

魏瑞江,王鑫,朱慧钦. 2015. 日光温室黄瓜小气候适宜度定量评价模型. 气象, 41(5): 630-638.

# 日光温室黄瓜小气候适宜度定量评价模型<sup>\* 1</sup>

魏瑞江<sup>1,2</sup> 王鑫<sup>1,2</sup> 朱慧钦<sup>3</sup>

1 河北省气象科学研究所, 石家庄 050021

2 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

3 河北省高邑县气象局, 高邑 051330

**提 要:** 为了定量评价日光温室内小气候对蔬菜生长发育的适宜程度, 增加设施农业气象服务量化服务内涵, 文章根据实际观测资料并结合前人研究成果建立了日光温室内气温、空气相对湿度、接受到的太阳辐射及其综合因子对黄瓜生长发育的适宜度模型, 运用黄瓜实际产量与适宜度的关系对模型进行检验, 并实际应用了模型。得出黄瓜产量随综合小气候适宜度的增加而增加, 两者相关显著, 说明所建模型用于分析温室内小气候对黄瓜的适宜程度是可靠的。通过应用, 得出日光温室内小气候对黄瓜生长发育最适宜的是 5 月, 最不适宜的是 1 月; 不论是气温适宜度、空气相对湿度适宜度、接受到的太阳辐射适宜度, 还是三者综合小气候适宜度, 在整个观测年度, 其值的变化趋势均呈不规则“V”字形, 春季适宜度最高, 其次是秋季, 冬季最低。计算结果与当地实际情况是一致的。

**关键词:** 黄瓜日光温室, 小气候适宜度, 定量评价模型

**中图分类号:** P49

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 05. 011

## Quantitative Evaluation Model for Cucumber Microclimate Suitability-Degree of Solar Greenhouse

WEI Ruijiang<sup>1,2</sup> WANG Xin<sup>1,2</sup> ZHU Huiqin<sup>3</sup>

1 Hebei Institute of Meteorological Sciences, Shijiazhuang 050021

2 Key Laboratory of Meteorological and Ecological Environment of Hebei, Shijiazhuang 050021

3 Gaoyi Meteorological Station of Hebei, Gaoyi 051330

**Abstract:** To evaluate quantitatively the suitability of microclimate in greenhouse for the growth and development of vegetables and increase the connotation of facility agriculture meteorological quantitative service, this paper sets up four suitability-degree models of inside air temperature, air relative humidity, solar radiation and three factors integrated microclimate in cucumber solar greenhouse are respectively based on the observation data and the results of previous studies and thus the correlation between cucumber actual yield and suitability-degree of the models are verified. It is concluded that cucumber yield increases with the increase of integrated suitability-degree, and they two are significant correlated. This means that the model for analyzing the suitability of microclimate for cucumber growth in greenhouse is reliable. From the application of the models it is found that the most appropriate time is May in which the microclimate in greenhouse contributes to the growth and development of cucumber well while the most unsuitable time is January. Regardless of temperature suitability, air relative humidity suitability, the received solar radiation suitability or three factors comprehensive suitability, the varying trend of its values is irregular “V”-shaped during the whole observation year. The spring suitability degree is the highest, followed by the

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306039)资助

2014 年 2 月 11 日收稿; 2014 年 8 月 25 日收修定稿

第一作者: 魏瑞江, 主要从事设施农业气象研究. Email: weirj6611@sina.com

autumn, and the lowest in winter. The calculation result is in line with the local actual situation.

**Key words:** cucumber solar greenhouse, microclimate suitability-degree, quantitative evaluation model

## 引言

设施农业代表了现代农业的发展趋势与方向,我国各地设施农业蓬勃发展。日光温室是设施农业的重要组成部分,我国大面积发展的是塑料日光温室,其中90%以上以生产蔬菜为主,涉及秋、冬、春、夏四个季节,对蔬菜周年供应起到重要支撑作用,同时成为农民增收的重要途径。

由于设施农业生产的相对封闭性及其与外界大气候的依变关系,决定了设施内小气候不同于外界大气候又与外界大气候紧密相关的复杂状况,有时会造成设施内温度、湿度和辐射等小气候的亏缺或盈余,影响了设施蔬菜产量的提高和蔬菜品质的改善。为了掌握温室内的微气候状况,各地在日光温室建立了不少小气候观测站,积累了大量的微气候数据,而目前在设施农业气象服务中多是利用微气候数据建设施农业气象灾害指标(李美荣等,2007;魏瑞江等,2009a;彭晓丹等,2013;许莹等,2014)、对气象灾害进行监测、预警、评估(魏瑞江等,2008;黎贞发等,2013;薛晓萍等,2013;杨再强等,2013;米津辉等,2014)或对温室内小气候进行预报(柳芳等,2009;王鑫等,2010;魏瑞江等,2010;薛晓萍等,2012;李宁等,2013),其服务内容和精细化程度远不能满足设施农业生产的需求,而且大量的微气候数据也没有充分被利用。如何将微气候数据服务于每天的设施农业生产中,定量评价日光温室内光、温、湿等小气候对蔬菜生长发育的适宜程度,以便有针对性地采取措施,改善温室小气候环境,促进蔬菜生长发育,是设施农业气象研究的重要内容之一。

