

DOI: 10.5846/stxb201802060310

张雪琦, 贾天下, 董仁才. 基于光纤测温技术的城市地表温度精细化分析. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Zhang X Q, Jia T X, Dong R C. Refined analysis of urban surface temperature based on optical fiber temperature measurement technology. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

基于光纤测温技术的城市地表温度精细化分析

张雪琦^{1,2}, 贾天下^{1,2}, 董仁才^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:城市景观空间构型与热岛效应关联性较强, 研究高时空分辨率的城市不同下垫面地表温度变化, 可以更加精细地掌握城市热环境的时空特征。光纤温度传感系统具有实时在线、测温精度高和不受电磁干扰等优点, 具备实时、在线、连续开展城市地表温度在线监测的能力。在北京市通州某园区内, 选择有太阳辐射的 4 个时段, 对多种类型下垫面的地表温度进行了时间间隔为 1 分钟、空间间隔为 1 米的连续四小时、总长度为 100 米的实时在线监测。通过对监测时间段内不同类型下垫面地表温度的变化分析, 发现这种分布式光纤测温系统能够有效辨识小尺度下地表温度的时间变化性和空间变化性, 能有效区分透水和不透水地面, 并监测和评估沥青马路地表温度的升温速率以及遮荫效果对地表温度的降温作用。同时, 这种监测模式获取的数据能够对地表温度空间序列开展自相关分析, 进一步验证了地表温度空间序列在较小尺度上仍然具有自相关性, 且距离越近, 相关性越大。研究同时表明, 光纤测温技术能直接地获取城市热环境的现场真实数据, 可以有效应用于小尺度城市热环境的观测与研究。

关键词:地表温度; 光纤传感; 城市热环境; 自相关

Refined analysis of urban surface temperature based on optical fiber temperature measurement technology

ZHANG Xueqi^{1,2}, JIA Tianxia^{1,2}, DONG Rencai^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The spatial configuration of the urban landscape is highly correlated with the heat island effect. By studying the land surface temperature (LST) of different underlying surfaces with high spatial and temporal resolution, we can grasp the temporal and spatial characteristics of the urban thermal environment more accurately. The optical fiber temperature sensing system has the advantages of real-time and high measurement accuracy and immunity to electromagnetic interference, and can monitor the LST in real time and continuously. In a park in Tongzhou, Beijing, four periods with solar radiation were selected, and the LST of various types of underlying surfaces was recorded in four consecutive hours with 1-minute time interval and 1-meter space interval, and the total length was 100m. By analyzing the changes of LST of different underlying surface, it's proved that this distributed optical fiber temperature measurement system can effectively identify temporal and spatial variability of LST on a small scale, distinguish between permeable and impervious grounds, monitor the heating rate of the surface temperature of asphalt road, and evaluate the cooling effect of shading on LST. At the same time, data obtained by this monitoring mode enables autocorrelation analysis of LST spatial sequence. The results verified that the LST spatial sequence still has autocorrelation on a small scale, and the closer the distance, the higher the correlation level.

基金项目:国家重点研发计划资助(2016YFC0503605)

收稿日期:2018-02-06; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongrencai@rcees.ac.cn

Simultaneously, it is confirmed by this practice that the optical fiber temperature measurement technology can be effectively applied to the observation and research of small-scale urban thermal environment.

Key Words: land surface temperature; optical fiber sensing; urban thermal environment; autocorrelation

近几十年来,中国经历了一个快速的城市化发展过程,城市中硬化地表增多,城市建筑群越来越密集。在接受同等太阳辐射的条件下,硬化地表具有更大的吸热率和更小的比热容,使得城市地区的升温效应更加强烈^[1]。热量在城市空间范围内的聚集造成城市热环境恶化,产生了热岛效应,影响城市生态系统的物流、能流以及结构和功能^[2],引发了一系列的生态环境问题。因此,城市热环境问题已经引起政府管理部门、规划部门和科研工作者等各方面的重视。自2018年4月1日起实施的《绿色生态城区评价标准》国家标准已经考虑城区“热岛效应”,建议合理控制城区的城市热岛效应强度。在城市热环境方面已经有大量研究,尤其是在热格局的定性描述和地表温度与土地利用类型的相关分析层面,还有许多学者聚焦在探索不同空间统计单元中关键景观组分对热岛效应驱动力存在差异的重要归因方式^[3-7]。研究趋势表明,对城市不同下垫面地表温度的高时空分辨率变化特征的关注度越来越高。

