



刘欢,徐金涛,高丽娟,李龙飞,冀明辉,姚悦,郝宝锋. 基于差热分析技术的112份梨种质资源抗寒性鉴定与评价[J]. 中国农业大学学报,2026,31(02):92-103.
LIU Huan, XU Jintao, GAO Lijuan, LI Longfei, JI Minghui, YAO Yue, HAO Baofeng. Identification and evaluation of 112 pear germplasm resources for cold resistance based on differential thermal analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 92-103.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.08

基于差热分析技术的112份梨种质资源抗寒性鉴定与评价

刘欢 徐金涛 高丽娟 李龙飞 冀明辉 姚悦 郝宝锋*

(河北省农林科学院 昌黎果树研究所,河北 昌黎 066600)

摘要 为建立可靠高效的梨种质资源抗寒性评价方法,鉴定梨种质资源抗寒性,筛选高抗寒种质,以112份梨种质资源一年生枝条为试材,采用差热分析(DTA)系统测定枝条组织低温放热(LTE)温度,建立温度-伤害度回归方程(LT-I),利用LTE相关指标分析112份梨种质资源抗寒性,并综合隶属函数分析和聚类分析进行抗寒性评价及筛选。结果表明:1)112份梨种质资源枝条的LTE指标显著相关且差异明显,砧木和秋子梨的起始结冰平均温度和终止结冰平均温度最低,西洋梨最高。2)不同类型梨种质枝条关键伤害度(LT20、LT50、LT100)的温度范围存在差异,砧木和秋子梨3个关键伤害度的温度范围均明显低于西洋梨。3)利用隶属函数和聚类分析将梨种质资源划分为5类,其中,极抗寒种质2份,高抗寒种质17份,中抗寒种质19份,低抗寒种质46份,低温敏感种质28份;筛选出‘河北杜梨’‘寒香’‘南果梨’‘小花盖’‘寒露’‘寒酥’‘早酥’为梨抗寒优异种质。综上,本研究可为梨抗寒育种及抗寒机制解析提供技术支撑和理论依据。

关键词 梨;种质资源;抗寒性;低温放热;评价

中图分类号 S661.2

文章编号 1007-4333(2026)02-0092-12

文献标志码 A

Identification and evaluation of 112 pear germplasm resources for cold resistance based on differential thermal analysis

LIU Huan, XU Jintao, GAO Lijuan, LI Longfei, JI Minghui, YAO Yue, HAO Baofeng*

(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract The study was to establish a reliable and efficient method for evaluating cold hardiness of pear germplasm resources, identify the cold hardiness of pear germplasm resources, and screen highly cold-hardy germplasm. In this study, 112 annual branches of pear germplasm resources were used as test materials. The low-temperature exothermic (LTE) temperatures of the branch tissues were determined using differential thermal analysis (DTA) system and the temperature-injury regression equations (LT-I), established. The cold resistance of the 112 pear germplasm resources was analyzed using the LTE indexes, and comprehensive cold hardiness evaluation and screening were conducted through comprehensive membership function analysis and cluster analysis. The results showed that: 1) The LTE indicators of branches from 112 pear germplasm resources were significantly correlated and showed obvious differences. The average initial freezing temperature and average final freezing temperature of rootstocks and *P. ussuriensis* were the lowest, while those of *P. communis* were

收稿日期: 2025-07-04;接受日期: 2025-11-25

基金项目: 河北省农林科学院基本科研业务费项目(2024020202);河北省高层次人才资助项目(C20231157);河北省农林科学院科技创新专项资助项目(2022KJCXZX-CGS-7);河北省现代农业产业技术体系资助项目(HBCT2024170406);国家梨产业技术体系资助项目(CARS-29)

第一作者: 刘欢(ORCID:0009-0007-0396-9131),副研究员,主要从事梨育种与栽培技术研究,E-mail:18526426881@163.com

通讯作者: 郝宝锋(ORCID:0009-0003-3288-2503),研究员,主要从事梨育种、栽培生理及植保研究,E-mail:haobf1973@163.com

the highest. 2) There were differences in the temperature ranges of key injury degrees (LT20, LT50, LT100) among different types of pear germplasm branches, and the temperature ranges where the three key injury degrees occurred in rootstocks and *P. ussuriensis* were significantly lower than those in *P. communis*. 3) Cluster analysis based on membership functions categorized the germplasm into five groups, including 2 extremely cold-hardy germplasm resources, 17 highly cold-hardy germplasm resources, 19 moderately cold-hardy germplasm resources, 46 low cold-hardy germplasm resources, and 28 cold-sensitive germplasm. Additionally, *P. betulifolia* (Hebei), 'Hanxiang', 'Nanguo', 'Xiaohuagai', 'Hanlu', 'Hansu', and 'Zaosu' were screened as superior cold-resistant pear germplasms. In conclusion, this study provided technical support and theoretical basis for cold-hardy pear breeding and cold resistance mechanism analysis.

Keywords pear; germplasm resources; cold resistance; low-temperature exothermic; evaluation

梨树作为全球重要的温带经济果树,其栽培面积和产量均占全球总量的60%以上^[1-2],在我国农业中占据核心地位。然而,梨树常遭受非生物胁迫,低温胁迫作为重要的非生物胁迫之一,不仅严重影响梨树的生长发育和地理分布^[3-5],还会降低果实品质及产量^[6-7]。因此,建立可靠且高效的梨抗寒性评价方法,全面评价梨种质资源抗寒性并筛选高抗寒种质,对寒冷地区梨育种和种质创新至关重要。目前,国内外对植物抗寒性的鉴定已有许多报道,如电导率法(EL)、氯化三苯基四氮唑染色法(TTC)、恢复生长法(RG)和生理指标评价法等。其中,有关梨抗寒性的研究多采用电导法,另有部分研究采用生理生化法。王玮等^[8]利用电导法评价了7个梨品种抗寒性,郭伟珍等^[9]以电导法评价了10个梨品种(系)的抗寒性,王睿哲等^[10]和李今普^[11]采用电导法结合生理生化指标评价了梨种质资源抗寒性。前人研究表明,EL作为最常使用的传统方法,虽准确度高,但耗时久且需试材多^[12-13];TTC法虽可检测到组织的死亡,但染色判定主观性强、误差大,对实验操作技能要求高^[14-15];RG法虽可直观评估果树抗寒性,但也存在周期长、耗材大的问题^[16]。与传统分析法不同,低温放热(LTE)法是基于植物组织结冰放热温度的差异来评价其抗寒性^[17],最早始于国外^[18]。已有学者采用该方法鉴定了榛子^[17]、葡萄^[19-20]、板栗^[21]、桃^[22]和核桃^[23]等植物的抗寒性,表明LTE法具有简便、快速、准确、样品无损且用量少等优点,但LTE法应用于梨抗寒性的研究鲜有报道。此外,有关梨抗寒性评价方面,已有研究者对部分梨品种开展了抗寒性鉴定。孙梦颖等^[24]评价了4个梨品种抗寒性,秦倩等^[25]对25份新疆地方梨种质枝条抗寒性进行了评价,李清亚等^[26]和王文举

