

DOI: 10.20103/j.stxb.202303230562

郭冠华, 陈丽飞, 曹 峥, 吴志峰, 陈颖彪. 物联网技术支持下的城市热环境时空变化分析. 生态学报, 2024, 44(7): 2849-2858.

Guo G H, Chen L F, Cao Z, Wu Z F, Chen Y B. Spatio-temporal variation analysis of urban thermal environment based on Internet of Things technology. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2849-2858.

物联网技术支持下的城市热环境时空变化分析

郭冠华, 陈丽飞, 曹 峥, 吴志峰*, 陈颖彪

广州大学地理科学与遥感学院, 广州 511006

摘要: 热环境是城市生态系统最为关键的大气环境要素之一, 开展城市热环境研究的前提是在时空维度上获取足量的热环境参数。利用先进的物联网技术构建了在线式热环境监测设备, 收集 2022 年 10 月 16 日至 24 日广州大学校园气温、风速、太阳辐射和地面温度四种热环境参数, 分析小尺度下城市热环境的时空变化特征。研究结果表明: 1) 不同测点之间的风速特征具有一定的相关性, 极个别测点的风速特征与其它测点相关性仅在 0.5 左右, 显示其小气候的独特性; 2) 不同测点风速和热岛强度变化时空差异明显, 即使距离靠近的测点, 受邻近建筑和植被特征的影响热环境特征会有所差异, 各测点的日间风速大, 热岛强度较为明显, 夜间风速较小, 热岛强度较弱; 3) 地面温度与气温的相关性达 0.8 左右, 这种相关性在夜间表现更为密切, 并且这种关系受风速的影响不大。研究结果反映了城市热环境参数在小尺度上的高度异质性, 并揭示了物联网技术在城市热环境监测领域的可行性、便捷性和高效性。

关键词: 城市热环境; 时空变化; 物联网; 广州; 校园

Spatio-temporal variation analysis of urban thermal environment based on Internet of Things technology

GUO Guanhua, CHEN Lifei, CAO Zheng, WU Zhifeng*, CHEN Yingbiao

School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 511006, China

Abstract: The urban thermal environment is a comprehensive physical environment system that integrates various external factors related to heat within a city, which affects the survival and development of its residents. Thermal environment is regarded as one of the most important ecological parameters in both natural and urban ecosystems. It is well established that obtaining adequate space-time-related thermal environment parameters is a prerequisite for conducting urban thermal environment studies. However, the stations of urban meteorological stations managed by government departments are relatively scattered, and the data obtained cannot express the microclimate conditions within the city. Scholars can obtain rich data on urban thermal environment parameters by independently setting up on-site monitoring points, but this requires significant economic costs. Currently, domestic and foreign scholars have achieved the goal of efficient monitoring of the ecological environment using Internet of Things (IoT) technology. Monitoring urban thermal environment by using Internet of Things (IoT) technology can effectively address these issues. In this study, we selected Guangzhou University as research area and developed a series of innovative thermal environment field measurement devices based on Internet of Things (IoT) technology to collect air temperature, wind speed, solar radiation, and land surface temperature simultaneously online. Specifically, ten measuring sites were selected to record the four thermal environmental parameters mentioned above between October 16 and 24, 2022. The results were as follows: 1) The two boundary parameters, solar radiation, and wind speed

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071236)

收稿日期: 2023-03-23; 网络出版日期: 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzuwzf@163.com

shaped the basic characteristics of the thermal environment in the study area. There was a strong correlation between the wind speeds of different sites, while very few sites had very low correlation between the wind speeds, indicating the uniqueness of the microclimate. 2) The variations of wind speed and heat island intensity at different sites were significantly different both temporally and spatially. Even with the close distance between measurement points, the characteristics of the thermal environment were influenced by the surrounding buildings and vegetation. The wind speed and heat island intensity were higher at each measuring site during the daytime and vice versa at night. 3) The correlation between land surface temperature and air temperature was more than 0.8, and this correlation was stronger at night than during the day. Interestingly, this relationship was also not greatly influenced by wind speed. The results of this study revealed the high heterogeneity of the urban thermal environment at a local scale and demonstrated the feasibility, convenience, and efficiency of IoT technology for urban thermal environment monitoring.

