

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.036

基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律分析

张军华^{1,2} 沈楷程^{1,2} 陈丹艳^{1,2} 张明科³ 张海辉^{1,4} 胡瑾^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 4. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对日光温室冬季反季节生产中冠层温度时空分布不均的问题,以典型西北日光温室为研究对象,建立了40通道PT100温度场监测系统,对冬季番茄冠层全天候动态温度数据进行采集,在此基础上,采用克里金插值算法进行冠层温度场建模,通过差分进化算法获取温度极值点,分析了不同天气条件下冠层特征温度的时空变化规律。结果表明,晴天、多云天、阴(雨)天插值验证的 R^2 均大于0.94,平均均方根误差分别为1.34、0.95、0.40℃,该算法更适用于阴(雨)天及夜间低温冠层温度场的插值;在不同天气条件下,温室冠层温度全天整体上呈现西高东低、内高外低的趋势,阴(雨)天温室内温度整体变化规律趋于一致,晴天、多云天气揭被后,受外界光辐射等因素影响室内温度分布差异性较大,晴天夜间温度的下降程度大于阴(雨)天;冠层极值点分布结果表明,在不同天气条件下,极值特征点在日光温室中分布区域基本相同,冠层最高温点主要位于温室中部[22.0 m, 2.5 m]附近,最低温点主要位于温室东部外膜[4.0 m, 5.48 m]附近。日光温室冠层极值特征点的获取为温室栽培、温度灾害监测与传感器部署等研究提供了理论基础。

关键词: 日光温室; 冠层温度场; 时空变化规律; 克里金插值; 差分进化算法; 物联网

中图分类号: S625.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0335-08

OSID:



Spatio-temporal Variation of Canopy Characteristic Temperature in Solar Greenhouse

ZHANG Junhua^{1,2} SHEN Kaicheng^{1,2} CHEN Danyan^{1,2} ZHANG Mingke³ ZHANG Haihui^{1,4} HU Jin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory for Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to explore the pattern of crop canopy temperature change and spatial location distribution characteristics, so as to realize the reasonable deployment of the greenhouse temperature monitoring scheme to prevent the occurrence of local chilling injury of crops in solar greenhouses. A 40-channel high-precision temperature field monitoring system were deployed to collect the tomato canopy temperature in the winter in a northwest solar greenhouse. The Kriging interpolation algorithm was used to interpolate the collected data to obtain a temperature field model. And the temperature extreme value feature points of the temperature field model were obtained based on differential evolution (DE) algorithm. The spatio-temporal variations of canopy characteristic temperature under different weather conditions were analyzed. The results showed that the R^2 values of interpolation in sunny, cloudy and overcast (rainy) days were more than 0.94, and values of the average root mean square error (RMSE) were 1.34℃, 0.95℃ and 0.40℃, respectively. The algorithm was more suitable for the interpolation of low temperature canopy temperature field in overcast (rainy) days and night. Under different weather conditions, the greenhouse canopy temperature showed a trend of higher west and lower east, higher

收稿日期: 2021-03-28 修回日期: 2021-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100602)、国家大宗蔬菜产业技术体系岗位专家任务项目(CARS-23-C06)、陕西省重点研发计划项目(2020NY-117)和西安市科技计划项目(201806117YF05NC13(4))

作者简介: 张军华(1991—),男,博士生,主要从事农业电气化与自动化技术研究,E-mail: zhangjunhua@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 胡瑾(1980—),女,副教授,主要从事设施环境调控与智能信息处理研究,E-mail: hujin007@nwsuaf.edu.cn

inside and lower outside, and the overall change of the temperature in the greenhouse tended to be consistent in the overcast (rainy) days. After the exposure of sunny and cloudy weather, the indoor temperature distribution was quite different due to external light radiation, and the temperature decrease at night in sunny days was greater than that in overcast (rainy) days. The results of further analysis of the distribution of canopy extreme points showed that under different weather conditions, the distribution of extreme characteristic points in the solar greenhouse was basically the same, and the highest temperature points of the canopy mainly appeared near the middle of the greenhouse [22.0 m, 2.5 m]. The lowest temperature points mainly appeared near the outer film of the eastern part of the greenhouse [4.0 m, 5.48 m]. The acquisition of canopy extreme characteristic points in solar greenhouse provided a theoretical basis for greenhouse cultivation, temperature disaster monitoring and sensor deployment.

Key words: solar greenhouse; canopy temperature field; spatio-temporal variation law; Kriging interpolation; differential evolution algorithm; Internet of Things

0 引言

冠层温度是作物生长发育过程中的重要环境因素,直接影响作物的生理状态^[1]。在冬季北方反季节生产过程中,温室温度的监测和调控尤为重要,日光温室通过后墙对太阳能的蓄放热特性及覆盖物的保温,可有效实现夜间温室内温度的提升,日光温室在中国北方地区分布较为广泛^[2-3]。随着生产需求及建造技术的提升,日光温室建造朝着大跨度、大长度方向发展,室内空间不断扩大^[4-5],温室内温度不仅受外界环境影响,同时还受墙体、地温、作物、湿度等因素影响,导致温室内温度时空分布不均^[6-7]。特别是在冬季受连续阴(雨)天、雪天等气候变化影响时,极易导致作物冠层局部温度过低,造成作物冷害、冻害甚至死亡^[8-9]。因此,分析作物冠层温度分布特征,进而寻找温度最低点、优化日光温室环境监测及增温设施部署对减少冻害损失具有重要意义。

