

# 日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究<sup>\*</sup>

薛晓萍<sup>1</sup>, 李楠<sup>1</sup>, 杨再强<sup>2</sup>

(1. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 基于人工气候箱和大田试验观测结果, 探讨了日光温室黄瓜生产低温冷害气象指标确定技术, 将冬季黄瓜生产低温冷害分为无灾、轻灾、中灾和重灾4个等级, 利用层次分析法和GIS技术, 对日光温室黄瓜生产低温冷害综合风险进行评估。结果表明, 山东省各级冷害出现日数随着低温冷害程度的加重呈减少的趋势, 但区域间存在一定差异。鲁北、鲁西北北部、鲁中北部以及半岛内陆地区遭受低温冷害风险较高, 半岛东部沿海、鲁西南、鲁南及鲁东南沿海区域风险较低, 其他地区属于中度风险。

**关键词:** 日光温室; 黄瓜; 低温冷害; 指标; 风险评估; 山东

**中图分类号:** S4; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0061-05

黄瓜为喜温作物, 是我国北方地区冬季日光温室主栽作物之一, 由于日光温室结构较为简陋, 且以非加温为主, 其内部温度的高低主要依赖于外界天气条件, 在冬季生产过程中, 常因强降温天气导致温室内出现低温逆境, 从而使黄瓜生长遭受低温胁迫, 生理活动失调, 产量、品质下降。目前, 低温冷害已成为我国北方地区冬季温室黄瓜生产主要气象灾害之一。关于低温对黄瓜光合作用、生长发育、产量形成等生理生态指标的影响, 前人已进行了大量研究, 早期的研究主要集中在短期极端低温及中高光强下低温对黄瓜生长的影响<sup>[1-5]</sup>。近年来, 针对低温弱光对黄瓜影响研究表明<sup>[6-8]</sup>, 持续低温弱光环境条件下, 植株CO<sub>2</sub>同化能力降低, 净光合速率下降, 从而影响其生长发育与产量。上述研究为构建和完善低温影响的评价指标体系奠定了基础。关于低温冷害对作物的影响, 国内、外学者比较关注的是影响机理, 而对低温灾害风险评估、区划等方面的研究成果甚少<sup>[5-10]</sup>。近年来, 国内学者将自然灾害风险理论应用于气象灾害风险评估<sup>[11-17]</sup>, 综合考虑了气象灾害致灾强度、承灾环境、抗灾能力、灾损风险等因素, 使气象灾害风险性的定量评估更科学。而针对低温灾害对农业影响风险评估, 多以低温灾害发生频率和灾害损失等为主要研究内容, 且主要是针对大田作物<sup>[18-21]</sup>, 迄今为止, 日光温室低温冷害风险评估与区划技术研究尚未见报道,

本文拟基于人工气候箱和大田试验, 构建温室黄瓜不同低温冷害等级下外界气温等级指标, 以山东为例, 对其低温冷害风险进行评估, 探讨日光温室生产灾害风险评估技术, 以期为我国设施农业生产防灾减灾提供科技支撑, 同时为日光温室结构设计提供相应参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

#### 1.1.1 人工气候箱试验

试验于2011年1-6月于人工气候箱(TPG1260, Australian)中进行, 人工气候箱容积1260 L, 光照控制范围0~1000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 温度控制范围5~45  $^{\circ}\text{C}$ , 湿度控制范围30%~90% RH。低温试验设计5、7、9、11  $^{\circ}\text{C}$ 四个水平, 处理1~5 d, 恢复1~5 d。低温试验期间, 相对湿度控制为75%, 光合有效辐射控制为800  $\mu\text{molom}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 以25  $^{\circ}\text{C}$ 处理为对照, 供试黄瓜品种为津优35号。

在试验过程中, 采用LI-6400便携式光合测定仪获取黄瓜光合、叶绿素荧光等参数, 每个处理重复3次。

#### 1.1.2 大田试验

大田观测试验于2009年12月至2012年5月在天津(宝坻、小王庄)、山东(莱芜、淄博、东

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-01-22 修回日期: 2013-03-05

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(设施农业气象灾害预警及防御关键技术)(GYHY(QX)201006028)

