

基于危害积温的枸杞花期霜冻指标试验

朱永宁^{1,2,3}, 张磊^{1,2,3}, 马国飞^{1,2,3}, 徐蕊^{1,2,3}, 李芳红⁴, 段晓凤^{1,5*}

(1. 宁夏回族自治区气象科学研究所, 银川 750002; 2. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002; 3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002; 4. 宁夏大学农学院, 银川 750000; 5. 内蒙古生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051)

摘要:为得到枸杞花期受霜冻危害的温度范围, 探究低温及其持续时间对枸杞花期的影响, 利用人工霜冻实验箱于 2016—2019 年开展了枸杞花期霜冻模拟试验, 统计了不同温度及其不同持续时间下枸杞花期 3 个阶段(花蕾期、初花期、盛花期)的受冻率, 引入危害积温的概念进行了分析, 结合霜冻灾害的实际情况对危害积温的公式进行了修订, 建立了基于危害积温的枸杞花期霜冻指标, 并利用野外实地调查结果对该指标进行了验证。结果表明, 当气温降至 -1°C 时枸杞花朵未出现受冻迹象, 降至 -2°C 时枸杞花朵开始出现受冻迹象, -8°C 时受冻率达到 100%, 说明枸杞花期受霜冻危害的温度范围为 $-8\sim-1^{\circ}\text{C}$, 在此温度范围内, 温度越低、低温持续时间越长, 花朵受冻率越高。枸杞花蕾的抗冻能力最强, 初花次之, 盛花最弱。修订后的危害积温公式对受冻情况的解释更加客观全面, 计算结果与野外调查结果基本一致, 建立的指标能够应用于枸杞花期霜冻灾害预报、预警以及评估。

关键词:温度; 风险评估; 枸杞; 花期; 霜冻指标; 危害积温

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.023

中图分类号: P49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0188-06

朱永宁, 张磊, 马国飞, 等. 基于危害积温的枸杞花期霜冻指标试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 188-193.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.023 <http://www.tcsae.org>

Zhu Yongning, Zhang Lei, Ma Guofei, et al. Frost index of *Lycium Barbarum* during flowering period based on harmful accumulated temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 188-193. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.023 <http://www.tcsae.org>

0 引言

枸杞是茄科枸杞属多年生落叶灌木, 是宁夏农业发展的战略性主导产业, 近年来也在内蒙古、青海、甘肃、新疆等地广泛种植, 是西北地区的重要经济作物^[1]。西北地区是霜冻多发区, 4 月中旬—6 月上旬是春季霜冻危害的关键期^[2-5], 此时各产区的枸杞正值老眼枝开花期到春梢开花期, 霜冻对枸杞花期造成的危害直接关系到枸杞的产量和品质, 对枸杞产业的发展具有较大影响。目前, 针对植物霜冻的研究已在各类粮食作物、棉花以及果树上进行^[6-11], 得到不同植物的霜冻指标是研究的热点之一。在果树霜冻指标方面, 20 世纪 90 年代, 庞廷颐通过霜冻后调查, 得到荔枝、芒果和香蕉不同等级霜冻的受冻范围分别是 $-4.0\sim-0.1$ 、 $-3.5\sim-0.1$ 、 $-1.0\sim-1.1^{\circ}\text{C}$ ^[12]。李政等通过地理移植试验总结出芒果的受害温度区间为 $-2.5\sim-0.5^{\circ}\text{C}$, 低于 -2.5°C 时严重受害^[13]。彭伟秀等利用人工模拟霜冻实验箱研究发现 4 个仁用杏品种的抗寒性不同, 同一朵花中, 抗寒性强弱

为花瓣>雄蕊>雌蕊, 并得到了不同品种杏花器官组织受冻的临界温度^[14]。随着研究的深入, 学者们逐渐发现不同树种、不同品种之间的霜冻指标有所不同, 甚至一个花期不同阶段的霜冻指标也有所不同。许彦平等通过大田试验和低温霜冻模拟试验, 根据受冻率确定了桃花不同霜冻级别的温度范围, 并给出了对应的气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的持续时间^[15]。王景红等通过人工气候实验箱和人工霜冻模拟箱对中国北方苹果花期霜冻开展了试验研究, 建立了基于低温和低温持续时间的霜冻指标体系^[16-18]。其他学者通过研究建立了茶树、酿酒葡萄、巴丹杏、梨、李子等林果的霜冻指标^[19-22]。多位学者的研究表明霜冻危害不仅与低温有关, 还与低温持续时间有关, 但在实际中难以完成低温和持续时间的“全排列”试验, 导致建立的指标中温度和持续时间的区间范围无法完全闭合, 只能根据经验划定闭合区间, 这在一定程度上影响指标的准确性和实际应用。还有些研究以最低温度低于某一界限的日数作为时间指标, 但由于气温的日变化幅度较大, 以日为单位描述低温的持续时间不够客观, 无法准确的反映低温持续情况, 目前, 天气预报已能实现逐小时的气温预报。为了建立可以同时反映低温及其持续时间的霜冻指标, 又能结合当前天气预报的精度开展应用, 本研究引入了危害积温^[23]的概念, 在 2016—2019 年利用人工霜冻实验箱开展了枸杞花期霜冻指标的研究, 修订了危害积温计算公式, 建立的指标更符合客观实际, 同时能更好的应用于枸杞花期霜冻预报、预警和评估。

