

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候的关系[J]. 气象,2010,36(1):97-103.

石家庄地区日光温室冬季小气候特征 及其与大气候的关系^{* 1}

魏瑞江^{1,2,3} 王春乙⁴ 范增禄⁵

- 1 兰州大学大气科学学院,兰州 730000
- 2 河北省气象科学研究所,石家庄 050021
- 3 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021
- 4 中国气象科学研究院,北京 100081
- 5 河北省气候中心,石家庄 050021

提 要: 根据 2006—2007 年、2008—2009 年冬季日光温室内小气候和附近气象站观测资料,利用相关和逐步回归分析,对不同天气状况下石家庄地区日光温室冬季小气候特征及其与外界的关系进行了研究。结果表明,晴天和少云-多云天气下日光温室内的气温、空气相对湿度、接受到的最大太阳辐射有明显的日变化;连续寡照时,室内全天气温低,空气湿度大,不利于蔬菜正常生长发育。影响日光温室内小气候的主要因子有外界的日照时数、平均气温、最低气温、最高气温、空气湿度、云量以及温室内前一天的最高气温等。建立了日光温室内外气象要素的相关模型,经拟合检验和应用检验,不同天气状况下日光温室内日最低气温、最高气温、空气最小相对湿度、接受到的最大太阳辐射的平均绝对误差分别在 1.1℃、2.5℃、5.8%、58.3 W·m⁻² 以内,平均相对误差大部分在 10% 以内,具有较高的精度。

关键词: 日光温室, 冬季小气候, 变化特征, 相关模型

Microclimate Characteristics Under Plastic Sunlight Greenhouse and Relationship with Macroclimate in Shijiazhuang Region in Winter

WEI Ruijiang^{1,2,3} WANG Chunyi⁴ FAN Zenglu⁵

- 1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000
- 2 Hebei Provincial Institute of Meteorology, Shijiazhuang 050021
- 3 Hebei Provincial Meteorological and Eco-environmental Key Laboratory, Shijiazhuang 050021
- 4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
- 5 Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021

Abstract: Based on the observed data of plastic sunlight greenhouse microclimate and neighbouring weather stations during the two winter periods following as 2006—2007 and 2008—2009, using the method of related statistical analysis, the characters of plastic sunlight greenhouse microclimate and the relationship between the microclimate and outside weather conditions in Shijiazhuang area during the winter are studied. The result indicated that the microclimatic factors have obvious diurnal variations under these weather conditions such as sunny day, slight cloud-cloudy day. Persistent sunless days can result in lower temperature and higher air humidity inside greenhouse, which could be harmful to the normal growth of cucumber. The main factors affecting the microclimate were as follows, sunshine hours, average temperature, lowest temperature, highest temperature, air humidity, cloudage outside and the yesterday's highest temperature in-

^{*} 本文得到科技部农业科技成果转化项目(2006GB24160427 和 2008GB24160441)支持
2008 年 9 月 10 日收稿; 2009 年 10 月 9 日收修定稿
第一作者:魏瑞江,主要从事农业气象业务和科研工作. Email:hbkyj@163.com

side. The correlation model of weather factors inside and outside the plastic sunlight greenhouse has been set up, which has high accuracy verified by historical data and application. The model's accuracies of lowest temperature, highest temperature, air relative humidity, and largest solar radiation under different weather conditions are within $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6% and $58.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Most of the average relative errors are below 10 percent.

Key words: greenhouse, microclimate in winter, variation characteristics, correlation model

引 言

日光温室蔬菜生长发育离不开光、温、湿等小气候条件,而以太阳能为热量来源的日光温室内的微气候在很大程度上受外界天气条件的影响。外界天气晴朗,室内接收到的太阳辐射就多,温度就高,空气相对湿度就低。日光温室内的微气候及其与外界气象条件关系的研究较多,如李军、金志凤、赵鸿、孙智辉等分别对上海玻璃温室、浙江连栋塑料大棚、黄土高原日光温室内的温度、湿度的变化特征进行分析^[1-4];吴元中等找出了上海三连栋大棚及大型玻璃自控温室内温度的影响因子,并建立了定量相关模型^[5];李军等建立了上海四连栋塑料温室内外温湿度的相关模型^[6];魏瑞江等建立了阴天状况下河北日光温室内的气温与外界同时次气温的关系模型^[7];刘可群等建立了武汉大棚内温度与太阳高度角及大气温度的相关模型^[8];张永红等应用边界理论探讨了设施农业与气象的关系^[9]。这些研究为温室蔬菜生产管理提供了理论依据。但目前温室(或大棚)内微气候与外界大气候的定量相关模型中以温度模型居多,湿度、太阳辐射相关模型较少,或是所建立的相关模型中多是温室(或大棚)内温度(或湿度)与外界温度(或湿度)之间单因子的相关模型,而温室(或大棚)内微气候与外界温度、湿度、天空状况、风速等多因素有关^[10]。

