

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):132-139.
ZHU Hanqing, CHEN Chen, LI Nan. Technical research on forewarning model of tomato's low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(3): 132-139. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.015. (in Chinese)

日光温室番茄寡照低温灾害预警模型构建技术研究

朱汉青¹,陈辰²,李楠²

(1. 平原县气象局,山东 平原 253100; 2. 山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用2011—2015年(11月—次年5月)临淄、莱芜、利津的日光温室小气候和自动气象观测站逐日资料,采用结构方程(SEM)和层次分析(AHP)等方法,甄别了寡照低温灾害的致灾因子,构建了日光温室番茄寡照低温灾害预警模型。利用2016年11月1日—2017年5月31日山东临淄、莱芜、利津、平度、章丘及2015年11月1日—2016年5月31日天津静海、河北徐水日光温室小气候和自动气象观测站逐日观测资料对模型进行独立样本检验。结果表明:1)3 d以下(1~3 d)寡照低温灾害致灾因子包括前1日温室内最低气温、前1日温室外最低气温、前1日温室内最低20 cm地温、当日温室外最低气温、前1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2日温室内最低气温、前1日温室内最低气温、前1日温室外最低气温和前2日温室外最低气温;2)应用山东临淄、莱芜等5地及天津静海、河北徐水日光温室主要生产季内3 d以下、4 d以上寡照低温灾害实际发生情况对模型预警结果进行检验,预警等级与实际低温等级完全一致的平均准确率分别为72%和74%,误差在1个等级以内的分别为99%和98%。

关键词: 日光温室; 番茄; 寡照低温; 预警模型; 结构方程; 层次分析

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0132-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.015

Technical research on forewarning model of tomato's low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse

ZHU Hanqing¹, CHEN Chen², LI Nan²

(1. Pingyuan Meteorological Bureau, Pingyuan 253100, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract Based on daily data of micro-climate observation and automatic meteorological observation station at Linzi, Laiwu, and Lijin from 2011 to 2015 (from November to next May), the SEM (structural equation modeling) and AHP (analytic hierarchy process) are used to choose factors of causing tomato's low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse and the forewarning model is built. The daily data of micro-climate observation and automatic meteorological observation station at Linzi, Laiwu, Lijin, Pingdu, and Zhangqiu of Shandong from 1 November 2016 to 31 May 2017 and Jinghai of Tianjin and Xushui of Hebei from 1 November 2015 to 31 May 2016 is utilized to test the forewarning model. The results are listed as below. 1) Factors of causing low temperature stress by continuous shading under three days (between one and three days) are minimum indoor air temperature one day ago, minimum outdoor air temperature one day ago, minimum indoor ground temperature at 20 cm one day ago, minimum

收稿日期:2019-04-08; 修订日期:2019-04-30

基金项目:山东省气象局科研项目(2016sdqxm03)

作者简介:朱汉青,男,硕士,助理工程师,主要从事地面气象观测业务,hanqing0923@163.com。

通信作者:李楠,女,硕士,高级工程师,主要从事设施农业气象预报服务工作,dogears0229@qq.com。

outdoor air temperature on that day, and sunshine duration one day ago; while factors of causing low temperature stress by continuous shading over three days (between 4 and 12 days) are minimum indoor air temperature two days ago, minimum indoor air temperature one day ago, minimum outdoor air temperature one day ago, and minimum outdoor air temperature two days ago. 2) The data of low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse under or over three days during main production season in Linzi, Laiwu, Lijin, Pingdu, and Zhangqiu of Shandong, Jinghai of Tianjin, and Xushui of Hebei is used to verify the forewarning results of the model. The average accuracy of forewarning grades in full accord with actual grades is 72% and 74%, respectively; the deviation within one grade is 99% and 98%, respectively.