目前,针对日光温室温度变化规律、分布特征及监测预警已进行了大量研究^[10-11]。现有日光温室小环境因子建模预测方法具有较高精度,能准确模拟、预测监测点的变化规律^[12-15]。然而,以单点或少数监测点数据对温室内整体及冠层温度进行分析存在一定局限性,易忽略全局极值温度点。近年来,CFD技术广泛应用于农业领域,能动态模拟太阳热负荷在温室中的分布与变化,结合温室构造等因素可实现对温室小气候整体变化规律的分析,同时可进行温室温度场仿真,为温室温度场预测与调控提供了新的思路^[16-18]。但由于日光温室结构复杂,特别是温室内冠层温度受作物长势、外界光照、墙体蓄热、覆盖材料等多种因素影响,导致作物冠层温度的空间分布表现出非线性,且变化不定,使CFD技术相对难以模拟^[6,19],在实际监测调控应用中存在较大误差。以上研究虽然在一定程度上揭示了日光温室整体温度变化,但仅以较少典型位置(温室中部

及两端)的传感器部署进行监测^[9,20],难以全面反映温室冠层时空分布不均的实际情况,导致获取的特征点存在偏差,无法为日光温室生产过程及时作出预警,以防止温度灾害的发生。

本文构建基于物联网技术的日光温室温度场监测系统,采集冠层温度数据,采用插值算法对番茄冠层温度场进行拟合,并分析冠层温度场特征,提取温度极值点,研究不同天气条件下温度极值点分布规律,以期为日光温室设施调控传感器及增温设施的高效部署提供理论依据。

1 试验数据获取与分析

1.1 试验对象

采用典型西北下沉式日光温室为试验对象,属于单栋、单坡面、厚土墙式温室,其坐北朝南,温室东西长50 m,南北跨度7 m,脊高5 m,下沉0.5 m,后墙和东、西两侧墙体为黏土制成,拱架为钢架结构,后坡覆以PC板和纺织材料制成的保温棉被,透光材料为聚氯乙烯薄膜,采用上下通风方式建造。试验在陕西省泾阳县西北农林科技大学泾阳蔬菜示范基地6号日光温室进行,位于北纬34.4°~34.6°,东经108.4°~108.9°,属于典型的温带大陆性季风气候。棚内种植作物为番茄,于2019年10月20日定植,温室内垄宽0.8 m,垄间距0.8 m,每垄种植2行番茄,共计33垄,整个生育期采用滴灌方式进行灌溉,试验期间温室于08:00—09:00间揭保温被,晴天/多云天气10:00—10:30间开上通风进行降温及外界二氧化碳补充,阴(雨)天一般不通风或延迟至12:30后。

1.2 数据获取

为采集番茄冠层温度分布情况数据,采用自主开发的温度场监测系统,包括温度采集节点、485节点、DTU数据上传模块与物联网监控平台。整套温度场监测系统分8路共计40个温度采集节点,系统结构框图如图1所示。

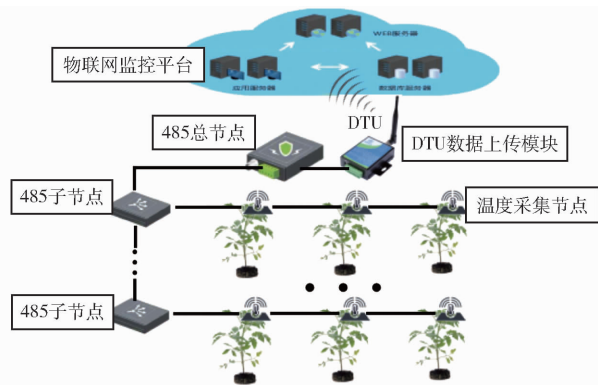


图 1 温度场监测系统整体框图

Fig. 1 Diagram of temperature monitoring system

温度采集节点以 MSP430FR2433 微处理器为核心处理单元,采用德国贺利氏生产的 PT100 型薄膜铂热电阻进行温度采集,其使用不锈钢保护管与四氟高密度镀银屏蔽线进行封装,具有良好的抗腐蚀性抗干扰性能,测量精度 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$,温度测量范围 $-50 \sim 300^{\circ}\text{C}$;温度信号通过 ADS1274 24 位高精度采样芯片进行转换,并由串口传送给核心处理单元,每个处理单元具有单独编号,各个单元间通过 485 总线形式进行通信。485 节点采用 STM32F103 微处理器,负责接收处理每个温度采集节点传输的数据。数据上传模块采用 Comway 4G DTU 全网通透传模块(4G 模块),负责将汇集的温度场数据上传。最终数据汇聚至物联网监控平台进行管理与分析。

试验于 2019 年 11 月 27 日—12 月 15 日进行,番茄处于花期,试验期间植株平均高度 40 ~ 60 cm,共连续采集 19 d 冠层温度场数据,其中晴天、多云天、阴(雨)天分别为 7、7、5 d。温度场监测系统每 5 min 记录一次温度场数据,通过 4G 模块将数据上传至监控平台。试验部署方案如图 2 所示,温度场监测系统 40 个温度传感器按图 2 中所示方案部署,共 8 列,东西距侧墙各 4 m 作为缓冲区,各列相距 6 m;每列部署 5 个传感器分别距后墙 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 m,距地面 0.5 m。本文采用试验期间 19 d 数据进行分析,每 30 min 选取一次数据,共获 912 组冠层原始温度数据,每组 40 个温度点,总计 36 480 个温度点数据用于番茄冠层温度场插值模型构建。

