

我国几个板栗品种抗寒性综合评价

郭燕 张树航 李颖 张馨方 韩斌 王广鹏* 杨阳
(河北省农林科学院 昌黎果树研究所,河北 昌黎 066600)

摘要 以10个中国板栗(*Castanea mollissima* Bl.)品种休眠期一年生枝条为材料,测定各品种不同低温处理下枝条的相对电导率(REC)、冻害指数、总着色度和丙二醛(MDA)、脯氨酸、可溶性糖含量及枝条结构特征。将REC配合 Logistic 方程求出枝条低温半致死温度(LT₅₀),通过相关性分析筛选与LT₅₀极显著相关的理化、结构指标,并用隶属函数法求出各抗寒性相关指标平均隶属度,对供试品种进行综合评价和抗寒性排序。结果表明:随处理温度的降低,10个板栗品种枝条REC变化趋势呈近“S”型,基于相对电导率拟合的LT₅₀差异较大,为-26.64~-17.73℃;-20℃处理下枝条REC、冻害指数、总着色度、MDA含量,及枝条木栓层厚度和木栓层比率与其LT₅₀呈极显著相关,可作为板栗枝条抗寒性鉴定的理化和组织结构指标;以6个指标为基础参数的隶属函数法适用于板栗树种枝条的抗寒性准确评价。10个中国板栗主栽品种枝条抗寒性强弱顺序为:‘燕宽’>‘燕山早丰’>‘燕奎’>‘处暑红’>‘紫珀’>‘粘底板’>‘罗田1号’>‘红栗’>‘燕红’>‘杂35’。

关键词 板栗; 抗寒性; 指标; 综合评价

中图分类号 S664.2

文章编号 1007-4333(2019)04-0052-12

文献标志码 A

Comprehensive evaluation on the cold resistance of several main Chinese chestnut cultivars

GUO Yan, ZHANG Shuhang, LI Ying, ZHANG Xinfang, HAN Bin, WANG Guangpeng*, YANG Yang
(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract Annual dormant branches of 10 chestnut cultivars were taken as the experimental materials. Relative electrical conductivities (REC), freeze injury index, dyeing degree, the contents of malondialdehyde (MDA), proline, and soluble sugar under different low temperature treatments, as well as the anatomical structures indexes of branches were determined in this study. Semi lethal temperature (LT₅₀) was assessed with REC and Logistic equation. The physicochemical and morphological structural indexes, which had significant relationship with LT₅₀, were screened by correlation analysis. The membership function was used to determine the average subordinate level of the indexes, the comprehensive evaluation and cold resistance of main cultivars were sorted by comparing the average subordinate indexes. The results showed that: The relative electrical conductivities of 10 chestnut cultivars were in approximate “S” trend as temperature decreased. The LT₅₀ based on the REC of 10 chestnut varieties (strains) were quite different, ranging from -26.64 to -17.73℃. The significant correlations were found between LT₅₀ and the indexes including REC, freeze injury index, dyeing degree, the contents of MDA under -20℃ treatment, as well as phellem layer thickness and phellem layer ratio of the branch. These characters could be used as physicochemical and morphological structural indexes. The membership function based on 6 indexes could be used to accurately identify the cold resistance of the chestnut. The order of cold resistance of 10 chestnut cultivars, from the strong to the weak, was Yankuan, Yanshanzaofeng, Yankui, Chushuhong Zipo, Niandiban, Luotian 1, Hongli, Yanhong and Za 35.

Keywords Chinese chestnut; cold resistance; index; comprehensive evaluation.

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 河北省财政专项项目(F17R06007);河北省重点科技支撑项目(16226312D-6)

第一作者: 郭燕, 助理研究员, 主要从事板栗育种与栽培生理研究, E-mail: 529127092@qq.com

通讯作者: 王广鹏, 研究员, 主要从事板栗育种与栽培技术研究, E-mail: 845034984@qq.com

冻害是中国板栗(*Castanea mollissima* Bl.)北方栽培区常见的一种生理性病害,经常给生产带来重大经济损失,选用抗寒性强的品种是减轻冻害损失的有效途径^[1]。准确评价不同板栗品种的抗寒性,对抗寒品种的利用创新及其合理栽培区划有重要意义。

有关板栗品种抗寒性评价的研究报道较少。陈楚莹等^[2]通过板栗枝条的质壁分离程度、贮藏物质含量、蒸腾强度及低温下枝条受冻程度指标比较了辽宁省7个板栗品种的抗寒性。陈丽华^[3]通过树体生长状况指标比较了10个板栗品种的抗寒性。我国有300多个板栗品种(系)^[4],但对各品种抗寒性的了解仍十分有限。与其他果树相比,对板栗遭受冻害后的枝条结构特征、生物膜结构、生理和生化等方面的变化还缺乏基础层面的认识是限制其抗寒性鉴定的主要原因。

本研究通过不同低温处理板栗枝条,筛选与其抗寒性相关的结构、生理、生化指标,并以其为基础开发抗寒性综合评价方法,继而对我国几个板栗品种抗寒性进行鉴定,以期为我国板栗种质的抗寒性评价、抗寒种质创新及不同抗寒力品种区划奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验供试品种为原产6个省份的10个中国板栗品种(表1),位于河北省昌黎果树研究所板栗种质资源圃,于2002年将所有供试品种接穗统一嫁接于燕山早丰实生砧木上,株行距2 m×4 m,管理措施一致。选取休眠期一年生枝条为试验材料。

表1 供试板栗品种

Table 1 List of tested Chestnut cultivars

来源	品种	来源	品种
Source	Cultivar	Source	Cultivar
河北省	燕山早丰	山东	红栗
	燕宽		杂35
	燕奎	安徽	粘底板
	紫珀	江苏	处暑红
北京市	燕红	湖北	罗田1号

1.2 试验处理

2015年1月15日,每品种随机选取30株,于每株树冠外围中部随机剪取长40 cm左右、茎粗0.7 cm左右、无病虫害的一年生休眠期枝条10根。将剪取的枝条按品种混合后,先后用自来水、蒸馏水冲洗干净。之后每品种随机选取30~35根枝条为1份,共分7份,放入自封袋中,在袋中加入适量水密封,置高低温交变湿热试验箱中进行不同冷冻温度处理。共设-10,-15,-20,-25,-30,-35℃6个低温处理,每处理均以4℃/h的速率降温,达到设定温度后保持12 h,再以4℃/h的速率升温至4℃保持2 h,后放入4℃冰箱中备用;对照(CK)枝条直接置于4℃冰箱中。各项指标测定前均将冷冻枝条置于室温(25℃)下8 h。每处理随机选取3根枝条为1个重复,共3个重复。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 相对电导率的测定