目前在气象条件对农业影响的定量化研究方面多是针对大田作物,如郭建平等(2003)建立了东北地区玉米热量指数的预测模型,罗蒋梅等(2009)、魏瑞江等(2007;2009b)针对冬小麦、夏玉米建立了气象条件影响定量评价模型,马树庆等(2013)建立了东北地区玉米整地、播种和收获气象适宜度评价模型,李德等(2012)确定了安徽宿州冬小麦冬季干旱时段灌溉气象适宜指数的概念和计算模型,易雪等(2010)将气候适宜度方法用到早稻产量预报中,钟新科等(2012)、张建军等(2013)基于气候适宜度分

别对湖南春玉米的适宜播种期和安徽一季稻生长气候适宜性进行评价分析,宋迎波等(2013)确定了冬小麦气候适宜诊断指标,而针对气象条件对蔬菜影响的定量评价较少,仅刘霞等(2012)针对大田蔬菜建立了适宜度模型,张明洁等(2013)利用影响日光温室蔬菜生产的外界气候指标,对日光温室气候适宜性进行区划,但针对日光温室内小气候适宜度的定量计算尚未见报道。

本文拟应用模糊数学理论,建立黄瓜日光温室内小气候适宜度模型,动态定量评价温室内气温、空气相对湿度、接受到的太阳辐射及其综合小气候对黄瓜生长发育的适宜程度,减少人为的判断,提高气象为设施农业服务的科技含量和信息化水平,丰富农业气象服务的内涵,同时为日光温室智能化管理提供依据。

## 1 资料来源

小气候资料来自于河北省高邑县黄瓜日光温室。日光温室坐北朝南,东西长32.0 m,南北宽9.0 m,脊高3.5 m,后墙和东西墙为土墙,墙体厚1.5 m。日光温室内黄瓜每年种植两茬,秋冬茬和冬春茬,一般在每年的9月开始种植秋冬茬,次年1月拉秧,2月定植冬春茬,6月初拉秧。

日光温室内设立小气候观测站,观测温室内1.5 m高度的气温、空气相对湿度、2.0 m高度接受到的太阳辐射,观测精度分别为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\%$ 和 $\pm 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。每10分钟记录一次数据,存储到存储器中。观测时间从当年10月初至次年5月末,记作一个观测年度,如观测时间从2008年10月至2009年5月,记为2008观测年度。

在小气候观测过程中,平行观测温室内黄瓜的生长发育状况,包括发育期和每天采收的产量等。黄瓜产量的采收以整个日光温室为单位,每天巡查,对于已经达到商品标准的黄瓜果实进行采摘、称重,并记录采收的重量。

## 2 气候适宜度模型的建立

日光温室黄瓜生长发育经历播种、定植、开花、

结果和拉秧等过程,从播种到定植为育苗期,从定植到开花为苗期,从开花到拉秧为花果期。黄瓜每个生育期所需要的气象条件不尽相同。

日光温室内气温( $T$ )、空气相对湿度( $U$ )、太阳辐射( $Q$ )对黄瓜生长发育的影响可以看成不同的模糊集,通过建立不同模糊集的适宜度模型,计算温室内气温、空气相对湿度及接受到的太阳辐射对于黄瓜的适宜程度。

## 2.1 气温适宜度模型

为了定量评价日光温室内气温对黄瓜生长发育的适宜程度,借鉴前人研究成果(郭建平等,2003;马树庆,1994),建立温度适宜度模型:

$$\tilde{T}(t_i) = \begin{cases} 0 & \text{当 } t_i \leq t_l \text{ 或 } t_i \geq t_h \text{ 时} \\ \frac{(t_i - t_l) \times (t_h - t_i)^B}{(t_0 - t_l) \times (t_h - t_0)^B} & \\ \text{其中 } B = \frac{t_h - t_0}{t_0 - t_l}, & (1) \\ \text{当 } t_l < t_i < t_h \text{ 且 } t_i \neq t_0 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } t_i = t_0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$\tilde{T}_{\text{日}} = \left[ \sum_{i=1}^n \tilde{T}(t_i) \right] / n \quad (2)$$

式(1)中, $\tilde{T}(t_i)$ 为日光温室内第*i*时刻的气温对黄瓜生长发育的适宜度, $t_i$ 为日光温室内第*i*时刻的气温(单位:°C), $t_l$ 、 $t_h$ 和 $t_0$ 分别为黄瓜某发育期所需的最低气温、最高气温和适宜气温(安志信等,2005)(表1)。 $\tilde{T}(t_i)$ 是一个在0~1变化的不对称抛物线函数(图1),它反映了温度条件从不适宜到适宜再到不适宜连续变化过程。式(2)中, $\tilde{T}_{\text{日}}$ 为日气温适宜度, $n$ 为一天中日光温室内小气候观测次数。因为小气候观测频次为每10分钟一次,一天144次,所以 $n=144$ 。因为无论白天还是夜间,日光温室内的气温的高低关系着黄瓜是否正常生长发育,所以日气温适宜度的值为全天各时刻气温适宜度的平均值。

表 1 黄瓜各发育期所需的最低气温、最适气温和最高气温值(单位:°C)