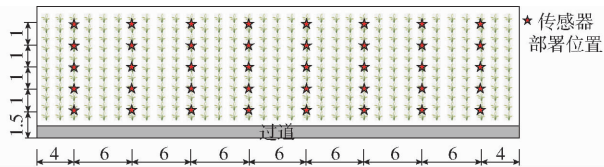


图 2 温度场监测系统部署示意图

Fig. 2 Temperature field monitoring system deployment diagram

1.3 数据分析

以实测试验数据为基础,通过克里金法(Kriging)计算温度场数据,进而采用差分进化算法获取番茄冠层温度场极值特征点,探寻日光温室作物冠层温度特征点分布及变化规律,其算法流程如图 3 所示。

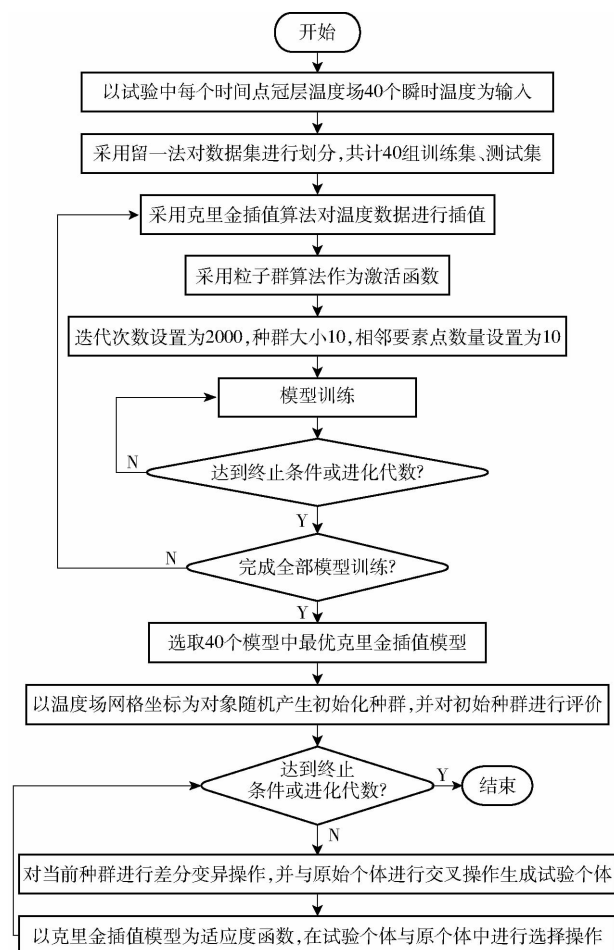


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

1.3.1 克里金插值

针对冠层温度场连续且分布不均、差异性大、不规律,以及试验过程中因试验条件限制导致支撑建模分析数据量少的问题,本文采用简单克里金算法进行温度场建模,克里金法是通过协方差函数对随机过程或场进行空间建模和预测的回归算法,能实现目标位置的无偏估计^[21-22],其广泛应用于农业、气象等空间领域插值,如土壤有机质空间分布、作物需水量变化趋势分析、地下/地表温度预测、降水时空分布等^[23-27]。本文通过 Pycharm 软件与克里金算法库进行温度场建模,采用留一法对 19 d 每个时刻监测温度数据进行交叉验证的数据集划分,即每个时刻温度场的 40 个温度点中每个点轮流作为测试集,剩余 39 个点为训练集,循环建模验证 40 次,每个时刻共获取 40 个验证模型及验证数据点,19 d

共计获取 36 480 个验证数据用于插值模型性能分析。其中克里金算法采用粒子群算法作为激活函数,由于监测数据量有限,预测点相邻要素点数量设置为 10,即预测点数据由其最近邻 10 个监测点计算所得。

1.3.2 差分进化算法

差分进化算法(Differential evolution, DE)是一种基于群体差异的启发式随机搜索算法,它采用随机并行搜索,可实现非线性不可微连续空间的函数最小值搜寻^[28],适用于本文研究中非线性温度场极值的寻优。差分进化算法是基于无约束条件优化问题

$$\begin{cases} \min f(x_1, x_2, \dots, x_D) \\ \text{s. t. } x_j^l \leq x_j \leq x_j^u \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_j ——第 j 维变量取值

x_j^l, x_j^u ——取值上、下限

按以下步骤求解:

初始化种群 $\{X_i(0) | x_{j,i}^l(0) \leq x_{j,i}(0) \leq x_{j,i}^u(0); i = 1, 2, \dots, N_p; j = 1, 2, \dots, D\}$,并根据式(2)随机产生初始种群。

$$x_{j,i}(0) = x_{j,i}^l + \text{rand}(0, 1)(x_{j,i}^u - x_{j,i}^l) \quad (2)$$

其中 $X_i(0)$ 表示父代的第 i 条“染色体”, $x_{j,i}(0)$ 表示第 0 代第 i 条染色体的第 j 个“基因”, $x_{j,i}^l, x_{j,i}^u$ 分别表示第 j 维的下边界与上边界, N_p 为种群规模, $\text{rand}(0, 1)$ 表示取 $(0, 1)$ 区间内均匀分布的随机数。通过差分策略,将从群体中随机选取的 2 个个体 $X_2(b), X_3(g)$ 构成向量差并缩放后与待变异个体 $X_{r_1}(g)$ 进行合成,即

$$V_i(g+1) = X_{r_1}(g) + F(X_{r_2}(g) - X_{r_3}(g)) \quad (3)$$

其中 $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3, r_1, r_2, r_3 \in [1, N_p]$ 的 3 个随机数, F 为确定的缩放因子常数, g 为代数。选择第 g 代种群及其变异的中间体进行交叉操作,根据交叉概率 C_r 随机产生新个体,当 $\text{rand}(0, 1) \leq C_r$ 或 j 最大时产生的新个体 $U_{i,j}(g+1)$ 公式为

$$U_{i,j}(g+1) = \begin{cases} V_{j,i}(g+1) \\ x_{j,i}(g) \end{cases} \quad (4)$$

