

段晓凤, 刘伟, 包佳婧, 等. 内蒙古河套向日葵低温致灾试验与指标构建. 应用气象学报, 2025, 36(1): 24-32.

DOI: 10.11898/1001-7313.20250103

内蒙古河套向日葵低温致灾试验与指标构建

段晓凤¹⁾ 刘伟²⁾ 包佳婧²⁾ 刘艳丽²⁾ 李淑祺²⁾ 唐红艳^{1)*}

¹⁾(内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051)

²⁾(内蒙古巴彦淖尔市气象局, 巴彦淖尔 015000)

摘 要

2023 年 8—9 月在内蒙古自治区巴彦淖尔市农业气象试验站向日葵基地开展向日葵人工模拟冻害试验和大田冻害试验, 对比不同播期向日葵叶片、茎秆、籽粒的过冷却能力; 统计不同低温条件下向日葵的受冻率, 分析致灾条件与受冻率的定量关系, 采用回归分析法构建基于危害积温和发育进程的冻害指标并验证。结果表明: 向日葵籽粒的过冷却能力和抗冻性最强, 茎秆次之, 叶片最弱; 对于同一器官, 苗龄和叶龄越大, 抗冻性越强; 器官间抗冻性差异较播期间差异明显。向日葵受冻的临界温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 随温度降低, 持续时间加长, 向日葵受冻程度加重。相同播期的向日葵植株受轻、中、重度冻害对应的危害积温值均呈增大趋势。在冻害等级相同的前提下, 随播期推迟, 苗龄减小, 所需危害积温越少; 反之, 苗龄和叶龄越大, 所需危害积温越多; 同一播期植株的籽粒所需危害积温最大, 茎秆次之, 叶片最小。经验证冻害指标可合理、客观地反映向日葵受冻状况, 为河套向日葵秋季冻害预警及评估等气象服务提供科学依据。

关键词: 河套向日葵; 危害积温; 指标; 试验

引 言

向日葵是世界第 4 大油料作物, 因其较高的食用价值和经济价值而备受关注。中国向日葵种植面积保持在世界第 6 位^[1], 其中内蒙古河套灌区(位于巴彦淖尔市)是全国少有的优质高产产区之一, 已发展为我国最大的向日葵种植基地和集散地, 被列为国家级特色油料的特优和重点区域^[2]。河套灌区地处内蒙古高原, 地理位置偏北, 冷空气活动频繁, 气温变化剧烈, 每年秋季均有不同程度冻害发生, 尤其在气候变化背景下极端天气气候事件多发, 增加了重度冻害发生的风险。低温冻害造成的危害严重制约该产业的发展, 如何避免或减轻冻害成为产业稳定发展的重大难题。冻害致灾等级指标是冻害预警和防御的核心问题^[3], 对于科学制定灾前防御和灾后补救措施具有重要意义。

目前, 作物冻害方面已有较多研究, 多集中在发生机理^[4-5]、发生特征及规律^[6-7]、冻害预报预警^[8-9]、影响及风险评估^[10-13]、防御技术^[14-17]、冻害指标等方面^[18-19]。有关向日葵低温冻害的报道尚少, 国外 Bajaj 等^[20]、Inouye^[21] 分别在向日葵霜冻抗性的遗传种质和对春霜冻的敏感度方面开展过研究, 国内 2008 年颁布行业标准(QX/T 88—2008)^[22], 给出主要粮食作物和主要经济作物霜冻害等级指标, 其中包括向日葵乳熟期霜冻指标, 即日最低气温 $-2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发生轻霜冻, $-3\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发生中霜冻, $-5\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发生重霜冻。杨松等^[23-24] 通过田间调查的方式得出最低气温为 $4\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 向日葵叶片受轻微冻害, $1\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时向日葵幼苗即可受冻致死; 另外, 降温幅度达 $8\sim10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也可造成向日葵幼苗受冻, 明确了向日葵苗期受冻临界值。王海梅等^[25] 通过室内冻害模拟试验, 研究向日葵苗期受冻形态特征和受冻率, 指向日葵叶片的过冷却点和致死温度分别为

2024-09-03 收到, 2024-11-12 收到再改稿。

资助项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0145), 内蒙古自然科学基金项目(2022MS04017)

* 通信作者, 邮箱: 495527364@qq.com

-5.5~-4 °C 和不高于-6 °C。向日葵春季冻害指标的获取方式已从大田调查、专家经验发展至室内模拟试验,但秋季低温冻害等级指标仍停留于田间经验,使向日葵低温冻害气象服务因缺乏理论依据而略显被动。同时,受冻程度除受低温影响,很大程度还取决于低温持续时间长短,尤其是精确到小时尺度的低温持续时间在冷冻灾害的预警预报中更加必要。已有关于冷冻灾害指标的研究结论^[26-29]虽兼顾低温及持续时间,但多呈分段区间形式,即通过不同低温区间结合相应时间长度,给出农作物冻害指标,往往无法将不同持续时间长度下不同低温冻害过程全覆盖,导致冻害等级指标的严谨性和实用性受限。为此,需采取“无缝隙”模式精确地表达低温冻害等级指标。

