特征

Changes in endogenous hormone content and cellular structure during seed storage of *Quercus mongolica*

不同贮藏条件对秤锤树种子生理生化及活力的影响

The effect of different storage conditions on physiology biochemistry and vigor of the *Sinojackia xylocarpa* seeds

低温层积过程中野鸦椿种子生理生化变化的研究

Biochemical and physiological changes of *Euscaphis japonica* seeds during the period of stratification

毛竹种子发育过程中形态和生理特性变化

Changes in morphological and physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* seeds during development

榧树的花粉活力检测及短期贮藏条件

Studies on pollen vitality detection and short-term storage conditions of *Torreya grandis*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.003 http: //qks.csuft.edu.cn

亚低温冷冻对蒙古栎和麻栎种子生活力及生理特性的影响

魏 俊[1,2]，周永红[1]，曲悦慈[1]，杨小欢[1]，艾万峰[1,2]，王俊男[3]，陆秀君[1,2]

（1. 沈阳农业大学 林学院，辽宁 沈阳 110866；2. 辽宁省森林培育重点实验室，辽宁 沈阳 110866；
3. 彰武县国有胜利林场，辽宁 阜新 123216）

摘 要：【目的】探究蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异及其潜在生理机制，为栎树种子有效贮藏提供理论参考。【方法】以新收获 1 周内的蒙古栎与麻栎种子为研究对象，模拟自然环境条件开展试验，将成熟种子依次置于 0、−2、−4、−5、−6、−8、−10、−12、−14 ℃的亚低温梯度环境中进行冻藏，每个温度梯度下的处理时长均为 7 d。定期取样并检测种子发芽率，比较蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异，探究小分子糖、可溶性蛋白、淀粉等内含物含量的变化。将种子置于 −3 ℃条件下贮藏 1 a 后，检测种子贮藏前后的生活力相关指标，探究亚低温贮藏策略。【结果】1）蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异显著。随着冻藏温度的降低，蒙古栎与麻栎种子生活力先保持平缓而后快速下降，蒙古栎种子可耐受约 −8 ℃低温，而麻栎种子最低耐受温度约为 −5 ℃，随着贮藏温度的进一步降低，种子生活力急剧下降。2）果糖、葡萄糖、蔗糖等小分子糖含量随贮藏温度的降低而积累，但棉子糖、水苏糖、乳糖、半乳糖、木糖、核糖和鼠李糖未检出或痕量存在。3）蒙古栎与麻栎种子可溶性蛋白于 −2 ℃贮藏时含量最高，淀粉含量随贮藏温度的降低而降低，丙二醛含量则随温度的降低而升高。4）蒙古栎与麻栎种子于 −3 ℃冻藏 1 a 后，种子相对发芽率仍可达 93.6% 以上，保持较高生活力。【结论】蒙古栎种子低温耐受性强于麻栎种子，可溶性蛋白、淀粉、蔗糖在低温耐受调控中发挥重要作用，棉子糖、水苏糖等非还原性糖的缺失可能是导致蒙古栎与麻栎种子表现出顽拗型特征的主要原因之一。蒙古栎与麻栎种子在亚低温 −3 ℃保持高生活力，表明顽拗型种子采用亚低温冻藏是可行的。

关键词：蒙古栎；麻栎；顽拗型种子；低温耐受性；亚低温贮藏；小分子糖

中图分类号：S722.1+7；S792.18 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)05-0022-07

Effect of subzero temperature on seed viability and physiological characteristics of *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima*

WEI Jun[1,2], ZHOU Yonghong[1], QU Yueci[1], YANG Xiaohuan[1], AI Wanfeng[1,2], WANG Junnan[3], LU Xiujun[1,2]

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China;
2. Key laboratory for Silviculture of Liaoning Province, Shenyang 110866, Liaoning, China;
3. Shengli State Forest Farm, Zhangwu Country, Fuxin 123216, Liaoning, China)

Abstract:【Objective】To investigate the differential low-temperature tolerance and the the underlying physiological mechanisms between *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds, and to provide theoretical insights for improving oak seed storage.【Method】Freshly harvested *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds within one week were used as experimental materials. The experiment was conducted under simulated natural environmental conditions. After seed maturation, the seeds were stored sequentially at 0, -2, -4, -5, -6, -8, -10, -12, and -14 ℃ for cryopreservation, with each temperature gradient maintained for 7 days. Regular sampling was conducted to monitor germination percentage, comparing the seeds' low-temperature tolerance differences between the two oak species. Additionally, changes in the contents of small-molecule sugars, soluble proteins and starch were analyzed. The seeds were stored at -3 ℃ for one year, after which changes in seed viability indicators before and after storage were measured to investigate the subzero non-freezing storage strategy.【Result】The low-temperature tolerance of *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds differed significantly. As the temperature

收稿日期（Received）：2025-05-16 **修订日期**（Revised）：2025-08-24

基金项目：辽宁省自然科学基金项目（2024-BSLH-281）。

第一作者：魏俊（junwei@syau.edu.cn），讲师，博士。 **通信作者：**陆秀君（lxjsyau@syau.edu.cn），教授，博士。

引文格式：魏俊 , 周永红 , 曲悦慈 , 等 . 亚低温冷冻对蒙古栎和麻栎种子生活力及生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(5):22-28.