本文根据 2006—2007 年、2008—2009 年冬季日光温室内的微气候和附近气象站观测资料,利用相关和逐步回归分析,对不同天气状况下冬季石家庄地区日光温室内的温度、湿度和接受到的太阳辐射等微气候特征及其与室外日照、温度、湿度、风速、云量等气象要素的关系进行研究,以期有关部门和广大农民减灾增效提供依据。

1 材料与方法

小气候资料来源于日光温室内的观测。观测点

设在河北省高邑县黄瓜日光温室,黄瓜种植两茬,第一茬从 10 月到 1 月,第二茬从 2 月到 6 月,种植品种为 96-6。由于黄瓜是喜温喜湿植物,所以浇水次数较多,晴天时一般 10 天左右浇一次,寡照天气时间间隔时间较长。

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,后墙高 2.8 m,后墙和东西墙为土墙,墙体厚 1.5 m,前面为单面弧状,覆盖厚度为 0.08 mm 的聚乙烯塑料薄膜,薄膜外面有草帘,每天日出后揭开,日落后盖上。温室顶部设有通风口,通风口的开启视温室内的温度而定,当温室内温度过高时开启,开启时间一般为 11:00—15:00。

小气候观测仪设在日光温室内的中间位置。观测仪包括 AR5 型数据采集器、AV-10TH 型空气温湿度传感器(放置在小百叶箱内)、AV-20P 型太阳总辐射传感器。空气温度、相对湿度、太阳总辐射的观测精度分别为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\%$ 和 $\pm 3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。空气温度观测设 0.5 m、1.5 m 两个高度,空气相对湿度观测设 1.5 m 一个高度,太阳辐射观测设 2.0 m 一个高度。每 10 分钟采集一次数据,自动存储在采集器中,人为定期导入笔记本电脑,从温室取回数据。观测时间为 2006—2007 年冬季和 2008—2009 年冬季。

室外气象数据来源于距观测点 3 km 的高邑县气象站。

为了分析和预报不同天气状况下日光温室内的微气候,按照气象上按日照量别分类的分类标准,即日照百分率 $S\geq 60\%$ 、 $20\%<S<60\%$ 、 $0\leq S\leq 20\%$ 分别为晴天、少云-多云和寡照天气^[8],相应划分观测资料,并进行统计。用 2006 年 12 月 13 日至 2007 年 2 月 28 日的资料统计分析建立模型(观测时间从 12 月 13 日开始),用 2008 年 12 月 1 日至 2009 年 2 月 28 日的资料进行应用检验。

从日光温室每日的微气候观测数据中挑选出气温的日最高值、最低值,空气相对湿度的最小值,接受到的太阳辐射的最大值,分别作为当天日光温室

内的最高气温、最低气温、最小相对湿度、最大太阳辐射。采用相关分析法,计算外界当天和前一天的气象条件与温室内各要素的相关性。选取通过0.05水平显著性检验的气象条件为入选因子,应用逐步回归分析方法,建立回归模型^[11],并进行检验。

2 结果与分析

2.1 冬季日光温室内小气候变化特征

2.1.1 冬季日光温室内温度变化特征

图 1 是季内晴天时日光温室内气温变化曲线。可见,日光温室内气温有明显的日变化,白天升高,夜间下降,日最高气温一般在 30℃以上,有时能达到 35~40℃,甚至 40℃以上,这可能是放风不及时或通风口开启不够大所致;日最低气温 2 月 10 日以前一般在 15℃以下,有时在 10℃以下,2 月 10 日以后一般在 15℃以上,因为此时外界气温也不断回升,温室内散失的热量相对减少。

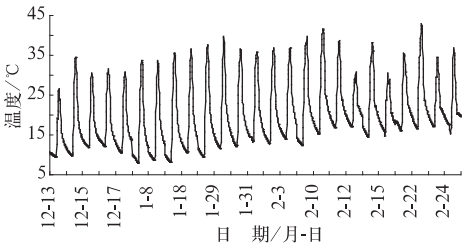


图 1 晴天时日光温室内气温变化曲线
(2006—2007 年冬季,高邑)
ig.1 The air temperature change inside the
sunlight greenhouse in the sunny days
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