Key words solar greenhouse; tomato; low temperature stress by continuous shading; forewarning model; SEM; AHP

引言

日光温室生产主要能量来源为太阳辐射,太阳辐射在很大程度上直接影响甚至决定了日光温室内的光、温等小气候环境,对日光室内作物光合、新陈代谢作用等有很大影响,是构成日光温室赖以生产、运行的能量基础。近年来,冬季寡照天气成为一种常见的天气现象,且呈现出发生频率高、影响范围大、持续时间长等特征,日光温室蔬菜生产受寡照天气的影响也日趋加重^[1]。日光温室蔬菜在生育期间,若遭受持续寡照天气,光照条件将无法满足不同生长需要,对作物光合作用及光合特性均有显著影响^[2-3],同时,也会造成日光室内热量不足,从而影响作物生长发育、产量和品质^[4]。目前,国内学者多针对设施农业生产中的寡照及低温寡照复合灾害进行相关指标研究^[5-9],但忽略了当外界气温不低时,单纯由寡照造成的热量不足带来的低温影响。因此,开展寡照低温灾害预警技术研究,可为设施农业生产防灾减灾提供依据。

日光温室番茄寡照指标^[10]表明,3 d为灾害的临界时间,3 d以下寡照对日光温室番茄生长无影响,4 d以上则会导致日光温室番茄发生轻度及以上灾害。当出现寡照天气时,日光室内气温会明显下降,可能造成低温冷害。因此,本研究针对3 d以下寡照和4 d以上寡照分别构建寡照低温预警模型。

1 资料与方法

1.1 数据资料

预警模型构建所用数据为2011—2015年设施蔬菜生产主要服务季内,即11月—次年5月(以下简称“试验期”),山东临淄、莱芜、利津等3个自动

气象观测站最高气温、最低气温、空气相对湿度、风速、日照时数等逐日监测资料,日光温室小气候自动监测站最高气温、最低气温、地温最低值、地温最高值、最小空气相对湿度等要素逐日监测资料。

预警模型检验所用数据为2016年11月1日—2017年5月31日山东临淄、莱芜、利津、平度、章丘及2015年11月1日—2016年5月31日天津静海、河北徐水等7个自动气象观测站及日光温室小气候自动监测站逐日观测要素。

1.2 研究方法

将1 d内累计日照时数低于3 h定义为寡照日,日光温室番茄出现明显低温冷害时外界气温一般在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。利用日光温室生产季内日照时数及平均气温进行统计计算,筛选非低温条件下的寡照天气资料,即平均气温在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上且日照时数在3 h以下的时段,提取该时段内的日光室内、外气象观测资料,用于分析单纯由寡照引起的日光温室番茄低温冷害;通过反复构建结构方程模型(SEM),并按验证性因子分析模型的识别方法对模型进行判断,最终运用卡方与自由度的比值及RMSEA(近似误差的平方根)两个指标对模型进行评判,直到整个模型可以被识别,且卡方与自由度的比值、RMSEA两个指标最小,确定最准确、最简洁的结构方程模型^[11-19]。通过计算模型各因子间的通径系数,利用层次分析法(AHP),建立层次结构模型并计算判断矩阵,分别通过层次单排序及一致性检验、层次总排序及一致性检验^[20-24],最终确定寡照低温预警模型。

2 寡照对日光室内气温的影响

2.1 寡照情况分析

平均寡照日数统计时段内出现寡照日的平

均值,最大连续寡照日数指统计时段内出现连续寡照日的最大值。分析试验期间山东省(122站平均,下同)各月内平均寡照日及最大连续寡照日数(图1)可知,1月、11月及12月平均寡照时间最长,其中,11月平均寡照日数达13.8 d,1月为12.2 d,这3个月的寡照日数占试验期间总寡照日数的60%;全省平均最大连续寡照日数12月最高,为6.6 d,次高11月为5.0 d。利津、莱芜和临淄试验期间,三站平均最大连续寡照日数为2.9 d,利用三站各月内平均最大连续寡照日数统计,最大出现在11月,为5.8 d,其中,2015年11月达11.7 d。根据三站试验期间平均出现最大连续寡照时间及各月内出现的最大连续寡照时间,结合日光温室番茄寡照指标^[10],确定分别构建1~3 d(以下简称“3 d以下”)

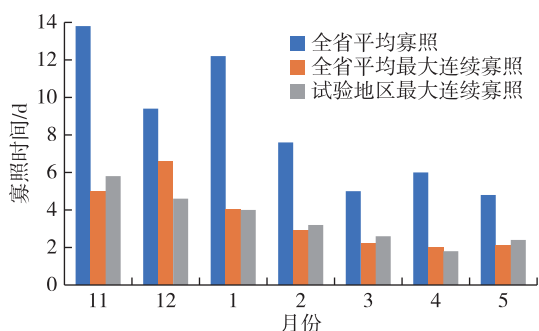


图1 2011—2015年的11月一次年5月山东省及试验地月平均寡照日数

Fig.1 Monthly average continuous shading days of Shandong and test stations between November and next May from 2011 to 2015