作者简介: 薛晓萍(1964-), 女, 山东招远人, 博士, 研究员, 主要从事应用气象研究. E-mail: xypdhy@163.com

营、昌乐)进行, 试验温室坐北朝南, 东西长 60 ~ 80 m、南北跨度 9 ~ 12 m、脊高 3 ~ 4 m, 东、西、北三面墙是厚度为 1 m 实土墙, 前屋面覆盖聚乙烯无滴膜, 温室内种植作物为黄瓜。

温室小气候观测要素包括室内气温、湿度、辐射和地温(0、5、10、20、40 cm), 观测仪器为 ZQZ-A 自动气象站, 数据采集频次为 1 次/h。温室外气象资料来源于当地气象局。

### 1.2 低温冷害等级指标确定

#### 1.2.1 温室内黄瓜低温冷害指标的确定方法

采用叶绿素荧光动力学技术对黄瓜低温冷害等级温度指标进行确定<sup>[22-24]</sup>, 黄瓜光合作用受低温影响的胁迫指数(LTI)表达式为:

$$LTI = \frac{P'_{g\max}}{P_{g\max}} \times \frac{(F_v/F_m)'}{F_v/F_m} \times 10。 \quad (1)$$

式中:  $P_{g\max}$  和  $P'_{g\max}$  分别表示最适温度及低温状态下的最大光合速率,  $F_v/F_m$  和  $(F_v/F_m)'$  分别表示最适温度及低温状态下的 PSII 潜在光化学效率。

以最适宜温度条件下 LTI 值为基础, 根据光合作用系统活性受低温影响的程度, 将 LTI 值划分为不同等级范围, 从而确定对应的低温冷害等级温度指标值。

#### 1.2.2 温室外低温冷害气温指标的确定

根据温室内黄瓜低温冷害等级指标, 分别挑选温室内不同等级最低温度对应的温室外最低气温数据, 按照 80% 的保证率的对应关系选取, 取其平均值作为温室外低温冷害等级指标值。

### 1.3 风险评估方法

根据 1.2 节中确定的低温冷害等级指标, 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日数, 基于 GIS, 采用反距离加权方法对各冷害等级出现日数进行 90 m × 90 m 网格点插值, 通过计算综合风险指数(P) 对全省低温冷害风险进行评估与区划。综合风险指数计算方法为:

$$P = a \times X_1 + b \times X_2 + c \times X_3 + d \times X_4 \quad (2)$$

式中:  $a, b, c, d$  分别为四个低温冷害等级的影响权重值;  $X_1, X_2, X_3, X_4$  分别为无灾、轻灾、中灾及重灾四个等级栅格数据标准化后的值。

## 2 结果与分析

### 2.1 温室内黄瓜低温冷害等级指标

将试验所得不同低温处理条件下黄瓜光合速率、荧光参数等观测数据带入式(1), 可得到其对应条件下的 LTI 值(表 1)。

表 1 黄瓜低温胁迫指标计算值

低温处理	$P_{g\max}$	$F_v/F_m$	$P'_{g\max}/P_{g\max}$	$(F_v/F_m)'/(F_v/F_m)$	LTI
5 ℃12 h	5.85	0.48	0.33	0.59	1.93
5 ℃24 h	3.14	0.37	0.18	0.45	0.80
5 ℃48 h	-0.56	0.25	-0.03	0.30	——
5 ℃72 h	-1.67	0.21	-0.09	0.26	——
5 ℃96 h	-3.43	0.19	-0.19	0.23	——
7 ℃12 h	6.87	0.51	0.39	0.62	2.41
7 ℃24 h	3.85	0.42	0.22	0.51	1.11
7 ℃48 h	1.56	0.29	0.09	0.35	0.31
7 ℃72 h	-1.20	0.24	-0.07	0.29	——
7 ℃96 h	-1.89	0.23	-0.11	0.28	——
9 ℃12 h	10.35	0.57	0.58	0.70	4.06
9 ℃24 h	7.44	0.45	0.42	0.55	2.30
9 ℃48 h	4.14	0.33	0.23	0.40	0.94
9 ℃72 h	1.08	0.27	0.06	0.33	0.20
9 ℃96 h	0.21	0.25	0.01	0.30	0.04
11 ℃12 h	12.51	0.61	0.71	0.74	5.25
11 ℃24 h	9.43	0.42	0.53	0.51	2.72
11 ℃48 h	6.96	0.48	0.39	0.59	2.30
11 ℃72 h	3.89	0.52	0.22	0.63	1.39
11 ℃96 h	2.76	0.53	0.16	0.65	1.01