相对电导率采用电导法测定^[5]。将样品枝条切成0.5 cm小段,称取2.0 g,置于25 mL试管中加入去离子水25.0 mL,盖好瓶塞,于摇床上25℃振荡浸提12 h,用DDS-11C型数显电导率仪测定各样品浸提液电导值(C_1)。然后将样品浸提液在沸水中加热25 min杀死组织,25℃下浸提12 h再测定总电导值(C_2)。相对电导率(REC)= $C_1/C_2 \times 100\%$ 。

1.3.2 枝条冻害指数及组织活力的测定

枝条冻害指数采用组织褐变法^[6]测定。冻害指数分级标准参照贺普超等^[7]的方法略有改动。从冷冻枝条节间中部截断,观察枝条不同组织截面低温处理后的褐变情况,确定冻害级次。冻害级次分级标准为:0级,无冻害,髓部绿色,木质部绿色,韧皮部绿色;1.0级,轻微冻害,髓部白色、原生木质部部分变褐、韧皮部绿色;2.0级,髓部白色,木质部大部分褐色,韧皮部绿色;2.5级,髓部白色,木质部全部褐色,韧皮部部分褐色;3.0级,髓部白色,木质部全部褐色,韧皮部全部褐色。按级别进行统计,用冻害指数反映各品种枝条的受冻程度,冻害指数= Σ (冻害级次×枝段数)/(4×枝段总数)。芽褐变率的统计参照田景花等^[6]的方法。芽褐变率=褐变芽数/总芽数×100%。枝条组织活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法^[8]。低温处理后,从各枝条上切取长0.4 cm的小段,每个种质取10段,放入50 mL 0.5%的TTC溶液中,于黑暗中静置15 h,观察木质部着色情况。抗寒力以着色程度表示,着

色越深,表示抗寒力越强,未着色记为0,淡红色记为1,粉红色记为2,红色记为3。总着色度= Σ (着色程度 \times 枝段数)/枝段总数。

1.3.3 枝条组织结构观测

枝条组织结构观测参照田景花等^[6]的方法并略有改动。每个品种随机选取洗净的4℃环境下(对照)的枝条30根,先用游标卡尺在枝条中部的节位之间测量枝条直径及髓直径,然后测量去皮后枝条直径(仅包括木质部和髓)。木质部厚度=(去皮后枝条直径-髓直径)/2。髓半径=髓直径/2。自每品种枝条中部切取0.3 cm \times 0.3 cm大小的树皮30片,FAA固定液固定,Leica冷冻切片机(Leica CM1850)切片,厚度15~18 μ m,番红·固绿染色,石蜡封片。Olympus BX-51显微镜观察树皮横切面解剖结构并拍照,以目镜测微尺测量木栓层厚度。计算木栓层在茎结构中所占的比率,木栓层比率=木栓层厚度/枝条半径 \times 100%。

1.3.4 生理指标测定

丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸TBA显色法^[9];脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮显色法^[9];可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[10]。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Excel 2003进行处理,将不同温度处理下的相对电导率拟合改进的Logistic方程 $y=K/(1+ae^{-bx})$,其中 y 为相对电导率, x 为处理温度, K 为相对电导率饱和值, a 、 b 为方程参数,求该方程的二阶导数并令其等于0,可获得方程曲线的拐点 $x=-\ln(1/a)/b$, x 即为半致死温度 LT_{50} ,具体参照莫惠栋^[11]的方法。数据的相关性分析和差异显著性分析采用SPSS 20.0完成。

运用隶属函数法计算10个板栗品种各抗寒指标隶属度^[12],并以各品种6项抗寒指标隶属度的平均值作为抗寒力综合评价标准,进行比较。

如果指标与抗寒性呈正相关,则指标隶属度计算公式如下:

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

如果指标与抗寒性呈负相关,则用反隶属函数计算,公式如下:

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}),$$

式中: U_{ij} 表示 i 品种 j 指标的抗寒隶属函数值; X_{ij} 表示 i 品种 j 指标的测定值; X_{jmin} 表示所有品种 j 指标的最小值; X_{jmax} 表示所有品种 j 指标的最大值; i 表示某个品种; j 表示某项指标。

2 结果与分析

2.1 低温处理下板栗枝条相对电导率及低温半致死温度(LT_{50})变化特征

不同低温处理下板栗枝条的相对电导率及由其求出的 LT_{50} 数值见表2。可以看出,10个板栗品种枝条相对电导率随处理温度的降低均呈现‘缓慢增加 \rightarrow 急剧增加 \rightarrow 保持平稳’(近S型曲线)的变化趋势,说明不同板栗品种枝条对低温胁迫的响应具有一致性,但不同板栗品种枝条电导率(电解质外渗率)变化趋势出现明显拐点时所处的温度各不相同。

LT_{50} 是指在该温度时,植物达到半致死状态,当温度继续低于该温度时,植物所受的伤害将不可恢复甚至死亡, LT_{50} 值越低抗寒性越强^[9]。由表2可见,根据 LT_{50} 得出10个板栗品种枝条的抗寒性顺序:‘燕宽’ $>$ ‘燕山早丰’ $>$ ‘燕奎’ $>$ ‘紫珀’ $>$ ‘处暑红’ $>$ ‘粘底板’ $>$ ‘罗田1号’ $>$ ‘红栗’ $>$ ‘杂35’ $>$ ‘燕红’。10个板栗品种(系)枝条的 LT_{50} 差异较大,为-26.64~-17.73℃,部分品种间的差异达到显著水平,说明基于电导法的 LT_{50} 可以很好地区分板栗休眠期一年生枝条的抗寒性。将各品种不同低温处理下相对电导率与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明温度为-20、-25、-30和-35℃的处理,其相关系数(r)分别为0.946**、0.880**、0.869**和0.854**,其中-20℃的处理两者相关系数数值最高,说明-20℃的处理枝条相对电导率作为板栗枝条抗寒性鉴定的生理指标最合适。

2.2 低温处理下板栗枝条冻害指数变化特征

由表3可以看出,随处理温度的降低,10个板栗品种枝条冻害指数均近似呈“S”型变化趋势,但各自冻害指数出现急剧升高拐点的温度明显不同。‘燕红’、‘杂35’和‘罗田1号’枝条冻害指数出现急剧升高拐点的温度最高,均为-15℃;‘燕奎’、‘紫珀’、‘处暑红’、‘粘底板’和‘红栗’次之,在-20℃时急剧升高;‘燕山早丰’和‘燕宽’枝条的冻害指数急剧升高时的温度最低,为-25℃。