及4~12 d(以下简称“4 d以上”)寡照低温预警模型。

2.2 寡照对日光温室内气温的影响

通过分析试验期间不同月份及不同寡照时间对日光温室内平均、最高及最低气温影响,出现3 d连续寡照时,日光温室内平均气温降温幅度在3.7℃左右,最低气温降温幅度在2.4℃左右,最高气温降温幅度在10.3℃左右;随着持续寡照天数增加,降温幅度增加,连续4~7 d及7~12 d平均气温的降温幅度分别为5.5℃和7.1℃;最低气温的降温幅度为3.3℃和4.6℃,最高气温的降幅为12.6℃和15.0℃。

3 寡照低温预警模型构建及检验

3.1 因子选取及权重确定

日光温室内气温与前期温室内、外气象因子关系密切^[25]。通过相关性分析并结合预报因子的可获取性,确定包括气温、地温、相对湿度、风速、日照时数等5个因子类型作为模型构建的备选因子集(表1)。

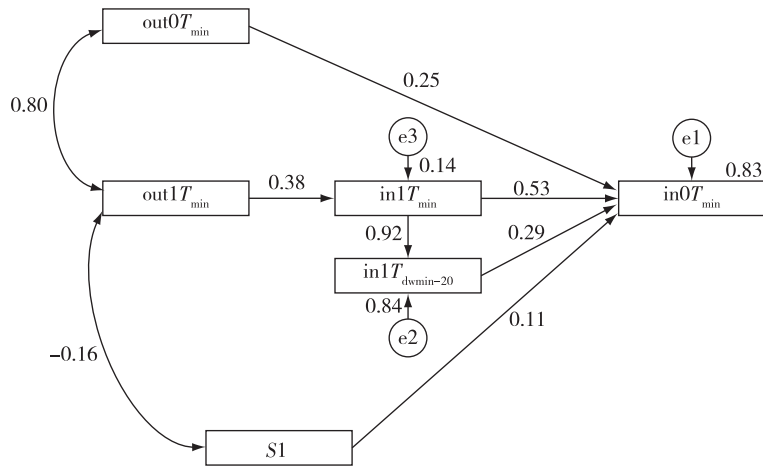
利用AMOS17.0构建日光温室3 d以下和4 d以上寡照低温结构方程模型,经反复构建并检验,最终确定因子间的关系。路径图分别如图2、图3所示,所选因子重要性权重值及排序见表2。

表1 寡照低温预警模型构建备选气象因子集

Table 1 Alternative meteorological factor set for building the forewarning model of low temperature stress by continuous shading

资料来源	因子类型	当日	前1日	前2日
温室内	气温		T_{\min}, T_{\max}	T_{\min}, T_{\max}
	地温		$T_{\text{dwmn}}(0, 5, 20, 40 \text{ cm})$	$T_{\text{dwmn}}(0, 5, 20, 40 \text{ cm})$
			$T_{\text{dwmax}}(0, 5, 20, 40 \text{ cm})$	$T_{\text{dwmax}}(0, 5, 20, 40 \text{ cm})$
	相对湿度		RH_{\min}	RH_{\min}
温室外	气温	T_{\min}, T_{\max}	T_{\min}, T_{\max}	T_{\min}, T_{\max}
	风速	v	v	v
	日照时数		S	S
	相对湿度		RH_{\min}	RH_{\min}

注: T_{\min}, T_{\max} 分别代表最低气温、最高气温; $T_{\text{dwmn}}, T_{\text{dwmax}}$ 分别代表最低地温、最高地温; RH_{\min} 代表最小相对湿度; v 代表平均风速; S 代表日照时数。



注： $out0T_{min}$ 代表温室外当日最低气温， $out1T_{min}$ 代表温室外前 1 日最低气温， $out2T_{min}$ 代表温室外前 2 日最低气温， $in0T_{min}$ 代表温室内当日最低气温， $in1T_{min}$ 代表温室内前 1 日最低气温， $in2T_{min}$ 代表温室内前 2 日最低气温， $in1T_{dwmn-20}$ 代表温室内前 1 日最低 20 cm 地温， $S1$ 代表前 1 日日照时数，图 2、表 2 同。e1, e2, e3 为残差变量标识，单向箭头和双向箭头分别表示单向因果关系和双向因果关系，线上数值为通径系数。

