

城市下垫面辐射热对微气候影响的对比实验研究

刘大龙¹, 冯本成², 赵佳², 孙恬¹, 文莉娟¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究气候、材质对城市下垫面辐射热作用的影响, 选取西安、汉中的 4 种城市下垫面(沥青、混凝土、铺面砖、草地)为研究对象, 通过测量两地的下垫面长波辐射强度、地表温度和热流等, 以及气温、相对湿度等环境参数, 总结了各自的变化规律。对比了 4 种下垫面辐射热对空气的热作用, 并对比了西安、汉中两地热作用的差异。以下垫面地表温度为纽带, 通过它的时间标准差、空间标准差及时空标准差, 从多角度揭示了下垫面类型与气候类型造成的城市下垫面辐射热作用差异。研究发现: 气候不同导致城市下垫面辐射对空气的热作用不同; 草地热作用的气候性差异最显著; 下垫面热流强度与短波辐射有较强的相关性; 长波辐射与气温、相对湿度具有显著的相关性。下垫面材质的反射率与长波辐射强度关系最密切, 吸收率对短波辐射强度影响最显著。

关键词: 下垫面; 地表温度; 热作用; 物理性质

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0890-08

Comparative experimental study on the impact of urban underlying surface radiation heat on microclimate

LIU Dalong¹, FENG Bencheng², ZHAO Jia², SUN Tian¹, WEN Lijuan¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the influence of climate and materials on the radiant heat effect of urban underlying surfaces, four kinds of urban underlying surfaces (asphalt, concrete, paving brick and grassland) in Xi'an and Hanzhong were selected as the research objects. By measuring the long and short wave radiation intensity, surface temperature and heat flow of underlying surfaces, as well as the environmental parameters such as air temperature and relative humidity, their change laws were summarized. The thermal effects of four kinds of underlying surface radiant heat on air are compared, and the differences of thermal effects between Xi'an and Hanzhong are compared. The land surface temperature of the underlying surface is the link. Through its time standard deviation, space standard deviation and space-time standard deviation, the difference of urban underlying surface radiant heat caused by the underlying surface type and climate type is revealed from multiple angles. It is found that different climates lead to different thermal effects of urban underlying surface on air; The radiant heat effect of paving brick and asphalt is stronger than that of concrete and grassland, and the climatic difference of radiant heat effect is significant; There is a strong correlation between the heat flux intensity of the underlying surface and the short wave radiation; The long wave radiation has a significant correlation with air temperature and relative humidity. The physical properties of the underlying surface such as reflectivity, absorptivity, thermal conductivity and specific heat capacity have a strong impact on the long wave and short wave radiation intensity; This study can provide scientific basis for optimizing urban thermal environment design.

Key words: underlying surface; surface temperature; thermal action; physical property

随着气候变暖以及我国城市化进程的加速, 城市下垫面是形成城市微气候的关键, 显著影响着城市的地气间的能量收支
城市热环境不断恶化, 成为制约城市发展亟待解决的重要问题之一^[1]。

平衡,而其中辐射热是下垫面影响城市热量收支规律的关键^[2-4]。城市下垫面是典型的人造下垫面,类型多样,不同材质因辐射吸收、发射及反射能力的不同导致下垫面的辐射热效应差异显著。太阳短波辐射是下垫面最主要的辐射热源,而空气既受到辐射热作用的影响,又反作用于辐射热作用。因此,气候对下垫面辐射热作用具有重要作用。地表材质和气候类型都是影响下垫面辐射热作用的关键要素,它们与下垫面的辐射热作用的关系是城市能量系统分析、城市热环境设计、城市规划等研究的重要基础问题。

