

5个苹果砧木品种枝条的低温半致死温度及耐寒性评价

王红平^{1,2}, 董铁¹, 刘兴禄¹, 尹晓宁¹, 孙文泰¹, 牛军强¹, 马明^{1,2*}

(¹甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070; ²甘肃农业大学园艺学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】探寻适宜评价苹果砧木抗寒性的方法, 将低温半致死温度(LT₅₀)和冻害指数相结合而快速准确判断植物的抗寒能力。【方法】以 SH1、Y-1、B9、M9T337 和 M26 的 1 a 生深度休眠期的枝条为试材, 对其进行 -15 ℃、-20 ℃、-25 ℃、-30 ℃、-35 ℃、-40 ℃ 低温冷冻 12 h, 测定低温胁迫后的相对电导率, 利用 Logistic 方程确定 LT₅₀ 的大小, 同时采用目测法计算相应胁迫温度下的冻害指数。【结果】经低温胁迫, 5 个苹果砧木枝条的相对电导率呈“S”型曲线, 相对电导率与胁迫温度之间呈极显著负相关。利用相对电导率拟合 Logistic 方程确定的 SH1、Y-1、B9、M9T337 和 M26 低温半致死温度分别为 -36.0 ℃、-32.7 ℃、-40.1 ℃、-23.4 ℃ 和 -31.3 ℃。冻害指数随着胁迫温度的降低呈不等幅度的上升趋势且在某一低温区出现突然越级的现象。【结论】利用低温半致死温度和冻害指数法可简单快速评价苹果砧木枝条的抗寒性。综合得出, 5 个苹果砧木枝条的抗寒能力依次为 B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337。

关键词: 苹果砧木; 抗寒性; 相对电导率; 半致死温度; 冻害指数

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2020)04-0495-07

A study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for branches of five apple rootstock cultivars

WANG Hongping^{1,2}, DONG Tie¹, LIU Xinglu¹, YIN Xiaoning¹, SUN Wentai¹, NIU Junqiang¹, MA Ming^{1,2*}

(¹Institute of Fruit and Flower, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; ²College of Horticulture, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: 【Objective】Heald invented the electrical conductance method in 1902 and Dertez used it in cold resistance identification in 1932. It has been recognized that this method is relatively reliable and has been widely used in the identification of cold resistance in fruit trees such as grapes, pears, citrus and apples. The damage caused by low temperature to fruit trees is one of the main natural disasters affecting fruit tree production in many parts of the world today. Cold resistance breeding is one of the goals of apple breeders. For the identification of cold resistance, many methods were used in the past, including electrical conductivity method, growth recovery method, tissue browning method, electrical impedance diagram method and Logistic equation method. Exploring the method for evaluating the cold resistance of apple rootstocks and in order to combine the LT₅₀ and the freezing damage index to quickly and accurately determine the cold resistance of plants. It was suggested that 50% of electrolyte osmotic ratio could be used to determine the critical semi-lethal temperature for apple cultivars. In order to compare the cold resistance of branches of five apple rootstocks and select highly cold-resistant resources for breeding, and the electrical conductivity and freezing damage index were used to evaluate their cold resistance. 【Methods】The experiments took branches of five apple rootstock cultivars including SH1, Y-1, B9, M9T337 and M26 as materials. Changes in cell membrane permeability at -15 ℃, -20 ℃, -25 ℃, -30 ℃, -35 ℃ and -40 ℃ were studied with one-year-old branches using electrical conduc-

收稿日期: 2019-08-23 接受日期: 2020-02-17

基金项目: 甘肃省苹果产业科技攻关项目(GPCK2013-3); 国家苹果产业技术体系专项(CARS-27); 甘肃省农业科学院地合作项目(2017GAAS57); 公益性行业(农业)科研专项(201303104); 国家重点研发计划课题(2016YFD0201135); 农业部西北地区果树科学观测实验站