图 2 日光温室 3 d 以下寡照低温结构方程模型路径图

Fig.2 Path map of SEM of low temperature stress by continuous shading under three days (between one and three days) in solar greenhouse

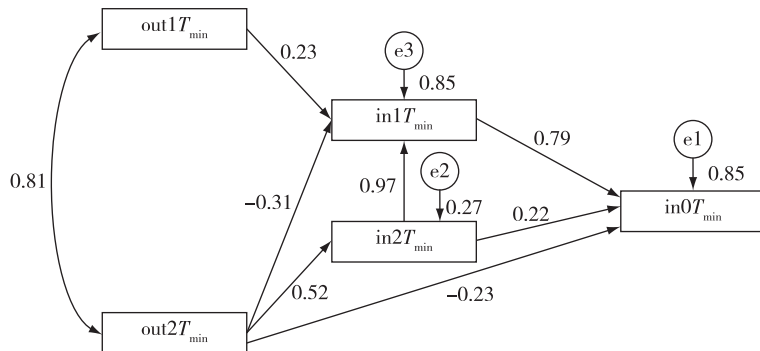


图 3 日光温室 4 d 以上寡照低温结构方程模型路径图

Fig.3 Path map of SEM of low temperature stress by continuous shading over three days (between 4 and 12 days) in solar greenhouse

表 2 日光温室寡照低温结构方程模型所选因子权重值及排序

Table 2 Weight and rank of factors in SEM of low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse

3 d 以下			4 d 以上		
因子	权重	排序	因子	权重	排序
$out1T_{min}$	0.30	2	$out1T_{min}$	0.18	3
$in1T_{min}$	0.79	1	$in2T_{min}$	0.99	1
$in1T_{dwmn-20}$	0.29	3	$in1T_{min}$	0.80	2
$out0T_{min}$	0.25	4	$out2T_{min}$	0.04	4
$S1$	0.11	5			

3.2 预警模型构建

3.2.1 判断矩阵

利用表 2、表 3 中日光温室 3 d 以下、4 d 以上寡照低温结构方程模型所选因子重要性权重值，两两比较，按层次分析法首先计算得到判断矩阵分别为矩阵 1、矩阵 2：

$$\begin{bmatrix}
 1.00 & 2.66 & 2.74 & 3.12 & 7.21 \\
 0.34 & 1.00 & 1.03 & 1.17 & 2.71 \\
 0.36 & 0.97 & 1.00 & 1.14 & 2.63 \\
 0.32 & 0.85 & 0.88 & 1.00 & 2.31 \\
 0.14 & 0.37 & 0.38 & 0.43 & 1.00
 \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 1})$$

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 1.24 & 5.49 & 9.00 \\ 0.80 & 1.00 & 4.42 & 9.00 \\ 0.18 & 0.23 & 1.00 & 4.09 \\ 0.04 & 0.06 & 0.24 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 } 2)$$

3.2.2 层次排序检验

利用数据处理软件(DPS)分析判断矩阵,计算各因子权重系数及检验结果,见表3。

表3 日光温室寡照低温模型层次分析检验结果

Table 3 Test result of AHP of low temperature stress by continuous shading in solar greenhouse

3 d 以下因子及权重		4 d 以上因子及权重	
$M(1)$	0.48	$N(1)$	0.48
$M(2)$	0.18	$N(2)$	0.42
$M(3)$	0.17	$N(3)$	0.12
$M(4)$	0.15	$N(4)$	0.04
$M(5)$	0.06		
最大特征根 $\lambda(M) = 5.00$		最大特征根 $\lambda(N) = 4.11$	
判断矩阵一致性指标 $CI(M) = 0.00$		判断矩阵一致性指标 $CI(N) = 0.04$	
判断矩阵的随机一致性指标 $RI(M) = 1.11$		判断矩阵的随机一致性指标 $RI(N) = 0.89$	
判断矩阵的一致性比率 $CR(M) = 0.00$		判断矩阵的一致性比率 $CR(N) = 0.04$	

由表3可知,3 d 以下寡照低温构建判断矩阵的一致性比率 $CR(M) = 0.00 < 0.10$,通过一致性检验,故得到如下3 d 以下寡照低温预警模型:

$$K_1 = 0.48X_1 + 0.18X_2 + 0.17X_3 + 0.15X_4 + 0.06X_5 \quad (1)$$

其中, K_1 代表3 d 以下寡照低温指数; X_1 ,即 $\text{in}1T_{\min}$,代表前1日日光温室内最低气温; X_2 ,即 $\text{out}1T_{\min}$,代表前1日日光温室外最低气温; X_3 ,即 $\text{in}1T_{\text{dmin}-20}$,代表前1日日光温室内最低20 cm地温; X_4 ,即 $\text{out}0T_{\min}$,代表当日日光温室外最低气温; X_5 ,即 S_1 ,代表前1日日照时数。