目前,对于城市下垫面与城市热辐射和热环境的关系研究备受关注。孙仕强等^[5]利用夏季测试数据,对南京城郊的辐射平衡进行分析探究,得出了夏季晴天条件下城区向上短波辐射小于郊区,城市地表向上长波辐射大于郊区自然地表;王菲菲等^[6]通过反演地表净辐射通量,发现林地和裸地所占面积比例对地表净辐射通量的影响最显;周莉等^[7]利用大气环流模式 LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom)对珠江三角洲、长江三角洲和京津冀城市群下垫面变化的东亚气候进行模拟试验,得出城市群下垫面类型改变后,地面温度升高,进而感热通量、地表有效长波辐射增强;崔耀平等^[8]分析了城市区域四种均一地表覆盖类型对地表净辐射通量的影响,发现不透水地面的显热大潜热小,而植被层的显热小潜热大;Li等^[9]通过对不同类型园林空间的温度、湿度和PM2.5浓度的对比分析,得出不同空间形式、种植形式和材料对下垫面热环境和PM2.5含量的影响;Zhang等^[10]基于地面覆盖材料的反射率对热环境的影响,发现反射率的增加对地表附近的风速影响不大,但使地表附近的气温下降;范舒欣等^[11]探究了小微尺度下垫面的类型与格局特征对环境微气候的影响,发现不同类型下垫面之间日均空气温度、湿度的差异均达到了显著及以上水平;Huang等^[12]分析了不同下垫面类型对地表温度影响的规律,发现随着透水下垫面不断转化为不透水表面,导致城市地表温度持续上升。

同时,探究气候与城市辐射热作用的关系的研究也受到了诸多学者的关注,Lindberg等^[13]基于三个高纬度城市的气候条件和地理背景,研究了气候和城市环境对平均辐射温度的影响,发现夏季平均辐射温度较为接近,冬季相差较大;Lau等^[14]通过气候变化分析了哥德堡、波尔图和法兰克福的城市辐射热负荷,发现云量与城市辐射热

负荷具有相关性;Yao等^[15]基于中国不同气候区选取31个城市,探究气候变化与城市热岛的关系,发现北方城市地表与气候变化具有较低的敏感性,而南方两者的关系并不明显;Konarska等^[16]研究发现阳光直射区和阴影区的表面温度差异会随着云量的增加而减小,这反过来会影响长波辐射通量。

综上所述,现有研究已形成共识:城市下垫面对城市辐射场具有重要作用。有些研究分析了同一城市不同下垫面的辐射热效应;有的研究分析了不同气候区下垫面的宏观辐射作用差异。对于城市环境营造,下垫面的类型选取是重要内容,在不同气候条件下,不同下垫面的辐射热效应是否存在差异?存在什么差异?这些问题对于城市设计、景观营造等领域具有重要意义。本文分别选择地处寒冷地区的西安和夏热冬冷地区的汉中以及四种具有代表性的城市下垫面(草地、铺面转、混凝土、沥青)作为研究对象,系统分析两种气候区和4种下垫面的辐射场变化规律,阐述了不同气候区的下垫面对城市辐射热作用的影响,并通过地表温度的时间、空间和时空标准差定量分析不同下垫面的时空变化特征,对比分析材质、气候对城市辐射热作用的差异性。

1 测试区域概况与测试方法

1.1 测试区域概况

西安地处陕西关中地区,属于典型的寒冷地区;汉中地处陕南地区,属于典型的夏热冬冷地区。西安与汉中分别位于秦岭北麓和南麓,两地虽相距不远,但地形地貌、气候,甚至风俗民貌都有明显差异。在气候特征上,西安偏干冷,汉中偏湿热。两地的测试选在夏季,主要原因是夏季辐射强度高,辐射效应更为显著。在西安的测试区域位于某高校内,测点为太阳光无遮挡的开阔场地,测试时间为2021年7月20日—7月22日;汉中的测试区域也位于某高校内,测试时间为2021年7月23日—7月26日,测点附近无高楼建筑,为开阔场地。两地的测点尽量选择外观颜色大体一致的,同时避免大量热流和汽车经过等造成实验干扰。选取4种常见的不同城市下垫面,分别为草地、铺面砖路面、沥青路面和混凝土路面。图1为各测试点下垫面材质。四种下垫面的属性有所不同,方便进行对比研究。