采用贪婪选择策略择优选取式(4)产生新个体与父代个体,将符合条件个体保存至下一代群体中,返回模型是否满足终止条件,满足则寻得的点为该函数的极值点,该算法具有收敛速度快、参数设置少且优化结果稳定的优点,适用于全局最优解的求取。

2 结果与分析

2.1 作物冠层温度场插值结果分析

对交叉验证计算数据与实测数据进行线性拟合分析,结果如图 4 所示,图 4a、4c、4e 分别表示晴天、多云天及阴(雨)天实测值与预测值线性拟合结果,图 4b、4d、4f 表示不同天气条件下克里金插值标准残差大于 2σ 离群值点出现的时间分布直方图。

由图 4 可得,晴天、多云天、阴(雨)天拟合决定系数分别为 0.955 3、0.960 4、0.944 7,其均方根误差分别为 1.34、0.95、0.40℃,说明本方法在温度场插值中效果较好,能较好表征冠层温度的变化规律。阴(雨)天相较于晴天与多云天决定系数相对较低,但其均方根误差相对较小,由图 4e 可看出,各个温度范围波动大小较为一致,这是由于阴(雨)天相对

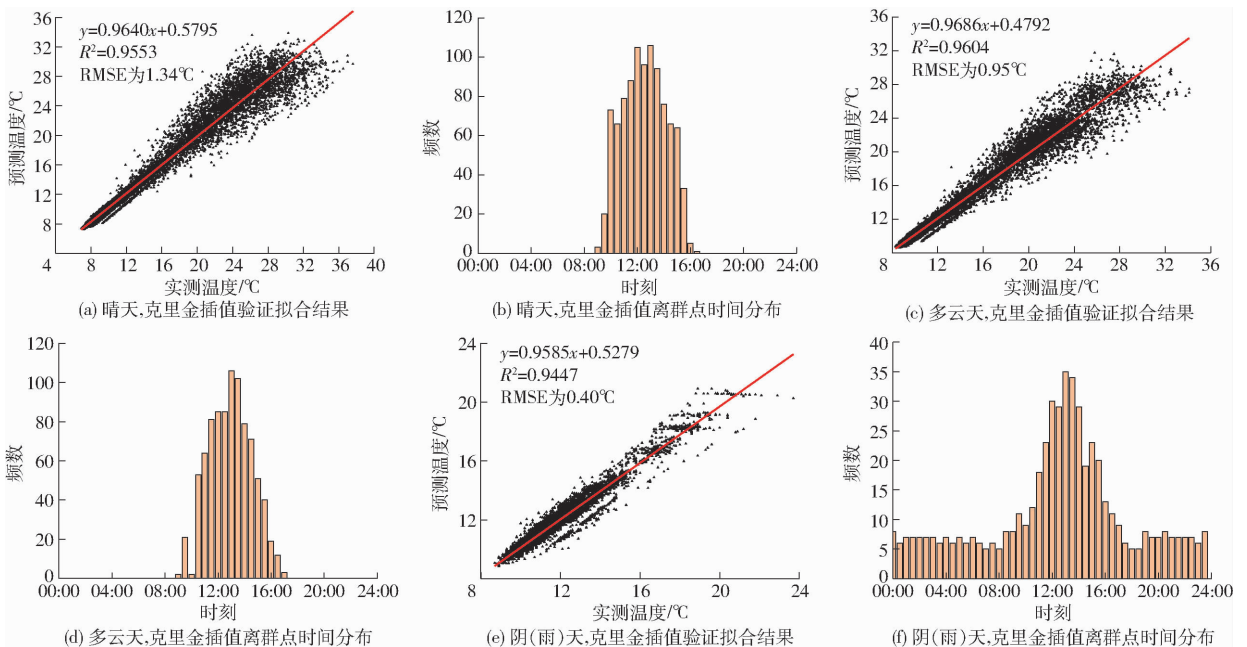


图 4 克里金插值效果验证及预测离群点时间分布

Fig. 4 Verification of Kriging interpolation and the time distribution of outliers points

于晴天受外界辐射影响较小,使冠层温度波动趋于稳定,插值的偏差较小、精度较高。图 4a、4c 中高温部分(白天)相对于低温部分(夜间)波动较大,导致整体均方根误差较阴(雨)天更大,主要因为晴天温度受外界光辐射波动、通风等因素影响,使冠层温度空间变异性变大,导致空间分布不均且无规律,从而影响建模精度。图 4b、4d、4f 结果表明,由于太阳辐射使温室内能量流动加剧、水汽蒸发,温度离群点主要出现于揭被后,且太阳辐射越强,插值造成的偏差较大;由偏差分布的时间结果可知,该方法相比较晴天白天温度插值计算,更适用于夜间及阴(雨)天全天的温度插值,即更加适用于冬季日光温室的低温温度场的建模。