4 d 以上寡照低温构建判断矩阵的一致性比率 $CR(N) = 0.04 < 0.1$,通过一致性检验,故得到如下4 d 以上寡照低温预警模型:

$$K_2 = 0.48Y_1 + 0.42Y_2 + 0.12Y_3 + 0.04Y_4 \quad (2)$$

其中, K_2 代表4 d 以上寡照低温指数; Y_1 ,即 $\text{in}2T_{\min}$,代表前2日日光温室内最低气温; Y_2 ,即 $\text{in}1T_{\min}$,代表前1日日光温室内最低气温; Y_3 ,即 $\text{out}1T_{\min}$,代表前1日日光温室外最低气温; Y_4 ,即 $\text{out}2T_{\min}$,代表前2日日光温室外最低气温。

3.3 模型应用及检验

3.3.1 模型应用

3.3.1.1 模型因子等级划分

寡照低温预警模型在应用时首先将模型中各气象因子 X 及 Y 转换为1、2、3、4四个等级值,利用转化后的等级值计算寡照低温指数 K (四舍五入取整),根据 K 值划分寡照低温灾害预警等级。等级值为1代

表无灾,2代表轻灾,3代表中灾,4代表重灾。

3.3.1.2 日光温室内番茄低温冷害等级指标

通过查阅文献[11,26]以及对农业部门的调研了解,5℃、10℃、13℃为日光温室内番茄低温冷害等级指标,因此日光温室内最低气温等级指标为1级(13,+∞)、2级(10,13]、3级(5,10]、4级(-∞,5]。寡照低温预警模型中温室内最低气温因子 X_1 、 Y_1 、 Y_2 均采用该等级指标。

3.3.1.3 日光温室外最低气温等级指标

利用日光温室内、外逐日最低气温资料,按番茄低温冷害气象等级指标即1级(13,+∞)、2级(10,13]、3级(5,10]、4级(-∞,5]进行匹配,并按80%保证率计算方法进行筛选,确定日光温室外最低气温等级指标为1级(-2,+∞)、2级(-5,-2]、3级(-9,-5]、4级(-∞,-9]。寡照低温预警模型中温室外最低气温因子 X_2 、 X_4 、 Y_3 、 Y_4 均采用该等级指标。

3.3.1.4 日光温室内地温等级指标

日光温室内种植区土壤是热量的储存体,夜间无太阳辐射提供热量时主要依靠土壤储热释放来维持室内温度。因此,地温也是影响寡照低温灾害的一个重要气象因子。

将各站日光温室内最低20 cm地温与日光温室内最低气温进行逐步回归拟合,构建二次拟合方程(表4)。将日光温室内番茄低温冷害等级指标界限值代入拟合方程,得到各站日光温室内最低20 cm地温 X_3 等级指标值,见表5。

表4 日光温室最低20 cm地温与最低气温的拟合方程

Table 4 Fitting equation of minimum ground temperature at 20 cm and minimum air temperature in solar greenhouse

站点	拟合方程	决定系数 R^2
临淄	$y=9.494+0.670x+0.005x^2$	0.87
莱芜	$y=11.475+0.302x+0.018x^2$	0.83
利津	$y=8.853+0.792x-0.003x^2$	0.90
平度	$y=10.414+0.618x-0.003x^2$	0.71
章丘	$y=10.722+0.390x+0.018x^2$	0.76

注: x 为日光温室最低气温, y 为日光温室最低 20 cm 地温。

表5 日光温室最低20 cm地温等级指标

Table 5 Grade index of minimum ground temperature at 20 cm in solar greenhouse

℃

站点	1级指标	2级指标	3级指标	4级指标
临淄	(19.1, +∞)	(16.7, 19.1]	(13.0, 16.7]	(-∞, 13.0]
莱芜	(18.5, +∞)	(16.3, 18.5]	(13.4, 16.3]	(-∞, 13.4]
利津	(18.7, +∞)	(16.5, 18.7]	(12.7, 16.5]	(-∞, 12.7]
平度	(18.0, +∞)	(16.3, 18.0]	(13.4, 16.3]	(-∞, 13.4]
章丘	(18.9, +∞)	(16.4, 18.9]	(13.1, 16.4]	(-∞, 13.1]