将各品种不同低温处理下冻害指数与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明温度为-15、-20和-25℃的处理,其冻害指数与 LT_{50} 相关系数(r)分别为0.699*、0.965**、0.773**,其中-20℃的处理冻害指数与 LT_{50} 两者呈极显著正相关,且相关系数最高,说明-20℃的处理板栗枝条冻害指数作为抗寒性鉴定的指标最合适。

表2 低温处理下板栗枝条相对电导率及低温半致死温度

Table 2 Relative electrical conductivities of chestnut branches under low temperatures and estimation of LT₅₀

%

品种 Cultivar	相对电导率 REC							半致死温度/℃ LT ₅₀
	4 ℃	-10 ℃	-15 ℃	-20 ℃	-25 ℃	-30 ℃	-35 ℃	
燕山早丰	37.51±1.11 bcd	39.94±1.19 bcd	41.67±2.58 ab	43.39±2.34 ab	58.37±2.67 b	68.62±0.83 b	70.05±4.86 b	-26.27±0.54 a
燕宽	34.74±0.91 a	37.66±1.14 ab	40.75±2.06 a	42.16±1.05 a	53.84±0.82 a	66.76±1.11 b	66.14±2.04 a	-26.64±0.59 a
燕奎	38.79±2.37 cd	36.88±1.97 a	42.48±1.11 ab	46.23±2.60 b	52.44±4.31 a	63.77±1.95 a	75.90±2.78 c	-22.89±0.60 c
紫珀	37.07±0.95 abc	39.35±0.92 abcd	41.38±0.92 ab	50.66±1.37 c	61.30±1.54 b	75.23±0.93 c	77.21±1.02 c	-21.01±0.64 de
燕红	36.24±1.09 ab	41.84±0.87 def	50.51±2.26 de	65.43±2.18 e	75.16±1.05e	89.90±2.63 f	88.24±1.95 ef	-17.73±0.59 g
红栗	39.84±1.52 d	43.30±1.04 ef	53.44±3.93 e	65.64±2.64 e	75.49±0.87e	80.92±1.18 d	85.02±0.01 e	-18.46±0.60 fg
杂35	35.63±1.43 ab	40.43±0.63 bcde	48.17±1.05 cd	63.87±1.14 e	74.76±1.17e	88.34±1.10 ef	89.88±0.68 f	-18.37±1.03 fg
粘底板	35.81±1.16 ab	38.68±1.27 abc	40.34±1.32 a	57.20±1.37 d	68.12±1.13 cd	78.76±1.06 d	81.25±1.26 d	-20.18±1.05 def
处暑红	36.80±0.87 abc	41.13±2.38 cde	44.67±0.80 bc	56.06±1.56 d	65.95±1.41 c	72.92±1.73 c	75.07±1.27 c	-21.92±1.01 cd
罗田1号	38.10±1.23 bcd	43.29±2.77f	47.19±1.58 cd	58.13±3.14 ^d	70.18±2.10 d	86.60±0.66 e	87.15±1.02 ef	-19.34±1.02 efg

注:同列数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。Note: Different letters within the same column mean significant differences ($P<0.05$). The same below.

表3 低温处理下板栗枝条冻害指数

Table 3 Freeze injury index of chestnut branches under low temperatures

品种 Cultivar	温度/℃ Temperature						
	4	-10	-15	-20	-25	-30	-35
燕山早丰	0.00	0.00	3.33	15.75	50.19	93.69	95.17
燕宽	0.00	3.03	5.05	8.52	53.81	91.82	98.84
燕奎	0.00	2.57	3.72	24.17	61.11	95.67	96.67
紫珀	0.00	2.75	3.70	26.18	69.53	91.22	93.35
燕红	0.00	3.33	18.76	55.91	91.83	99.63	100.00
红栗	0.00	3.33	6.07	46.02	71.67	99.56	100.00
杂35	0.00	3.33	18.34	53.53	81.11	99.28	99.75
粘底板	0.00	3.33	8.33	35.52	70.02	100.00	100.00
处暑红	0.00	3.70	5.55	26.67	43.33	80.11	94.44
罗田1号	0.00	3.33	13.34	40.34	64.30	99.49	99.49

2.3 低温处理下板栗枝条总着色度变化特征

由表4可以看出,随处理温度的降低,10个板栗品种枝条总着色度均近似呈倒“S”型变化趋势,但根据总着色度急剧降低时的温度可将10个板栗品种分为两大类。‘燕红’、‘杂35’、‘罗田1号’、‘燕奎’、‘紫珀’、‘粘地板’和‘红栗’枝条总着色度急剧降低时的起点温度较高,-15~-30℃时急剧降低,之后趋于平缓;‘燕山早丰’、‘燕宽’和‘处暑红’

枝条的总着色度急剧降低时的起点温度较低,-20~-30℃时急剧降低,之后也趋于平缓。

将各品种枝条的不同低温处理下总着色度与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明-15和-20℃处理,其总着色度与 LT_{50} 相关系数(r)分别为-0.741*和-0.803**,可见-20℃处理的板栗枝条总着色度作为板栗枝条抗寒性鉴定的指标较-15℃处理为好。

表4 低温处理下板栗枝条的总着色度

Table 4 Dyeing degree of chestnut branches under low temperatures

品种 Cultivar	温度/℃ Temperature						
	4	-10	-15	-20	-25	-30	-35
燕山早丰	3.0	3.0	2.8	2.0	1.4	0.3	0.3
燕宽	3.0	2.9	2.7	2.5	1.5	0.3	0.3
燕奎	3.0	2.9	2.8	1.5	1.1	0.3	0.2
紫珀	3.0	2.9	2.7	1.2	1.2	0.4	0.3
燕红	2.9	3.0	2.4	0.9	0.5	0.2	0.1
红栗	3.0	3.0	2.3	1.6	1.1	0.2	0.1
杂35	3.0	3.0	2.6	1.0	0.7	0.1	0.0
粘底板	3.0	2.9	2.6	1.1	1.1	0.3	0.4
处暑红	3.0	3.0	2.8	2.3	1.0	0.4	0.2
罗田1号	2.7	2.5	2.5	1.8	2.3	0.3	0.0

2.4 低温处理下板栗枝条丙二醛含量变化特征

MDA 含量与抗寒性呈负相关^[13-14]。由表 5 可以看出,随处理温度的降低,10 个板栗品种枝条 MDA 含量均呈“先上升、后下降”的变化趋势,但是不同品种 MDA 含量出现峰值时所对应的处理温度不同。‘燕红’、‘红栗’、‘杂 35’和‘罗田 1 号’在处理温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时枝条 MDA 含量达到峰值;‘粘底板’在处理温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时枝条 MDA 含量达到峰值;‘燕山早丰’、‘燕宽’、‘燕奎’、‘紫珀’和‘处暑红’在处理温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时枝条 MDA 含量才达到峰值,峰值出现最晚。