1.2 测试方法

测试主要内容为地表温度,空气温度、空气



图 1 测试区域照片

Fig. 1 Photos of test area

相对湿度、风速、长波辐射量以及短波辐射量. 测试地表温度由四通道温度计测试得出, 每一个表面温度由 4 个通道温度的平均值得出, 测试周期为 10 min; 温度块用于测试空气温度和空气相对湿度, 并基于三脚架高度以及相关测试经验, 将其包裹在锡箔纸中并离地 1 m 左右的距离, 防止太阳辐射直接照射在传感器上使测得的结果升高, 测试周期为 5 min; 风速仪用于测试风速; 测量短波辐射的方法为将太阳辐射仪朝向地面水平放置, 离开地面一定的距离测得下垫面反射辐射强度, 测试周期为 10 min. 长波辐射强度与测量反射辐射强度的仪器放置位置相同, 不同的是采用的仪器是长波辐射仪, 其可以测量长波波段范围内的辐射强度测试周期为 10 min. 相关仪器精度如表 1 所示.

表 1 测试仪器及相关参数

Tab. 1 Testing Instruments and Related Parameters

测试项目	仪器名称	仪器精度
短波辐射强度	EKO(MS-602)	$\pm 0.5\%$
长波辐射强度	QTS-4 长波辐射仪	$\pm 0.5\%$
地表温度	四通道热电偶	$\pm 0.5\%$
空气温湿度	温度块	空气温度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 空气湿度 $\pm 5.0\%$
地表热流	热流传感片	$0.005\text{ mV}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$
风速	Testo405i 风速仪	$\pm (0.1\text{ m/s}+5\%$ 测量值)

测试在西安和汉中分别做了测试, 短波辐射测试时间间隔为 10 min. 长波辐射全天测试, 测试间隔为 10 min. 空气温湿度计时间间隔 5 min. 测试仪器在使用过程中均进行了校正.

2 城市下垫面的辐射对比分析

2.1 不同下垫面地表温度对比分析

城市下垫面辐射热作用集中体现在地表温度

上. 西安和汉中的地表温度如图 2 所示. 两市的四种下垫面的地表温度变化大体一致, 趋势为先上升后下降. 由于空气温度的升高和太阳辐射的增强, 两市下垫面地表温度在 14 时左右达到最大值, 在 6 时左右达到最小值. 西安铺面砖的地表温度明显高于其他三种下垫面温度, 草地的地表温度最低, 沥青和混凝土的地表温度相差很小; 汉中沥青的地表温度略高于铺面砖和混凝土. 虽然汉中市下垫面材质与西安类似, 但是两者地表温度有着较大的区别. 因为西安空气温度较高和空气相对湿度较低, 西安铺面砖的地表温度远远高于汉中, 沥青和混凝土的地表温度低于汉中, 西安下垫面地表温度总体高于汉中.

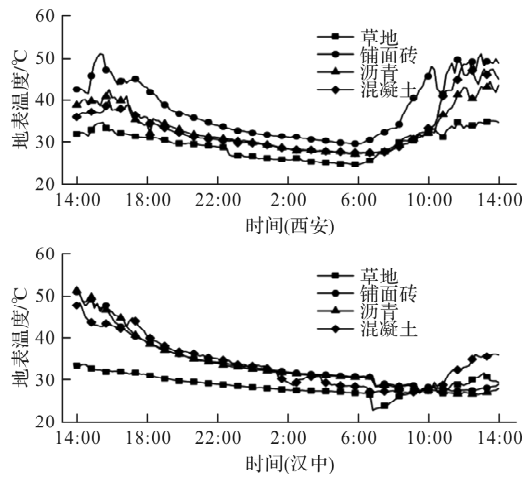


图 2 西安与汉中不同下垫面地表温度

Fig. 2 Surface temperature of different underlying surfaces in Xi'an and Hanzhong