Table 1 Cucumber required minimum temperature, the optimum temperature and maximum temperature in each growth stage (unit: °C)

发育期	最低气温	最适气温	最高气温
育苗期	10	25~30	40
苗期	10	25~30	40
花果期	15	22~30	35

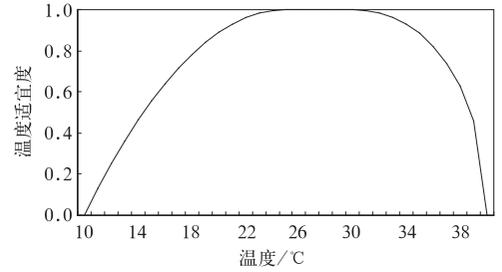


图 1 日光温室黄瓜对温度的反应过程

Fig. 1 Reaction process of greenhouse cucumber to temperature

## 2.2 空气相对湿度适宜度模型

黄瓜喜湿,当空气相对湿度在70%~85%时生长良好,湿度过大会引起多种病害发生(安志信等,1994),湿度过低影响光合作用,黄瓜在25°C的条件下,相对湿度为80%~85%时的光合量比相对湿度为60%时提高10%~15%(安志信等,2005)。建立空气相对湿度适宜度模型:

$$\tilde{U}(u_i) = \begin{cases} 0 & \text{当 } u_i \leq u_l \text{ 或 } u_i \geq u_h \text{ 时} \\ \frac{(u_i - u_l) \times (u_h - u_i)^B}{(u_0 - u_l) \times (u_h - u_0)^B} & \\ \text{其中 } B = \frac{u_h - u_0}{u_0 - u_l}, & \\ \text{当 } u_l < u_i < u_h \text{ 且 } u_i \neq u_0 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } u_i = u_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tilde{U}_{\text{日}} = \left[ \sum_{i=1}^m \tilde{U}(u_i) \right] / m \quad (4)$$

式(3)中, $\tilde{U}(u_i)$ 为日光温室内第*i*时刻的空气相对湿度对黄瓜生长发育的适宜度, $u_i$ 为日光温室内第*i*时刻的空气相对湿度, $u_l$ 、 $u_h$ 和 $u_0$ 分别为黄瓜某发育期所需的空气相对湿度的最低值、最高值和适宜值。根据实际观测,日光温室空气相对湿度一般 $\geq 25\%$ ,最高为100%,所以本文设 $u_l = 25\%$ , $u_h = 100\%$ , $u_0 = 70\% \sim 85\%$ 。当空气相对湿度由低到高变化时,其对黄瓜的适宜度是从0到1再到0的动态变化过程(图2)。式(4)中, $\tilde{U}_{\text{日}}$ 为日光温室日空气相对湿度适宜度, $m$ 为白天日光温室小气候观测次数。因为在日光温室黄瓜生长发育过程中,夜间空气相对湿度一般均为饱和或接近饱和,对黄瓜的影响差别不大,对黄瓜影响的差异主要为白天,所以日空气相对湿度适宜度以白天(08:00—20:00)各时刻适宜度的平均值作为数值,故 $m=72$ 。

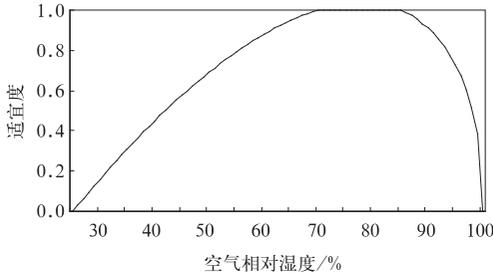


图 2 日光温室黄瓜对空气  
相对湿度的反映过程

Fig. 2 Reaction process of greenhouse  
cucumber to relative humidity

### 2.3 太阳辐射适宜度模型

因为当日光温室内接受到的日最大太阳辐射  $\geq 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 温室内日最高气温有超过 98% 的天数  $\geq 20^\circ\text{C}$ , 该情况下光照相对充足, 光热条件基本能满足黄瓜生长需要; 当接受到的日最大太阳辐射  $< 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 日光温室内的日最高气温超过 96% 的天数  $< 20^\circ\text{C}$  (王荣英等, 2014)。所以本文以太阳辐射达到  $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  为临界点,  $\geq 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  为太阳辐射处于适宜状态。建立太阳辐射适宜度模型:

$$\tilde{Q}(q_i) = \begin{cases} e^{-[(q_i - q_0)/b]^2} & q_i < 250 \\ 1 & q_i \geq 250 \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{Q}_H = \left( \sum_{i=1}^m \tilde{Q}(q_i) \right) / m \quad (6)$$

式(5)中,  $\tilde{Q}(q_i)$  为日光温室接受到的太阳辐射适宜度,  $q_i$  为日光温室内某一时刻接受到的太阳辐射,  $q_0$  和  $b$  为常数, 通过多年观测数据和黄瓜生长发育状况得到, 其取值分别为 250 和 100。当接受到的太阳辐射由低到高变化时, 其对黄瓜的适宜度是从 0 ~ 1 的动态变化过程(图 3)。

