doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.035

日光温室作物冠层夏季光照强度与空气温湿度时空变化规律研究

吕欢欢　牛源艺　韩雨晓　李顺达　张　漫　李　寒
(中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对温室内不同时间、位置的环境参数存在变异性,且随天气与季节变化,日光温室冠层光照强度、空气温度和空气相对湿度的分布差异性问题,构建了基于无线传感器网络的环境监测系统。环境感知节点部署在作物冠层位置,集成了光照强度、空气温湿度等传感器。首先,基于实时采集的温室环境数据,采用反距离加权算法进行插值分析,得到环境参数的离散曲面;其次,通过基于质心坐标的 K-means 聚类算法,得到了温室内连通及非连通区域的代表性特征点;最后,采用半变异函数与变异系数方法对温室环境的空间变异性与时间变异性进行分析。实验结果表明,夏季日光温室在下午表现为高温与高光照,08:00、16:00 的光照强度分别为 12:00 的 24.2%、72.9%,08:00 的空气温度(27.7℃)较 12:00、16:00 低约 6.0℃,对应的空气湿度(90%)高约 30%。晴天最大光照强度分别为阴天、雨天的 1.4 倍和 4.6 倍,晴天、阴天最高空气温度高于雨天(29.5℃)约 6℃,最小空气相对湿度远低于雨天(84%)。夏季日光温室晴天与阴天表现为高温和低湿,雨天表现为高湿和低光照。各环境参数中,光照强度的空间变异性最强,变程为 10.34 m。空气温湿度的空间变异性较弱,整体分布均匀。光照强度、空气温度和空气相对湿度的时间变异性均为中等变异程度。环境参数的特征点及时空变化规律有助于日光温室传感器的高效部署,为揭示作物与环境的交互作用提供了基础。

关键词: 日光温室; 光照强度; 空气温湿度; 时空变化; K-means; 无线传感器网络
中图分类号: S625.5+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)05-0368-11　　**OSID**:

Spatiotemporal Variation of Crop-canopy Light Intensity and Air Temperature and Humidity in Summer Solar Greenhouse

LÜ Huanhuan　NIU Yuanyi　HAN Yuxiao　LI Shunda　ZHANG Man　LI Han
(*Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The solar greenhouse structure helps indoor lighting and heat storage, ensuring the normal growth of crops. However, there is variability in environmental parameters at different times and locations in the greenhouse, and they vary with weather and seasons. To reveal the spatiotemporal variation patterns of light intensity, air temperature and humidity in the canopy, an environmental monitoring system based on wireless sensor networks was built. Nodes with environmental information sensing functions such as light intensity, air temperature and humidity were deployed in the crop canopy to analyze the temporal and spatial variation of environmental parameters. Firstly, the inverse distance weighted algorithm was used to construct discrete data surface of canopy light intensity, air temperature and humidity. Secondly, the K-means clustering based on centroid coordinates of the interpolation results was carried out to calculate the position of the feature points of connected and non-connected areas in the greenhouse. Finally, the semi-variogram method was used to analyze the spatiotemporal variability of the monitoring parameters of the interpolation nodes. The experimental results showed that the solar greenhouse in summer presented high temperature and high light in the afternoon. The light intensity at 08:00 and 16:00 was 24.2% and 72.9% of that at 12:00, respectively. The air temperature at 08:00

收稿日期: 2023-09-21　修回日期: 2023-11-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(31971786)
作者简介: 吕欢欢(1997—),女,硕士生,主要从事农业物联网技术应用研究,E-mail: lhh_97@126.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事智慧农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

(27.7℃) was about 6℃ lower than that at 12:00 and 16:00, and the air humidity (90%) was about 30% higher. The maximum light intensity in sunny day was 1.4 times of that in cloudy day and 4.6 times of that in rainy day. The maximum air temperature in sunny day and cloudy day was about 6℃ higher than that in rainy day (29.5℃), and the minimum air humidity were lower than that in rainy day (84%). The solar greenhouse presented high temperature and low humidity in both sunny day and cloudy day, and high humidity and low light in rainy day. The range of light intensity was 10.34 m, and the spatial variability was strong. The spatial variability of air temperature and humidity was weak, and the overall distribution was relatively uniform. The temporal variability of light intensity, air temperature, and air humidity were moderate. The characteristic points and spatial and temporal variation patterns of environmental parameters contributed to the efficient deployment of solar greenhouse sensors and provided a basis for revealing the interaction between crops and the environment.

Key words: solar greenhouse; light intensity; air temperature and humidity; spatiotemporal variation; K-means; WSN

0　引言

随着设施农业生产需求的提升,日光温室面积不断增加,室内空间不断扩大[1-3]。温室内环境不仅受外界环境影响,还受自身结构与室内作物等因素影响[4]。探究温室内光照强度、空气温湿度的时空变化规律,有助于日光温室生产的精细、高效管理[5-7]。实际上,生产者更关注如何用少量的传感器全面地监测温室环境,从而降低环境监测成本,实现节本增效。

目前,温室环境的时空变化规律研究主要借助计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)对温室热环境、蓄热体内部热分布以及空气流动情况进行模拟[8],有助于温室通风、建筑结构设计、小气候环境预测与调控等[9-10]。CFD 的功能性表现突出,但边界条件的获取依赖温室的结构和类型,且存在模拟值与实测值误差的问题[11-12]。但由于日光温室空间尺寸较大,CFD 计算耗时较长[13-14]。综上,研究日光温室内环境参数的日、月、年等长周期高频率数据的时空变化规律,CFD 不是最佳的研究工具。

基于传感器的实测值,对离散数据进行空间插值,可快速获得观测平面内光照强度、空气温度及湿度数据的连续分布,真实反映日光温室环境状况。目前基于空间插值的日光温室环境参数时空变异性分析的研究较少,张军华等[15]采用克里金插值算法,构建日光温室冠层温度场,分析温度时空变化规律,并通过差分进化算法获取温度极值点。该研究在一定程度上优化了温度传感器的部署位置和数目,但未基于温度时空分布规律深入探讨传感器节点的布置间距,且未考虑光照等其他环境因素的耦合作用。宗哲英[16]通过布置大量传感器来监测日光温室内部不同观测平面的环境参数,通过三维矩阵、三次样条插值和函数拟合的方法对数据进行分析,重构了测试区域环境光照强度场、温度场和湿度场。刘琦等[17]采用传感器密集布点方式获取作物冠层处温湿度,并通过 Elman 神经网络预测作物冠层不同位置的温湿度分布及变化。以上研究均借助了无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)技术,WSN 因其低成本、低功耗、自组织等优势,常作为信息监测的基础网络,广泛应用于日光温室环境信息的采集[18-19]。

综上所述,本文构建 WSN 日光温室环境监测系统,获取冠层光照强度、空气温湿度数据,并进行空间插值分析;继而通过聚类算法提取插值结果特征点,为传感器节点的部署位置和数目提供理论依据;同时,基于插值计算结果分析空间变异性,进一步优化传感器节点的部署方案。