对于黄瓜, 在最适宜温度条件下,  $F_v/F_m$  最高, 光合作用速率达到最大, 此时公式(1)中的 LTI 值为 10, 当黄瓜受到低温胁迫时,  $F_v/F_m$  显著下降, 在 0 ℃以上和最适温度下限之间, 气温越低及持续时间越长, 叶片光合作用速率( $P_{g\max}$ ) 及 PSII 潜在光化学效率( $F_v/F_m$ ) 越低。本研究中, 当 5 ℃持续 24 h 或者 7 ℃持续 48 h, 黄瓜叶片光合作用速率下降到  $1.56 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , PSII 潜在光化学效率下降 0.29 时, 此时光系统活性受损; 当低温胁迫继续加剧, 叶片光合作用速率低于 0 时, PSII 潜在光化学效率( $F_v/F_m$ ) 低于 0.2, 此时叶片光系统活性受损严重, 造成不可恢复的伤害; 植株发生严重冻害甚至死亡, 此时 LTI 低于 0。若将黄瓜生长受低温胁迫影响分为无、轻、中和重 4 个等级, 则根据不同胁迫处理光合作用速率和  $F_v/F_m$ , 可将 LTI 值介入 4 ~ 10 的低温处理视为无冷害发生,  $1 \leq LTI < 4$  为轻度冷害,  $0 \leq LTI < 1$  为中度冷害,  $LTI \leq 0$ , 将发生重度冷害。各等级灾害对应的低温指标见表 2。

将表 2 中不同等级冷害对应的温度指标与大田试验数据进行比较, 按照 1.2.2 节中指标确定方法, 可获得温室黄瓜不同等级低温冷害对应的温室外最低气温指标值(表 3), 当温室外气温最低温度  $T \downarrow$  高于 -2 ℃时, 温室内气温对黄瓜生长无影

响;  $T \downarrow$  介于  $-5^{\circ}\text{C}$  与  $-2^{\circ}\text{C}$  时, 将导致轻度灾害;  $T \downarrow$  高于  $-9^{\circ}\text{C}$ 、低于  $-5^{\circ}\text{C}$  时, 中度灾害; 若  $T \downarrow$  低于  $-9^{\circ}\text{C}$ , 则产生严重灾害。

表 2 低温冷害等级温度指标

低温冷害等级			
无	轻	中	重
9 $^{\circ}\text{C}$ 持续 12 h	5 $^{\circ}\text{C}$ 持续 12 h	5 $^{\circ}\text{C}$ 持续 24 h	5 $^{\circ}\text{C}$ 持续 h 及以上
11 $^{\circ}\text{C}$ 持续 12 h	7 $^{\circ}\text{C}$ 持续 ~24 h	7 $^{\circ}\text{C}$ 持续 48 h	7 $^{\circ}\text{C}$ 持续 h 及以上
	9 $^{\circ}\text{C}$ 持续 24 h	9 $^{\circ}\text{C}$ 持续 ~96 h	
	11 $^{\circ}\text{C}$ 持续 24 ~96 h		

表 3 黄瓜低温冷害室外气温等级指标

低温冷害等级	最低温度指标 $^{\circ}\text{C}$
无	$-2 < T \downarrow$
轻	$-5 < T \downarrow \leq -2$
中	$-9 < T \downarrow \leq -5$
重	$T \downarrow \leq -9$

## 2.2 不同等级冷害日数空间分布特征

按照表 3 中低温冷害指标, 分别统计分析山东省冬季各县历年(1981–2012 年)不同灾害等级出现日数(图 1), 可以看出, 全省各级冷害出现日数随着低温冷害程度的加重呈减少的趋势, 但区域

间存在一定差异。

### 2.2.1 无灾日数区域分布

30 年平均无灾日数为 12~56 d(图 1a), 出现概率为 12%~62%。无灾日出现概率的空间分布为: 鲁西北大部、鲁中局部及半岛中部部分地区为 13%~22%; 鲁南大部、半岛沿海部分地区及鲁西南南部局部地区为 44%~62%, 其中半岛沿海局部为 56% 以上; 其他地区在 22%~44% 之间。