为此,本文将向日葵低温冻害精细化气象服务需求作为出发点,选用具有发展潜力的河套向日葵主栽品种作为研究对象,以室内人工模拟试验为主、大田冻害试验和自然冻害调查为辅,基于危害积温^[30-31]和发育进程揭示不同温度及持续时间条件与向日葵受冻状况的关系,确定向日葵乳熟期的受冻指标和致死临界值,可结合逐时滚动天气预报开展科学化和精细化的河套向日葵低温冻害动态预警等气象服务。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

2023年8月15日—9月24日在内蒙古自治区巴彦淖尔市农业气象试验站向日葵基地开展试验。试验地点地处黄河“几”字弯顶部、河套平原腹地,为黄河冲击平原,地势平坦;年平均气温为4~8 °C,无霜期平均为120~150 d,年总辐射量超过6000 MJ·m⁻²,日照时数为3100~3200 h,年平均降水量为130~250 mm^[32]。

1.2 试验材料

河套灌区向日葵主栽品种SH361由三瑞农业科技股份有限公司选育而成,为中熟丰产优质杂交种,生长季为110~115 d,适宜大于等于10 °C活动积温为2300 °C·d的地区生长,在河套灌区种植广泛且具有较大发展潜力,作为本试验材料。分别于5月20日、5月31日、6月10日分期播种,其中播期1属正常播种日期,之后每期间隔10 d。

1.3 研究方法

1.3.1 试验仪器

采用中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研发的MSX-2F型人工模拟低温系统,温度控制范围为-20~30 °C,每10 s采集1次温度;温度持续时长最短为0.5 h,最长为12 h。内设传感器精度为±0.3 °C,通过FrostTem40数据采集系统监测记录试验材料和箱内温度变化。大田冻害试验和自然冻害调查借助便携式温度记录仪和附近自动气象站记录降温过程。

1.3.2 试验设置

1.3.2.1 采样

按照同一土壤类型、同一地势、同一施肥水平、同一地块的原则,选择管理较好、长势均衡的向日葵田块,注意远离地头、林带、公路和堆放有机肥的特殊区域,待3个播期的植株均进入乳熟期,同时采样,从葵盘以下50 cm茎秆处剪下,将剪口部位插在专用营养液培养,避免由于脱离植株母体缺少营养和水分供给而降低抗逆性,消减离体试验带来的不确定性和误差。未处理样本作为对照,观察发现3个播期植株的叶片和茎秆外观形态相似、籽粒差异较大。

1.3.2.2 过冷却模拟试验

分批次将置于营养液的向日葵样本放入低温模拟试验箱内,分别将40支温度传感器探头固定于叶片、籽粒、茎秆;设置人工模拟低温试验箱的温度控制曲线,降温过程参考河套灌区历年秋季低温冻害过程温度变化规律,为保证出现过冷却点,将试验箱温度最低降至-10 °C;利用植株细胞液过冷却现象中的体温变化曲线特征,得到致死温度节点。

1.3.2.3 不同程度受冻模拟试验

将准备好的向日葵样本放入低温模拟试验箱,根据过冷却点温度范围,设置自然降温、指标温度持续及冻后升温的温度控制过程。为全面覆盖向日葵受冻条件的可能性,设计不同温度梯度的人工模拟低温处理试验:以1 °C为温度梯度、1 h为低温持续的时间梯度为一个处理,设计-1 °C持续1 h、-2 °C持续1 h、-2 °C持续2 h、-3 °C持续1 h、-3 °C持续3 h、-4 °C持续1 h、-5 °C持续1 h、-5 °C持续2 h、-5 °C持续3 h共9个处理,每个处理设置3个重复,24 h后进行受冻症状测定。

1.3.2.4 大田冻害试验

根据天气预报结果,选择最低气温在2 °C以下

的天气开展大田冻害试验。为降低抽样误差,提高样本代表性,按S型选样法选定9个向日葵植株,3株为1个重复,株体挂置温度自计仪记录温度变化过程,为低温冻害指标的检验提供支撑。

1.3.2.5 自然冻害调查

在五原县、磴口县、杭锦后旗、乌拉特前旗、临河区等地选定向向日葵自然低温冻害调查地点,提前挂置温度自计仪记录低温过程。冻害发生后随机选择3株进行形态结构观测,为指标的准确性检验提供又一支撑材料。

1.3.2.6 冻后观测

通过观测样本的叶片、籽粒、茎秆冻后特征,确定受冻症状标准;冻后调查时按照该标准进行观测,出现其中任一种状况即判定为受冻;如向日葵植株不同器官出现两种以上受冻程度的症状,采取就高原则统计受冻率(受冻率为受冻样本量与总样本量比值),即不同器官同时受冻时,按照受冻症状标准,将最高等级认定为植株冻害等级,如籽粒轻度受冻的同时叶片中度受冻、茎秆未受冻,判定整个植株为中度受冻。

