

魏瑞江,王鑫.国内设施种植气象灾害研究进展[J].海洋气象学报,2021,41(4):73-81.
WEI Ruijiang, WANG Xin. Research progresses of meteorological disasters in domestic facility planting [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(4): 73-81. DOI:10.19513/j.cnki.issn 2096-3599.2021.04.007. (in Chinese)

国内设施种植气象灾害研究进展

魏瑞江^{1,2}, 王鑫^{1,2}

(1.河北省气象科学研究所,河北 石家庄 050021;2.河北省气象与生态环境重点实验室,河北 石家庄 050021)

摘要:设施种植的主要气象灾害有低温(冷冻害)、寡照、风灾、雪灾及其复合灾害等,从国内设施种植气象灾害指标、灾害监测预警、灾害风险及灾害影响等方面对前人研究成果和进展进行归纳总结。灾害指标的研究所采用的方法主要是人工控制试验或对历年实际发生的灾害样本进行分析总结;灾害监测预警方法一般是用设施内小气候或设施外气象条件作为灾害指标,将灾害指标植入计算机系统,对灾害进行监测预警;风险评估多是从灾害的危险性角度去研究,确定灾害的风险概率、风险指数等;灾害影响的研究多集中在对作物生理生态反应等方面。同时从设施种植气象灾害研究存在的薄弱环节出发,提出设施种植气象灾害指标、灾害监测预警评估方法及灾害的影响等方面仍是今后一段时间研究的重点和热点。

关键词:设施种植;气象灾害;指标;监测预警;评估

中图分类号: S625;X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)04-0073-09

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.007

Research progresses of meteorological disasters in domestic facility planting

WEI Ruijiang^{1,2}, WANG Xin^{1,2}

(1. Meteorological Science Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Laboratory for Meteorological and Eco-environment, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract The main meteorological disasters of facility planting include low temperature (chilling and freezing injury), spare sunlight, wind disaster, snow disaster and compound disasters caused by the disasters mentioned above. Previous researches and progresses are summarized in this paper from the aspects of argometeorological disaster index, disaster monitoring and early warning, disaster risk and disaster impact. The main methods used in the research on disaster index are manual control experiments and summary of disaster samples that have actually occurred over the past years. The disaster monitoring and early warning methods are generally achieved through the operation of a computer system based on microclimate inside or meteorological conditions outside the facility as disaster indexes. The risk assessment is investigated mainly with the perspective of hazards of disaster to determine the risk probability and risk index of disasters. The research on disaster impacts are generally focused on the physiological and biochemical responses of crops. Considering the weakness in the research of meteorological disasters of facility planting, the focuses and hotspots in the future would be as follows: the meteorological disaster index, disaster monitoring, early warning evaluation method and the impact of disaster.

收稿日期:2021-06-07; 修订日期:2021-06-25

基金项目:河北省重点研发计划项目(19227214D)

通信作者:魏瑞江,女,正高级工程师,主要从事设施农业气象研究,weirj6611@sina.com。

Key words facility planting; meteorological disasters; disaster index; monitoring and early warning; assessment

引言

随着设施农业的迅速发展,设施种植已经实现全年化,设施内所种植的作物主要有蔬菜、花卉、林果等,这些作物在生长发育过程中常常受到气象灾害的影响,气象灾害的种类一般包括低温(冷冻害)、寡照、风灾、雪灾及其复合灾害,如低温寡照、高温高湿等。前人对国内设施种植气象灾害的研究主要涉及灾害指标、灾害监测预警、灾害风险评估、灾害影响等方面。本文对我国在上述四方面的研究成果进行归纳总结,目的是凝练已有灾害指标、灾害监测预警和风险评估技术及灾害对作物的影响,便于后人采纳和应用,为后人进行进一步研究奠定基础。

1 对灾害指标的研究

灾害指标是设施农业气象研究的基础,设施农业气象灾害指标研究所采用的方法主要是人工控制试验或对历年实际发生的灾害样本进行分析总结以及采用能量平衡和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟方法等。

1.1 低温(冷冻害)指标

低温(冷冻害)是在设施作物生长发育过程中由于热量不足而使其受到不利影响的一种自然灾害。低温(冷冻害)指标一般用设施内的温度或是用设施外的温度来体现。

1.1.1 用设施内温度表征

基于我国设施农业生产防灾减灾的需要,相关涉农科研院所和高校的科研技术人员,针对黄瓜、

番茄、甜椒、茄子等蔬菜的各个生长阶段,开展了大量的低温影响研究工作。杨再强等^[1]采用人工控制试验,研究5℃、7℃、9℃、11℃低温对设施番茄光合色素含量、最大光合速率、叶绿素荧光参数、抗氧化酶活性的影响表明,低温5℃处理3d或者低温7℃处理4d是番茄发生严重冷害的临界指标。彭晓丹等^[2]采用人工控制试验,以25℃为对照,研究5℃、7℃、9℃、11℃低温对黄瓜叶片光合作用特性及抗氧化酶活性的影响,得出了温室黄瓜低温气象灾害指标(表1)。张淑杰等^[3]基于日光温室番茄实际低温冻害发生及影响因素分析,以日光室内最高气温、日光室内最低气温及日光室内气温连续3d≤5℃持续时间确定辽宁省日光温室番茄果实膨大期低温冻害指标(表2)。刘伟等^[4]通过试验得出,小青菜叶片的抗衰老特性随气温降低而降低,细胞膜透性变得越来越差,-4℃持续9h小青菜细胞活性受到不可恢复的伤害,为小青菜低温胁迫产生结构性伤害的临界值。