等^[27]仅分别对豆梨和西洋梨品种进行抗寒性评价。可见,现有研究多局限于少数地方梨品种,且类型单一,对梨种质资源进行大量综合性的抗寒性评价尚未见报道。针对目前研究存在的传统方法局限性,以及研究样本少量、类型单一的问题,本研究拟以国家环渤海地区特色果树种质资源圃的4个梨系统(白梨、砂梨、秋子梨和西洋梨)、种间杂交种和主要砧木资源(杜梨、豆梨)的112份梨种质一年生枝条为试材,采用LTE法分析枝条组织结冰放热温度,通过隶属函数和聚类分析法综合评价梨枝条抗寒性,旨在建立一种可靠准确的梨枝条抗寒性鉴定方法,筛选高抗寒梨种质,以期为我国梨种质抗寒性鉴定提供技术支撑,并为梨抗寒育种及抗寒机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料来源于国家环渤海地区特色果树种质资源圃(39°42' N, 119°25' E)。该地区属大陆性季风气候,年平均气温10℃,年日照时数2 809 h,年有效积温394℃,无霜期约186 d,年平均降水量640 mm。试验区为沙壤土,南北行向,株行距2 m×4 m,树体长势健壮,无病虫害。112份梨种质资源包括白梨(*P. bretschneideri*)25份,砂梨(*P. pyrifolia*)13份,秋子梨(*P. ussuriensis*)15份,西洋梨(*P. communis*)30份,种间杂交品种(Interspecific hybridization)27份,砧木(Stock species)2份,详见表1。试验于2024年1月进行,每个品种选取5株长势相近、无病虫害的树木,每株树冠外围采集10根一年生枝条,枝条直径为0.8~1.0 cm,长度在40~50 cm。每个品种枝条混合后选取10根置于4℃冰箱保存以备LTE分析。

表 1 112 份梨种质资源名称及分类

Table 1 Names and types of 112 pear germplasm resources

种质类型 Germplasm type	编号 No.	种质名称 Name of germplasm	种质类型 Germplasm type	编号 No.	种质名称 Name of germplasm	种质类型 Germplasm type	编号 No.	种质名称 Name of germplasm
砂梨 <i>P. pyrifolia</i>	PG001	苹果梨	白梨 <i>P. breshneideri</i>	PG039	波梨	西洋梨 <i>P. commusnis</i>	PG077	丑梨
	PG002	威宁大黄		PG040	香椿梨		PG078	瓢梨
	PG003	香酥梨		PG041	秋白梨		PG079	红安久
	PG004	红梨		PG042	水瓶宵		PG080	哈代
	PG005	满丰		PG043	雪花梨		PG081	保利阿斯卡
	PG006	秋月		PG044	遵化早白梨		PG082	考西亚
	PG007	黄金		PG045	半斤酥		PG083	居特路易斯
	PG008	红糖梨		PG046	库尔勒香梨	种间杂交 Interspecific hybridization	PG084	寒香
	PG009	晚秀		PG047	香梨		PG085	寒露
	PG010	宝珠		PG048	平谷红梨		PG086	寒酥
	PG011	二十世纪		PG049	红枝母秧		PG087	早酥
	PG012	丰水		PG050	11-04-139		PG088	七月酥
	PG013	爱甘水		PG051	红霄梨		PG089	蔗梨
秋子梨 <i>P. ussuriensis</i>	PG014	南果梨	西洋梨 <i>P. commusnis</i>	PG052	水红宵		PG090	苹博香
	PG015	小花盖梨		PG053	慈白梨		PG091	甘梨早八
	PG016	挂梨		PG054	满玉		PG092	红月梨
	PG017	黄花罐		PG055	8-42		PG093	早酥红
	PG018	红皮酸梨		PG056	红星		PG094	雪英
	PG019	歪把梨		PG057	姬玉		PG095	中梨 1 号
	PG020	挂里子		PG058	洋白		PG096	早酥蜜
	PG021	早香梨		PG059	世纪无核		PG097	03-21-15
	PG022	早熟梨		PG060	巴梨		PG098	烁玉
	PG023	碣石山野生梨		PG061	好本号		PG099	新梨 7 号
	PG024	野梨		PG062	玛丽亚		PG100	11-11-141
	PG025	红花罐		PG063	利布林		PG101	七月红香梨
	PG026	鸭广梨		PG064	鲜美		PG102	雪峰
	PG027	贼不偷		PG065	新早巴梨		PG103	翠玉
	PG028	南红梨		PG066	早红考密斯		PG104	五九香
白梨 <i>P. breshneideri</i>	PG029	平顶香梨		PG067	新城洋梨		PG105	红香酥
	PG030	蜜梨		PG068	伏茄	砧木 Stock species	PG106	08-26
	PG031	晚玉		PG069	康佛伦斯		PG107	黄冠
	PG032	酥玉		PG070	阿巴特		PG108	香红蜜
	PG033	蜜玉		PG071	李克特		PG109	玉美人
	PG034	10-24-20		PG072	玉壁林达		PG110	玛瑙梨
	PG035	金坠梨		PG073	Decola		PG111	河北杜梨
	PG036	09-01-110		PG074	Jana		PG112	豆梨
	PG037	11-02-257		PG075	意大利 2 号			
	PG038	03-19-99		PG076	粉酪			

1.2 试验仪器

差热分析(DTA)系统分为数据采集系统(山东农业大学机械与电子工程学院制作)和人工模拟自然降温气候室两部分(GDTS-2252,无锡精创科技有限公司)。工作室尺寸:600 mm×750 mm×500 mm,工作范围:−70~150 ℃。数据采集系统包括27个Peltier热电模块(40 mm×40 mm×15 mm),可感应枝条组织受冻结冰放热并将其转换为电压输出。此外,还可通过pt100传感器记录放热过程中的温度变化,精度可达到0.1%。

1.3 试验方法

LTE测定参考Küpe等^[28]、Wang等^[20]和高振等^[29]的方法。每个品种枝条选取节间部位,截取2 cm长度,两头封蜡后置于热电模块中,并用塑料泡沫板压在上部使其与热电模块充分接触,每个品种做3次重复。随后,开启程序降温:室温下1 h降至4 ℃,4 ℃降至0 ℃用时1 h,0 ℃保持1 h,0 ℃降至−44 ℃用时11 h,程序降温结束。

1.4 数据分析

采用Excel 2011进行数据整理和计算。使用Origin 2024软件进行相关性分析、聚类分析并绘图。采用变异系数对LTE指标进行描述性统计,计算公式如下:

$$CV=S/U \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 代表标准差, U 为指标平均值。

利用隶属函数法综合各LTE指标对梨不同品种抗寒性进行综合评价。计算公式如下:

如指标与抗寒性呈正相关:

$$U_{ij}=(X_{ij}-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin}) \quad (2)$$

如指标与抗寒性呈负相关:

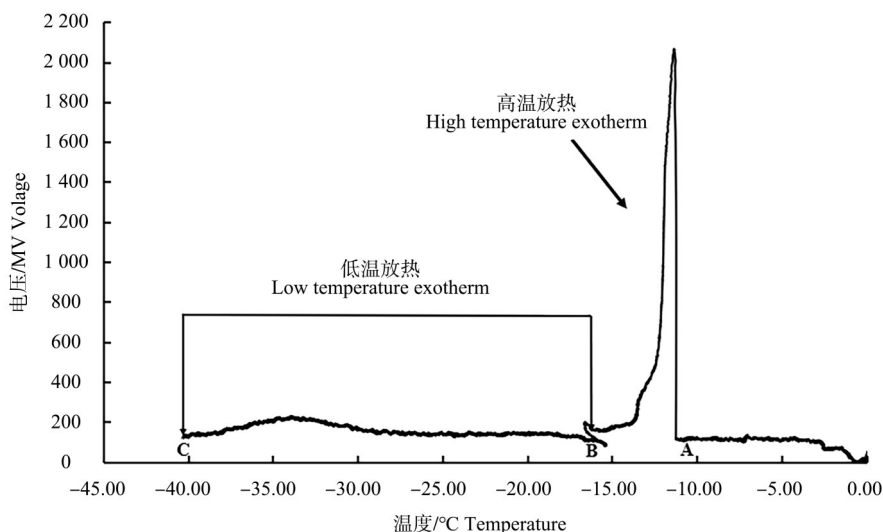
$$U_{ij}=1-(X_{ij}-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin}) \quad (3)$$

式中: U_{ij} 为第*i*个品种的第*j*指标隶属函数值; X_{ij} 第*i*个品种的第*j*指标测定值; X_{jmin} 为*j*指标的最小值, X_{jmax} 为*j*指标的最大值。

2 结果与分析

2.1 梨枝条LTE分析方法的建立

利用DTA系统测定丰水梨一年生枝条所得的高温放热(HTE)和LTE曲线如图1所示。低温胁迫下,枝条组织结冰形成冰晶并伴随放热。由于枝条组织细胞存在过冷却现象,在冰点(0 ℃)时并未发生结冰放热。温度降至A点(−11.2 ℃)时,枝条组织出现显著的放热过程。依据放热特征判断,该过程为细胞外组织结冰引起的HTE过程,此过程不具致命性^[29]。随着温度降低至B点(−16.63 ℃)时,枝条组织结冰放热,再次出现放热峰;当温度降至C点(−40.32 ℃)时,结冰放热过程结束,此过程为LTE过程,可导致枝条冻害发生。



A, 高温放热起始点;B, 低温放热起始点;C, 低温放热完全点。

A, the starting temperature point of high-temperature exotherm in the branches; B, the starting temperature point of low-temperature exotherm in the branches; C, the completion temperature point of low-temperature exotherm in the branches.

图1 丰水梨一年生枝条高温放热和低温放热图形

Fig. 1 Typical profiles of high temperature exotherms and low temperature exotherms

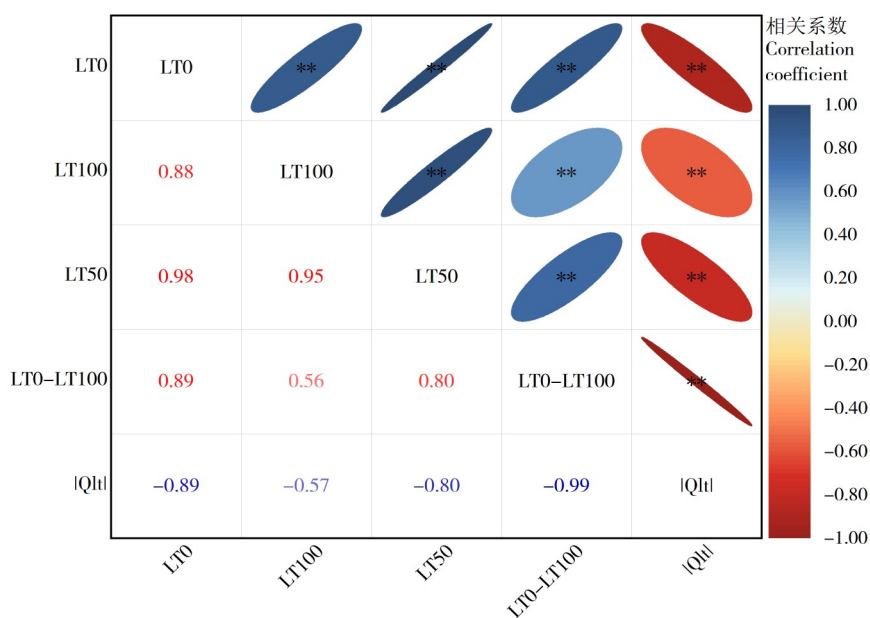
图1中B点为开始结冰点,即枝条组织伤害度为0,记为LT0;C点为结冰放热完全点,即枝条伤害度为100%,记为LT100。通过对初始冰点和结冰放热完全点进行回归分析,建立丰水枝条LT-I方程($y = -4.22x - 70.20$)。丰水枝条在 $-16.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始受冻结冰,温度降至 $-28.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时枝条组织呈半致死状态,在 $-40.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时枝条组织全部冻死。

2.2 LTE法分析不同梨种质资源抗寒性

2.2.1 不同梨种质资源LTE指标分析

通过差热分析测定112个梨种质资源枝条在低温胁迫下的放热过程,得到了植物组织的胞外结冰温度、起始结冰放热温度和结冰完全放热温度。由于胞外结冰伴随的高温放热对枝条组织具有非致命性和可恢复性^[29],本研究未对其比较分析。梨枝条的抗寒性主要由其枝条组织的受冻程度决定。因此,枝条组织LTE指标的差异,可作为评价和鉴

定梨枝条组织抗寒性的关键指标。由于单一LTE指标评价作为抗寒性评价标准不够全面,本研究对LTE关键指标低温放热温度差值(LT0-LT100)、斜率绝对值(|Qlt|)、LT0、LT50、LT100进行相关性分析(图2)。结果显示,5个指标之间均存在相关性,其中|Qlt|与LT0、LT50、LT100、LT0-LT100呈极显著负相关($P < 0.01$)。表明LT-I方程|Qlt|越大,枝条组织从开始结冰到结冰完全的温度跨度越小,且随温度下降,枝条组织细胞开始结冰现象出现较晚,达到半致死和完全致死状态也越晚,越不易受冻。由于传统方法多采用LT50评价枝条抗寒性,因此,本研究进一步分析了LT50与其他LTE指标的相关性,以全面评估梨种质资源枝条抗寒能力。由图2可知,LT50与LT0、LT100和LT0-LT100呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为0.98、0.95和0.80。



LT0,枝条组织初始结冰温度点;LT50,枝条组织半致死温度点;LT100,枝条组织结冰放热完全温度点;LT0-LT100,枝条组织结冰放热完全温度点与初始结冰温度点差值;|Qlt|,LT-I方程斜率绝对值;**表示各指标在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。

LT0 indicates the freezing temperature of annual branch; LT50 represents the semi-lethal temperature point of the branch tissue; LT100 indicates the 100% injury degree temperature of annual branch; LT0-LT100 represents the difference between freezing temperature of annual branch and the 100% injury degree temperature of annual branch; |Qlt| indicated the absolute value of the slope of LT-I; ** indicate that each index has significant correlation at $P < 0.01$ levels.