作者简介: 王红平, 男, 硕士, 主要从事果树栽培与生理研究。Tel: 17739805480, E-mail: 1214995694@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 0931-7611659, E-mail: maming65118@163.com

tance method and the semi-lethal temperatures (LT_{50}) was obtained from the Logistic equations of electrical conductivity vs temperature. They were compared among the rootstock cultivars in relation to freezing injury index under different low temperatures.【Results】The results showed that the relationships between the relative electrolyte exudation rate and the temperature in the tested branches fitted well with the Logistic curve equation. The electrolyte leakage ratio of apple branches increased in an “S” curve pattern with the decrease in temperature. The semi-lethal temperature of the five apple cultivars ranged from $-23.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. With the ability to recover from injury damage in some cells, the conductivity of the whole tissue always followed a “S” pattern in different temperatures. The fitting coefficient ranged from 0.899 to 0.973, which was higher than the correlation coefficient ($r_{0.01}=0.874$, $p < 0.01$), indicating that the regression curve was highly reliable. The semilethal temperature of M9T337 was in $-23.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; it was $-40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ of B9, and around $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in SH1, Y-1 and M26. According to lethal low temperature, it can be inferred that the order of cold resistance among the five varieties was $B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337$. The freezing damage index at each temperature was calculated. It was highest in M9T337, lowest in B9, and similar among SH1, Y-1 and M26. The semi-lethal low temperature of branches was positively correlated with the freezing index at each temperature. The correlation coefficients were in the range from 0.820 to 0.979, which were all greater than the correlation coefficient ($p_{0.05}=0.811$). With the decrease of temperature, the freezing damage index showed an upward trend, and a sudden jump occurred in a low temperature range. This indicates that the level of the freeze damage index became higher when the branches were exposed to the critical point of lethal temperature. After low temperature stress, the browning degree and time sequence of each rootstock varieties were obviously different, indicating that the medulla, xylem and phloem of cell structure were different. The sensitivity and reaction time of the branches to bear freezing damage were related to the characteristics of the varieties. According to freezing damage index, it could be inferred that the order of cold resistance of the five apple rootstock was $B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337$. With the decrease in temperature, the freezing damage index showed a rising trend with a sudden upsurge occurred at certain low level. The cold resistance of apple stock can be reflected objectively and accurately with semi-lethal low temperature combined with freezing damage index.【Conclusion】The cold resistance of apple rootstocks can be easily and quickly evaluated using the semi-lethal temperature and the freezing damage index methods. The cold resistance of the five apple rootstock cultivars was in the order of $B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337$.

Key words: Apple scion branch; Cold resistance; Relative conductivity; Semi-lethal temperature; Freezing injury index

苹果属于蔷薇科苹果属(*Malus*)多年生落叶果树。世界上苹果属植物约有 35 种^[1],主要分布在北温带,包括亚洲、欧洲和北美洲。中国原产有 24 个种,目前我国的苹果栽培面积、总产量、人均占有量与出口量均居世界第一^[2-3],在促进农民脱贫致富,改善农村经济状况,农业产业化方面起到了重大作用^[3-4]。甘肃陇东地区是我国苹果发展的主产区,但冬季低温和倒春寒现象造成了当地苹果砧木发生冻害,这严重制约了苹果矮砧栽培模式的发展,因

此筛选抗寒性较强的苹果砧木工作已经到了刻不容缓的地步。近几年来,科研工作者主要侧重于苹果栽培品种的抗寒性、抗旱性和抗病虫害等方面的研究,也取得了非常明显的进展。目前,国内外学者对植物的抗寒性鉴定主要从细胞形态结构、生理代谢和基因工程等方面进行研究,植物的抗寒性与细胞膜的流动性、膜脂过氧化程度、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量等密切相关^[5-6]。但由于植物抗寒机制的复杂程度,影响抗寒性的因素众多,单一

指标评价植物的抗寒性是相对片面的,因此很多学者采用与抗寒性相关的多个指标,同时利用隶属函数法进行抗寒性综合评价。何伟等^[7]运用电导法配合 Logistic 方程和隶属函数法综合评价了不同葡萄品种和砧木枝条的抗寒性,认为与抗寒指标相关的平均隶属度曲线变化能准确反映其抗寒能力的强弱。杨凤祥等^[8]通过主成分分析结合聚类分析对不同草莓品种间抗寒能力的比较发现,认为二者的重复率超过 70%以上,能够准确反映抗寒能力的大小。植物的半致死温度(LT₅₀)具有遗传性状,是衡量植物耐寒力的稳定指标,但它也受温度以外的其他因素影响,如原产地以及地域分布等^[9]。关于植物的抗寒研究有不少的报道,抗寒生理的研究认为电导率大小与植株的抗寒力呈负相关^[10],同时配以 Logistic 方程拟合曲线,其拐点温度可被认为是植物的半致死温度,可以更好的区别出物种或品种之间的抗寒性差异^[11]。目前,关于苹果的砧木抗寒及苹果品种生物学特性研究很多,但是对甘肃陇东地区引进的苹果品种抗寒适应性方面的研究报道却不多。笔者通过人工模拟低温环境的方法,对 5 个苹果品种的 1 a 生枝条进行低温诱导,并对相对电导率和冻害指数指标进行测定,以期筛选出适宜当地气候类型的苹果矮化砧木,这对于发展当地苹果矮化密植建园、育苗及推广具有重要参考价值。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试的 5 个苹果砧木(SH1、Y-1、B9、M9T337