### 2.2.2 轻灾日数区域分布

山东省 30 年平均轻灾日数为 20~34 d(图 1b), 出现概率为 22%~38%。鲁中部分及鲁西北、鲁中内陆、鲁南局部地区在 22%~28% 之间; 鲁西南大部、半岛北部、鲁南及鲁西北局部地区为 31%~38%; 其他地区在 28%~31% 之间。

### 2.2.3 中灾日数区域分布

中灾日数在 11~35 d 之间(图 1c), 出现概率在 12%~39% 之间。鲁西及鲁中地区、半岛大部、鲁南部分地区为 28%~39%, 其中鲁西北大部及鲁中、半岛部分地区在 33% 以上; 其他地区为 12%~28%。

### 2.2.4 重灾日数区域分布

重灾日数为 0~25 d(图 1d), 概率低于 28%。全省空间分布情况为: 鲁西北中部、鲁中东部及半岛内陆部分地区在 17%~28%; 鲁南及半岛沿海局部地区小于 6%; 其他地区在 6%~17% 之间。

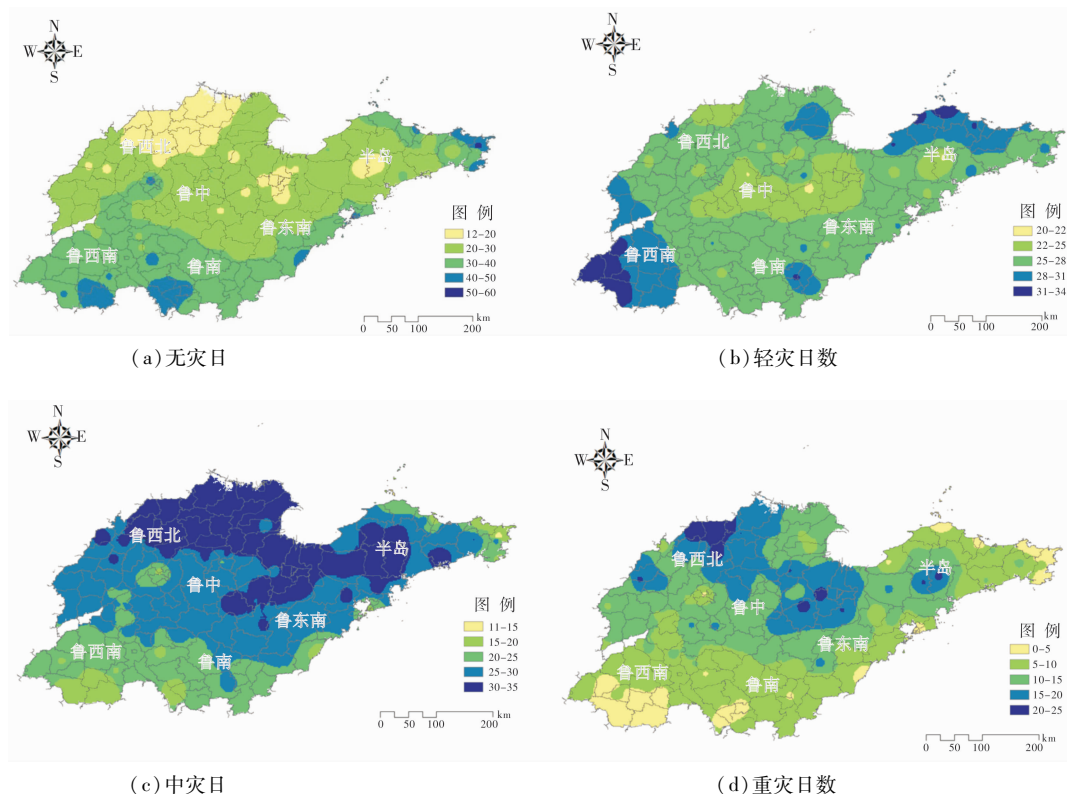


图 1 山东省冬季不同灾害等级出现日数分布图(1981–2012 年)

### 2.3 不同等级冷害风险评估

由 2.2 节的统计结果可知,不同灾害等级出现日数存在一定的量级差异,为便于比较,将其数据进行标准化处理,数据标准化方法采用下式进行:

$$X_j = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中: $X_j$  为低温天数标准化值; $X_i$  为低温天数原始值; $X_{\min}$  为低温天数最小值; $X_{\max}$  为低温天数最大值。

