

吴珩, 范伶俐, 陈璐瑶, 等. 基于 ENVI-met 的广东海洋大学夏季校园小气候特征分析[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 44-53.
WU Heng, FAN Lingli, CHEN Luyao, et al. Analysis of campus microclimate of Guangdong Ocean University in summer based on ENVI-met[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 44-53. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.005. (in Chinese)

基于 ENVI-met 的广东海洋大学夏季校园小气候特征分析

吴珩¹, 范伶俐^{1,2,3}, 陈璐瑶¹, 欧阳思琪¹, 李欣焯¹, 吴丽琴¹, 黄港珍¹, 刘心怡¹, 沈俊炎¹

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学广东省高等学校陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室, 广东 湛江 524088; 3. 中国气象局-广东海洋大学海洋气象联合实验室, 广东 湛江 524088)

摘要: 校园是师生活活动的主要场所, 为研究不同下垫面对人体舒适度的影响, 在广东海洋大学湖光校区选取三种不同性质的下垫面, 开展夏季小气候观测与数值模拟。利用 Origin、SPSS 和 ENVI-met 软件进行数据处理。研究表明: (1) 在校园现有的绿化和建筑布局下, 风对小气候的影响较大; 夏季无降水时, 通风条件差的少遮荫草地温度高、湿度低, 舒适度较差。(2) 合理密植高大的绿化林, 可以有效降低夏季地面温度。(3) ENVI-met 模型在热带稳定变化的天气条件下模拟效果较好, 能在一定程度上反映校园内区域小气候特征, 其模拟结果可为校园基础设施建设的优化和师生出行提供科学依据。

关键词: 小气候; 校园; 人体舒适度; ENVI-met

中图分类号: P463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0044-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.005

Analysis of campus microclimate of Guangdong Ocean University in summer based on ENVI-met

WU Heng¹, FAN Lingli^{1,2,3}, CHEN Luyao¹, OUYANG Siqu¹, LI Xinye¹, WU Liqin¹, HUANG Gangzhen¹, LIU Xinyi¹, SHEN Junyan¹

(1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Climate, Resource and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. CMA-GDOU Joint Laboratory for Marine Meteorology, Zhanjiang 524088, China)

Abstract Campus is the main place for the activities of teachers and students. In order to study the influence of different underlying surfaces on human comfort, three types of underlying surfaces with different properties are selected in Huguang campus of Guangdong Ocean University to carry out the observation and numerical simulation of microclimate in summer. Origin, SPSS, and ENVI-met softwares are used for data processing. The results are shown as follows. (1) Under the existing greening and building layout of the campus, wind has a great impact on the microclimate. When there is no precipitation in summer, the less shaded grassland with poor ventilation condition has higher temperature, lower humidity, and less comfort. (2) Reasonable dense planting of tall green forest can effectively reduce the ground temperature in summer. (3) ENVI-met model has a good simulation effect under stable

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-11-27

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目(2018YFC1506002); 广东海洋大学本科生创新创业团队项目(CCTD201805); 广东海洋大学大学生国家级创新实验项目(201710566005)

第一作者: 吴珩, 男, 主要研究方向为小气候观测, wuheng1@stu.gdou.edu.cn。

通信作者: 范伶俐, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为气候与气候变化, fanlingli@126.com。

tropical weather conditions, which can reflect the regional microclimate characteristics of the campus to a certain extent. The simulation results can provide scientific basis for the optimization of campus infrastructure construction and the travels of teachers and students.

Key words microclimate; campus; human comfort; ENVI-met

引言

在全球变暖的背景下,随着城市化进程的加快,城市热岛、雾霾增多等问题日益突出^[1],影响着人类的健康。因此如何在现有的基础设施上创造宜人环境,提高人体舒适度,成为亟需解决的问题。校园小气候特征对师生的学习生活有着重要的影响,国内外已有一些相关研究。王亚英等^[2]通过对比分析校外自动气象站和校内各测点的温、湿度资料,明确了绿化环境对校园小气候的影响。德永军等^[3]以内蒙古农业大学几种典型城市下垫面为研究对象,分析其对校园小气候的影响,结果表明园林草地具有改善和调节小气候的作用。杜娇娇^[4]发现绿色基础设施比率高低与校外气象站的温度、湿度观测值有极显著的线性回归关系。张芯蕊^[5]以保定市龙潭公园为例,在现场实测和 ENVI-met 软件数值模拟的基础上,得出植物的栽植对于调节城市热环境起着至关重要作用的结论。胡燕安^[6]以典型严寒地区大学为例,对比分析实测数据和 ENVI-met 软件的模拟数据,得出微气候环境在道路走向与冬季主导风向垂直且建筑长边平行于道路走向时是最优的结论。孙长征等^[7]通过分析气象因素造成的人体反应,阐明人类运动时受到温、压、风等气象要素的影响最大。陈红等^[8]研究校园不同布局形式的绿色空间的小气候特征和人体舒适度,结果表明围合型、行列式、开敞型绿色空间舒适时间依次减少。彭海峰^[9]发现乔木+草类型的植物结构,降温增湿作用最为显著。王颖等^[10]发现校园内密林型草地降温增湿以及对人体舒适作用明显。PERERA et al.^[11]通过实测数据确定热指数,利用 ENVI-met 进行微气候数值模拟,表明绿化树能使大城市的温度显著降低 2.07 °C。另外,岳甲^[12]以杭州学院部分路段为研究对象,也发现了绿化带可以降低空气温度 2.55 °C。在上述有关的小气候研究中,有基于不同学校、不同季节、不同下垫面等获取的小气候实测数据,开展的统计分析研究,也有利用数值模式进行的模拟研究,但针对典型南亚热带的校园小气候特征的研究尚不多见。本研究采用实地观测和模拟两种方法诊断广东海洋大学湖光

