

李化龙,王景红,张维敏,等. 模拟低温下主产品种猕猴桃结果母枝冻害指标. 应用气象学报, 2021, 32(5): 618-628.

DOI: 10.11898/1001-7313.20210509

模拟低温下主产品种猕猴桃结果母枝冻害指标

李化龙¹⁾ 王景红¹⁾ 张维敏^{1)*} 柏秦凤¹⁾
潘宇鹰¹⁾ 张 焘¹⁾ 权文婷¹⁾ 郭建平²⁾

¹⁾ (陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710015)

²⁾ (中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

越冬冻害是猕猴桃的主要气象灾害,为探讨低温对猕猴桃的伤害机理,建立猕猴桃越冬冻害指标体系,2020年12月—2021年2月利用MSX-2F霜箱系统模拟越冬期低温过程,采用组织褐变率、细胞伤害率等参数对结果母枝冻害特征进行定量描述,通过冻害指数与低温的Logistic关系模型,研究6个主栽品种结果母枝冻害特征。结果表明:结果母枝主芽半致死温度以海沃德最低,为 -16.5°C ,瑞玉、徐香、金福居中,分别为 -14.8°C , -14.9°C 和 -14.2°C ,翠香、红阳较高,分别为 -13.4°C , -13.8°C 。 $-16^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 低温主要影响结果母枝主芽活性, -16°C 为主芽受冻向副芽受冻的转折点,低于 -18°C 对主、副芽活性均有伤害, -20°C 以下低温可造成结果母枝大量死亡。品种间抗冻性能,以海沃德最强,瑞玉、金福、徐香居中,翠香、红阳最弱。以结果母枝芽冻害指数为主要参数,构建6个主产品种猕猴桃结果母枝5级低温冻害指标,对应类型和温度阈值如下:1级为轻度减产型, $-11.0^{\circ}\text{C}\sim-10.5^{\circ}\text{C}$;2级为中度减产型, $-14.5^{\circ}\text{C}\sim-10.5^{\circ}\text{C}$;3级为重度减产型, $-16.5^{\circ}\text{C}\sim-12.0^{\circ}\text{C}$;4级为绝收型, $-20.0^{\circ}\text{C}\sim-13.5^{\circ}\text{C}$;5级为致死型, $-20.0^{\circ}\text{C}\sim-15.0^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 猕猴桃; 低温胁迫; 结果母枝; 半致死温度; 冻害指标

引 言

猕猴桃隶属猕猴桃科猕猴桃属,为多年生落叶藤本植物^[1],种群主要分布在秦岭以南及横断山脉以东地区^[2-5]。中华猕猴桃和美味猕猴桃是我国主要商业化栽培品种^[6],其中美味猕猴桃占种植面积的60%以上。

近年中华/美味猕猴桃种植区域不断北扩南推,已发展到全国22个省份^[7-8],种植范围最南端由广东省和平县(24.25°N)延伸至云南省屏边县(22.98°N),最北端从陕西省渭南市(34.50°N)北扩至天津市蓟州区(40.05°N)^[9]。低温冻害是严重危害猕猴桃的气象灾害,轻则造成结果母枝芽座萌发能力降低、果树大幅度减产,重则导致枝条受伤、褐变甚至死亡,

造成当年绝产绝收或死树毁园^[10-13]。1991年秦岭北麓猕猴桃产区冬季冻害导致次年周至县猕猴桃减产50%~95%,成龄树30%~50%地上部分因冻死亡^[14-15]。2008年1—2月我国南方长时间大范围冰冻灾害,造成庐山猕猴桃93%减产或绝产^[16]。越冬冻害不仅影响猕猴桃的生长发育和产量品质,也是猕猴桃引种推广扩大发展的主要限制因子。研究低温冻害的影响机理,建立科学合理的低温冻害温度指标^[17-19],对猕猴桃种植区域的适宜性评价、冻害的预测防御及冻害程度的判定识别具有重要意义。目前低温对猕猴桃的影响研究主要集中在冻害指标田间调查分析和品种抗寒性鉴定方面。屈振江等^[20]基于猕猴桃冻害田间调查资料构建越冬冻害气象指标,Hewett等^[21]和Pyke等^[22]通过测定低温处理后猕猴桃枝条发芽率的方法,探讨不同季节低温对

2021-04-06 收到, 2021-06-04 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002202)

* 通信作者, 邮箱: 404312067@qq.com

猕猴桃的损伤,Burak 等^[23]根据 -10°C , -13°C 和 -15°C 低温处理后的萌芽率,评价土耳其引进猕猴桃品种抗寒性;孙世航^[24]通过低温胁迫处理一年生猕猴桃枝条,对51个不同基因型的猕猴桃种质的抗寒性进行评价。田间调查法虽然可直观获得植株的冻害情况,但极端天气并非经常出现,研究呈间断性,且缺少冻害地段的实时气象资料,难以准确建立冻害程度与气象资料的对应关系^[25-27],同时猕猴桃抗寒性评价方法注重品种间抗低温性能的比较^[28-29],但对不同低温强度可能造成的伤害程度关注不足。类似文献^[30],本研究利用MSX-2F人工模拟霜箱再现历史上出现的典型低温冻害过程,采用结果母枝生长恢复法、组织褐变法、细胞结冰点温度法和细胞电导率法,探讨猕猴桃主栽品种结果母枝低温冻害特征,构建猕猴桃越冬冻害温度指标,以期为猕猴桃种植区域的引种推广适宜性评价、越冬冻害的预测防御及灾害评估等提供参考^[31-33]。

1 技术与方法

1.1 试验地点

试验地点位于陕西省秦岭北麓猕猴桃产区($34^{\circ}04'\text{N}$, $108^{\circ}27'\text{E}$),海拔高度为457 m,年平均气温为 13.2°C ,最热月平均气温为 26.1°C ,最冷月平均气温为 -0.7°C ,极端最高气温为 42.2°C ,极端最低气温为 -20.2°C ,土壤表层极端最低温度为 -23.8°C ,年平均无霜期为220 d,年平均降水量为660 mm,年平均降水日数为100 d,年平均日照百分率为42%,年平均相对湿度为73%,属暖温带季风气候。试验于2020年12月—2021年2月在陕西省农业遥感

与经济作物气象服务中心进行。

1.2 试验材料

研究材料取自陕西佰瑞猕猴桃研究院及附近猕猴桃冬剪果园中华猕猴桃红阳、美味猕猴桃徐香、翠香、海沃德、瑞玉、金福6个品种休眠期成熟枝条, 0°C 左右冰箱保湿贮藏。红阳、徐香、海沃德为国内主栽品种,翠香为秦岭北麓主栽品种,瑞玉、金福为秦岭北麓产区新品种。