1　材料与方法

1.1　实验设计

实验于 2022 年 6 月 23 日至 8 月 17 日在北京市农林科学院实验基地(40°10′55″N,116°27′26″E)日光温室(下沉式半拱形覆膜温室)内进行。温室坐北朝南,东西方向长 50.00 m,南北跨度为 7.00 m,脊高 3.70 m,后墙高 3.00 m,后屋面仰角 30°。前屋面使用聚乙烯薄膜覆盖,后屋面由彩钢板构成,后墙使用水泥砂浆抹面,实心黏土砖砌墙。实验期间为避免高温影响,日光温室内天窗与侧通风口常开(大风、雨天天气时关闭)、西墙中部设置电动排风扇(空气温度达 30℃时自动工作,温度降至 28℃时停止)、配合遮阳网使用(10:00 打开,16:00 收起)。实验期间温室种植作物为辣椒(果期)。如图 1 所示,日光温室内共布置 51 个传感器节点,东西方向排布 17 列,列间隔 3.00 m,南北方向排布 3 行,行间隔 2.00 m。温室东、西、南、北侧边缘处传感器节点分别距壁面 1.75、0.25、1.50、0.50 m。传感器节点与作物冠层位于同一高度平面,且光照传感器无叶

片遮挡。此外,相同的几个节点被放置在温室外,作为气象站数据来源。

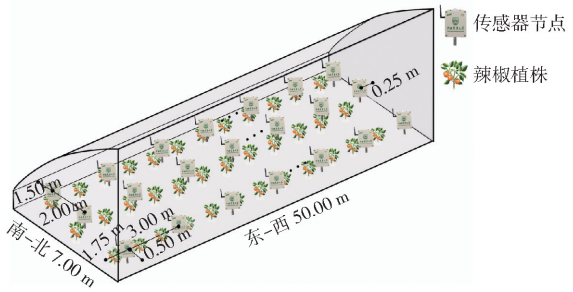


图 1 日光温室传感器节点布置示意图

Fig. 1 Arrangement of sensor nodes in solar greenhouse

实验通过基于 CC2530 处理器的 WSN 监测系统完成环境参数实时采集。系统包含感知层、网络层和应用层 3 部分[20],如图 2 所示,其中,感知层由 51 个传感器节点、1 个协调器和 2 个路由器组成;协调器、路由器、传感器节点基于 ZigBee 协议组成底层无线网络传输系统,实现数据的采集与无线传输[21],其网络拓扑结构为树形。传感器节点分别连接光照强度传感器与空气温湿度传感器,采集周期为 10 min,传感器参数如表 1 所示。网络层主要实现感知层与应用层间的通信,实验通过 4G 数据传输单元(Data transfer unit, DTU)建立 WSN 系统与

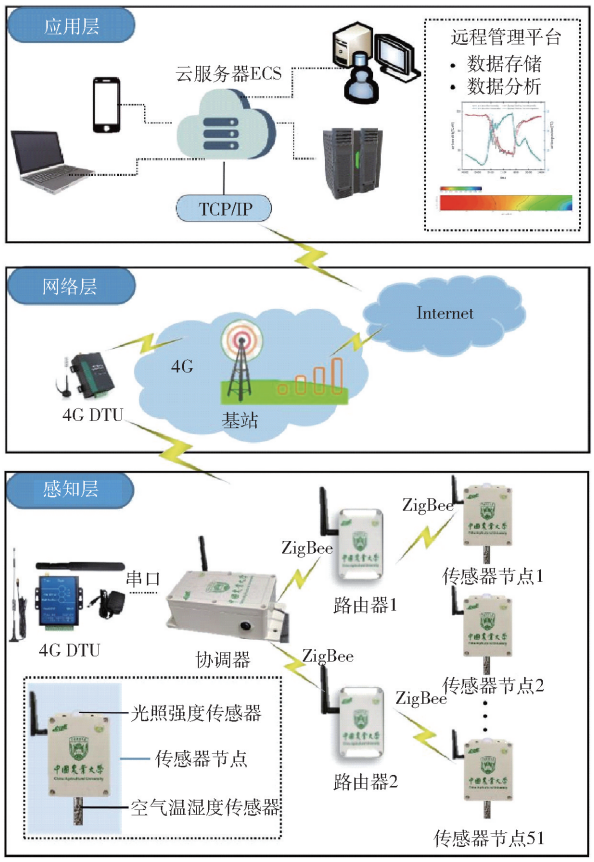


图 2 基于 WSN 的日光温室环境信息自动监测系统

Fig. 2 Solar greenhouse environment information automatic monitoring system based on WSN

云服务器(Elastic compute service, ECS)间的通信。其中,4G DTU 设置为透明传输,遵循 TCP/IP 协议。应用层主要实现用户的远程管理功能,服务器、手机、便携式计算机等均可访问云服务器 ECS。

表 1 传感器参数

Tab. 1 Parameters of sensors

测量参数	产品型号	量程	精度
光照强度	MAX44009	0 ~ 200 000 lx	0.01lx
空气温度	SHT30	-40 ~ 120℃	±0.3℃
空气相对湿度	SHT30	0 ~ 100%	±3%

1.2 数据处理

1.2.1 数据处理流程

采用 WSN 日光温室环境信息监测系统,分析 2022 年 6 月 23 日至 8 月 17 日间的光照强度与空气温湿度数据。如图 3 所示,数据分析处理过程包括:①数据预处理。完成异常值剔除、卡尔曼滤波、一阶差分滤波。②反距离加权(Inverse distance weighted, IDW)插值计算。将离散数据生成连续的数据曲面。③K-means 聚类。结合质心坐标,在空间上对 IDW 插值结果进行二维 K-means 聚类;在时间上对二维中心坐标再次进行聚类,计算中心点坐标,即代表性特征点。④时空变异性分析。包括特征点的光照强度与空气温湿度的时间变化规律分析、插值节点环境参数的空间变异性分析,以及时间变异性分析。

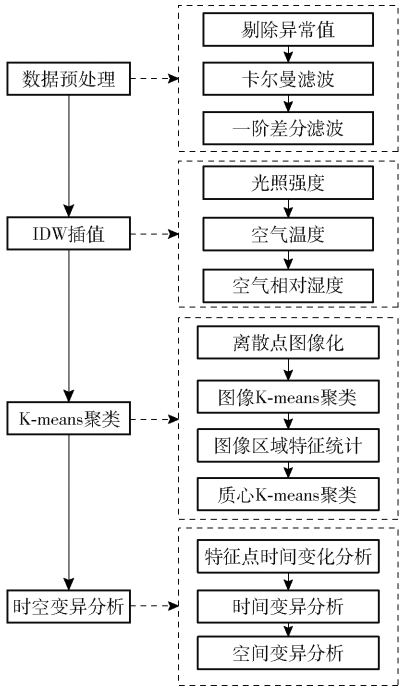


图 3 数据处理流程框图

Fig. 3 Block diagram of data processing flow

1.2.2 数据预处理方法

首先,消除系统测量的异常值,如传感器测量满

量程值等。传感器采集的数据，受噪声干扰会造成信号变形、失真，常采用滤波方法降低噪声干扰[22]。卡尔曼滤波利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计[23-24]。本文涉及的环境参数测量均为一维线性系统，采用线性卡尔曼滤波算法进行数据处理的状态方程和控制方程分别为

$$\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(t-1)+\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{W}(t-1) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Z}(t)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}(t) \tag{2}$$