收稿日期: 2020-01-07 修订日期: 2020-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41565007); 第四批“宁夏青年科技人才托举工程”项目(TJGC2019058)。

作者简介: 朱永宁, 工程师, 主要从事农业气象灾害研究。

Emai: zhuyongning.007@163.com

*通信作者: 段晓凤, 高级工程师, 主要从事农业气象资源与灾害研究。

Emai: dxl_1127@163.com

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验所用枸杞品种为‘宁杞 1 号’，该品种具有产量高、品质优、抗病性和抗虫性强等综合优势^[24]，自 20 世纪 70 年代开始在全国各产区广泛种植。试验于每年 4—5 月枸杞开花时进行，所用枸杞枝条来自宁夏枸杞研究所的试验田，试验田位于宁夏银川市西夏区芦花镇。每次试验前选择生长健康且有花器官的枸杞枝条，将枸杞枝条剪下后置于营养液中备用。

人工霜冻试验箱是中国农科院农业环境与可持续发展研究所研制的 MSX-2F 型，实验箱内尺寸是 1 m(长)×1 m(宽)×0.77 m(高)。温度控制范围为-20~30℃，精度为±0.5℃，可设置到小数点后 1 位。温度持续时间最短设置时长为 0.5 h，最长为 12 h。箱内设有 40 个温度探头，每 10 s 采集 1 次温度，采集精度为±0.3℃，数据通过实验箱配套的数据采集仪自动记录并存储。

利用奥林巴斯牌显微镜作为霜冻调查的辅助工具，型号为 CX31，放大倍数 10~40 倍。

1.2 试验方法

本试验中低温处理范围为-9~-1℃，选择-1℃是参考了宁夏 2010—2018 年枸杞开花期出现的低温以及枸杞农业气象灾害的记录，在历史记录中，最低气温达到 0℃时并没有受冻的记载，所以选择从-1℃开始。-9℃是在试验中从-1℃开始依次进行试验所得，在-8℃持续 1 h 时，枸杞花朵全部受冻，又进行了-9℃持续 1 h 的试验，结果与-8℃一样。低温处理的间隔为 1℃。试验按照一个温度梯度不同持续时间进行，持续时间从 1 h 到 6 h 不等。每次试验处理设置 3 个重复，每个重复中花蕾、初花、盛花数量均达到 50 个以上。为使模拟降温与实际霜冻过程更接近，以室温为初始温度，按照 4.0℃/h 的速度降至 0℃，再以 1.0~3.0℃/h 的速度下降至处理温度并持续相应时间，试验结束后关闭人工霜冻试验箱，温度自然升温至室温，试验结束 24 h 后开始调查。

参考其他学者的研究结果^[22,25]，结合枸杞花朵的特征，总结了枸杞花朵受冻的状况(表 1)，在受冻调查时按照此标准进行观察，只要出现表中所列的一种状况即统计为受冻，分别统计计算花蕾、初花和盛花以及所有花朵的受冻率，以受冻率<30%，30%~70%，>70%分别作为轻、中、重度霜冻的判别标准^[26]，受冻率=受冻花朵数量/调查花朵总数×100%。

1.3 危害积温的计算方法及统计分析方法

根据危害积温定义，在低温危害过程中其计算公式如下

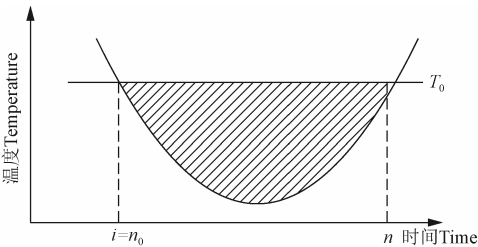
$$K = -\sum_{i=n_0}^n (T_i - T_0) \quad (1)$$

式中 K 是危害积温，℃·h。 T_i 是某一次低温危害过程的逐时温度，℃， T_0 是低温危害的临界温度，℃， $T_i \leq T_0$ 。 n 为低温过程中温度低于临界温度的持续时间，h， n_0 是低温危害过程的临界时间，h。低温危害的危害积温可用图 1 表示。由于人工霜冻试验箱采集温度的精度比控制温度的精度高，且在试验过程中控制温度不能完全与设计温