表1 温室黄瓜低温气象灾害指标

Table 1 Low temperature meteorological disaster index of cucumber in greenhouse

灾害等级	不同低温持续时间/h			
	5℃	7℃	9℃	11℃
轻度	—	—	<12	—
中度	<12	12~24	12~24	24~72
重度	24	48	48~72	—
极重度	≥48	>72	—	—

表2 辽宁地区日光温室番茄果实膨大期低温冻害指标

Table 2 Index of chilling and freezing injury of tomato fruit in solar greenhouse in Liaoning province

前提条件	低温冻害等级	日光室内要素		
		最高气温/℃	最低气温/℃	3d内气温≤5℃持续时间之和/h
前期室内多日连续出现小于5℃低温时段,持续时间小于10h,其后低温阴雨雪天气持续3d(其中2d无日照,1d日照时数小于3h),相对湿度90%以上	无	>15	>6	—
	轻度	≥10	4~6	<15
	中度	<10	2~4	5~30
	重度	<8	<2	>30

1.1.2 用设施外温度表征

李美荣等^[5]通过历年实际发生的样本进行分

析总结,得到陕西省关中地区日光温室蔬菜低温冻害指标:当日光温室附近气象站最低气温降至

-8.0~-11.9℃时,温室内蔬菜可出现轻度冻害,部分叶片受冻,茎叶停止生长;当最低气温降至-12.0~-13.9℃时,温室内蔬菜可遭受中度低温冻害,部分植株受冻枯萎死亡;当最低气温降至-14.0℃及以下时,温室内蔬菜可遭受严重的低温冻害,蔬菜出现大面积的死苗,甚至绝收。薛晓萍等^[6]基于人工气候箱和大田试验,得出山东日光温室黄瓜不同低温冷害等级指标:当温室外最低气温 $t > -2.0$ ℃时无灾害,当 -5.0 ℃ $< t \leq -2.0$ ℃时为轻度灾害,当 -9.0 ℃ $< t \leq -5.0$ ℃时为中度灾害,当 $t \leq -9.0$ ℃时为重度灾害。孙东磊等^[7]根据河北省中部地区“寿光五代”日光温室内外气象资料和番茄生长发育资料,采用回归分析方法,建立了不同天气条件下日光温室内外最低气温回归模型,确定了番茄不同等级冻害温室外最低气温(t)指标(表3)。

表3 冀中地区不同天气条件下番茄冻害的温室外最低温度指标

Table 3 Outside minimum temperature for tomato freezing injury under different weather conditions in the central part of Hebei province

天气条件	轻度冻害	中度冻害	重度冻害
晴天	-13.0℃ $< t \leq$ -8.5℃	-15.0℃ $< t \leq$ -13.0℃	$t \leq -15.0$ ℃
多云	-14.0℃ $< t \leq$ -9.5℃	-17.5℃ $< t \leq$ -14.5℃	$t \leq -17.5$ ℃
阴天	-14.5℃ $< t \leq$ -9.0℃	-16.5℃ $< t \leq$ -14.0℃	$t \leq -16.5$ ℃

1.2 寡照指标

寡照灾害指标的得出所采用的方法同样主要是通过人工控制试验或对历年实际发生的样本进行分析总结。寡照灾害指标多用逐日日照时数持续时间表示。

朱静等^[8]以芹菜“津南实芹1号”品种为试材,在人工控制温室内设计寡照试验,通过测定不同寡照处理和恢复处理下芹菜的光合参数及荧光参数,得出寡照2~6 d为轻度灾害,7~11 d为中度灾害,12 d及以上为重度灾害,寡照处理第12 d以后,芹菜光系统活性受到严重损伤,无法恢复。李楠等^[9]在番茄苗期、花果期于日光温室内采用遮阳网进行寡照试验,寡照分别处理1 d、3 d、5 d、7 d、10 d、15 d及恢复处理,寡照处理时晴天中午时刻遮阳网下光照强度小于3 000 lx,对寡照处理植株及对照植株进行光合速率观测、生长发育观测和产量观测,在此

基础之上确定了日光温室番茄苗期和花果期寡照指标(表4)。江和文等^[10]研究葫芦岛地区寡照灾害时,采用逐日日照时数 $S < 3$ h的持续天数(D_c)作为不同等级寡照灾害的指标,定义:当 $3 \text{ d} \leq D_c \leq 5 \text{ d}$ 时为轻度灾害,当 $D_c > 5 \text{ d}$ 时为重度灾害。魏瑞江等^[11]根据多年日光温室小气候资料、蔬菜生长发育资料和对的气象台站气象资料,结合寡照过程中日光温室内的气温下降状况、蔬菜生长发育状况,得出日光温室内的日最高气温均随着寡照持续天数的增加呈对数下降,其中华北中南部地区寡照持续3 d及以上时,温室内日最高气温可下降到20℃以下,寡照持续10 d及以上时,温室内最高气温可能下降到10℃以下;华北北部地区,则分别持续2 d及以上和5 d及以上时,温室内日最高气温可分别下降到20℃以下和10℃以下。