校区不同性质下垫面的小气候气象要素特征,并通过对比两种方式所得到的结果,判别 ENVI-met 模型的适用性。实现在已知大气环流条件下,即便不开展校园小气候实地观测,也可以通过数值模拟的方法,预测不同天气、不同下垫面下舒适度的目标,进而指导师生学习生活。

1 试验介绍

1.1 研究区域概述

广东海洋大学湖光校区位于中国大陆最南端的湛江市,地理位置为 21°08'~21°90'N,110°17'~110°18'E,占地约 280 hm²^[13],属南亚热带季风气候,濒临南海,受海洋气候影响,气温日较差小,空气湿润^[14],草木常青,终年无霜雪,炎热的夏季十分漫长。本研究观测点选取在校园中部,观测场地(模拟区域)东高西低,涵盖了大王椰子树、印度紫檀等 5 种校园内常见树种,下垫面以水泥硬化路面、柏油路和草地绿化带为主,上下课时段人员密集,具有植被类型丰富、下垫面性质差异明显和人流量大的特点。

1.2 观测点布置

依据对已有关于小气候研究^[4]的总结,得出影响小气候的因素主要为下垫面类型、植被类型、树木与建筑物遮挡等。将校内不同场所的环境和人流差异作为观测点选取依据,将研究区域确定在桂樟路与艺林路附近(图 1)。

三个观测点自北向南依次分布在南北走向的桂樟路附近,间距约 50 m。1 号观测点位于第三食堂与学生公寓“海云”之间的人行道上,下垫面为岩石地砖和混凝土路面,受周围建筑物和乔木遮挡,仅能接收一小部分太阳辐射,通风条件有限。2 号观测点位于桂樟路与艺林路的十字路口左上侧,下垫面是混凝土,北侧以 10 m 为间距种植了单排行道树,乔木和建筑的遮挡作用有限(太阳高度角较大时),通风条件相对较好,几乎全天都能够接收到太阳直接辐射。3 号观测点位于学生公寓“海虹”东侧的草坪中心,场地宽敞,四周有密集的乔木环绕,无树荫遮蔽,但太阳辐射在日出时受周围乔木遮挡。观测点的选取可以体现出不同性质下垫面和遮蔽

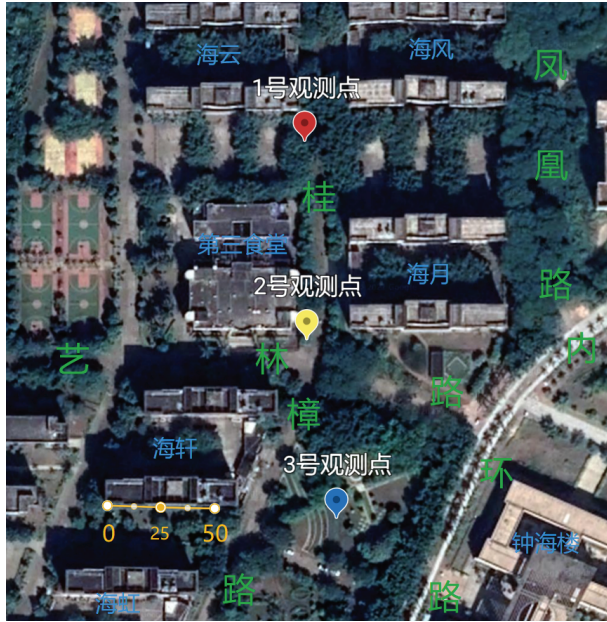


图1 研究区域总平面图(来源于 Google Earth, 数据更新时间:2019年11月)

Fig.1 General plane diagram of research area (the data is from Google Earth and updated in November 2019)

情况对局地小气候的影响,各观测点性质与特点详见表1。

1.3 试验天气背景

按照气候学上的入夏标准:连续5 d 平均气温 $t \geq 22^\circ\text{C}$,湛江市气象局^[15] 官宣,湛江市区2021年3月11日已成功入夏,故此次观测为夏季观测。

观测时间为2021年4月12、14、16、19、22、23日,每日07:30—19:00进行连续观测,总计6 d,挑选出具有代表性的多云(12日)、阴天(14日)、雨天(19日)、晴天(22日)四种天气类型进行研究。观测期间的湛江地区天气及相关参数见表2—4。

1.4 试验仪器及试验区人体舒适度计算

研究采用高精度的MC601六要素一体化微型气象站观测距地1.5 m处的温度、相对湿度、气压、风速四个气象要素。采用定点观测法,在校内各观测点布置测量仪器,采样频率为 $1 \text{次} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

实测数据人体舒适度计算公式如下:

$$I_{\text{HC}} = (1.818t + 18.18)(0.88 + 0.002f) - 3.2v + 18.2 + (t - 32)/(45 - t) \quad (1)$$

表1 观测点概况

Table 1 Overview of observation points

| 观测点编号 | 观测点位置 | 下垫面性质 | 遮蔽情况 | 特点 |
|-------|-------|--------|------|---|
| 1 | 人行道 | 地砖、混凝土 | 多树荫 | 地势西低东高,道路两旁有相对密集的乔木和宿舍楼,仅能接收一小部分太阳辐射 |
| 2 | 路口 | 混凝土 | 无遮蔽 | 地形平坦,北侧有茂密乔木,南侧相对通透,南侧宿舍楼在太阳高度角较大时不影响太阳全天直射 |
| 3 | 草坪中心 | 草皮 | 少树荫 | 场地宽敞明亮,中部略微隆起,以10 cm左右草皮为主,外围有密集绿篱和乔木 |