城市热环境是一个多尺度的概念,分为城市尺度、街区尺度、建筑尺度^[8],不同尺度的热环境相互联系。街区是城市的重要组成部分,街区尺度的城市热环境与城市中居民的居住质量和身心健康息息相关,近年来,街区尺度内的城市热环境逐渐被人们重视,研究性质也正由定性分析向定量研究转变^[9]。城市热环境的表征因子一般为地表温度和大气温度^[5],数据获取的方法主要有地面大气温度观测、数值模拟和热红外遥感3大类技术^[7]。其中,地表温度数据主要通过遥感监测手段获取,包括航空航天遥感、手持热辐射遥感、近地面红外相机、测温仪、辐射计等,这种不接触地表开展的地表温度观测与地表真实温度都有一定的差异。空间精度和时间精度对地表温度的研究结果非常重要,遥感影像的分辨率一般在几十到几千米,无法精确反映小尺度的城市热环境。有学者提出降尺度的方法,但降尺度的结果受许多尺度因子的影响,有一定误差^[10]。另一方面,温度数据由遥感图像反演而来,反演的结果受大气状态和地表发射率的影响,导致反演得到的温度的精度有限^[11]。同时,遥感图像通常是卫星过境的某一时刻观测到的影像,无法实现连续观测,因此现有研究多聚焦于地表温度的空间规律而非时间规律。此外,还有学者利用热红外成像仪以及温度计等进行温度监测^[12,13],但都无法做到实际意义上的实时监测和长时间连续观测,缺乏对各种下垫面之间相互影响及耦合关系的研究,难以满足城市热环境精细化管理的实际需要。在高精度、长时间、多时段、建筑尺度的层面上,没有成熟的技术可以支持对城市地表温度的获取^[5]。

地表温度具有空间自相关性,Song等做了以60m为区间长度的60m到1080m共18个空间分辨率下的地表温度的空间自相关分析,发现地表温度具有强烈的空间依赖性,随着分辨率的下降,自相关越来越弱^[14]。Weng等发现在120m分辨率下地表温度与植被丰度的关联图像纹理表现出最大差异。120m分辨率大概是一个街区的尺度,也就是说,以街区为单位,其内在的下垫面类型、建筑物高度和密度、土地利用类型和人类活动强度会影响地表温度,使城市景观的物理特征发生改变^[15]。戴晓燕等研究了上海市180m、540m及1080m尺度下地表温度的分布特征,也发现180m尺度下地表温度场分布最为复杂,随着尺度的提高地表温度分布的空间格局趋于简单,空间差异缩小^[16]。这些研究使用的地表温度数据都是来自于遥感图像的反演。由于现有的地面实测手段费时费力,目前为止很少有对街区以下更小尺度的地表温度进行长期连续观测的研究和空间自相关性的分析。然而研究表明,街区层面的空间形态是研究人居环境舒适度的关键因素^[17],因此,在更小的尺度下研究地表温度的空间自相关,有望发现更精细化的地表温度的变化规律,从而在空间规划及布局等方面提出一些新的建议。

光纤测温技术近年来飞速发展,具有不受电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀、电绝缘、传输距离远等特点^[18]。光纤测温技术分为光纤光栅测温 and 分布式光纤测温两种方式。在分布式光纤测温方式中,光纤本身既是传感

器又是信息传送通道,只需要一根光纤就能实现对地表温度的测量,在选择监测路径和铺设时具有较大的灵活性,已经被成功应用在了电缆温度监测、火灾预警、土壤温度监测^[19-21]等领域。基于分布式光纤测温方式的优点,本研究探索性地使用光纤测温技术来获取高空间精度与时间精度的地表温度数据,希望为城市地表温度监测技术提供一些新的思路。同时,应用获取的数据对城市不同的下垫面地表温度变化规律及自相关关系进行研究,以期发现小尺度下地表温度的相关规律,为城市规划提供参考。

1 研究方法与时地

1.1 分布式光纤测温原理与仪器配置

分布式光纤测温原理是采用拉曼光学时域反射(R-OTDR)技术通过连续分布式光纤温度传感系统探测光纤铺设方向上的温度变化趋势,对光信号处理后经过计算得出温度信息,其原理如图1所示。由脉冲激光二极管产生光脉冲进入到光纤内部后与光纤分子相互作用产生瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射等,进而产生后向散射光,光纤中的后向散射光经过分光模块滤除瑞利散射光,剩余的拉曼散射光波长与热能相关,即光强与温度相关。拉曼散射光分为斯托克斯光和反斯托克斯光,经过雪崩光电二极管探测出光功率的值,通过光功率与温度的关系计算出所测温度,基于R-OTDR技术采集散射信号的回波时间确定该温度对应的光纤上的相对位置。温度的计算公式^[22]如下:

$$T = \frac{T_0 h \Delta v}{h \Delta v - k T_0 \left[\ln \frac{R(T)}{R(T_0)} - \int_0^z (\alpha_s - \alpha_{as}) dz \right]}$$

其中, T_0 为参考光纤的温度值, h 表示普朗克常数, k 表示玻尔兹曼常数, Δv 表示拉曼频移,以石英光纤为例, $\Delta v = 1.32 \times 10^{13} \text{ Hz}$, z 为测温光纤的位置, $R(T)$ 为测温光纤处反斯托克斯光和斯托克斯光的光强之比, $R(T_0)$ 为