2.2 冠层温度特征点日变化规律分析

2.2.1 冠层温度场特征点获取

以克里金插值模型为差分进化算法的适应度函数,设置算法参数种群规模为 20,迭代次数 1000,缩放因子 0.5,交叉因子 0.8,对日光温室冠层温度进行二维寻优,以 2019 年 12 月 3 日 09:00 时温度最大值寻优为例,其进化曲线如图 5 所示,由图 5 可知,采用 DE 算法收敛速度较快,在迭代至 112 次时基本平稳,能快速获取温度极值。本文共获取连续 19 d 每 30 min 一组极值数据,共获取 1 824 个温度极值特征点与位置坐标,其中最高温与最低温点各 912 个,晴天、多云天极值各 336 组,阴(雨)天极值 240 组。

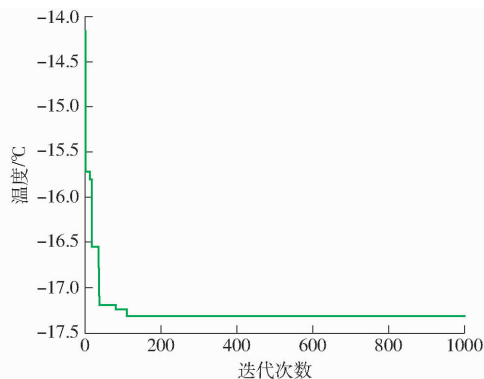


图 5 DE 算法温度寻优进化曲线

Fig. 5 Evolution curve of temperature optimization of DE

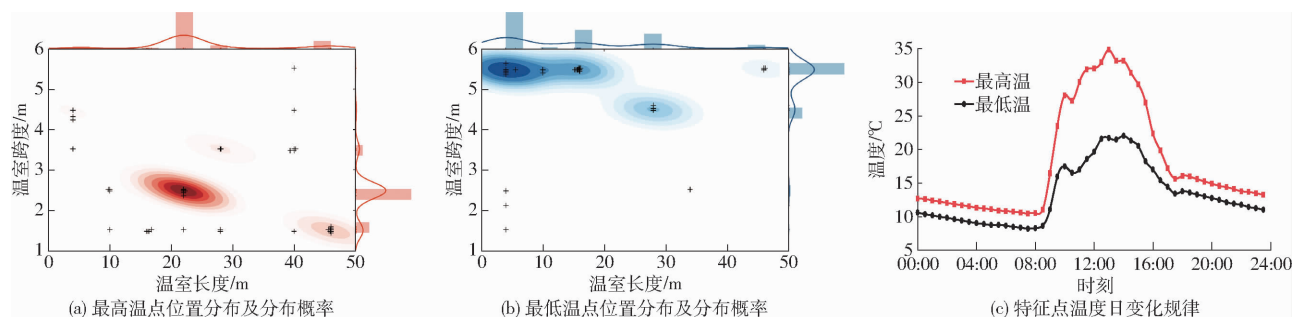


图 6 日光温室晴天温度特征点变化规律

Fig. 6 Variation of temperature characteristic points in sunny days in solar greenhouse

2.2.2 冠层温度特征点日变化规律分析

通过建模寻优结果分析不同天气条件下温室内冠层温度特征点的分布及变化规律,温度变化规律分析中每类天气条件各时刻温度数据,由试验期间所有该类天气对应时刻温度取均值获得。

(1) 晴天冠层特征点分布及温度变化规律

晴天冠层温度极值点位置分布及温度变化趋势如图 6 所示。由图 6a 可知,晴天最高温点主要分布于温室中部,且靠近内墙,以东墙和后墙连接处为横向与跨度方向起始零点,经分析约 69.3% 的温度最高点位于温室横向 22.05 m,距内墙 2.48 m 附近,结合图 6c 分析可知,08:30 左右揭被后太阳辐射使温室内温度迅速升高,由于太阳初升直射西墙,而日光温室东部由于东墙遮挡温度偏低,温室温度呈现西高东低的趋势,导致揭被后约 14.3% 最高温点出现在温室横向 45.99 m、距内墙 1.51 m 靠近西墙附近;13:00 后,太阳辐射角减小,辐射能量降低,且墙体向外散热快使温室东西两侧较中部温度低,使最高温度位置向中间移动,由于地面长辐射、冠层辐射等因素导致热气流上升随温室薄膜向内墙顺时针循环,同时薄膜附近与室外热交换快的原因,使白天温室靠近后墙侧温度高于靠近薄膜侧温度^[29];其次夜间盖被后由于外界温度较低,温室内热量通过保温被快速散热,使靠近薄膜外侧温度较低,同时温室后墙中部由于白天太阳辐射蓄热时间长,夜间保温性能更好,这些均是温室全天温度最高温点大多数出现在[22.05 m, 2.48 m]附近的主要原因。其余极值特征点位置散布,主要由于白天温室内被外界环境扰动及农事操作等原因导致。

由图 6b 可知,晴天最低温特征点分布区域较广,主要分布于温室靠近薄膜附近,其中约 75% 最低温点位于横向 0 ~ 20 m、距后墙 5.5 m 左右区域内,约 19.3% 位于温室横向 28 m,距内墙 4.5 m 附近;结合图 6c 及数据分析可得,08:30 左右揭被后,最低温由最东侧向偏中方向移动,白天主要集中在[28 m, 4.5 m]附近,至 16:30 左右,由于太阳与