度一致，故本文中计算危害积温时 T_i 使用实际的采集温度，即实验箱中 40 个温度探头记录的每小时平均温度。

表 1 枸杞花期 3 个阶段受冻症状标准
Table 1 Symptoms of frozen level of *Lycium Barbarum* during three flowering phases

| 花期的不同阶段 Different stages of flowering | 受冻症状 Freezing symptoms |
|--|--|
| 花蕾期 Bud stage | 1) 花蕾外皮颜色变深且有皱状，或者变黑、干枯；2) 雄蕊颜色变褐、变黑或变形萎缩，切开雄蕊花药背面凹陷处颜色变褐、变黑；3) 子房切面颜色变褐或变黑；4) 花梗根部变黑、明显变软、变细，有些一碰即掉。 |
| 初花期 Early flowering period | 1) 雄蕊颜色变褐、变黑或变形萎缩，切开雄蕊花药背面凹陷处颜色变褐、变黑；2) 子房与花梗连接处出现褐变，锥形花瓣下部变褐、变黑，柱头变干、变深褐色或黑色；3) 子房中部颜色变褐或变黑，且子房明显有水渍；4) 花梗颜色变褐或变黑，变软、变细，有些一碰即掉。 |
| 盛花期 Full flowering period | 1) 紫色花瓣明显褐变，子房出现褐变；2) 花梗呈黑绿色且变软，切面变褐、变黑；3) 黄色花子房变黑，紫色花子房明显出现水渍；4) 花梗根部变黑、变软、变细，有些一碰即掉。 |



注： T_0 表示低温危害的临界温度； n 表示低温过程中温度低于临界温度的持续时间； n_0 表示低温危害过程的临界时间。
Note: T_0 is the critical point of the cold hazard; n is the duration of the cold process when the temperature is below critical point; n_0 is the critical time of the cold hazard process.

图 1 危害积温示意图

Fig.1 Schematic diagram of harmful accumulated temperature

根据试验结果及分析，当气温为-1℃持续 4 h 时枸杞花均未表现出受冻的迹象，到-2℃持续 1 h 时开始出现霜冻的迹象，说明枸杞霜冻指标的临界高温为-1℃，即 $T_0=-1℃$ 。本试验中处理的最短时长为 1 h，临界时间为 1 h，即 $n_0=1 h$ 。当温度降低到-8℃及以下时，所有的枸杞花朵受冻率均达到 100%，无论低温时间继续延长或者温度继续降低，都不再导致枸杞花受冻率(程度)增加，危害积温仅从数学计算结果上有所增加，但在霜冻过程中并没有实际意义。利用试验中人工霜冻试验箱采集的温度，根据公式(1)计算危害积温，在-8℃持续 1 h 时， $K=21.43℃·h$ ，-5℃持续 4 h 时 $K=21.01℃·h$ ，从数学计算结果上可以看出 2 种情况基本一致，但实际情况是-8℃持续 1 h 枸杞花朵受冻率为 100%，-5℃持续 4 h 的受冻率仅为 39%。由此可见，(1) 式仅描述了在霜冻过程中的临界高温的情况，没有考虑到临界低温的情况，为了更客观的描述霜冻危害，将(1) 式修订为

$$K = \begin{cases} 0 & T_i \geq -1^\circ\text{C} \\ -\sum_{i=n_0}^n (T_i - T_0) & -8^\circ\text{C} < T_i < -1^\circ\text{C} \\ \infty & T_i \leq -8^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)用分段函数的形式更客观的描述了枸杞受霜冻危害时的情况,明确了枸杞花期霜冻危害的临界低温和临界高温,即温度 $\geq -1^{\circ}\text{C}$ 时,持续时间达到1 h,枸杞花朵不受霜冻危害,危害积温为 $0^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 。温度 $\leq -8^{\circ}\text{C}$ 时,持续时间达到1 h,所有枸杞花朵的危害积温为 ∞ ,即全部受冻。温度在 -1°C 到 -8°C 之间时,危害积温在数值上等于逐小时温度与临界温度之差的累积和。

统计分析工具使用的是 SPSS 25.0,使用双变量相关分析,相关系数选择 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 枸杞花朵不同阶段受霜冻时的受冻率