其中　$\boldsymbol{A}=1.00$　$\boldsymbol{\Gamma}=1.00$　$\boldsymbol{H}=1.00$

式中　$\boldsymbol{X}(t)$——t 时刻真实值，一维变量

$\boldsymbol{Z}(t)$——t 时刻观测值

$\boldsymbol{A}$——状态转移矩阵

$\boldsymbol{\Gamma}$——控制输入矩阵

$\boldsymbol{H}$——状态观测矩阵

$\boldsymbol{W}(t)$——过程噪声

$\boldsymbol{V}(t)$——测量噪声

过程噪声方差为 Q，测量噪声方差为 R。对于温度传感器，$R=0.09$，$Q=0.05$；对于湿度传感器，$R=9.00$，$Q=1.00$；对于光照强度传感器，$R=10.00$，$Q=1.00$。

计算偏差 $P(t|t-1)=P(t-1)+Q$，卡尔曼增益 $K=\dfrac{P(t|t-1)}{P(t|t-1)+R}$，得到卡尔曼估计值 $\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{X}(t-1)+K(\boldsymbol{X}(t)-\boldsymbol{X}(t-1))$。

光照强度易受云层遮挡等外界条件干扰，存在较大瞬时波动幅度[25]。一阶差分对时间序列进行处理[26]，通过差分计算寻找超过阈值点的数据，用相邻前后 2 次数值的均值进行替代，从而达到滤波效果。本实验中阈值设置为 10 000 lx。空气温湿度在连续采集周期内数值较为稳定，无明显瞬时干扰，无需进行一阶差分滤波。

数据预处理中异常数据剔除、卡尔曼滤波与一阶差分滤波均通过程序实现，处理过程包括：①异常数据筛选，剔除满量程值。②卡尔曼滤波，消除随机噪声的干扰。③一阶差分滤波，消除光照强度脉冲信号。

为进一步平滑数据，对光照强度、空气温度和空气相对湿度相邻 3 组数据求平均，将时间间隔扩大至 30 min。对于光照强度，本研究选择 05:00—19:00 时间段的数据；空气温湿度选择全天数据进行分析。综上，共筛选出 1 392 组光照强度，2 304 组空气温度和空气相对湿度，每组数据均由 51 个传感器节点同步采集。

1.2.3　IDW 插值方法

基于 IDW 插值方法分析 51 个传感器节点的数据。IDW 内插单元需要对邻近区域采样点进行均值计算，样本点在空间分布上需要满足均匀分布，并且密集程度应满足在分析中足以反映局部表面变化[27]。日光温室内光照强度、空气温湿度传感器分布均匀，满足条件。

IDW 插值方法以插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均，离插值点越近的样本点被赋予的权重越大[28]，具体计算公式为

$$Z_0=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{Z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^m}} \tag{3}$$

式中　Z_0——点 0 的估计值

Z_i——控制点 i 的值

d_i——控制点 i 与点 0 间的距离

n——估计中控制点数目

m——指定的幂

通过对邻近区域的每个采样点值平均运算获得内插单元值。

插值计算程序参数设置如下：网格化算法为 IDW，权为 2，平滑系数为 3，各向异性比率为 1，角度设置为 0。

1.2.4　K-means 聚类选取特征点

利用聚类算法计算 IDW 插值结果的聚类中心，为夏季日光温室内传感器安装数目和安装位置提供理论依据。K-means 算法是基于距离的聚类算法，通过计算目标数据集与簇类中心之间的距离将数据分类，最大限度地提高簇内的相似性并且减少簇间的相似性[29]。本研究选择 K-means 算法进行离散网格数据聚类，算法流程如图 4 所示。

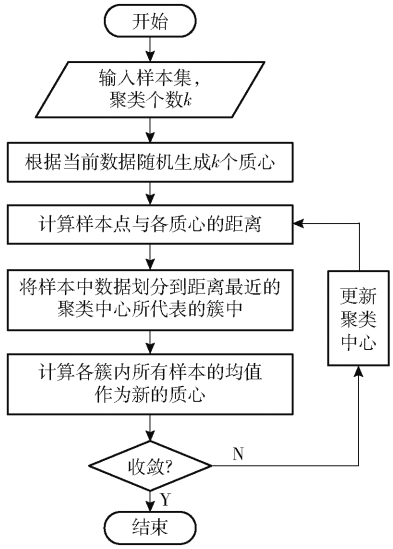


图 4　K-means 算法流程图

Fig. 4　Flowchart of K-means algorithm

将 IDW 插值点的计算值作为像素点的亮度信息,插值点坐标作为像素点位置,从而转换为 101 像素×11 像素的图像数据集∅,将∅划分为 k 个互不相交的子集 Γ_i,N_i 为第 i 类聚类 Γ_i 中的样本数目,m_i 为该类别下的样本均值[30-31],即

$$m_i = \frac{1}{N_i}\sum_{y\in\Gamma_i} y \tag{4}$$

将 Γ_i 中的各样本 y 与均值 m_i 间的欧氏距离作为代价函数

$$J_e = \sum_{i=1}^{k}\sum_{y\in\Gamma_i} \| y - m_i \|^2 \tag{5}$$

代价函数 J_e,表示将 k 个聚类中心点(m_1,m_2,…,m_k)代替 k 个样本集(Γ_1,Γ_2,…,Γ_k)进行度量时得到的总误差平方和。

令 J_e 处于极小值的聚类中心是基于误差平方和原则的最佳效果。经上述聚类得到聚类中心点坐标云图,对平面坐标进行二维 K-means 聚类,计算光照强度、空气温度和空气相对湿度的特征点坐标。

1.2.5 时空变异分析

基于 K-means 聚类特征点分析光照强度、空气温度及相对湿度的时间变化规律,并对参数的空间变异性与时间变异性进行分析。

空间变异性分析可量化空间结构,优化传感器节点的布置间距与数量。半变异函数分析法是常用的空间变异分析方法,基于区域化变量理论[32],反映了变量在一定空间尺度上的变异特征和相关程度。半变异函数[33]可表示为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i+h))^2 \tag{6}$$

式中 $\gamma(h)$——半变异函数

$Z(x_i)$、$Z(x_i+h)$——x_i、x_i+h 位置上的样本值

h——两样本点在空间位置上的间隔

$N(h)$——间距为 h 时所有样本点的成对数目

常见的半变异函数模型有球状模型、指数模型、高斯模型等[34],本研究采用指数模型,其模型数学表达式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h=0) \\ C_0 + C\left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right) & (h>0) \end{cases} \tag{7}$$