少云-多云天气时,日光温室内气温也有明显的日变化,只是日最高气温低于晴天时的值,12 月和 1 月一般在 25~30℃,2 月一般在 30~35℃;日最低气温的变化与晴天时相似,12 月和 1 月较低,一般在 10℃以下,2 月有所回升,在 15℃左右(图略)。

寡照天气时,如果不是连续寡照,同时外界日照时数不为零时,温室内日最高气温一般能上升到 25~30℃,满足黄瓜生长发育的需求;如果连续寡照 3~4 天,室内最高气温就会下降到 20℃左右;连续寡照持续时间越长,室内温度越低,仅在 10℃左右。试验期间的 2006 年 12 月 23 日至 2007 年 1 月 4 日出现了连续 13 天的寡照天气,温室内气温呈下降趋势,期间日最高气温仅 17.9℃,日最低气温仅 7.5℃,给黄瓜生长带来很大影响(见图 2)。

图 3 是不同天气下日光温室内气温日变化对比,可以看出,同一时次的气温值,晴天>少云-多云天气>寡照天气,并且三种天气状况下白天气温差值大于夜间,日最高值出现时差值最大。

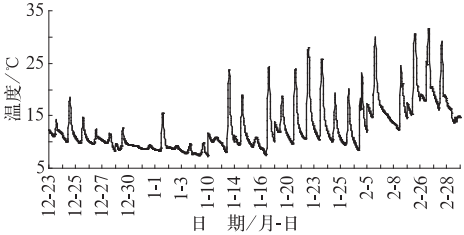


图 2 寡照天气时日光温室内气温变化曲线
(2006—2007 年冬季,高邑)
Fig.2 The air temperature change inside the
sunlight greenhouse in the sunless days
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

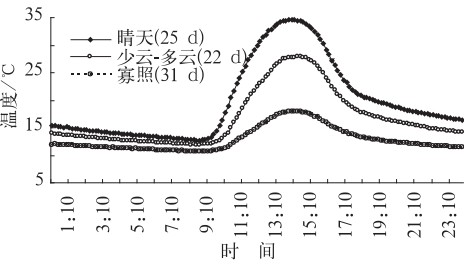


图 3 不同天气状况下日光温室内温度对比
(2006—2007 年冬季,高邑)
Fig.3 The contrast of air temperature
inside the sunlight greenhouse under
different weather conditions
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

2.1.2 冬季日光温室内湿度变化特征

晴天时日光温室内空气相对湿度有明显的日变化,白天下降,最小值一般在 50%左右,夜间升高,最大值在 95%左右。从 12 月到 2 月,日最大相对湿度呈下降趋势,而日最小相对湿度没有明显的变化趋势(见图 4)。

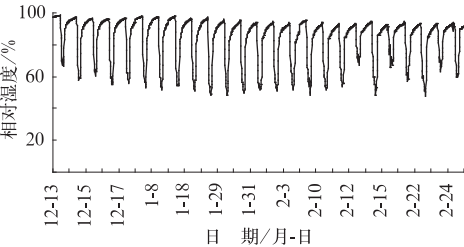


图 4 晴天时日光温室内空气
相对湿度变化曲线
(2006—2007 年冬季,高邑)

Fig.4 The change of air relative humidity
inside the sunlight greenhouse in sunny days
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

少云-多云天气时,日光温室内空气相对湿度的变化趋势与晴天时相似,只是最小值一般在 60%左右,最大值在 90%~100%之间。

寡照天气时,如果连续寡照,温室内空气相对湿度几乎全天处于饱和状态,如果不是连续寡照,白天空气相对湿度有所下降,最小值在 60%~70%,夜间又回升到 95%左右(见图 5)。

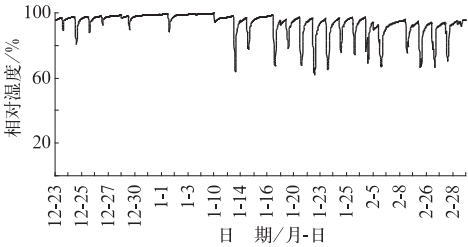


图 5 寡照天气时光温室内空气相对湿度变化
(2006—2007 年冬季,高邑)

Fig. 5 As in Fig. 4, but for sunless days

图 6 是不同天气下日光温室内空气相对湿度对比。由图 6 可见,从 18:10 到 10:10 三种天气下温室内空气相对湿度均较高且差异很小,其他时间同一时次的数值晴天<少云-多云天气<寡照天气,并且三者均在午后达到最小值。