1.3.3 冻害指标确定及验证

1.3.3.1 致灾指标计算

采用数理统计和形态差异对比方法研究向日葵受冻程度和低温强度及时间的关系,确定受冻临界温度和持续时间,将低于临界的有害温度积累值,即危害积温作为向日葵低温致灾指标。

危害积温计算公式如下:

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

式(1)中: K 为危害积温,单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$; T_i 为某次低

温危害过程的逐时温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; n 为低温过程中温度低于临界温度的持续时间,单位: h ; n_0 为低温危害过程的临界时间。低温模拟试验是指40个温度探头记录的每小时实际监测温度,即一次冻害的降温至冻后升温过程中,每360个温度监测数据的平均值;根据试验结果,温度降至 -1°C 、持续1h时,向日葵的叶片开始出现轻微受冻症状,说明向日葵低温危害的临界温度为 -1°C ,即 $T_0 = -1^{\circ}\text{C}$; $T_i \leq T_0$,因此 $K \geq 0$ 。

通过皮尔逊双变量相关法,分析危害积温与向日葵受冻状况的相关关系,确定相关系数;同时建立线性回归方程,揭示受冻情况与危害积温的定量关系,然后根据受冻率反推计算冻害致灾的危害积温指标。

1.3.3.2 冻害指标构建

田间观测向日葵生长发育进度,将10%以上向日葵植株开始灌浆的日期,认定为向日葵乳熟期初日,记作日序1,次日记作日序2,依次类推。将日序数和危害积温进行归一化处理,分析向日葵乳熟期日序数和危害积温与受冻率的回归关系,构建冻害指标。

1.3.3.3 指标验证

利用大田冻害试验和自然冻害调查结果,对指标进行验证和修订完善。

2 结果与分析

2.1 向日葵受冻症状标准

根据向日葵叶片、籽粒、茎秆的表观特征,归纳总结向日葵轻度、中度、重度受冻症状标准(表1)。

表1 河套向日葵受冻症状标准

Table 1 Symptom standard of frozen Hetao sunflower

受冻程度	受冻症状标准		
	叶片	茎秆	籽粒
轻度	叶片软蔫、水渍	茎秆无明显症状	籽粒无明显症状
中度	叶片萎蔫起皱、颜色变深	茎秆外皮由嫩绿色转变为黄色,切面褐变	籽粒无明显症状
重度	叶片枯萎缩小、变黑	茎秆明显褐变、棕变,切面变黑	播期1和播期2籽仁颜色由乳白色轻微变深、水渍,播期3籽粒外壳明显褐变,籽仁棕变、白色薄膜消失

2.2 向日葵过冷却临界温度

为进一步确定向日葵过冷却温度临界值,利用过冷却试验结果分析叶片、茎秆、籽粒的过冷却温度

(剔除可能由于探头固定不良导致的异常偏大、偏小值),发现同一播期的叶片、茎秆、籽粒的过冷却点温度范围不同,不同播期、同一器官的过冷却点温度范

围也不同(表 2)。

播期 1 向日葵植株的籽粒依次比茎秆和叶片的过冷却平均温度偏低 1.6 °C、3.61 °C,播期 2 向日葵植株的籽粒依次比茎秆和叶片的过冷却平均温度偏低 1.1 °C、3.1 °C,播期 3 向日葵植株的籽粒依次比茎秆和叶片的过冷却平均温度偏低 0.7 °C、3.0 °C,说明籽粒的过冷却能力和抗冻性最强,茎秆次之,叶片最弱。播期 1 叶片的过冷却平均温度依次比播期 2

和播期 3 低 0.19 °C、0.29 °C,播期 1 茎秆的过冷却平均温度依次比播期 2 和播期 3 偏低 0.2 °C、0 °C,播期 1 籽粒的过冷却平均温度依次比播期 2 和播期 3 偏低 0.7 °C、0.9 °C,说明播期 1 植株的叶片和籽粒的过冷却能力最强,播期 2 次之,播期 3 最弱,随着播期推迟,向日葵叶片和籽粒的抗冻性减弱,茎秆抗冻性差异不明显。向日葵各器官抗冻性的差异较不同播期间的差异明显。

表 2 3 个播期的向日葵各器官过冷却温度(单位:°C)

器官名称	项目	播期 1	播期 2	播期 3
叶片	温度范围	-5.9~-3.4	-5.1~-3.2	-4.5~-2.9
	平均温度	-4.19	-4.0	-3.9
茎秆	温度范围	-7.8~-4.9	-7.6~-5.2	-7.8~-5.0
	平均温度	-6.2	-6.0	-6.2
籽粒	温度范围	-8.7~-5.2	-8.3~-5.6	-7.8~-5.0
	平均温度	-7.8	-7.1	-6.9