1.3 试验方法

试验采用MSX-2F人工模拟霜箱,内设40只热电偶温度传感器监测试验材料温度变化,每只传感器记录数据间隔为10 s。系统能够根据设定好的降温曲线模拟低温冻害过程。

1.3.1 试验设计

1.3.1.1 不同强度自然冻害过程

选取历史上5次不同强度的自然冻害过程,过程最低温度分别为 -20.2°C (过程1,1977年1月2日,周至)、 -17.0°C (过程2,2020年12月26日,眉县)、 -16.0°C (过程3,1991年12月28日,眉县)、 -13.5°C (过程4,2012年1月25日,眉县)、 -11.9°C (过程5,1997年1月9日,眉县),过程温度曲线变化如图1所示。 -20.2°C 为秦岭北麓猕猴桃产区周至县历史极端最低温度,出现在猕猴桃商业栽培之前,无灾害损失记录。霜箱的降温曲线参考图1,分别代表低温强度为 -20°C , -17°C , -16°C , -14°C 和 -12°C 的越冬冻害。

选生长基本一致的猕猴桃结果母枝,剪成30 cm长的枝段,每个品种取10根枝条共60枝放入MSX-2F霜箱进行自然冻害过程模拟处理,处理结束后缓慢升温至室温后取出进行试验观测。枝条

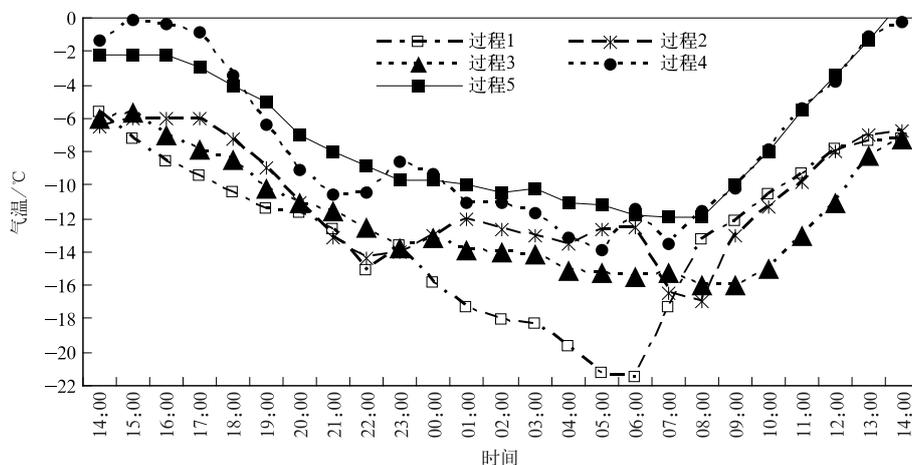


图1 猕猴桃越冬期冻害过程温度变化曲线

Fig. 1 Temperature of freezing injury during overwintering for kiwifruit

取样前在大田经历了 2020/2021 年冬季 -10°C 的低温过程,其观测资料作为 -10°C 自然冻害过程样本进行分析。

1.3.1.2 低温强度和持续时间组合试验

为探索不同低温强度和持续时间组合与低温伤害的定量关系,设置 7 个温度梯度(-10°C , -12°C , -14°C , -16°C , -18°C , -20°C 和 -22°C) 和 4 个时间梯度(1 h, 3 h, 5 h 和 7 h) 共 28 个处理进行冻害试验。选红阳、徐香、翠香 3 个代表品种,每个品种取 12 根枝条分 4 组用自封袋保湿封装,每袋 3 根枝条为重复,试验开始前,霜箱以 $2^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 降温速度对枝条进行预冷却,预冷却时间为 2.5~5.0 h,至设计低温后计时,每隔 1 h, 3 h, 5 h 和 7 h 分别取出 1 组枝条放入 0°C 冰箱缓慢回温,1 d 后测定结果母枝韧皮部电导率。

1.3.2 研究方法

1.3.2.1 猕猴桃结果母枝过冷却点温度

根据植物体内溶液的过冷却现象判断植物的低温反应是近年发展的技术^[34]。植物体内溶液的结冰温度往往低于 0°C ,当环境温度持续下降时,植物体内溶液在某一温度点开始结冰释放潜热,植物体内温度由降转升,出现谷值跳跃现象,该起跳点温度即为植物体过冷却点温度;植物体内溶液放热与吸热处于平衡状态时,温度不再升高,此时的温度即为植物体结冰点温度。过冷却点是衡量植株抗冻能力的重要指标,过冷却点越低,抗冻能力越强,越耐冻。试验选取 6 个品种的猕猴桃枝条,3 次重复,用刀片在枝条表皮斜切至木质部,将 T-G0.32 型热电偶温度传感器探头置于韧皮部与木质部之间的切口,用塑料薄膜包裹切口固定探头并阻止枝条失水,温度传感器与 FrosTem40 数据采集系统和电脑连接,记录间隔为 10 s,温度控制精度为 0.5°C ,自动连续记录猕猴桃结果母枝温度变化,观测不同品种猕猴桃

枝条的过冷却点和结冰点温度。

1.3.2.2 猕猴桃结果母枝细胞低温伤害率

植物在低温胁迫下细胞内水溶性物质外渗,引起细胞导电性能变化,其值大小与植物受冻害程度呈正相关,可直观反映低温对细胞的损伤程度。剪取试验枝条约 5 cm,避开芽眼,切削枝条外表皮至木质部表层成 0.1 cm 的薄片,称取 0.5 g 样品,放入加有 20 ml 去离子水的 50 ml 试管中,在室温条件下浸提 24 h,摇匀后用 DDS-307A 型电导率仪测定初始电导率(C_1), C_1 代表低温处理后枝条的电解质渗出量。随后试管口加塞封闭,置入沸水中水浴 30 min,在室温条件下继续浸提 24 h,测定最终电导率(C_2), C_2 代表枝条原生质膜被全部破坏后所渗出的电解质总量。各处理重复测定 3 次,取平均值,计算不同处理相对电导率(R)和细胞伤害率(y):

$$R = C_1/C_2 \times 100\%, \quad (1)$$

$$y = [(R_i - R_{ck})/(100 - R_{ck})] \times 100\%。 \quad (2)$$

式(2)中, R_i 为低温处理下的相对电导率即电解质渗出率, R_{ck} 为对照处理的电解质渗出率。

将各温度处理下的细胞伤害率进行 Logistic 方程拟合:

$$y = k/(1 + ae^{-bx})。 \quad (3)$$

式(3)中, x 为相应处理温度, k 为细胞伤害率的饱和容量(本试验为 100), a 和 b 为参数。

经线性变换后计算参数 a 和 b 及相关系数 r ,求得拐点温度 $x = \ln a/b$,即为细胞半致死温度值。

1.3.2.3 低温对猕猴桃结果母枝芽、枝伤害指数

经冻害过程处理的枝条与对照枝条同在室温 18°C 、自然光照条件下进行水培法培养^[35],每隔 3 d 换水 1 次,并剪去枝条基部 2~3 mm,露出新茬。水培 30 d 后观测统计低温伤害后结果母枝正常芽存留率、芽座和枝条褐变率。猕猴桃结果母枝芽座、枝条冻害程度形态分级见表 1。

表 1 猕猴桃芽座、枝条冻害程度形态分级标准

Table 1 Morphological grading standard of freeze injury degree of kiwifruit bud base and branch		
类别	冻害等级	冻害程度形态表现
芽座	0	主芽正常萌发;或未萌发但芽座海绵体正常、主芽轴正常,芽座活性未受低温影响,为正常芽
	1	主芽芽轴褐变或干枯,不能萌发出结果枝,丧失结果能力; 芽座海绵体正常,副芽存活,可萌发出营养枝,为冻伤芽
	2	主芽芽轴褐变或干枯,不能萌发出结果枝,丧失结果能力; 芽座海绵体褐变,副芽也丧失萌发力,不能萌发出营养枝,影响次年结果,为褐变芽
枝条	0	韧皮部鲜绿正常
	1	韧皮部大部绿色,局部褐变
	2	韧皮部大部褐变,局部存有绿色
	3	韧皮部失绿褐变

低温和对照处理每个品种调查 10 根枝条,统计芽座、枝条冻害级别,计算冻害指数。

$$F = \sum_{i=1}^D (n_i \times d_i) / (N \times D) \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, F 为冻害指数, n_i 为第*i*级冻害的枝数或芽座数, d_i 为第*i*级冻害等级, N 为调查总枝数或芽座数, D 为冻害最高等级值。

对芽冻害指数与处理温度进行 Logistic 拟合分析,建立芽冻害指数与低温的关系模型。

2 结果与分析

2.1 6 个猕猴桃品种的过冷却点温度

不同猕猴桃品种结果母枝的过冷却点及结冰点温度如表 2 所示。由表 2 可见,过冷却点以瑞玉猕猴桃最低,为 -3.4°C ,与之相近的有海沃德,为 -3.2°C ,徐香、金福、翠香 3 品种基本相近,分别为 -2.0°C , -1.7°C 和 -1.7°C ,红阳猕猴桃过冷却点

表 2 不同猕猴桃品种结果母枝过冷却点和结冰点温度

温度	海沃德	徐香	金福	瑞玉	翠香	红阳
过冷却点/ $^{\circ}\text{C}$	-3.2	-2.0	-1.7	-3.4	-1.7	-1.4
结冰点/ $^{\circ}\text{C}$	-1.4	-0.8	-0.7	-1.8	-0.6	-0.2
跃升值/ $^{\circ}\text{C}$	1.8	1.2	1.0	1.6	1.1	1.2

最高,为 -1.4°C 。各品种结冰点特征与过冷却点相似。根据结果母枝过冷却点温度将 6 个猕猴桃品种的抗冻性能分为 3 类:瑞玉、海沃德为强抗低温类型,徐香、金福、翠香为中抗低温类型,红阳为弱抗低温类型。

2.2 不同强度冻害过程对结果母枝的影响

2.2.1 不同强度冻害过程对猕猴桃结果母枝芽活性的影响

2.2.1.1 低温胁迫下正常芽存留率变化特征

猕猴桃结果母枝芽的活性直接影响结果枝的萌发量和挂果量。不同强度冻害处理的猕猴桃结果母

枝正常芽存留率如图 2 所示。由图 2 可见,不同品种猕猴桃正常芽存留率随低温强度变化差异明显, -10°C 低温下各品种的正常芽存留率约为 80%,品种间相差不大。随低温强度加大,正常芽存留率降低,其中减幅最大的为翠香,降温至 -16°C 时正常芽存留率仅为 6.7%,平均减幅为 $10.6\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,减幅最小的是瑞玉,平均减幅为 $7.6\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。 -18°C 强低温下,徐香、瑞玉和海沃德尚有 7.4%~20.7%的正常芽存留,表现出较强的抗低温能力,翠香、金福和红阳已无正常芽存留。 -20°C 强低温下,6 个猕猴桃品种均无正常芽存留。

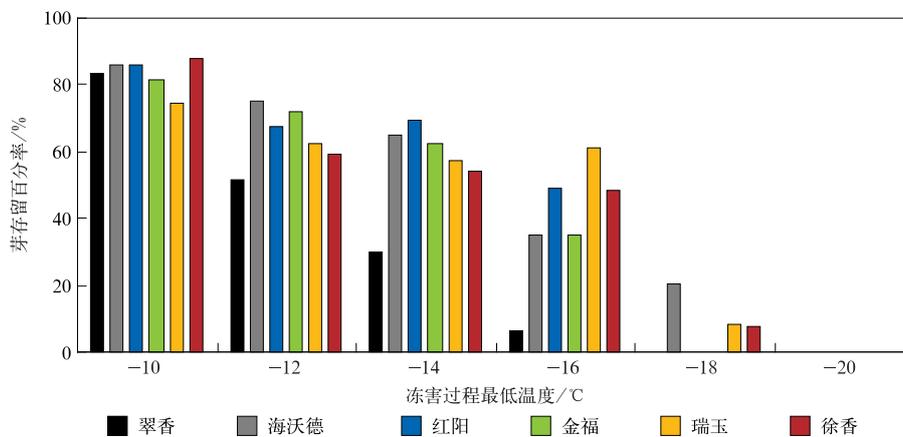


图 2 不同强度冻害过程猕猴桃结果母枝芽存留率

Fig. 2 The bud retention rates of kiwifruit branch under different freezing injury intensities