图2 梨枝条LTE各指标相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of LTE indicators in pear branches

由表2可知,112份梨种质资源中不同类型的梨种质枝条LTE各指标呈现差异性。比较各类型梨种质LT0和LT100平均值发现,LT0平均值由高到低依次为西洋梨>砂梨>白梨>种间杂交>秋子

梨>砧木,LT100平均值由高到低依次为西洋梨>砂梨>白梨>种间杂交>砧木>秋子梨。结果表明,砧木和秋子梨的起始结冰放热温度和结冰完全放热温度较低,而西洋梨在较高温度时开始结冰,

并结冰完全。LT-I方程斜率代表温度每降低1℃,梨枝条组织伤害增加的程度,由0%~100%枝条伤害度和对应温度回归分析所得,反映了在0%~

100%伤害度下不同品种枝条组织对低温环境的敏感度。如表2所示,各类型梨种质的Qlt也存在差异,其中砧木最低,西洋梨最高。

表2 不同类型梨种质资源1年生枝LTE指标均值

Table 2 Mean values of LTE indexes of 1-year old branches of different kinds of pear germplasm resources

种质类型 Germplasm type	LT0 均值/℃ Average LT0 of type	LT100 均值/℃ Average LT100 of type	Qlt 均值 Average Qlt of type
砂梨 <i>P. pyrifolia</i>	-18.36	-40.54	-4.52
秋子梨 <i>P. ussuriensis</i>	-21.61	-42.54	-4.82
白梨 <i>P. breshneideri</i>	-19.35	-41.57	-4.50
西洋梨 <i>P. communis</i>	-16.17	-40.13	-4.28
种间杂交 Interspecific hybridization	-20.71	-41.94	-4.73
砧木 Stock species	-23.29	-42.24	-5.39

2.2.2 不同梨种质资源程序降温下伤害程度比较

通过LT-I回归方程,确定不同低温下枝条的伤害度。本研究选取3个伤害度点(LT20、LT50和LT100)分析112份梨种质资源的低温放热过程,进一步评价不同类型梨种质资源枝条的抗寒性。Li等^[22]研究表明,枝条伤害度达20%时,可对生产造成直接影响。因此,本研究选取LT20做为关键指标之一。如图3所示,砧木枝条伤害度达20%时的温度范围为-31~-25℃,秋子梨为-29~-25℃,可见,砧木和秋子梨2种类型枝条受损20%的温度较低。比较而言,砂梨和西洋梨分别于-23℃和-21℃时表现出枝条损伤率达20%的现象,且在低温-25℃时,92.3%的砂梨种质和全部

西洋梨种质枝条伤害度均达到20%。表明非极端低温即可导致西洋梨和砂梨枝条发生冻害,其中73.3%的西洋梨枝条在-21℃时冻害达20%,抗寒性最弱。种间杂交种和白梨均在-29~-23℃范围内枝条伤害度达20%,LT20温度范围介于西洋梨和砂梨与秋子梨和砧木之间,表明此2种类型梨种质抗寒性大于西洋梨和砂梨,但小于秋子梨和砧木。

结果表明,112份梨种质枝条LT50范围为-37~-27℃(图4(a)),且不同类型梨种质间LT50存在差异。具体表现为:砧木和秋子梨枝条的半致死临界温度为-31℃;其中,河北杜梨枝条在极端低温-37℃时才达到半致死状态;白梨及种间杂交类型的半致死温度主要集中在-35~-31℃;西洋梨与砂梨种质的半致死温度多分布于-31~-29℃,其中西洋梨种质在-31℃时全部达到半致死状态,抗寒能力较差,与砧木及秋子梨的抗寒表现存在明显差异。如图4(b)所示,秋子梨、砧木和种间杂交类型枝条伤害度100%时的温度范围较低(-45~-41℃),其中秋子梨的LT100最低;西洋梨枝条伤害度100%时的温度范围最高(-43~-39℃),且93%的西洋梨种质在-41℃时伤害度达到100%,进一步验证了西洋梨抗寒能力较差。

2.2.3 梨种质资源枝条LTE指标的描述性统计

本研究对112份梨种质资源LTE各指标进行统计分析(表3),结果表明,低温胁迫下不同种质间LTE参数呈现明显差异,变异系数介于3.77%~

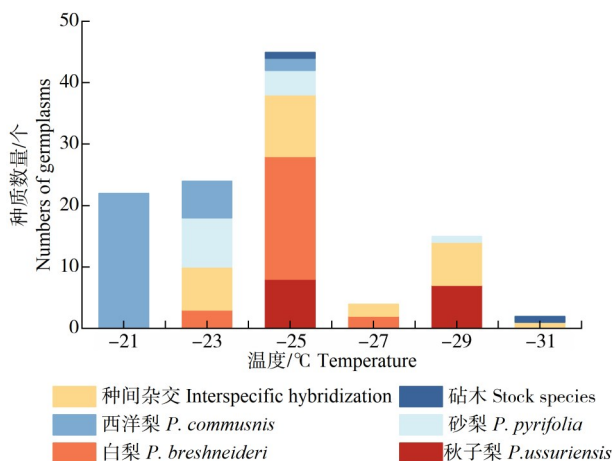


图3 不同类型梨枝条伤害度20%的温度比较

Fig. 3 Temperature comparison of different types of pear branches with 20% injury

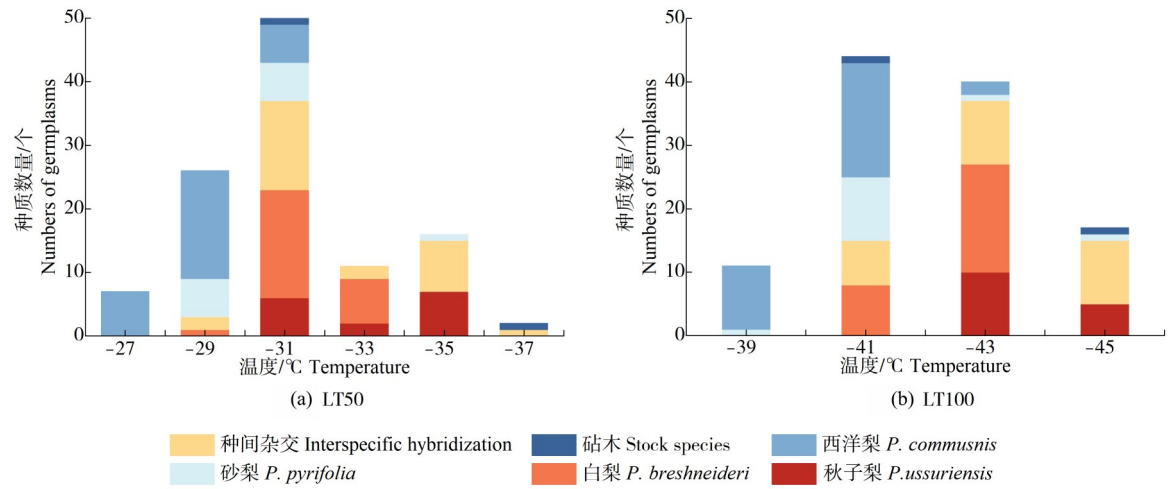


图4 不同类型梨枝条伤害度50%和100%的温度比较

Fig. 4 Comparison of temperatures at 50% and 100% injury of different types of pear branches