2.2 长短波辐射对比分析

图 3 为西安和汉中不同下垫面的短波辐射强度和长波辐射强度. 地表短波辐射强度与太阳辐射有密切的关系, 从图 3 中可以看出, 西安在 14 时左右的短波辐射强度最强, 到了夜间, 由于没有了太阳辐射, 各下垫面的短波辐射强度均为零, 短波辐射强度大小依次为混凝土>草地>沥青>铺面砖; 汉中市在 14 时左右达到最大值, 短波辐射强度大小依次为铺面砖>草地>混凝土>沥青. 总体上看, 汉中市下垫面的短波辐射强度要高于西安, 西安铺面砖与汉中沥青的强度最低. 西安铺面砖的长波辐射强度较高, 汉中人工下垫面的长波辐射强度较为接近, 沥青略高于混凝土和铺面砖. 汉中市下垫面长波辐射整体低于西安, 原因可能是汉中气候较西安更为湿热, 空气相对湿度较高, 易于吸收长波辐射, 从而导致长波辐射强度较低.

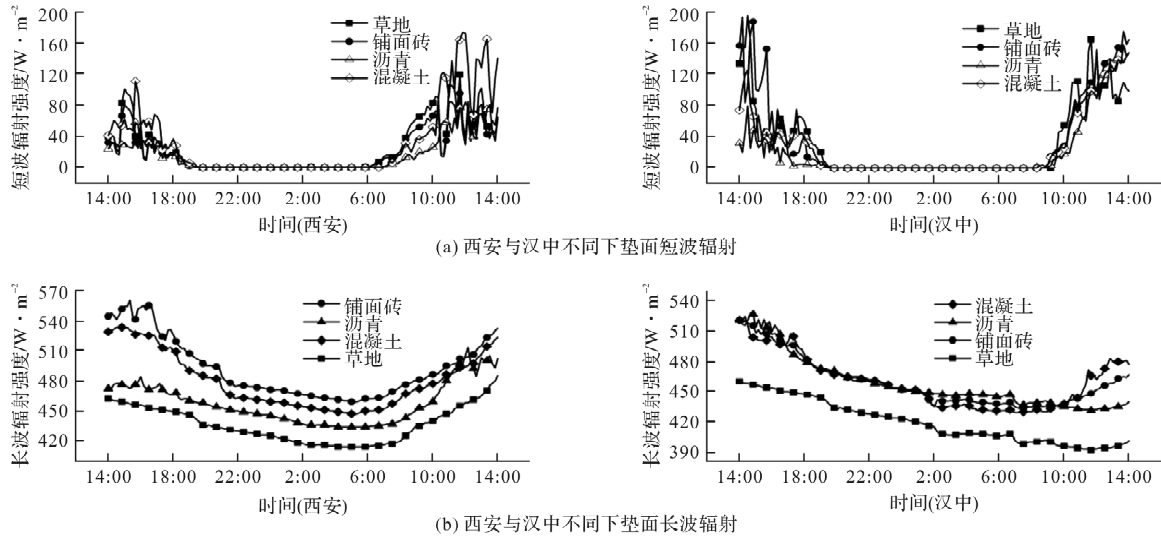


图3 西安与汉中不同下垫面的长短波辐射强度

Fig. 3 Long and short wave radiation intensity of different underlying surfaces in Xi'an and Hanzhong

2.3 不同下垫面热流强度对比分析

下垫面地表热流与热辐射密切相关,在一定程度上能够反映出城市下垫面辐射热作用的强弱.西安与汉中各下垫面短波辐射与热流的关系如图4所示.白天时,热流变化幅度较大,夜间,随着短波辐射的消失,热流趋于平稳,保持在 0 W/m^2

以下.西安热流强度依次为草地>铺面砖>混凝土>沥青,汉中热流强度依次为草地>混凝土>铺面砖>沥青,下垫面的热流强度变化趋势与短波辐射强度保持一致.夏季汉中气候较为湿热,空气相对湿度较高,空气温度较低,导致热流整体低于西安.