表4 番茄苗期和花果期寡照灾害气象等级指标

Table 4 Sunless grade index in greenhouse at tomato seedling, flowering and fruiting stages

灾害等级	苗期指标-寡照日数/d	花果期指标-寡照日数/d
无灾	≤ 3	≤ 3
轻灾	4~7	4~5
中灾	8~10	5~10
重灾	> 10	> 10

1.3 风灾指标

风灾指标一般用瞬时最大风速、平均最大风速等表示。风灾指标的得出多数是采用风洞试验方法,少有用历年灾情总结得出。

杨再强等^[12]利用NH-2型(南航2型)风洞试验方法,研究不同风向角下设施塑料大棚表面风压分布规律表明,设施大棚顶部两侧区域受风吸力影响最大,最小临界风速为 $14.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。张波^[13]采用风洞试验方法,测量和分析不同风向角下日光温室塑料薄膜表面风压系数和分布规律,得出日光温室各区域发生风灾的最小临界风速为 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。李楠等^[14]利用几何缩尺比为1:6的日光温室模型进行风洞试验,测定不同风向下日光温室表面不同区域的风压系数,利用公式推导出日光温室表面各区域发生风灾的临界风速,得出山东省日光温室表面最易受风灾损害区域的临界风速为 $18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。陈妮娜等^[15]利用2000—2011年辽宁省14个地市61个县气象站的瞬时最大风速、平均风速及设施农业受灾情况,研究辽宁省设施农业大风致灾指标表

明:当平均风力达到6~7级时,设施农业轻度受灾,拱棚受灾的可能性较大;当平均风力达到8~9级时,设施农业中度受灾,拱棚受灾的可能性很大,日光温室受灾的可能性较大;当平均风力超过10级时,设施农业重度受灾,拱棚受灾的可能性极大,日光温室受灾的可能性很大。张淑杰等^[16]利用东北地区176个气象站1981—2010年10 min平均最大风速资料,采用极值I型分布函数计算了5 a、10 a、20 a、30 a重现期的风速极值和风压,结合东北地区日光温室结构特点,确定了东北各区域日光温室遭受大风危害的临界风速指标,风压低值区、次低值区、次高值区和高值区临界风速分别为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.4 雪灾指标

雪灾指标一般用日降雪量或积雪深度或积雪持续时间表示。杨再强等^[17]研究表明,日降雪量 S_n 达到15 mm以上时日光温室就可能遭受雪灾, $15 \text{ mm} < S_n \leq 20 \text{ mm}$ 为轻灾, $20 \text{ mm} < S_n \leq 25 \text{ mm}$ 为中灾, $25 \text{ mm} < S_n \leq 30 \text{ mm}$ 为重灾, $S_n > 30 \text{ mm}$ 为极重灾害。张波^[13]采用能量平衡和计算流体力学(CFD)模拟方法,根据日光温室和塑料大棚的负荷,分别计算在不同风速、降雪量和风向条件下日光温室表面所能承受的临界积雪厚度,并进一步得到不同降雪等级下日光温室和塑料大棚垮塌的临界时间,得到在风速为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时以积雪持续时间为指标的雪灾气象指标(表5),并且得出同等降雪等级下,日光温室和塑料大棚垮塌的临界时间均随

着风速的增大而增大。陈妮娜等^[15]利用2000—2011年辽宁省14个地市61个县气象站的降雪量、积雪深度及设施农业受灾情况,研究辽宁省设施农业暴雪致灾指标表明:当积雪深度达到6~9 cm时,设施农业轻度受灾,塑料大棚受灾的可能性较大;当积雪深度达到10~20 cm时,设施农业中度受灾,塑料大棚受灾的可能性很大,日光温室受灾的可能性较大;当积雪深度超过21 cm时,设施农业重度受灾,塑料大棚受灾的可能性极大,日光温室受灾的可能性很大。张淑杰等^[18]利用东北地区179个气象站1981—2010年的雪深资料,从暴雪存在的2种相态及3种坡度角日光温室所能承受的最大雪压出发,在充分考虑当地日光温室的建筑物质量下,确定了日光温室遭受雪灾的临界指标(表6),表明不同的降雪类型、不同的临界雪压和不同的温室坡度,垮棚致灾指标不同。

表5 日光温室和塑料大棚雪灾等级指标

Table 5 Grade index of snow disaster in solar greenhouse and plastic greenhouse

雪灾等级	日光温室		塑料大棚	
	24 h 降雪量/ mm	持续时间/ d	24 h 降雪量/ mm	持续时间/ d
	轻度	<2.4	>7.0	<2.4
中度	2.5~4.9	3.5~7	2.5~4.9	2.3~4.8
重度	5.0~9.9	1.7~3.5	5.0~9.9	1.2~2.4
特重	>10.0	>1.7	>10.0	>1.2

表6 东北地区不同降雪类型、不同温室坡度下垮棚致灾指标

Table 6 Blizzard disaster index under different snowfall types and greenhouse slopes in Northeast China