式中 a——变程

C_0——块全值,随机变异 h 为 0 时的半方差

C——结构变异性

C_0+C 为基台值,是整个空间系统内总的变异,随着采样间距 h 的增大,半变异函数最终达到一个相对稳定的常数值,当函数值超过基台值后,则不存在空间相关性;a 是当函数值达到基台值时对应的样本间距[35]。通过非线性拟合得到半变异函数模型的参数估计值。

使用变异系数(Coefficient of variation,C_v)衡量参数的时间变异性[36],并通过测量参数标准差 σ 与均值 μ 比值百分数来表示[37],其数学表达式为

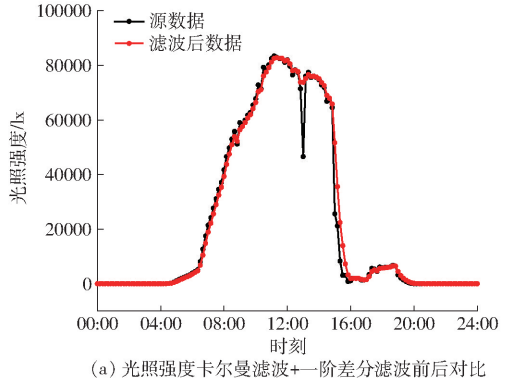
$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}\times 100\% \tag{8}$$

判断时间变异性标准为:$C_v<10\%$ 为弱变异,$10\%\leqslant C_v\leqslant 100\%$ 为中等变异,$C_v>100\%$ 为强变异[38]。

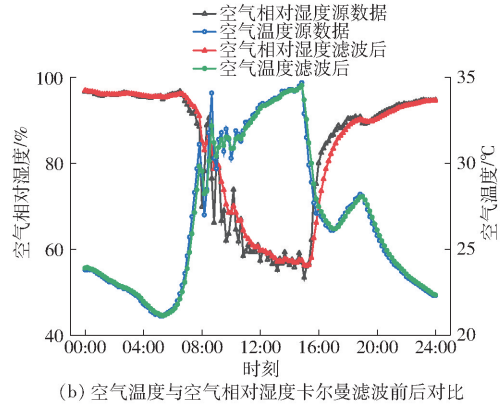
2 结果与讨论

2.1 数据预处理

为准确分析夏季生产的日光温室环境的时空变异性,首先通过数据预处理滤除异常数据点。随机选取 1 号传感器节点 6 月 23 日的测量数据为例,光照强度曲线在午间存在明显波谷,高温时段打开的遮阳网对传感器所接收的光线有较大影响,使得该时段内光照强度观测值骤减。此外,多云天气下短时云层遮挡对连续观测也存在较大影响。图 5a 表明,卡尔曼滤波和一阶差分滤波消除了光照强度的噪声干扰;图 5b 表明,经卡尔曼滤波处理后,空气温度和空气相对湿度曲线平滑,一定程度减少了噪声影响。



(a) 光照强度卡尔曼滤波+一阶差分滤波前后对比



(b) 空气温度与空气相对湿度卡尔曼滤波前后对比

图 5 数据预处理结果

Fig. 5 Data preprocessing results

2.2　IDW 插值分析

基于光照强度、空气温度和空气相对湿度数据的插值结果，分析温室环境的时空分布情况。图 6 显示了 6 月 23 日 14:00 温室环境的可视化结果，当空气温度越高时，则该区域对应的空气相对湿度越低，反之则越高。从空间分布来看，空气温度和空气相对湿度的差异主要体现在东西方向，而光照强度的差异分布体现在南北方向，呈南高北低趋势。综合温室结构及夏季管理等因素，光照强度受到温室采光曲面曲率变化的影响，所以其差异主要体现在南北方向；空气温湿度受到温室结构影响，从日间积温角度来看，山墙遮挡光照，西侧墙体低，环境空气温度低，此外，空气温湿度还与通风扇有关，通风扇位于西墙中部，综上，空气温度和空气相对湿度的差异主要体现在东西方向。

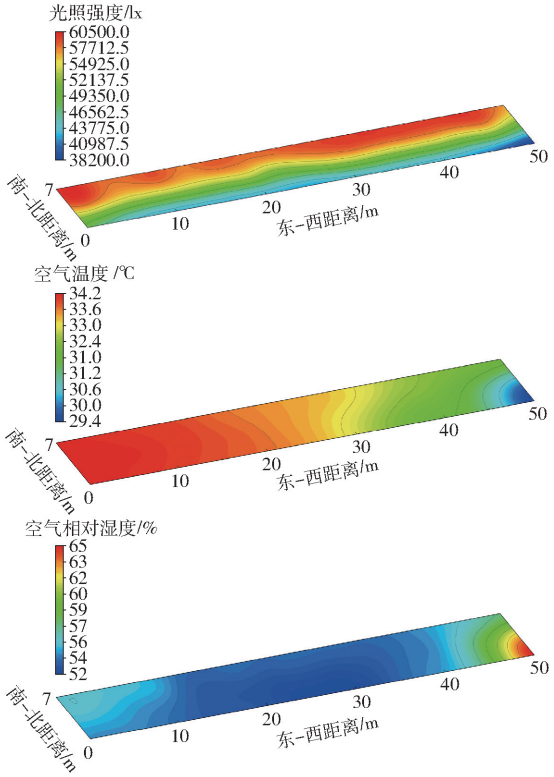
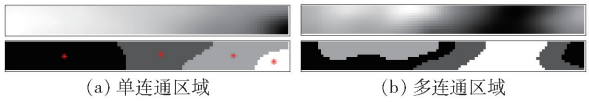


图 6　IDW 插值结果可视化

Fig. 6　Visualization of IDW interpolation

2.3　K-means 聚类选取特征点

为进一步量化分析温室环境的时空变异性，通过聚类分析提取温室环境数据的特征点。将插值结果转换为灰度图像，如图 7a 所示，红色星号标记为聚类中心。当同一簇内存在多个连通区域时，如图 7b 所示，传统分析方法所得到的聚类中心位于连通区域外。本文通过区域属性计算得到了多连通区域的聚类中心，将 K-means 聚类结果生成 4 幅二值图像，同时分别计算区域属性，得到同一聚类类别的多个质心，如图 8 所示，进而通过代表性质心作为该区域的聚类中心。