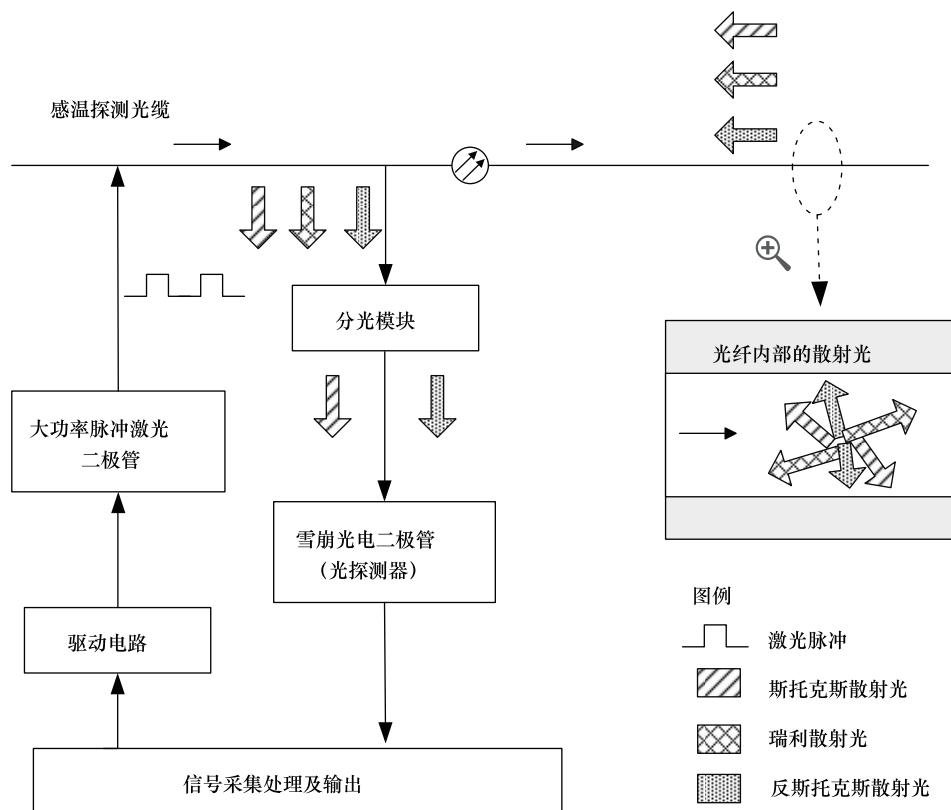


图1 光纤测温的原理示意图

Fig.1 Optical temperature measurement principle

测温参考点处反斯托克斯光和斯托克斯光的光强之比, α_{as} 、 α_s 为反斯托克斯光和斯托克斯光在光纤中的衰减系数。

分布式光纤测温系统可以连续地得到沿着探测线路几公里的测量信息, 测量误差大大降低, 同时可以实现实时监测。本实验中使用的分布式光纤测温系统的空间分辨率为 1 米, 温度分辨率为 0.5℃, 其中, 温度传感器(光纤)对工作环境的要求较低, 防水、防震、绝缘, 在大多数类型的城市地表都可以铺设, 满足对城市地表小尺度、多点的连续实时性的温度测量要求, 能适用于城市地表热环境的连续监测。

1.2 光纤布线方法

为了有效监测城市下垫面温度特征, 本实验设计路径采用紧贴地表放置测温光纤的模式。使用 100m 光纤依次经过了绿地、沥青马路、行道树坑、水泥地面、行道树坑、石材小路、灌木丛、石质台阶、绿地(有遮荫)、绿地(太阳直晒)、灌木丛、透水砖小路、绿地、透水砖小路、行道树坑、沥青马路等下垫面类型, 为了精细化分析监测结果, 详细区分了地表是否硬化、是否有遮荫以及地面干燥程度等信息, 光纤相对位置和具体的下垫面类型信息统计记录如表 1, 进行了时间间隔为 1 分钟、空间间隔为 1 米的连续四小时监测。

表 1 下垫面详细信息
Table 1 Underlying surface details

下垫面类型 Type of Underlying surface	光纤位置/m Optical fiber position	地表状态 Surface conditions		
		硬化/非硬化 Hardened/non-hardened	遮荫 Shading	干燥/湿润 Dry/moist
绿地 Green space	0—12	非硬化	有	干燥
沥青马路 Asphalt road	12—25.8	硬化	无	干燥
行道树坑 Tree pit	25.8—28.2	非硬化	无	湿润
水泥地面 Cement floor	28.2—31.5	硬化	无	干燥
行道树坑 Tree pit	31.5—35	非硬化	有	湿润
石材小路 Stone path	35—36.6	硬化	无	干燥
灌木丛 Bush	36.6—42	非硬化	有	干燥
石质台阶 Stone steps	42—47.1	硬化	无	干燥
绿地 Green space	47.1—58.7	非硬化	有	干燥
绿地 Green space	58.7—62.2	非硬化	无	干燥
灌木丛 Bush	62.2—77.1	非硬化	无	干燥
透水砖小路 Permeable brick road	77.1—79.3	硬化	无	干燥
绿地 Green space	79.3—92.1	非硬化	无	干燥
透水砖小路 Permeable brick road	92.1—94.4	硬化	有	干燥
行道树坑 Tree pit	94.4—97.7	非硬化	有	湿润
沥青马路 Asphalt road	97.7—100	硬化	无	干燥