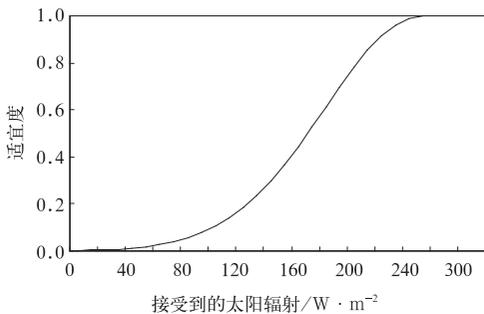


图 3 日光温室黄瓜对接受到的太阳辐射的反应过程

Fig. 3 Reaction process of greenhouse cucumber  
to the received solar radiation

式(6)中,  $\tilde{Q}_H$  为日光温室内接受到的太阳辐射适宜度的日值, 简称日太阳辐射适宜度,  $m$  为白天日光温室内小气候观测次数。因为夜间日光温室内没有太阳辐射进入, 黄瓜植株也不进行光合作用, 所以日太阳辐射适宜度以白天(08:00—20:00)各时刻太阳辐射适宜度的平均值作为数值, 故  $m = 72$ 。

### 2.4 综合小气候适宜度模型

在黄瓜生长发育过程中, 温度、空气相对湿度和接受到的太阳辐射 3 个气象因子相互关联、相互制约、相互影响, 为了综合反映气温、空气相对湿度及太阳辐射 3 因子对黄瓜生长的影响程度, 合理评价温室内小气候对黄瓜生长的适宜动态, 3 个因子用等权重建立综合小气候适宜度模型:

$$S_H = \sqrt[3]{\tilde{T}_H \times \tilde{U}_H \times \tilde{Q}_H} \quad (7)$$

式中  $S_H$  为日光温室内某一天的综合小气候适宜度。

## 3 模型的检验

用 2008 和 2009 年两个观测年度的资料进行检验, 两个观测年度对应的温室外秋、冬、春季的气温距平见表 2, 按照《气候状况公报编写规范》(安月改等, 2010) 计算, 两个观测年度分别代表偏暖年型和偏冷年型。

表 2 日光温室两个观测年度所对应的  
外界季平均气温距平(单位:  $^\circ\text{C}$ )

Table 2 Seasonal mean temperature anomaly corresponding  
to two observations years in greenhouse (unit:  $^\circ\text{C}$ )

观测年度	秋季	冬季	春季
2008	1.0	1.1	0.9
2009	-0.8	-0.7	-1.1

黄瓜是无限生长植物, 黄瓜果实从坐果开始, 经过不断发育, 当达到商品瓜时被采摘, 被采收的黄瓜果实的累积量组成了黄瓜的产量。因为黄瓜产量除与品种特性、肥水管理、土壤质地、栽培管理水平、植株生长势等因素有关外, 还与日光温室内的的小气候有关, 在前者一致的情况下, 黄瓜产量决定于温室内的的小气候条件。温室内小气候条件优越, 则黄瓜产量则高, 反之则低。

因为黄瓜采摘时间受人为因素的影响, 可能每天采摘, 也可能隔一天或几天采摘, 所以产量的统计用 10 d 的平均值, 综合小气候适宜度值亦用与之对应的 10 d 平均值。

用式(1)~(7)计算出两个观测年度日光温室内的综合小气候适宜度值,再计算出黄瓜结瓜期间每 10 d 的平均值,两个观测年度黄瓜产量与对应的综合小气候适宜度的关系见图 4 和图 5。由图 4 和图 5 可见,黄瓜产量随着综合小气候适宜度的增加而增加,2008 观测年度两者的相关系数  $R=0.8672(n=14)$ ,2009 观测年度  $R=0.9211(n=11)$ ,均通过  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验,两者相关显著。说明温室内综合小气候适宜度越高,温室内小气候条件越适宜黄瓜生长发育,其产量越高。同时,也说明所建立的适宜度模型是可靠的。

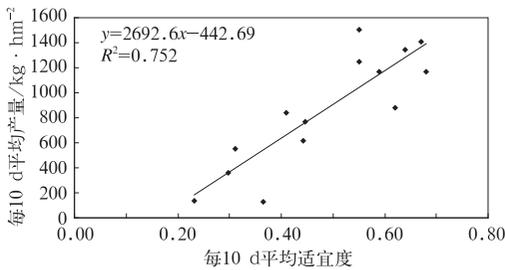


图 4 2008 观测年度日光温室黄瓜产量与综合小气候适宜度的关系

Fig. 4 Relationship between greenhouse cucumber yield and comprehensive microclimate suitability degree in 2008

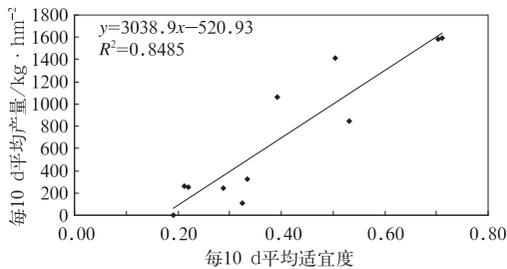


图 5 2009 观测年度日光温室黄瓜产量与综合小气候适宜度的关系

Fig. 5 Relationship between greenhouse cucumber yield and comprehensive micro-climate suitability degree in 2009