在试验中分别统计花蕾、初花和盛花的受冻率,并计算出所有花朵的整体受冻率,详见表2。

表2 不同低温处理-持续时间下枸杞花朵受冻率

| 温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$ | 持续 1 h For 1 hour | | | | 持续 2 h For 2 hours | | | | 持续 3 h For 3 hours | | | | 持续 4 h For 4 hours | | | | 持续 5 h For 5 hours | | | | 持续 6 h For 6 hours | | | | % |
|---------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|--------------------|----|----|----|--------------------|----|----|----|--------------------|----|----|----|--------------------|----|----|----|---|
| | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | 花蕾 | 初花 | 盛花 | 整体 | |
| -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | |
| -2 | 1 | 28 | 28 | 11 | 21 | 28 | 31 | 29 | 28 | 32 | 36 | 30 | 31 | 36 | 38 | 36 | 33 | 46 | 44 | 38 | 36 | 46 | 44 | 42 | |
| -3 | 20 | 31 | 36 | 26 | 26 | 33 | 42 | 33 | 32 | 33 | 50 | 37 | 37 | 35 | 58 | 43 | 38 | 49 | 61 | 47 | 42 | 63 | 75 | 49 | |
| -4 | 28 | 35 | 43 | 35 | 30 | 36 | 41 | 31 | 30 | 46 | 54 | 39 | 31 | 55 | 58 | 41 | 49 | 63 | 64 | 53 | - | - | - | - | |
| -5 | 30 | 38 | 46 | 34 | 30 | 40 | 49 | 35 | 33 | 48 | 52 | 37 | 33 | 58 | 58 | 39 | 59 | 70 | 67 | 59 | 65 | 87 | 68 | 73 | |
| -6 | 45 | 49 | 61 | 50 | 47 | 55 | 65 | 57 | 45 | 49 | 61 | 54 | 76 | 70 | 94 | 78 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| -7 | 39 | 65 | 61 | 49 | 53 | 65 | 61 | 64 | 56 | 91 | 64 | 65 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| -8 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| -9 | 100 | 100 | 100 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

注:表中“-”表示未开展相应低温和对应的持续时间试验。

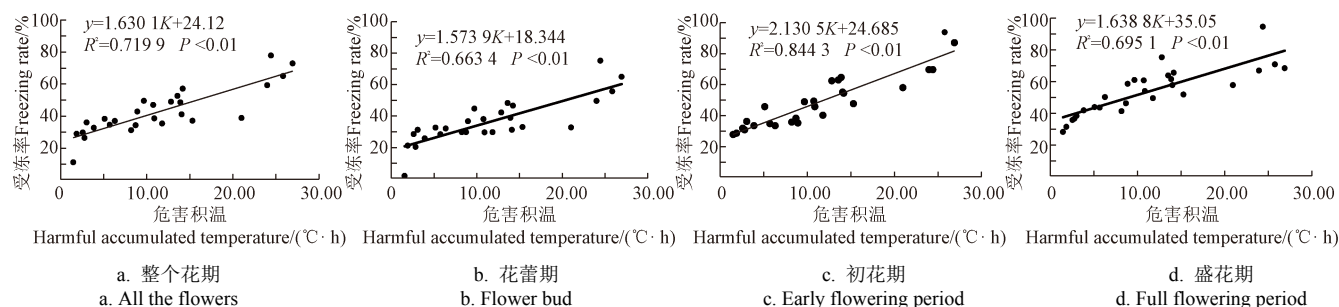
Note:“-” in the table means that the corresponding low temperature and corresponding duration test have not been carried out.

分析表2的结果,可以发现枸杞花蕾、初花、盛花在 -1°C 时均未出现受冻情况,在 -2°C 时开始出现受冻现象,说明枸杞花朵的受冻临界高温为 -1°C 。温度达到 -8°C 及以下时,低温处理持续1 h,枸杞花朵受冻率达到100%,说明枸杞花朵的受冻临界低温为 -8°C 。在 $-8\sim -1^{\circ}\text{C}$ 之间,同一低温处理下,低温持续时间越长枸杞受冻率越高。同一持续时间下,处理温度越低,枸杞受冻率越高。这一结果与国内外其他学者研究的结论一致^[16-17,22]。同时可以发现,枸杞花朵不同阶段的抗冻能力是不同的,整体上花蕾的抗冻能力最强,初花次之,盛花最弱。

2.2 枸杞花期霜冻指标建立与验证

依据试验数据,计算不同处理下枸杞花朵遭受霜冻的危害积温,分别与花蕾、初花、盛花以及全部花朵的受冻率做相关分析并建立回归方程,枸杞花朵在遭受霜冻后的受冻率和危害积温呈正相关,在 $P<0.01$ 水平下,