降雪类型	临界雪压/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	临界雪深/cm		
		温室坡度角 30°	温室坡度角 35°	温室坡度角 40°
纯降雪	0.15	19	26	38
	0.25	32	43	64
	0.35	45	60	89
	0.45	57	77	115
混合型降雪	0.15	10	13	19
	0.25	16	21	32
	0.35	22	30	45
	0.45	29	38	57

1.5 低温寡照灾害指标

低温寡照是低温和寡照的复合灾害,指在秋末至春初季节,由于连续的阴雪或雾霾天气,日照不

足或无日照,使日光温室内温度偏低,温室内环境条件不能满足作物生长发育所需,造成作物生长发育受阻的气象灾害。魏瑞江^[19]根据河北省中南部

地区日光温室蔬菜生长发育实际观测资料及温室内外气象条件,最早提出了低温寡照灾害指标(表7)。对于黄瓜,当阴天1 d且室外气温低于 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或连阴天2 d且室外气温低于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或连阴天3 d且室外气温低于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,日光温室内黄瓜就有受害的可能^[20]。张淑杰等^[21]在人工气候箱内模拟4种低温弱光高湿处理,即低温 $5\sim 2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\sim 1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\sim 0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\sim (-1)\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温为变温处理,每组历时

4 d,如 $5\sim 2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为在人工气候箱里设定前两天温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,第3天 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,第4天 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,以此类推;弱光 $0(2\text{ d})\sim 400\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;空气湿度 $70\%\sim 95\%$,对番茄最大净光合速率、叶绿素荧光参数及酶活性的影响,得出 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下低温弱光高湿胁迫已经对番茄造成伤害,当 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下低温持续3 d,且最低温度降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,番茄即受冻。

表7 日光温室低温寡照灾害指标

Table 7 Disaster index of low temperature and sunless in solar greenhouse

灾害等级	低温指标	寡照指标
轻度	10—11月温室外最低气温 $\leq -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或12月—次年1月温室外最低气温 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	连续3 d无日照,或连续4 d中有3 d无日照,另1 d日照时数小于3 h
中度	10—11月温室外最低气温 $\leq -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或12月—次年1月温室外最低气温 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	连续4~7 d无日照,或逐日日照时数小于3 h连续7 d以上
重度	10—11月温室外最低气温 $\leq -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或12月—次年1月温室外最低气温 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	连续无日照日数大于7 d,或逐日日照时数小于3 h连续10 d以上

2 灾害监测预警研究

及时、准确的农业气象灾害监测预警有助于农业生产部门及时采取有效措施,减轻灾害损失,利于设施农业持续稳定发展。灾害监测预警方法一般有三种:一是建立设施内小气候观测站,对设施内小气候进行监测,当设施内小气候条件达到临界灾害指标时就进行预警;二是建立设施内、外气象条件相关模型,用设施外气象条件作为灾害指标,当设施外气象条件即将达到灾害指标时即预警;三是建立设施内、外气象条件相关模型,用设施内、外的气象因子作为灾害指标,当设施内、外气象条件即将达到灾害指标时即预警。低温灾害监测预警三种方法均有所应用,而风灾、雪灾、寡照以及低温寡照等灾害则多用第二种方法,但也有用第三种方法的。

2.1 用设施内数据进行监测预警

目前人们运用物联网技术,结合远程监控和地理信息系统等技术,建立了各种设施农业气象灾害监测预警的智能系统,将预警信息通过网络提供给用户,应用于设施农业气象灾害防御。黎贞发等^[22]利用物联网技术,集成开发了一套包括日光温室小气候与生态环境监测网络、数据实时采集与无线传输、低温灾害监测与预警发布、远程加温控制于一体的技术方法,在天津设施农业气象服务中发挥了积极作用。张智^[23]针对我国日光温室环境调控能

力差以及抵抗自然灾害能力较弱的现状,设计了日光温室自动监控及低温预警系统,提出了基于单片机的总体环境控制方案,采用模糊控制算法规则,完成对温室内温度、湿度、水肥灌溉等的实时显示与调控,并对有出现低温冷害的可能进行预报预警。系统以MCS-51系列单片机89C51为控制核心,配置以双积分型A/D转换器ICL7109、编程I/O口扩展芯片8155、外部数据存储器芯片6264、程序存储器芯片27256、看门狗芯片X25045等部件,构成实时环境监测与控制系统。

2.2 用设施外气象条件进行监测预警

目前,建立设施内外气象条件相关模型使用较多的方法是在气象灾害指标基础上,应用时间序列分析、多元回归分析、韵律、相似等数理统计方法,建立设施内气象因子预报模型,当设施外气象条件将要达到灾害指标临界值时进行预警。

如李美荣等^[5]建立了陕西省关中地区不同天气类型下日光温室内、外最低气温的相关模型,以温室外最低气温为蔬菜低温冻害指标,当温室外最低气温即将下降到临界指标时就进行低温冻害预警,为低温冻害气象服务奠定基础。魏瑞江等^[24]根据石家庄地区冬季日光温室内小气候和附近气象站观测资料,利用相关分析和逐步回归分析,分别建立了石家庄地区冬季日光温室内日最低气温、日最高气温、日最小相对湿度和日最大太阳辐射与温室外气象条件的相关模型,对灾害进行监测预警。