## 4 模型的应用

利用式(1)~(7)对种植黄瓜的 2008、2009、2010 和 2012 观测年度高邑县日光温室内的气温、空气相对湿度、接受到的太阳辐射及综合小气候对黄瓜的适宜度进行计算,结果为逐日的气温适宜度最小值为 0,最大值为 0.99;空气相对湿度适宜度最小值为 0,最大值为 0.99;接受到的太阳辐射适宜度最小值为 0,最大值为 0.76;综合小气候适宜度最小值为 0,最大值为 0.87。为了便于分析和应用,将适宜度划分为适宜、次适宜、不适宜 3 个等级,按照最优分割法,如果将  $[0,1]$  分三段,节点分别为 0.3、0.7,按照比例,同时结合不同适宜度等级下黄瓜实际生长发育状况,3 个等级划分如下:

气温适宜度和湿度适宜度:  $\geq 0.7$  为适宜,  $[0.3, 0.7)$  为次适宜,  $< 0.3$  为不适宜;

辐射适宜度:  $\geq 0.5$  为适宜,  $[0.2, 0.5)$  为次适宜,  $< 0.2$  为不适宜;

综合适宜度:  $\geq 0.6$  为适宜,  $[0.3, 0.6)$  为次适宜,  $< 0.3$  为不适宜。

同时为了便于比较,将逐日的适宜度值处理成逐旬值,即旬适宜度,并将 4 个观测年度截取相同的时间,时间从当年的 10 月中旬至次年的 5 月下旬。

### 4.1 气温适宜度

#### 4.1.1 气温适宜度不同等级所占的比例

表 3 为 4 个观测年度每月逐日气温适宜度处于“适宜”、“次适宜”、“不适宜”等级的日数比例。由表 3 可见,气温适宜度为“适宜”等级的在 5 月所占比例最高,为 45%,其次是 10、3 和 4 月,占 30%~40%,11、12 和 1 月所占比例最低,在 5%以内;“不适宜”等级在 1 月所占比例最高,达 67%,其次是 12 月,占 60%,在 10 月和 3—5 月所占比例最低,在 10%以内。可见当地日光温室内的气温对黄瓜生长发育最适宜的是 5 月,其次是 10、3 和 4 月,1 月最不适宜。

表 3 每月逐日气温适宜度不同等级出现的日数的百分比(单位:%)

Table 3 Corresponding percentage of days at different levels of daily temperature suitability every month (unit:%)

适宜度等级	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
适宜	40	5	4	2	19	36	30	45
次适宜	53	71	36	31	57	60	65	52
不适宜	7	24	60	67	24	4	5	3

### 4.1.2 不同年度气温适宜度随时间的变化

图 6 是不同观测年度气温适宜度的旬值随时间变化情况。由图 6 可见,4 个观测年度气温适宜度的旬值在同一时间其值有一定的差异,有时差异较

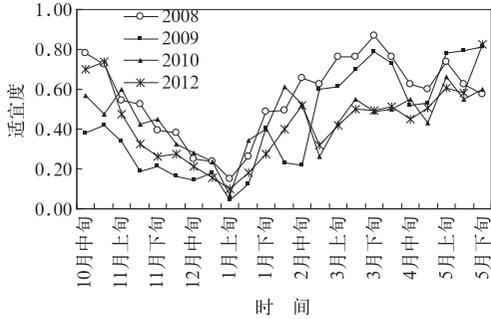


图 6 黄瓜不同观测年度气温适宜度旬值随时间的变化情况

Fig. 6 Dekad temperature suitability degree value of cucumber varying with time in different observation years

小,有时差异较大,但变化趋势是一致的,整个观测年度均呈不对称不规则的“V”字形,即从 10 月中旬至 1 月上旬其值均在波动中呈下降趋势,1 月上旬其值达到最低,从 1 月上旬至 5 月下旬,其值在波动中呈上升趋势。

## 4.2 空气相对湿度适宜度

### 4.2.1 空气相对湿度适宜度不同等级所占的比例

表 4 为 4 个观测年度每月逐日空气相对湿度适宜度处于“适宜”、“次适宜”和“不适宜”等级的日数比例。由表 4 可见,空气相对湿度适宜度为“适宜”等级的在 5 月所占比例最高为 79%,其次是 4、3 和 10 月,11 月所占比例最低,为 13%;在“不适宜”等级中,在 1 和 2 月所占比例最高,分别为 33% 和 37%,其次是在 12 月,为 21%,在 10、11 和 3—5 月所占比例最低,在 10% 以内。可见当地日光温室内的空气相对湿度对黄瓜生长发育最适宜的是 5 月,其次是 4、3 和 10 月,12 月至次年 2 月最不适宜。

表 4 每月逐日空气相对湿度适宜度不同等级出现日数的百分比(单位:%)

Table 4 Corresponding percentage of days at different levels of daily relative humidity suitability every month (unit:%)

适宜度等级	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
适宜	33	13	31	22	19	47	53	79
次适宜	62	52	48	45	45	48	43	17
不适宜	5	8	21	33	37	6	4	4

### 4.2.2 不同年度空气相对湿度适宜度随时间的变化

图 7 是不同观测年度空气相对湿度适宜度的旬值随时间的变化情况。由图 7 可见,4 个观测年度空气相对湿度适宜度的旬值在不同年度存在一定差异,差异大小不一,同一年度间秋季和春季适宜度较