Key Words: urban thermal environment; spatio-temporal variation; internet of things; Guangzhou; campus

城市热环境是指城市区域内与热有关的、影响居民生存与发展的各种外部要素组成的物理环境系统^[1],它是城市生态系统最重要的大气环境要素之一,也是城市环境状况的综合表征^[2-4]。联合国发布的最新报告显示,到 2030 年全球城市人口将增加至 60%,而人口超过 1000 万的特大城市也将从 33 个增加到 43 个。大量研究表明,全球气候变暖和城市扩张联合作用引起的热环境恶化对城市人居环境、生态系统服务乃至人类福祉产生严重影响^[5-8]。随我国城市化进程的加速推进,城市热环境的时空变化过程及其驱动机制备受学界关注。

在时间与空间维度获得足量的热环境数据是进行城市热环境研究的重要前提。近地面气象监测一直是城市热环境研究最直接、最传统的技术手段^[9-11],由政府部门管理的城市气象站能提供高时间频率的多种热环境参数,但是站点较为分散,无法表达城市内部复杂的微气候状况。为了弥补城市气象站空间分辨率的不足,学者们一直开展自主布设监测点收集包括气温^[12-15]、风速^[14, 16-17]、地面温度^[18-19]和黑球温度^[17]等热环境参数。通过实地监测能够获得丰富的城市热环境信息,但是设备的采购和维护管理带来的人力和物力成本会大大增加热环境实地监测的难度,在一定程度上阻碍了热环境研究工作的推进。

近年来物联网和传感器技术的进步为生态环境监测与管理提供了新的理论和方法,使得生态环境动态监测更具高效性和快捷性^[20]。目前,国内外学者已在生态环境监测领域逐步使用物联网技术,如常立侠^[21]提出了我国海岛生态系统物联网监测的概念和模型,李新^[22]紧密围绕国家生态监测需求,研发生态系统关键参量监测设备和生态物联网关键技术,Matasov^[23]利用物联网技术开展了城市绿色基础设施水分含量和光谱特征的在线监测工作,Martín-Baos^[24]基于物联网技术开发了低成本交通流量和空气质量指数在线式监测设备,这些研究成果都为城市热环境的高效监测工作提供了新思路。本研究尝试基于物联网技术构建在线式热环境监测设备,对城市校园空间热环境状况进行连续高频监测,深入挖掘微尺度下城市热环境的时空变化特征。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区选取和监测点设置

研究区位于广州市番禺区的广州大学校园内,实验位置地处校园西南角,面积约 0.16km²(图 1)。该位置绿化程度较高,有大型人工湖,校园道路主要由沥青和透水铺砖构成,区域内基本包含了校园典型景观类型,可作为热环境实验的示范场所。本研究选择了 10 个热环境监测点,同时针对不同的科学问题,在 10 个监测点上布设了不同的监测设备,详细描述如表 1 所示。

1.2 热环境相关参数获取方法

本研究关注的热环境参数包括太阳辐射、风速、气温和地面温度,所述地面温度是指沥青和透水铺砖表面的温度平均值,典型热环境测点的设备布设示意如图 2 所示。实验涉及的设备均使用了无线传输技术,即获

取的所有热环境参数会通过公共网络传输至云平台,用户可以直接在线地从云平台客户端随时实时查看或下载数据。根据不同热环境传感器的供电要求,本研究设计了相应的在线传输和供电方式,不同的监测设备数据采集同步进行。



图 1 研究区测点布置

Fig.1 Field measurement points in the study area

表 1 10 个测点监测参数及周边环境情况

Table 1 Measuring parameters of ten points and their surrounding landscape characteristics

测点编号 Measuring points	监测参数 Measuring parameters	周边环境情况 Surrounding landscape
01	降雨量、太阳辐射、气温、风速	位于电子信息楼顶,用于监测研究区的边界气象情况
02	太阳辐射、气温、风速、地面温度	人行道旁,东侧有树木遮盖,南侧开阔
03	太阳辐射、气温、风速、地面温度	开阔的不透水地面,周边 10m 范围内无遮挡
04	气温、风速	电子信息楼内部,四周被楼宇围合
05	气温、风速	人行道旁,南侧有树木遮挡
06	气温、风速	成片树木下方
07	气温、风速	人行道旁,南侧有建筑物
08	气温、风速	人行道旁,东南侧有树木遮挡
09	气温、风速	人工湖岸旁,东侧为湖面西侧为树木
10	气温、风速	人行道旁,东侧有树木遮挡

气温和风速:气温传感器测量范围为-40—80℃,精度±0.3℃,风速传感器测量范围 0—30m/s,精度0.1m/s。这两种参数使用了窄带物联网(NB-IoT)通讯,能够实现设备的超低功耗运行,设备使用了3.6V 20000mAh电池,数据采集间隔设置为 15min,上传设置为 720min,该设计在理论上能使设备稳定运行 4 年。

太阳辐射和地面温度:太阳辐射使用光电式太阳辐射计进行测量,其测量范围为 0—1500W/m²,精度为 ±10W/m²。地面温度监测使用 K 型热电偶,其温度测量范围为-200—200℃,精度为±0.2℃,地面温度监测是

在每个测点上分别测量沥青和透水铺砖两种典型材质,然后用两种材质的平均温度作为该测点的地面温度。两种传感器使用了 12V 供电和 4G 通讯,为了尽量降低设备功耗和延长电池使用时间,本研究使用 12V 20000mAh 锂电池,同时研发了一种定时开关(图 3),实现电源开关间隔和通电时长的控制。对太阳辐射和地面温度的采集间隔和上传间隔分别设置均为 15min,即定时开关通电间隔为 15min,通电时间为 1min。对比发现,在没有定时开关,即两个传感器常开的情况下,设备只能运行 5d 时间,而加入定时开关后同样的采集间隔设置设备可持续运行 3 个月,大大提升了热环境监测效率。