WEI J, ZHOU Y H, QU Y C, et al. Effect of subzero temperature on seed viability and physiological characteristics of *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):22-28.

* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。

Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

decreased, seed viability initially remained stable but then declined rapidly. *Q. mongolica* seeds could tolerate temperatures as low as approximately -8℃, whereas *Q. acutissima* seeds had a minimum tolerance threshold of around -5℃. Beyond these thresholds, seed viability sharply decreased. The contents of small-molecular sugars such as fructose, glucose, and sucrose were induced to accumulate with decreasing temperatures. However, raffinose, stachyose, lactose, galactose, xylose, ribose, and rhamnose were nearly undetectable. Soluble protein in both *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds peaked at -2℃, while starch gradually declined with lower temperatures. In contrast, malondialdehyde (MDA) levels increased as temperatures decreased. After one year of cryopreservation at -3℃, the seeds of both species maintained a high viability, with a relative germination rate still exceeding 93.6%.【Conclusion】The seeds of *Q. mongolica* exhibited stronger low-temperature tolerance than those of *Q. acutissima*. Soluble proteins, starch, and sucrose played crucial roles in regulating seeds' cold tolerance, while the absence of non-reducing sugars such as raffinose and stachyose may be one of the primary factors contributing to the recalcitrant nature of both oak species. Both *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds maintained high viability when stored at -3℃, demonstrating the feasibility of subzero non-freezing storage for recalcitrant seeds. These findings provide important insights for developing effective storage protocols for *Quercus* species with recalcitrant seeds.

Keywords: *Quercus mongolica*; *Quercus acutissima*; recalcitrant seed; cold-tolerance; subzero non-freezing storage; small-molecule sugars

低温与脱水耐受是种子的重要性状，直接影响种子生活力。为适应不同环境及气候类型，不同植物种子在长期进化过程中形成各自特有的耐受调控机制[1]。正常型种子在发育成熟过程中经历主动性脱水，可耐受低温胁迫并长期保持种子生活力。相反，顽拗型种子在发育成熟过程中未经过主动性脱水，低温条件下易丧失活力[2]。为减少因脱水或冷冻处理引起的生活力丧失，顽拗型种子通常具有体积大、贮藏寿命短、萌发速度快等特点[3]，如何有效维持种子生活力关乎顽拗型种子植物生存和农林业高效生产。

栎树大都为顽拗型种子植物[4]。蒙古栎 *Quercus mongolica*、麻栎 *Q. acutissima* 等是我国珍贵乡土栎属植物，抗逆性强，集“碳库”“水库”“粮库”“钱库”于一身，具有重要的生态价值和经济价值，开发利用前景广阔[5]。然而，由于蒙古栎、麻栎等顽拗型种子无法有效贮藏，结实又具有明显大小年现象[6]，且无性繁殖困难[7]，其良种选育落后，优质种质稀缺。因此，探究蒙古栎、麻栎等栎树种子低温耐受机制，提高种子贮藏性，是挖掘利用优质种质的重要基础。

有研究表明，超低温冻存是实现顽拗型种子植物种质资源长期有效保存的主要方式之一[8-9]。然而，受限于冷冻保护剂对组织的高渗透胁迫和化学伤害[10]，加之不同物种繁琐的预处理和解冻恢复程序[8,11]，顽拗型种子超低温贮藏仍局限于实验室研究，难以规模化应用于种子库。低温贮藏（0～4 ℃）虽能大大降低贮藏成本和简化贮藏程序，但因种子代谢活动未完全抑制，难以实现种子长期有效贮存[12]。相比之下，亚低温贮藏可能是一种行之有效的方法。已有研究表明，许多顽拗型种子对 0 ℃以下亚低温具有一定耐受性，如夏栎 *Q. robur* 种子在 −1 ℃条件下可贮藏 3 a 之久并保持较高生活力[13]；槲栎 *Q. aliena* 和枹栎 *Q. serrata* 种子在不低于 −8 ℃时生活力可得到较好维持[14]；川滇高山栎 *Q. aquifolioides* 种子在 −5 ℃条件下具有较好的萌发抑制性和生活力贮藏性[15]。然而，受限于普通冰箱在 0 ℃以下亚低温范围的控温精度，不同栎树种子低温耐受阈值和时长并不清楚。此外，不同栎树种子间低温耐受性存在显著差异，但其生理和遗传机制不清楚，这极大限制了顽拗型种子的高效保存和优质种质的挖掘。