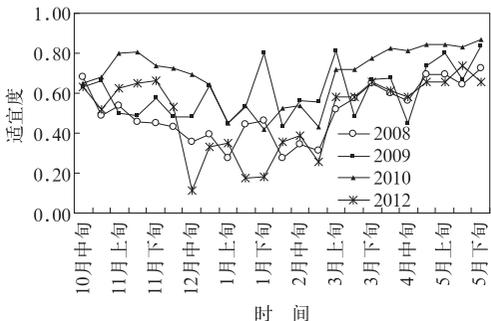


图 7 黄瓜不同观测年度空气相对湿度适宜度的旬值随时间变化情况

Fig. 7 Dekad relative humidity suitability degree value of cucumber varying with time in different observation years

高,冬季适宜度较低,整个观测年度变化趋势也均呈不规则“V”字形。

## 4.3 接受到的太阳辐射适宜度

### 4.3.1 接受到的太阳辐射适宜度不同等级所占的比例

表 5 为 4 个观测年度每月逐日接受到的太阳辐射适宜度处于“适宜”、“次适宜”和“不适宜”等级的日数比例。由表 5 可见,接受到的太阳辐射适宜度为“适宜”等级的在 4 和 5 月所占比例最高,在 80% 以上,其次是 3 和 10 月,11 月至次年 2 月所占比例较低,在 20% 以内;“不适宜”等级在 12 月至次年 2 月所占比例最高,占 28%~39%,3—5 月所占比例最低,在 10% 以内。可见当地日光温室内的接受到的太阳辐射对黄瓜生长发育最适宜的是 4 和 5 月,其次是 3 和 10 月,12 月至次年 2 月最不适宜。

表 5 每月逐日接受到的太阳辐射适宜度不同等级出现日数的百分比(单位:%)

Table 5 Corresponding percentage of days at different levels of daily solar radiation received suitability every month (unit:%)

适宜度等级	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
适宜	46	11	4	12	19	69	84	80
次适宜	40	69	68	56	42	26	12	11
不适宜	13	20	28	32	39	6	4	9

#### 4.3.2 不同年度接受到的太阳辐射适宜度随时间的变化

图 8 是不同观测年度接受到的太阳辐射适宜度的旬值随时间的变化情况。由图 8 可见, 4 个观

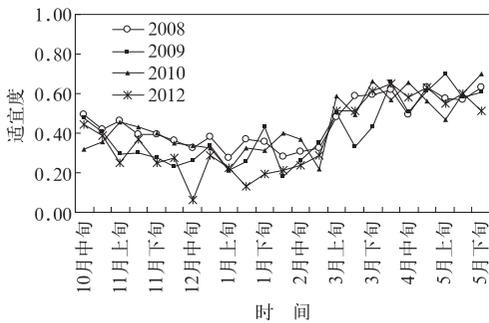


图 8 黄瓜不同观测年度接受到的太阳辐射适宜度的旬值随时间变化情况

Fig. 8 Received dekad solar radiation suitability degree value of cucumber varying with time in different observation years

表 6 每月逐日综合小气候适宜度不同等级出现日数的百分比(单位:%)

Table 6 Corresponding percentage of days at different daily comprehensive microclimate suitability every month (unit:%)

适宜度等级	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
适宜	27	5	5	5	17	41	60	77
次适宜	61	77	60	44	38	55	36	18
不适宜	12	18	35	52	45	4	4	5

#### 4.4.2 不同年度综合小气候适宜度随时间的变化

图 9 是不同观测年度综合小气候适宜度的旬值随时间变化的情况。由图 9 可见, 4 个观测年度综合小气候适宜度的旬值均呈不规则“V”字形, 从 10 月中旬至 1 月上旬呈下降趋势, 最低值一般出现在 1 月上旬, 其后到 5 月下旬呈上升趋势, 尤其从 2 月下旬至 3 月上旬上升趋势明显。

#### 4.4.3 产量与综合小气候适宜度的关系

高邑县日光温室黄瓜秋冬茬产量采收时间主要在 11 月至次年 1 月; 冬春茬产量采收时间主要在 3 月至次年 5 月。为了进一步说明黄瓜产量与日光温室小气候的关系, 将结瓜期间的黄瓜产量按月进

测年度辐射适宜度的旬值在不同年度存在一定差异, 但变化趋势是一致的, 整个观测年度均呈不规则“V”字形, 从 10 月中旬至 12 月中旬, 其值在波动中呈下降趋势, 12 月下旬至 2 月下旬, 升降趋势不明显, 从 3 月上旬开始其值明显升高, 一直到 5 月下旬, 其值变化比较稳定且比较高。

### 4.4 综合小气候适宜度

#### 4.4.1 综合小气候适宜度不同等级的比例

表 6 为 4 个观测年度每月逐日综合小气候适宜度处于“适宜”、“次适宜”和“不适宜”等级的日数比例。由表 6 可见, 综合小气候适宜度为“适宜”等级的在 5 月所占比例最高, 为 77%, 其次是 4 月, 占 60%, 在 11、12 和 1 月所占比例最低, 均为 5%; “不适宜”等级在 1 月所占比例最高, 占 52%, 在 3、4 和 5 月最低, 均为  $\leq 5\%$ 。可见当地日光温室综合小气候对黄瓜生长发育最适宜的是 5 月, 其次是 4、3 和 10 月, 最不适宜的是 1 月。