表2 观测时段湛江地区天气状况

Table 2 Weather conditions of Zhanjiang during observation period

| 时间 | 气象要素 | | | | | | | |
|-------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | 多云(12日) | | 阴天(14日) | | 雨天(19日) | | 晴天(22日) | |
| | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 相对湿度/% | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 相对湿度/% | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 相对湿度/% | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 相对湿度/% |
| 06:00 | 22.5 | 93 | 23.7 | 95 | 23.0 | 88 | 24.2 | 91 |
| 07:00 | 22.5 | 95 | 24.0 | 96 | 23.9 | 87 | 24.5 | 91 |
| 08:00 | 22.8 | 92 | 25.1 | 92 | 24.6 | 86 | 25.5 | 89 |
| 09:00 | 22.9 | 91 | 26.0 | 84 | 24.5 | 84 | 26.7 | 84 |
| 10:00 | 22.9 | 93 | 25.6 | 76 | 24.8 | 85 | 27.2 | 78 |
| 11:00 | 23.1 | 97 | 27.9 | 70 | 25.7 | 83 | 27.2 | 73 |
| 12:00 | 23.3 | 100 | 28.1 | 68 | 24.8 | 79 | 27.5 | 71 |
| 13:00 | 23.5 | 100 | 26.5 | 69 | 26.0 | 84 | 28.5 | 71 |
| 14:00 | 23.9 | 98 | 28.4 | 66 | 26.5 | 77 | 29.0 | 68 |
| 15:00 | 24.7 | 90 | 28.3 | 68 | 25.0 | 82 | 28.2 | 71 |
| 16:00 | 25.6 | 81 | 28.4 | 69 | 24.0 | 88 | 28.0 | 72 |
| 17:00 | 26.3 | 74 | 27.0 | 72 | 24.2 | 92 | 27.3 | 76 |
| 18:00 | 24.2 | 91 | 26.2 | 77 | 24.2 | 92 | 26.5 | 79 |
| 19:00 | 24.0 | 94 | 25.8 | 84 | 23.7 | 91 | 26.1 | 83 |

表3 观测时段相关参数

Table 3 Relevant parameters during observation period

| 日期 | 0~20 cm 土壤温度/°C | 0~20 cm 土壤湿度/% | 室内温度/°C | 总云量 | 低云量 |
|-----|-----------------|----------------|---------|-----|-----|
| 12日 | 24.3 | 87 | 22 | 5 | 4 |
| 14日 | 25.7 | 94 | 23 | 6 | 5 |
| 19日 | 25.7 | 100 | 23 | 8 | 8 |
| 22日 | 26.2 | 63 | 24 | 1 | 1 |

注:云量是用“八分计”方法测量,云布满天空时云量为8。

表4 4月19日降雨时间记载

Table 4 Record of rainfall duration on 19 April

| 时段 | 起止时间 |
|----|-------------|
| 1 | 07:48—08:20 |
| 2 | 11:36—11:50 |
| 3 | 15:12—16:50 |
| 4 | 17:30—20:00 |

其中 t 为温度(单位:°C), f 为相对湿度(单位:%), v 为平均风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

舒适度指数对应的人体感觉如表5所示。

表5 人体舒适度指数等级标准及对应的人体感觉

Table 5 Grade standard of human comfort index and corresponding human body sensation

| 等级 | 分级值 | 人体感觉 |
|----|-----------|---------|
| 1 | <25 | 寒冷,极不舒适 |
| 2 | 25~38 | 很冷,很不舒适 |
| 3 | 38~50 | 偏冷,不舒适 |
| 4 | 50~58 | 偏凉,较舒适 |
| 5 | 58~70 | 最舒适 |
| 6 | 70~75 | 偏暖,较舒适 |
| 7 | 75~79 | 偏热,不舒适 |
| 8 | 79~85 | 炎热,很不舒适 |
| 9 | ≥ 85 | 酷热,极不舒适 |

2 数值模拟方案

2.1 方案目的

采用 ENVI-met 模拟小气候特征^[16],边界层方案要综合考虑多种因素^[17]。本文按照观测场实际情况对模型进行量化,以探究 ENVI-met 对不同天气、不同下垫面条件下校园小气候的模拟效果。

2.2 模型量化

使用 ENVI-met V4.4.6 基础版对观测场所进行模拟,中心位置位于2号观测点西北侧,面积为 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 。在水平方向上设置 50×50 个网格,

分辨率为 5 m 。在垂直方向上,以 1 m 为地势分辨率将地势分成6层,研究区域内最高建筑(学生公寓“海月”和“海风”)的绝对高度为 26 m ,设置分辨率为 2 m 的等间距网格40个。为了确保模型计算稳定性,水平边界设置了 25 m 的边界缓冲带。

利用 BMP 格式建筑图纸作为参照,绘制建筑和交通要素。通过卫星地图对比实际勘测,设置下垫面和植被要素。基于实地调研模拟区域内绿色植物的高度、数量、形态大小和种类等,将具有代表性的乔木分成5类,分别是大王椰子树、印度紫檀、高山榕、龙眼树、芒果树和小型树种;将植物按高度分成 10 cm 草地、 30 cm 地被、 40 cm 绿篱和 60 cm 绿篱等4种;下垫面材料选用可以反映出研究场下垫面的差异性的浅色混凝土、壤质土和地砖混凝土(相关参数见表6)。制得模型如图2所示。

表6 不同下垫面的相关参数

Table 6 Relevant parameters of different underlying surfaces

| 类型 | 高度/m | 粗糙度 | 发射率 | 透射率 | 反照率 |
|-------|------|-------|------|-----|-----|
| 草皮 | 0.1 | — | — | 0.3 | 0.2 |
| 地被 | 0.3 | — | — | 0.3 | 0.2 |
| 绿篱 | 0.4 | — | — | 0.3 | 0.2 |
| | 0.6 | — | — | 0.3 | 0.2 |
| 浅色混凝土 | — | 0.010 | 0.90 | — | 0.2 |
| 壤质土 | — | 0.015 | 0.98 | — | 0.0 |
| 沥青 | — | 0.010 | 0.90 | — | 0.2 |