本研究以北方珍贵乡土栎属植物蒙古栎和麻栎种子为研究对象，通过模拟自然越冬环境，采用亚低温逐级降温方式，定期检测种子生活力变化，探究蒙古栎和麻栎种子低温耐受阈值，揭示亚低温冷冻对种子生理代谢的影响，从而为蒙古栎、麻栎等种子亚低温贮藏和低温耐受调控提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蒙古栎与麻栎种子分别于 2023 年 10 月采自辽宁省沈阳市东陵公园（41°49′36″N，123°35′52″E）和大连旅顺（38°43′12″N，121°08′24″E）优良林分，在林下采集成熟种子（壳斗茶褐色），挑选无虫眼、饱满、大小色泽基本一致的种子作为后续试验材料。

1.2 研究方法

1.2.1 种子亚低温贮藏

种子采收后 1 周内使用 PE 自封袋密封，并冻存于北京福意联医疗设备有限公司生产的直流压缩机冰箱（FYL-YS-100LL）内，该冰箱温度可控范围为−15～10 ℃，且控温精度经实测为 ±0.8 ℃，基本满足试验需求。为模拟种子自然越冬环境，温度依次设置为 0、−2、−4、−5、−6、−8、−10、−12、−14 ℃。将种子置于各温度梯度下分别冻存 7 d，

冻存结束后测定种子生活力和相关生理指标。

1.2.2　种子生活力及亚低温耐受检测

由于蒙古栎与麻栎种子休眠程度较低，其种子生活力可直接通过种子发芽率反映。种子经不同亚低温冻存（每 7 d 调减一次温度）后，随机取出 25 ～ 30 粒蒙古栎与麻栎种子，于室温条件下放置在含有湿沙（含水量约 60%）的培养皿中进行萌发试验，光周期设置为 14 h 光照 /10 h 黑暗，光强 5 000 lx，每个样本 3 次重复。种子萌发以胚根突破种皮达种子总长 1/2 及以上为标准，每隔 7 d 记录 1 次发芽粒数，直至种子不再萌发。萌发期间适时补水，以种子不萌发或严重褐化作为生活力丧失的判断依据。统计初始对照（新收获 1 周内的未冷冻种子）及不同低温冻存后的种子发芽率，当种子发芽率降低至对照的 50% 时所在冻存温度视为最低耐受阈值。

1.2.3　蒙古栎与麻栎种子亚低温长期贮藏

新收获蒙古栎与麻栎种子经 PE 自封袋密封后贮藏于 −3 ℃（±0.8 ℃）冰箱中，冻存 1 a（2024 年 10 月）后测定种子发芽率，使用相对发芽率反映种子生活力保存情况。相对发芽率为冻存后种子发芽率与初始对照（新采收种子发芽率）的比值，萌发试验参照种子生活力的测定方法进行。

1.2.4　种子生理指标的测定

种子含水量的测定使用低温恒质量烘干法（105 ℃烘干过夜，直至种子质量不再下降），每个样本随机选取 15 粒左右种子进行试验，每个试验 3 次生物学重复。

生理指标的测定：随机选取约 30 粒种子，经液氮处理后，使用家用粉碎机打磨成粉末，迅速置于 −80 ℃冰箱中保存备用。种子可溶性糖和淀粉含量的测定采用蒽酮比色法，可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法，丙二醛（MDA）含量的测定采用硫代巴比妥酸法 [16]。各样品测定设置 3 次重复。小分子糖（鼠李糖、核糖、木糖、果糖、葡萄糖、半乳糖、蔗糖、乳糖、棉子糖、水苏糖）含量的测定采用高效液相色谱法，仪器使用 Agilent 1260 Infinity Ⅱ高效液相色谱仪。小分子糖的测定委托中国南京汉广生物科技有限公司进行。

1.2.5　数据处理

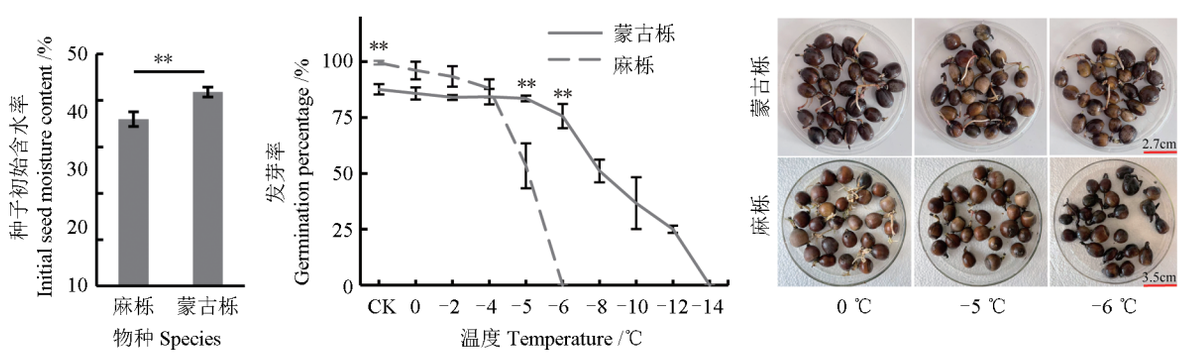
数据统计及图表绘制使用 Excel 2016 软件进行，样本间显著性差异使用 Mann-Whitney U 检验。