孙东磊等^[7]建立了冀中地区不同天气条件下“寿光五代”番茄日光温室内最低气温与温室外日平均气温、最低气温和最高气温的回归模型,确定了番茄不同等级冻害温室外最低温度指标,当室外即将达到临界温度指标时就对冻害进行预警。李宁等^[25]基于主成分回归方法建立了天津西青区日光温室内最低气温与温室内外各气象要素之间的多元回归模型。张淑杰等^[3]对沈阳和喀左地区日光温室番茄实际低温冻害及其影响因素进行分析,构建了日温差指数,确定辽宁地区日光温室番茄果实膨大期低温冻害气象指标,并采用回归分析方法建立了日光温室内逐时气温预报模型,实现温室内番茄低温冻害预警。邹学智等^[26]利用 BP 神经网络方法,基于浙江省慈溪市的公众天气预报和草莓大棚内极端气温的观测数据,构建了以大棚外日最高气温、最低气温、相对湿度、最大风级、白天和夜间天空状况作为自变量的塑料大棚内日最高气温和日最低气温的预测模型,以预测草莓塑料大棚内日最高气温和日最低气温。白青华和王惟晨^[27]利用主成分回归方法,构建了张掖地区日光温室内最低温度预报模型,对低温冻害进行预警。黎贞发等^[22]基于典型日光温室小气候观测数据与作物生长发育临界指标,利用逐步回归及神经网络方法,构建温室内小气候与外界气象条件的相关模型,确定日光温室低温灾害预警指标,并制作低温灾害预警信息,利用手机短信、电子显示屏、网站等多媒体发布。

另外,也有把所得到的设施外气象灾害指标植入计算机系统,当设施外气象条件将要达到灾害指标时就进行预警。如张波^[13]基于 VS2010.NET 和 SQL 数据库平台,利用 C#编程语言,构建温室风雪灾害预警决策支持服务系统,实现对设施农业的风灾和雪灾的预警。吾买尔·吐尔逊等^[28]为有效防止大风对日光温室的破坏,制作了日光温室自动防风装置模型,为提高其自动化程度,利用 PLC 控制技术 & 计算机编程语言 VB.Net,开发了一种日光温室自动防风监控系统,系统通过 PLC 自动控制装置模型的辅助设备,及时采集相关参数的数据,以保证系统稳定运转。

2.3 用设施内、外数据进行监测预警

用设施内、外数据对气象灾害进行监测预警多是采用数理统计方法,建立设施内、外气象条件相关模型,但所建立的模型中预报因子涉及设施内的和设施外的,当设施内、外气象条件将要达到灾害指标临界值时就进行预警。如朱汉青等^[29]建立了

日光温室番茄寡照低温灾害预警模型,表明 1~3 d 寡照低温灾害致灾因子包括前一日温室内最低气温、前一日温室外最低气温、前一日温室内最低 20 cm 地温、当日温室外最低气温、前一日日照时数; 4 d 以上(4~12 d)寡照低温灾害致灾因子包括前两日温室内最低气温、前一日温室内最低气温、前一日温室外最低气温和前两日温室外最低气温,当这些因子的值即将达到时,即进行预警。李楠等^[30]针对日光温室黄瓜,建立了日光温室黄瓜低温冷害预警模型,预警模型中的预报因子也涉及设施内和设施外的,当预报因子即将达到时,则可发布预警信息。

3 灾害风险研究

在以往的研究中,对于气象灾害风险研究多是从灾害的危险性、暴露性、脆弱性以及防灾减灾能力角度进行^[31-33],或者从产量损失的角度进行^[34-36],由于设施农业生产在不同区域的气候适应性还不明确,部分区域盲目发展扩大种植规模,设施蔬菜生产常常因各种极端天气而导致减产或绝收。所以对设施种植气象灾害风险评估尤其对低温、寡照、低温寡照等属于累积性灾害的风险评估主要考虑其危险性。另外,设施农业气象灾害发生次数相对较少,且累积时间短,无法用传统的方法对其进行风险区划,因此多采用信息扩散理论的方法进行灾害风险分析与区划^[37]。

魏瑞江等^[38]从灾害的风险概率、风险指数角度对低温寡照灾害进行研究,得出:河北省日光温室低温寡照灾害综合风险最大的地区为邯郸的中部;石家庄、邢台两市中部,邯郸大部,风险次之。黄川容等^[39]针对北京市日光温室,考虑风灾的强度和成灾概率,构建了风灾的风险指数,评估北京区域日光温室风灾的风险。杨再强等^[40]利用中国南方地区 15 省(自治区、市)160 个气象观测站 1990—2009 年的气象资料,综合考虑气温、光照、风速、降水等主要致灾因子,建立了基于实数编码的加速遗传算法的南方塑料大棚气象灾害的投影寻踪等级评价模型,计算出南方塑料大棚的气象灾害月份和季节的风险等级,并按季节进行了风险区划。薛晓萍等^[41]基于人工气候箱和大田试验观测,研究了日光温室黄瓜低温冷害气象指标,将黄瓜低温冷害分为无灾、轻灾、中灾和重灾 4 个等级,统计山东省各气象站常年冬季日光温室不同等级低温冷害出现的日数,基于 GIS 对各等级冷害出现的日数进行网格