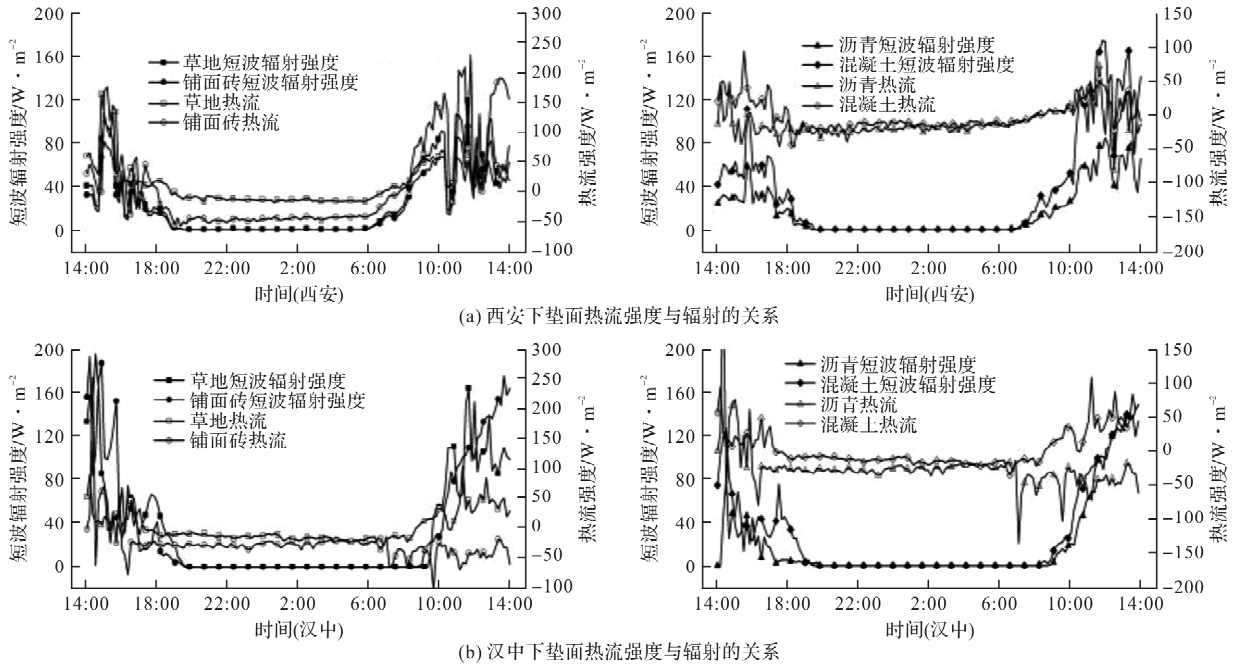


图4 下垫面热流强度与短波辐射的关系

Fig. 4 Relationship between heat flux intensity of underlying surface and short wave radiation

3 城市下垫面辐射影响要素分析

3.1 不同下垫面辐射强度与气象因子的关系

太阳辐射强度与空气温湿度有较强的相关性,由于太阳辐射热与长波辐射的日夜平衡,使得空

气温度日变化具有一定的规律性;而对于空气相对湿度而言,水分蒸发过程中,需要吸收汽化潜热,这些热量直接或间接来自太阳辐射热^[17].对于其余气象因子,风速对于辐射强度的影响较小,可能是因为测试区域风速较小,且无规律性以及

测试区域下垫面大都为硬质下垫面；云量对于辐射强度的影响较大，为保证测试时两地的云量保持相对一致，均选择晴天的测试数据进行分析。图 5 为两座城市下垫面空气温度与空气相对湿度变化趋势。西安铺面砖空气温度整体较高，而汉中