3.3.1.5 日照时数等级指标

利用逐步回归将各站日照时数与各站日照百分率进行线性拟合,日照百分率的等级指标为1级晴(0.8, +∞);2级少云(0.6, 0.8];3级多云

(0.2, 0.6];4级阴(-∞, 0.2]。将日照百分率等级界限值,即0.2、0.6、0.8代入拟合方程,得到日照时数 X_5 的等级指标,见表6。

表6 日照时数等级指标

Table 6 Grade index of sunshine duration

h

站点	1级指标	2级指标	3级指标	4级指标
临淄	(9.5, +∞)	(7.1, 9.5]	(2.5, 7.1]	(-∞, 2.5]
莱芜	(9.4, +∞)	(7.1, 9.4]	(2.5, 7.1]	(-∞, 2.5]
利津	(9.5, +∞)	(7.2, 9.5]	(2.5, 7.2]	(-∞, 2.5]
平度	(9.5, +∞)	(7.1, 9.5]	(2.5, 7.1]	(-∞, 2.5]
章丘	(9.5, +∞)	(7.1, 9.5]	(2.4, 7.1]	(-∞, 2.4]

3.3.2 模型检验

利用2016年11月1日—2017年5月31日山东临淄、莱芜、利津、平度、章丘等5个气象观测站逐日资料分别对3 d以下寡照低温、4 d以上寡照低温预警模型进行独立样本检验。将模型中各因子按等级指标划分并代入预警模型中计算预警等级值,检验时段日光温室逐日最低气温等级作为实际低温等级。将预警等级值与实际低温等级无偏差或相差在1个等级以内作为寡照低温预警模型准确性的标准,检验结果如表7和表8。5个被检验站点

中,3 d以下寡照低温、4 d以上寡照低温预警等级与实际低温等级无偏差的平均准确率分别67%和68%,相差在1个等级以内的准确率分别为98%和97%。同时,应用该模型对2015年11月1日—2016年5月31日天津静海、河北徐水进行检验,3 d以下寡照低温、4 d以上寡照低温预警等级与实际低温等级无偏差的平均准确率分别为85%和90%,相差在1个等级以内的准确率均为100%。表明构建的日光温室番茄寡照低温预警模型预警效果较好,并且具有可推广性。

表7 日光温室内番茄3 d以下寡照低温灾害预警模型检验结果

Table 7 Test result of the forewarning model of tomato's low temperature stress by continuous shading under three days (between one and three days) in solar greenhouse

站点	总样本	误差为0的样本	误差在1个等级之内的样本	误差为0的准确率	误差在1个等级之内的准确率
山东临淄	212	146	209	69%	99%
山东莱芜	212	156	208	74%	98%
山东利津	210	101	205	48%	98%
山东平度	90	70	87	78%	97%
山东章丘	148	99	147	67%	99%
山东平均	174	114	171	67%	98%
天津静海	20	17	20	85%	100%
河北徐水	87	73	87	84%	100%
总平均	140	95	127	72%	99%

表8 日光温室内番茄4 d以上寡照低温灾害预警模型检验结果

Table 8 Test result of the forewarning model of tomato's low temperature stress by continuous shading over three days (between 4 and 12 days) in solar greenhouse

站点	总样本	误差为0的样本	误差在1个等级之内的样本	误差为0的准确率	误差在1个等级之内的准确率
山东临淄	212	143	206	67%	97%
山东莱芜	212	139	204	66%	96%
山东利津	210	146	201	70%	96%
山东平度	90	65	86	72%	96%
山东章丘	148	94	145	64%	98%
山东平均	174	117	168	68%	97%
天津静海	20	20	20	100%	100%
河北徐水	87	69	87	79%	100%
总平均	140	97	126	74%	98%

4 结论与讨论

1) 通过构建结构方程模型甄别了寡照低温灾害的致灾因子。3 d以下寡照低温灾害致灾因子包括前1日温室内最低气温、前1日温室外最低气温、前1日温室内最低20 cm地温、当日温室外最低气温、前1日日照时数;4 d以上寡照低温灾害致灾因子包括前2日温室内最低气温、前1日温室内最低气温、前1日温室外最低气温、前2日温室外最低气温。结合日光温室番茄低温冷害等级指标及日照百分率等级指标,应用统计方法计算得到了日光温室外最低气温、日光温室内最低20 cm地温及日照时数等级指标。