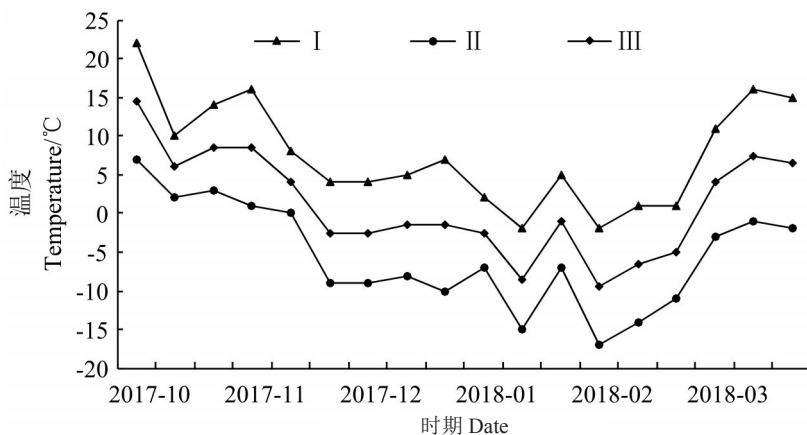
和 M26)于 2015 年 4 月栽植于甘肃省静宁县国家苹果产业体系综合试验站。2018 年 12 月底开始露地采集枝条,每品种选取 5 株树,取中部枝条,长度约 50 cm,粗度约 0.75 cm,每株采集 70 根生长健壮、粗细均匀、无病虫害的 1 a 生深度休眠的枝条。

1.2 静宁县2017年10月至2018年3月温度的旬变化

静宁县 2017 年 10 月至 2018 年 3 月期间旬最高温度、旬最低温度和旬平均温度变化情况见图 1 (来自于甘肃省气象局数据)。整个秋冬季节静宁县旬最低温度在 2018 年 1 月中旬和 2018 年 2 月初出现两次低谷。从 2017 年 11 月中旬开始,温度开始呈现持续下降的趋势,到 2018 年 1 月中旬受强冷空气的影响,出现寒潮天气,导致降温幅度较大。于 2018 年 2 月 8 日出现当年日最低温度-15℃,2018 年 2 月初再次出现寒潮天气,3 月初气温才开始逐渐回升。

1.3 方法

2017 年 12 月,将采集来的枝条依次用自来水、蒸馏水和重蒸馏水冲洗两遍,用白色干净纱布擦干后,石蜡封闭枝条两端的剪口。将每种砧木枝条分成 7 组,每组 10 条,留下其中一组,在室温下测定其电导率作为对照(CK),其余枝条用白色干净纱布包裹后装入自封袋并作好标签,分别在-15℃、-20℃、-25℃、-30℃、-35℃、-40℃低温下进行冷冻处理,冷冻和解冻时的冰箱温度均以 4℃·h⁻¹为 1 个时间间隔进行,到达目标温度后持续 12 h 后进行解冻。冷冻处理采用 LRH-250CB 的低温冰箱,控温精度范围在±1℃之间。



I. 旬最高气温; II. 旬最低气温; III. 旬平均温度。

I. Maximum air temperature; II. Minimum air temperature; III. Average air temperature.

图1 2017年10月至2018年3月田间旬气温变化

Fig. 1 Changes of ten-day air temperature during the experiment period

取冷冻后枝条的中间部位(不含花芽部分)剪成 0.200 cm 的薄片,准确称取 3.000 g,放入 50 mL 的三角瓶中,加入 30 mL 重蒸馏水,在室温下(25 ℃)放置摇床浸提 10 h,然后用电导仪测出此时的电导率(R),以代表低温处理的电解质渗出量;再将三角瓶用保鲜膜封好瓶口放入沸水浴中蒸煮 30 min(期间摇晃数次),放置摇床再浸提 10 h,测得此时枝条的电导率(R_0),以代表处理材料的原生质膜被破坏后而渗出的全部电解质总量。每个样品 3 次生物学重复。(摇床转速设定 100 r·min⁻¹,用 DDS-11A 电导率仪测定相对电导率)测定结果采用公式 1 计算^[12-13]。