(a) 单连通区域　　(b) 多连通区域

图 7　灰度化与 K-means 聚类效果

Fig. 7　Grayscale and K-means clustering



图 8　K-means 聚类结果二值化图像区域特征属性统计

Fig. 8　Features of binary images of K-means clustering results

经以上数据分析，基于质心坐标集合进行二维 K-means 聚类分析，结果如图 9 所示。图中横纵坐标分别代表聚类中心点在观测平面东西方向和南北方向上的二维坐标，图中散点代表不同时刻下插值结果的聚类中心，基于散点二维坐标再次进行聚类分析，得到具有时空代表性的聚类中心，如图 9 中星号所示，光照强度的特征点坐标为（4.50 m，2.70 m）、（12.20 m，4.45 m）、（24.87 m，4.16 m）、（40.28 m，2.28 m），空气温度的特征点坐标为（5.65 m，4.24 m）、（16.92 m，3.24 m）、（27.35 m，3.42 m）、（40.52 m，3.97 m），空气相对湿度的特征点坐标为（6.23 m，3.77 m）、（16.80 m，3.71 m）、（31.65 m，3.76 m）、（43.63 m，3.57 m）。

2.4　时空变异

基于光照强度、空气温度和空气相对湿度的插值结果和特征点，探究不同天气（晴天、阴天、雨天）

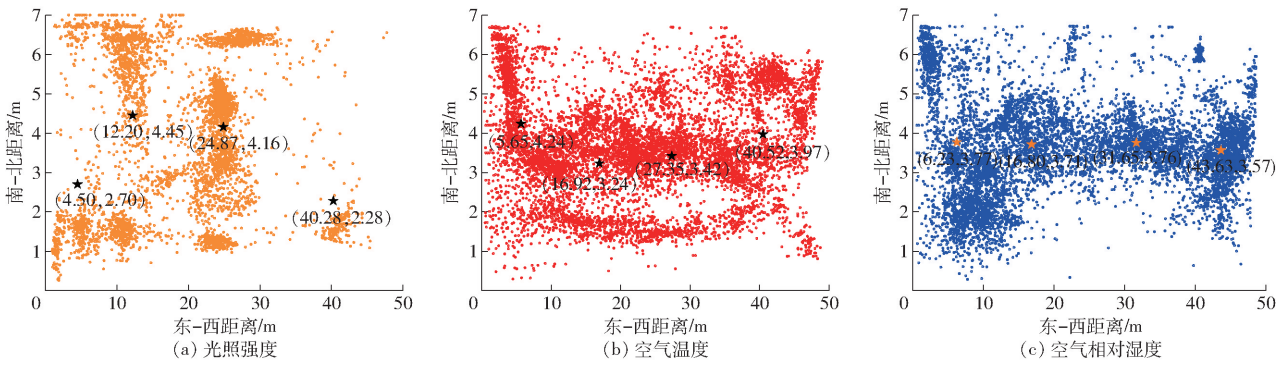


图 9　聚类中心云图及特征点坐标

Fig. 9　Cluster center cloud maps and feature point coordinates

及不同时刻条件下(08:00、12:00、16:00)的温室环境变化规律,通过半变异函数分析方法,分析日光温室冠层平面内光照强度、空气温度和空气相对湿度的相关性与变异性,从而揭示温室环境的时空变异性,优化温室传感器部署的数目与间距。

2.4.1 特征点时间变化分析

绘制特征点光照强度、空气温度和空气相对湿度随测量时间变化的点线图,如图 10 所示,每天对应数据的时刻一定,均为 08:00、12:00 和 16:00。横坐标表示数据连续测量时间。相同时刻下,不同特征点的光照强度、空气温度及相对湿度曲线变化趋势接近,光照强度越高时,空气温度越高、空气相对湿度越低。图 10a 表明,12:00 对应的光照强度平均高于 16:00,而 16:00 对应的光照强度平均高于 08:00;相较于 12:00 与 16:00,08:00 光照强度方差更小、极差更小、波动更小;表 2 数据计算得出,08:00、16:00 时特征点光照强度均值分别为 12:00 时的 24.2%、72.9%。图 10b、10c 显示,相较于 12:00 与 16:00,08:00 时空气温度最低,空气相对湿度最高,极差与方差最小,曲线变化最为平缓。对于空气温度与空气相对湿度,12:00 与 16:00 的曲线变化趋势接近,且差值小。08:00、12:00 和 16:00 对应的空气温度均值分别为 27.7、33.1、33.9℃,空气相对湿度均值分别为 90%、65% 和 58%。

绘制晴天(2022 年 6 月 24 日)、阴天(2022 年 7 月 19 日)、雨天(2022 年 7 月 3 日)的光照强度、空气温度及相对湿度的变化曲线,及对应天气下气象站数据,如图 11、12 所示。相同天气条件下,不同特征点的光照强度、空气相对湿度和空气温度变化趋