温室辐射角减小造成温室西侧被西墙遮挡,使其附近温度迅速下降,至17:00左右盖被时间段内,最低温位于温室最西侧靠薄膜附近;盖被后至午夜左右,由于墙体的蓄热保温功能,温室东西两侧及后墙内测温度较高,温度最低点主要位于中部[28 m, 4.5 m]附近;午夜过后东西墙薄蓄热少保温功能基本消散,逐步向外界散热,由于东墙较西墙白天墙体蓄热量小,夜间保温效能时间更短,使其内侧附近温度降温较快,因此夜间至开棚期间最低温主要位于温室东侧[4.35 m, 5.32 m]附近。

由图6c可知,最高温点平均温度日变化范围为10.5~34.8℃,由于温室效应及太阳能量辐射角等因素,白天平均最高温出现在13:00左右;最低温点日平均温度变化范围为8.2~22.0℃,最低温出现在07:30—08:00期间,此时太阳正处于地平线附

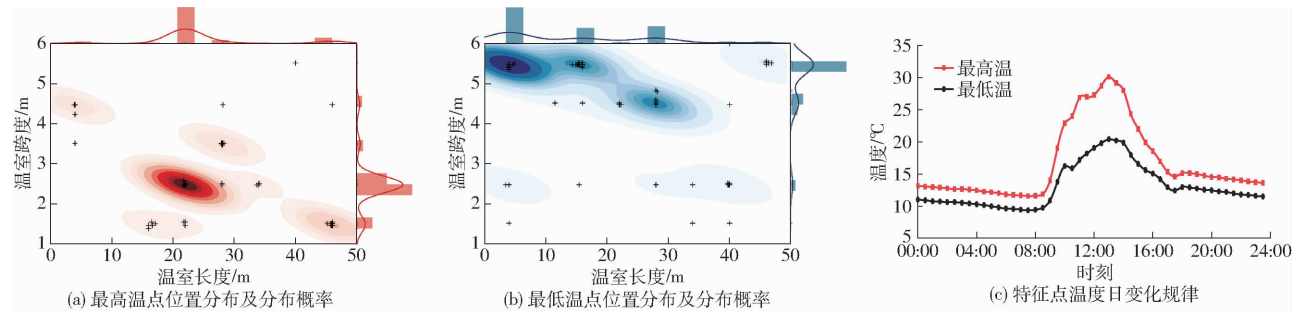


图7 日光温室多云天温度特征点变化规律

Fig. 7 Variation of temperature characteristic points in cloudy days in solar greenhouse

由图7a结果及分析可得,约73.2%最高温点位于温室横向22.0 m,距后墙2.49 m附近,位置和出现时间与晴天基本一致;开棚揭被后至13:00期间约10.4%点出现在温室横向45.98 m,距内后墙1.61 m处附近,此后温室最高温点向温室中部22~28 m附近偏移;其余分布点主要由于揭被后多云天气太阳辐射无规律变化及外界环境变化所造成。多云天最低温分布如图7b所示,其主要分布范围与晴天基本一致,但分布范围更广,主要原因是多云天太阳辐射变化使温室内温度出现波动,导致温度分布不均造成。经分析约70.5%最低温点分布于温室横向0~20 m,距后墙5.3 m附近,其中约66.6%最低温点位于[4.01 m, 5.3 m]附近,主要发生时间为夜间至开棚揭被前;盖被后一段时间内由于温室保温特性约19.6%最低温会集中出现于[27.9 m, 4.52 m]位置附近,综上分析多云天气温度极值特征点分布概率、位置、时间与晴天基本一致。由图7c温度变化趋势分析可得,多云天最高温点平均温度日变化范围为11.5~30.1℃,最低温点平均温度日变化范围为9.3~20.4℃,其日变化规律与晴天基本相同。由于多云天气温室内外温差较晴天略小,

近,且未揭被,温室内外存在较大温差,处于温室热量散失降温阶段;此后由于外界温度升高,温室内外温差减小,后墙及土壤的蓄热能量使温室内温度出现缓慢回升趋势。揭被后温室内温度迅速升高,且温室最高温点上升趋势明显高于最低温度,说明日光温室不同位置温度变化的滞后性与不均匀性存在明显差异;10:00—10:30期间执行开上通风操作,此时内外温差较大,温室内部热空气快速从通风口散失,使温室内温度出现短暂下降,此后至13:00左右温室温度持续升高至最高温;在15:00—15:30期间由于通风口的关闭,温室内温度下降速率降低。关棚后最高温点、最低温点温度呈缓慢下降的趋势。

(2) 多云天冠层特征点分布及温度变化规律

多云天冠层温度极值点位置分布及温度变化趋势如图7所示。

使在10:00左右通风开始过程中温室内温度下降趋势比晴天小,甚至部分天呈现上升趋势。

(3) 阴(雨)天冠层特征点分布及温度变化规律

阴(雨)天冠层温度极值点位置分布及温度变化趋势如图8所示。

由图8a分布结果可知,阴(雨)天冠层温度最高点主要分布在温室中部横向22.0 m,距离内墙2.51 m附近,其分布的点数约占总体的97.5%,主要原因是阴(雨)天外气候环境变化小,且无太阳直接辐射,使温室内部整体温度场趋于稳定,同时温室后墙的蓄热保温特性使最高温度点靠近内墙;仅2.5%的最高温点在12:00—14:00间位于温室西墙附近,这是由于阴(雨)天上午温室内西墙附近积温相对较多造成,在14:00过后外界温度下降,温室东西两侧温度散失较快,使温度最高点重新回移至温室中部;阴(雨)天最低温分布情况主体分布与晴天、多云天气基本一致,但相对更集中,分布如图8b所示。由于阴(雨)天外输入温室的能量少,且外界温度低,温室内靠近薄膜附近,热量散失较快,使95%的最低温点远离后墙靠近于薄膜,其中约79.8%最低温点位于温室横向4.04 m,距后墙