1.3 场地选择与特征描述

测试地点位于北京市通州区北京经济技术开发区某院内(116.57°E, 39.78°N), 海拔高度 10.97 米。监测时间为 2017 年 6 月 29 日 10:40—14:40 时间段。根据当日通州气象站(116.63°E, 39.92°N; 海拔高度 43.3 米)监测的数据, 当日通州最高气温 33.4℃, 最低气温 23.2℃, 天气多云, 南风 1—2 级。测试时间段内气象站监测的温度和风速信息如表 2, 这些信息将用于结果分析和对比。

表 2 通州气象站监测数据
Table 2 Monitoring data of Tongzhou meteorological station

监测项目 Monitoring indicator	时间段 Time period				
	10:00—11:00	11:00—12:00	12:00—13:00	13:00—14:00	14:00—15:00
平均温度 Average temperature/℃	31.4	28.2	30.1	28.4	27.2
平均风速 Average wind speed(m/s)	1.1	1	3.5	3.2	1.2

2 结果分析

2.1 地表温度的空间辨识效果分析

按照实验设计,通过分布式光纤测温系统对该监测场进行连续监测,共计采集到的四小时温度结果剔除异常数据后 23800 条。其中,最高温度为 49℃,监测到时间及位置是 13:40—14:40 时段的沥青马路;最低温度为 27℃,监测到的时间及位置是 12:40—13:40 时段的有遮荫的绿地;四个时段监测场地的平均地表温度分别为 33.41℃、35.34℃、33.65℃、34.37℃,与当时通州气象站的监测气温相比,监测场地的地表温度分别比气温高出 5.21℃、5.24℃、5.25℃、7.17℃;四个小时内的总体平均地表温度为 34.18℃,比监测时段内的平均气温高 5.12℃。按照光纤铺设路径,每分钟记录一次的方式进行存储,得到的四个时间段内距离和温度的对应关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,温度曲线在不同下垫面类型之间是连续过渡的,并形成波峰与波谷特征,沿光纤铺设线路,一共有 15 处不同下垫面类型交界处。根据表 1,将地表下垫面以基本类型、有无遮荫和干燥程度进行划分,硬化地表形成相对的波峰,非硬化地表形成相对的波谷,这种波峰与波谷的温度差在 5—10℃ 左右,能够有效区分景观类型。其中,有非硬化/硬化下垫面交界处 7 处,硬化/非硬化下垫面交界处 6 处,非硬化/非硬化下垫面交界处 2 处。

在非硬化/硬化下垫面交界处温度右侧均呈上升趋势,在硬化/非硬化下垫面交界处温度左侧均呈下降趋势,对于光纤覆盖长度比较短的石材小路以及透水砖小路,光纤传感器也可以探测到相较于两边不同下垫面类型的地表温度的升高。可以看出,光纤测温技术的空间精度可以满足对城市里小尺度下高异质性下垫面类型地表温度的识别。