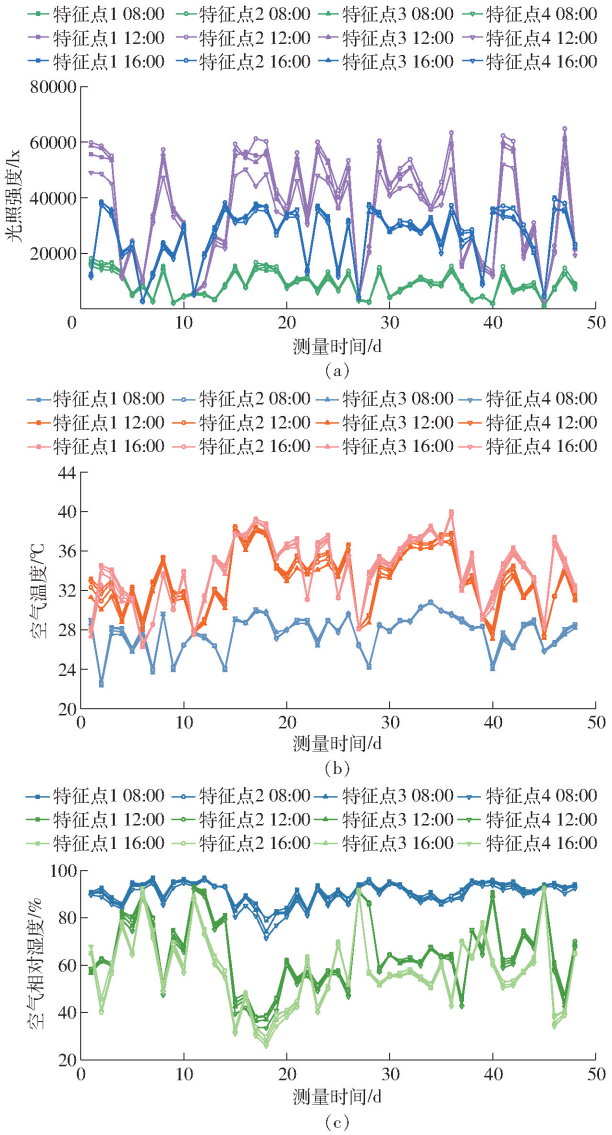


图 10 基于特征点的温室环境变化曲线

Fig. 10 Time variation curves of greenhouse environment based on feature points

表 2 不同时刻下温室环境参数统计结果

Tab. 2 Statistics of environmental parameters at different times

时刻	特征点	光照强度			空气温度			空气相对湿度		
		均值/lx	极差/lx	方差/lx^2	均值/℃	极差/℃	方差/℃^{2}	均值/%	极差/%	方差/%^{2}
08:00	1	8 533.57	16 039.52	4 282.57	27.8	8.1	1.9	91	18	4
	2	9 372.49	17 098.57	4 783.37	27.6	8.3	1.9	91	17	4
	3	8 802.26	15 617.35	4 384.83	27.6	8.4	1.9	90	22	5
	4	8 334.89	14 391.85	4 233.38	27.7	8.2	1.9	89	25	5
12:00	1	36 192.84	58 315.76	17 922.75	33.4	11.1	3.1	66	55	15
	2	38 529.07	61 484.70	19 004.10	33.0	10.9	3.0	65	55	15
	3	36 811.78	57 792.89	18 094.02	32.7	11.0	3.0	64	57	15
	4	32 756.76	51 207.37	15 263.15	33.3	11.0	3.0	63	59	16
16:00	1	26 722.06	37 202.71	10 490.74	34.2	13.3	3.4	58	63	15
	2	27 010.17	36 534.65	10 366.48	33.8	13.2	3.4	58	62	15
	3	26 094.45	35 519.43	10 009.32	33.6	13.6	3.4	57	65	15
	4	25 397.08	34 695.84	10 075.80	34.0	13.3	3.4	57	66	15

势一致，温室内及室外的环境变化趋势也一致；在不同天气下，温室内光照强度、空气温度及相对湿度曲线变化趋势存在差异。由图 11a 可知，晴天日间温室光照强度变化曲线高于阴天和雨天，晴天光照条件较好。从表 3 可知，温室晴天最大光照强度（59 313.08 lx）是阴天（42 806.41 lx）的 1.4 倍、雨天（12 583.79 lx）的 4.6 倍。温室最高空气温度晴天（35.2℃）与阴天（35.9℃）接近，高于雨天（30.0℃）约 6℃，阴天、晴天和雨天温室最小空气相对湿度分别为 33%、40% 和 84%。由图 11b、11c 可知，夜间温室内环境表现为低温、高湿。相较于晴天与雨天，阴天日间空气温度更高（阴天数据采集日期晚于晴天近 20 d，外界气候更加炎热）。雨天温室表现为高相对湿度（92%）、低光照强度（5 088.96 lx），不利于作物生长。

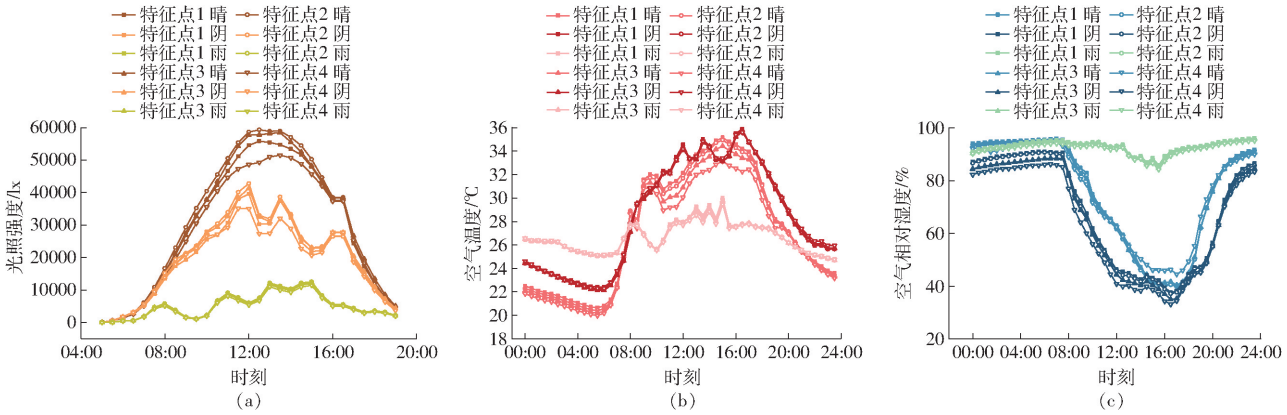


图 11　不同天气下温室环境参数变化曲线

Fig. 11　Variation curves of greenhouse environment parameters under different weather

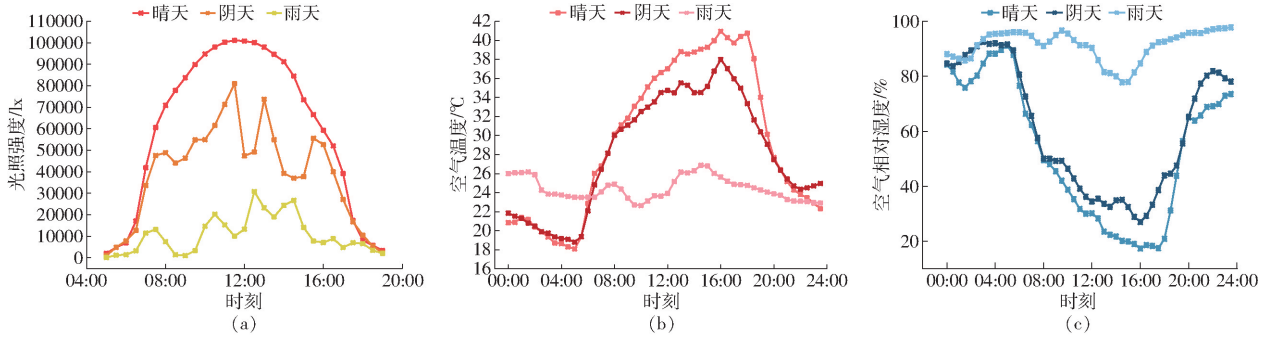


图 12　不同天气下室外环境参数变化曲线

Fig. 12　Variation curves of outdoor environment parameters under different weather

表 3　不同天气条件下温室环境参数统计结果

Tab. 3　Statistics of environmental parameters under different weather conditions

天气	特征点	光照强度/lx			空气温度/℃			空气相对湿度/%		
		极大值	极小值	均值	极大值	极小值	均值	极大值	极小值	均值
晴天	1	55 868.93	96.50	29 411.74	35.2	20.6	27.5	96	40	75
	2	59 313.08	106.84	31 195.72	35.0	20.4	27.3	95	40	75
	3	58 416.42	94.57	30 448.92	34.4	20.2	27.0	95	40	75
	4	51 460.61	90.40	27 784.97	33.1	20.0	26.5	94	44	75
阴天	1	39 521.57	38.10	19 290.69	35.9	22.4	28.5	91	37	68
	2	42 806.41	35.62	20 461.67	35.8	22.2	28.5	91	37	67
	3	41 281.66	29.16	20 213.25	35.6	22.1	28.5	88	35	65
	4	35 095.99	47.18	18 567.24	35.6	22.3	28.6	86	33	63
雨天	1	11 934.90	8.99	5 049.29	30.0	24.8	26.7	96	86	93
	2	12 583.79	9.64	5 322.98	29.9	24.7	26.6	96	85	93
	3	12 365.84	9.96	5 218.38	29.8	24.7	26.6	96	84	92
	4	11 419.91	9.04	4 765.21	29.5	24.8	26.6	95	84	92