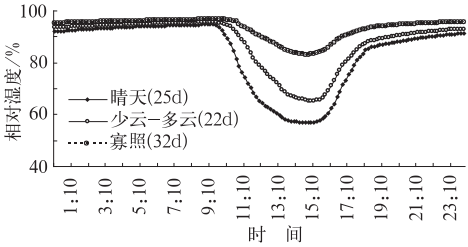


图 6 不同天气状况下日光温室内相对湿度对比
Fig. 6 The contrast of air relative humidity inside the sunlit greenhouse under different weather conditions
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

2.1.3 冬季日光温室内太阳辐射变化特征

晴天时,日光温室内接受到的太阳辐射也有明显的日变化,见图 7。当揭开草帘后,日光温室内接受到的太阳辐射开始增加,到中午前后达到最大,最大值一般为 $290\sim520\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,其后逐渐下降,当盖上草帘后,接受到的太阳辐射为零。

少云-多云时日光温室内接受到的太阳辐射的变化趋势与晴天时差异不大,只是最大值较低,一般在 $220\sim400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

寡照时日光温室内接受到的太阳辐射最大值一般在 $0\sim300\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,当不揭开草帘时,接受到的太阳辐射为零。

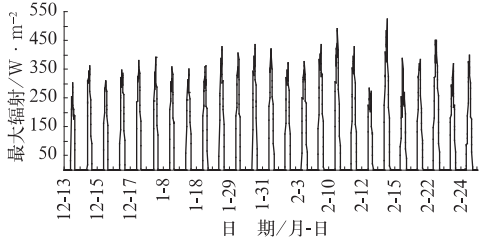


图 7 晴天时光温室内接受到的太阳辐射变化
(2006—2007 年冬季,高邑)

Fig. 7 The change of solar radiation received by the sunlit greenhouse in sunny days
(winter 2006—2007, Gaoyi area)

2.2 日光温室内冬季小气候与外界的关系

2.2.1 相关性分析

日光温室是一个相对封闭的系统,但它又与外界进行着热量交换。日光温室内的热量来自太阳辐射,太阳辐射以短波辐射的形式透入日光温室内,被室内的地面、墙体、骨架、后屋面、植物体、空气等吸收,转化成热能,并通过长波辐射传导和对流的方式进行交换散发热量,散发热量可能与外界的温度、湿度、云量、风速以及日光温室内的基础温度等有关。

经过对日光温室内的日最高气温、最低气温、空气最小相对湿度、接受到的最大太阳辐射分别与外界当天和前一天的日最低气温、最高气温、平均气温、最小相对湿度、平均相对湿度、平均总云量、平均低云量、最大风速、平均风速以及前一天温室内日最高气温的相关统计分析,得出其相关程度是不同的,相关系数见表 1。

2.2.2 相关模型的建立

以通过 0.05 显著性水平检验的因子为自变量,分别建立日光温室内日最高气温、最低气温、空气最小相对湿度、接受到的最大太阳辐射等小气候与外界气象要素的相关模型,模型均通过了 0.01 的显著性水平检验(见表 2)。

由表 2 可见,晴天时光温室内日最低气温、最高气温、空气最小相对湿度、最大太阳辐射均与日照时数有关,除此之外还与室外当天平均气温、最低气温、最高气温、总云量、空气相对湿度以及温室内、外前一天的最高气温中某一项或两项或三项要素有