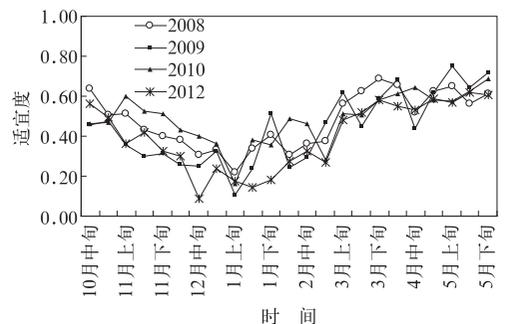


图 9 黄瓜不同观测年度综合小气候适宜度的旬值随时间变化情况

Fig. 9 Dekad comprehensive microclimate suitability degree value of cucumber varying with time in different observation years

行统计平均,并分别计算对应月的平均综合小气候适宜度,月平均产量和月平均综合小气候适宜度均

为4年的平均(表7)。

表7 日光温室黄瓜不同月份的平均产量与综合小气候适宜度值  
Table 7 Greenhouse cucumber average yield in different month of growth and comprehensive microclimate suitability degree

	11月	12月	1月	3月	4月	5月
月平均综合小气候适宜度	0.42	0.31	0.27	0.56	0.59	0.64
月平均产量/kg·hm <sup>-2</sup>	1032.37	739.80	550.04	1182.22	1399.90	1413.40

由表7可见,从11月至1月,温室内综合小气候适宜度值逐渐减小,每月平均产量也随着综合适宜度的减小而降低;3—5月,综合小气候适宜度值逐渐增大,每月平均产量随着综合适宜度的增大而增加。可见黄瓜产量与温室内小气候关系显著,同时当地日光温室蔬菜选择两个茬口种植,当温室内小气候适宜度最差时,前茬处于拉秧期,减少了小气候不适宜对产量的影响。

## 5 结论与讨论

(1)本文根据实际观测资料并结合前人研究成果建立了日光温室内气温、空气相对湿度、接受到的太阳辐射及其综合小气候对黄瓜生长发育的适宜度模型,并运用黄瓜实际产量与适宜度的关系对模型进行了检验。通过检验,得出黄瓜产量随综合小气候适宜度的增加而增加,两者相关显著,说明所建模型用于分析温室内小气候对黄瓜的适宜程度是可靠的。

(2)应用模型对4个不同观测年度黄瓜日光温室内小气候适宜度进行计算,得出日气温适宜度和日空气相对湿度适宜度最小值均为0,最大值均为0.99,日太阳辐射适宜度最小值为0,最大值为0.76,综合小气候适宜度最小值为0,最大值0.87。因为一年四季太阳光照射日光温室的时间长短不一,但为了与气象上定义的“白天”一致,在计算日太阳辐射适宜度时均截止至20时,而即使在春季,19时以后温室内也难以接受到太阳辐射,在冬季白天太阳光照射时间更短,同时在太阳落山前温室外要加盖草苫子等覆盖物,更缩短了温室接受太阳辐射的时间,所以致使计算出的日太阳辐射适宜度最大值较气温和空气相对湿度的适宜度小。

(3)本文根据实际观测,确定当日光温室内空气相对湿度分别为25%和100%时对黄瓜生长发育的

适宜度为0,当日光温室内接受到的日最大太阳辐射 $\geq 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,对黄瓜的适宜度为1。虽然湿度过大或过小均不利于植株进行光合作用积累有机物质,但当温室内空气相对湿度在25%以下或在100%时,可能不会即刻造成黄瓜植株死亡。另外,如果日最大太阳辐射值过大有可能引起植株短时间停止光合作用,所以温室内空气相对湿度和接受到的太阳辐射对黄瓜植株不适宜或最适宜的界限值有待收集更多实际观测数据并进一步深入探讨。

(4)按照日适宜度值的大小,将适宜度划分为“适宜”、“次适宜”和“不适宜”3个等级,在不同的月份3个等级的适宜度所占的比例是不同的,但存在一定的规律,温室内的气温对黄瓜生长发育最适宜的是5月,其次是10、3和4月,1月最不适宜;空气相对湿度对黄瓜生长发育最适宜的是5月,其次是4、3和10月,12月至次年2月不适宜;太阳辐射对黄瓜生长发育最适宜的是4和5月,其次是3和10月,12月至次年2月不适宜;综合小气候对黄瓜生长发育最适宜的是5月,其次是4、3和10月,最不适宜的是1月。不论是气温适宜度、空气相对湿度适宜度、接受到的太阳辐射适宜度,还是综合小气候适宜度,在整个观测年度,其值的变化均呈不规则“V”字形,即春季适宜度最高,其次是秋季,冬季最低。说明当地温室内小气候条件在春季和秋季比较适宜黄瓜生长发育,在冬季尤其在1月最不适宜,这与当地实际情况是一致的,因为冬季外界温度低、日照少,致使温室内小气候条件较差。