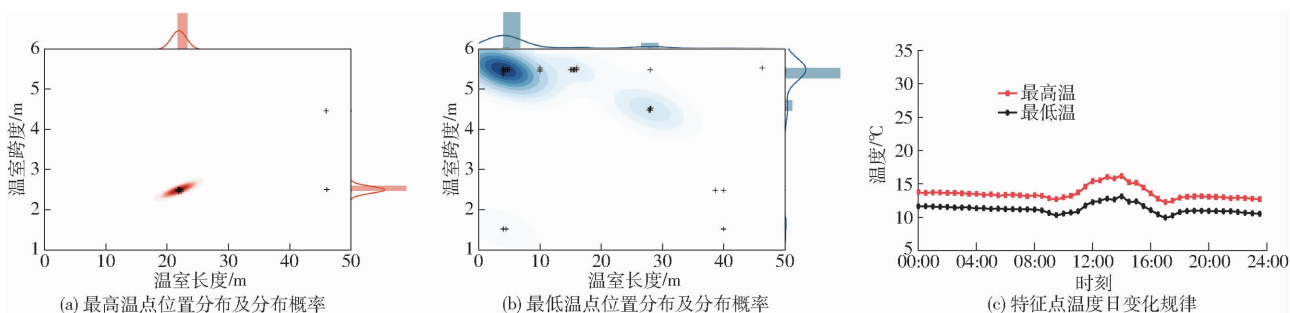


图8 日光温室阴(雨)天温度特征点变化规律

Fig. 8 Variation of temperature characteristic points in overcast (rainy) days in solar greenhouse

5.48 m附近。图中位于[4.0 m, 1.52 m]附近数据主要出现于揭被后,可能是由于农事操作过程中开关门帘使局部温度短时下降造成。

由图8c可知,阴(雨)天最高温点平均温度日变化范围为12.7~16.2℃,一天最高温出现在14:00左右;最低温变化范围为10.3~13.1℃,一天最低温出现在09:30左右,在08:30揭被后至09:30左右温度呈现下降的趋势,这主要是由于无阳光能量直接辐射,温室内外温差大,温室内热量积累量小于向室外散失量导致,说明阴(雨)天在开棚揭被时需注意内外温差,防止温室内温度下降过快造成作物冷害;14:00过后出现温度下降是由于光辐射角减小,外界温度降低,温室内外温差变大导致。夜间温室温度变化较为平缓,与其他天气趋势一致,体现出日光温室良好的保温性能。

综上晴天、多云天、阴(雨)天冠层温度特征点分析结果可得,不同天气条件下其主要分布位置基本一致,温室冠层最高温点主要出现于温室中部[22.0 m, 2.5 m]附近,温度最低点主要位于靠近东墙与外膜[4.0 m, 5.48 m]附近。温室内冠层温度变化规律类同,但阴(雨)天夜间最低温均值最高,多云天气次之,晴天最低,且晴天温室内夜间温度下降速率大于多云天下降速率,阴(雨)天下降速率最缓

慢,其主要原因在于阴(雨)天存在乌云遮挡,能够有效反射地面长波辐射,起到了保温的作用。

3 结论

(1)采用克里金插值算法能较好地获取符合实际冠层温度的插值数据,经验证,插值后晴天、多云天、阴(雨)天的决定系数分别为0.955 3、0.960 4、0.944 7,均方根误差分别为1.34、0.95、0.40℃,由于日光辐射变化及通风等农事操作的影响,克里金插值算法更适用于阴(雨)天全天及夜间低温冠层温度场的的数据插值。

(2)在不同天气条件下,日光温室内冠层温度变化趋势基本一致,揭被后温室内温度呈上升趋势,最低温主要出现在揭被及日出前后,最高温出现在13:00左右,晴天夜间温度下降速率最快,多云天次之,阴(雨)天最慢,最低温与下降速率的规律相反,为阴(雨)天最高。

(3)在不同天气条件下,温室内冠层最高温点存在差异,但主要集中在温室中部[22.0 m、2.5 m]附近,最低温点主要位于[4.0 m、5.48 m]靠近东墙与外膜附近区域。温室层极值特征点的获取可为温度灾害监测、温室智能化控制、增温设施部署等研究提供有效参考。

参 考 文 献

- [1] 张宏鸣,王佳佳,韩文霆,等.基于热红外遥感影像的作物冠层温度提取[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):203-210.
ZHANG Hongming, WANG Jiajia, HAN Wenting, et al. Crop canopy temperature extraction based on thermal infrared remote sensing images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):203-210. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190423&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.023. (in Chinese)
- [2] 张勇,高文波,邹志荣.日光温室主动蓄热后墙传热CFD模拟及性能试验[J].农业工程学报,2015,31(5):203-211.
ZHANG Yong, GAO Wenbo, ZOU Zhirong. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall[J]. Transactions of the CSAE, 2015,35(5):203-211. (in Chinese)
- [3] 鲍恩财,曹晏飞,邹志荣,等.不同结构主动蓄热墙体日光温室传热特性[J].农业工程学报,2019,35(3):189-197.
BAO Encai, CAO Yanfei, ZOU Zhirong, et al. Characteristic of heat transfer for active heat storage wall with different structures in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(3):189-197. (in Chinese)
- [4] CAO K, XU H, ZHANG R, et al. Renewable and sustainable strategies for improving the thermal environment of Chinese solar greenhouses[J]. Energy and Buildings, 2019, 202: 109414.
- [5] 邹志荣.日光温室结构变革与发展趋势[C]//中国园艺学会设施园艺分会2015年学术年会论文集,2015:25.
ZOU Zhirong. Structural reform and development trend of solar greenhouse[C]//Proceedings of the 2015 Academic Annual Conference of the Facility Horticulture Branch of the Chinese Horticultural Society, 2015:25. (in Chinese)
- [6] TONG G, CHRISTOPHER D M, LI B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J].

- Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129 - 139.
- [7] JIAO W, LIU Q, GAO L, et al. Computational fluid dynamics-based simulation of crop canopy temperature and humidity in double-film solar greenhouse[J]. Journal of Sensors, 2020(4): 1 - 15.
- [8] LI M, CHEN S, LIU F, et al. A risk management system for meteorological disasters of solar greenhouse vegetables[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(6): 997 - 1010.
- [9] CHEN S, LI Z, LIU F, et al. Risk evaluation of solar greenhouse cucumbers low temperature disaster based on GIS spatial analysis in Tianjin, China[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2019, 10(1): 576 - 598.
- [10] 许红军, 李彦荣, 崔拥民, 等. 新疆和田沙漠腹地日光温室环境测试与分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊1): 60 - 65. XU Hongjun, LI Yanrong, CUI Yongmin, et al. Thermal performance test and analysis of solar greenhouse in hinterland of Hetian desert, Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(Supp.1): 60 - 65. (in Chinese)
- [11] 欧亚丽, 伊宏伟, 姜丽. 日光温室的温度变化规律研究[J]. 北方园艺, 2014(4): 37 - 41. OU Yali, YI Hongwei, JIANG Li. Study on temperature change regular of solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2014(4): 37 - 41. (in Chinese)
- [12] 邹伟东, 张百海, 姚分喜, 等. 基于改进型极限学习机的日光温室温湿度预测与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 194 - 200. ZOU Weidong, ZHANG Baihai, YAO Fenxi, et al. Verification and forecasting of temperature and humidity in solar greenhouse based on improved extreme learning machine algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 194 - 200. (in Chinese)
- [13] 陈昕, 唐湘璐, 李想, 等. 二次聚类与神经网络结合的日光温室温度二步预测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 353 - 358. CHEN Xin, TANG Xianglu, LI Xiang, et al. Two-steps prediction method of temperature in solar greenhouse based on twice cluster analysis and neural network [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 353 - 358. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s054&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.054. (in Chinese)
- [14] ZOU W, YAO F, ZHANG B, et al. Verification and predicting temperature and humidity in a solar greenhouse based on convex bidirectional extreme learning machine algorithm[J]. Neurocomputing, 2017, 249: 72 - 85.
- [15] 牟双. 日光温室气温预测及顶部通风调控贝叶斯模型[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. MOU Shuang. Bays model of solar greenhouse temperature prediction and roof ventilation regulation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [16] SABERIAN A, SAJADIYE S M. The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation [J]. Renewable Energy, 2019, 138(4): 722 - 737.
- [17] LIU Y, TENG G, ZHOU B, et al. Analysis on the characteristics of temperature environment and optimal sensor placement in roof solar greenhouse using computational fluid dynamics simulation methods[J]. Sensor Letters, 2012, 10(1-2): 146 - 154.
- [18] ZHANG G, FU Z, YANG M, et al. Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162(2): 337 - 347.
- [19] ZHANG Y, HENKE M, LI Y, et al. High resolution 3D simulation of light climate and thermal performance of a solar greenhouse model under tomato canopy structure[J]. Renewable Energy, 2020, 160: 730 - 745.
- [20] 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. LI Zhenfa, WANG Tie, GONG Zhihong, et al. Forewarning technology and application for monitoring low temperature disaster in solar greenhouses based on internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 229 - 236. (in Chinese)
- [21] ZHANG Y, YAO W, YE S, et al. A regularization method for constructing trend function in Kriging model[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59(4): 1221 - 1239.
- [22] VAN STEIN B, WANG H, KOWALCZYK W, et al. Cluster-based Kriging approximation algorithms for complexity reduction [J]. Applied Intelligence, 2020, 50(3): 778 - 791.
- [23] 黄魏, 韩宗伟, 罗云, 等. 基于地形单元的土壤有机质空间变异研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 161 - 167. HUANG Wei, HAN Zongwei, LUO Yun, et al. Spatial distribution of soil organic matter based on topographic unit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 161 - 167. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150424&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.024. (in Chinese)
- [24] SEKULI A, KILIBARDA M, PROTI D, et al. Spatio-temporal regression Kriging model of mean daily temperature for Croatia [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(1): 101 - 114.
- [25] RUEHAAK W. 3-D interpolation of subsurface temperature data with measurement error using Kriging[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4): 1893 - 1900.
- [26] WILLIAM A, MARTÍNEZ, DSCAR M. Median Polish Kriging for space-time analysis of precipitation[J]. Spatial Statistics, 2017, 19: 1 - 20.
- [27] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188 - 197. LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188 - 197. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150927&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.027. (in Chinese)
- [28] OPARA K, ARABAS J. Comparison of mutation strategies in Differential Evolution-A probabilistic perspective[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 39: 53 - 69.
- [29] ZHANG X, WANG H, ZOU Z, et al. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese solar greenhouse temperature distribution[J]. Biosystems Engineering, 2016, 142: 12 - 26.