2.3 向日葵受冻率计算

在明确过冷却温度范围基础上,开展低温冻害模拟试验,根据向日葵受冻症状标准,观察冻后表现特征判定向日葵低温冻害的危害程度,统计受冻率。对比同一播期、不同低温及持续时间处理的受冻状况,对比不同播期、同一低温及持续时间处理的受冻差异,揭示不同播期及不同处理样本受冻状况间的关系。温度降至-3 °C、持续 1~3 h 时,向日葵茎

秆开始出现轻度受冻症状,但可恢复生长,对籽粒灌浆影响不大;温度降至-5 °C、持续 1~3 h 时,茎秆出现中度受冻症状,叶片 100% 受冻,籽粒尚未出现明显受冻症状;温度降至-10 °C,3 个播期样本的籽粒均出现 100% 重度冻伤,导致向日葵产量和质量明显降低。

表 3 显示,随温度降低,持续时间加长,3 个播期的植株样本平均受冻率和各播期样本受冻率逐渐

表 3 不同低温处理及持续时间下向日葵受冻率

模拟低温/°C	持续时间/h	分期播种	受冻率/%				
			重复 1	重复 2	重复 3	每期平均	3 期平均
-1	1	播期 1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
		播期 2	0.0	0.0	16.7	5.6	
		播期 3	12.5	0.0	20.0	10.8	
-2	1	播期 1	0.0	12.5	0.0	4.2	9.1
		播期 2	0.0	20.0	0.0	6.7	
		播期 3	12.5	16.7	20.0	16.4	
-2	2	播期 1	0.0	12.5	14.3	8.9	13.8
		播期 2	0.0	14.3	22.2	12.2	
		播期 3	30.0	14.3	16.7	20.3	
-3	1	播期 1	33.3	0.0	20.0	17.8	22.0
		播期 2	25.0	25.0	16.7	22.2	
		播期 3	33.3	20.0	25.0	26.1	
-3	3	播期 1	58.3	40.0	40.0	46.1	47.6
		播期 2	57.1	50.0	33.3	46.8	
		播期 3	50.0	50.0	50.0	50.0	
-4	1	播期 1	10.0	16.7	33.3	20.0	20.7
		播期 2	14.3	20.0	25.0	19.8	
		播期 3	22.2	20.0	25.0	22.4	

续表 3

模拟低温/℃	持续时间/h	分期播种	受冻率/%				
			重复 1	重复 2	重复 3	每期平均	3 期平均
-5	1	播期 1	50.0	66.7	80.0	65.6	76.7
		播期 2	71.4	80.0	75.0	75.5	
		播期 3	100.0	100.0	66.7	88.9	
-5	2	播期 1	100.0	50.0	66.7	72.2	81.8
		播期 2	83.3	80.0	83.3	82.2	
		播期 3	85.7	100.0	87.5	91.1	
-5	3	播期 1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		播期 2	100.0	100.0	100.0	100.0	
		播期 3	100.0	100.0	100.0	100.0	

增加,可见向日葵受冻程度呈加重趋势。各播期之间相比,随低温条件加强,除 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 1 h 试验处理的播期 2 样本较播期 1 样本受冻率少 0.2% ,其他低温模拟试验的播期 2 样本均比播期 1 样本受冻率增加,同时播期 3 样本也比播期 2 样本受冻率增加,直至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 3 h 时,3 个播期的样本全部冻死,受冻率增加为 0 。随着播期推迟,向日葵苗龄和叶龄越小,向日葵籽粒的乳状物形成越不充实,同一低温条件下植株抗冻性越弱;反之,播期越早,向日

葵苗龄和叶龄越大,籽粒乳状物越接近成熟,同一低温条件下植株抗冻性越强,与过冷却试验分析结果一致。

2.4 低温冻害指标构建与验证

利用试验数据,分别计算各播期、不同处理向日葵遭受冻害的危害积温,分别与播期 1、播期 2、播期 3 及 3 个播期受冻率平均值进行相关分析并建立回归方程。向日葵在遭受冻害后的受冻率与危害积温呈显著正相关(达到 0.01 显著性水平)(图 1)。以受