表3 112份梨种质资源5个LTE指标的描述性统计

Table 3 The description and statistics of 5 LTE indexes of 112 pear germplasm resources

指标 Indicator	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
LT0	−27.30	−14.76	−19.09	2.80	14.69
LT50	−35.44	−26.59	−30.12	2.12	7.03
LT100	−44.88	−38.16	−41.15	1.55	3.77
LT0−LT100	16.27	26.00	22.07	1.62	7.34
Qlt	−3.85	−6.15	−4.56	0.36	7.93

14.69%。其中,LT100变异系数最低(3.77%),而LT0变异系数最高(14.69%),大于10%,变异度丰富,表明不同梨种质资源枝条冷害起始临界温度差异较大。

2.3 梨种质资源枝条LTE综合评价

2.3.1 隶属函数分析

为全面客观评价112份梨种质资源的抗寒性,本研究采用隶属函数法对LTE过程中不同放热温度点LT0、LT50、LT100及Qlt进行隶属函数分析,计算平均隶属函数值(SV)。根据平均隶属函数值大小进行抗寒能力排序,隶属函数值越大,表明抗寒性越强。结果显示,112份供试材料的平均隶属函数值范围为0.37~0.95,平均值为0.37(表4)。

2.3.2 聚类分析

采用聚类分析法对112份梨种质资源平均隶属函数值进行聚类分析(图5)。聚类分析将112份梨种质划分为5类,第Ⅰ类包含2份种质,0.86≤SV≤

0.95,为极抗寒类型(HH);第Ⅱ类包含17份种质,0.63≤SV≤0.80,为高抗寒类型(H);第Ⅲ类包含19份种质,0.42≤SV≤0.52,为中抗寒类型(MH);第Ⅳ类包含46份种质,0.25≤SV≤0.41,为低抗寒类型(LH);第Ⅴ类包含28份种质,0.05≤SV≤0.22,为低温敏感类型(WH)。其中,HH类型和H类型中共7份种质SV≥0.75,包含‘河北杜梨’‘寒香’‘南果梨’‘小花盖’‘寒露’‘寒酥’‘早酥’。

2.3.3 不同类型梨种质抗寒性分布

基于112份梨种质的LTE隶属函数值(表4)和聚类分析结果(图5),分析不同类型梨种质的抗寒性分布(表5)。结果表明,砧木类型中HH和LH类型种质各占50%,无WH类型种质。种间杂交种质包含5个抗寒类型,以H和LH类型为主,占比81.4%;而HH和WH类型种质占比较少,呈中等抗寒水平。秋子梨主要包含H和MH类型种质,占比86.7%,且无WH类型种质。白梨主要为MH和LH类型,无极端抗寒类

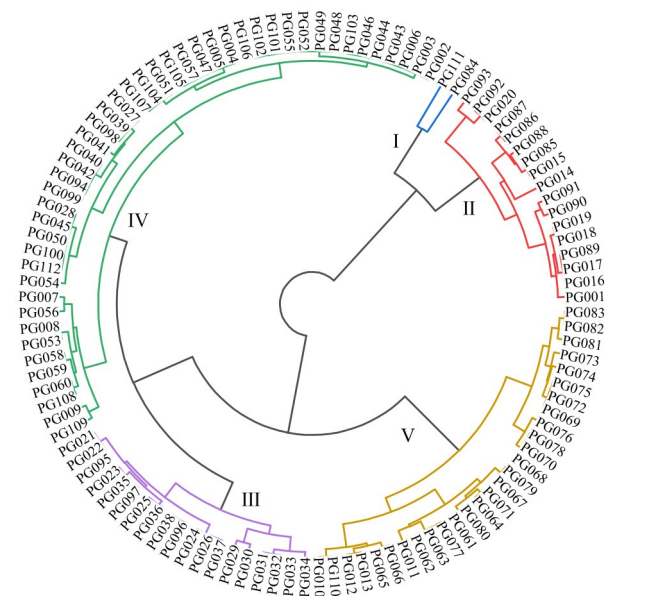
表 4 112 份梨种质资源平均隶属函数值及抗寒等级

Table 4 The average membership function values and cold resistance grades of 112 pear germplasm resources

编号 No.	隶属函数值 Membership function value	抗寒等级 Cold resistant type	编号 No.	隶属函数值 Membership function value	抗寒等级 Cold resistant type	编号 No.	隶属函数值 Membership function value	抗寒等级 Cold resistant type
PG001	0.72	II	PG039	0.40	IV	PG077	0.16	V
PG002	0.35	IV	PG040	0.39	IV	PG078	0.11	V
PG003	0.35	IV	PG041	0.41	IV	PG079	0.13	V
PG004	0.33	IV	PG042	0.39	IV	PG080	0.15	V
PG005	0.33	IV	PG043	0.35	IV	PG081	0.05	V
PG006	0.35	IV	PG044	0.35	IV	PG082	0.06	V
PG007	0.30	IV	PG045	0.37	IV	PG083	0.06	V
PG008	0.27	IV	PG046	0.35	IV	PG084	0.86	I
PG009	0.26	IV	PG047	0.33	IV	PG085	0.75	II
PG010	0.22	V	PG048	0.34	IV	PG086	0.76	II
PG011	0.18	V	PG049	0.34	IV	PG087	0.76	II
PG012	0.21	V	PG050	0.37	IV	PG088	0.74	II
PG013	0.21	V	PG051	0.32	IV	PG089	0.71	II
PG014	0.80	II	PG052	0.34	IV	PG090	0.69	II
PG015	0.75	II	PG053	0.27	IV	PG091	0.68	II
PG016	0.71	II	PG054	0.38	IV	PG092	0.65	II
PG017	0.71	II	PG055	0.34	IV	PG093	0.63	II
PG018	0.70	II	PG056	0.31	IV	PG094	0.39	IV
PG019	0.70	II	PG057	0.33	IV	PG095	0.45	III
PG020	0.65	II	PG058	0.29	IV	PG096	0.44	III
PG021	0.45	III	PG059	0.29	IV	PG097	0.43	III
PG022	0.45	III	PG060	0.28	IV	PG098	0.40	IV
PG023	0.43	III	PG061	0.15	V	PG099	0.39	IV
PG024	0.42	III	PG062	0.16	V	PG100	0.37	IV
PG025	0.44	III	PG063	0.16	V	PG101	0.34	IV
PG026	0.42	III	PG064	0.14	V	PG102	0.34	IV
PG027	0.40	IV	PG065	0.20	V	PG103	0.35	IV
PG028	0.37	IV	PG066	0.20	V	PG104	0.32	IV
PG029	0.52	III	PG067	0.13	V	PG105	0.33	IV
PG030	0.51	III	PG068	0.11	V	PG106	0.34	IV
PG031	0.48	III	PG069	0.08	V	PG107	0.32	IV
PG032	0.48	III	PG070	0.11	V	PG108	0.28	IV
PG033	0.48	III	PG071	0.14	V	PG109	0.25	IV
PG034	0.47	III	PG072	0.08	V	PG110	0.22	V
PG035	0.43	III	PG073	0.09	V	PG111	0.95	I
PG036	0.44	III	PG074	0.07	V	PG112	0.37	IV
PG037	0.42	III	PG075	0.08	V			
PG038	0.44	III	PG076	0.10	V			