将各品种不同低温处理下枝条的 MDA 含量与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明温度为 -10 、 -15 、 -20 、 -25 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理,其枝条 MDA 含量与 LT_{50} 相关系数 (r) 分别为 0.815^{**} 、 0.691^{*} 、 0.880^{**} 、 0.692^{*} 和 0.741^{*} ,其中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的处理两者相关系数值最高且达极显著水平,说明 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理下板栗枝条中 MDA 含量越高, LT_{50} 越高,板栗抗寒性越弱,可见 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理下枝条 MDA 含量作为板栗枝条抗寒性鉴定的一个生理指标较好。

2.5 低温处理下板栗枝条可溶性糖含量变化特征

由表 6 可以看出,随处理温度的降低,10 个板栗品种枝条可溶性糖含量均呈“降-升-降”的变化趋势。‘燕宽’枝条的可溶性糖含量在整个低温处理过程中一直维持较高水平,‘罗田 1 号’枝条的可溶性糖含量一直处于较低水平,其他品种间差异不显著。

将各品种不同低温处理下枝条可溶性糖含量与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明任何处理下的可溶性糖含量与 LT_{50} 的相关系数均未达到显著以上水平,说明板栗枝条中可溶性糖含量与抗寒性的相关性不密切,不足以作为其抗寒性鉴定的一个准确指标。

2.6 低温处理下板栗枝条脯氨酸含量变化特征

从表 7 可以看出,随处理温度的降低,‘燕山早丰’、‘燕宽’、‘燕红’、‘粘底板’和‘罗田 1 号’5 个品种枝条中脯氨酸含量均呈“先升高再降低”的变化趋势,而‘燕奎’、‘紫珀’、‘红栗’、‘杂 35’和‘处暑红’5 个品种枝条脯氨酸含量却呈一直“上升”的变化趋势。整体来看,‘燕山早丰’枝条中的脯氨酸含量一直处于较高水平,‘杂 35’枝条中的脯氨酸含量一直处于较低水平。

将各品种不同低温处理后枝条的脯氨酸含量与 LT_{50} 进行相关性分析,结果表明不同低温处理下脯

氨酸含量与 LT_{50} 均无显著相关性,说明板栗枝条中脯氨酸含量与抗寒性无相关性,不宜作为板栗枝条抗寒性鉴定的指标。

2.7 不同板栗枝条组织结构特征与抗寒性之间关系

测定及计算的各品种枝条木质部、木栓层厚度和髓半径、枝条半径以及木质部比率和木栓层比率列于表 8。可以看出,10 个板栗品种一年生枝条各组织测定值差异较大。髓半径最大的为‘粘底板’,最小的为‘红栗’,两者相差 1.3 倍;木质部最厚为‘粘底板’,最小的为‘红栗’,两者相差 1.8 倍;木栓层最厚为‘燕山早丰’,最小的为‘杂 35’,两者相差 2.2 倍;枝条半径最大的是‘粘底板’,最小的是‘红栗’,两者相差 1.5 倍;木质部比率最大的是‘粘底板’,最小的是‘杂 35’,两者相差 1.2 倍;木栓层比率最大的是‘燕山早丰’,最小的是‘杂 35’,两者相差 2.2 倍。木栓层和木栓层比率最高品种和最低品种差异最大,‘燕山早丰’和‘燕宽’的木栓层厚度和木栓层比率均显著高于其他品种。

将 10 个品种的木质部、木栓层厚度、髓半径、枝条半径,以及木质部比率和木栓层比率的测定结果与相对电导率拟合的 LT_{50} 进行相关性分析,结果见表 8。相关分析表明,板栗一年生枝条的木质部厚度、木质部比率、髓半径和枝条半径与其 LT_{50} 之间呈负相关,但未达到显著水平,而木栓层厚度和木栓层比率与其 LT_{50} 之间呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.955^{**} 和 -0.826^{**} 。可以认为木栓层越厚、在茎结构中所占比率越大, LT_{50} 越低,抗寒性越强,因此一年生枝条木栓层厚度及其在茎结构中所占的比率可作为板栗枝条抗寒性鉴定的结构指标之一。

2.8 板栗各抗寒指标的相关性分析

将筛选得到的与 LT_{50} 呈极显著相关的 6 个抗寒指标进行相关性分析(表 9)。可以看出,相对电导率与冻害指数和丙二醛含量、冻害指数与丙二醛含量、着色指数与木栓层厚度、木栓层与木栓层比率之间均存在极显著正相关;总着色度与木栓层比率呈显著正相关;相对电导率与木栓层厚度、冻害指数与总着色度、木栓层厚度和木栓层比率、丙二醛与木栓层厚度之间均存在极显著负相关;相对电导率与总着色度和木栓层比率存在显著负相关。由此可见,各抗寒指标所提供的信息会有一些的重叠和疏漏,应用多个抗寒指标对不同板栗品种进行抗寒性综合评价。

表5 低温处理下板栗枝条丙二醛含量

Table 5 MDA contents of chestnut branches under low temperatures

品种 Cultivar	温度/℃ Temperature						nmol/g
	4	-10	-15	-20	-25	-30	
燕山早丰	4.37±0.51 ab	4.57±0.61 a	4.77±0.71 a	5.65±0.76 ab	5.40±0.56 ab	5.98±0.53 a	4.74±0.54 a
燕宽	4.73±0.53 bc	4.51±0.44 a	5.42±0.42 ab	5.03±0.55 a	5.71±0.51 abc	7.29±0.43 bc	4.21±0.54 a
燕奎	4.78±0.58 bc	4.52±0.55 a	5.41±0.56 ab	5.96±0.40 abc	4.86±0.57 a	6.01±0.58 a	4.66±0.59 a
紫珀	4.41±0.48 ab	5.21±0.47 abc	5.46±0.47 ab	6.23±0.45 bc	6.32±0.47 bc	6.89±0.49 abc	4.84±0.53 a
燕红	4.63±0.61 bc	6.45±0.61 ef	6.95±0.61 c	8.89±0.61 e	7.60±0.61 e	7.36±0.61 c	7.71±0.61 c
红粟	6.54±0.65 d	7.25±0.60 f	9.62±0.61 d	9.74±0.58 e	7.46±0.77 de	7.15±0.80 bc	8.30±0.65 c
杂35	4.84±0.77 bc	6.25±0.63 cd	7.01±0.55 c	9.71±0.65 e	8.39±0.32 e	7.06±0.54 abc	7.70±0.54 c
粘底板	3.43±0.42 a	4.97±0.41 ab	6.56±0.35 c	6.71±0.35 cd	7.97±0.47 e	7.17±0.50 bc	6.46±0.55 b
处暑红	5.39±0.41 bc	5.59±0.42 bcd	6.03±0.78 bc	6.20±0.81 bc	6.51±0.72 cd	6.79±0.71 abc	5.92±0.63 b
罗田1号	5.51±0.49 c	5.65±0.69 bcd	5.92±0.64 bc	7.72±0.62 d	5.50±0.49 abc	6.20±0.52 ab	4.45±0.39 a