根据层次分析法可获得各低温冷害等级的影响权重,其中无灾为 0.096,轻灾 0.162,中灾 0.278,重灾 0.463,则(2)式可表达为:

$$P = 0.096 \times X_1 + 0.162 \times X_2 + 0.278 \times X_3 + 0.463 \times X_4 \quad (4)$$

根据自然断点法,将区域低温冷害风险确定为低风险、中风险和高风险三个等级,其中, $0 \leq P < 0.420$  为低度风险, $0.420 \leq P < 0.570$  为中度风险, $0.570 \leq P < 1$  为高度风险。由图 2 可知,对于山东而言,鲁北、鲁西北北部、鲁中中北部以及半岛内陆地区冬季利用日光温室种植黄瓜,遭受低温冷害风险较高,需要做好防御措施。半岛东部沿海、鲁西南、鲁南及鲁东南沿海区域风险较低,其他地区属于中度风险。

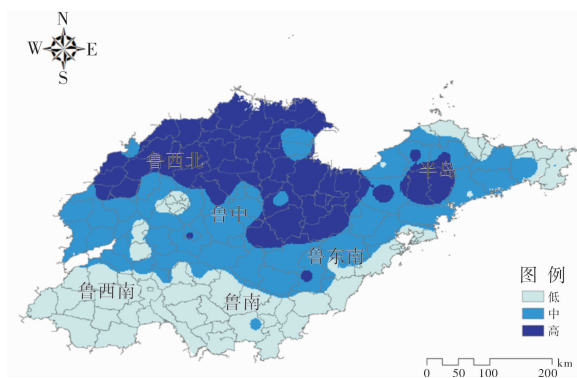


图 2 山东省日光温室黄瓜生产低温冷害风险分布图

## 3 结论与讨论

(1)近年来,随着灾害风险评估理论的发展,气象灾害风险评价指标是综合考虑危险性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力四个主要因素,从而能更加科学、定量地反映各类灾害风险度。而本研究在对日光温室黄瓜生产低温冷害风险的评价仅考虑了其危险性,主要原因在于,对于某一区

域而言,生产上所用温室建造结构与场所均有一定的规范要求,因而其暴露性、脆弱性、防灾减灾能力基本一致。

(2)尽管关于黄瓜低温冷害研究成果较多,但多数属于机理研究,本研究根据人工气候箱的试验观测结果,对低温冷害温度指标进行等级划分,可为生产者提供更具针对性防灾依据。研究表明<sup>[22]</sup>,温室小气候具有一定的区域稳定性,因而本文研究基于温室内黄瓜低温冷害指标和温室内外气象观测数据所确定的低温冷害等级指标,将使区域温室低温冷害风险评价与区划能更客观地反映当地的实际情况。

(3)从山东全省不同灾害等级的出现天数的概率分析看,鲁西南西部轻灾发生概率较大,但中灾和重在的概率较低,因此,其综合风险最低。鲁中山区、鲁北发生中、重冷害几率较大,综合风险最大。而半岛地区轻、中等出现概率大,但受海洋气候影响,其发生重灾的概率较少,综合风险较半岛东部较内陆地区低。综上,低温是山东鲁中山区、鲁北北部开展日光温室黄瓜生产的主要逆境胁迫因子,需要加强低温冷害的防御。

## 参考文献:

- [1] Hodgson RAJ, Raison JK. Inhibition of photosynthesis by chilling in moderate light: a comparison of plants sensitive and insensitive to chilling[J]. *Planta*, 1989, 178(4): 545-552.
- [2] 曾绍西,王以柔. 低温对黄瓜幼苗子叶光合强度和叶绿素荧光的影响[J]. *植物生理学通讯*, 1989(4): 12-15.
- [3] 李晓萍,陈贻竹,李平,等. 黄瓜幼苗的冷锻炼与低温引起的光抑制[J]. *植物生理学报*, 1996, 22(1): 101-104.
- [4] 曾纪晴,刘鸿先,王以柔,等. 黄瓜幼苗子叶在低温下的光抑制及其恢复[J]. *植物生理学报*, 1997, 23(1): 12-15.
- [5] 马德华,庞金安,李淑菊,等. 短期强低温处理对黄瓜幼苗光合作用的影响[J]. *河北农业大学学报*, 1998, 21(2): 39-42.
- [6] 陈青君,张福漫,王永健,等. 黄瓜对低温弱光反应的生理特征研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(1): 77-81.
- [7] 周艳虹,喻景权,钱亚榕,等. 低温弱光对黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 921-924.
- [8] 张红梅,余纪柱,金海军. 低温弱光对黄瓜植株生长、光合特性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3): 339-342.
- [9] Foolad M R, Lin G Y. Genetic analysis of cold tolerance during vegetative growth in tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill[J]. *Euphytica*, 2001, 122: 105-111.