2.2.1.2 不同低温胁迫下冻伤芽变化特征

猕猴桃结果母枝上的芽座由 1 个主芽、2 个副

芽和外围海绵体构成,正常情况下主芽萌发结果,副芽潜伏,主芽受伤后可刺激副芽萌发成营养枝,当年

丧失结果能力^[36]。图3为不同低温胁迫下猕猴桃结果母枝芽冻伤率。由图3可知, $-16^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 条件下, 随低温强度加大, 猕猴桃主芽冻伤率逐渐升高, 表明该阶段低温主要伤害对象为主芽。各品种之间, 以翠香猕猴桃主芽对低温胁迫最为敏感, 主芽受伤率均最大, 分别为 16.7%, 27.3%, 44.4%,

86.7%; 红阳猕猴桃主芽对低温胁迫敏感性最低, 主芽受伤率均最小, 分别为 14.3%, 12.3%, 12.2%, 36.6%; 各品种主芽冻伤率在 -16°C 时达最大, 之后, 低温伤害由主芽受冻型转为芽座褐变型, 主芽、副芽均受到低温冻害影响, 芽座受冻程度发生质变。

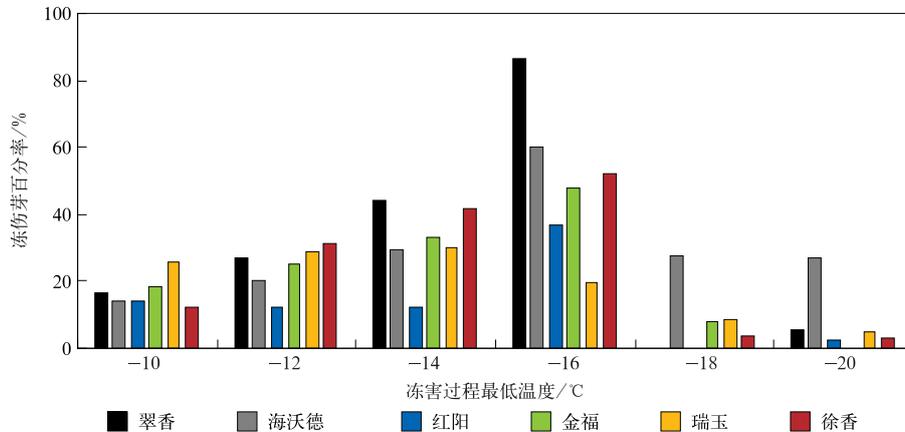


图3 不同强度冻害过程猕猴桃结果母枝芽冻伤率
Fig. 3 The bud frostbite rates of kiwifruit branch under different freezing injury intensities

2.2.1.3 不同低温胁迫下褐变芽变化特征

猕猴桃结果母枝芽座褐变随低温强度的变化如图4所示。在 -10°C 下各品种均未出现芽座褐变现象, $-16^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ 条件下, 平均芽座褐变率在 10% 左右, 当低温强度达到 $-20^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ 时, 褐变率急剧上升, -18°C 为芽座褐变的突变点。就品种

而言, 海沃德的芽座褐变率最小, -18°C 时为 51.7%, -20°C 时为 72.7%, 表现出极强的抗低温能力, 翠香和红阳的芽褐变率最高, -18°C 时已达到 100%, 抗低温能力较弱, 瑞玉和徐香的芽褐变率在 -18°C 时分别为 82.9% 和 88.9%, 抗低温能力居中。

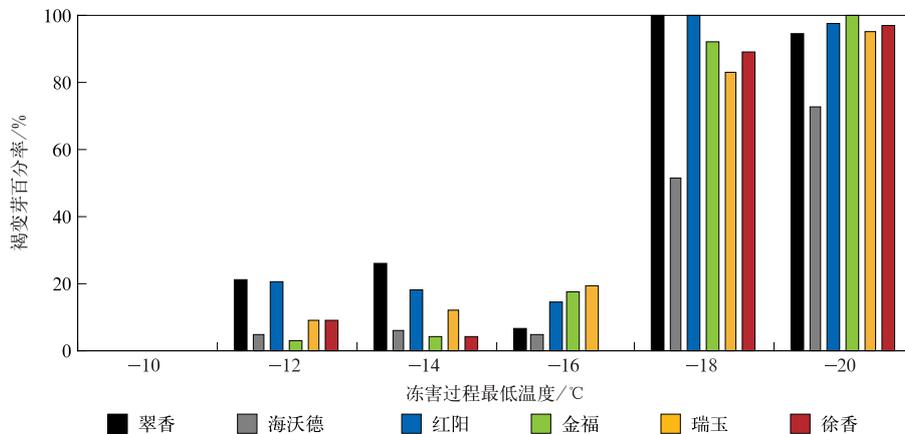


图4 不同强度冻害过程猕猴桃结果母枝芽褐变率
Fig. 4 The bud browning rates of kiwifruit branch under different freezing injury intensities

2.2.1.4 不同低温胁迫下芽冻害指数变化特征

为定量描述低温与芽活性关系, 采用芽冻害指

数反映低温强度对正常芽存留、主芽冻伤、芽座褐变的综合影响(图5)。由图5可以看到, 随低温强度

加大,猕猴桃结果母枝芽冻害指数呈 S 型变化。-10℃ 低温条件下,各品种芽冻害指数为 6.1%~12.9%,品种间差异不大;随温度进一步降低,6 个品种的芽冻害指数逐渐增大,品种间差异较明显。

-20℃ 强低温条件下,除海沃德的芽冻害指数 86.4% 处于较低水平外,翠香、红阳、金福、瑞玉、徐香的冻害指数分别达到 97.3%,98.9%,100%,97.4% 和 98.5%,猕猴桃结果母枝芽几乎全部受损。

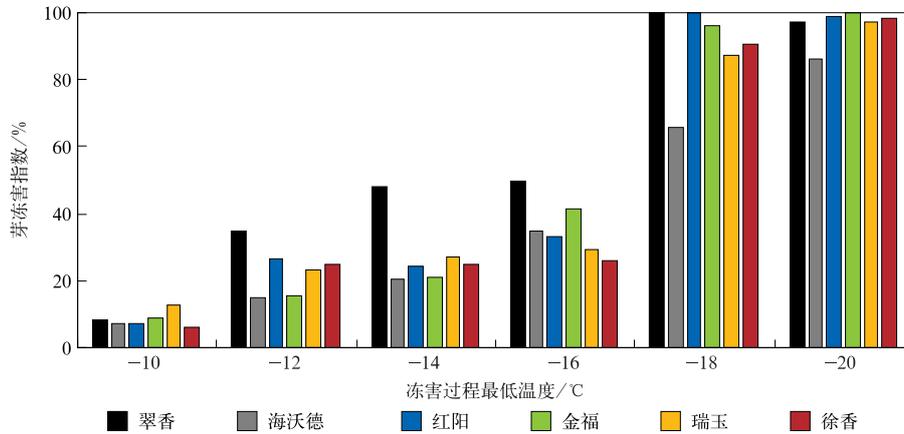


图 5 不同强度冻害过程猕猴桃结果母枝芽冻害指数

Fig. 5 The bud freezing injury index of kiwifruit branch under different freezing injury intensities