表 1 日光温室内小气候与外界气象要素的相关系数

外界气象要素		日光温室内小气候											
		晴天($n=25$)						少云—多云($n=22$)					
		$T_{\text{内max0}}$	$T_{\text{内min0}}$	$U_{\text{内min0}}$	$Q_{\text{内max0}}$	$T_{\text{内max0}}$	$T_{\text{内min0}}$	$U_{\text{内min0}}$	$Q_{\text{内max0}}$	$T_{\text{内max0}}$	$T_{\text{内min0}}$	$U_{\text{内min0}}$	$Q_{\text{内max0}}$
当天	$S_{\text{外0}}$	0.4478 *	0.4821 *	−0.2515	0.6117 ***	0.4263 *	0.2584	−0.4211	0.5214 *	0.0984	−0.2057	−0.1329	0.1761
	$T_{\text{外max0}}$	0.5223 **	0.4517 *	−0.1022	0.1207	0.8316 ***	0.7656 ***	−0.3322	0.6075 **	0.8288 ***	0.8647 ***	−0.6424 ***	0.6273 ***
	$T_{\text{外min0}}$	0.2747	0.6810 ***	0.1830	0.1195	0.7026 ***	0.9061 ***	0.0726	0.4736 *	0.3771 *	0.8526 ***	−0.1107	0.1233
	$T_{\text{外avg0}}$	0.4313 *	0.7090 ***	0.0790	0.1597	0.8229 ***	0.8944 ***	−0.1086	0.5935 **	0.6413 ***	0.9195 ***	−0.4044 *	0.4177 *
	$U_{\text{外min0}}$	−0.2827	0.3649	0.6897 ***	−0.3974 *	−0.0553	0.0187	0.1297	−0.2585	−0.6401 ***	−0.1705	0.7336 ***	−0.6397 ***
	$U_{\text{外avg0}}$	−0.2316	0.2006	0.5482 **	−0.4014 *	−0.0579	−0.0489	0.2739	−0.1997	−0.5954 ***	−0.2115	0.6779 ***	−0.6064 ***
	$N_{\text{外avg0}}$	−0.2280	0.5867 **	0.6720 ***	−0.2698	0.4501 *	0.6326 **	0.2470	0.3081	−0.3897 *	0.1458	0.4511 *	−0.4525 *
	$L_{\text{外avg0}}$	− − − −	− − − −	− − − −	− − − −	−0.3579	−0.4718 *	0.3704	−0.0671	−0.3903 *	−0.3625 *	0.3758 *	−0.3624 *
	$F_{\text{外avg0}}$	−0.2354	−0.1639	−0.0403	−0.0246	0.1463	0.1933	0.1669	0.2408	0.0358	0.4611 **	0.1036	−0.0836
	$F_{\text{外max0}}$	0.1430	−0.1715	−0.4029 *	0.3468	0.1280	0.1345	0.1447	0.1513	−0.0003	0.4372 *	0.1516	−0.1880
前一天	$S_{\text{外-1}}$	0.0126	0.1861	−0.0195	0.0507	0.3506	0.4788	−0.1294	0.2157	−0.1606	−0.1249	0.1174	−0.0160
	$T_{\text{外max-1}}$	0.4918 *	0.6324 ***	−0.0636	0.1776	0.6030 **	0.7535 ***	0.0755	0.3973	0.5974 **	0.8297 ***	−0.4039 *	0.3793 *
	$T_{\text{外min-1}}$	0.1586	0.5900 **	0.2255	0.3662	0.7033 ***	0.8308 ***	0.0791	0.5717 **	0.2656	0.5262 **	−0.0594	0.1290
	$T_{\text{外avg-1}}$	0.4095 *	0.7333 ***	0.0830	0.3952	0.7133 ***	0.8736 ***	0.0955	0.5368 *	0.4827 **	0.7434 ***	−0.2602	0.2839
	$U_{\text{外min-1}}$	0.1793	0.2719	0.0138	0.1017	−0.3275	−0.3258	0.1961	−0.2560	−0.5502 **	−0.3649 *	0.5877 **	−0.5225 **
	$U_{\text{外avg-1}}$	0.1119	0.2560	0.1400	0.0376	−0.2869	−0.3280	0.2790	−0.1881	−0.5100 **	−0.3672 *	0.5284 **	−0.4107 *
	$N_{\text{外avg-1}}$	0.3616	0.3913	−0.0729	0.3321	0.5370 **	0.5394 **	−0.0266	0.4423 *	0.0037	−0.1374	0.0124	−0.0051
	$L_{\text{外avg-1}}$	− − − −	− − − −	− − − −	− − − −	−0.2223	−0.3570	0.0857	0.0026	−0.4689 **	−0.3401	0.4735 **	−0.4794 **
	$F_{\text{外avg-1}}$	0.0734	−0.2992	−0.2520	0.0224	0.3588	0.3501	−0.1918	0.4157	0.1667	0.2123	−0.0665	0.0841
	$F_{\text{外max-1}}$	−0.1270	−0.2097	−0.1042	0.1205	0.1373	0.2185	−0.0403	0.2042	0.2630	0.1652	−0.1846	0.2333
	$T_{\text{内max-1}}$	0.0851	0.7353 ***	0.3105	0.0694	0.5575 **	0.6881 ***	−0.4081	0.2874	0.5341 **	0.8081 ***	−0.4122 *	0.3491