2　结果与分析

2.1　不同亚低温对蒙古栎与麻栎种子生活力的影响

种子低温耐受性与含水量密切相关，经检测，该批次蒙古栎和麻栎种子初始含水量分别为 41.8% 和 36.0%（图 1）。随着冻存温度的降低，蒙古栎与麻栎种子生活力先保持平缓后快速下降（图 1）。当冻存温度为 −4 ～ 0 ℃时，麻栎种子生活力保存较好，经 −4 ℃冻存后种子发芽率不低于 88.0%，但继续降低冻存温度后，其种子生活力快速下降。麻栎种子在 −5 ℃冻存后其生活力降至 53.3%，−6 ℃时生活力完全丧失（图 1）。蒙古栎种子在不低于 −6 ℃冻存时其生活力保存较好，相较新收获的种子（CK）未出现明显下降，随着温度的进一步降低，种子生活力快速下降。蒙古栎种子经 −8 ℃冻存 7 d 后发芽率降至 51.1%，−14 ℃时生活力完全丧失。蒙古栎与麻栎种子低温耐受阈值分别约为 −8 和 −5 ℃。

为验证蒙古栎与麻栎种子是否可以于 −4 ～ 0 ℃亚低温有效贮藏，分别将两者新收获的种子长期贮藏于 −3（±0.8）℃冰箱中，贮藏 12 个月后进行种



“*”, $P < 0.05$; “**”, $P < 0.01$.

图 1　种子初始含水量及不同亚低温对蒙古栎与麻栎种子生活力的影响

Fig. 1　*Q. mongolica* and *Q. acutissima* initial seed moisture content and the effect of different subzero temperatures on the seed viability

子萌发试验，测定种子发芽率。冻存后蒙古栎与麻栎种子发芽率分别为 82.0% 和 93.1%，相比初始对照发芽率（87.6% 和 99.5%），种子相对发芽率仍可达 93.6% 以上，种子生活力保存良好（图 2）。

2.2　不同亚低温下蒙古栎与麻栎种子生理响应

可溶性糖、可溶性蛋白、淀粉等是植物生理代谢中的重要物质，对植物生长发育和抗逆调控有密切影响。随着冻存温度的降低，蒙古栎和麻栎种子的可溶性糖含量保持相对稳定，当低于耐受阈值后开始下降（图 3）。冻存温度为 −5 和 −10 ℃时，麻栎和蒙古栎种子的可溶性糖含量最高，分别为 12.1 和 15.3 mg/g，与对照相比，蒙古栎增加了 2.5 mg/g，而麻栎增加不明显。当温度进一步降低时，可溶性糖含量开始下降，种子生活力丧失。蒙古栎与麻栎种子可溶性蛋白含量随冻存温度的降低先升高后缓慢下降（图 3），且蒙古栎种子可溶性蛋白含量要明显高于麻栎种子，两者于 −2 ℃冻存后含量最高，分别达 3.26 mg/g 和 2.47 mg/g。淀粉是种子主要储能物质，影响种子能量代谢。随着冻存温度的降低，蒙古栎与麻栎种子淀粉含量逐渐下降，且在不同冻存温度下，蒙古栎种子淀粉含量显著高于麻栎种子。与淀粉含量相反，随着冻存温度的逐渐降低，丙二醛含量在蒙古栎与麻栎种子中逐渐上升，最高分别达 4.38 mg/g 和 2.59 mg/g（图 3）。