图 2 热环境参数获取设备

Fig.2 Thermal environment parameters acquisition equipment

1.3 数据处理方法

所有设备在 2022 年 10 月 15 日安装完毕,并在 16 日 0 时开始收集数据。同年 10 月 25 日,从云平台网页端下载数据,通过 01 测点的降雨量数据可知,10 月 16 日至 24 日内研究区无降雨。对所有获得的数据进行小时平均处理,随后的分析均在小时平均数据上进行。分析不同测点的热岛效应时,考虑到测点 06 的乔木覆盖程度较高,能代表自然/半自然状态下的热环境状况,因此选定其作为热岛效应的比较基准,即将热岛强度定义为其它测点与测点 06 之间的气温差。此外,在分析时将 7:00—18:00 定义为日间,19:00—06:00(次日)定义为夜间。

2 结果与分析

2.1 太阳辐射和风速变化状况

图 4 结果表明,研究时期内多为晴朗天气,仅在 10 月 18 日、19 日出现多云的情况。10 月 18 日研究区太阳辐射量较低,正午时楼顶的自动气象站 01 和测点 03 仅有 $400\text{W}/\text{m}^2$,被树木遮蔽的 02 测点则更低。其它日

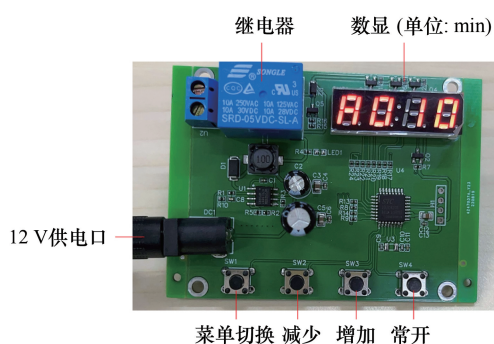


图 3 本研究设计的定时开关

Fig.3 The timing switch designed in this study

期太阳辐射总量逐时变化较为平稳,具体表现为:正午时刻太阳辐射总量均达到 $1100\text{W}/\text{m}^2$ 左右,位于楼顶的 01 测点正午太阳辐射总量最高;因 03 测点周边较为开敞,无任何遮挡物,其太阳辐射的变化特征与楼顶测点相似;在东南侧被树木遮蔽的测点 02 也表现出较强的规律性,即正午之前太阳辐射总量较低,平均值仅约 $180\text{W}/\text{m}^2$ 左右,而在午后,测点开始受到太阳辐射的直接影响,辐射总量较高。

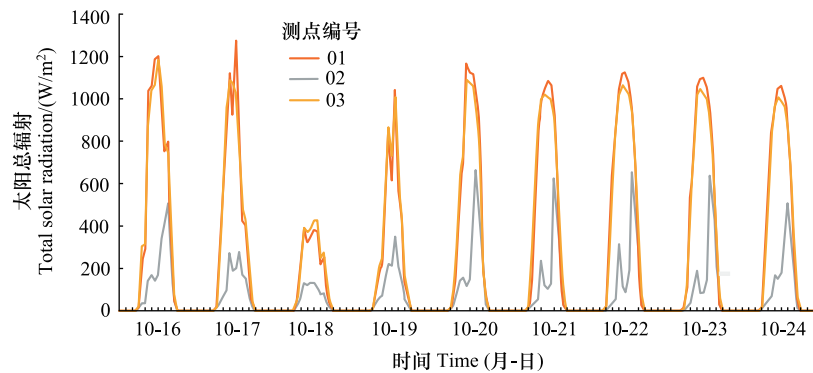


图 4 01、02 和 03 测点太阳辐射变化状况

Fig.4 Solar radiation changes of 01、02 and 03 measuring points

图 5 为各测点的风速变化情况,分析结果表明 10 月 16 日至 18 日研究区内出现大风天气,楼顶自动气象站测得三天内小时平均风速为 $2\text{m}/\text{s}$,最高风速 $5\text{m}/\text{s}$ 出现在 10 月 17 日正午。其它 9 个测点在这三天也测得较高的风速,其中测点 07 和测点 09 的风速较其它测点高,原因是它们分别位于相对开敞的人行道上和湖面旁,通风条件相对较好。10 月 18 日至 24 日期间各测点风速呈现周期性波动变化,变化规律相似。