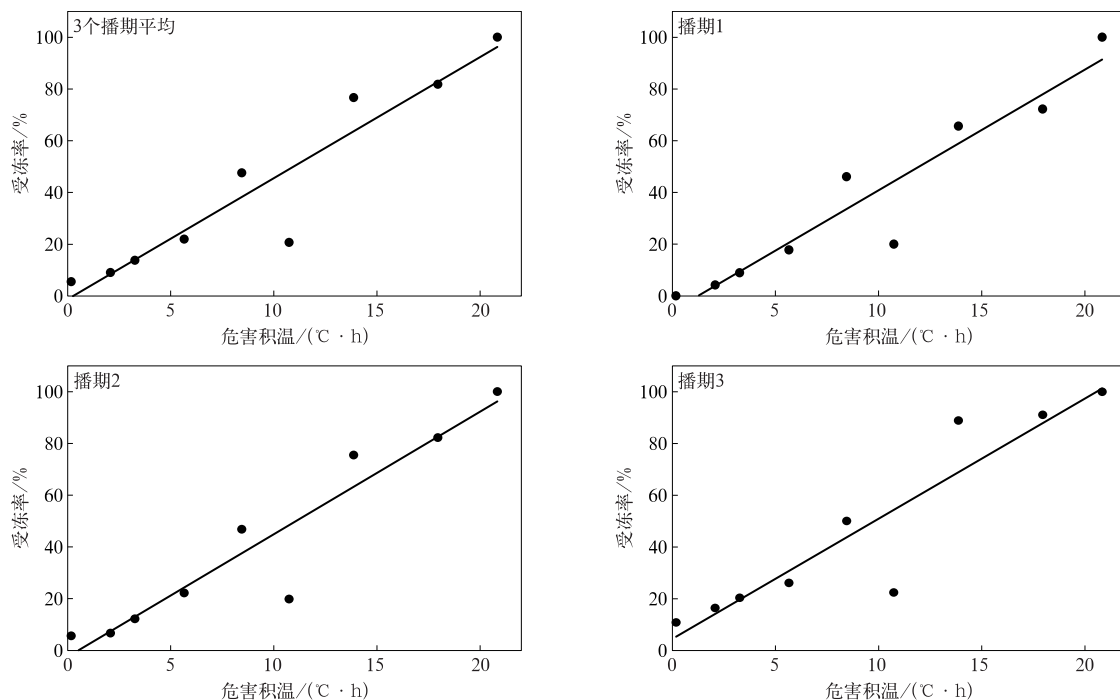


图 1 向日葵受冻率与危害积温关系

Fig. 1 Relationship between sunflower freezing rate and accumulated harmful temperature

冻率不大于 30% 、 $30\% \sim 70\%$ 、大于 70% 分别作为轻度、中度、重度冻害的划分界限^[14],利用受冻率与危害积温的定量关系,分别计算不同程度受冻情况下向日葵各播期的危害积温(K)范围(如表 4 所

示)。由表 4 可见,各播期平均和 3 个播期轻、中、重度冻害对应 K 均呈增大趋势。相同冻害等级下,不同播期间 K 存在差异,随播期推迟, K 减小,可见达到相同受冻程度,苗龄和叶龄越小,所需危害积温

表4 向日葵不同程度冻害对应的危害积温(K)范围(单位:℃·h)
Table 4 Accumulated temperature(K) range corresponding to different degrees of freezing damage of sunflower(unit:℃·h)

播期	轻度	中度	重度
播期1	$0 \leq K \leq 7.27$	$7.27 < K \leq 16.26$	$K > 16.26$
播期2	$0 \leq K \leq 6.86$	$6.86 < K \leq 15.31$	$K > 15.31$
播期3	$0 \leq K \leq 5.50$	$5.50 < K \leq 14.11$	$K > 14.11$

越小;反之,苗龄和叶龄越大,所需危害积温越大。即冻害等级越大、植株抗冻性越强,所需危害积温越大,结合过冷却试验结果推断,在达到同一冻害等级的前提下,同一播期植株的籽粒所需危害积温最大,茎秆次之,叶片最小。

实际生产中,每年向日葵的播种日期会根据气象条件等因素有所调整,可能与试验设置的播种日

$$y = \frac{18.341 \times S + 112.761 \times K - 13.85}{100} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中:y为受冻率,单位:%;S为向日葵乳熟期日序数归一化指数;K为危害积温归一化指数。

2020年9月上旬突发强降温,最低气温降至-3℃,造成向日葵每亩减产约25kg,且严重变质,带来较大经济损失;结合8月26日和8月29日两次大田冻害试验结果,利用挂置的便携式温度记录仪所记录的温度变化数据,计算危害积温,并与观测记录的受冻率比较,对向日葵冻害指标进行验证。

表5 向日葵受冻率计算结果与大田冻害试验及实际调查结果比较
Table 5 Comparison of calculated results of sunflower freezing rate with results of supplementary tests and actual investigations

调查地点	实地调查的受冻程度	危害积温/(℃·h)	计算的受冻程度	符合情况
巴彦淖尔市农业气象试验站	轻度	14.12	中度	计算结果较实际情况重
临河区	中度	11.84	中度	符合
磴口县	中度	10.91	中度	符合
杭锦后旗	轻度	5.17	轻度	符合
乌拉特前旗补充试验	重度	15.96	重度	符合
乌拉特中旗补充试验	重度	16.29	重度	符合

3 结论与讨论

本研究采用人工模拟冻害试验和自然冻害调查等方法,分析不同发育进程向日葵不同器官之间受冻状况的定性定量关系,分析了受冻率与危害积温和乳熟期日序数的回归关系,构建了向日葵冻害指标,主要结论如下:

1) 向日葵受冻临界温度为-1℃;-3℃、持续1~3h时,向日葵茎秆开始出现轻度受冻症状;