$R^2\geq 0.66$,显著相关(图2)。以受冻率 $<30\%$, $30\%\sim 70\%$, $>70\%$ 分别作为轻、中、重度霜冻的判别标准,利用受冻率与危害积温的关系,分别计算得到不同程度霜冻情况下枸杞花蕾、初花、盛花以及全部花朵的危害积温范围(表3):全部花朵受到轻、中、重度霜冻时对应范围为 $0.0<K\leq 3.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $3.6<K\leq 28.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $28.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}<K$;花蕾受到轻、中、重度霜冻时对应的 K 值范围为 $0.0<K\leq 7.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $7.4<K\leq 32.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $32.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}<K$;初花期受到轻、中、重度霜冻时对应的范围为 $0.0<K\leq 2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $2.5<K\leq 21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、 $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}<K$;盛花期受到中度和重度霜冻时对应范围为 $0.0<K\leq 21.3$ 和 $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}<K$ 。根据回归方程计算得到盛花遭受轻度霜冻时的危害积温为 $-3.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$,经过与试验结果比较,盛花在 -2°C 持续1 h时受冻率达到28%, -2°C 持续2 h时受冻率达到了31%,可见在临界高温(-1°C)以下,持续1 h直接会导致枸杞盛花受到中度霜冻害。



注: y 是受冻率, %; K 是危害积温, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 。

Note: y is freezing rate, %; K is harmful accumulated temperature, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$.

图2 枸杞花朵受冻率与危害积温的关系

Fig.2 The relationship between the freezing rate of the *Lycium Barbarum* flowers and the harmful accumulated temperature

2018年4月6—7日宁夏出现了大风沙尘、寒潮、霜冻天气过程,此时宁夏灌区枸杞正值花蕾期。4月7日上

午工作人员赴宁夏枸杞产区进行了实地调查。利用临近自动气象站数据计算危害积温并与大田调查结果比较,

对建立的指标进行了验证。验证结果显示, 7 个调查点中, 中宁县渠口太阳梁受冻程度的实际调查结果是中度, 根据危害积温计算的结果为轻度, 实际调查的霜冻害程度比计算的程度高, 其他 6 个调查点的实际调查结果与计算结果相符 (表 4)。

表 3 枸杞花朵受到不同程度冻害对应的危害积温范围

Table 3 The harmful accumulated temperature range of *Lycium Barbarum* flowers under different degrees of freeze damage ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)

| 花期的不同阶段 Different flower phases | 轻度 Mild | 中度 Moderate | 重度 severe |
|------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| 整个花期 All the flowers | $0 < K \leq 3.6$ | $3.6 < K \leq 28.1$ | $28.1 < K$ |
| 花蕾期 Flower bud | $0 < K \leq 7.4$ | $7.4 < K \leq 32.8$ | $32.8 < K$ |
| 初花期 Early flowering period | $0 < K \leq 2.5$ | $2.5 < K \leq 21.3$ | $21.3 < K$ |
| 盛花期 Full flowering period | - | $0 < K \leq 21.3$ | $21.3 < K$ |

注：轻度、中度和重度分别对应的是受冻率 $<30\%$, $30\% \sim 70\%$, $>70\%$ 。
Note: The mild, moderate and severe in the table correspond to freezing rate $<30\%$, $30\% \sim 70\%$, $>70\%$.

表 4 基于危害积温的计算结果与实际调查结果比较

Table 4 Comparing the calculated results based on the harmful accumulated temperature with the actual survey results

| 调查地点 Survey location | 受冻程度实际调查结果 Actual investigation of freezing degree | 危害积温 Harmful accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) | 计算结果 Calculation results | 符合情况 Consistent or not |
|-------------------------|---|--|-----------------------------|---------------------------|
| 中卫市宣和 | 中度 | 9.8 | 中度 | 符合 |
| 中宁县长山头百瑞源基地 | 中度 | 10.4 | 中度 | 符合 |
| 中宁县舟塔孔滩 | 重度 | 33.7 | 重度 | 符合 |
| 中宁县大地红梧山 | 中度 | 13.9 | 中度 | 符合 |
| 中宁县上渠 | 中度 | 17.6 | 中度 | 符合 |
| 中宁县渠口太阳梁 | 中度 | 4.2 | 轻度 | 计算结果较实际调查轻 |
| 青铜峡市曲靖乡 | 轻度 | 3.8 | 轻度 | 符合 |

3 讨 论

本研究中枸杞花朵受冻模拟试验均为离体试验, 虽然对枸杞枝条进行了营养液培养, 但其抗冻能力与活体枝条的差异难以避免。试验中的模拟降温过程更趋于理想状况, 并且间隔为 1 h, 与实际情况有所不同^[27]。利用危害积温计算的霜冻危害等级与实际调查情况基本一致, 但调查时枸杞花均为花蕾期, 初花和盛花期的受冻情况还需在后期加以验证。

本试验结果显示花蕾、初花和盛花的耐冻能力不同, 但受冻的临界温度一样, 在 -1°C 持续 4 h 受冻率为 0, 而在 -8°C 持续 1 h 的情况下受冻率为 100%, 这可能与没有开展半致死温度试验有关, 未得到真正的致死拐点温度, 在后期还可以继续开展相关试验研究。另外, 试验结果也说明, 温度对生物的影响方式主要有温度强度、持续时间和温度变化, 其中温度强度是最基本条件, 只有具备了一定的强度, 其持续时间与变化才能对生物产生影响^[28-29]。