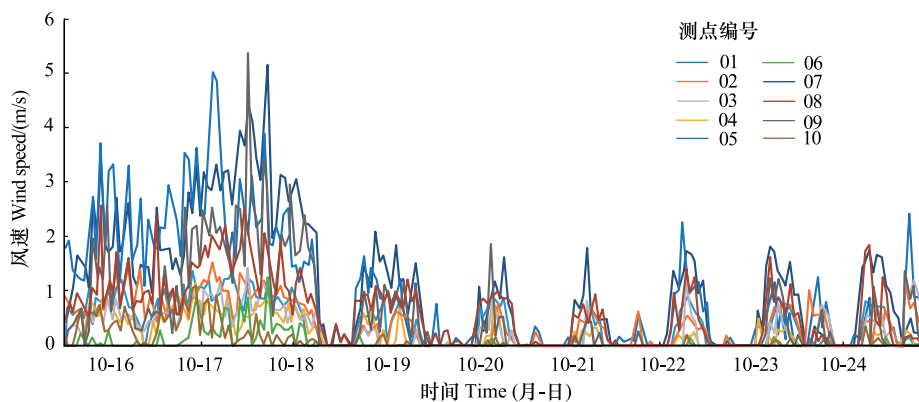


图 5 所有测点风速变化状况

Fig.5 Wind speed changes of all measuring points

为了进一步分析不同测点之间的风速变化是否存在关联,对各测点逐时风速值进行皮尔森相关性分析,结果如图 6 所示。结果表明各测点的风速值之间存在较强关联,相关性系数大部分都在 0.5 以上。位于楼顶的 01 测点与各测点均表现出非常强的关联,相关性系数都在 0.7 以上(仅与测点 06 除外,相关性仅为 0.49),说明楼顶测点能代表研究区的边界条件,并主导各测点的风环境。同时,分析也发现,位置较近或者景观特征相似的测点风速相关性会比较强,如测点 07 和测点 08 的相关性高达 0.88,它们位置仅相隔 20m,因此风速变化的同步性较强,但又由于测点 08 旁有树木遮挡,所以风速值会较测点 07 低。此外,测点 07 与测点 09、05 之间的相关性也较高,表明在同一气象条件下它们的风环境变化具有一定的同步性。部分测点之间的相关性相对较低,如测点 10 和 06 与其它测点的相关性大部分在 0.5 左右,显示这些测点受研究区边界条件的影响

较低,形成相对独立的小气候。

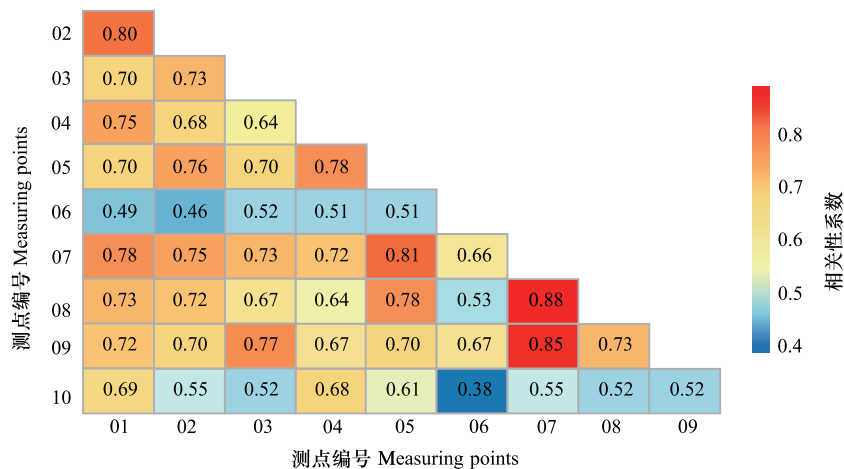


图6 所有测点风速相关性特征

Fig.6 Correlation characteristics of wind speed of all measuring points

所有相关性系数均通过 0.05 的置信度检验

2.2 日间和夜间热岛强度和风速变化特征

将所有日期的热岛强度和风速数据划分为日间和夜间,绘制各测点的小提琴变化图,结果如图 7、图 8 所示。从图 7 可以看出,不同测点的风速变化特征差异较大,07 和 09 测点的风速变化最大,与楼顶自动气象站的风速变化较为一致,大部分时间风速集中在 0—2m/s 左右,最大风速达到 5m/s,其它测点风速变化较小。对比日间和夜间风速分布特征发现,日间的风速相对较高,01 测点日间平均风速为 1.05m/s,且有 36% 的时间风速在 1m/s 以上,相比之下夜间平均风速为 0.8m/s,风速在 1m/s 以上时间只占 17%。受到外围边界条件的影响,其它测点表现出类似的特征。与图 6 的结果相似,测点 10 和 06 日间和夜间风速分布类似,与其它测点的变化不同,进一步说明了这两个测点的热环境特的独特性。