点插值,根据层次分析法获得各等级低温冷害的影响权重,再计算低温冷害综合风险指数,对全省低温冷害风险进行评估。杨再强等^[42]针对北方典型日光温室,首先计算了各站点日光温室主要生产期低温、寡照、暴雪、风灾等单个灾害的综合指数,对计算得到的单个气象灾害综合指数进行聚类分析,按指数范围划分为4个等级,得到北方日光温室生产中相应气象灾害风险等级的划分标准,再通过建立投影寻踪模型,得到各站点每月的设施气象灾害风险等级。江和文等^[10]从灾害风险概率、灾害频率等角度,构建了葫芦岛市日光温室低温寡照灾害风险评估模型,确定低温寡照灾害风险指数,综合评估葫芦岛市日光温室蔬菜低温寡照灾害的风险水平。李楠等^[14]利用 ArcGIS 分析了山东省风灾的空间分布特征,同时,基于信息扩散理论,通过计算不同地区不同等级风灾发生的风险概率,对山东省日光温室风灾进行风险评估,表明:2006—2015年山东省日光温室生产季内(11月至翌年4月)风灾以轻度灾害为主,且主要发生在春季的3月和4月,风灾呈东多西少、北多南少的空间分布特征;风灾高发区主要分布在山东半岛、鲁西北部、鲁中东部及鲁东南部分地区,风灾发生的概率为80.1%以上。于红等^[43]利用天津市武清区2009—2016年最大风速资料,基于风灾强度评估模型对武清区日光温室风灾进行风险评估,分析风灾风险空间变化特征。

4 灾害影响研究

人们对灾害的影响非常重视,研究也比较多,研究所涉及的作物主要包括番茄、黄瓜、甜椒、小青菜、芹菜等蔬菜,以及葡萄、砂糖橘、草莓等林果或浆果等。研究最多的是低温和寡照及其复合灾害低温寡照对作物的影响,也有对高温对作物影响的研究。所采用的方法主要是在人工气候箱(室)内设定不同温度或光照或湿度或不同光温组合,模拟不同的灾害种类和级别,研究不同等级不同灾害处理下作物外观形态的变化^[44-47]、生理生化的反应^[1-2,4,6,8-9,19-20,48-49],以及对植株生长发育^[44-45,48-50]、干物质积累和分配^[51-53]、果实品质^[19,44,46,50,54]等的影响,其中研究最多的是灾害下作物生理生化的反应,从致灾机理角度进行了阐释,包括作物的光合特性、光合色素含量、叶绿素荧光参数、叶绿素含量、保护酶活性、抗氧化酶活性、过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性、超氧化物歧化

酶活性、丙二醛含量、可溶性蛋白含量、细胞膜透性、植株抗衰老特性、植株内源激素水平的变化等。如低温灾害使番茄植株叶绿素 a、Chla / Chlb 和最大光合速率均存在不同程度的降低,降低了 PSII 的原始光能转换效率和潜在活性,使得番茄超氧化物歧化酶(SOD),过氧化物酶(POD),过氧化氢酶(CAT),丙二醛(MDA)酶的活性均有不同程度升高^[1];对于黄瓜植株,最大光合速率随低温胁迫程度的增加依次降低,SOD、POD 和 MDA 活性先升高后下降,CAT 仅升高;超氧化物歧化酶活性随着处理温度的降低先升高后下降^[2];黄瓜果实含水率和维生素 C 含量随低温处理的延长呈下降趋势,可溶性蛋白质含量先增加后减少,可溶性糖含量先减少后增加^[20]。对于小青菜,叶绿素含量随着低温胁迫强度的加剧和持续时间的延长而明显下降;叶片组织的 SOD 活性随着胁迫温度的降低而不断升高,POD 和 CAT 活性随着处理时间的延长,均表现出先升高后降低的趋势;MDA 含量则表现出了先升高后降低再升高的特点;叶片的相对电导率随着胁迫温度的降低而升高^[4]。西瓜在低温寡照下,增加了 SOD、POD 活性,但却降低了 CAT 活性,MDA 含量不断增加^[49]。

5 讨论与展望

本文基于已有研究成果,从国内设施种植气象灾害指标、灾害监测预警、灾害风险及灾害影响等方面进行归纳总结,设施种植气象灾害的研究起步于21世纪初期,之后的十年进入研究升温阶段,对灾害指标的研究手段多是试验的方法,或是用统计的方法,或是能量平衡和计算流体力学模拟方法,这些研究成果为后续研究奠定了坚实的基础。不同的方法有其不同的优缺点,试验的方法在所用仪器所能承受范围内设定不同的光温组合或光温湿组合或风力风向组合等,测定不同组合下作物的反应,便于灾害指标的得出,但试验室里用于试验的作物多是盆栽,生长空间受到一定限制,与作物实际生长空间存在或多或少的差异。用历年实际发生的灾害样本进行统计的方法,反映了作物的实际生长发育状况,但不同等级的灾害样本较少,再通过统计方法建立相关模型推算出灾害指标,或许存在一定的误差。能量平衡和计算流体力学模拟方法机理性比较强,但所涉及的参数比较多,有的难以获得,灾害指标的获得有时是在设定一些参数的情况下进行的,也存在一定的局限性^[55-56]。所以,