危害积温在作物灾害的应用中前人已有过研究, 但

在原来的计算公式中, 针对霜冻及其他低温危害中只考虑了临界高温, 根据霜冻实际情况, 在临界低温以下, 受冻率以及受冻程度不再随着温度降低和持续时间延长而增加, 所计算的危害积温与实际受害情况不符^[30], 本研究明确了临界低温, 并定义在临界低温及以下时, 持续时间超过临界时间, 危害积温为无穷大, 这样描述更符合客观情况。同理, 在高温危害中也应如此描述。在危害温度持续时间方面, 也应该考虑最短临界时间 (某一温度下植株开始出现受冻症状时的持续时间) 和最长临界时间 (某一温度下导致全部植株致受冻时的持续时间), 由于本文中试验条件限制, 以 1 h 为最短临界时间, 其他情况在有条件时还可以继续开展研究。

4 结 论

本文引入危害积温的概念分析枸杞花期受冻情况, 同时根据霜冻实际对危害积温公式进行了修订, 据此建立的指标用于枸杞花期霜冻的预报、预警以及评估, 主要结论如下:

1) 温度 $\geq -1^{\circ}\text{C}$ 时, 枸杞花朵不受冻; 温度 $\leq -8^{\circ}\text{C}$ 并持续 1 h, 枸杞花朵受冻率达到 100%; 在 $-8^{\circ}\text{C} \sim -1^{\circ}\text{C}$ 范围内, 枸杞花朵受冻率随着温度的降低和持续时间的增加呈线性增加趋势。枸杞花蕾的抗冻能力最强, 初花次之, 盛花最弱。

2) 根据建立的指标, 枸杞花蕾受到轻、中、重度霜冻时对应的危害积温 K 值范围为 $0.0 < K \leq 7.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, $7.4 < K \leq 32.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, $32.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h} < K$ 。初花期受到轻、中、重度霜冻时对应的 K 值范围为 $0.0 < K \leq 2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, $2.5 < K \leq 21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h} < K$ 。盛花期受到中度和重度霜冻时对应的 K 值范围为 $0.0 < K \leq 21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, $21.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h} < K$ 。

根据试验结果, 没有得到盛花期受轻度霜冻的指标, 推断盛花期在低温 $-2 \sim -1^{\circ}\text{C}$ 之间, 持续时间小于 1 h 的情况下可能会出现轻度霜冻的现象, 由于本试验没有如此精度, 同时鉴于霜冻的标准, 可以接受此结果。

【参 考 文 献】

- [1] 马力文, 刘静. 枸杞气象业务服务[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 1-7.
- [2] 陈少勇, 夏权, 王劲松, 等. 西北地区晚霜冻结束日的气候变化特征及其影响因子[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 8-13.
Chen Shaoyong, Xia Quan, Wang Jinsong, et al. Climatic variation characteristics and influencing factors of the last frost date in Northwest China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(1): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王连喜. 宁夏农业气候资源及其分析[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2008: 110-116.
- [4] 郭晓雷, 申双和, 张磊, 等. 宁夏枸杞种植区春霜冻发生的时空分布特征分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 238-242.
Guo Xiaolei, Shen Shuanghe, Zhang Lei, et al. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of spring frost in the planting area of *Lycium Barbarum* in Ningxia[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(6): 238-242. (in