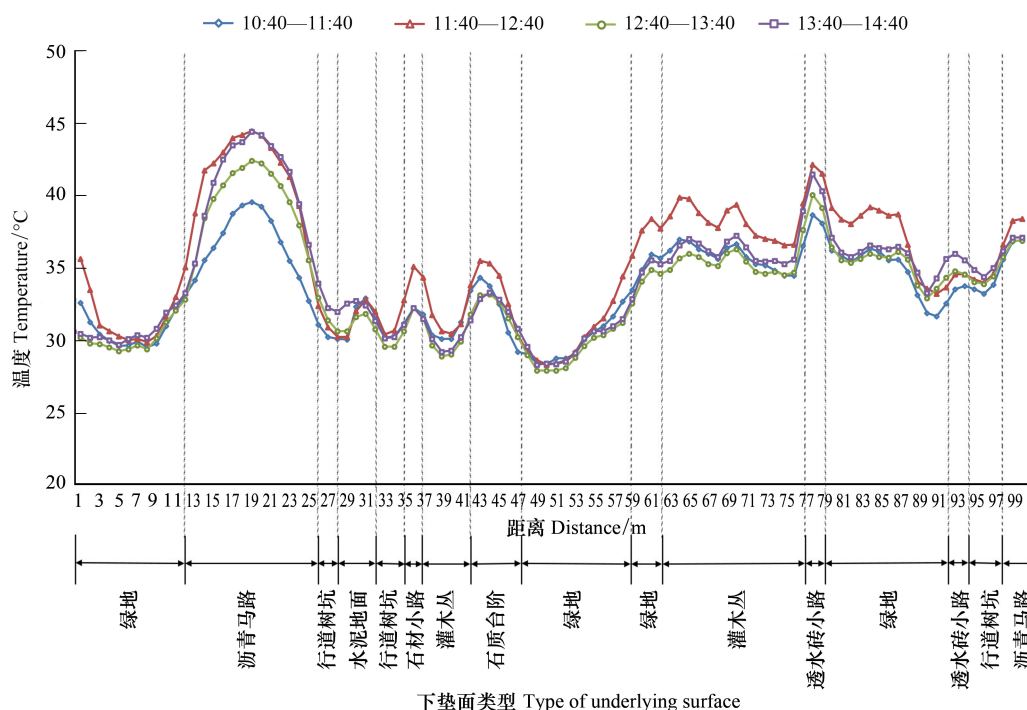


图 2 四小时温度监测结果

Fig.2 Temperature monitoring results of four hours

2.2 地表温度时间辨识效果分析

在时间精度上,本实验使用的光纤测温系统的传感周期是 1 秒,但在数据存储的过程中,考虑到温度的上升和下降是平缓的过程,综合考虑数据量与数据的时间精度,选用 1 分钟为存储周期,将一分钟内探测到的温

度求平均得到一个值来代表每分钟内的地表温度,四个小时内不同下垫面之间的地表温度相对变化趋势大致相同,反映了光纤测温技术的可靠性,但不同时间段温度的数值有区别,说明下垫面类型的变化对地表温度的影响方向是一致的,影响的效果受到太阳辐射、气温、云量等因素的影响。

具体来看,图 2 显示 10:40—11:40 时段在研究时间段内地表温度最低,到 11:40—12:40 时段地表温度升高,12:40—13:40 时段地表温度有小幅下降,13:40—14:40 时段地表温度又有升高。11:40—12:40 时间段各类型下垫面的总体地表温度高于其他三个时间段,而根据气象站当天的观测资料,气温在 12:00—13:00 时间段达到 10:00—15:00 时间段中的最大值,与本次监测得到的地表温度结果之间具有合理的重叠性。以上两段的分析说明光纤测温技术可以精确识别一小时内以及各小时之间的地表温度变化趋势。

2.3 地表温度的变化分析

根据四小时监测得到的数据,不同时间段内不同下垫面的平均地表温度如表 3,从表 3 可以看出,不同下垫面的平均温度在不同时段都有不同程度的变化。其中是否遮荫是对地表温度影响比较大的因素,对于相邻的两块有遮荫和无遮荫的绿地,平均地表温度前者比后者低 6.4℃;对于不相邻的两块有遮荫和无遮荫的灌木丛,平均地表温度前者比后者低 5.8℃;对于不相邻的两条有遮荫和无遮荫的透水砖小路,平均地表温度前者比后者低 5.5℃。另外,地表是否湿润也是影响地表温度的一个重要因素,原因是湿润的地表具有较强的水分蒸发,对地表有一定降温效果。

以 10:40—11:40 时间段内各下垫面类型的平均温度为基准,计算了后一个监测小时相比前一个监测小时地表温度的变化率(图 3)。在相同时间、相同太阳辐射强度的情况下,地表温度升温最明显的下垫面类型是沥青马路,在 11:40—12:40 时段内平均地表温度比前一个监测小时升高了 13.33%,而且温度下降相对缓慢。升温次明显的下垫面类型是没有遮荫的透水砖小路和石材小路,11:40—12:40 时段内地表温度分别上升 9.08%和 8.51%,石材小路的降温效率比透水砖小路快,在第 12:40—13:40 时段内二者的地表温度分别下降 8.22%和 5.36%。降温效果最好的是没有遮荫的绿地,虽然 11:40—12:40 时段内无遮荫的绿地地表温度上升了 6.83%,但在 12:40—13:40 时段内地表温度迅速降低 8.95%,无遮荫的绿地温度变化的趋势与杨雅君等发现的草地地表温度日变化波动较大^[13]一致。在 11:40—12:40 时段内直晒绿地的地表温度有 6.73%—6.83%的上升,而有遮荫的绿地地表温度在相同的时间内上升 1.76%,直晒的灌木丛和透水砖小路地表温度分别上升 6.68%和 9.08%,而有遮荫的灌木丛和透水砖小路地表温度分别上升 1.58%和 2.74%,表明有无遮荫对地表温度的影响较大。