表6 低温处理下板栗枝条可溶性糖含量

Table 6 Soluble sugar contents of chestnut branches under low temperatures

品种 Cultivar	温度/℃ Temperature						/%
	4	-10	-15	-20	-25	-30	
燕山早丰	1.08±0.04 b	0.92±0.01 b	0.87±0.07 b	1.06±0.01 d	0.92±0.08 b	0.96±0.01 e	0.81±0.06 cd
燕宽	1.38±0.03 e	1.20±0.07 e	0.97±0.01 def	1.22±0.02 f	1.13±0.10 c	1.11±0.05 g	0.93±0.02 ef
燕奎	1.27±0.03 d	1.06±0.02 c	0.99±0.05 ef	1.08±0.01 d	0.92±0.02 b	0.90±0.05 d	0.80±0.02 cd
紫珀	1.02±0.03 b	0.82±0.01 a	0.91±0.02 bcd	1.16±0.05 e	1.05±0.11 bc	1.03±0.01 f	0.98±0.06 f
燕红	1.11±0.01 b	0.82±0.06 a	1.02±0.02 f	0.97±0.04 c	0.95±0.05 b	0.81±0.04 c	0.88±0.08 de
红粟	1.05±0.07 b	0.78±0.01 a	0.90±0.01 bc	0.95±0.01 c	0.98±0.06 b	0.73±0.03 b	0.68±0.09 ab
杂35	1.19±0.04 c	0.90±0.06 b	0.95±0.03 cde	0.79±0.01 a	0.97±0.04 b	0.83±0.01 c	0.76±0.08 bc
粘底板	1.33±0.09 de	1.02±0.02 c	0.89±0.02 b	1.11±0.01 d	1.02±0.14 bc	0.99±0.01 ef	0.91±0.03 ef
处暑红	1.10±0.03 b	1.05±0.02 c	0.61±0.01 a	0.90±0.03 b	0.71±0.01 a	0.71±0.02 ab	0.62±0.01 a
罗田1号	0.79±0.05 a	0.79±0.01 a	0.63±0.06 a	0.75±0.01 a	0.69±0.10 a	0.65±0.05 a	0.63±0.01 a

表 7 低温处理下板栗枝条的游离脯氨酸含量
Table 7 Proline contents of chestnut branches under low temperatures

品种 Cultivar	温度/°C Temperature						ug/g
	4	-10	-15	-20	-25	-30	
燕山早丰	46.91±3.02 d	65.81±2.59 g	151.01±3.32 f	164.56±4.25 f	144.05±2.14 h	203.44±5.75 g	101.93±3.65 c
燕宽	49.56±4.00 d	39.35±4.15 d	50.59±2.04 b	69.39±5.95 c	124.13±1.02 g	160.64±4.93 ef	144.83±6.63 e
燕奎	46.92±6.01 d	23.77±3.09 d	77.77±1.01 c	95.74±1.13 e	101.07±0.98 de	73.25±1.05 c	219.75±8.82 h
紫珀	24.01±1.08 b	25.18±0.60 c	79.53±4.05 c	85.31±4.04 d	95.43±3.10 cd	123.17±2.97 d	190.13±6.97 g
燕红	30.58±2.04 c	21.11±2.10 b	69.02±7.28 c	76.38±3.10 c	103.18±0.97 ef	162.10±5.96 f	88.80±4.91 b
红栗	33.30±2.09 c	50.13±2.76 f	50.67±0.69 b	51.64±7.21 b	53.50±4.06 b	53.76±5.20 b	104.95±5.10 cd
杂 35	5.64±1.03 a	4.93±1.08 a	15.16±2.08 a	21.76±4.13 a	31.29±9.42 a	29.96±4.08 a	72.60±3.12 a
粘底板	5.82±0.88 a	17.93±1.92 b	46.32±0.08 b	46.27±3.92 b	109.57±2.84 f	152.71±7.93 e	111.48±2.22 d
处暑红	45.09±2.06 d	44.99±1.95 e	94.10±2.94 d	103.31±3.16 e	90.73±2.16 c	60.70±7.71 b	178.36±2.50 f
罗田 1 号	20.44±5.80 b	21.48±2.18 bc	134.95±3.91 e	168.34±4.79 f	166.04±5.80 i	126.30±2.84 d	104.62±1.12 cd

表 8 10 个板栗品种(系)一年生枝条组织结构测定结果

Table 8 The average values of anatomical structures of annual branches of ten chestnut varieties

品种 Cultivar	髓半径/mm Pith radius	木质部/mm Xylem	木栓层/ μm Phellem	枝条半径/mm Branch radius	木质部比率/% Xylem ratio	木栓层比率/% Phellem ratio
燕山早丰	0.79±0.01 ab	2.02±0.06 ab	32.10±2.16 d	3.59±0.07 ab	56.31±4.38 a	0.89±0.58 e
燕宽	0.86±0.03 bcd	2.67±0.24 de	28.95±2.15 d	4.19±0.29 bcd	63.65±8.92 bc	0.69±1.18 d
燕奎	0.83±0.01 bc	2.19±0.03 abcd	22.87±2.86 c	3.78±0.04 abc	57.88±7.97 a	0.61±0.23 cd
紫珀	0.85±0.01 bcd	2.56±0.25 cde	20.12±2.30 bc	4.07±0.09 bc	62.79±4.91 bc	0.49±4.73 abc
燕红	0.81±0.02 abc	2.18±0.30 abcd	15.60±1.19 b	3.73±0.29 abc	58.27±4.47 a	0.42±3.58 ab
红栗	0.72±0.03 a	1.79±0.01 a	17.10±0.77 ab	3.13±0.07 a	57.32±2.82 a	0.55±1.53 c
杂 35	0.81±0.05 abc	2.10±0.12 abc	14.88±0.24 a	3.69±0.22 abc	56.91±2.80 a	0.40±0.05 a
粘底板	0.94±0.04 d	3.17±0.10 f	19.59±0.82 b	4.78±0.21 d	66.37±1.38 c	0.41±0.89 a
处暑红	0.83±0.15 bc	2.46±0.68 bcde	20.30±1.41 bc	3.95±0.98 bc	62.01±11.44 b	0.51±2.08 bc
罗田 1 号	0.90±0.04 cd	2.73±0.17 ef	17.45±1.84 ab	4.30±0.23 cd	63.44±6.28 bc	0.41±0.46 a