期不一致。即使日期一致,其乳熟期气象条件未必相同,植株经历的低温情况可能存在差异,上述不同等级危害积温范围的应用存在一定局限性。为此,需建立基于向日葵发育进程和危害积温的普适性冻害指标。分析向日葵乳熟期日序数和危害积温与受冻率的回归关系,构建指标,如式(2)所示。根据计算结果,结合冻害划分界限^[14],判断向日葵受冻等级。

结果显示:6个调查点中,巴彦淖尔市农业气象试验站向日葵的实际调查结果是轻度,而根据危害积温计算的结果是中度,即实地调查结果的冻害程度比计算程度轻,这可能由于农业气象试验站内的硬化地面和围墙,使向日葵园区实际温度高于监测温度所致;其他5个冻害调查点的实际调查结果与计算结果相符(表5)。

-5℃、持续1~3h时,茎秆出现中度受冻症状,但叶片100%受冻;温度越低、持续时间越长,向日葵受冻程度越重。向日葵籽粒的过冷却能力和抗冻性最强,茎秆次之,叶片最弱;对于同一器官,随着苗龄增大,植株抗冻性增强;各器官抗冻性差异较各播期间差异明显。

2) 向日葵受冻率与危害积温呈显著正相关,利用其定量关系,计算得出的不同程度受冻情况下各播期向日葵的危害积温范围:播期1向日葵受轻、中、重度冻害对应危害积温分别为 $0 \leq K \leq 7.27$ ℃·

h、 $7.27 < K \leq 16.26 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $K > 16.26 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ；播期2受轻、中、重度冻害对应危害积温分别为 $0 \leq K \leq 6.86 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $6.86 < K \leq 15.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $K > 15.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ；播期3受轻、中、重度冻害对应危害积温分别为 $0 \leq K \leq 5.50 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $5.50 < K \leq 14.11 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $K > 14.11 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 。

3) 基于向日葵发育进程和危害积温的普适性冻害指标,经验证与大田试验和自然冻害调查结果较为符合,建立的冻害指标可为河套向日葵乳熟期冻害预报、预警及评估等气象服务提供科学依据。

冻害模拟试验中,温度降至 $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,籽粒尚未出现明显受冻症状;温度降至 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,发生重度冻伤,缺乏 $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 至 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 不同低温间隔模拟试验,进一步确定籽粒发生轻、中、重度冻害的温度等级指标。本研究所用样本植株采用分期播种方式,向日葵每期间隔10 d,随着发育时间推移,相隔两期的生长进度可能接近,次年将分期播种的间隔日数增加至15 d,以突出生长进度差异;同时分期播种数量有限,无法全覆盖整个发育过程,因此,可通过尝试采用热量表征不同发育进度等方法研究向日葵冻害指标,进一步提高研究成果的实用性。另外,试验开展1年期,试验周期较短,冻害指标的准确程度存在不足,但过冷却试验、冻害模拟试验、大田冻害试验、自然冻害调查等多种试验和调查方式可一定程度弥补上述不足。