公式 1: 细胞伤害率/% = $(R - CK)/(R_0 - CK) \times 100$, 转化细胞伤害率 $y_1 = \ln[(k - y)/y]$, 将 Logistic 方程 $y = k/(1 + ae^{-bt})$ 转化为 $\ln[(k - y)/y] = \ln a - bt$, 变成细胞伤害率(y_1)与处理温度(t)的直线方程,通过直线回归的方法求出方程参数 a、b 值及相关系数 R, 半致死温度 LT₅₀(拐点温度 $t = \ln a/b$)。y 为实测细胞伤害率, t 代表冷冻处理温度, k 为细胞伤害率的饱和量(取 k = 100)。

经低温处理后,从冰箱中取出,在室温下放置 24 h 进行分级。枝条冻害指数采用组织褐变法^[14]测定。冻害指数分级标准参照贺牛立新等^[15]的方法但略有改动。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;0 级,无冻害,髓部绿色,木质部绿色,韧皮部绿色;1 级,轻微冻害,髓部白色,原生木质部部分变褐,韧皮部绿色;2.5 级,无冻害,髓部绿色,木质部绿色,韧皮部绿色;3 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。

测定结果采用公式 2 计算^[16]。

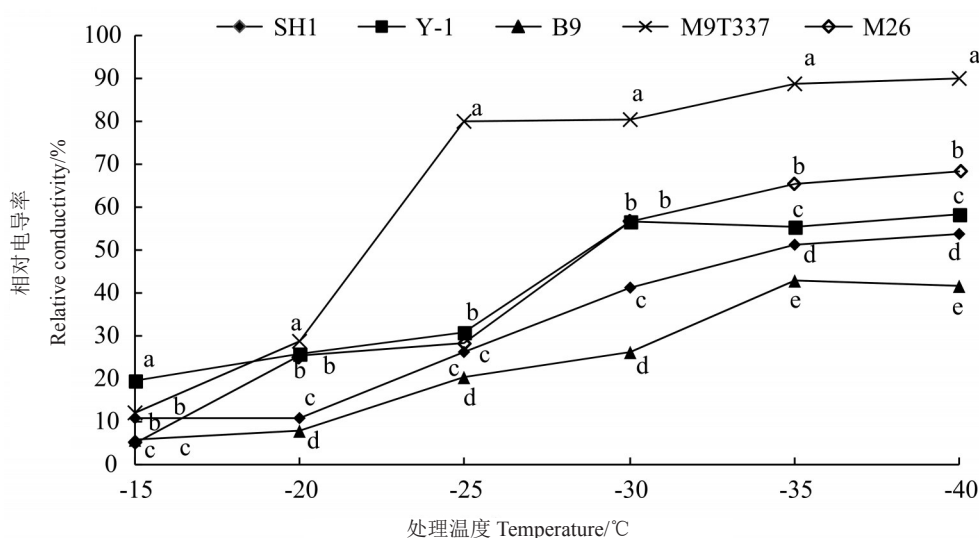
公式 2: 冻害指数 = $\Sigma(\text{冻害级次} \times \text{枝段数}) / (4 \times \text{枝段总数})$ 。

用 Excel 2010 统计数据并分析相关系数和获得 Logistic 方程的拟合参数,查相关系数显著性检验表。

2 结果与分析

2.1 不同低温胁迫下各砧木品种枝条的相对电导率变化

随着胁迫温度的持续降低,各供试砧木的相对电导率总体表现上升的变化趋势,但上升幅度因品种差异而不同,处理温度与相对电导率之间呈“S”型的变化曲线(图 2)。处理温度在 -15 ℃ 时,各供试砧木的相对电导率上升幅度相对对照均表现为上升趋势, B9 和 M26 的相对电导率上升幅度分别为 5.30% 和 5.89%, 其他品种都在 10.95% 以上; -15 ℃ 和 -20 ℃ 之间,各品种相对电导率除 SH1 下降了 0.14%, 其他均表现上升趋势,尤以



不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 差异显著。

Different small letters indicate significant difference at $p < 0.05$.