2.3 模型参数设置

模型主要输入参数包括地理信息、气象条件、土壤条件和模式输出参数等^[18]。本研究选取2021年4月12、14、19、22日06:00作为模拟起始时间,模拟时长为 13 h ,模拟的初始气象参数来源于湛江地面气象观测站(气象边界条件参见表2,附加参数详见表3,环境参数设置参见表7)。输出参数包括温度、湿度、风向、风速等指标,输出间隔为 0.5 h 。

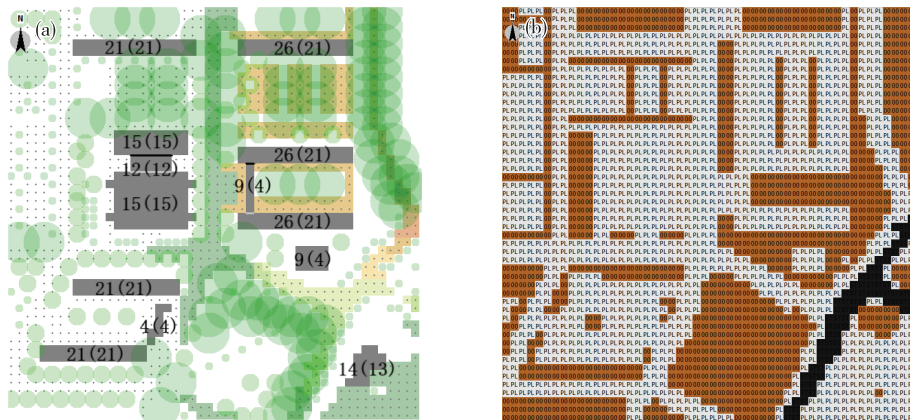


图2 观测区域建模平面图(a 图为模型中地形、建筑和高大植物的分布,其中深灰色矩形块表示建筑物,括号外数字为绝对高度,括号内数字为建筑高度,绿色圆形色斑表示树冠大小,浅绿色方块表示低地势,橙色方块表示高地势;b 图为模型中基础材料的分布,其中浅灰色表示混凝土材质,棕色表示壤质土,黑色表示沥青)

Fig.2 Modeling plane of observation area (Fig.2a is for the distribution of terrain, buildings, and tall plants in the model, in which dark gray rectangular blocks represent buildings, the numbers outside the brackets are absolute height, the numbers inside the brackets are building height, green round spots represent canopy size, light green squares represent low terrain, and orange squares represent high terrain; Fig.2b is for the distribution of base materials in the model, in which light gray represents concrete material, brown represents loamy soil, and black represents asphalt)

表7 模型环境参数设置

Table 7 Environment parameter settings for the model

| 模型模拟位置 (广东省湛江市麻章区) | 地表粗糙长度/m | 起始时间 (北京时间) | 模拟时长/h | 10 m 处风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 风向/($^{\circ}$) |
|-----------------------|----------|--------------------------|--------|---|-------------------|
| 21.15°N, 110.30°E | 0.1 | 2021年4月12、14、19、22日06:00 | 13 | 5.5 | 135 |

3 实测结果与模拟结果分析

3.1 实测结果分析

3.1.1 风速分析

风速是影响人体舒适度的重要指标之一,在闷热的夏季,适宜的风速能够改善人体舒适度。如图3a、b、d所示,在多云、阴天和晴天下风速大小表现为1号观测点<2号观测点,原因是1号观测点处于茂密的树林内部,风受乔木的削弱程度要比位于开阔路口的2号观测点大。再者,由于2号观测点周围的3栋建筑物和不完全遮蔽地面的比热容较小,在相同太阳辐射条件下升温幅度比位于树林内部和草坪上高,这一温差造成的气压差有利于空气运动的产生,使局地风速增大。1号观测点和3号观测点由于受到建筑物或乔木的阻挡,在无局地湍流影响的情况下,大环境风容易被拦截削弱,故在该3类天气状况下1号、3号观测点的风速不大,差异较小。

在雨天天气,2号观测点接收到的太阳直接辐射很弱,难以形成热力差异,3个观测点的风速大小

更多地取决于观测时段的大环境风速。所以由图3c可以看出,3个观测点的风速变化趋势和振幅差异都很小。另外,在14:00左右3号观测点出现了一个风速的极大值,而另外两个观测点没有出现,这可能是周围环境和瞬时风综合影响下出现的偶然现象。

由表8可知,在四种天气下,日平均风速都是2号观测点最大,说明观测点开阔程度对局地风速的影响较大。雨天3个观测点的风速变化差异最小,而晴天3个观测点的风速大小及其变化趋势差异较大,说明在夏季的晴天,校园环境开阔程度对小气候风速的调节更加明显。

3.1.2 温度分析

在白天观测时段,温度变化的根本原因是地面接收到太阳辐射后,以长波辐射的形式向大气提供能量。如图4所示,温度整体变化特征为:日出后,温度先升高再下降,最高温度出现在13:30—14:30时段。由于热力对流旺盛,云量增多导致太阳辐射被云层反射,各观测点在11:30—13:00间降温约 1°C (图4b);07:30—08:30、11:30—12:00、