- Chinese with English abstract)
- [5] 张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 气候变暖背景下新疆无霜冻期时空变化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1908-1916. Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin, et al. The impact of global warming on frost-free periods from 1961 to 2010 in Xinjiang[J]. Resources Science, 2013, 35(9): 1908-1916. (in Chinese with English abstract)
 - [6] 李茂松, 王道龙, 钟秀丽, 等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 72-78. Li Maosong, Wang Daolong, Zhong Xiuli, et al. Current situation and prospect of research on frost of winter wheat[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(4): 72-78. (in Chinese with English abstract)
 - [7] 张燕. 北疆垦区农业气候变化对棉花生产影响的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. Zhang Yan. The Effect of Climate Change on Cotton Production in Typical Agriculture Regiment of North Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese with English abstract)
 - [8] 张晓煜, 马玉平, 苏占胜, 等. 宁夏主要作物霜冻试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(2): 50-54. Zhang Xiaoyu, Ma Yuping, Su Zhansheng, et al. Experiments on frost injuries of main crops in Ningxia Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(2): 50-54. (in Chinese with English abstract)
 - [9] 李红英, 段晓凤, 王静, 等. 宁夏苹果花期霜冻敏感性指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 184-188. Li Hongying, Duan Xiaofeng, Wang Jing, et al. Research on frost sensitive indexes in apple blossom in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 184-188. (in Chinese with English abstract)
 - [10] Bascietto M, Bajocco S, Ferrara C, Alivernini A, et al. Estimating late spring frost-induced growth anomalies in European beech forests in Italy[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(8): 1039-1049.
 - [11] Wang Yafeng, Case Bradley, Rossi Sergio, et al. Frost controls spring phenology of juvenile Smith fir along elevational gradients on the southeastern Tibetan Plateau[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(7): 963-972.
 - [12] 庞庭颐. 荔枝等果树的霜冻低温指标与避寒种植环境的选择[J]. 广西气象, 2000, 21(1): 12-14. Pang Tingyi. Frostbite low temperature index and selction of planting environment escaping cold for fruiterers such as litchi[J]. Journal of Guangxi Meterology, 2000, 21(1): 12-14. (in Chinese with English abstract)
 - [13] 李政, 苏永秀, 王莹, 等. 芒果寒(冻)害等级划分及低温指标确定[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 18-22, 56. Li Zheng, Su Yongxiu, Wang Ying, et al. Determination of cold (freezing) injury classification and indicator of low temperature on mango[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 18-22, 56. (in Chinese with English abstract)
 - [14] 彭伟秀, 杨建民, 张芹, 等. 杏花器官组织抗寒性研究[J]. 果树学报, 2002, 19(2): 108-110. Peng Weixiu, Yang Jianmin, Zhang Qin, et al. Resistance to cold gardiness of flower parts of apricot varieties[J]. Journal of Fruit Science, 2002, 19(2): 108-110. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 许彦平, 万信, 贾建英, 等. 北京 7 号桃树 (*Prunus armeniaca*) 盛花期霜冻害指标试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 195-200.
 - Xu Yanping, Wan Xin, Jia Jianying, et al. Experimental study on frost index of Beijing No. 7 peach trees in full blooms[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(11): 195-200. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 王景红, 刘璐, 高峰, 等. 陕西富士系苹果花期霜冻灾害气象指标的修订[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 50-56. Wang Jinghong, Liu Lu, Gao Feng, et al. Revision on meteorological indices of florescence frost disaster for Fuji apple in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 50-56. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 王景红, 高峰, 刘璐, 等. 陕西省富士系苹果花晚霜冻指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 268-285. Wang Jinghong, Gao Feng, Liu Lu, et al. Investigation on the last freezing indexes of Fuji apple flowers in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 268-285. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 张晓煜, 万信, 李红英, 等. 北方果园霜冻防御[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 43-60.
 - [19] 李仁忠, 金枝凤, 杨再强, 等. 浙江省茶树春霜冻害气象指标的修订[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2659-2666. Li Renzhong, Jin Zhifeng, Yang Zaiqiang, et al. Revision on meteorological indices of spring frost disaster for Camellia sinensis in Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(10): 2659-2666. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 段晓凤, 张磊, 李红英, 等. 贺兰山东麓酿酒葡萄新梢萌芽室内霜冻模拟试验[J]. 经济林研究, 2018, 35(4): 171-176. Duan Xiaofeng, Zhang Lei, Li Hongying, et al. Laboratory frost simulation experiment of wine grape at germination period of young sprouts at eastern foot of Helan Mountain[J]. Nonwood Forest Research, 2018, 35(4): 171-176. (in Chinese with English abstract)
 - [21] 陈丛敏, 刘立宏, 王东, 等. 巴旦杏春季低温霜冻灾害气象指标分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(1): 57-60. Chen Congmin, Liu Lihong, Wang Dong, et al. Analysis of meteorological indexes of freeze injury on amygdalus communis L. in Spring[J]. Desert and Oasis Meterology, 2014, 8(1): 57-60. (in Chinese with English abstract)
 - [22] 王静, 张晓煜, 杨洋, 等. 宁夏杏、李子花期幼果期霜冻指标试验研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 93-98. Wang Jing, Zhang Xiaoyu, Yang Yang, et al. Experimental study on frost index of apricot and plum in Ningxia Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 93-98. (in Chinese with English abstract)
 - [23] 程德瑜. 危害积温及其在作物灾害中的应用[J]. 中国农业气象, 1988, (1): 51-53.
 - [24] 胥耀平, 李冰. 10 个主要枸杞品系综合评定[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(3): 46-49, 58. Xu Yaoping, Li Bing. Comprehensive evaluation on ten main cultivated superior clones of Lycium barbarum[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996, 11(3): 46-49, 58. (in Chinese with English abstract)
 - [25] 孟庆瑞, 王文凤, 梁隐泉, 等. 杏品种花器官过冷却点及结冰点的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1128-1133. Meng Qingrui, Wang Wenfeng, Liang Yinquan, et al. Study on supercooling point and freezing point in floral organs of apricot[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1128-1133. (in Chinese with English abstract)
 - [26] 中国气象局, QX/T 88-2008 作物霜冻害等级[S]. 北京: 气