注：I, 极抗寒种质；II, 高抗寒种质；III, 中抗寒种质；IV, 低抗寒种质；V, 低温敏感种质。

Note: I indicates extremely cold-resistant varieties; II indicates highly cold-resistant varieties; III indicates moderately cold-resistant varieties; IV indicates low cold-resistance varieties; V indicates cold-sensitive varieties.



梨种质资源名称见表1。I代表极抗寒种质;II代表高抗寒种质;III代表中抗寒种质;IV代表低抗寒种质;V代表低温敏感种质。
The name of varieties is the same as those in table 1. I indicates extremely cold-resistant varieties;II indicates highly cold-resistant varieties;III indicates moderately cold-resistant varieties;IV indicates low cold-resistance varieties;V indicates cold-sensitive varieties.

图5 112份梨种质资源聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of 112 pear germplasm resources

表5 不同类型梨种质抗寒性分布

Table 5 Distribution of cold hardiness in different types of pear germplasms

种质类型 Germplasm type	HH	H	MH	LH	WH
P	0.0	7.7	0.0	61.5	30.8
U	0.0	46.7	40.0	13.3	0.0
B	0.0	0.0	40.0	60.0	0.0
C	0.0	0.0	0.0	23.3	76.7
I	0.0	33.3	11.1	48.1	3.7
Z	50.0	0.0	0.0	50.0	0.0

注:P,砂梨;U,秋子梨;B,白梨;C,西洋梨;I,种间杂交;Z,砧木;HH,极抗寒类型;H,高抗寒类型;MH,中抗寒类型;LH,低抗寒类型;WH,低温敏感型。

Note: P represents *P. pyrifolia*; U represents *P. ussuriensis*; B represents *P. breshneideri*; C represents *P. communis*; I represents Interspecific hybridization; Z represents Stock species; HH represents extremely cold-resistant type; H represents highly cold-resistant type; MH represents moderately cold-resistant type; LH represents low cold-resistant type; WH represents cold-sensitive type.

型。砂梨主要包含LH和低WH类型,占比92.3%;而西洋梨LH和WH占比100%,均不包含H和MH类型种质。综上所述,秋子梨以中高抗寒等级为主,白梨和种间杂交无极端抗寒类型,西洋梨为低抗寒等级类型。

3 讨论

3.1 梨枝条LTE分析方法的建立

本研究发现,梨枝条在低温胁迫初期出现一次高温放热;随温度下降,又出现一次低温放热,与Küpe等^[28]研究结果一致。大量研究表明,枝条组织的HTE过程是不致命的,但LTE过程可对枝条组织造成不可逆转的损害^[30]。目前,LTE法应用于梨枝条抗寒性的研究鲜有报道,本研究借鉴前人采用LTE分析枝条抗寒性的研究方法^[31],基于DTA系统检测结果,根据枝条组织起始结冰和终止结冰的温度点建立了梨枝条LTE法,用于梨枝条抗寒性鉴定,较传统的EI法更简洁、高效。

3.2 LTE法评价梨种质资源枝条抗寒性

传统方法多采用LT50做抗寒性评价依据。但Gu^[32]研究表明LT50不能全面反映植物整个越冬期的抗寒性,综合分析LT50和斜率Qlt才更全面准确;付晓^[33]发现以单一温度评价葡萄枝条抗寒性是不全面的,应采用多放热温度点综合评价。本研究对LTE各指标进行相关分析表明Qlt绝对值与LT0、LT50、LT100和LT0-LT100呈极显著负相关($P<0.01$),Qlt绝对值越大,枝条组织达到半致死和完全致死状态越晚,越耐寒。LT50与LT0、

LT100 和 LT0-LT100 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 进一步验证了 LT50 与 LTE 关键指标间紧密相关, 可用于全面评估梨枝条抗寒能力。本研究采用 LTE 法对包含 6 个类型的 112 份梨种质资源进行了全面系统的抗寒性评价。本研究发现, 不同梨种质的 LT0 和 LT100 存在差异, 砧木和秋子梨的 LT0 和 LT100 较低, 表明其在较低的温度下开始结冰并结冰完全, 进而表现出较高抗寒性; 西洋梨 LT0 和 LT100 最高, 表明其在较高温度时开始结冰, 并结冰完全, 表现出较低的抗寒性; 种间杂交类型中不同种质的抗寒性存在差异, 这可能由于其亲本遗传背景不同, 且抗寒等级与亲本抗寒性的强弱密切相关。本研究中, 耐寒种质的放热起始温度明显低于低温敏感种质的放热起始温度, 这与 Ferguson 等^[30]的研究结果一致。此外, 本研究明确了枝条关键伤害度 (LT20、LT50、LT100) 的温度范围, 不仅进一步评价了不同类型梨种质的抗寒性差异, 还对梨种质的适应环境提供理论依据。其中, 西洋梨在非极端低温时即出现 20% 冻害现象, 且西洋梨的 LT50 和 LT100 最低, 均明显高于秋子梨和砧木。充分验证了砧木和秋子梨种质资源抗寒性较高, 而西洋梨种质抗寒性较低。王晓祥等^[34]研究表明秋子梨抗寒性极高; 李清亚等^[26]发现砧木杜梨和几个豆梨品种可在寒冷地区可安全越冬; 王文举等^[27]研究表明西洋梨抗寒性较弱, 低温环境易发生冻害。在本研究中, 秋子梨和砧木抗寒性较高, 而西洋梨抗寒性最弱, 与前人研究结果一致。