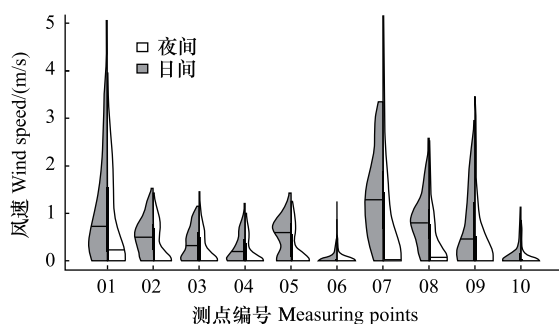


图7 不同测点日间和夜间风速变化小提琴统计图

Fig.7 Violin plot of wind speed during daytime and nighttime at different measuring points

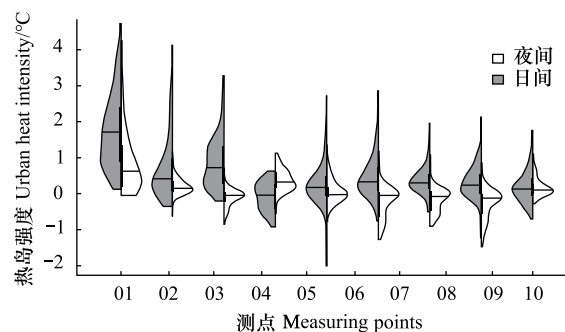


图8 不同测点日间和夜间热岛强度变化统计图

Fig.8 Violin plot of urban heat intensity during daytime and nighttime at different measuring points

以自然/半自然状态的测点 06 为基准点,统计其它测点日间和夜间热岛效应变化特征,结果如图 8 所示。结果发现,楼顶 01 测点所有时间均呈现热岛效应,日间平均热岛强度为 1.73℃,日间最高热岛强度达 4.72℃,夜间平均热岛强度为 0.89℃,相比之下,其它测点都出现热岛和冷岛效应。测点 05、07 和 03 的热岛效应变化幅度较大,日间热岛效应都十分强烈,测点 07 日间平均热岛强度为 0.46℃,最高热岛强度达 2.85℃,夜间大部分时间会出现冷岛,最强冷岛达到 -1.27℃,其它几个测点均有类似的变化特征。这些测点在正午左右均受太

阳辐射直接影响,使得日间的热岛效应尤为明显,到了晚上,良好的通风条件也促进了近地面的热量散失,形成冷岛效应。测点 10 和测点 04 位置相近,且周边被建筑物和树木包围,从图 7 看出它们的风速在研究时间内都较小,因此热岛强度变化较小。测点 04 受建筑物的阻挡日间没有受到太阳辐射的直接影响,因此日间有一半时间都表现为冷岛,到了晚上围合式的建筑也阻碍了通风,使得日间吸收的热量在夜间没有及时扩散到大气当中,夜间的热岛效应特别明显。

2.3 地面温度与气温相关关系分析

地面温度和气温的关系一直是热环境研究的重要内容,本研究尝试考虑风速的情况,分析 02 和 03 测点地面温度与气温的关系。同样地将数据划分为日间和夜间,同时为了更清晰地对比二者关系的差异,将散点图横坐标和纵坐标设置为同一个边界范围,结果如图 9 所示。结果表明,日间和夜间地面温度与气温的关系存在明显的差异,02 和 03 测点的日间温差都比较大,回归决定系数都在 0.8 以上,表示地面温度能表达气温约 80%左右的变异程度。02 测点决定系数都较高,日间和夜间分别为 0.8082 和 0.8769,03 测点日间的决定系数较低,仅为 0.7774,并且数据全部集中在 1:1 直线的下方,表明日间地面温度普遍高于气温,这是因为该测点比较开阔,太阳辐射全天直接加热地面,使得气温快速升高。上述结果可知,在有树木遮挡的情况下,地面由于缺少太阳辐射的直接加热,气温与地面温度更为接近。夜间两个测点地面温度和气温的关系特征非常相似,由于夜间没有太阳辐射的加热,地面温度与气温的关系更为密切,数据都分布在 1:1 直线附近。此外,也发现不同大小的风速分布特征不明显,表明风速对地面温度和气温的关系影响不大,周边景观特征对二者的关系影响会更大。