2.4.2　时间变异

采用变异系数衡量温室环境参数的时间变异性，变异系数越大，表明对应参数的波动越大、均匀性越低。基于插值节点环境参数计算实验期间光照强度、空气温度和空气相对湿度的 C_v 最大值分别为 89.4%、16.9% 和 22.0%，最小值分别为 85.2%、

13.8% 和 20.7%,均为中等变异程度。相较于光照强度,空气温湿度表现为较低的变异系数,时间波动较小,整体趋势更为平坦。

2.4.3 空间变异

结合设施作物生长特性,对日间不同时刻(08:00、12:00、16:00)、不同天气(晴天、阴天、雨天)条件的光照强度、空气温度和空气相对湿度的空间变异性进行分析。基于半变异函数拟合方法,计算模型特征参数估计值,根据变程 a 确定传感器布置间距。

结果表明,空气温湿度半变异函数均呈线性,平面内插值节点存在空间相关性,插值节点处空气温湿度表现出良好的稳定性。光照强度半变异函数存在基台值,随着 h 增加,曲线首先呈线性增长趋势,然后趋于水平。

基于指数模型进行非线性回归分析,模型参数估计值如表 4 所示,在指数模型下,变程为 $3a$,不同天气和时间条件下平均变程为 10.34 m。因此,在监测夏季日光温室光照强度时空分布时,传感器部署间距应小于 10.34 m,保证数据典型、有效。

表 4 不同天气、时刻下光照强度半变异函数参数估计

Tab.4 Parameter estimation of semi-variogram of light intensity under different weather and time

天气	时刻	参数估计值			决定系数
		a/m	C_0	C	R^2
晴天	08:00	3.47	0	3.36×10^6	0.816
	12:00	2.70	0	3.02×10^7	0.866
	16:00	3.57	0	2.38×10^7	0.861
阴天	08:00	3.38	0	2.34×10^6	0.870
	12:00	3.11	0	1.31×10^7	0.916
	16:00	5.84	0	1.23×10^7	0.920
雨天	08:00	2.96	0	2.82×10^5	0.788
	12:00	2.98	0	3.01×10^5	0.790
	16:00	3.00	0	2.65×10^5	0.788

3 结论

(1)利用反距离插值算法获得了温室环境参数的连续插值曲面,通过基于质心坐标的 K-means 聚类算法,得到了温室内连通及非连通区域环境表示性特征点,特征点的数目与空间坐标为夏季日光温室内传感器部署提供了参考。

(2)采用半变异函数分析了温室环境参数的空间变异性,与空气温湿度相比,光照强度的空间变异性更强,变程为 10.34 m,传感器部署间距应小于变程。同样,变异系数分析也表明光照强度具有较高时间变异性,但三者均为中等变异程度。未来可考虑环境参数垂直方向的时空分布,并深入研究不同季节、不同年份下环境参数的时空变异性。

(3)日光温室 12:00 与 16:00 表现为高温、高光照、低湿,08:00 表现为低温、低光照、高湿。晴天与阴天下日光温室呈高温与低湿状态,雨天呈高湿与低光照状态。晴天与阴天最高空气温度高于雨天约 6℃,且空气湿度远低于雨天。不同天气光照强度相差较大,晴天最大,分别为阴天与雨天的 1.4 倍、4.6 倍,适当补光可弥补光照不足,保证作物的光合作用。

参 考 文 献

[1] 孙煜. 墙体结构对下沉式日光温室热湿环境的影响[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2020.
SUN Yu. The influence of wall on the thermal and humid environment of sunken solar greenhouse[D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2020. (in Chinese)

[2] 任杰. 基于 ANSYS 的大跨度薄膜温室结构有限元分析及优化设计[D]. 南京:南京农业大学,2020.
REN Jie. Finite element analysis and optimization design of a large-span film greenhouse structure based on ANSYS[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[3] 方慧,张义,伍纲,等. 大跨度保温型温室的热环境模拟[J]. 中国农业气象, 2019,40(3):149-158.
FANG Hui, ZHANG Yi, WU Gang, et al. Modeling of thermal climate in a large-scale insulation solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(3):149-158. (in Chinese)

[4] ZHANG Guoxiang, FU Zetian, YANG Mingsong, 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, 2019,162:337-347.

[5] ZHOU Chengbo, ZHANG Yubin, LIU Wenke, et al. Light quality affected the growth and root organic carbon and autotoxin secretions of hydroponic lettuce[J]. Plants, 2020, 9(11):1-16.

[6] 韦婷婷, 杨再强, 王明田, 等. 高温与空气湿度交互对花期番茄植株水分生理的影响[J]. 中国农业气象, 2019, 40(5):317-326.
WEI Tingting, YANG Zaiqiang, WANG Mingtian, et al. Effects of high temperature and different air humidity on water physiology of flowering tomato seedings[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(5): 317-326. (in Chinese)

[7] 柏萍. 调控空气相对湿度对温室甜瓜和番茄生长、水分状态及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
BAI Ping. Effect of regulation air relative humidity on growth, water status and yield of muskmelon and tomato in greenhouse [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[8] DE LA TORRE-GEA G, SOTO-ZARAZUA G M, LOPEZ-CRUZ I, et al. Computational fluid dynamics in greenhouses: a