3.3 梨种质资源抗寒性综合评价

由于 LTE 法为综合评价方法, 为准确客观地评价梨种质抗寒性, 本研究对 LTE 各关键指标进行隶属函数分析, 隶属函数值越大, 表明抗寒性越强。根据平均隶属函数值进一步对 112 份梨种质资源进行聚类分析, 共分为 5 类, 极抗寒种质 2 份, 高抗寒种质 17 份, 中抗寒种质 19 份, 低抗寒种质 46 份, 低温敏感种质 28 份。筛选出的 7 个抗寒核心种质的隶属函数值由大到小为‘河北杜梨’>‘寒香’>‘南果梨’>‘寒酥’>‘早酥’>‘寒露’>‘小花盖’。‘河北杜梨’隶属函数值最大, 抗寒等级为极抗寒类型, 因此, 抗寒性最强, 在北方寒冷地区常选用‘河北杜梨’为砧木。本研究中, ‘南果梨’、‘早酥’、‘苹果梨’的抗寒性依次减弱, 这与曲柏宏等^[35]的研究结果一致。李今普^[11]研究表明‘苹果梨’抗寒性大于‘寒

香’, 而本研究中‘苹果梨’抗寒性小于‘寒香’, 这可能是由于同一品种的耐寒性在不同地区之间存在差异所致。Farrar 等^[36]研究表明, 关键物候期的变化会影响糖和淀粉的储存量, 破坏树木的渗透平衡, 从而影响树木的抗寒能力。此外, 有效积温和降水量等关键气象因子通过调控新梢生长及养分积累, 可保障寒地梨树安全越冬^[37]。可见, 不同地区梨品种的耐寒性表现不仅与该地区冬季的绝对低温有关, 还受所在地区的物候期和气象因素影响。不同类型梨种质资源中, 砧木和秋子梨均无低温敏感类种质, 且以极抗寒和高抗寒为主, 表明抗寒能力强。白梨和砂梨虽然均以低抗寒类型为主, 但白梨无低温敏感种质, 且中抗寒类型较高, 因此, 白梨抗寒能力略高于砂梨。西洋梨以低温敏感种质为主, 抗寒性较弱, 这与 LTE 各指标评价梨种质抗寒性结果一致。综合评价发现梨种质资源中极抗寒和高抗寒种质较少, 而中抗寒和低抗寒占比较大。因此, 未来应加强极端抗寒种质的挖掘与利用, 为梨抗寒育种及分子机制研究奠定基础。

4 结 论

本研究基于 DTA 系统建立了梨枝条 LTE 分析方法, 该方法能快速确定梨枝条组织冻害发生的临界温度, 全面、准确地评价不同梨种质资源抗寒性。112 份梨种质资源中, 砧木和秋子梨起始结冰与终止结冰点温度较低, 抗寒性强; 西洋梨则相反, 抗寒性弱。通过隶属函数和聚类分析将供试资源划分为 5 个抗寒等级, 明确各类型梨种质抗寒性分布特征, 并筛选出 7 个抗寒优异种质(‘河北杜梨’‘寒香’‘南果梨’‘小花盖’‘寒露’‘寒酥’‘早酥’), 为梨抗寒育种及抗寒机理研究提供理论依据。

参考文献 References

- [1] Gabay G, Flaishman M A. Genetic and molecular regulation of chilling requirements in pear: Breeding for climate change resilience[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1347527
- [2] Nishio S, Hayashi T, Yamamoto T, Yamada M, Takada N, Kato H, Nishitani C, Saito T. Validation of molecular markers associated with fruit ripening day of Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) using variance components[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 9-14
- [3] Wang Y X, Hu Y, Chen B H, Zhu Y F, Dawuda M M, Svetla S. Physiological mechanisms of resistance to cold stress associated with 10 elite apple rootstocks[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 857-866