图2 处理温度与相对电导率的关系

Fig. 2 Relationship between temperature and relative electrical conductivity

M26 上升迅速,上升幅度在 20% 以上,其次是 M9T337 上升较为迅速,上升幅度达 16.48%,Y-1 和 B9 上升最为缓慢,但都在 2% 以上;-20 ℃ 和-25 ℃ 之间,各品种相对电导率均表现为上升,尤以 M9T337 上升迅速,上升幅度达 51.23%,其他品种上升幅度在 2%和 20%之间;-25 ℃ 和-30 ℃ 之间,各品种相对电导率均表现为上升,尤以 Y-1 和 M26 上升迅速,上升幅度分别达 25.81%和 28.23%,其次 SH1 和 B9 上升较为迅速,上升幅度分别为 15.05%和 5.79%,而 M9T337 上升幅度仅为 0.63%;-30 ℃ 和-35℃ 之间,Y-1 的相对电导率下降了 1.23%,SH1 和 B9 分别上升了 10.13%和 16.89%,其他品种上升幅度达 8%以上;-35 ℃ 和-40 ℃ 之间,B9 的相对电导率下降了 1.25%,其他品种相对电导率上升幅度达 2.5%左右。

2.2 半致死温度的比较

细胞在致死性伤害出现之前往往有一个从可逆到不可逆伤害的逐渐发展过程,在这一过程中,有的细胞有“修复”能力,因而整个组织在不同温度下相对电导率总是呈“S”形曲线,故用 Logistic 曲线方程进行拟合。结果表明:各供试砧木的相对电导率与温度之间的关系曲线能较好地用 Logistic 曲线方程进行拟合,拟合值为 0.898 78~0.973 14,进行 *F* 值(*F* = 0.01)检验表明,5 个品种的拟合系数均高于相关系数临界值 $r_{0.01}$ =0.874,呈极显著水平,说明其拟合结果可靠,可信度较高。由表 1 可知:M9T337 的低温半致死温度达-23.4 ℃,B9 的低温半致死温度达-40.1 ℃,而 SH1、Y-1 和 M26 的低温半致死温度均在-30 ℃ 附近。根据低温半致死温度的高低,可以推断出 5 个品种的抗寒性由强到弱的

表1 Logistic拟合方程参数及半致死温度
Table 1 The parameters of Logistic fitting equation and semi-lethal temperature

砧木 Varieties	半致死低温 Semi-Lethal-low temperature/℃	方程参数Parameter of equation					拟合方程 Logistic fitting equation	排序 Order
		<i>a</i>	<i>b</i>	ln <i>a</i>	<i>R</i> ² (相关系数)	<i>r</i> _{0.01} (拟合值)		
SH1	-36.0 b	44.6	-0.105 5	3.798 0	0.927 8	-0.973 1**	$y=100/(1+44.6e^{0.1055x})$	2
Y-1	-32.7 c	12.9	-0.078 2	2.557 4	0.890 3	-0.938 3**	$y=100/(1+12.9e^{0.0782x})$	3
B9	-40.1 a	77.2	-0.108 5	4.346 0	0.941 5	-0.970 5**	$y=100/(1+77.2e^{0.1085x})$	1
M9T337	-23.4 d	54.1	-0.170 7	3.991 4	0.857 1	-0.898 8**	$y=100/(1+54.1e^{0.1707x})$	5
M26	-31.3 c	81.4	-0.140 5	4.399 7	0.893 4	-0.970 0**	$y=100/(1+81.4e^{0.1405x})$	4

注:** 表示拟合度呈极显著水平。
Note: ** Indicate the significance at *p* < 0.01.

顺序依次为 B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337。

2.3 半致死低温与冻害指数的相关性分析

根据目测法对每一胁迫温度下的枝条褐变程度进行冻害分级,并计算相应温度下的冻害指数,如表 2 所示(对照为 2018 年 2 月试验田间最低温度-15 ℃ 的结果)。由表 2 可以看出:M9T337 的冻

害指数达到最高,B9 的冻害指数达到最低,而 SH1、Y-1 和 M26 的冻害指数基本接近。枝条半致死低温与每一温度下的冻害指数呈正相关,相关系数依次为 0.839、0.886、0.979、0.937、0.816、0.906 和 0.820 均大于相关系数临界值 $p_{0.05}$ =0.811。冻害指数随着胁迫温度的降低呈现不同幅度的上升趋势且

表2 冻害指数与半致死低温的相关性分析
Table 2 Correlation analysis between semi-lethal low temperature and freezing index

砧木 Varieties	CK		-15℃		-20℃		-25℃		-30℃		-35℃		-40℃		平均值 Average	排序 Order
	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>		
SH1	0.00		13.30		32.30		45.30		64.70		70.70		96.30		46.09	4
Y-1	0.00		12.00		36.70		44.00		66.00		83.70		100.00		48.91	3
B9	0.00	0.839	6.70	0.886	26.70	0.979	38.70	0.937	43.30	0.816	68.00	0.906	93.70	0.820	39.59	5
M9T337	5.60		22.70		66.00		77.00		81.30		93.30		100.00		63.70	1
M26	0.00		21.30		45.30		61.30		86.70		90.70		100.00		57.90	2

注: *F* 为冻害指数(%),*R* 为半致死低温与冻害指数的相关性系数。
Note: *F* is the freezing injury index(%),*R* is the correlation coefficient between Semi-lethal low temperature(℃)and freezing injury index under processing temperature.