将温度与猕猴桃芽冻害指数按式(3)进行 Logistic 方程拟合(表 3)。由表 3 可见,各品种芽座冻害指数与温度的拟合方程均达到 0.05 显著性水平,表明拟合可靠性较强。根据 Logistic 方程求得各品种结

果母枝芽半致死温度,以海沃德最低,为-16.5℃,芽座抗低温能力最强,翠香最高,为-13.4℃,芽座抗低温能力最弱,各品种抗低温性能由强到弱依次为海沃德、徐香、瑞玉、金福、红阳、翠香。

表 3 猕猴桃芽座冻害指数与低温强度 Logistic 拟合方程

Table 3 Logistic fitting equations between freezing injury index of kiwifruit bud base and low temperature intensity

品种	拟合方程	半致死温度/℃	拟合度
翠香	$F=100/(1+2461.96e^{0.75x})^*$	-13.4	0.69
海沃德	$F=100/(1+240.06e^{0.43x})^{**}$	-16.5	0.97
红阳	$F=100/(1+9541.10e^{0.85x})^*$	-13.8	0.71
金福	$F=100/(1+16974.71e^{0.88x})^{**}$	-14.2	0.84
瑞玉	$F=100/(1+454.54e^{0.53x})^*$	-14.8	0.83
徐香	$F=100/(1+1642.33e^{0.64x})^{**}$	-14.9	0.85

注: ** 表示达到 0.01 显著性水平, * 表示达到 0.05 显著性水平。

2.2.2 不同强度自然冻害过程对猕猴桃结果母枝活性的影响

低温冻害对猕猴桃结果母枝的伤害在韧皮部反映明显,低温伤害程度越大,韧皮部褐变程度越高。图 6 为不同低温强度下猕猴桃结果母枝韧皮部冻害指数的变化。由图 6 可知,-14℃~-10℃,猕猴桃结果母枝冻害指数为 0~10%,枝条发生冻害的几率很小;-16℃,翠香、金福、瑞玉开始出现结果母枝受冻褐变现象,冻害指数分别为 13.3%,13.3% 和 16.7%,红阳、海沃德、徐香此时未出现枝条受冻现

象;低温强度增至-18℃,6 个猕猴桃品种枝条受冻指数显著增加,其中翠香、红阳受冻指数趋于 100%,几乎全部受冻褐变,金福、徐香受冻指数为 63.3%,海沃德、瑞玉冻害指数较低,分别为 26.7% 和 36%;低温强度增至-20℃,除翠香、红阳维持受冻指数接近或达到 100% 状态外,瑞玉的受冻指数增加至 83.3%,金福受冻指数增幅较缓,为 74.1%,海沃德、徐香略有增加,受冻指数增至 30.0% 和 66.7%。就品种而言,翠香、红阳结果母枝抗冻性最差,瑞玉、金福、徐香抗冻性居中,海沃德抗冻性能最强。

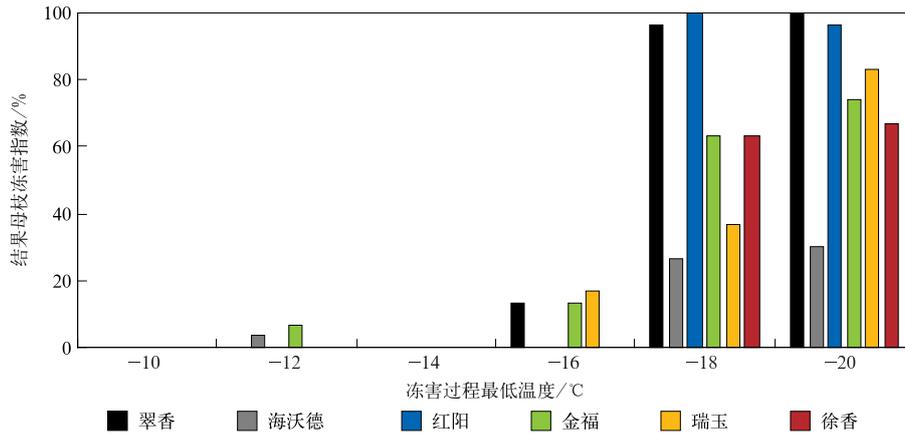


图 6 不同强度冻害过程下猕猴桃结果母枝冻害指数

Fig. 6 The freezing injury index of kiwifruit branch under different freezing injury intensities

2.3 低温强度和持续时间对猕猴桃结果母枝细胞伤害率的影响

对 7 个温度梯度 (-10°C , -12°C , -14°C , -16°C , -18°C , -20°C , -22°C) 和 4 个低温持续时间 (1 h, 3 h, 5 h, 7 h) 共 28 个处理的猕猴桃结果母枝细胞伤害率进行线性化处理, 分析其与低温强度、持续时间及温度分别不超过 -10°C , -12°C , -14°C 和 -16°C 的小时有效负积温 (单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$) 的相关性, 发现猕猴桃结果母枝细胞伤害率与低温强度呈极显著相关 ($P=0.000$); 与不超过 -10°C , -12°C , -14°C 和 -16°C 的小时有效负积温也呈极显著相关, 但相关系数均小于与低温强度的相关性; 与低温持续时间相关不显著。据此, 用不同持续时间处理的细胞伤

害率的平均值与低温强度进行特征分析。

图 7 为红阳、徐香、翠香结果母枝细胞伤害率随低温强度的变化。由图 7 可见, 3 个品种枝条的细胞伤害率总体随低温强度增加而逐渐增大, 即温度越低导致细胞膜的透性越大。在 -10°C , -12°C 和 -14°C 低温条件下, 细胞伤害率随温度降低而缓慢增大, 其中以红阳、翠香的增加幅度较大, 温度每降低 1°C 细胞伤害率增加约 5%, 徐香的增幅相对较小, 温度每降低 1°C 细胞伤害率约增加 3%; 在 -16°C , -18°C 和 -20°C 低温条件下, 细胞伤害率随温度降低显著增加, 增加幅度为 $7\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \sim 10\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $-22^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 低温条件下, 细胞伤害率随温度降低几乎不变, 细胞伤害程度达到最大。