以起始的绿地的平均温度为基准,计算了每个小时内各个下垫面类型相对于它相邻的两个下垫面类型的地表温度的变化(图 4)。沥青马路相较于周围两种下垫面类型的地表温度差别最大,最高可以比两侧平均地表温度高出 32.41%。比相邻两侧下垫面地表温度低最多的是紧挨着沥青马路的行道树坑,比相邻两侧下垫面地表温度低 16.21%,但这个负值主要是由于沥青马路的升温效果而不是树坑本身的下垫面性质,所以降温效果最明显的是比相邻两侧下垫面地表温度低 14.29%的有遮荫绿地。在四个监测时间段内总体上硬化下垫面的地表温度高于两侧其他下垫面类型的地表温度,但 58.7m—62.2m 测量光纤处的无遮荫绿地和 92.1—94.4m 测量光纤处的透水砖小路地表温度不符合上述规律(图 4),其原因是遮荫影响。无遮荫绿地与有遮荫

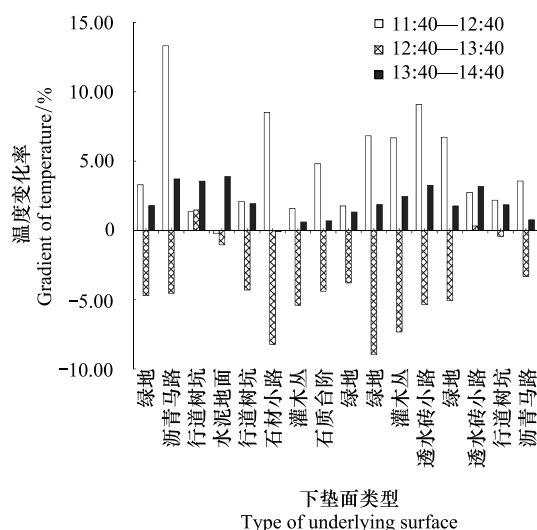


图 3 各下垫面不同时间段的温度变化率比较

Fig. 3 Comparison for temperature change rate of different underlying surfaces in each time period

绿地相邻致使在计算时无遮荫绿地比相邻下垫面地表温度高;透水砖小路有遮荫,因此温度比相邻的无遮荫绿地和行道树坑地表温度低。

表 3 不同下垫面的平均地表温度(℃)
Table 3 Average land surface temperature of different underlying surfaces

现场照片 Photos in situ	下垫面类型 Type of underlying surface	监测时间段 Monitoring period			
		10:40—11:40	11:40—12:40	12:40—13:40	13:40—14:40
	绿地	30.67	31.68	30.19	30.73
	沥青马路	36.32	41.16	39.29	40.75
	行道树坑	30.08	30.49	30.94	32.04
	水泥地面	31.69	31.62	31.29	32.51
	行道树坑	30.76	31.4	30.05	30.63
	石材小路	31.95	34.67	31.82	31.79
	灌木丛	30.99	31.48	29.78	29.96
	石质台阶	32	33.54	32.07	32.29
	绿地	30.07	30.6	29.44	29.83
	绿地	35.44	37.86	34.47	35.11
	灌木丛	35.78	38.17	35.37	36.24
	透水砖小路	38.33	41.81	39.57	40.86
	绿地	34.62	36.95	35.08	35.7
	透水砖小路	33.58	34.5	34.61	35.71
	行道树坑	33.48	34.21	34.06	34.69
	沥青马路	36.41	37.71	36.46	36.74

2.4 地表温度的自相关性分析

城市景观格局对地表温度的上升和下降均有较大影响^[3],研究地表温度的空间自相关关系,有助于将城市内不同下垫面类型(不透水面、植被、水体等)的空间分布变化进行合理分配,以达到优化城市热环境的目的。但受制于数据精度,以往研究地表温度空间自相关性的结论多聚焦到街区尺度,少有对街区内更小尺度