注: $T_{\text{内max0}}$ 、 $T_{\text{内min0}}$ 、 $U_{\text{内min0}}$ 、 $Q_{\text{内max0}}$ 分别代表日光温室内当天的最高气温、最低气温、空气最小相对湿度、接受到的最大太阳辐射。 $T_{\text{内max-1}}$ 为日光温室内前一天的最高气温(下同)。

$S_{\text{外0}}$ 、 $T_{\text{外max0}}$ 、 $T_{\text{外min0}}$ 、 $T_{\text{外avg0}}$ 、 $U_{\text{外min0}}$ 、 $U_{\text{外avg0}}$ 、 $N_{\text{外avg0}}$ 、 $L_{\text{外avg0}}$ 、 $F_{\text{外avg0}}$ 、 $F_{\text{外max0}}$ 分别代表外界当天的日照时数、最高气温、最低气温、平均气温、空气最小相对湿度、空气平均相对湿度、平均总云量、平均低云量、平均风速、最大风速(下同)。

$S_{\text{外-1}}$ 、 $T_{\text{外max-1}}$ 、 $T_{\text{外min-1}}$ 、 $T_{\text{外avg-1}}$ 、 $U_{\text{外min-1}}$ 、 $U_{\text{外avg-1}}$ 、 $N_{\text{外avg-1}}$ 、 $L_{\text{外avg-1}}$ 、 $F_{\text{外avg-1}}$ 、 $F_{\text{外max-1}}$ 分别代表外界前一天的日照时数、最高气温、最低气温、平均气温、空气最小相对湿度、空气平均相对湿度、平均总云量、平均低云量、平均风速、最大风速(下同)。

*、**、***分别代表通过0.05、0.01、0.001的显著性水平检验。
—表示无相关系数,因为晴天时外界低云量为零。

关。少云-多云天气时,温室内日最低气温与室外当天和前一天的最低气温、室内前一天的最高气温有关;温室内日最高气温、空气最小相对湿度、最大太阳辐射均与日照时数有关,除此之外还与温室外当天和前一天最高气温、当天总云量、平均低云量以及温室内前一天最高气温中某一项或两项或三项要素有关。寡照天气时,因为日照偏少或无日照,温室内日最低气温、最高气温、空气最小相对湿度、最大太

阳辐射均与日照时数无关,与温室外当天平均气温、最低气温、最高气温、空气相对湿度、平均总云量中某一项或两项或三项要素有关。

2.3 日光温室内外气象要素相关模型的检验与应用

2.3.1 拟合检验

利用表 2 中的模型分别对 2006 年 12 月 14 日至 2007 年 2 月 28 日不同天气状况下日光温室内的

表 2 石家庄地区日光温室冬季小气候与外界气象要素的相关模型

天气类型		相关模型		F 计算值	F 检验值	R
晴	日最低气温	$T_{\text{内min0}}=0.584+0.313 S_{\text{外0}}+0.383 T_{\text{外avg0}}+0.303 T_{\text{外min0}}+0.293 T_{\text{内max-1}}$		39.613	4.26	0.942
	日最高气温	$T_{\text{内max0}}=21.892+0.009 S_{\text{外0}}-0.653 T_{\text{外avg0}}+0.691 T_{\text{外max0}}+0.403 T_{\text{外max-1}}$		8.398	4.26	0.798
	日最小相对湿度	$U_{\text{内min0}}=57.845-0.014 S_{\text{外0}}+1.139 N_{\text{外avg0}}$		16.079	5.66	0.767
少云	日最大太阳辐射	$Q_{\text{内max0}}=321.611+0.234 S_{\text{外0}}-0.908 U_{\text{外avg0}}$		17.329	5.66	0.782
	日最低气温	$T_{\text{内min0}}=10.783+0.480 T_{\text{外min0}}+0.343 T_{\text{外min-1}}+0.152 T_{\text{内max-1}}$		97.821	4.94	0.971
	日最高气温	$T_{\text{内max0}}=23.329+0.625 S_{\text{外0}}+0.464 T_{\text{外max0}}+0.356 T_{\text{外min-1}}$		22.997	4.94	0.89
多云	日最小相对湿度	$U_{\text{内min0}}=65.939-1.132 S_{\text{外0}}-0.380 T_{\text{外max0}}+0.888 N_{\text{外avg0}}+1.381 L_{\text{外avg0}}$		7.356	4.43	0.711
	日最大太阳辐射	$Q_{\text{内max0}}=240.9+0.236 S_{\text{外0}}+4.338 T_{\text{外max-1}}$		10.38	5.85	0.723
	日最低气温	$T_{\text{内min0}}=10.578+0.768 T_{\text{外avg0}}$		164.231	7.60	0.920
寡照	日最高气温	$T_{\text{内max0}}=8.158-1.075 T_{\text{外min0}}+1.934 T_{\text{外max0}}$		57.542	5.42	0.894
	日最小相对湿度	$U_{\text{内min0}}=83.381+0.212 U_{\text{外min0}}+2.970 U_{\text{外avg0}}-3.562 T_{\text{外max0}}$		20.541	4.54	0.829
	日最大太阳辐射	$Q_{\text{内max0}}=214.629-28.251 T_{\text{外avg0}}+35.788 T_{\text{外max0}}-20.389 N_{\text{外avg0}}$		14.398	4.54	0.779