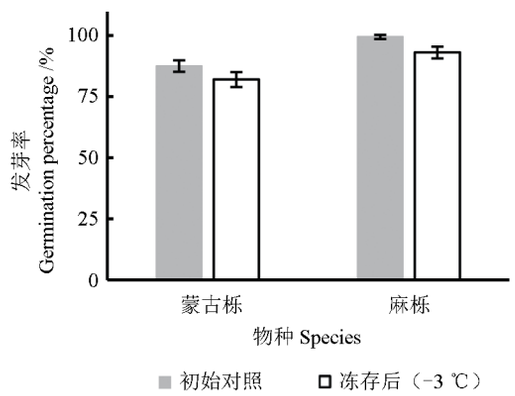
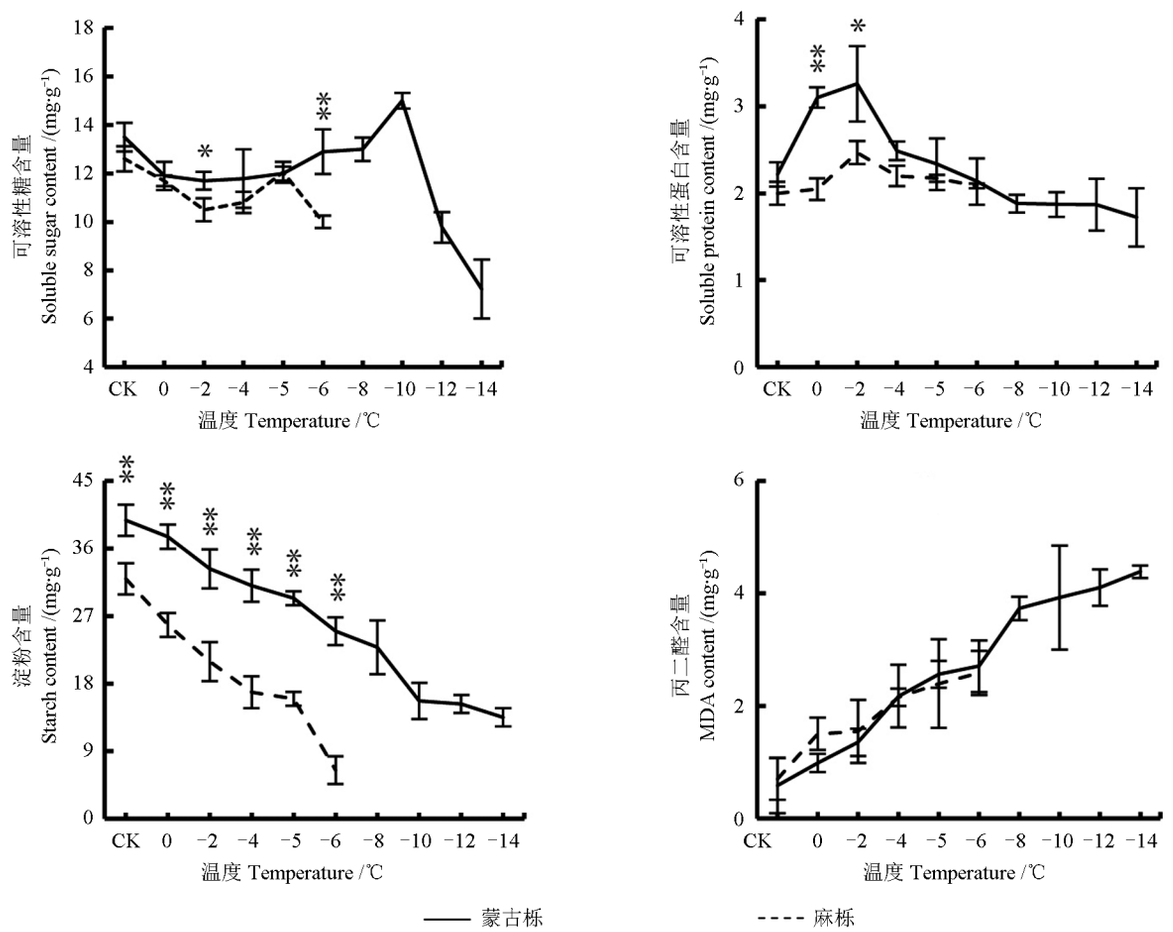


图 2　蒙古栎与麻栎种子经 −3 ℃冻存 12 个月前后生活力变化

Fig. 2　Pre- and post-cryopreservation seed viability of *Q. mongolica* and *Q. acutissima* at −3 ℃ for 12 months



*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

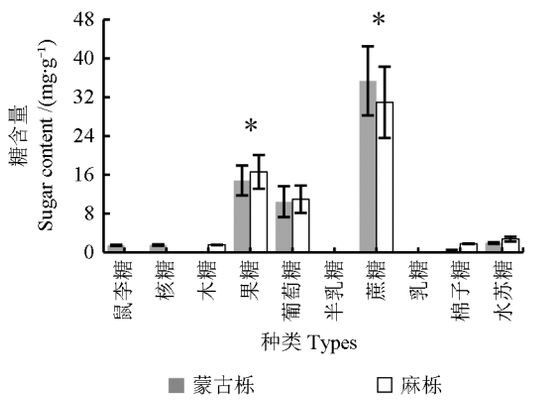
图 3　不同低温条件下蒙古栎和麻栎种子的可溶性糖、淀粉、蛋白、丙二醛含量

Fig. 3　Soluble sugar, starch, protein, and MDA content in *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds under different low temperatures

2.3　蒙古栎与麻栎种子小分子糖含量及其对亚低温的响应

小分子糖在植物抗逆调控中发挥重要作用。在蒙古栎和麻栎新收获种子中，小分子糖主要以还原性单糖果糖、葡萄糖，以及非还原性二糖蔗糖为主，含量为 10.5 ～ 35.4 mg/g（图 4）。其中，蔗糖含量最高，在蒙古栎和麻栎种子中分别达 35.39 mg/g 和 30.94 mg/g；其次为果糖，分别为 14.84 mg/g 和 16.63 mg/g。与蔗糖和果糖比较，葡萄糖含量较低，在蒙古栎与麻栎种子中分别为 10.47 mg/g 和 10.98 mg/g。此外，棉子糖、水苏糖、乳糖、半乳糖、木糖、核糖和鼠李糖等小分子糖含量极低，呈现未检出或痕量存在特征（图 4）。