参考文献

- [1] 郭树春,李素萍,孙瑞芬,等.世界及我国向日葵产业发展总体情况分析.中国种业,2021(7):10-13.
Guo S C, Li S P, Sun R F, et al. Analysis of the overall situation of sunflower industry development in the world and China. *China Seed Ind*, 2021(7): 10-13.
- [2] 李丽君,李素萍,苗永茂,等.内蒙古自治区向日葵品种登记现状分析.中国种业,2021(5):32-34.
Li L J, Li S P, Miao Y M, et al. Analysis on the status of sunflower variety registration in Inner Mongolia Autonomous Region. *China Seed Ind*, 2021(5): 32-34.
- [3] 李美萱,霍治国,孔瑞,等.黄淮海冬小麦春季低温灾害等级指标构建.应用气象学报,2024,35(1):45-56.
Li M X, Huo Z G, Kong R, et al. Indicator construction of spring low-temperature disaster affecting winter wheat of Huang-Huai-Hai based on meta-analysis. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(1): 45-56.
- [4] Tschurr F, Kirchgessner N, Hund A, et al. Frost damage index: The antipode of growing degree days. *Plant Phenomics*, 2023, 5. DOI:10.34133/plantphenomics.0104.
- [5] 孙鲁龙.根域温度/根系调控葡萄响应低温霜冻的生理生态机制.泰安:山东农业大学,2017.
Sun L L. Physiological and Ecological Mechanism of Root Zone Temperature/Root System Regulating Grape Response to Low Temperature and Frost. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.
- [6] 董全,陈博宇,胡宁,等.2024年2月我国两次大范围雨雪冰冻天气对比.应用气象学报,2024,35(4):385-399.
Dong Q, Chen B Y, Hu N, et al. Comparison of two ice and snow storm processes in China in February 2024. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(4): 385-399.
- [7] 李凤琴,李茂春,胡秀茹,等.新疆哈密市初、终霜冻日变化及其对棉花生长的影响.中国棉花,2020,47(10):18-20.
Li F Q, Li M C, Hu X R, et al. Daily change characteristics of the first and last frost in Hami City of Xinjiang and its influence on cotton growth. *China Cotton*, 2020, 47(10): 18-20.
- [8] 陈豫英,陈楠,杨银,等.贺兰山东麓春季最低气温和霜冻精细化格点预报产品的检验.自然灾害学报,2019,28(1):198-206.
Chen Y Y, Chen N, Yang Y, et al. The refined gridded weather forecasting verification of the spring minimum air temperature and frost in the Eastern Region of Helan Mountain. *J Nat Disasters*, 2019, 28(1): 198-206.
- [9] 韩浦城,纪忠萍.5月华南气温的岭回归预测模型.应用气象学报,2024,35(4):480-492.
Han P C, Ji Z P. Ridge regression prediction model for temperatures of South China in May. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(4): 480-492.
- [10] 邱美娟,刘布春,刘园,等.中国北方主产地苹果始花期模拟及晚霜冻风险评估.农业工程学报,2020,36(21):154-163.
Qiu M J, Liu B C, Liu Y, et al. Simulation of first flowering date for apple and risk assessment of late frost in main producing areas of northern China. *Trans Chinese Soc Agric Eng*, 2020, 36(21): 154-163.
- [11] Liu Y W, Ban S T, Wei S W, et al. Estimating the frost damage index in lettuce using UAV-based RGB and multispectral images. *Front Plant Sci*, 2024, 14. DOI:10.3389/fpls.2023.1242948.
- [12] 孙光辉,段居琦,李俊儒,等.气候-土地综合影响的我国油茶农业气候区划.应用气象学报,2024,35(4):444-455.
Sun G H, Duan J Q, Li J R, et al. Agro-climatic zoning of oiltea camellia in China based on climate-land integrated impacts. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(4): 444-455.
- [13] Yazdanpanah H, Stigter C J. Selective inverted sink efficiency for spring frost protection in almond orchards northwest of Isfahan, Iran. *Theor Appl Climatol*, 2011, 105(1): 27-35.
- [14] 钟秀丽,王道龙,李玉中,等.黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估.应用气象学报,2007,18(1):102-107.
Zhong X L, Wang D L, Li Y Z, et al. Risk assessment of frost damage in wheat. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(1): 102-107.
- [15] 宋艳玲,周广胜,郭建平,等.北方冬小麦冬季冻害及播期延迟

- 应对. 应用气象学报, 2022, 33(4): 454-465.
- Song Y L, Zhou G S, Guo J P, et al. Freezing injury of winter wheat in northern China and delaying sowing date to adapt. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 454-465.
- [16] 袁福香, 穆佳, 高岩, 等. 覆盖与揭膜时间对越冬人参和西洋参出苗影响. 应用气象学报, 2023, 34(6): 729-738.
- Yuan F X, Mu J, Gao Y, et al. Effects of covering and uncovering date on seedling emergence of overwintering ginseng and American ginseng. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 729-738.
- [17] 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. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 129-145.
- [18] 霍治国, 李美萱, 张海燕, 等. 中国冬小麦霜冻灾害研究进展. 中国农业资源与区划, 2023, 44(6): 16-31.
- Huo Z G, Li M X, Zhang H Y, et al. Review on frost damage of winter wheat in China. *Chinese J Agric Resour Reg Plan*, 2023, 44(6): 16-31.
- [19] 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.
- Li H L, Wang J H, Zhang W M, et al. Freezing injury index of kiwifruit branches for main varieties under simulated low temperature. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(5): 618-628.
- [20] Bajaj K R, Dhillon S K. Evaluation of sunflower germplasm for frost resistance. *Crop Improv*, 2008, 35(1): 55-60.
- [21] Inouye W D. Aspen sunflowers susceptible to spring frosts. *Bull Ecol Soc Am*, 2007, 88(4): 380.
- [22] 中国气象局. 作物霜冻害等级: QX/T 88—2008. 北京: 气象出版社, 2008.
- China Meteorological Bureau of the People's Republic of China. Grade of Crop Frost Damage: QX/T 88—2008. Beijing: China Meteorological Press, 2008.
- [23] 杨松. 河套灌区向日葵生产的农业气象服务研究. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- Yang S. Agrometeorological services for sunflower production in Hetao Irrigation District. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [24] 杨松, 杨卫, 刘俊林, 等. 河套灌区向日葵终霜冻指标及其时空分布特征. 中国农学通报, 2010, 26(1): 256-259.
- Yang S, Yang W, Liu J L, et al. The occurrence regulation and its temporal and spatial distribution of sunflower last frost disaster in Hetao Irrigated Area. *Chinese Agric Sci Bull*, 2010, 26(1): 256-259.
- [25] 王海梅, 侯琼, 云文丽, 等. 内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度. 生态学报, 2014, 34(11): 2948-2953.
- Wang H M, Hou Q, Yun W L, et al. Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. *Acta Ecol Sinica*, 2014, 34(11): 2948-2953.
- [26] 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. 中国农业气象, 2015, 36(1): 50-56.
- Wang J H, Liu L, Gao F, et al. Revision on meteorological indices of florescence frost disaster for Fuji apple in Shaanxi Province. *Chinese J Agrometeor*, 2015, 36(1): 50-56.
- [27] 李仁忠, 金志凤, 杨再强, 等. 浙江省茶树春霜冻害气象指标的修订. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2659-2666.
- Li R Z, Jin Z F, Yang Z Q, et al. Revision on meteorological indices of spring frost disaster for Camellia sinensis in Zhejiang Province. *Chinese J Ecol*, 2016, 35(10): 2659-2666.
- [28] 段晓凤, 张磊, 李红英, 等. 贺兰山东麓酿酒葡萄新梢萌芽期室内霜冻模拟试验. 经济林研究, 2017, 35(4): 171-176.
- Duan X F, Zhang L, Li H Y, et al. Laboratory frost simulation experiment of wine grape at germination period of young sprouts at eastern foot of Helan Mountain. *Nonwood For Res*, 2017, 35(4): 171-176.
- [29] 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 study on frost index of Lycium barbarum during flowering period in Ningxia. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 31(4): 417-426.
- [30] 程德瑜. 危害积温及其在作物灾害中的应用. 中国农业气象, 1988, 9(1): 51-53.
- Cheng D Y. Harmful accumulated temperature and its application in crop disasters. *Chinese J Agrometeor*, 1988, 9(1): 51-53.
- [31] 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. 农业工程学报, 2020, 36(14): 188-193.
- Zhu Y N, Zhang L, Ma G F, et al. Frost index of Lycium Barbarum during flowering period based on harmful accumulated temperature. *Trans Chinese Soc Agric Eng*, 2020, 36(14): 188-193.
- [32] 李思慧, 赵慧颖, 侯琼, 等. 向日葵生长发育气候条件的定量评价研究——以河套灌区为例. 中国农学通报, 2015, 31(36): 237-242.
- Li S H, Zhao H Y, Hou Q, et al. Quantitative evaluation of climate condition for sunflower growth: Taking Hetao Irrigation Area for example. *Chinese Agric Sci Bull*, 2015, 31(36): 237-242.