日最低气温、最高气温、空气最小相对湿度、接受到的最大太阳辐射 4 个要素进行拟合检验。得到日光温室内日最低气温拟合平均绝对误差为 0.7~0.8℃,平均相对误差为 5.9%~8.5%;日最高气温拟合平均绝对误差为 1.2~1.8℃,平均相对误差为 4.3%~9.9%;空气最小相对湿度拟合平均绝对误差为 2.9%~5.3%,平均相对误差为 5.0%~6.8%;最大太阳辐

射拟合平均绝对误差为 23.7~57.0 W·m⁻²,平均相对误差为 7.9%~22.3%,见表 3。由表 3 可见,除寡照天气时日最大太阳辐射拟合平均相对误差超过 10%外,其他拟合平均相对误差均在 10%以内,具有较高的精度。因为寡照天气时,有时由于降雪等原因,不揭开草帘,室内接受到的太阳辐射为零,而模型模拟值很难为零,所以误差较大。

表 3 不同天气状况下日光温室内小气候拟合检验

外界天气状况	日最低气温		日最高气温		日空气最小相对湿度		日最大太阳辐射	
	平均绝对误差/℃	平均相对误差/%	平均绝对误差/℃	平均相对误差/%	平均绝对误差/%	平均相对误差/%	平均绝对误差/W·m ⁻²	平均相对误差/%
晴天	0.8	6.0	1.8	5.4	2.9	5.3	35.7	9.7
少云-多云	0.7	5.9	1.2	4.3	3.3	5.0	23.7	7.9
寡照	0.8	8.5	1.8	9.9	5.3	6.8	57.0	22.3

2.3.2 应用检验

利用表 2 中的模型,对 2008 年 12 月 1 日至 2009 年 2 月 28 日日光温室内的 小气候进行计算,并与实测值对比进行检验。得出,不同天气状况下温室内日最低气温平均绝对误差为 0.9~1.1℃,平均相对误差为 9.2%~9.5%;日最高气温平均绝对误差为 2.3~2.5℃,平均相对误差为 7.8%~12.8%;日空气最小相对湿度平均绝对误差为 4.4%

~5.8%,平均相对误差为 6.7%~8.9%;日最大太阳辐射平均绝对误差为 35.6~58.3 W·m⁻²,平均相对误差为 8.7%~20.7%(见表 4)。可见,各要素的平均相对误差只有寡照天气下的日最高气温平均相对误差以及少云-多云和寡照天气下日最大太阳辐射平均相对误差超过 10%,其他要素平均相对误差均在 10%以内,效果较好。

表 4 不同天气状况下日光温室内外相关模型的应用检验

Table 4 The application and test of the correlation model between microclimate in sunlight greenhouse and the climate outside under different weather conditions

外界天气状况	日最低气温		日最高气温		日空气最小相对湿度		日最大太阳辐射	
	平均绝对误差/℃	平均相对误差/%	平均绝对误差/℃	平均相对误差/%	平均绝对误差/%	平均相对误差/%	平均绝对误差/W·m ⁻²	平均相对误差/%
晴天	0.9	9.2	2.5	7.8	4.4	8.2	35.6	8.7
少云-多云	1.0	9.3	2.3	8.9	5.8	8.9	58.3	17.9
寡照	1.1	9.5	2.4	12.8	5.6	6.7	55.7	20.7

3 结论与讨论

(1) 晴天和少云-多云天气状况下日光温室内的气温、空气相对湿度和接受到的太阳辐射有明显的日变化,只是少云-多云天气时室内最高气温、最大太阳辐射的值低于晴天时的值,小气候条件利于黄瓜生长发育;寡照时日光温室内的气温低、湿度大,尤其连续寡照时,室内气温在黄瓜生长发育适宜温度以下,同时空气相对湿度接近饱和,影响黄瓜正常生长发育。