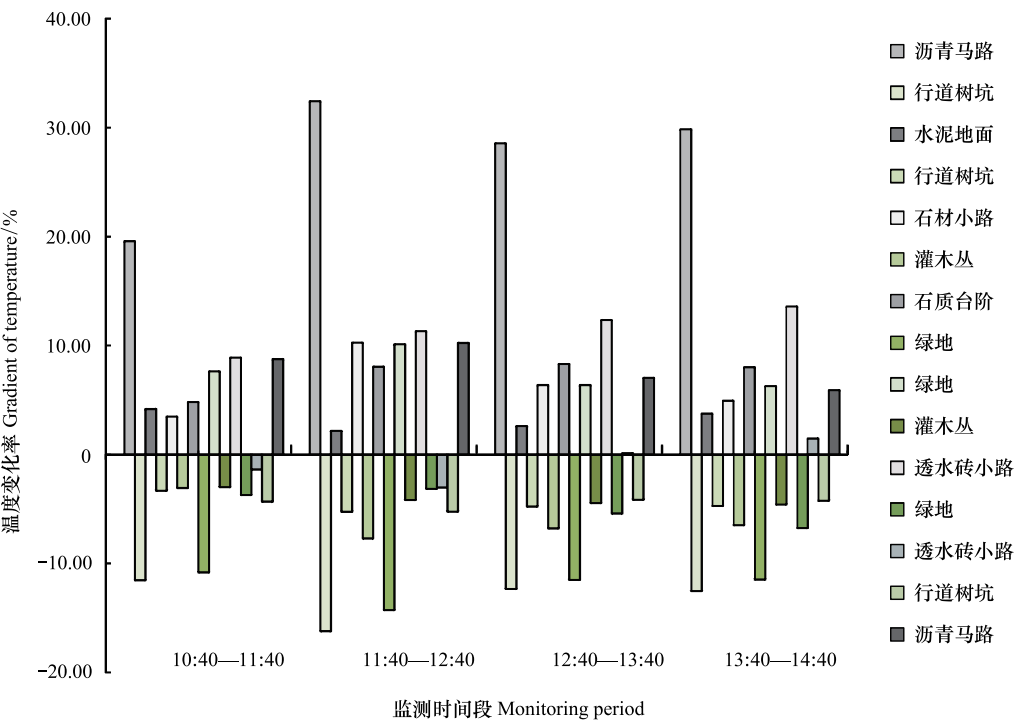


图 4 各时间段不同下垫面与相邻下垫面温度间的相对变化率

Fig.4 The temperature change rate between different underlying surfaces

的地表温度的空间自相关性分析。在本次研究中,光纤基本按照直线方式进行铺设,近似使用每一米光纤所测温度代表每一米实际距离的地表温度。因此,利用光纤测温系统及其监测数据,使用 SPSS 软件对不同下垫面平均地表温度的空间化的序列做了自相关性分析。结果表明地表温度在小尺度下依然具有空间自相关性(表 4),且随着序列延迟数的增加,自相关性系数减小,即一个点的地表温度与周围地表温度具有相关性,

表 4 地表温度的自相关分析

Table 4 Autocorrelation analysis of land surface temperature

延迟 Lag	自相关性 Autocorrelation	标准误差 ^a Std.Error ^a	博克斯-杨统计 Box-Ljung Statistic		
			值 Value	自由度 df	显著性 ^b Sig. ^b
1	0.951	0.099	93.170	1	0.000
2	0.842	0.098	166.943	2	0.000
3	0.720	0.098	221.398	3	0.000
4	0.603	0.097	260.056	4	0.000
5	0.489	0.097	285.719	5	0.000
6	0.370	0.096	300.547	6	0.000
7	0.243	0.095	307.048	7	0.000
8	0.117	0.095	308.566	8	0.000
9	-0.001	0.094	308.566	9	0.000
10	-0.101	0.094	309.720	10	0.000
11	-0.173	0.093	313.166	11	0.000
12	-0.214	0.093	318.457	12	0.000
13	-0.228	0.092	324.567	13	0.000
14	-0.228	0.092	330.747	14	0.000
15	-0.222	0.091	336.649	15	0.000
16	-0.208	0.091	341.926	16	0.000

a. 假定的基本过程为独立性(白噪声); b. 基于渐近卡方近似值

周围的点距离这个点越远,与这个点地表温度的相关性越小。对自相关系数进行显著性检验(图5),可以看到在延迟1—7时,自回归值突破了置信区间的界值,说明该空间温度序列在7阶以内相关性显著,7阶以上相关性不显著。本次分析的温度数据是以1m为间隔进行记录,即在本次使用光纤测量地表温度的区域内,一个点的地表温度与它相邻7米之内的地表温度数据相关性比较显著。

虽然这个结论只是基于单次实验结果,且会受用地属性以及自然通风/湿度等微气候因素的影响,难以得出一个点地表温度与距它多少距离内地表温度显著相关的普适性结论,但地表温度在小尺度下同样具有自相关性应该是明确的。这个规律可以为城市规划与建设提供参考。例如,硬化下垫面的宽度不要过大。有研究表明,植被层不仅可以通过自身较大的比热容保持较低的地表温度,还可以利用较大的蒸散发量,通过蒸散降温效应使周边气温保持较低^[23]。结合本研究发现的某点地表温度与周围地表温度相关的规律,在城市景观格局设计中尽量在硬化下垫面半径几米范围内镶嵌绿地斑块,比如在道路的中央和两边种植绿化带等,可以更好地发挥绿地的降温作用,对城市热岛有一定的缓解。

3 结论与讨论

研究表明,采用光纤测温技术可对城市小尺度下的不同下垫面类型的地表温度开展高时空精度监测,从而为精细化研究小尺度下不同下垫面地表温度的变化规律及其空间自相关特征提供技术支撑。这主要体现在温度曲线在不同下垫面所形成的波峰与波谷能够有效区分景观类型异质性、透水与不透水特性、遮荫与不遮荫等情形;在不同类型下垫面交界处,地表温度变化明显,具有拐点特征;遮荫会显著降低各种下垫面的地表温度。本研究对前人相关研究结论:城市绿地^[24,25]以及水体^[26]类型的景观对城市热环境有着良好的降温作用,从建筑物尺度采用高时空精度数据进行了有效验证。从另一个侧面也印证,在城市规划与建设过程中,见缝插绿、增加立体绿化等措施能通过增加城市中的绿地面积和遮荫面积来有效地改善城市热环境。