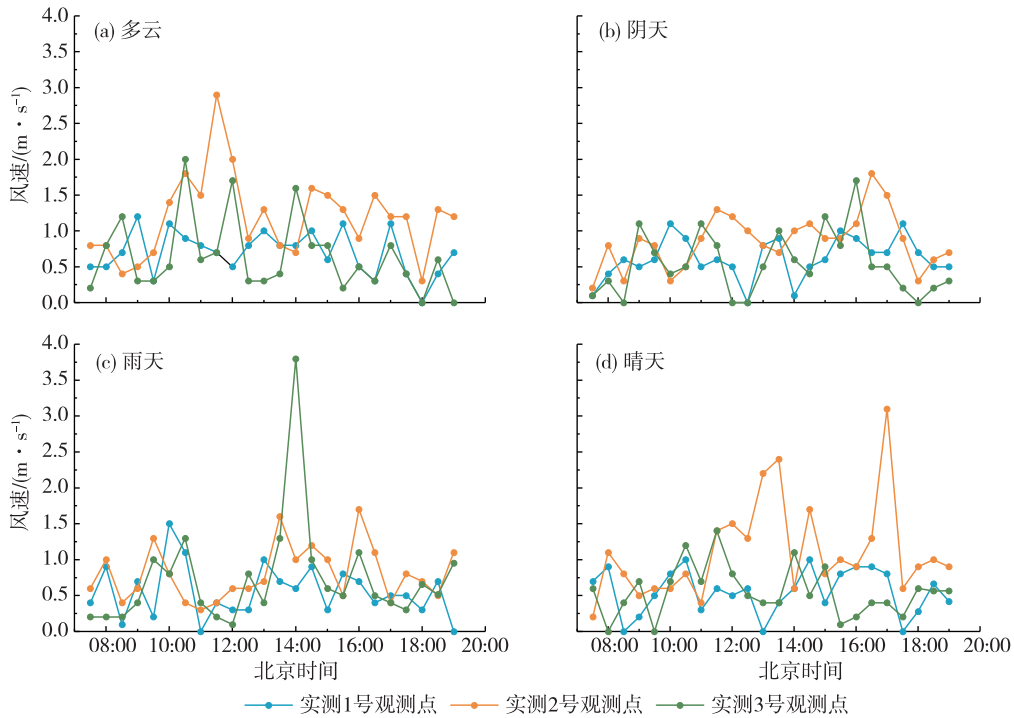


图3 四种天气状况(a.多云,b.阴天,c.雨天,d.晴天)各观测点风速变化

Fig.3 Variation of wind speed at each observation point under 4 weather conditions (a. cloudy, b. overcast, c. rainy, d. sunny)

14:30—16:00 时间段内温度都有小幅的下降趋势(图4c),结合表3可以看出这几个降温时段与降水时段基本吻合,说明地面接收的雨水,在蒸发过程中吸收热量造成了温度下降。

表8 四种天气状况各观测点日平均风速

Table 8 Daily mean wind speed of each observation point under 4 weather conditions

| 观测点 | 风速/(m·s ⁻¹) | | | |
|-------|-------------------------|-----|-----|-----|
| | 多云 | 阴天 | 雨天 | 晴天 |
| 1号观测点 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 2号观测点 | 1.2 | 0.9 | 0.8 | 1.1 |
| 3号观测点 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.6 |

对于不同观测点而言,在同一天气条件下,温度表现为3号观测点>2号观测点>1号观测点的特征。3号观测点周围有较为密集的绿篱和乔木环绕,从图3中可看出3号观测点的风速大小总体上要比2号观测点的小,说明其通风状况较差,不利于热量的扩散,故温度最高。2号观测点周围无建筑物和树荫遮蔽,能够接收到大量的太阳辐射,由于该点位于路口,通风状况良好,能够加快热量交换,温度居中。通过相关分析(表9)表明,温度与风速存在一定的相关性,2号观测点和3号观测点的温

度与风速的相关系数分别为0.622和0.554,均通过了0.05显著性检验。1号观测点位于多树荫地砖混凝土上,受建筑物和树荫遮蔽的共同影响,接收的太阳直接辐射相对较少,所以温度最低。此时风速对其影响小(相关系数仅为0.257)。综上所述可知,遮蔽情况(云量、树荫等)、通风条件为影响温度变化的主要因素。在夏季时,同一天气条件下,温度呈现出少遮荫草地>无遮荫混凝土>遮荫地磚混凝土的特征。

表9 各观测点温度、相对湿度和风速间的 Pearson 相关系数

Table 9 Pearson correlation coefficient between temperature, relative humidity, and wind speed at each observation point

| 观测点 | Pearson 相关系数 | | |
|-------|--------------|--------|----------|
| | 相对湿度与温度 | 风速与温度 | 风速与相对湿度 |
| 1号观测点 | -0.993** | 0.257 | -0.255 |
| 2号观测点 | -0.993** | 0.622* | -0.600** |
| 3号观测点 | -0.973** | 0.554* | -0.524* |