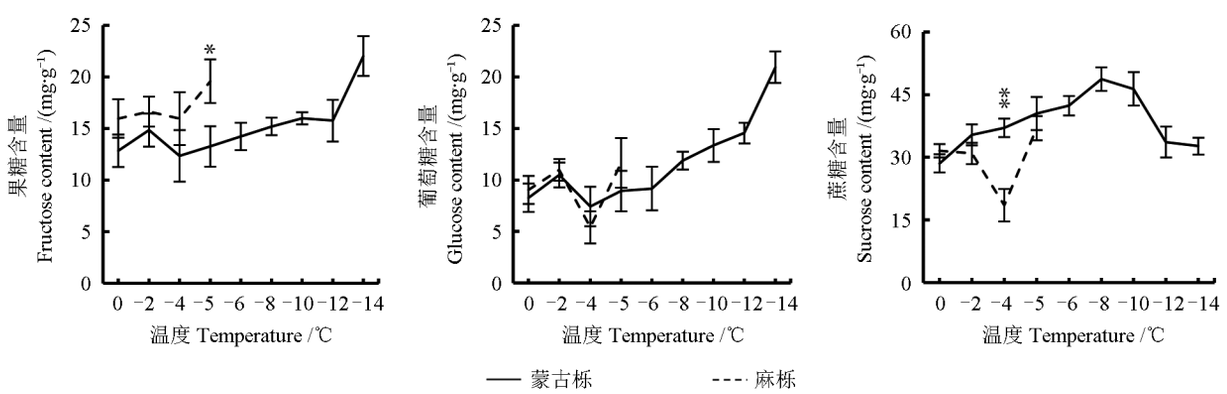
为进一步探究不同低温贮藏下小分子糖含量的变化，对不同温度冻存后种子小分子糖含量进行了检测，结果（图 5）表明，随着温度的降低，果糖与葡萄糖含量除在贮藏温度 −2 ℃降至 −4 ℃时下降外，其含量整体呈上升趋势。蒙古栎和麻栎种子在降温冷冻过程中，葡萄糖含量无明显差异，而果糖含量在 −5 ℃冻存后差异明显，其含量分别为 14.23 mg/g 和 18.86 mg/g。在蒙古栎种子中，蔗糖含量在冻存温度降至 −8 ℃前逐渐上升，随着温度继续降低，其含量快速下降；而麻栎种子则相反，蔗糖含量在 −4 ℃前逐渐下降，最低达 18.53 mg/g，随着温度的进一步降低，其含量增加，但仍低于蒙古栎。棉子糖、水苏糖、乳糖、半乳糖、木糖、核糖和鼠李糖等小分子糖在不同亚低温冻存下仍呈未检出信号。



*, $P < 0.05$.

图 4　蒙古栎与麻栎新收获种子小分子糖含量

Fig. 4　Content of small-molecule sugars in newly harvested seeds of *Q. mongolica* and *Q. acutissima*



*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

图 5　亚低温冷冻过程中蒙古栎与麻栎种子的果糖、葡萄糖、蔗糖含量

Fig. 5　Fructose, glucose, and sucrose content in *Q. mongolica* and *Q. acutissima* seeds during cryopreservation cooling

3　讨　论

3.1　蒙古栎和麻栎种子低温耐受性差异与其特异环境适应性的相关性

顽拗型种子低温耐受性与种子含水量密切相关，在安全含水量范围内，种子低温耐受性随含水量的降低而升高 [5,17]。本研究中，尽管蒙古栎种子初始含水量高于麻栎种子，但蒙古栎种子更耐低温。蒙古栎种子经 −6 ℃冻存后，种子生活力与对照相比仍保持在 86.3% 以上，当温度降至 −8 ℃时，种子生活力也仅降低至 58.3%。相反，麻栎种子经 −4 ℃冻存后，生活力开始快速下降，−6 ℃冻存后完全丧失。蒙古栎与麻栎种子的低温耐受性存在显著差异，这与二者长期适应不同气候分布区而形成的遗传特性有关。蒙古栎主要分布于我国东北、华北地区，最北可达俄罗斯远东地区，分布区气候寒冷，而麻栎主要分布在我国辽东半岛、山东及以南暖温带地区（https://www.plantplus.cn/cn），分布区气候相对温和。然而，两者低温耐受性差异的生理调控及遗传基础尚不明确。

3.2　小分子糖与种子低温耐受性的关系

小分子糖是植物适应逆境环境的重要调控物

质 [18-19]。在正常型种子中，低温耐受性与非还原性低聚糖、小分子抗氧化剂等密切相关 [20-21]。蔗糖、棉子糖和水苏糖等非还原性低聚糖可取代水分子，稳定细胞膜和蛋白酶等结构，是种子脱水干燥和冷冻耐受性形成的最重要策略之一 [20]。与之相反，还原性单糖与种子低温和脱水耐受性负相关 [20]。在正常型种子成熟后期，己糖（葡萄糖、果糖及其磷酸化衍生物）丰度逐渐减少，而非还原性低聚糖积累 [22]。由于多种小分子糖的保护以及细胞结构的物理及化学性质变化，正常型种子能够脱水干燥并耐受极低温度。相反，本研究中，蒙古栎和麻栎顽拗型种子以果糖、葡萄糖和蔗糖为主，棉子糖、水苏糖等非还原性糖含量极低，这可能是导致 2 种种子抗寒性存在显著差异的主要原因之一。