出现突然越级的现象。这说明当植物达到临界点致死温度附近时,冻害指数的级别越高。经低温胁迫发现,各品种枝条出现褐变的程度和时间先后顺序明显不同,这说明各苹果砧木枝条的髓部、木质部和韧皮部之间的存在细胞结构上的差异,导致各部位对低温伤害的敏感程度和时间不同。根据冻害指数的大小,可以推断出5个苹果砧木枝条品种的抗寒性由强到弱的顺序依次为 B9 > SH1 > Y-1 > M26 > M9T337。各苹果砧木的抗寒适应性与试验园的栽培表现是否一致,还有待通过田间调查进一步验证。

3 讨 论

LT₅₀用于判断品种间的耐寒性,已在火龙果^[17]、板栗^[18]、鸢尾^[19]、菊花^[20]等植物的耐寒性得到广泛应用。相对电导率结合 Logistic 曲线方程可准确获得植物的低温半致死温度。该试验结果表明,随着温度的下降,5个品种的电解质外渗率逐渐升高,并呈“慢-快-慢”的“S”型变化曲线,这与魏秀清等^[21]、高爱农等^[22]和黄伊凡等^[23]分别在芒果、苹果和枸杞等的研究结果和试验现象相吻合。我国陇东地区年平均气温 9.5 ℃,1月份最冷,平均最低气温-13.2 ℃,极端最低气温可达-28 ℃以下。5个供试苹果砧木枝条的 LT₅₀,M9T337 的最低,SH1、Y-1 和 M26 的居中,B9 的最高。结合田间表现和试验现象,我们发现供试的5个苹果砧木枝条都能在陇东地区正常越冬,然而事实上陇东地区露地栽培的苹果砧木枝条仍有抽条冻害现象的发生。因此,我们推测造成陇东地区苹果砧木枝条发生抽条冻害的原因与低温有关之外,还可能与当年降雪覆盖量、低温持续的时间和低温强度等自然因素息息相关。该试验通过对5个苹果砧木枝条1a生深度休眠期的抗寒性测定发现,砧木枝条的相对电导率随着胁迫温度的逐级降低呈现不等幅度升高的趋势。在降温初期(-15 ℃~-20 ℃)和降温中期(-20 ℃~-30 ℃),相对电导率升高幅度较为迅速,但在降温后期(-30 ℃~-35 ℃)相对电导率上升幅度明显减缓,这说明在降温过程中各砧木受到低温伤害反应的应激速率和时间明显不同。试验结果显示 M9T337 在-15 ℃~-20 ℃期间、SH1、Y-1 和 M26 在-30 ℃~-35 ℃期间、B9 在-35 ℃~-40 ℃期间时出现电导率值下降,这与梅立新等^[24]和于立洋

等^[25]的试验现象和结果相符。这是因为质膜在伤害初期阶段通过主动运输进行物质交换,适应逆境的自我保护作用,从而调整胞质的外渗导致外渗电导率值变低或变高。经过低温胁迫后期,电导率值维持在稳定水平,说明质膜已被破坏,主动运输功能完全丧失,低温造成离子活性下降,从而导致电导率值的下降。该试验结果表明半致死温度在冻害指数的验证下,更能客观的反应苹果砧木枝条的耐寒性。张仕明等^[26]和王玮等^[27]对梨的冻害指数研究发现,梨枝条的冻害程度越严重,其冻害指数的级别越高。由于品种间的抗寒力各有差异或枝条组织不充实,冬季枝条会出现不同程度的冻害。成熟的枝条各组织抗寒能力的强弱依次为形成层>皮层>木质部>髓部。轻微受冻时只表现髓部变色,中等冻害时木质部变色,严重冻害时才会出现冻伤韧皮部现象,待形成层变色时则枝条失去恢复能力。苹果砧木枝条的冻害指数随着胁迫温度的降低而呈现增加且低温半致死温度附近出现突然跃级的现象。