表9 板栗枝条各抗寒指标间相关系数

Table 9 Correlation coefficient of cold resistance indexes of chestnut branches

指标 Indexes	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1					
X_2	0.958**	1				
X_3	-0.644*	-0.779**	1			
X_4	0.939**	0.936**	-0.617	1		
X_5	-0.908**	-0.930**	0.777**	-0.829**	1	
X_6	-0.757*	-0.790**	0.749*	-0.620	0.926**	1

注: X_1 , 相对电导率; X_2 , 冻害指数; X_3 , 总着色度; X_4 , 丙二醛含量; X_5 , 木栓层厚度; X_6 , 木栓层比率;
* 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

Note: X_1 , relative electrical conductivities; X_2 , freeze injury index; X_3 , dyeing degree; X_4 , MDA contents;
 X_5 , phellem thickness; X_6 : phellem ratio; * means significance at $P < 0.05$, ** means significance at $P < 0.01$.

2.9 不同板栗品种抗寒性综合评价

运用隶属函数法,以6个抗寒指标隶属度的平均值对10个板栗品种枝条抗寒性进行综合评价并排序,平均隶属度越大,抗寒性越强。结果如表10所示,10个板栗品种枝条抗寒性强弱依次为:‘燕宽’>‘燕山早丰’>‘燕奎’>‘处暑红’>‘紫珀’>‘粘底板’>‘罗田1号’>‘红栗’>‘燕红’>‘杂35’,此排序结果与由相对电导率确定的 LT_{50} 的排序结果基本一致,只是‘紫珀’和‘处暑红’,‘燕红’和

‘杂35’顺序颠倒,但是前两者均是抗寒性中品种,后两者均是抗寒性极弱品种,所以顺序虽然颠倒,但是抗寒性没有显著差异。

如图1所示,依据10个板栗品种平均隶属度进行系统聚类分析,可以将其划分为4类,第I类包括‘燕宽’和‘燕山早丰’,其抗寒能力强;第II类包括‘燕奎’、‘处暑红’和‘紫珀’,其抗寒性中;第III类包括‘粘底板’、‘罗田1号’和‘红栗’,其抗寒性弱;第IV类包括‘燕红’和‘杂35’,其抗寒性极弱。

表10 不同板栗枝条抗寒性指标隶属度值

Table 10 Subordinative level of cold resistance indexes of different chestnut branches

品种 Cultivar	相对电导率 REC	冻害指数 Freeze injury index	总着色度 Dyeing degree	丙二醛含量 MDA contents	木栓层厚度 Phellem thickness	木栓层比率 Phellem ratio	平均隶属度 Average subordinative level	抗寒性排序 Order of cold resistance
燕山早丰	0.95	0.85	0.69	0.87	1.00	1.00	0.89	2
燕宽	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	0.59	0.90	1
燕奎	0.83	0.67	0.38	0.80	0.46	0.42	0.59	3
紫珀	0.64	0.63	0.19	0.75	0.30	0.19	0.45	5
燕红	0.01	0.00	0.00	0.18	0.04	0.04	0.04	9
红栗	0.00	0.21	0.44	0.00	0.13	0.30	0.18	8
杂35	0.08	0.05	0.06	0.01	0.00	0.01	0.03	10
粘底板	0.36	0.43	0.13	0.64	0.27	0.02	0.31	6
处暑红	0.41	0.62	0.88	0.75	0.31	0.23	0.53	4
罗田1号	0.32	0.33	0.56	0.43	0.15	0.01	0.30	7

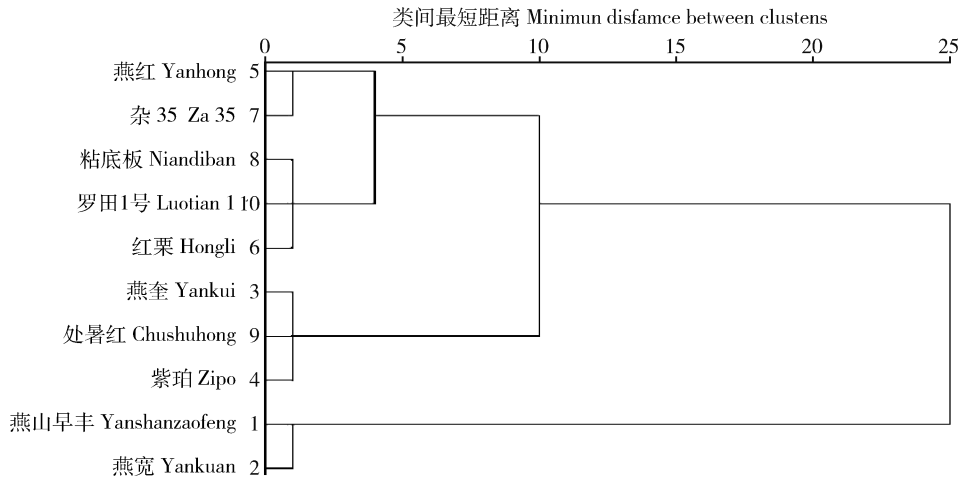


图 1 不同板栗品种平均隶属度聚类分析图

Fig. 1 Hierarchical cluster analysis on cold resistance of different chestnut cultivars by average subordinative level

3 讨论

阐明植物遭受冻害后的形态结构、生物膜结构、生理、生化和调控分子等方面的变化特征与抗寒性之间的关系,是准确鉴定植物抗寒性的基础。已知,部分组织结构解剖特征(木质部、木栓层厚度等)可用于鉴别植物抗寒性^[15-16];植物组织褐变程度以及组织活力也可用于鉴定桃、核桃和葡萄的抗寒性^[5,6,8,17-18];组织内可溶性糖含量、MDA 含量、脯氨酸含量、SOD 活性、POD 活性、膜脂肪酸组成等指标也在鉴定果树抗寒性方面取得很好的应用效果^[19-20]。基于电解质外渗量测定开发的电导法是木本植物上应用最广泛、最准确的一种抗寒性鉴定方法^[21-23],由电导法测定的电导率值配以 Logistic 方程求出的 LT_{50} 已广泛应用于葡萄、苹果、核桃等多种果树抗寒性鉴定^[21-25]。普遍认为,相对电导率和 LT_{50} 是植物抗寒性评价的两大重要理化指标,其鉴定结果与物种的田间表现基本一致^[21,26-27]。由于不同生理、生化和组织结构指标在不同树种上与其抗寒性间的关系不尽相同^[6,28-29],本研究测定了 10 个板栗品种的不同低温胁迫后休眠期 1 年生枝条 12 个生理、生化指标变化和组织结构指标差异,并通过相对电导率配以 Logistic 方程确定了枝条的 LT_{50} 。通过枝条各指标与其 LT_{50} 相关性分析发现,所测定的 12 种在植物上与抗寒性有关的指标中,仅有枝条相对电导率、冻害指数、总着色度、MDA 含量、木栓层厚度和木栓层比率 6 个指标与板栗枝条 LT_{50} 呈