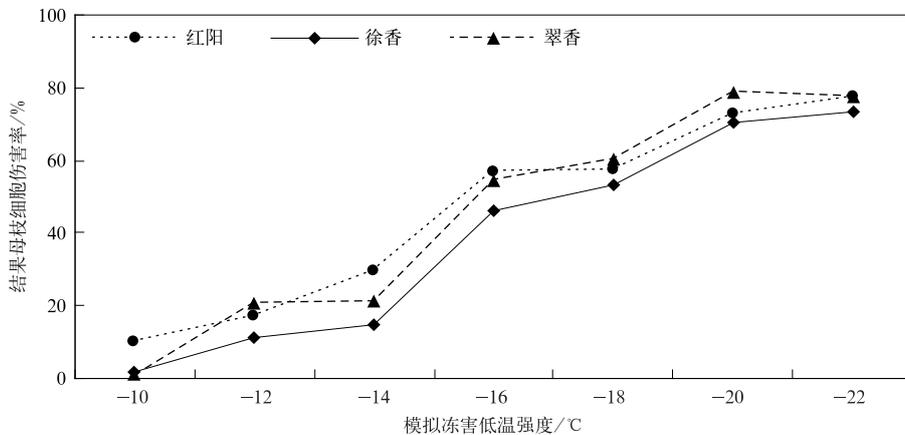


图 7 不同低温强度下猕猴桃结果母枝细胞伤害率

Fig. 7 The cell damage rates of kiwifruit branch under different low temperature intensities

对温度与3个品种细胞伤害率进行 Logistic 方程拟合,红阳、徐香、翠香的拟合度分别为 0.9783, 0.9671 和 0.9078,拟合度均达到极显著水平($P < 0.01$),表明方程可靠性较好。根据 Logistic 方程计算出红阳、徐香、翠香枝条的细胞半致死温度,分别为 -14.8°C , -16.4°C 和 -15.3°C ,据此推断3品种结果母枝的抗低温冻害性能由强到弱依次为徐香、翠香、红阳。

2.4 猕猴桃结果母枝低温冻害指标

猕猴桃结果母枝细胞过冷却点温度、芽存留率、芽冻害指数、枝条冻伤指数、枝条细胞伤害率各参数从不同方面描述低温强度与冻害的关系,其中以结果母枝芽冻害指数的连续性和稳定性较好,还能直观反映低温强度对产量的影响,故以结果母枝芽冻害指数为主要参数,兼顾其他参数,构建猕猴桃结果母枝低温冻害等级指标:①1级,轻度减产型冻害。芽冻害指数不超过10%,正常芽存留率约为80%,结果母枝细胞伤害率低于20%,无低温导致的芽褐变、枝褐变发生,对产量影响不超过10%。②2级,中度减产型冻害。芽冻害指数为10%~30%,正常芽存留率为60%~80%,结果母枝细胞伤害率约为20%,不超过5%的芽受冻褐变失去萌发力,无低温导致的枝条褐变发生,产量因冻害减产约为10%~30%。③3级,重度减产型冻害。芽冻害指数为30%~50%,低温强度达到猕猴桃结果母枝芽的半

致死温度,正常芽存留率为40%~60%,结果母枝细胞伤害率约为20%~30%,大约10%的芽受冻褐变失去萌发力,低温致枝条褐变率不超过10%,产量因冻害减产约为30%~60%,低温主要降低主芽萌发,影响当年产量,副芽可正常萌发出营养枝,不影响次年产量。④4级,绝收型冻害。芽冻害指数为50%~80%,低温强度介于猕猴桃结果母枝芽半致死温度和枝条细胞半致死温度;正常芽存留率小于40%,60%以上的主芽受冻失去结果能力,严重影响当年产量,约20%~40%的芽座受冻褐变,副芽失去萌发能力,对次年产量影响明显,结果母枝细胞伤害率约为30%~60%,低温冻害致枝条褐变率不低于25%,产量因冻害减产为60%~90%。⑤5级,致死型冻害。芽冻害指数不低于80%,低温强度超过猕猴桃结果母枝细胞半致死温度,结果母枝细胞伤害率不低于50%,低温致枝条褐变率不低于25%,抗冻性差的品种枝条几乎全部褐变死亡。

以上述低温冻害分级标准,由各品种结果母枝芽冻害指数 Logistic 拟合方程,计算6种猕猴桃结果母枝各级冻害温度指标(如表4所示)。由表4可见,在猕猴桃结果母枝冻害指标中,海沃德的温度指标最低,抗低温冻害能力最强;红阳、翠香的温度指标偏高,抗低温冻害能力最弱;金福、瑞玉、徐香的温度指标居中,抗低温冻害能力中等,其中瑞玉、徐香强于金福。

表4 6种猕猴桃结果母枝低温冻害分级指标

品种	结果母枝低温冻害等级温度($T/^{\circ}\text{C}$)				
	1级	2级	3级	4级	5级
翠香	$T \geq -10.5$	$-12.0 \leq T < -10.5$	$-13.5 \leq T < -12.0$	$-15.0 \leq T < -13.5$	$T < -15.0$
海沃德	$T \geq -11.5$	$-14.5 \leq T < -11.5$	$-16.5 \leq T < -14.5$	$-20.0 \leq T < -16.5$	$T < -20.0$
红阳	$T \geq -11.0$	$-13.0 \leq T < -11.0$	$-14.0 \leq T < -13.0$	$-15.5 \leq T < -14.0$	$T < -15.5$
金福	$T \geq -11.5$	$-13.0 \leq T < -11.5$	$-14.0 \leq T < -13.0$	$-16.0 \leq T < -14.0$	$T < -16.0$
瑞玉	$T \geq -10.5$	$-13.0 \leq T < -10.5$	$-15.0 \leq T < -13.0$	$-17.5 \leq T < -15.0$	$T < -17.5$
徐香	$T \geq -11.5$	$-13.5 \leq T < -11.5$	$-15.0 \leq T < -13.5$	$-17.0 \leq T < -15.0$	$T < -17.0$

3 结论

1) 猕猴桃各品种中,过冷却点温度以瑞玉、海沃德较低,徐香、金福、翠香相近,红阳最高;芽半致死温度以海沃德最低,瑞玉、徐香、金福居中,翠香、红阳较高。抗低温性能以海沃德最强,瑞玉、徐香、金福居中,翠香、红阳最弱。