- [4] Huang X S, Li K Q, Jin C, Zhang S L. ICE1 of *Pyrus ussuriensis* functions in cold tolerance by enhancing PuDREBa transcriptional levels through interacting with PuHHP1[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17620
- [5] Yang X Y, Wang R, Hu Q L, Li S L, Mao X D, Jing H H, Zhao J T, Hu G B, Fu J X, Liu C M. *DICE1*, a stress-responsive gene from *Dimocarpus longan*, enhances cold tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 142: 490-499
- [6] 吴嘉龙. 新疆4个早实核桃品种抗寒性评价[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2025
- Wu J L. Evaluation on cold resistance of four early-fruited walnut varieties in Xinjiang[D]. Ala'er: Tarim University, 2025 (in Chinese)
- [7] Chen R W, Wang J, Li Y, Bai R, Huang M X, Zhang Z Z, Zhao L X, Qu Z J, Liu L. Higher risk of spring frost under future climate change across China's apple planting regions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 159: 127288
- [8] 王玮, 李红旭, 赵明新, 曹素芳. 7个梨品种的低温半致死温度及耐寒性评价[J]. 果树学报, 2015, 32(5): 860-865
- Wang W, Li H X, Zhao M X, Cao S F. Study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for seven pear cultivars [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(5): 860-865 (in Chinese)
- [9] 郭伟珍, 赵京献, 李莹, 牛三义. 以电导法评价10个梨品种(系)的抗寒性[J]. 落叶果树, 2020, 52(6): 18-22
- Guo W Z, Zhao J X, Li Y, Niu S Y. Evaluation of cold resistance of ten pear cultivars by conductivity method[J]. *Deciduous Fruits*, 2020, 52(6): 18-22 (in Chinese)
- [10] 王睿哲, 张蓓, 郭铁群, 何天明, 崔慧敏, 王枝梅, 曼苏尔·那斯尔. 5个梨品种在低温胁迫下的生理响应及抗寒性评价[J]. 山东农业科学, 2023, 55(2): 57-63
- Wang R Z, Zhang B, Guo T Q, He T M, Cui H M, Wang Z M, Mansur N. Physiological responses to low temperature stress of five *Pyrus* spp species and their cold resistance evaluation[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(2): 57-63 (in Chinese)
- [11] 李今普. 内蒙古引种梨表型、品质及抗寒性综合评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023
- Li J P. Comprehensive evaluation of the phenotype, quality and cold resistance of introduced *Pyrus* in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [12] Wang Z L, Wang Y, Wu D, Hui M, Han X, Xue T T, Yao F, Gao F F, Cao X, Li H, Wang H. Identification and regionalization of cold resistance of wine grape germplasms (*V. vinifera*) [J]. *Agriculture*, 2021, 11(11): 1117
- [13] 任惠, 王小嫻, 刘业强, 苏伟强. 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
- Ren H, Wang X M, Liu Y Q, Su W Q. Cold resistance of *Averrhoa carambola* by application of electrical conductivity and logistic equation [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(3): 662-667 (in Chinese)
- [14] Li H Q, Li Q H, Xing L, Sun G J, Zhao X L. Comparison of cold hardiness evaluation of woody species by ELLT and TTCLT [J]. *HortScience*, 2020, 55(8): 1228-1232
- [15] Jun S H, Yu D J, Hur Y Y, Lee H J. Identifying reliable methods for evaluating cold hardiness in grapevine buds and canes [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2021, 62(6): 871-878
- [16] Wang Z M, Chai F M, Zhu Z F, Kirabi Elias G, Xin H P, Liang Z C, Li S H. The inheritance of cold tolerance in seven interspecific grape populations [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 266: 109260
- [17] 佟静怡. 榛种质资源抗寒性评价及抗寒候选基因挖掘[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024
- Tong J Y. Evaluation of cold resistance of *Corylus* resources and discovery of cold resistance candidate genes [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [18] Kang S K, Motosugi H, Yonemori K, Sugiura A. Exothermic characteristics of dormant buds of persimmon (*Diospyros kaki* Thunb) in relation to cold hardiness [J]. *HortScience*, 1997, 32(5): 840-843
- [19] 陈仁伟, 张晓煜, 丁琦, 杨豫, 南学军, 胡宏远, 冯蕊, 李芳红, 张亚红. 基于差热分析技术的4个酿酒葡萄品种不同部位抗寒性综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1022-1032
- Chen R W, Zhang X Y, Ding Q, Yang Y, Nan X J, Hu H Y, Feng R, Li F H, Zhang Y H. Comprehensive evaluation of cold resistance in different parts of four wine grape varieties based on different thermal analysis [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7): 1022-1032 (in Chinese)
- [20] Wang Z L, Wu D, Hui M, Wang Y, Han X, Yao F, Cao X, Li Y H, Li H, Wang H. Screening of cold hardiness-related indexes and establishment of a comprehensive evaluation method for grapevines (*V. vinifera*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1014330
- [21] 郭燕, 李颖, 张树航, 张馨方, 王广鹏. 利用低温放热法分析板栗枝条的抗寒性[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 201-209
- Guo Y, Li Y, Zhang S H, Zhang X F, Wang G P. Using low temperature exotherms method to analyze branch cold resistance of Chinese chestnut [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(S1): 201-209 (in Chinese)
- [22] Li Y H, Li J, Wang Z Y, Liu G J, Wang Y, Chang R F, Chen H, Tian Q H, Wang X D. Analyzing cold hardiness (Based on DTA) of one-year-old branches of peaches [J]. *PLoS one*, 2024, 19(9): e0306914
- [23] Ni Z T, Hu H F, Xu G Q. Cold hardiness and physio-biochemical responses of annual branches in five early-fruited walnut varieties (*Juglans regia* L) under simulated low-temperature stress [J]. *Horticulturae*, 2025, 11(1): 72
- [24] 孙梦颖, 王春雨, 郭伟珍, 李莹, 杨敏生, 张军, 赵京献. 4个梨品种在低温胁迫下的生理响应及耐寒性评价[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(12): 189-194
- Sun M Y, Wang C Y, Guo W Z, Li Y, Yang M S, Zhang J, Zhao J X. Physiological responses of four pear cultivars under low-temperature stress and evaluation of their cold resistance [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(12): 189-194 (in Chinese)
- [25] 秦倩, 蒋艳, 木合塔尔·扎热, 艾力江·麦麦提. 新疆的二十五份梨种质资源低温半致死温度比较及耐寒性评价[J]. 北方园艺, 2024(10): 24-31
- Qin Q, Jiang Y, Muhetar Z, Ailijiang M. Comparison of low temperature and half lethal temperature and evaluation of cold tolerance of 25 pear germplasm resources [J]. *Northern Horticulture*, 2024(10): 24-31 (in Chinese)
- [26] 李清亚, 路斌, 赵佳伟, 栗浩, 李艳, 苗胜越, 路丙社. 不同豆梨品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(1): 86-94, 110
- Li Q Y, Lu B, Zhao J W, Li H, Li Y, Miao S Y, Lu B S. Physiological response and cold resistance evaluation of different *Pyrus calleryana* varieties under low temperature stress [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2020, 48(1): 86-94, 110 (in Chinese)
- [27] 王文举, 李小伟, 顾文龙. 电导法测定西洋梨的抗寒性研究[J]. 北方园艺, 2008(2): 1-3
- Wang W J, Li X W, Gu W L. Conductance method determination to the cold tolerance of six occidental pear-*Pyrus communis* [J]. *Northern Horticulture*, 2008(2): 1-3 (in Chinese)
- [28] Küpe M, Köse C. The relationship between bud size and exotherm formation in dormant buds of grapevine [J]. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2020, 51(3): 243-248
- [29] 高振, 翟衡, 张克坤, 党园, 杜远鹏. LT-I分析7个酿酒葡萄品种枝条的抗

- 寒性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 1014-1024
- Gao Z, Zhai H, Zhang K K, Dang Y, Du Y P. A study on cold hardiness of seven wine grape canes by LT-I analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 1014-1024 (in Chinese)
- [30] Ferguson J C, Tarara J M, Mills L J, Grove G G, Keller M. Dynamic thermal time model of cold hardiness for dormant grapevine buds[J]. *Annals of Botany*, 2011, 107(3): 389-396
- [31] 高振, 翟衡, 孙鲁龙, 马艳春, 杜远鹏. 基于温度-伤害度关系分析酿酒葡萄根系及芽抗寒性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 983-990
- Gao Z, Zhai H, Sun L L, Ma Y C, Du Y P. Evaluation of root and bud cold hardiness of wine grape varieties based on temperature-injury relation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 983-990 (in Chinese)
- [32] Gu S L. Lethal temperature coefficient: A new parameter for interpretation of cold hardiness [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1999, 74(1): 53-59
- [33] 付晓. 45份鲜食葡萄品种资源枝条抗寒性评价分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017
- Fu X. The identification of cold resistance of 45 varieties of grapes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [34] 王晓祥, 任爱华, 韩继龙. 黑龙江省梨抗寒种质资源的评价及利用[J]. 中国南方果树, 2018, 47(S1): 32-38
- Wang X X, Ren A H, Han J L. Evaluation and utilization of pear cold-resistant germplasm resources in Heilongjiang Province[J]. *South China Fruits*, 2018, 47(S1): 32-38 (in Chinese)
- [35] 曲柏宏, 李玉梅. 延边地区梨品种抗寒性研究[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(5): 615-618
- Qu B H, Li Y M. Study on cold resistance of different pear varieties in Yanbian area[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006, 45(5): 615-618 (in Chinese)
- [36] Farrar J, Pollock C, Gallagher J. Sucrose and the integration of metabolism in vascular plants[J]. *Plant Science*, 2000, 154(1): 1-11
- [37] Zhao Y, Hu M Y, Wang Q, Yan X K, Lu M Y, Wu C H, Li H Y, Zhang M J. Climate variation and its influence on the cold tolerance and phenology periods of pear cultivars in Jilin, China[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2023, 23(1): 165-180

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 刘欢, 副研究员, 硕士。主要从事梨抗性育种与栽培、种质资源评价与利用等工作。主持河北省农林科学院基金项目1项, 参与省级项目7项; 以第一发明人获得国家发明专利2项、实用新型专利2项; 发表论文20余篇, 其中以第一作者身份发表6篇。



通讯作者简介: 郝宝锋, 研究员。主要从事梨育种、栽培生理和植保等技术研究。国家梨产业技术体系昌黎综合试验站站长、国家级科技特派员。在国家级和省级刊物上发表论文50余篇; 主编或参编专著2部; 获得国家发明专利7项; 获得河北省科技进步二等奖2项、三等奖2项、山区创业三等奖1项; 审定梨新品种4个, 获得梨品种保护权6个。