3.3　淀粉与可溶性蛋白在种子低温耐受调控中的作用

淀粉、可溶性蛋白等含量差异可能是造成蒙古栎与麻栎种子低温耐受性存在差异的主要原因。在亚低温梯度降温冷冻处理过程中，蒙古栎种子的淀粉、可溶性蛋白含量高于麻栎种子。可溶性蛋白在植物胁迫响应及自身代谢调控中均发挥重要作用，如脱水素、LEA（Late embryogenesis abundant）等小分子亲水蛋白在渗透调节中扮演着关键角色 [23]；逆境下，HSPs（Heat shock proteins）作为分子伴侣维持蛋白结构稳定 [24]。淀粉和可溶性糖的平衡参与植物耐冷调控。植物低温胁迫可诱导 *β*- 淀粉酶基因 *SlBAM3* 的表达，降解淀粉并增加可溶性糖的积累，从而提高植物低温耐受性 [25]。本研究中，蒙古栎和麻栎种子的淀粉含量均随冻存温度的降低呈下降趋势，可溶性蛋白含量在初始降温阶段略有升高，随后亦逐渐降低，且两者在蒙古栎与麻栎种子中差异明显。

3.4　蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异的冷冻生物学机理及其亚低温冻存的可行性

顽拗型种子成熟后含水量较高，休眠弱，贮藏性较差。低温冷冻虽能有效抑制顽拗型种子萌发，但低温环境易导致细胞内形成冰晶，进而造成细胞死亡 [26-27]。适宜低温对有效保存顽拗型种子十分重要。本研究中，在不低于 −4 ℃的亚低温范围内，蒙古栎与麻栎种子生活力均能得到良好保存，细胞未形成冰晶，这可能与细胞质浓度高、冰点降低密切相关 [28]。综合考虑小分子糖、淀粉以及可溶性蛋白含量等在蒙古栎与麻栎种子中的差异，推测蒙古栎种子细胞质浓度高于麻栎，冰点更低，但该观点需进一步试验验证。尽管蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异明显，但在亚低温 −3 ℃冻藏下均表现出较好的贮藏性，表明蒙古栎与麻栎等顽拗型种子亚低温贮藏具有可行性。然而，由于种子对贮藏温度的精确要求（既要尽可能抑制种子代谢，又不能使种胚细胞产生冰晶），且常规冷库和通用冰箱在亚低温范围内具有较大的温度波动，顽拗型种子亚低温贮藏对于常规冷库和通用冰箱仍不适用。

4　结　论

本研究针对北方珍贵乡土树种蒙古栎和麻栎，探究了不同亚低温冷冻对种子生活力和生理特性的影响。研究表明，蒙古栎种子相较麻栎种子更具低温耐受性，蒙古栎种子低温耐受阈值约为 −8 ℃，麻栎种子约为 −5 ℃，低于耐受阈值，种子生活力快速下降。蒙古栎与麻栎种子在 −3 ℃条件下表现出较好贮藏性，表明顽拗型种子亚低温贮藏具有可行性。蔗糖、淀粉、可溶性蛋白等在种子低温耐受调控中发挥重要作用，其中，淀粉含量差异可能是蒙古栎与麻栎种子低温耐受性差异的主要成因。

参考文献：

[1] DONOHUE K, DE CASAS R R, BURGHARDT L, et al. Germination, postgermination adaptation, and species ecological ranges[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2010,41:293-319.

[2] TRUSIAK M, PLITTA-MICHALAK B P, MICHALAK M. Choosing the right path for the successful storage of seeds[J]. Plants,2023,12:72.

[3] LAH N H C, EL ENSHASY H, MEDIANI A, et al. An insight into the behaviour of recalcitrant seeds by understanding their molecular changes upon desiccation and low temperature[J]. Agronomy,2023,13:2099.

[4] BALLESTEROS D, PRITCHARD H W. The cryobiotechnology of oaks: an integration of approaches for the long-term ex situ conservation of *Quercus* species[J]. Forests,2020,11:1281.

[5] 梁新茗 , 曲悦慈 , 梅梅 , 等 . 蒙古栎种子贮藏过程内源激素变化及显微结构特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(4):1-8.
LIANG X M, QU Y C, MEI M, et al. Changes in endogenous hormone content and cellular structure during seed storage of *Quercus mongolica*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(4):1-8.

[6] NUSSBAUMER A, GESSLER A, BENHAM S, et al. Contrasting resource dynamics in mast years for European beech and oak: a continental scale analysis[J]. Frontiers in Forests and Global Change,2021,4:689836.

[7] 钟明霞 , 艾万峰 , 袁欣 , 等 . 不同外源物质对蒙古栎插穗生根及基部生理生化的影响 [J]. 林业科学研究 ,2024,37(4):108-116.
ZHONG M X, AI W F, YUAN X, et al. Effects of different exogenous substances on rooting, basal physiology and biochemistry of *Quercus mongolica* cuttings[J]. Forest Research,2024,37(4):108-116.