4 结 论

根据低温半致死温度和冻害指数的高低,综合判断出,5个苹果砧木枝条的抗寒性由强到弱依次为 B9(-40.1 ℃)> SH1(-36.0 ℃)> Y-1(-32.7 ℃)> M26(-31.3 ℃)> M9T337(-23.4 ℃)。

参考文献 References:

- [1] 束怀瑞. 苹果学[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
SHU Huairui. Study of apple[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999.
- [2] 李育农. 世界苹果和苹果属植物基因中心的研究初报[J]. 园艺学报, 1989, 16(2):101-108.
LI Yunong. An investigation of the genetic centre of *M. pumila* and *Malus* in the world[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1989, 16(2): 101-108.
- [3] 刘荣,刘清国,范建新,龚德勇,吴小波,韩树全,雷朝云. 果树抗寒性生理生化及分子机理研究进展[J]. 分子植物育种, 2017, 15(5): 2028-2834.
LIU Rong, LIU Qingguo, FAN Jianxin, GONG Deyong, WU Xiaobo, HAN Shuquan, LEI Chaoyun. Research advances in the cold-resistance physiology biochemistry and molecular mechanism in fruit crops[J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(5): 2028-2834.
- [4] KARIMZADEH G, SHARIFI- SIRCHI G R, JALALI- JAVARAN M, DEHGHANI H, FRANCIS D. Soluble protein induced by low temperature treatment in the leaves of spring and winter wheat cultivars[J]. Pakistan Journal of Botany, 2006, 38(4):1015-1026.
- [5] RENAUT J, LUTTS S, HOFFMANN L, HAUSMAN J F. Re-