review[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(77):17651 - 17662.
[9] YOON J, SONG H, JANG E S. Computational fluid dynamics analysis of ventilation characteristics with various design parameters in single-span greenhouses[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020, 2020:1 - 14.
[10] BOURNET P E, ROJANO F. Advances of computational fluid dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: research, applications and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201(5):107277.
[11] 吴晓阳. 基于 CFD 热环境仿真的节能日光温室结构优化研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2022.
WU Xiaoyang. Structural optimization of energy-saving solar greenhouse based on CFD thermal environment simulation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[12] FATNASSI H, BOULARD T, PONCET C, et al. Computational fluid dynamics modelling of the microclimate within the boundary layer of leaves leading to improved pest control management and low-input greenhouse[J]. Sustainability, 2021, 13(15):8310.
[13] 侯思宇. 基于 CFD 模型的设施温室小气候环境预测和控制研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
HOU Siyu. Research and prediction on the control of greenhouse microclimate environment prediction based on CFD model [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[14] 张加乐. 面向求解三维复杂流动问题的 GPU 并行算法及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
ZHANG Jiale. Research on GPU-accelerated numerical methods and their application for three-dimensional complex flows[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
[15] 张军华,沈楷程,陈丹艳,等. 基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7):335 - 342.
ZHANG Junhua, SHEN Kaicheng, CHEN Danyan, et al. Spatio-temporal variation of canopy characteristic temperature in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 335 - 342. (in Chinese)
[16] 宗哲英. 温室群环境参数监测系统与参数时空分布规律研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
ZONG Zheying. Study on monitoring system of greenhouse group and the spatial and temporal distribution of the environmental parameters[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[17] 刘琦,塔娜,焦巍,等. 日光温室作物冠层温湿度时空分布及预测模型[J]. 北方园艺, 2019(17):56 - 65.
LIU Qi, TA Na, JIAO Wei, et al. Spatial temporal distribution and prediction model of canopy temperature and humidity in greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2019(17):56 - 65. (in Chinese)
[18] 徐立鸿,早明华,蔚瑞华,等. 温室无线传感器网络节点发射功率自适应控制算法[J]. 农业工程学报,2014,30(8):142 - 148.
XU Lihong, ZAO Minghua, WEI Ruihua, et al. Adaptive control algorithms of transmitting power for greenhouse WSN nodes [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8):142 - 148. (in Chinese)
[19] OUSSAMA G, RAMI A, TAREK F, et al. Fast and intelligent irrigation system based on WSN[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 13: 5086290.
[20] OJHA T, MISRA S, RAGHUWANSHI N S. Wireless sensor networks for agriculture: the state-of-the-art in practice and future challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118:66 - 84.
[21] 郭志鹏, 李娟, 赵友刚, 等. 物联网中的无线传感器网络技术综述[J]. 计算机与应用化学,2019,36(1):72 - 83.
GUO Zhipeng, LI Juan, ZHAO Yougang, et al. Review of wireless sensor networks technology in Internet of things[J]. Computers and Applied Chemistry, 2019, 36(1): 72 - 83. (in Chinese)
[22] ZHANG Yang, WANG Rong, LI Shouzhe, et al. Temperature sensor denoising algorithm based on curve fitting and compound Kalman filtering[J]. Sensors, 2020, 20(7):1959.
[23] SIMON D. Kalman filtering with state constraints: a survey of linear and nonlinear algorithms[J]. IET Control Theory and Applications, 2010,4(8):1303 - 1318.
[24] 李兆钢. 水泥回转窑的温度估计研究[D]. 济南:济南大学,2021.
LI Zhaogang. Temperature estimation study of cement rotary kiln[D]. Ji'nan: Unversity of Jinan, 2021. (in Chinese)
[25] 武莹. 新型大跨度非对称塑料大棚温光环境性能评价研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
WU Ying. Study on temperature and light performance evaluation of new large span asymmetric plastic greenhouses[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[26] 黄健熙,马鸿元,田丽燕,等. 基于时间序列 LAI 和 ET 同化的冬小麦遥感估产方法比较[J]. 农业工程学报,2015, 31(4):197 - 203.
HUANG Jianxi, MA Hongyuan, TIAN Liyan, et al. Comparison of remote sensing yield estimation methods for winter wheat based on assimilating time-sequence LAI and ET[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 197 - 203. (in Chinese)
[27] 李海涛,邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用,2019,28(7):1 - 8.
LI Haitao, SHAO Zedong. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7):1 - 8. (in Chinese)
[28] FATHOLOLOUMI S, VAEZI A R, ALAVIPANAH S K, et al. Comparison of spectral and spatial-based approaches for mapping the local variation of soil moisture in a semi-arid mountainous area[J]. Science of the Total Environment, 2020, 724: 138319.
[29] 马婵媛. 基于 K-Means 的分布式文本聚类系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.

MA Chanyuan. Design and implementation of distributed text clustering system based on K-Means[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
[30] 李玉功. K-means 聚类算法的改进及其在彩色图像分割中的应用[D]. 合肥:安徽大学,2018.
LI Yugong. Improvement of K-means clustering algorithm and its application in color image segmentation[D]. Hefei: Anhui University, 2018. (in Chinese)
[31] 武沛多. 基于聚类与图割算法的图像分割方法[D]. 北京:华北电力大学,2020.
WU Peiduo. Image segmentation method based on clustering and graph cut algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)
[32] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 94(3):95 - 111.
[33] SHUKLA M K, LAL R, VANLEEUWEN D. Spatial variability of aggregate-associated carbon and nitrogen contents in the reclaimed minesoils of Eastern Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6):1748 - 1757.
[34] 张涛. 变异函数模型的对比优选研究[D]. 南京:南京大学,2017.
ZHANG Tao. Optimization of spatial semi-variogram models[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)
[35] 叶露萍. 黄土高原土壤团聚体-水-植被的时空变异分析[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
YE Luping. Spatio-temporal variations of soil aggregate - water - vegetation on the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2020. (in Chinese)
[36] 李晓萍. 压砂地土壤水分的时空稳定性特征研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
LI Xiaoping. Study on spatial-temporal stability characteristics of soli moisture in gravel-sand mulched field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
[37] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2015,31(17):144 - 151.
ZHAO Wenju, LI Xiaoping, FAN Yanwei, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):144 - 151. (in Chinese)
[38] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008, 24(7):39 - 43.
FU Bin, WANG Yukuan, ZHU Bo, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7):39 - 43. (in Chinese)

(上接第 343 页)

[41] ZHANG M, YU G, ZHUANG J, et al. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 803 - 816.
[42] JIANG S Z, HUANG Y W, ZHAO L, et al. Effects of clouds and aerosols on ecosystem exchange, water and light use efficiency in a humid region orchard[J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 152377.
[43] HAN J, GUO C, YE S, et al. Effects of diffuse photosynthetically active radiation on gross primary productivity in a subtropical coniferous plantation vary in different timescales[J]. Ecological Indicators, 2020,115: 106403.
[44] GUI X, WANG L, SU X, et al. Environmental factors modulate the diffuse fertilization effect on gross primary productivity across Chinese ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148443.
[45] 高源,律江,李春征,等. 大气气溶胶对北京杨树人工林生态系统生产力的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4892 - 4902.
GAO Yuan, LÜ Jiang, LI Chunzheng, et al. Effects of atmospheric aerosols on the ecosystem productivity of a poplar plantation in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4892 - 4902. (in Chinese)
[46] 刘笑吟,王海明,王钥,等. 节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 271 - 282.
LIU Xiaoyin, WANG Haiming, WANG Yue, et al. Characteristics of rice transpiration and soil evaporation and their proportion variation in water-saving irrigated paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 271 - 282. (in Chinese)
[47] 刘小刚,冷险险,孙光照,等. 基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 236 - 245, 299.
LIU Xiaogang, LENG Xianxian, SUN Guangzhao, et al. Assessment of drought characteristics in Yunnan Province based on SPI and SPEI from 1961 to 2100[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 236 - 245, 299. (in Chinese)
[48] ZHANG T Y, YUE X, UNGER N, et al. Modeling the joint impacts of ozone and aerosols on crop yields in China: an air pollution policy scenario analysis[J]. Atmospheric Environment, 2021, 15: 118216.
[49] AGATHOKLEOUS E, FREI M, KNOPF O M, et al. Adapting crop production to climate change and air pollution at different scales[J]. Nature Food, 2023, 4: 854 - 865.