Experiments and Index Construction for Disaster Caused by Low Temperature Affecting Hetao Sunflower in Inner Mongolia

Duan Xiaofeng¹⁾ Liu Wei²⁾ Bao Jiajing²⁾ Liu Yanli²⁾ Li Shuqi²⁾ Tang Hongyan¹⁾

¹⁾(*Ecological and Agricultural Meteorological Center of Inner Mongolia, Hohhot 010051*)

²⁾(*Bayannur Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Bayannu 015000*)

Abstract

Sunflower is the fourth-largest oilseed crop. China ranks the sixth in the world of the planting area of sunflowers, and Hetao Irrigation Area in Inner Mongolia is one of the rare producing areas of high quality, developing into the largest planting base and specially distributed center of sunflowers. However, the damage caused by freezing significantly hinders the industry's development. How to prevent or mitigate freezing damage has become a significant challenge for the sustainable development of the industry. Therefore, the main varieties of Hetao sunflower with developmental potential are investigated. In August and September of 2023, artificial simulation tests are conducted as the primary focus. Field tests for freezing damage and investigations into natural freezing damage are conducted as secondary assessments. Supercooling abilities of sunflower leaves, stalks, and seeds at various sowing periods are compared and analyzed through artificial simulations and field supplementary experiments. The freezing rate of sunflowers under various low-temperature conditions is analyzed, and the quantitative relationship between adverse conditions and freezing rates is examined. The regression analysis method is employed to develop and validate disaster grade indices based on harmful accumulated temperature and ordinal numbers. Results indicate that sunflower seeds exhibit the highest supercooling ability and cold resistance, followed by stems and leaves. The older the seedling and leaf age, the greater the frost resistance is; conversely, younger seedlings and leaves exhibit weaker frost resistance. The variation in cold resistance among different parts is greater than the variation caused by different sowing methods. The critical freezing temperature of sunflower plants is $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The lower the temperature and the longer the duration, the greater the degree of freezing is. Harmful accumulated temperature values for sunflower plants exhibiting light, medium, and severe freezing damage demonstrate an increasing trend across three sowing periods. When the same freezing damage grade is reached, a delay in the sowing date results in a decrease in seedling age, as well as a reduction in the required cumulative harmful temperature. On the contrary, as the age of the seedling and leaves increase, the amount of harmful accumulated temperature required also increases. Under the same freezing damage grade, seeds require the highest accumulated temperature during the sowing period, followed by stems and leaves. It is proved that the harmful accumulated temperature indices can reasonably and objectively reflect the freezing condition of sunflower, which can provide a scientific basis for meteorological services such as early warning and evaluation of freezing damage in autumn for Hetao sunflower.

Key words: Hetao sunflower; harmful accumulated temperature; index; experiment