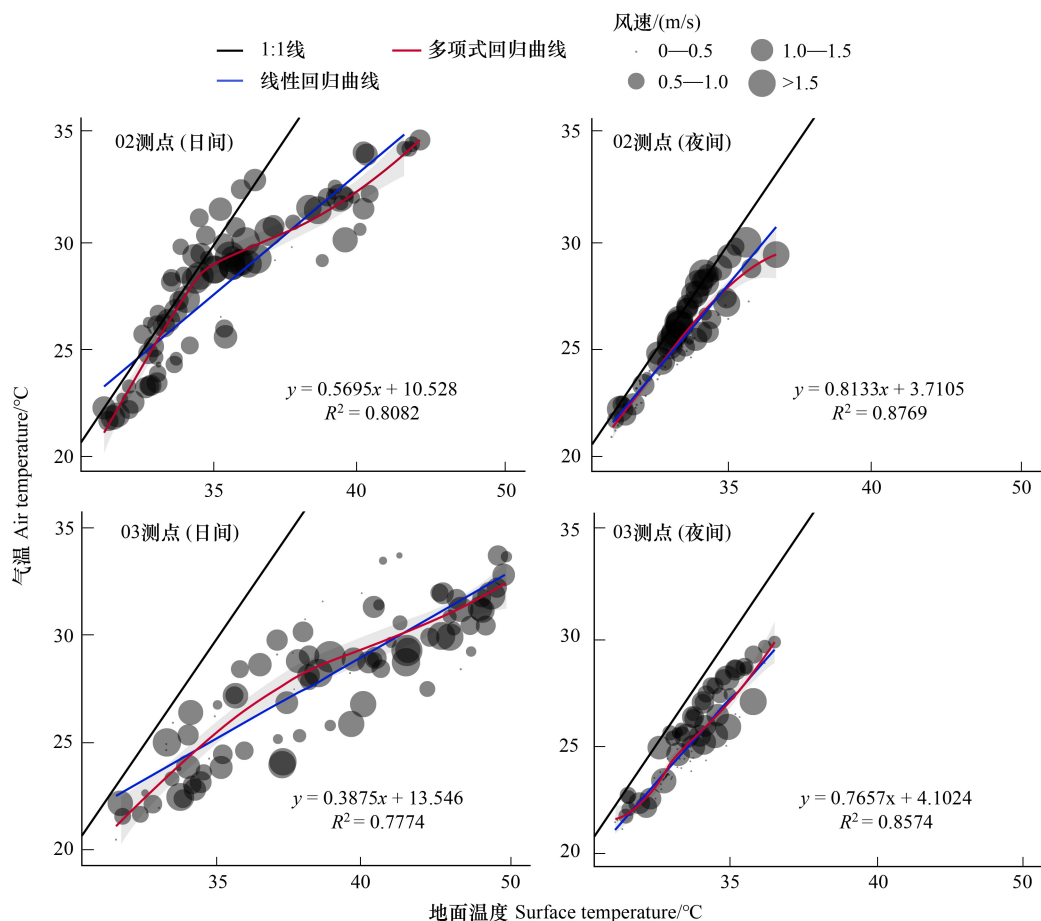


图9 02、03 测点日间和夜间地面温度与气温散点图

Fig.9 Scatter diagrams of the relationship between surface temperature and air temperature among daytime and nighttime

3 讨论

基于 10 月 16 日至 24 日的校园微尺度热环境监测结果, 本研究发现, 局部的热环境特征与天气边界条件有直接关系, 但由于景观特征的局部差异, 比如植被条件、建筑物分布、地面状况 (邻近人行道或者水体) 等, 会直接影响局部热环境特征, 使得小尺度的热环境状况存在一定的时空差异, 表现为热环境的时空异质性。处于楼顶的 01 测点, 可代表研究区热环境特征的平均状态, 其它测点受所在位置景观特征的影响, 热环境特征会表现不同, 如 02 测点因树木的遮挡, 下午才能获得更多直接的太阳辐射, 03 测点因为周边都没遮挡物, 表现出与 01 测点相似的太阳辐射变化特征。边界条件的风速状况基本决定了局部位置的风速变化特征, 但具体风速大小差异与树木、建筑等可形成遮挡的景观密切相关。如 07 测点地处周边无树木遮挡的人行道上, 日间与夜间的风速都比较高, 而距离仅 20m 远的 08 测点因为旁边树木的遮挡风速较低。除了风速的差异, 不同树木条件提供的遮阴、蒸散发差异直接影响了 07 和 08 两个邻接测点的热岛强度差异。本研究的发现与 Tong^[14] 的研究相似, 他指出 50m 范围内绿色植被的比例对局部热环境产生直接影响。刘琳^[17] 的研究结果也表明建筑物及树木等遮挡物对区域内部的遮蔽作用会对包括风速、黑球温度在内的热环境参数产生重要影响。因此, 日后的热环境实测工作需要进一步关注微尺度的时空变化特征, 同时也需要在大范围的实测中选取更有代表性的测点。

本研究发现城市热环境在日间和夜间具有不同的时空差异, 研究区日间的风速较高, 夜间风速较低, 热岛强度也是日间高于夜间, 并且日间风速和热岛效应的波动都比夜间大, 因此日间能更加凸显景观类型间的热环境差异。日间在太阳辐射的作用下, 地面直接被太阳的辐射能量加热, 因此地面温度要比近地面空气温度高的多, 建筑和树木的遮挡形成的阴影能极大地降低近地面温度^[25-26]。过往不少热环境实验都只在日间进行, 一方面是实验设备安全管理需要, 二是日间城市热环境的空间异质性会更加明显^[19], 日间也是人们在室外活动的主要时间段, 热环境对人体舒适度的影响更为明显^[27-29]。夜间一般风速都比较低, 大气相对稳定, 在没有太阳辐射影响的情况下, 不同景观表现出来的热环境特征与自身热性质直接相关。有学者研究发现, 日间植被的蒸散发降温作用会被强烈的空气流动所抑制^[30], 因此夜间植被的降温作用可能会更大。因此, 需要开展长时间持续的监测, 在站点尺度上获取更为全面和细粒度的热环境时间变化数据, 并根据日间和夜间不同的热环境形成机理进行有差别的分类探讨, 以全面挖掘城市热环境时空变化过程^[12, 31-32]。