2) 不同强度低温造成的伤害程度和伤害部位

差异明显, -16°C ~ -10°C 低温冻害主要影响结果母枝主芽活性,进而影响当年产量,低于 -18°C 的低温冻害对主、副芽的活性均有伤害,影响1~2年的产量, -20°C 以下的低温冻害可造成结果母枝大量死亡。

3) 猕猴桃结果母枝冻害分为5级,对应类型和温度阈值如下:1级为轻度减产型, -11.0°C ~ -10.5°C ;2级为中度减产型, -14.5°C ~ -10.5°C ;3级为重度减产型, -16.5°C ~ -12.0°C ;4级为绝收

型, $-20.0^{\circ}\text{C} \sim -13.5^{\circ}\text{C}$; 5级为致死型, $-20.0^{\circ}\text{C} \sim -15.0^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献

- [1] 朱鸿云. 猕猴桃. 北京: 中国林业出版社, 2009.
Zhu H Y. Actinidia. Beijing: China Forestry Press, 2009.
- [2] 岁立云, 刘义飞, 黄宏文. 红肉猕猴桃种质资源果实性状及 AFLP 遗传多样性分析. 园艺学报, 2013, 40(5): 859-868.
Sui L Y, Liu Y F, Huang H W. Genetic diversity of red-fleshed kiwifruit germplasm based on fruit traits and AFLP markers. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(5): 859-868.
- [3] Li J Q, Li X W, Soejarto D D. Actinidiaceae. *Flora of China*, 2007, 12: 334-360.
- [4] 梁畴芬. 论猕猴桃属植物的分布. 广西植物, 1983, 3(4): 3-22.
Liang C F. On the distribution of Actinidias. *Guangxi Plants*, 1983, 3(4): 3-22.
- [5] 崔致学. 中国猕猴桃. 济南: 山东科学技术出版社, 1993.
Cui Z X. Chinese Actinidia. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1993.
- [6] 黄宏文. 中国猕猴桃种质资源. 北京: 中国林业出版社, 2013.
Huang H W. Chinese Kiwifruit Germplasm Resources. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.
- [7] 中国猕猴桃产业发展报告(2020). (2020-09-25)[2021-03-03]. https://www.sohu.com/a/420839164_230053.
China Kiwifruit Industry Development Report(2020). (2020-09-25)[2021-03-03]. https://www.sohu.com/a/420839164_230053.
- [8] 钟彩虹, 黄宏文. 中国猕猴桃科研与产业四十年. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2018.
Zhong C H, Huang H W. Forty Years of Scientific Research and Industry of Kiwifruit in China. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2018.
- [9] 钟彩虹, 等. 猕猴桃栽培理论与生产技术. 北京: 科学技术出版社, 2020.
Zhong C H, et al. Kiwifruit Cultivation Theory and Production Technology. Beijing: Science and Technology Press, 2020.
- [10] 黄敏, 陈杰忠. 果树抗寒性研究进展. 亚热带植物科学, 2011, 40(1): 80-84.
Huang M, Chen J Z. Research progress on cold-resistance of fruit trees. *Subtropical Plant Science*, 2011, 40(1): 80-84.
- [11] Testolin R, Messina R. Winter cold tolerance of kiwifruit. A survey after winter frost injury in Northern Italy. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 1987, 15(4): 501-504.
- [12] Latocha P. Frost Resistance and Spring Frost Sensibility of a Few Cultivars of Actinidia Grown in Central Poland// Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Horticulture and Landscape Architecture, 2008, 29: 111-120.
- [13] Ebrahimi Y, Jorshari H, Lashtneshaii K H. Frost Damage on Kiwifruit in Iran// VII International Symposium on Kiwifruit, International Society Horticultural Science, 2011: 315-320.
- [14] 安成立, 刘占德, 刘旭峰, 等. 猕猴桃不同树龄冻害调研报告. 北方园艺, 2011(18): 44-47.
An C L, Liu Z D, Liu X F, et al. Kiwifruit research report freezing of different ages. *Northern Horticulture*, 2011(18): 44-47.
- [15] 黄长社, 王雯燕, 王丽, 等. 周至猕猴桃冻害气候特征分析及防御对策. 甘肃科学学报, 2017, 29(6): 46-49.
Huang C S, Wang W Y, Wang L, et al. Analysis and defending countermeasures of Zhouzhi kiwifruit freeze injury climatic characteristics. *Journal of Gansu Sciences*, 2017, 29(6): 46-49.
- [16] 虞志军, 周礼胜, 王岚, 等. 冰冻灾害对庐山植物园猕猴桃生长发育与产量的影响. 中国南方果树, 2012, 41(2): 84-88.
Yu Z J, Zhou L S, Wang L, et al. The effects of cold injury on the growth and yield of Actinidia in Lushan Botanical Garden. *South China Fruits*, 2012, 41(2): 84-88.
- [17] 陈家今, 李丽纯, 林晶, 等. 福建省枇杷气象灾害综合风险评估. 应用气象学报, 2014, 25(2): 232-241.
Chen J J, Li L C, Lin J, et al. Integrated risk evaluation on meteorological disasters of loquat in Fujian Province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(2): 232-241.
- [18] 杨凯, 陈彬彬, 陈惠, 等. 福建省台湾青枣寒害综合气候指标与等级划分. 应用气象学报, 2020, 31(4): 427-434.
Yang K, Chen B B, Chen H, et al. Comprehensive climatic index and grade classification of cold damage for Taiwan green jujube in Fujian. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(4): 427-434.
- [19] 屈振江, 周广胜, 魏钦平. 苹果花期冻害气象指标和风险评估. 应用气象学报, 2016, 27(4): 385-395.
Qu Z J, Zhou G S, Wei Q P. Meteorological disaster index and risk assessment of frost injury during apple florescence. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(4): 385-395.
- [20] 屈振江, 柏秦凤, 梁轶, 等. 气候变化对陕西猕猴桃主要气象灾害风险的影响预估. 果树学报, 2014, 31(5): 873-898.
Qu Z J, Bai Q F, Liang Y, et al. Potential impacts of climate change on the main meteorological disaster risk of kiwifruit in Shaanxi province. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(5): 873-898.
- [21] Hewett E W, Young K. Critical freeze damage temperatures of flower buds of kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1981, 24(1): 73-75.
- [22] Pyke N B, Stanley C J, Warrington I J. Kiwifruit: Frost tolerance of plants in controlled frost conditions. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 1986, 14(4): 443-447.
- [23] Burak M, Samanci H, Buyukyilmaz M. Winter frost resistance of Hayward and Matua kiwifruit cultivars. *Zahradnictvi(Horticultural Science)*, 2004, 31(1): 27-30.