注: * 和 ** 分别表示 P<0.05 和 P<0.01。

3.1.3 湿度分析

雨天的湿度日变化(图5c)与其他3种天气状况下不同。在图5a、b、d中,最大相对湿度出现在

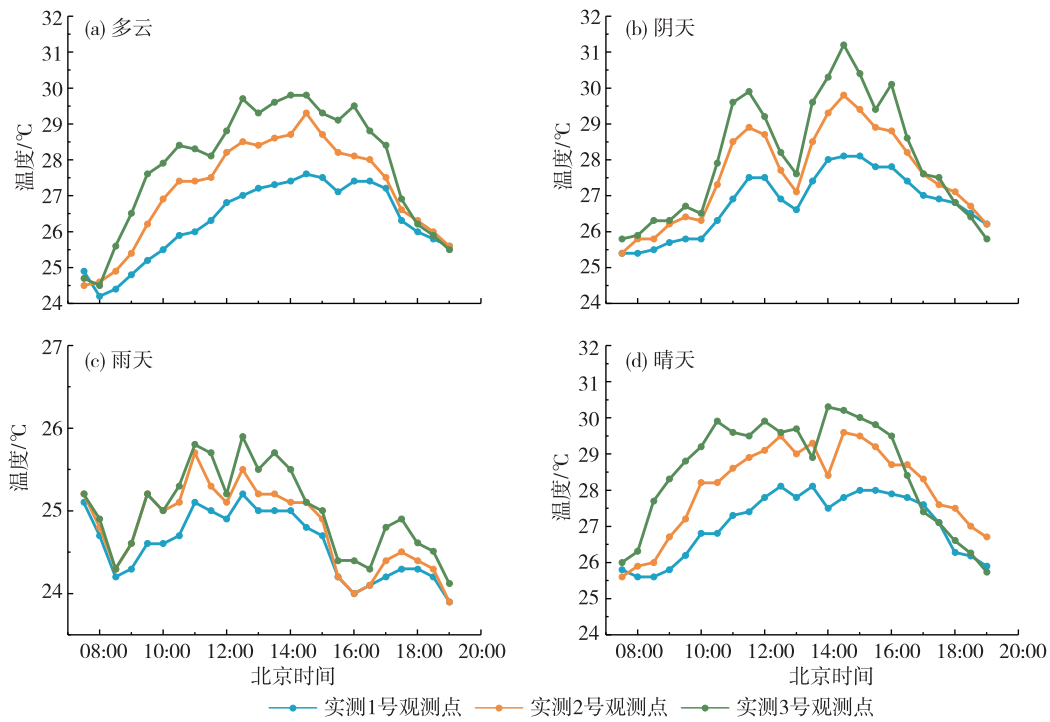


图4 四种天气状况(a.多云,b.阴天,c.雨天,d.晴天)各观测点温度变化
Fig.4 Variation of temperature at each observation point under 4 weather conditions (a. cloudy, b. overcast, c. rainy, d. sunny)

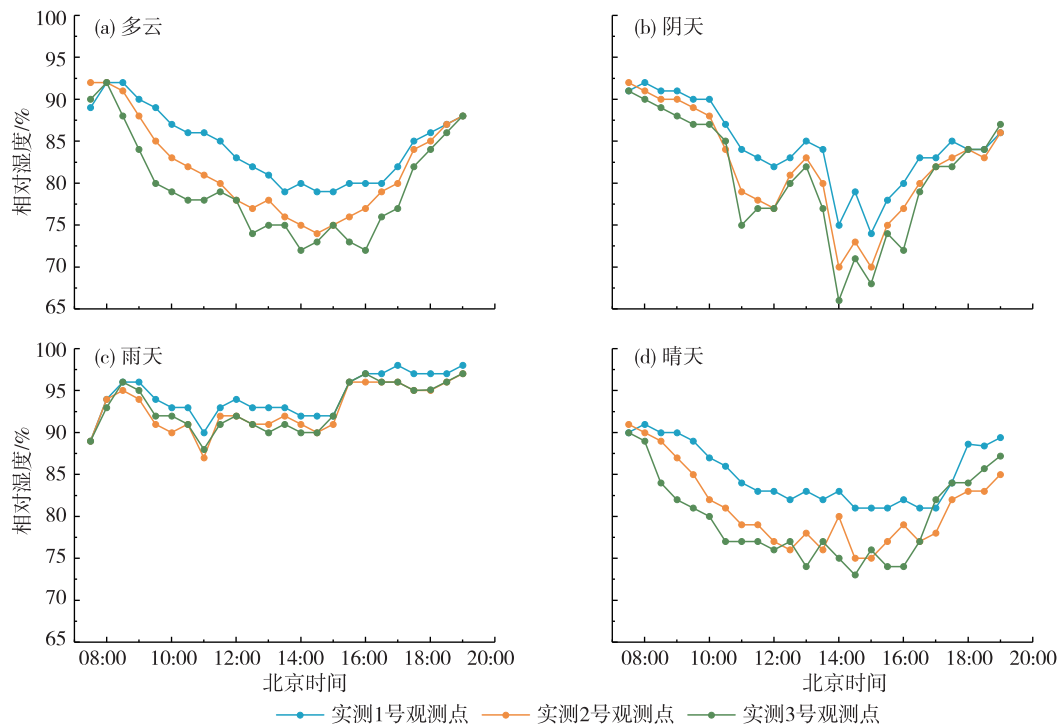


图5 四种天气状况(a.多云,b.阴天,c.雨天,d.晴天)各观测点相对湿度变化
Fig.5 Variation of relative humidity at each observation point under 4 weather conditions (a. cloudy, b. overcast, c. rainy, d. sunny)

08:00—08:30,最小值出现在13:30—14:30,相对湿度与温度的日变化趋势相反,两者相关系数均

小于-0.9(表9),呈显著负相关关系。在不同的天气下,3个观测点的平均相对湿度为:1号观测

点>2号观测点>3号观测点(图略)。1号观测点周围有树荫和墙体的遮挡,其相对较差的通风环境导致空气中的水汽扩散较难,即该点相对湿度与风速相关性小(相关系数为-0.255),温度低才是使该点相对湿度大于另外两个观测点的主要原因。2号观测点与3号观测点的相对湿度与风速存在一定相关性(相关系数分别为-0.600和-0.524),但没有相对湿度与温度的相关性强。2号观测点位于桂樟路与艺林路的十字路口,通风条件良好,水分的扩散好于1号观测点,但2号观测点温度较3号偏低,同样的空气水汽含量,随温度的上升,相对湿度下降,温度的差异致使3号观测点相对湿度低于2号观测点。这也说明了绿化

带对湿热环境有一定的影响,其中树林中的相对湿度高于其外侧点的相对湿度^[19]。

3.1.4 人体舒适度分析

多云、阴天和晴天时(图6a、b、d),3号观测点舒适度指数最大,一度超过79,说明在夏季无降水情况下少遮荫草地给人的舒适感较差。在雨天(图6c),3个观测点位的舒适度指数基本降至75以下,说明在夏季,下雨天可以较好地改善人体舒适感。在13:30—14:30时段中,草地的舒适度指数一度下降到65以下,通过分析原始数据发现位于草地的3号点位在19日(雨天)13:30—14:30出现了瞬时风速达 $3.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况,使得草地下垫面散热加快、相对湿度减少,人体舒适感得到了更好的改善。