无论是通过哪种方法得出的灾害指标,在应用过程中应考察其适应性,并进一步本地化。目前灾害指标多是针对常见蔬菜,且涉及的因子多是单要素,灾害监测预警风险评估的手段比较单一,灾害影响的研究多集中在对作物生理生化反应方面等。

随着设施农业的不断发展,各地设施种植种类也不断多样化,且设施小气候的相对封闭性及其与外界大气候的依变关系,这就决定了设施内小气候的多变性及致灾的复杂性,所以设施种植气象灾害研究仍需加强。

1)加强灾害指标的研究。由于各地设施种植的种类不同,所以有必要针对不同作物、不同生育阶段的灾害指标进行研究。同时由于设施结构的差异、地域的差异,灾害的种类也不尽相同,所以不同种类灾害的指标需进一步研究,并且灾害指标的普适性也有待进一步验证。

2)加强灾害监测预警评估方法的研究。对灾害的监测预警评估是气象防灾减灾的重要手段,由于设施种植不同于大田种植,有些在大田可用的监测预警评估手段可能不适合于设施农业,所以有必要开发新的可行的技术方法,以减少设施农业的损失。

3)加强灾害影响的研究。掌握灾害对作物的影响,是采取有效措施防御气象灾害的基础,由于不同的灾害对不同的作物不同的生育阶段的影响不同,致灾后作物的反应也不相同,所以有必要对灾害影响进行研究,不断提高气象服务的科学性和有效性。

参考文献:

- [1] 杨再强,张波,张继波,等.低温胁迫对番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].自然灾害学报,2012,21(4):168-174.
- [2] 彭晓丹,杨再强,柳笛,等.温室黄瓜低温气象灾害指标[J].气象科技,2013,41(2):394-400.
- [3] 张淑杰,孙立德,马成芝,等.日光温室番茄低温冻害指标确定及温度预报模型建立[J].气象与环境学报,2016,32(4):98-105.
- [4] 刘伟,杨再强,薛思嘉,等.低温胁迫对设施小青菜叶片抗衰老特性的影响[J].北方园艺,2017(17):80-86.
- [5] 李美荣,刘映宁,赵军,等.陕西省关中地区大棚蔬菜低温冻害预报服务方法[J].干旱地区农业研究,2007,25(5):204-207,231.
- [6] 薛晓萍,李楠,杨再强.日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究[J].灾害学,2013,28(3):61-65.
- [7] 孙东磊,魏瑞江,王鑫,等.冀中“寿光五代”温室番茄冻害气象指标及时间变化特征[J].气象与环境学报,2014,30(5):106-112.
- [8] 朱静,杨再强,柳笛,等.设施芹菜光合特性对寡照胁迫的响应[J].干旱气象,2012,30(1):53-58,65.
- [9] 李楠,薛晓萍,张继波,等.日光温室番茄寡照灾害等级指标研究[J].中国农学通报,2015,31(22):99-104.
- [10] 江和文,张丽敏,汪丽新.葫芦岛日光温室蔬菜低温寡照灾害风险评估[J].江西农业学报,2015,27(4):99-103.
- [11] 魏瑞江,王鑫,乐章燕.华北日光温室小气候及其高效利用[M].北京:气象出版社,2018.
- [12] 杨再强,张波,薛晓萍,等.设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律[J].生态学报,2012,32(24):7730-7737.
- [13] 张波.温室风灾与雪灾预警技术的研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [14] 李楠,薛晓萍,李鸿怡.基于信息扩散的山东省日光温室风灾风险评估[J].气象与环境学报,2018,34(5):149-155.
- [15] 陈妮娜,蒋大凯,王瀛,等.辽宁省设施农业大风和暴雪致灾指标[J].江苏农业科学,2013,41(11):386-387.
- [16] 张淑杰,孙立德,马成芝,等.东北日光温室最大风荷载特征及风灾预警指标研究[J].资源科学,2015,37(1):211-218.
- [17] 杨再强,张婷华,黄海静,等.北方地区日光温室气象灾害风险评价[J].中国农业气象,2013,34(3):342-349.
- [18] 张淑杰,陈艳秋,王萍,等.东北地区最大雪深、雪压及日光温室垮棚致灾指标[J].生态学杂志,2016,35(6):1601-1607.
- [19] 魏瑞江.日光温室低温寡照灾害指标[J].气象科技,2003,31(1):50-53.
- [20] 赵和丽,杨再强.低温和寡照单因素胁迫对温室黄瓜叶片光合、器官干物质分配及果实品质的影响[J].北方园艺,2018(10):1-8.
- [21] 张淑杰,杨再强,陈艳秋,等.低温、弱光、高湿胁迫对日光温室番茄花期生理生化指标的影响[J].生态学杂志,2014,33(11):2995-3001.
- [22] 黎贞发,王铁,宫志宏,等.基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用[J].农业工程学报,2013,29(4):229-236.
- [23] 张智.日光温室自动监控及低温预警系统的研究[D].西安:西北农林科技大学,2007.
- [24] 魏瑞江,王春乙,范增禄.石家庄地区日光温室冬季小气候特征及其与大气气候的关系[J].气象,2010,36(1):97-103.
- [25] 李宁,申双和,黎贞发,等.基于主成分回归的日光温室内低温预测模型[J].中国农业气象,2013,34(3):306-311.