- [10] Ke D, Sun G, Jiang Y. Dural role of superoxide radicals in the chilling-induced photoinhibition in maize seeding[J]. *Photosynthetic*, 2004, 42(1): 147–152.
- [11] 张丽娟, 李文亮, 张冬有. 基于信息扩散理论的气象灾害风险评估方法[J]. *地理科学*, 2009, 29(2): 250–254.
- [12] 刘希林, 陈宜娟. 泥石流风险区划方法及其应用——以四川西部地区为例[J]. *地理科学*, 2010, 30(4): 558–565.
- [13] 李谢辉, 王磊, 谭灵芝, 等. 渭河下游河流沿线区域洪水灾害风险评价[J]. *地理科学*, 2009, 29(5): 733–739.
- [14] 薛晓萍, 马俊, 李鸿怡. 基于 GIS 的乡镇洪涝灾害风险评估与区划技术——以山东省淄博市临淄区为例[J]. *灾害学*, 2012, 27(4): 71–74.
- [15] 郭安红, 王纯枝, 李轩, 等. 东北地区落叶松毛虫灾害气象风险区划初步研究[J]. *灾害学*, 2012, 27(2): 24–28.
- [16] 于文金, 闫永刚, 吕海燕, 等. 基于 GIS 的太湖流域暴雨洪涝灾害风险量化研究[J]. *灾害学*, 2011, 26(4): 1–7.
- [17] 蒋新宇, 范久波, 张继权, 等. 基于 GIS 的松花江干流暴雨洪涝灾害风险评估[J]. *灾害学*, 2009, 24(3): 51–56.
- [18] 马树庆, 王琪, 王春乙, 等. 东北地区玉米低温冷害气候和经济损失风险分区[J]. *地理研究*, 2008, 27(5): 1169–1177.
- [19] 何燕, 谭宗琨, 李政, 等. 基于 GIS 的广西甘蔗低温冻害区划研究[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(9): 81–85.
- [20] 袭祝香, 马树庆, 王琪. 东北区低温冷害风险评估及区划[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(2): 98–102.
- [21] 马树庆, 王琪, 袭祝香. 东北玉米低温冷害风险评估研究[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 137–141.
- [22] 薛晓萍, 李鸿怡, 李楠, 等. 日光温室小气候预报技术研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(29): 195–202.
- [23] 梁芳, 郑成淑, 孙宪芝等. 低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作和叶绿素荧光参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 29–35.
- [24] 刘玉凤, 李天来, 焦晓赤. 短期夜间亚低温及恢复对番茄光合作用和蔗糖代谢的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(4): 683–691.
- [25] 张志刚, 尚庆茂. 低温、弱光及盐胁迫下辣椒叶片的光合特性[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(1): 123–131.

## Risk Assessment Technology of Chilling Injury on Cucumbers in Solar Greenhouse

Xue Xaioping<sup>1</sup>, Li Nan<sup>1</sup> and Yang Zaiqiang<sup>2</sup>

(1. *Cliamte Center of Shandong Province, Jinan 250031, China;*

2. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)*

**Abstract:** According the observation result of artificial climate box and experimental plot, the technology to determine the chilling injury meteorological index of cucumbers in solar greenhouse is discussed, and the chilling injuries in winter are divided into four degrees as none, light, medium and serious. Using Analysis Hierarchy Process (AHP) and GIS technique, synthetic risk of chilling injury on cucumbers in solar greenhouse is assessed. Results show that the tendency of chilling injury day number all over Shandong Province is decieasing with the degree of chilling injury increasing, though there are differences among areas. The comprehensive risk of following regions is high: the north of Shandong, the north of northwest Shandong, the north of central Shandong and the inland of Shandong peninsula; the comprehensive risk of following regions is low: the coastal of east Shandong peninsula, the southwest of Shandong, the south of Shandong and the coastal of southeast of Shandong; and risks in the other regions are medium.

**Key words:** solar greenhouse; cucumber; chilling injury; index; risk assessment; Shandong