的下垫面空气温度较为接近，西安下垫面空气温度大于汉中；而空气相对湿度与空气温度的变化趋势相反，汉中下垫面的空气相对湿度高于西安，气候较为湿润。

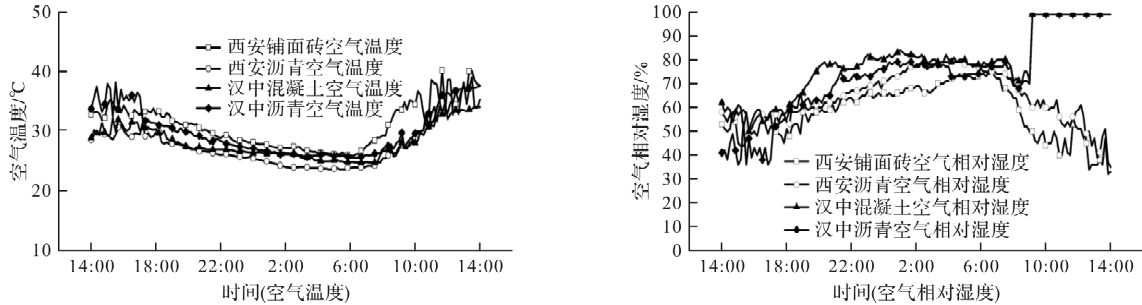


图 5 西安与汉中不同下垫面空气温度与空气相对湿度

Fig. 5 Air temperature and relative humidity of different underlying surfaces in Xi'an and Hanzhong

表 2 不同下垫面长短波辐射量与气象因子的偏相关系数

Tab. 2 Partial correlation coefficient between long and short wave radiation of different underlying surfaces and meteorological factors

分析变量		控制变量	西安下垫面偏相关系数				汉中下垫面偏相关系数			
			铺面砖	沥青	混凝土	草地	铺面砖	沥青	混凝土	草地
长波辐射	空气温度	空气相对湿度	0.85	0.83	0.61	0.76	0.9	0.71	0.86	0.82
	空气相对湿度	空气温度	−0.43	−0.49	−0.5	−0.64	−0.81	−0.94	−0.81	−0.94
短波辐射	空气温度	空气相对湿度	0.82	0.9	0.81	0.82	0.8	0.79	0.87	0.44
	空气相对湿度	空气温度	−0.74	−0.77	−0.77	−0.75	−0.94	−0.92	−0.89	−0.95

表 2 为不同下垫面长波辐射量与气象因子的相关系数。从表中可以看出，长波辐射对空气温度和空气相对湿度的影响极为显著。其中，长波辐射量与空气温度之间呈正相关关系，长波辐射量对空气温度起促进作用；并且从两市沥青长波辐射量与空气温度的相关系数可以看出，长波辐射量越高，对于空气温度的影响越显著。空气相对湿度与长波辐射量呈负相关关系，其对长波辐射量起抑制作用，这可能由于空气中水汽含量较高，削弱了辐射量。由于汉中下垫面空气相对湿度较高，空气温度较低，导致汉中的长波辐射量低于西安。

短波辐射强度与气象因子的相关性比长波辐射更为显著。特别是当出现全云天时，汉中短波辐射强度与空气相对湿度呈显著的负相关关系。

3.2 不同下垫面辐射强度与材质的关系

在多种属性因素共同作用下，城市下垫面的长短波辐射量往往具有较大的差异。根据民用建筑热工设计规范^[18]以及对下垫面材质的判断，表 3 为西安与汉中不同下垫面的物理性质参数。其中两座城市不同下垫面的导热系数与比热容归为一致；因为下垫面均为不透明材质，设定反射率与吸

收率之和为 1；查阅相关文献可知，反射率并不是恒定值而是一个区间，这是因为多种因素导致的，常见的影响因素有：表面颜色，表面光滑程度等。

表 3 下垫面物理性质

Tab. 3 Physical properties of underlying surface

	混凝土	草地	铺面砖	沥青
反射率	0.3(西安)	0.5(西安)	0.35(西安)	0.2(西安)
	0.35(汉中)	0.5(汉中)	0.4(汉中)	0.15(汉中)
导热系数	1.51	0.76	0.52	1.05
比热容	0.92	1.01	0.65	0.8
吸收率	0.7(西安)	0.5(西安)	0.65(西安)	0.8(西安)
	0.65(汉中)	0.5(汉中)	0.6(汉中)	0.85(汉中)