- sponses of poplar to chilling temperatures: proteomic and physiological aspects[J]. *Plant Biology*, 2004, 6(1):81-90.
- [6] 沈洪波,陈学森,张艳敏. 果树抗寒性的遗传与育种研究进展[J]. *果树学报*, 2002, 19(5):292-297.
- SHEN Hongbo, CHEN Xuesen, ZHANG Yanmin. Advances of the studies on the inheritance and breeding of cold hardiness variety in fruit crops[J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(5):292-297.
- [7] 何伟,艾军,范书田,杨义明,王振兴,赵滢,乔永在,张亚凤,李晓燕. 葡萄品种及砧木抗寒性评价方法研究[J]. *果树学报*, 2015, 32(6):1135-1142.
- HE Wei, AI Jun, FAN Shutian, YANG Yiming, WANG Zhenxing, ZHAO Ying, QIAO Yongzai, ZHANG Yafeng, LI Xiaoyan. Study on evaluation method for cold resistance of grape cultivars and rootstock[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(6): 1135-1142.
- [8] 杨凤翔,金芳,颜霞. 不同草莓品种耐寒特性综合评价[J]. *果树学报*, 2010, 27(3): 368-372.
- YANG Fengxiang, JIN Fang, YAN Xia. Comprehensive evaluation of different strawberry varieties' tolerance to coldness[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(3): 368-372.
- [9] 叶艳然,王文莉,郑成淑,付德静,刘慧雯. 四种野生苔草属植物的耐寒性评价[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1):89-95.
- YE Yanran, WANG Wenli, ZHENG Chengshu, FU Dejing, LIU Huiwen. Evaluation of cold resistance of four wild carex species [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 89-95.
- [10] MANCUSO S, NICESE F P, MASI E, AZZARELLO E. Comparing fractal analysis, electrical impedance and electrolyte leakage for the assessment of cold tolerance in *Callistemon* and *Grevillea* spp.[J]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2004, 79 (4): 627-632.
- [11] CHEN S L, POLLE A. Salinity tolerance of *Populus*[J]. *Plant Biology*, 2010, 12(2): 317-333.
- [12] DERYNG D, CONWAY D, RAMANKUTTY N. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 034011.
- [13] PROVENIES M C G, VAN ZANTEN M. High temperature acclimation through PIF4 signaling[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2): 59-64.
- [14] 李淑玲,冯建荣,李亚兰,赵宝龙,樊新民. 引入石河子地区的苹果品种抗寒性检测[J]. *果树学报*, 2012, 29(6):1010-1016.
- LI Shuling, FENG Jianrong, LI Yalan, ZHAO Baolong, FAN Xinmin. Research on cold resistance of apple cultivars introduced in Shihezi area[J]. *Journal of Fruit Science*, 2012, 29(6): 1010-1016.
- [15] 牛立新,贺普超. 用改进的组织变褐法鉴定葡萄抗寒性的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 1992, 20(1): 95-99.
- NIU Lixin, HE Puchao. A study on tissue browning method for cold hardness evaluation in *Vitis* L.[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 1992, 20(1): 95-99.
- [16] 刘祖祺,张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京:中国农业出版社, 1994: 382- 383.
- LIU Zuqi, ZHANG Shicheng. *Physiology of plant resistance*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994:382-383.
- [17] 高国丽,张冰雪,乔光,刘涛,彭志军,王彬,蔡永强,文晓鹏. 火龙果种质资源的耐寒性综合评价[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(3):26-32.
- GAO Guoli, ZHANG Bingxue, QIAO Guang, LIU Tao, PENG Zhijun, WANG Bin, CAI Yongqiang, WEN Xiaopeng. Comprehensively evaluating the cold tolerance of pitaya germplasms[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(3): 26-32.
- [18] 郭燕,张树航,李颖,张馨方,王广鹏,杨阳. 板栗抗寒性相关指标筛选与评价方法建立[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(10): 40-48.
- GUO Yan, ZHANG Shuhang, LI Ying, ZHANG Xinfang, WANG Guangpeng, YANG Yang. Screening of cold resistance related indexes and establishment of evaluation method for chinese chestnut[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(10): 40-48.
- [19] 王冠群,李丹青,张佳平,夏宜平. 德国鸢尾 6 个品种的耐寒性比较[J]. *园艺学报*, 2014, 41(4): 773-780.
- WANG Guanqun, LI Danqing, ZHANG Jiaping, XIA Yiping. Comparison of cold tolerance within 6 cultivars of *Iris germanica* [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4): 773-780.
- [20] 许瑛,陈发棣. 菊花 8 个品种的低温半致死温度及其抗寒适应性[J]. *园艺学报*, 2008, 35(4): 559-564.
- XU Ying, CHEN Fadi. The LT₅₀ and cold tolerance adapt ability of chrysanthemum during a natural drop in temperature[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(4): 559-564.
- [21] 魏秀清,余东,章希娟,许玲,陈志峰,张丽梅,许家辉. 6 个杧果品种耐寒性的研究[J]. *果树学报*, 2017, 34(5):594-602.
- WEI Xiuqing, YU Dong, ZHANG Xijuan, XU Ling, CHEN Zhifeng, ZHANG Limei. A study on cold resistance in six mango cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(5): 594-602.
- [22] 高爱农,姜淑荣,赵锡温,邓继光,沙守峰,刘志,张敏. 苹果品种抗寒性测定方法的研究[J]. *果树学报*, 2000, 17(1): 17-21.
- GAO Ainong, JIANG Shurong, ZHAO Xiwen, DENG Jiguang, SHA Shoufeng, LIU Zhi, ZHANG Min. Study on the hardness of apple cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2000, 17(1): 17-21.
- [23] 黄凡凡,戴国礼,慕自新,焦恩宁,杨金波,秦垦. 电导法结合 Logistic 方程鉴定不同枸杞种质的耐热性研究[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(7): 1017-1023.
- HUANG Yifan, DAI Guoli, MU Zixin, JIAO Enning, YANG Jinbo, QIN Ken. Study on heat resistance of *lycium* linn with conductivity method and logistic equation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(7): 1017-1023.
- [24] 梅立新,蒋宝,赵政阳,梁冬泉. 几种方法测定苹果矮化砧木枝条抗寒性指标的比较[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(6):103-106.
- MEI Lixin, JIANG Bao, ZHAO Zhengyang, LIANG Dongquan. Comparison of cold hardness indices of apple dwarf rootstocks determined by different methods[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(6): 103-106.
- [25] 于立洋,李政,韩佩尧,张静,汪敏骅,田晓晓,张军. 8 个新疆野苹果优良无性系抗寒性比较[J]. *核农学报*, 2017, 31(9):1827-1835.
- YU Liyang, LI Zheng, HAN Peiyao, ZHANG Jing, WANG Minhua, TIAN Xiaoxiao, ZHANG Jun. Comparison of cold hardness of 8 *Malus sieversii* clones[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(9): 1827-1835.
- [26] 张仕明,吴钧,史玉辉,张克云. 库尔勒香梨树冬季冻害指数及其变化特征分析[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(3):462-467.
- ZHANG Shiming, WU Jun, SHI Yuhui, ZHANG Keyun. Winter freezing damage index and its effect to fragrant pear trees in korla area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(3): 462-467.
- [27] 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 Wei, LI Hongxu, ZHAO Mingxin, CAO Sufang. Study on the cold resistance and pear cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(5): 860-865.