- 象出版社, 2008.
- [27] 杜钰娉. 五彩柃树的抗寒性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- Du Yuping. Studies on Freezing Resistance of Japanese Osmanthus Heterophyllus That is Excellent Osmanthus Lour tree[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [28] 简桂良, 邹亚飞, 王天存, 等. 不同强度温度刺激对棉花黄萎病的影响[J]. 棉花学报, 2003, 15(3): 83-86.
- Jian Guiliang, Zou Yafei, Wang Tiancun, et al. Influence of different temperature on cotton verticillium wilt[J]. Cotton Science, 2003, 15(3): 83-86. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张倩. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010.
- Zhang Qian. Study on the Impact Assessment of High Temperature Damage for Rice in the Lower and Middle Reaches of Yangtze River[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [30] 段若溪, 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 74-82.

Frost index of *Lycium Barbarum* during flowering period based on harmful accumulated temperature

Zhu Yongning^{1,2,3}, Zhang Lei^{1,2,3}, Ma Guofei^{1,2,3}, Xu Rui^{1,2,3}, Li Fanghong⁴, Duan Xiaofeng^{1,5*}

(1. Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China; 4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750000, China; 5. Inner Mongolia Ecology and Agro-Meteorology Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: *Lycium Barbarum* (also called wolfberry) is a deciduous shrub mainly grown in northwestern China. The flowering phase of *Lycium Barbarum* is from April to June when the frost occurred frequently. The harm of frost at this time can directly affect the yield and quality of *Lycium Barbarum*. It is necessary to study the frost index of *Lycium Barbarum* in the flowering phase for frost forecast, early warning, and evaluation. Taking the species of 'Ningqi No.1' as research object, we investigated the effect of low temperature and its duration on the frost index of the *Lycium Barbarum* flowering phase. In the spring of 2016-2019, an artificial frost test box was used to conduct the frost index experiments in Yinchuan, Ningxia Province, northwestern China. An invitro test was conducted in the low-temperature treatment. The young branches in a healthy growth state were selected from the experimental field in the Ningxia *Lycium Barbarum* Research Institute. The experimental temperature gradients were set from -9°C to -1°C , with an interval of 1°C . The selection of temperature gradients referred to the temperature reduction during the spring frost disasters in Ningxia from 2010 to 2018, and the observation records of the *Lycium Barbarum* agro-meteorological disasters. Different duration, from 1h to 6h, was set at an experimental temperature in each experiment. Three samples were used at each experimental temperature for reproducibility. More than 50 flower buds were selected for the early flowering and full flowering periods in each replicate. The room temperature was used as the initial temperature, and it was reduced to 0°C at a rate of 4.0°C/h , finally decreased to the experiment temperature at a rate of $1.0-3.0^{\circ}\text{C/h}$. The experiment temperature can be holding for the preset duration. The experiment box was closed once the experiment was completed, where the temperature naturally rose to room temperature. The freezing conditions of *Lycium Barbarum* flowers can be examined after 24 hours. In the post processing step, a concept of harmful accumulated temperature was introduced to systematically elucidate the effect of low temperature and its duration on *Lycium Barbarum* flowers. The results showed that the freezing rate and freezing degree cannot increase as the decrease of temperature and duration below the critical low temperature. A approximate formula of harmful accumulated temperature was modified using a piecewise function, in order to describe the degree of frost damage of *Lycium Barbarum* flowers at different temperature stages, according to the actual situation of damage. Then, combined with different freezing rates, the frost index of the *Lycium Barbarum* flowering phase was established based on the harmful accumulated temperature, and verified by the field experiments. The experimental results showed that when the temperature dropped to -1°C , there was no sign of freezing on the flower organs of *Lycium Barbarum*, whereas, when it fell to -2°C , the signs of freezing began to occur, with the freezing rate up to 100% at -8°C , indicating that the temperature range of frost damage was -8°C to -1°C during the *Lycium Barbarum* flowering phase. In addition, the different frost resistance of flowers varied at different stages. Specifically, flower buds showed the strongest frost resistance, followed by that in the early flowering period, and the weakest in the full flowering period. The proposed frost index based on the harmful accumulated temperature can be used to determine the critical low temperature of different forms of flower organs caused by frost, particularly considering concurrently the low-temperature intensity and duration, thereby to precisely predict the freezing conditions of the *Lycium Barbarum* flowers. The finding can provide a promising approach for the accurate forecast, early warning, and assessment for the frost of *Lycium Barbarum*.

Keywords: temperature; risk assessment; *Lycium Barbarum*; flowering phase; frost index; harmful accumulated temperature