- [26] 邹学智,申双和,曹雯,等.基于公众天气预报预测塑料大棚逐日极端气温[J].气象科学,2014,34(2):187-192.
- [27] 白青华,王惟晨.张掖日光温室最低温度预报模型的主成分回归法构建[J].中国农学通报,2015,31(32):223-228.
- [28] 吾买尔·吐尔逊,木合塔尔·米吉提,穆哈西,等.基于VB.Net日光温室自动防风监控系统开发[J].自动化技术与应用,2017,36(4):64-67,73.
- [29] 朱汉青,陈辰,李楠.日光温室番茄寡照低温灾害预警模型构建技术研究[J].海洋气象学报,2019,39(3):132-149.
- [30] 李楠,薛晓萍,张继波,等.日光温室黄瓜低温冷害预警模型构建技术研究[J].山东农业科学,2015,47(9):106-111.
- [31] 张继权.农业气象灾害风险评价、预警及管理研究[M].北京:科学出版社,2015.
- [32] 王春乙,张继权,霍治国,等.农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J].气象学报,2015,73(1):1-19.
- [33] 王连喜,肖玮钰,李琪,等.中国北方地区主要农作物气象灾害风险评估方法综述[J].灾害学,2013,28(2):114-119.
- [34] 霍治国,李世奎,王素艳,等.主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J].自然资源学报,2003,18(6):692-703.
- [35] 杨若子,周广胜.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,2015,73(6):1141-1153.
- [36] 钱永兰,毛留喜,周广胜.全球主要粮食作物产量变化及其气象灾害风险评估[J].农业工程学报,2016,32(1):226-235.
- [37] 薛晓萍.设施农业气象灾害及风险区划:黄淮海与环渤海设施蔬菜优势区域[M].北京:气象出版社,2021.
- [38] 魏瑞江,李春强,康西言.河北省日光温室低温寡照灾害风险分析[J].自然灾害学报,2008,17(3):56-62.
- [39] 黄川容,杨再强,刘洪,等.北京日光温室风灾风险分析及区划[J].自然灾害学报,2012,21(3):43-49.
- [40] 杨再强,朱凯,赵翔,等.中国南方塑料大棚气象灾害风险区划[J].自然灾害学报,2012,21(5):213-221.
- [41] 薛晓萍,李楠,杨再强.日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究[J].灾害学,2013,28(3):61-65.
- [42] 杨再强,张婷华,黄海静,等.北方地区日光温室气象灾害风险评价[J].中国农业气象,2013,34(3):342-349.
- [43] 于红,陈思宁,黎贞发,等.天津市武清区日光温室风灾风险时空特征分析[J].气象与环境科学,2019,42(2):62-67.
- [44] 薛晓萍,李楠,张继波,等.寡照对温室黄瓜花果期生长及产量品质影响研究[J].海洋气象学报,2020,40(3):77-83.
- [45] 白青华,马红勇,殷雪莲,等.低温期不同结构日光温室温度变化及其对樱桃番茄生长的影响[J].北方园艺,2013(22):59-62.
- [46] 朱雨晴,薛晓萍.花果期遮阴对番茄果实生长及品质的影响[J].干旱气象,2020,38(6):994-1000.
- [47] 江梦圆,杨再强,王明田,等.花期低温寡照对番茄植株生长及果实发育的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):125-131.
- [48] 付崇毅,刘杰才,崔世茂,等.低温对日光温室砂糖橘成花诱导及生理反应的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(5):572-579.
- [49] 侯伟,孙爱花,杨福孙,等.低温胁迫对西瓜幼苗光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J].广东农业科学,2014,41(13):35-39.
- [50] 朱丽云,杨再强,李军,等.花期低温寡照对番茄开花坐果特性及果实品质的影响[J].中国农业气象,2017,38(7):456-465.
- [51] 高杰云,熊静,陈清.日光温室越冬长茬番茄植株养分累积与分配特征[J].北方园艺,2017(16):80-84.
- [52] 杨再强,袁昌洪,丁宇晖,等.低温弱光对设施番茄苗期营养物质和干物质分配的影响[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(1):108-117.
- [53] 于淑芳,高贤彪,卢丽萍.高效节能型日光温室黄瓜养分的吸收规律[J].中国蔬菜,2000(5):13-14.
- [54] 魏守辉,肖雪梅,钟源,等.日光温室不同时段补光对番茄果实品质及挥发性物质影响[J].农业工程学报,2020,36(8):188-196.
- [55] 佟国红,David M.Christopher.墙体材料对日光温室温度环境影响的CFD模拟[J].农业工程学报,2009,25(3):153-157.
- [56] 薛晓萍,宿文.基于CFD的自然通风对日光温室湿度分布模拟分析[J].海洋气象学报,2019,39(4):90-96.