2) 利用层次分析法构建了日光温室番茄寡照低温灾害预警模型。利用2016—2017年日光温室主要生产季内临淄、莱芜、利津、平度、章丘及天津静海、河北徐水的逐日气象观测资料对预警模型进行检验。结果显示,山东的5个被检验地区3 d以下寡照低温、4 d以上寡照低温预警等级与实际低

温等级完全一致的平均准确率分别为67%和68%,相差在1个等级以内的平均准确率分别为98%和97%;天津静海、河北徐水检验结果表明,3 d以下寡照低温、4 d以上寡照低温预警等级与实际低温等级完全一致的平均准确率分别为85%和90%,相差在1个等级以内的准确率分别均为100%。

3) 结构方程模型既可分析观测变量间的关系,也可分析潜在变量的作用,同时还可以处理多个因变量,但建立稳定模型要求样本量大于200^[27],本研究因寡照低温过程有限,样本量虽未达到200以上,但达到了变量的10倍,因此仍可以认为该建模方法可用于本研究。

4) 构建的结构方程模型是否为最优解,取决于因子集以及已有理论基础,是否可以得到更为优秀的建模因子仍为该方面研究的重点内容。

参考文献:

- [1] 黄伟,张俊花,任华中.番茄耐低温弱光性研究进展[J].河北北方学院学报(自然科学版),2005,21(2):

- 46-48,51.
- [2] JUNG S Y, STEFFEN K L. Influence of photosynthetic photon flux densities before and during long-term chilling on xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence quenching in leaves of tomato (*lyopersicon hirsutum*) [J]. *Physiol Plant*, 1997, 100(4): 958-966.
- [3] BAEVRE O A. Effects of light on flowering and fruiting in the tomato [J]. *Norw J Agric Sci*, 1990, 4(3): 225-232.
- [4] 黄伟, 王英, 张福漫, 等. 低温弱光对温室番茄苗期光合特性的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2004, 23(增刊): 264-267.
- [5] 魏瑞江. 日光温室寡照低温灾害指标 [J]. *气象科技*, 2003, 31(1): 50-53.
- [6] 任华中, 黄伟, 张福漫. 低温弱光对温室番茄生理特性的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(1): 95-101.
- [7] 赵玉萍, 邹志荣, 杨振超, 等. 不同温度和光照对温室番茄光合作用及果实品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 125-130.
- [8] 陈青君, 范双喜, 王绍辉. 弱光与偏低温弱光下温室黄瓜耐性指标的研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊): 72-76.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 程开明. 结构方程模型的特点及应用 [J]. *统计与决策*, 2006(10): 22-25.
- [12] 田飞. 用结构方程模型构建指标体系 [J]. *安徽大学学报(哲学社会科学版)*, 2007, 31(6): 92-95.
- [13] 王惠文, 张瑛. 结构方程模型的预测建模方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(4): 477-480.
- [14] 陈琦, 梁万年, 孟群. 结构方程模型及其应用 [J]. *中国卫生统计*, 2004, 21(2): 70-74.
- [15] 吴兵福. 结构方程模型初步研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [16] 吴兆龙, 丁晓. 结构方程模型的理论、建立与应用 [J]. *科技管理研究*, 2004, 34(6): 90-92.
- [17] 王西石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 337-344.
- [18] 梁淑云. 结构模型中预报方法的研究及其应用 [J]. *生物数学学报*, 1997, 12(2): 170-175.
- [19] 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.
- [20] 朴春花. 层次分析的研究与应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [21] 刘琼. 基于层次分析法的风险评估系统的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [22] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- [23] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(5): 148-153.
- [24] 吴征宇. 关于层次分析的若干问题 [J]. *欧洲*, 2001, 19(6): 1-6.
- [25] 王孝卿, 李楠, 薛晓萍. 寿光日光温室小气候变化规律及模拟方法 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10): 236-242.
- [26] 陈胜萍, 刘晓光, 赵成萍, 等. 低温胁迫对不同番茄品种生长和生理生化指标的影响 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(11): 780-784.
- [27] 朱远程, 马栋. 谈结构方程模型的应用策略 [J]. *商业时代*, 2010, 18(6): 73-74.