在时空维度上获取足量的温度数据是热环境研究的前提, 遥感影像能快速地获取城市大范围全覆盖的热环境数据, 具有较高的空间分辨率, 但时间分辨率较低, 不足以在精细的时间尺度上开展城市热环境研究工作^[33]。而城市气象站只能提供非常稀疏的站点数据, 无法实现细粒度的气温数据获取, 因此使用相关设备开展实地观测是热环境研究的主要手段^[14, 31]。许多学者都认为热环境实验需要花费很多的人力和物力^[16, 19], 其核心问题在于使用的设备大部分都是离线的, 即所获取的数据都存放在设备的存储卡内, 科研人员需要花额外的时间精力在线下读取数据才能进行下一步数据分析研究工作。相比于传统的线下数据读取, 本研究利用物联网技术实现了包括气温、风速、太阳辐射、地面温度四种典型热环境参数的在线传输, 设备只需一次安装, 科研人员就能随时随地通过网络查看和下载数据, 在大大降低了热环境实验管理成本的同时, 也提高了数据获取与分析的效率。已有研究表明, 物联网和信息技术的发展可以为生态环境监测和管理提供新的理论和方法, 使生态环境动态监测具备更好的实用性和便捷性^[20, 22-23, 34]。因此, 亟需强化物联网技术在热环境实测的应用工作, 进一步推进热环境研究向精细化的时空尺度深入发展。

4 结论

本研究利用物联网技术构建了在线式校园热环境监测设备, 获取了 2022 年 10 月 16 日至 24 日校园温度、风速、太阳辐射、地面温度四种参数, 探讨了小尺度下城市热环境的时空异质性特征, 主要结论如下: 1) 小尺度上校园热环境状况具有高度的时空异质性, 这种异质性主要源于周边建筑、植被等微尺度景观特征的影

响。小尺度下大部分测点的太阳辐射和风速特征具有一定的同步性,位于楼顶的 01 测点能够代表研究区的热环境总体特征,表现为太阳辐射和风速与其它测点的变化规律十分相似。

2) 不同测点之间的风速具有较好的相关性,其中测点 07 和测点 08 的位置相隔仅有 20m,它们的相关性系数为 0.88,而测点 10 与 06、07、08 和 09 测点的相关性都较低,个别测点受局部景观特征的影响会形成相对独立的小气候。

3) 各测点日间和夜间的风速和热岛强度都表现出明显的时空差异,07 和 09 测点的日、夜间风速变化幅度较大,夜间最大风速达 5m/s,其它测点风速变化较小。不同测点的热岛强度也十分明显,日间热岛动态变化都较大,而夜间变化较小,各测点之间的热环境特征差异与所在位置的植被、建筑特征直接相关。

4) 地面温度与气温的关系较为复杂,这种关系受风速的影响不大,周边植被和建筑遮挡对二者的关系影响会更大。二者相关性在夜间会更为密切,这是由于夜间没有太阳辐射的直接加热,使得地面温度变化更为平缓,直接影响了近地面气温的状况。

参考文献 (References):