极显著相关关系,说明这 6 个指标与板栗枝条抗寒性关系密切,可以作为休眠期板栗枝条抗寒性评价的理化和组织结构指标。

果树抗寒性是受多种因素共同影响的复杂生理生化过程,指标所提供的信息会有一些的重叠和疏漏,使用单一指标评价样本抗寒性时,会因样本自身所处环境和生理状况的不同使得不同单一指标对同一批次样品的抗寒性评价结果不一致或是矛盾,所以孤立的使用单一指标反映抗寒本质误差较大,应筛选具有显著相关的若干生理生化指标对研究材料进行抗寒性综合评价^[22,30]。隶属函数法能够克服单个指标的片面性,全面分析植物的实际抗寒能力^[12,30]。目前这种方法已经在苹果、石榴和葡萄等树种的抗寒性鉴定中广泛应用^[20,31]。本研究运用隶属函数法计算了与板栗枝条抗寒性关系密切的 REC 等 6 个指标的平均隶属度,对 10 个板栗品种枝条抗寒性进行了综合分析排序,并且依据平均隶属度通过聚类分析将供试品种划分为抗性不同的 4 类,此研究结果与各品种田间抗寒性表现^[4,32] 基本一致,说明采用隶属函数法能够较为科学地评价和区分板栗休眠期枝条的抗寒性强弱,适用于对板栗进行抗寒性准确评价。

本研究中通过对原产 6 个省市的 10 个板栗品种抗寒性综合评价,认为各品种抗寒性强弱依次为:燕宽>燕山早丰>燕奎>处暑红>紫珀>粘底板>罗田 1 号>红栗>燕红>杂 35,聚类法可将其划分为抗寒性强、中、弱、极弱四类。目前,这 10 个板栗

品种均为我国不同板栗产区优良品种^[4],因此某一品种主栽区以外省份进行引种栽培时,可以该地已有的本研究中提及的某一品种在该地的田间抗寒表现为参考,对拟引入品种在该地的抗寒表现进行科学预判,比如栽植粘底板不发生冻害的地区,引种罗田1号、处暑红、燕宽(抗寒性等同或强于粘底板)则不发生冻害,反之,引种杂35、燕红(抗寒性低于粘底板)则有可能发生冻害,如此以避免盲目引种带来的因抗寒性不适宜导致的生产损失。

参考文献 References

- [1] 王广鹏,孔德军,张树航,刘庆香. 抗寒板栗新品种‘燕兴’[J]. 园艺学报,2012,39(10):2085-2086
Wang G P; Kong D J, Zhang S H, Liu Q X. A new cold-resistant chestnut cultivar ‘Yanxing’[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(10): 2085-2086 (in Chinese)
- [2] 陈楚莹,王开平,陈吉录. 不同板栗品种抗寒鉴定[J]. 林业科技通讯,1980,11:7-10
Chen C Y, Wang K P, Chen J L. Assessment of freezing tolerance in different cultivars of *Castanea mollissima* [J]. *Forest Science and Technology*, 1980, 11: 7-10 (in Chinese)
- [3] 陈丽华. 板栗冻害调查分析[J]. 辽宁林业科技,1995,5:43-44
Chen L H. Investigation on freezing injury of chestnut, *Journal of Liaoning*[J]. *Forestry Science & Technology*, 1995, 5: 43-44 (in Chinese)
- [4] 张宇和,刘懿. 中国果树志板栗榛子卷[M]. 北京:中国林业出版社,2005:69-133
Zhang Y H, Liu L. *Chinese Fruit Tree Chestnut Hazelnut Roll* [M]. Beijing: China Forestry Publishing Press, 2005: 69-133 (in Chinese)
- [5] 袁军伟,郭紫娟,马爱红,刘长江,韩斌,赵胜建. 葡萄砧木抗寒性的鉴定与综合评价[J]. 中国农学通报,2013,29(4):99-103
Yuan J W, Guo Z J, Ma A H, Liu C J, Han B, Zhao S J. Cold resistance identification and comprehensive evaluation of grape rootstocks[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(4): 99-103 (in Chinese)
- [6] 田景花,王红霞,高仪,张志华. 核桃属植物休眠期的抗寒性鉴定[J]. 园艺学报,2013,40(6):1051-1060
Tian J H, Wang H X, Gao Y, Zhang Z H. Assessment of freezing tolerance of *Juglans* germplasms by using annual dormant branches [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(6): 1051-1060 (in Chinese)
- [7] 贺普超,牛立新. 我国葡萄属野生种抗寒性的研究[J]. 园艺学报,1989,16(2):81-88
He P C, Niu L X. Study of cold hardiness in the wild *Vitis* native to China [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1989, 16(2): 81-88 (in Chinese)
- [8] 张博勇,张康健,张檀. 杜仲15个初选优良无性系抗寒性研究[J]. 西北林学院学报,2003,18(2):4-5
Zhang B Y, Zhang K J, Zhang T. Cold-resistance of fifteen preliminary selected *Eucommia ulmoides* clones of plus trees [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, 18(2): 4-5 (in Chinese)
- [9] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 上海:科学出版社,1999:303-306
Tang Z C. *Modern Plant Physiology Experiment Guide* [M]. Shanghai: Science Press, 1999: 303-306 (in Chinese)
- [10] 张义贤,张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):857-860
Zhang Y X, Zhang L P. Effects of heavy metals on membrane lipid peroxidation, proline and soluble sugar in roots of *Hordeum vulgare* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 857-860 (in Chinese)
- [11] 莫惠栋. Logistic方程及其应用[J]. 江苏农学院学报,1983,4(2):53-57
Mo H D. Logistic equation and its application [J]. *Journal of Jiangsu Agriculture*, 1983, 4(2): 53-57 (in Chinese)
- [12] 李鹏程,苏学德,王晶晶,郭绍杰,李铭,符小发. 8种葡萄砧木品种的低温半致死温度与抗寒性综合评价[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(1):92-96
Li P C, Su X D, Wang J J, Guo S J, Li M, Fu X F. Semi-lethal temperature and comprehensive evaluation of hardiness on eight kinds of grape rootstock [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2017, 52(1): 92-96 (in Chinese)
- [13] 周书娟,王飞,田治国,王朴,张喜琴. 新疆‘树上干’杏耐寒株系的鉴定与筛选[J]. 园艺学报,2011,38(10):1976-1982
Zhou S J, Wang F, Tian Z G, Wang P, Zhang X Q. Screening cold hardy genotype of Xinjiang local apricot variety ‘Shushang gan’ in China [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(10): 1976-1982 (in Chinese)
- [14] 藕丹,樊军锋,周永学,高建社. 10个白杨派无性系抗寒性的比较与评价[J]. 东北林业大学学报,2017,45(1):16-19
Ou D, Fan J F, Zhou Y X, Gao J S. Comparison and evaluation on cold-tolerance of ten varieties in Sect *Leuce* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(1): 16-19 (in Chinese)
- [15] 张谷雄,胡国谦,王宁,孙晓文. 柑桔枝叶形态解剖特征与抗寒性的关系[J]. 南京农业大学学报,1988,11(4):24-28
Zhang G X, Hu G Q, Wang N, Sun X W. Relationships between morphologic and anatomic characters of shoots and leaves in citrus and its cold resistance [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1988, 11(4): 24-28 (in Chinese)
- [16] 高庆玉,崔方. 黑龙江省5个主栽葡萄品种抗寒性鉴定[J]. 中国果树,2009,2:21-23
Gao Q Y, Cui F. Identification to hardy of 5 grape major cultivars in Heilongjiang Province [J]. *China Fruits*, 2009, 2: 21-23 (in Chinese)
- [17] 杨跃华. TTC分析法在茶树抗寒性鉴定中的应用[J]. 中国茶