- [24] 孙世航. 猕猴桃抗寒性评价体系的建立与应用. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Sun S H. Establishment and Application of Cold Resistance Evaluation System of Kiwifruit. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [25] 王钊, 罗慧, 李亚丽等. 近 50 年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应. 应用气象学报, 2016, 27(1): 85-94.
Wang Z, Luo H, Li Y L, et al. Effects of urbanization on temperatures over the Qinling Mountains in the past 50 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(1): 85-94.
- [26] 陈峪, 任国玉, 王凌, 等. 近 56 年我国暖冬气候事件变化. 应用气象学报, 2009, 20(5): 539-545.
Chen Y, Ren G Y, Wang L, et al. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 539-545.
- [27] 王培娟, 唐俊贤, 金志凤, 等. 中国茶树春霜冻害研究进展. 应用气象学报, 2021, 32(2): 129-145.
Wang P J, Tang J X, Jin Z F, et al. Review on spring frost disaster for tea plant in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2021, 32(2): 129-145.
- [28] 林苗苗, 孙世航, 齐秀娟, 等. 猕猴桃抗寒性研究进展. 果树学报, 2020, 37(7): 1073-1079.
Lin M M, Sun S H, Qi X J, et al. Advances in research on cold resistance in kiwifruit. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(7): 1073-1079.
- [29] 吴博泽, 郭俊佩, 刘璇, 等. 猕猴桃冻害及抗寒研究进展. 天津农业科学, 2020, 26(8): 67-71.
Wu B Z, Guo J P, Liu X, et al. Research progress on freezing damage and cold resistance of kiwifruit. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2020, 26(8): 67-71.
- [30] 段晓凤, 朱永宁, 张磊, 等. 宁夏枸杞花期霜冻指标试验研究. 应用气象学报, 2020, 31(4): 417-426.
Duan X F, Zhu Y N, Zhang L, et al. Experimental research on frost indexes for lycium barbarum flowering phase. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(4): 417-426.
- [31] 杨爱萍, 杜筱玲, 王保生, 等. 江西省多气象要素的柑橘冻害指标. 应用气象学报, 2013, 24(2): 248-256.
Yang A P, Du X L, Wang B S, et al. The multiple-meteorological-factor indexes for orange frozen injury in Jiangxi Province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(2): 248-256.
- [32] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630.
Guo J P. Research progress on agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(5): 620-630.
- [33] 李星敏, 柏秦凤, 朱琳. 气候变化对陕西苹果生长适宜性影响. 应用气象学报, 2011, 22(2): 241-248.
Li X M, Bai Q F, Zhu L. The influence of climate change on suitability of Shaanxi apple growth. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 241-248.
- [34] 王玮, 李红旭, 赵明新, 等. 7 个梨品种的低温半致死温度及耐寒性评价. 果树学报, 2015, 32(5): 860-865.
Wang W, Li H X, Zhao M X, et al. Study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for seven pear cultivars. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(5): 860-865.
- [35] 赵婷婷, 韩飞, 陈美艳, 等. 基于 3 种模型的猕猴桃重要栽培品种需冷量研究. 中国果树, 2018(6): 36-39.
Zhao T T, Han F, Chen M Y, et al. Study on chilling requirements of important kiwifruit cultivars determined by three models. *China Fruits*, 2018(6): 36-39.
- [36] 郁俊谊. 猕猴桃高效栽培. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Yu J Y. Efficient Cultivation of Kiwifruit. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.

Freezing Injury Index of Kiwifruit Branches for Main Varieties Under Simulated Low Temperature

Li Hualong¹⁾ Wang Jinghong¹⁾ Zhang Weimin¹⁾ Bai Qinfeng¹⁾
Pan Yuying¹⁾ Zhang Tao¹⁾ Quan Wenting¹⁾ Guo Jianping²⁾

¹⁾ (Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crop, Xi'an 710015)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Low temperature freezing injury is the main meteorological disaster affecting the yield and quality of kiwifruit in China. To explore the damage mechanism of low temperature stress on kiwifruit and establish the indices of kiwifruit overwintering freezing injury, the impacts on fruit parent branches of kiwifruit are investigated by simulating natural freezing injury process with MSX-2F artificial simulated frost box system. Growth recovery method, tissue browning method, cell freezing point temperature method and cell membrane damage rate method are used to describe the characteristics of freezing injury quantitatively. By establishing the logistic analysis model of the relationship between freezing injury index and low temperature, the characteristics of freezing injury of 6 varieties are studied systematically. The results show that the response of different varieties to low temperature are significantly different. The supercooling point of Ruiyu and Hayward are lower, which are -3.4°C and -3.2°C , respectively. The supercooling point of Xuxiang, Jinfu and Cuixiang are basically similar, which are -2.0°C , -1.7°C and -1.7°C , respectively. The supercooling point of Hongyang is the highest, which is -1.4°C . The half-lethal temperature of buds of Hayward (-16.5°C) is the lowest. The half-lethal temperature of Ruiyu (-14.8°C), Xuxiang (-14.9°C) and Jinfu (-14.2°C) is intermediate. And the half-lethal temperature of Cuixiang (-13.4°C) and Hongyang (-13.8°C) are the highest. The differences in the degree and site of injury caused by different intensities of low temperature are significant. The freezing injury caused by -16°C to -10°C mainly affects the activity of the main bud of the resulting parent shoot. When the temperature is below -18°C , the low temperature damages the activity of main and secondary buds. And when the temperature is below -20°C , a large number of parent shoots are killed by low temperature injury. Among varieties, the frost resistance of Hayward is the strongest, Ruiyu, Jinfu and Xuxiang are the middle, and Cuixiang and Hongyang are the weakest. Taking the freezing injury index of the resulting parent branch bud as the main parameter, the 5-grade low temperature freezing injury index of the resulting parent branch is constructed by different varieties. Its freezing temperature ranges of level 1-5 are -11.0°C to -10.5°C , -14.5°C to -10.5°C , -16.5°C to -12.0°C , -20.0°C to -13.5°C , -20.0°C to -15.0°C , respectively.

Key words: kiwifruit; low temperature stress; fruit branch; lethal temperature; index of freezing damage