- [1] 柳孝图,陈恩水,余德敏,邵铁如. 城市热环境及其微热环境的改善. 环境科学, 1997, 18(1): 54-58.
- [2] Buyantuyev A. and Wu J G, Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. Landscape ecology, 2010. 25(1): 17-33.
- [3] 陈云浩,李晓兵,史培军,何春阳,上海城市热环境的空间格局分析. 地理科学, 2002. 22(03): 317-323.
- [4] 周宏轩,濮宏桐,崔璐璐,周凤林,孙婧. 基于视觉指数的城市热环境效应——以徐州市为例. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2213-2220.
- [5] Wilke A B B, Beier J C, Benelli G. Complexity of the relationship between global warming and urbanization: an obscure future for predicting increases in vector-borne infectious diseases. Current Opinion in Insect Science, 2019, 35: 1-9.
- [6] Nogueira M, Soares P M M, A surface modelling approach for attribution and disentanglement of the effects of global warming from urbanization in temperature extremes: application to Lisbon. Environmental Research Letters, 2019. 14(11): 114023.
- [7] 王敏珍,郑山,王式功,尚可政. 高温热浪对人类健康影响的研究进展. 环境与健康杂志, 2012, 29(7): 662-664.
- [8] 崔海莹,银超慧,卢新海,田明杰,危小建. 基于步行性的城市热环境暴露风险区识别及其健康效应——以武汉市主城区为例. 地域研究与开发, 2023, 42(1): 75-80, 107.
- [9] 孙铁钢,肖荣波,蔡云楠,王耀武,吴昌广. 城市热环境定量评价技术研究进展及发展趋势. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2717-2728.
- [10] 陈爱莲,孙然好,陈利顶,基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012. 32(14): 4553-4565.
- [11] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.
- [12] 杨小山,姚灵烨,金涛,姜之点,彭立华,叶燕华. 南京夏季城市局地气温时空变化特征. 土木与环境工程学报: 中英文, 2019, 41(1): 160-167, 174.
- [13] Cheung P K, Jim C Y. Effects of urban and landscape elements on air temperature in a high-density subtropical city. Building and Environment, 2019, 164: 106362.
- [14] Tong S S, Wong N H, Jusuf S K, Tan C L, Wong H F, Ignatius M, Tan E N. Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in Northern China. Building and Environment, 2018, 127: 239-249.
- [15] Pfautsch S, Wujeska-Klaus A, Walters J R. Measuring local-scale canopy-layer air temperatures in the built environment: a flexible method for urban heat studies. Computers, Environment and Urban Systems, 2023, 99: 101913.
- [16] Xu D, Zhou D, Wang Y P, Xu W, Yang Y J. Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese Basin and static-wind city. Building and Environment, 2019, 147: 482-494.
- [17] 刘琳,刘京,林姚宇,王丹,多种城市地表形态的局地气候分析. 建筑科学, 2017. 33(2): 8-14.
- [18] 吴志丰,王业宁,孔繁花,孙然好,陈利顶,占文凤,基于热红外影像数据的典型居住区常见地表类型热特征分析. 生态学报, 2016. 36(17): 5421-5431.
- [19] 庞新坤,孙然好,城市公园景观的秋冬季动态热效应研究. 生态学报, 2017. 35(12): 4196-4202.
- [20] 郑渊茂,王业宁,周强,王豪伟,基于景感生态学的生态环境物联网框架构建. 生态学报, 2020. 40(22): 8093-8102.
- [21] 常立侠,张海杰,张飞宇,陈昌亮,黄蓓,周厚诚,张振克,彭少麟,海岛生态物联网建设: 概念和模型. 生态学报, 2019. 39(10): 3416-3425.
- [22] 李新,刘绍民,孙晓敏,吴冬秀,周燕,郭建文,温学发,陈世苹,马明国,生态系统关键参量监测设备研制与生态物联网示范. 生态学报,

2016. 36(22): 7023-7027.

- [23] Matasov V, Belelli Marchesini L, Yaroslavl'tsev A, Sala G, Fareeva O, Seregin I, Castaldi S, Vasenev V, Valentini R. IoT monitoring of urban tree ecosystem services: possibilities and challenges. *Forests*, 2020, 11(7): 775.
- [24] Martín-Baos J Á, Rodríguez-Benitez L, García-Ródenas R, Liu J. IoT based monitoring of air quality and traffic using regression analysis. *Applied Soft Computing*, 2022, 115: 108282.
- [25] 焦敏,周伟奇,钱雨果,王佳,郑重,胡潇方,王伟民,斑块面积对城市绿地降温效应的影响研究进展. *生态学报*, 2021. 41(23): 9154-9163.
- [26] 唐劫,鲍家旺,基于热舒适度的老旧住区更新改造影响研究. *建筑科学*, 2022. 38(10): 275-286.
- [27] Lau K K L, Chung S C, Ren C. Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: an approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment*, 2019, 154: 227-238.
- [28] 刘文静,孟庆林,汪俊松,广州口袋公园冬季使用率与热环境敏感性分析. *建筑科学*, 2022. 38(6): 59-69.
- [29] 卓志雄,吴天杰,洪长兴,黄启堂. 热岛效应视角下口袋公园对城市热环境的影响研究. *林业资源管理*, 2022(1): 95-105.
- [30] Konarska J, Uddling J, Holmer B, Lutz M, Lindberg F, Pleijel H, Thorsson S. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(1): 159-172.
- [31] 胡凤宁,周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展. *生态学报*, 2023, 43(11): 4445-4460.
- [32] Yang X S, Peng L L H, Jiang Z D, Chen Y, Yao L Y, He Y F, Xu T J, Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, 2020. 260: 114279.
- [33] 江斯达,占文凤,杨俊,刘紫涵,黄帆,赖佳梦,李久枫,洪发路,黄媛,陈吉科,李旭辉,局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展. *地理学报*, 2020. 75(9): 1860-1878.
- [34] Cao C, Yang Y C, Lu Y, Schultze N, Gu P Y, Zhou Q, Xu J P, Lee X H. Performance evaluation of a smart mobile air temperature and humidity sensor for characterizing intracity thermal environment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37(10): 1891-1905.