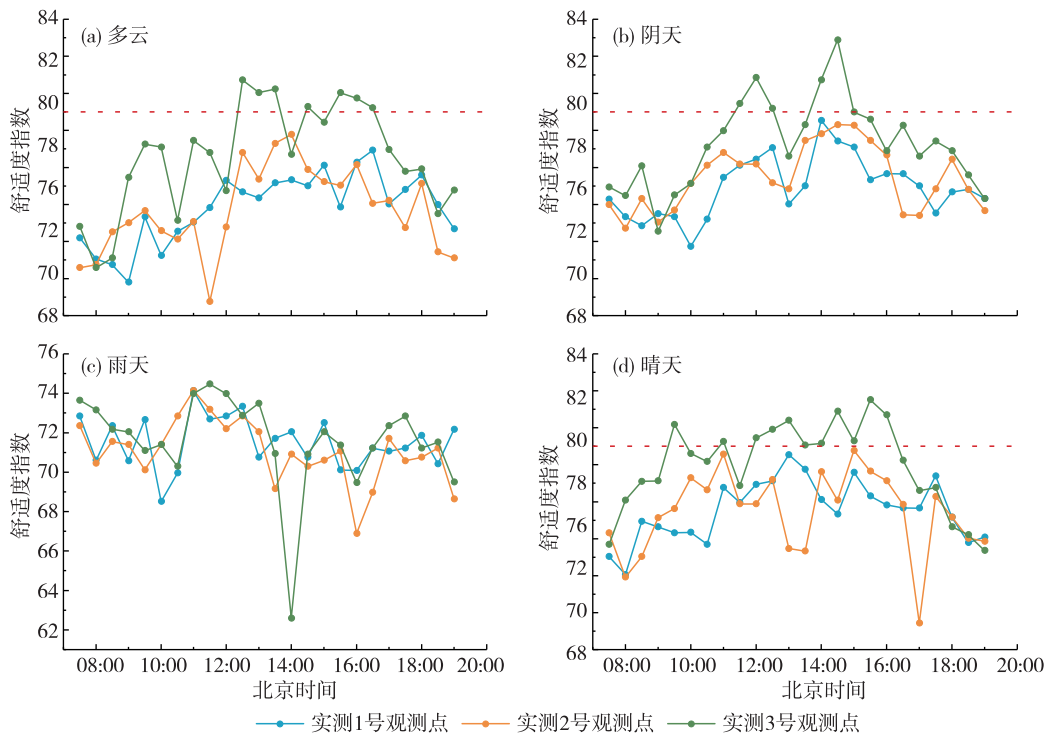


图6 四种天气状况(a.多云,b.阴天,c.雨天,d.晴天)各观测点人体舒适度变化(红色虚线表示舒适度指数为79)

Fig.6 Variation of human comfort index at each observation point under 4 weather conditions (a. cloudy, b. overcast, c. rainy, d. sunny; the red dotted line indicates a comfort index of 79)

3.2 ENVI-met 模拟结果分析

3.2.1 实测值和模拟值的相关分析

利用 Pearson 数做实测值和模拟值的相关性分析,结果如表10所示。由此可见,实测结果与模拟结果的相关性均通过了0.05的信度检验,其中模型在多云、阴天和晴天3种天气条件下的温度、湿度模拟效果最佳,相关系数均大于0.800;模型对雨天天气条件下的温度、湿度模拟效果稍差。实际情况下,雨水可以通过渗透入土壤,较快改变下垫面的热性质。

而模型在气象边界条件强迫下的风场、雨后下垫面热力性质等均与实际情况存在不可避免的误差,尤其是对微小尺度非定常风场引起的局地湍流的模拟误差较大。因此,在不稳定天气条件下,模型对真实天气情况预测误差较大,容易造成数据失真;模型在相对稳定的多云、阴天和晴天天气条件下,能够有效模拟预测真实天气,具有参考价值。

3.2.2 特殊温度场分析

根据上文实测值和模拟值的对比分析及相关

系数,日温度极大值和湿度极小值出现在 14:30 左右,而 14:30 也是学校一天之中人流量的高峰时段。12 日的多云天气条件下各观测点温度实测值与模

拟值的 Pearson 相关系数较阴天和晴天大,模拟效果最佳。因此,选取 12 日(多云)14:30 模拟的 1.4 m 处温度场进行分析,如图 7 所示。

表 10 四种天气状况下各观测点温度、相对湿度的实测值与模拟值 Pearson 相关系数

Table 10 Pearson correlation coefficient between measured and simulated values of temperature and relative humidity at each observation point under 4 weather conditions

| 观测点 | 实测值与模拟值 Pearson 相关系数 | | | | | | | |
|--------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 多云 | | 阴天 | | 雨天 | | 晴天 | |
| | 温度 | 相对湿度 | 温度 | 相对湿度 | 温度 | 相对湿度 | 温度 | 相对湿度 |
| 1 号观测点 | 0.954** | 0.914** | 0.966** | 0.875** | 0.763** | 0.635** | 0.948** | 0.891** |
| 2 号观测点 | 0.988** | 0.952** | 0.968** | 0.889** | 0.781** | 0.640** | 0.973** | 0.958** |
| 3 号观测点 | 0.970** | 0.909** | 0.957** | 0.866** | 0.854** | 0.716** | 0.864** | 0.898** |

注: **表示 $P < 0.01$ 。

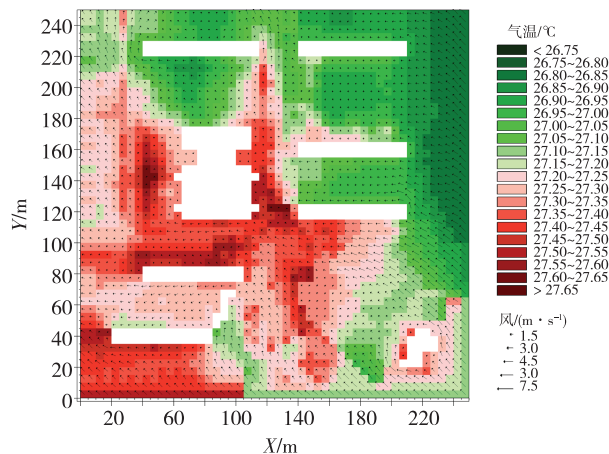


图 7 12 日 14:30 在 1.4 m 高处的温度(色阶,单位: $^{\circ}\text{C}$)和风(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布平面图