[8] CHMIELARZ P, MICHALAK M, PAŁUCKA M, et al. Successful cryopreservation of *Quercus robur* plumules[J]. Plant Cell Reports,2011,30:1405-1414.

[9] 蒲籽言 , 胡继文 , 王军辉 , 等 . 林木超低温保存研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2024,37(5):22-29.
PU Z Y, HU J W, WANG J H, et al. Research progress in cryopreservation of forest trees[J]. World Forestry Research,2024,37(5):22-29.

[10] WHALEY D, DAMYAR K, WITEK R P, et al. Cryopreservation: an overview of principles and cell-specific considerations[J]. Cell Transplantation,2021,30:1-12.

[11] 冀智清 . 栓皮栎胚性组织低温保存及体胚遗传稳定性的研究 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2012.
JI Z Q. Cryopreservation of embryogenic tissues and genetic stability of somatic embryo in *Quercus variabilis*[D]. Yangling: Northwest A & F University,2012.

[12] 魏俊 , 梁新茗 , 曲悦慈 , 等 . 不同含水量蒙古栎种子贮藏过程生理生化特性研究 [J]. 沈阳农业大学学报 ,2023,54(5):547-554.
WEI J, LIANG X M, QU Y C, et al. Physiological and biochemical characteristics of seed storage of *Quercus mongolica* with different water content[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(5):547-554.

[13] SUSZKA B, TYIKOWSKI T. Storage of acorns of the English oak (*Quercus robur* L.) over 1-5 winters[J]. Arbor Kórnickie, 1980,25:199-229.

[14] 彭麟麟 . 栎属种子的低温耐受性和储藏寿命研究 [D]. 昆明 : 云南大学 ,2022.
PENG L L. Study on chilling resistance and storage life of oaks' seeds[D]. Kunming: Yunnan University,2022.

[15] 程晓彬 , 张旭 . 贮藏温度对川滇高山栎种子发芽及出苗的影响 [J]. 贵州农业科学 ,2015,43(1):129-131.
CHENG X B, ZHANG X. Effects of storage temperature on seed germination and emergence of *Quercus aquifolioides*[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2015,43(1):129-131.

[16] 王学奎 . 植物生理生化实验原理和技术 [M].2 版 . 北京 : 高等教育出版社 ,2006.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2006.

[17] 程继铭 , 闫兴富 . 辽东栎种子的顽拗性 : 脱水和低温敏感性 [J]. 广西植物 ,2019,39(12):1691-1701.
CHENG J M, YAN X F. Recalcitrance of *Quercus wutaishanica* seeds: sensitivity to desiccation and low temperature[J]. Guihaia, 2019,39(12):1691-1701.

[18] ROSA M, PRADO C, PODAZZA G, et al. Soluble sugars: metabolism, sensing and abiotic stress: a complex network in the life of plants[J]. Plant Signaling & Behavior,2009,4(5):388-393.

[19] DONG S Y, BECKLES D M. Dynamic changes in the starch-sugar interconversion within plant source and sink tissues promote a better abiotic stress response[J]. Journal of Plant Physiology, 2019,234-235:80-93.

[20] SMOLIKOVA G, LEONOVA T, VASHURINA N, et al. Desiccation tolerance as the basis of long-term seed viability[J]. International Journal of Molecular Sciences,2021,22:101.

[21] FERNANDES J S, FARIA J M R, HILHORST H W M, et al. Reinduction of desiccation tolerance in germinated millet (*Pennisetum glaucum* L.) seeds[J]. Tropical Plant Biology,2023, 16:208-223.

[22] BAUD S, DUBREUCQ B, MIQUEL M, et al. Storage reserve accumulation in *Arabidopsis*: metabolic and developmental control of seed filling[J]. The Arabidopsis Book,2008,6:e0113.

[23] AZARKOVICH M I. Dehydrins in orthodox and recalcitrant seeds[J]. Russian Journal of Plant Physiology,2020,67(2):221-230.

[24] KELLER A. A review on heat shock proteins (HSP70 and HSP90) in protein folding and stress response[J]. International Journal of Molecular Biology and Biochemistry,2025,7(1):57-62.

[25] FAN X L, LIN H R, DING F, et al. Jasmonates promote *β*-amylase-mediated starch degradation to confer cold tolerance in tomato plants[J]. Plants,2024,13:1055.

[26] DAN N, SHELAKE S, LUO W C, et al. Impact of controlled ice nucleation on intracellular dehydration, ice formation and their implications on T cell freeze-thaw viability[J]. International Journal of Pharmaceutics,2024,665:124694.

[27] NINAGAWA T, EGUCHI A, KAWAMURA Y, et al. A study on ice crystal formation behavior at intracellular freezing of plant cells using a high-speed camera[J]. Cryobiology,2016,73:20-29.

[28] PRICKETT R C, MARQUEZ-CURTIS L A, ELLIOTT J A W, et al. Effect of supercooling and cell volume on intracellular ice formation[J]. Cryobiology,2015,70:156-163.

[本文编校：谢荣秀]