(2) 不同天气状况下日光温室内的 小气候与外界气象条件的相关程度不同,影响室内小气候的因子也不同。晴天时主要影响因子为外界 的日照时数、平均气温、最低气温、最高气温、空气湿度、云量以及温室内前一天的最高气温等;少云-多云时,主要影响因子为外界 的日照时数、最低气温、最高气温、云量以及温室内前一天的最高气温等;寡照时主要影响因子为外界 的平均气温、最低气温、最高气温、空气湿度、云量等。

(3) 应用统计方法组建了冬季石家庄地区日光温室内外气象要素的相关模型,模型通过了显著性检验。经拟合检验,不同天气状况下,日光温室内日

最低气温拟合平均绝对误差均在 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,日最高气温拟合平均绝对误差在 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内;日空气最小相对湿度拟合平均绝对误差在 5.3% 之内;日最大太阳辐射拟合平均绝对误差在 $57.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之内。除寡照天气下的日最大太阳辐射平均相对误差超过 10% 外,其他拟合平均相对误差均在 10% 以内。模型具有较高的精度。

(4) 用日光温室内外气象要素相关模型对试验点 2008—2009 年冬季日光温室内外小气候要素进行计算。不同天气状况下日光温室内外日最低气温平均绝对误差在 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,日最高气温平均绝对误差在 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,日空气最小相对湿度平均绝对误差在 5.8% 之内,日最大太阳辐射平均绝对误差在 $58.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之内;各要素平均相对误差只有寡照天气下的日最高气温以及少云-多云和寡照天气时日最大太阳辐射超过 10% ,其他均在 10% 以内,效果较好。

(5) 从小气候观测数据看,晴天时日光温室内的日最高气温有时在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,甚至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,说明放风管理不够及时,或风口开放得不够大。所以日光温室怎样放风、放风多长时间也是气象服务的一项内容,使广大农民合理的进行温室管理。

(6) 本研究设定小气候数据采集频次为 10 分钟一次,能够反映温室内外小气候的变化,基本满足了气象服务的需求。文中小气候的最高值、最低值是从每 10 分钟一次的观测数据中挑选出的,与温室内的极值可能存在一定的误差,小气候数据采集的设定有待在今后工作中改进。

(7) 本文在建立日光温室内外小气候与外界大气气候的相关模型时仅用了一年的数据,另外,日光温室内外小气候还与温室的朝向、大小、结构、墙体厚度、薄膜材料以及所在地理位置、室内种植作物和作物所处的生育期、管理方式等有关,所以结论仍存在一定的局限性。

参考文献

- [1] 李军,杨秋珍,罗卫红. 自控玻璃温室冬季气候生态特征及调控策略[J]. 应用生态学报,2005,16(7): 1241-1246.
- [2] 金志凤,景元书,李永秀,等. 连栋塑料大棚内温湿度及番茄叶片净光合速率的垂直和水平分布特征[J]. 农业工程学报,2006,22(增 2): 275-278.
- [3] 赵鸿,张强,杨启国,等. 黄土高原半干旱雨养区日光温室小气候分析[J]. 应用气象学报,2007,18(5): 627-634.
- [4] 孙智辉,薛清云,李生袖. 日光温室油桃休眠期分析研究[J]. 气象,2005,31(3): 85-87.
- [5] 吴元中,李军,杨秋珍. 蔬菜三连栋大棚内外冬季温度变化研究[J]. 中国生态农业学报,2002,10(4): 38-40.
- [6] 李军,杨秋珍,吴元中. 非加温型四连栋塑料温室内外温湿度关系研究[J]. 气象,2005, 31(8): 22-25.
- [7] 魏瑞江,王西平,常桂荣,等. 连阴天气塑料日光温室内外温度的关系及调控[J]. 中国农业气象,2001,22(3): 24-27.
- [8] 刘可群,黎明锋,杨文刚. 大棚小气候特征以及与大气候的关系[J]. 气象,2008,34(7): 101-107.
- [9] 张永红,葛微衍,贾金海. 从界壳理论看设施农业专业预报的地位和作用[J]. 气象,2002,28(10): 57-58.
- [10] 崔建云,董晨娥,左迎之,等. 外部环境气象条件对日光温室气象条件的影响[J]. 气象,2006,32(3): 102-106.
- [11] 魏淑秋. 农业气象统计[M]. 福州:福建科学技术出版社,1985:107.