总之,光纤测温技术不论是从空间精度还是从时间精度上都可以满足对城市空间小尺度条件下地表温度的精细化监测。其监测数据具有精度高、实时性好和误差小的特点,经济成本和人力成本都比较低,且光纤被铺设好后可实现地表温度的长时间自动监测。更为重要的是使用光纤测温技术获取地表温度数据具有较大的分析价值,研究成果有利于实现城市的精细化管理,能为城市规划和园林设计等提供数据支持和合理的建议。

参考文献(References):

- [1] Son N T, Thanh B X. Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Cantho city, Vietnam. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 36: 81-91.
- [2] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Gregory T J, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. *生态学报*, 2005, 25(08): 2055-2060.
- [3] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模, 景观组分到空间构型. *生态学报*, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [4] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.
- [5] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(03): 1134-1147.
- [6] 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.

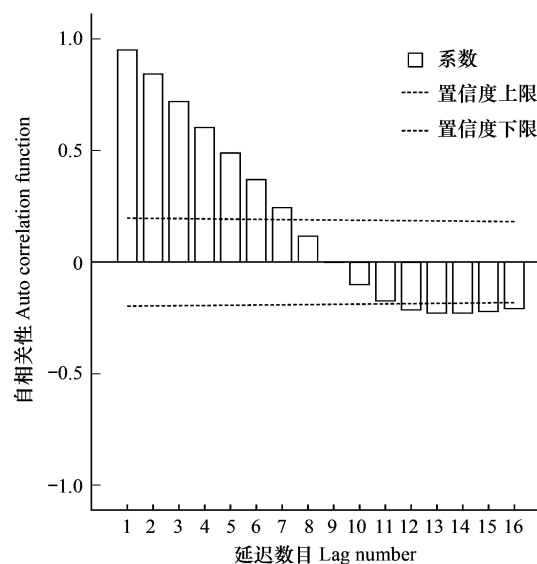


图5 地表温度的自相关性检验

Fig.5 Autocorrelation test of land surface temperature

- [7] 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.
- [8] Ooka R. Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1919-1930.
- [9] 饶峻荃. 广州地区街区尺度热环境与热舒适度评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] 杨英宝, 李小龙, 曹晨. 多尺度城市地表温度降尺度方法. 测绘科学, 2017, 42(10): 73-79.
- [11] 孟翔晨, 历华, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 李彬. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例. 遥感学报, 2018, 22(05): 857-871.
- [12] 刘霞, 王春林, 景元书, 麦博儒. 4 种城市下垫面地表温度年变化特征及其模拟分析. 热带气象学报, 2011, 27(3): 373-378.
- [13] 杨雅君, 邹振东, 赵文利, 邱国玉. 6 种城市下垫面热环境效应对比研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 881-889.
- [14] Song J, Du S, Feng X, Guo L. The relationships between landscape compositions and land surface temperature: Quantifying their resolution sensitivity with spatial regression models. Landscape and Urban Planning, 2014, 123: 145-157.
- [15] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote sensing of Environment, 2004, 89(4): 467-483.
- [16] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3995-4004.
- [17] 卢有朋. 城市街区空间形态对热岛效应的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [18] 廖延彪. 光纤传感技术对工业发展的促进作用. 物理, 2003, 32(09): 604-608.
- [19] 刘学君, 袁碧贤, 卢浩, 吴艳元, 钟少龙, 戴波. 地源热泵中光纤光栅土壤温度监测系统研究. 自动化仪表, 2018, 39(08): 52-55.
- [20] 于庆. 分布式光纤测温技术在煤矿中的应用. 工矿自动化, 2012, 38(04): 5-8.
- [21] 彭超, 赵健康, 苗付贵. 分布式光纤测温技术在线监测电缆温度. 高电压技术, 2006, (08): 43-45.
- [22] 邵嫒琴. 分布式光纤温度传感器校准中参考温度的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.
- [23] 陈声海, 魏信, 王修信, 朱启疆. 小区地表温度与下垫面结构关系研究. 国土资源遥感, 2009, 2009(3): 49-53.
- [24] 张昌顺, 谢高地, 鲁春霞, 刘春兰, 李娜, 王硕, 孙艳芝. 北京城市绿地对热岛效应的缓解作用. 资源科学, 2015, 37(6): 1156-1165.
- [25] 王帅帅, 陈颖彪, 千庆兰, 谢锦鹏. 城市公园对城市热岛的影响及三维分析——以广州市主城区为例. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1792-1798.
- [26] 韩筱婕. 基于城市热岛减缓的湖泊湿地景观功能连通性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.