Fig.7 Plane distribution of temperature (color scale, units: $^{\circ}\text{C}$) and wind (barb, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 1.4 m at 14:30 BST

模拟区域内的温差约 1°C ,但温度场的空间分布差异较大。冷区基本位于高大乔木林遮蔽区,这与高大乔木的种群密度和形态结构有关。具有高叶密度的高山榕和拥有大冠幅的印度紫檀吸收、反射了大量太阳辐射,大大减小了到达地面的太阳辐射强度,降低了混凝土地面辐射增温效应;树木的蒸腾耗热,也可以有效降低树林内部温度。暖区主要位于桂樟路与艺林路的交叉路口,呈“十”字形。午后,入射的太阳辐射穿透该区域小冠幅的龙眼树,到达混凝土地面引起增温。紧凑的建筑群、丰富的地被植物以及东高西低的地形共同削弱了模拟区域中心的风速,使得建筑群接收到太阳辐射后,能量的扩散较乔木树林慢,由此造成建筑群温

度比乔木树林区温度高。无树荫遮蔽的草地温度略低于混凝土路面温度,甚至比遮蔽下的柏油路面温度高,主要是由草地低反照率的辐射特性决定的,草地将吸收的更多辐射能转化为热能,并加热了其大气。

4 小结与讨论

(1)在此次校园小气候研究中,通风条件对小气候特征的影响较大。在夏季无降水的情况下,因受通风条件限制,3 个观测点实测温度表现为:少遮荫草地>无遮荫混凝土>遮荫地砖混凝土。相对湿度表现为:遮荫地砖混凝土>无遮荫混凝土>少遮荫草地。

(2)建筑物和绿化布局会影响局地小气候特征从而影响人体舒适度,绿荫可以减少到达地面的太阳直接辐射,进而影响温度;良好的通风有利于水汽、热量的扩散;下垫面热力性质差异有助于局地空气对流运动的产生。因此,在兼顾遮荫和通风的同时,合理密植高大的绿化林可以有效降低夏季地面温度。

(3)ENVI-met 模型在热带稳定变化的天气下模拟效果较好,基于模型预测校园小气候特征以指导师生出行具有可行性。通过提高空间分辨率、增加预热时长、设定更精确的气象边界条件等可以进一步提高预报准确性。因此,未来在模型设计上还有优化的空间。由于客观现实环境因素之间的影响错综复杂,在不断优化模型的同时也不能过分依赖模型,还需结合一定的实地观测才能更好地预测小气候。

参考文献:

- [1] 欧晓琪,陈婷婷,丁凌琪,等.南京瞻园夏季园林小气候实测分析及舒适度研究[J].现代园艺,2021,44(3):14-17.
- [2] 王亚英,郝兴宇,蔺银鼎,等.校园绿化小气候效应及其对人体舒适度的影响:以山西农业大学校园为例[J].山西农业大学学报(自然科学版),2011,31(2):117-120.
- [3] 德永军,聂琴,王志刚,等.不同下垫面对校园小气候的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2005(4):1-4.
- [4] 杜娇娇.校园人群活动空间夏季小气候及人体舒适度研究:以青岛理工大学市北校区为例[J].现代园艺,2019(6):13-14.
- [5] 张芯蕊.基于 ENVI-met 的城市公园绿地热舒适度改善策略研究[D].保定:河北农业大学,2020.
- [6] 胡燕安.基于 ENVI-met 的严寒地区大学校园道路空间微气候环境研究[D].大庆:东北石油大学,2020.
- [7] 孙长征,高慧君,黄燕玲,等.气象要素对体育项目的综合影响[J].山东气象,2011,31(2):23-26.
- [8] 陈红,何瑞珍,郭煜琛,等.校园不同绿色空间的小气候特征及其人体舒适度[J].地域研究与开发,2018,37(3):126-131,137.
- [9] 彭海峰.校园人群活动空间小气候实测分析[D].杭州:浙江农林大学,2018.
- [10] 王颖,车紫薇,冯力,等.大学校园不同绿地类型的小气候特征[J].现代园艺,2014(2):10-13.
- [11] PERERA T A N T, NAYANAJITH T M D, JAYASINGHE G Y, et al. Identification of thermal hotspots through heat index determination and urban heat island mitigation using ENVI-met numerical micro climate model [J/OL]. Model Earth Syst Environ, 2021; pre-published. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01091-x>.
- [12] 岳甲.绿化对夏冬季节街谷环境温度的影响研究[D].杭州:浙江农林大学,2018.
- [13] 罗桥顺,刘新平,陈士银,等.大尺度下土地利用与景观格局演变分析:以湛江海洋大学主校区为例[J].资源开发与市场,2006,22(2):151-154.
- [14] 李正泉,贺忠华,胡中民.气候与健康及气候康养研究进展[J].海洋气象学报,2020,40(1):107-116.
- [15] 湛江市气象局.高温+雷雨,夏天熟悉的配方又来了! [EB/OL].(2021-03-31)[2021-08-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qKwWFVsrNWtqmRLemX5qjA>.
- [16] 李英男,韩依纹.基于 ENVI-met 的城市绿地微气候模拟研究进展[J].中国城市林业,2021,19(3):61-66.
- [17] 孙文奇,李昌义.数值模式中的大气边界层参数化方案综述[J].海洋气象学报,2018,38(3):11-19.
- [18] 王婷,陈小芮,章家恩,等.不同绿化改造方案对小区微气候环境影响的 ENVI-met 模拟研究[J].华南农业大学学报,2019,40(4):61-68.
- [19] 中共沈阳市委,沈阳市人民政府.第十八届沈阳科学学术年会论文集[C].沈阳:沈阳市科学技术协会,2021:5.