- 叶,1989,(5):15-16
Yang Y H. Studies on assessment of freezing tolerance of tea plant by TTC analytical method[J]. *China Tea*, 1989,(5):15-16 (in Chinese)
- [18] 刘天明,张振文,李华. 桃品种耐寒性研究[J]. *果树科学*,1998,15(2):107-111
Liu T M,Zhang Z W,Li H. The hardiness for peach cultivars [*Prunus persica* (L)/batsch [J]]. *Journal of Fruit Science*, 1998,15(2):107-111 (in Chinese)
- [19] 何伟. 山葡萄种质资源抗寒性评价方法的建立及评价研究[D]. 北京:中国农业科学院,2015
He W. Development of evaluation method and utilization for cold resistance of germplasm resources of vitis amurensis[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2015 (in Chinese)
- [20] 付超,周雪玲,朱春林. 应用隶属函数法综合评价高酸苹果抗寒性及果实品质[J]. *北方园艺*,2017,(2):11-15
Fu C,Zhou X L,Zhu C L. Comprehensive evaluation of cold resistance and fruit quality of apple with high acidity by subordinate function[J]. *Northern Horticulture*,2017,(2):11-15 (in Chinese)
- [21] 梁锁兴,席海源,王文平,侯东梅,孟庆仙,张明丽. 电解质渗出率配合 logistic 方程鉴定 7 个平欧杂种榛品种(系)的抗寒性[J]. *农学学报*,2017,7(4):34-38 (in Chinese)
Liang S X,Xi H Y,Wang W P,Hou D H,Meng Q X,Zhang M L. Determination of cold-resistance for 7 flat-european hazel cultivars through electrical permeation rate combining logistic equation[J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7 (4): 34-38 (in Chinese)
- [22] 李瑞雪,金晓玲,胡希军,柴弋霞,蔡梦颖,罗峰,张方静. 6 种含笑属植物抗寒性分析与综合评价[J]. *应用生态学报*,2017,28(5):1464-1472
Li R X,Jin X L,Hu X J,Chai Y X,Cai M Y,Zhang F J. Analysis and comprehensive evaluation on cold resistance of six varieties of Michelia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(5):1464-1472 (in Chinese)
- [23] Lukatkin A S, Brazaityte A, Bobinas C. Chilling injury in chilling-sensitive plants: A review[J]. *Agriculture*, 2012, 99(2):111-124
- [24] Liu W P, Su S C, Liu X, Hou Z X. Comparison of different cultivars of blueberry overwintering ability in Qingdao of China [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, 3(3): 391
- [25] Palonen P, Buszard D. Current state of cold hardiness research on fruit crops[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1997, 77(3): 399-420
- [26] 谢晓金,郝日明. 南京地区 12 种常绿阔叶树种冬季抗寒性动态变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2149-2154
Xie X J, Hao R M. Dynamic changes of cold hardiness in winter in twelve evergreen broad-leaved species from Nanjing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2149-2154 (in Chinese)
- [27] 缴丽莉,路丙社,白志英,孟庆瑞,甄红伟. 四种园林树木抗寒性的比较分析[J]. *园艺学报*, 2006, 33(3): 667-670
Jiao L L, Lu B S, Bai Z Y, Meng Q R, Zhen H W. The Comparison of cold resistance of four gardening young trees [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(3): 667-670 (in Chinese)
- [28] 徐呈祥. 提高植物抗寒性的机理研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7966-7980
Xu C X. Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7966-7980 (in Chinese)
- [29] 王柏,李志坚. 植物脂肪酸与抗寒性关系研究进展[J]. *甘肃农业科技*, 2014, (12): 54-57
Wang B, Li Z J. Research progress on the relationship between plant fatty acid and cold resistance [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2014, (12): 54-56 (in Chinese)
- [30] 申桂艳. 林木抗寒性研究方法[J]. *吉林林业科技*, 2017, 46(1): 32-34
Shen G Y. The forest cold resistance research methods [J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2017, 46(1): 32-34 (in Chinese)
- [31] 刘贝贝,陈利娜,牛娟,李好先,张杰,曹尚银. 6 个石榴品种抗寒性评价及方法筛选[J]. *果树学报*, 2018, 35(1): 66-73
Liu B B, Chen L N, Niu J, Li H X, Zhang J, Cao S Y. Selection of methods for evaluation on cold tolerance of six pomegranate varieties [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(1): 66-73 (in Chinese)
- [32] 王广鹏,陆凤勤,孔德军. 板栗高校栽培技术与主要病虫害防治 [M]. 北京:中国农业出版社,2016:8-28
Wang G P, Lu F Q, Kong D J. *Cultivation Techniques and Diseases and Pests Control of Chinese Chestnut* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2016: 8-28 (in Chinese)

责任编辑:王燕华