(5)本文仅考虑了影响日光温室黄瓜生长发育的主要小气候因子温度、空气相对湿度和太阳辐射,因为黄瓜生长发育还受其他因素的影响,有条件的可适当加以考虑。虽然各地建立了不少日光温室小气候观测站,但获取其他站点不同年度的、连续的、同种类蔬菜的日光温室内观测资料的共享仍有一定的难度,所以本文仅用一个站的资料对所建模型进

行检验和应用,但为他人提供了一定的技术方法,今后可以在更大范围进行应用。日光温室种植的蔬菜种类较多,有叶菜类和果菜类等,不同的蔬菜需要的气象条件不同,同一种类蔬菜不同品种之间也有差异,在今后应用中蔬菜所需指标应根据具体情况而定。

## 参考文献

- 安月改,刘学峰,于长文,等. 2010. 气候状况公报编写规范. DB13/T 1270-2010.
- 安志信,刘文明. 2005. 设施蔬菜主要生理障碍(上). 农村实用工程技术(温室园艺), (6):42-43.
- 安志信,张福嫒,陈瑞生,等. 1994. 蔬菜节能日光温室的建造及栽培技术. 天津:天津科学技术出版社,55-57.
- 郭建平,田志会,张涓涓. 2003. 东北地区玉米热量指数的预测模型研究. 应用气象学报,14(5):626-633.
- 李德,张学贤,刘瑞娜. 2012. 冬小麦冬季干旱时段灌溉气象适宜指数研究. 气象,38(12):1565-1571.
- 李美荣,刘映宁,赵军,等. 2007. 陕西省关中地区大棚蔬菜低温冻害预报服务方法. 干旱地区农业研究,25(5):204-207.
- 李宁,申双和,黎贞发,等. 2013. 基于主成分回归的日光温室内低温预测模型. 中国农业气象,34(3):306-311.
- 刘霞,张茹吉,李玉奇,等. 2012. 基于气候数据的蔬菜适宜栽培季节判别模型建立及应用. 中国农学通报,28(4):230-235.
- 柳芳,王铁,刘淑梅. 2009. 天津市二代节能型日光温室内部温湿度预测模型. 中国农业气象,30(增1):86-89.
- 黎贞发,王铁,宫志宏,等. 2013. 基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用. 农业工程学报,29(4):229-236.
- 罗蒋梅,王建林,申双和,等. 2009. 影响冬小麦产量的气象要素定量评价模型. 南京气象学院学报,32(1):94-99.
- 马树庆. 1994. 吉林省农业气候研究. 北京:气象出版社,33.
- 马树庆,陈剑,王琪,等. 2013. 东北地区玉米整地、播种和收获气象适宜度评价模型. 气象,39(6):782-788.
- 彭晓丹,杨再强,柳笛,等. 2013. 温室黄瓜低温气象灾害指标. 气象科技,41(2):394-399.
- 宋迎波,王建林,李昊宇,等. 2013. 冬小麦气候适宜诊断指标确定方法探讨. 气象,39(6):768-773.
- 魏瑞江,康西言,姚树然,等. 2009a. 低温寡照天气形势及温室蔬菜致灾环境. 气象科技,37(1):64-66.
- 魏瑞江,李春强,康西言. 2008. 河北省日光温室低温寡照灾害风险分析. 自然灾害学报, (3):56-62.
- 魏瑞江,宋迎波,王鑫. 2009b. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法. 应用气象学报,20(5):622-627.
- 魏瑞江,王春乙,范增禄. 2010. 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. 气象,36(1):97-103.
- 魏瑞江,张文宗,康西言,等. 2007. 河北省冬小麦气候适宜度动态模型的建立及应用. 干旱地区农业研究,25(6):5-9,15.
- 王荣英,魏瑞江,王鑫,等. 2014. 不同年型下日光温室内小气候差异. 中国农学通报,30(8):244-249.
- 王鑫,魏瑞江,康西言. 2010. 日光温室湿度日预测的季节时序模型应用研究. 中国农学通报,26(22):407-412.
- 许莹,马晓群,王晓东,等. 2014. 安徽省冬小麦春霜冻害气象指标的研究. 气象,40(7):852-859.
- 薛晓萍,李鸿怡,李楠,等. 2012. 日光温室小气候预报技术研究. 中国农学通报,28(29):195-202.
- 薛晓萍,李楠,杨再强. 2013. 日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究. 灾害学,28(3):61-65.
- 杨再强,张婷华,黄海静,等. 2013. 北方地区日光温室气象灾害风险评估. 中国农业气象,34(3):342-349.
- 易雪,王建林,宋迎波. 2010. 气候适宜度指数在早稻产量动态预报上的应用. 气象,36(6):85-89.
- 张建军,马晓群,许莹. 2013. 安徽省一季稻生长气候适宜性评价指标的建立与试用. 气象,39(1):88-93.
- 张明洁,赵艳霞. 2013. 北方地区日光温室气候适宜性区划方法. 应用气象学报,24(3):278-286.
- 钟新科,刘洛,宋春桥,等. 2012. 基于气候适宜度评价的湖南春玉米优播期分析. 中国农业气象,33(1):78-85.
- 朱津辉,郭建茂,毛留喜. 2014. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究. 气象,40(11):1398-1407.