表 4 为平均长波辐射强度与下垫面物理性质的相关系数。从表中可以看出，三种下垫面物理性质与长波辐射量均呈负相关关系。其中，反射率对长波辐射量的影响最为显著，这可能是因为随着下垫面反射率提高，其吸收的短波辐射量减少，地表温度变低，由于地表上方的长波辐射强度与地表温度有关，所以随着下垫面反射率的提高，下垫面长波辐射强度不断降低；随着下垫面导热系数增加，更多的热量导入地下，地表温度降低，而地表发射的长波辐射强度与地表温度有直接关

系,所以下垫面材料导热系数增加,地表长波辐射量在减小;而比热容与长波辐射强度的逐时变化量有密切关系。

表4 平均长波辐射强度与下垫面物理性质的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between average long wave radiation intensity and physical properties of underlying surface

分析变量	控制变量	偏相关系数
导热系数	比热容、反射率	-0.29
反射率	比热容、导热系数	-0.73
比热容	导热系数、反射率	-0.36

短波辐射作为下垫面的主要热源,对城市下垫面辐射热有重要作用。表5为下垫面所吸收的平均短波辐射与物理性质的相关系数。从表中可以看出,短波辐射强度与导热系数、比热容和吸收率呈正相关关系,与反射率呈负相关关系。其中,下垫面吸收率和反射率对短波辐射的影响最为显著。这可能是因为短波辐射作为下垫面的主要热源,其值的大小反映出所吸收太阳辐射的大小,随着下垫面吸收率的增大,短波辐射强度也随之增大;反射率的大小决定了短波反射辐射的大小,随着下垫面反射率的增大,所反射的太阳辐射也增大,导致下垫面吸收的短波辐射减小;而比热容决定了下垫面的蓄热性,这与下垫面短波辐射强度密切相关。

表5 平均短波辐射强度与下垫面物理性质的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficient between average short wave radiation intensity and physical properties of underlying surface

分析变量	控制变量	偏相关系数
导热系数	反射率、比热容、吸收率	0.55
反射率	导热系数、比热容、吸收率	-0.85
比热容	导热系数、反射率、吸收率	0.8
吸收率	导热系数、反射率、比热容	0.88

测试区域西安铺面砖的反射率和导热系数较低,其长波辐射强度较大;同时其吸收率较高,导致所吸收的短波辐射较高,使得地表温度最高。汉中混凝土、沥青的物性相差较大,尤其二者吸收率与反射率相差甚远,而测试得出的长波辐射量与短波反射辐射量却相差无几,这可能是因为空气相对湿度较高且二者含量较为接近,导致水汽对于长波辐射的吸收作用更强,同时对短波辐射产生影响。这也间接表明气候因素对于长短波辐射量的影响更为显著。

4 城市下垫面热环境的时空变化特征

地表温度是城市下垫面辐射热作用的集中体

现。采用黄良美等^[19]数据处理方法,通过对下垫面温度进行时间标准差、空间标准差和时空标准差计算,能够定量分析出不同下垫面在时间系列、空间系列及时空综合系列的热环境变化特征。其标准差计算公式分别如下。

$$X_1 = X_{ij} - \bar{X}_i \quad (1)$$

$$X_2 = X_{ij} - \bar{X}_j \quad (2)$$

$$X_3 = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N-1}}} \quad (3)$$

式(1)中: X_{ij} 为 j 类下垫面在 i 时的测试温度; \bar{X}_i 为四种下垫面在 i 时的平均温度; X_1 为用 \bar{X}_i 中心化后的第一类矩阵。式(2)中: \bar{X}_j 为 j 类下垫面的24小时平均温度; X_2 为用 \bar{X}_j 中心化后的第二类矩阵。式(3)中: X_3 式用用 \bar{X}_i 中心化后再进行其标准差转换后的第三类矩阵;最后将这三种 4×24 矩阵进行标准差计算,可得出时间、空间和时空标准差。

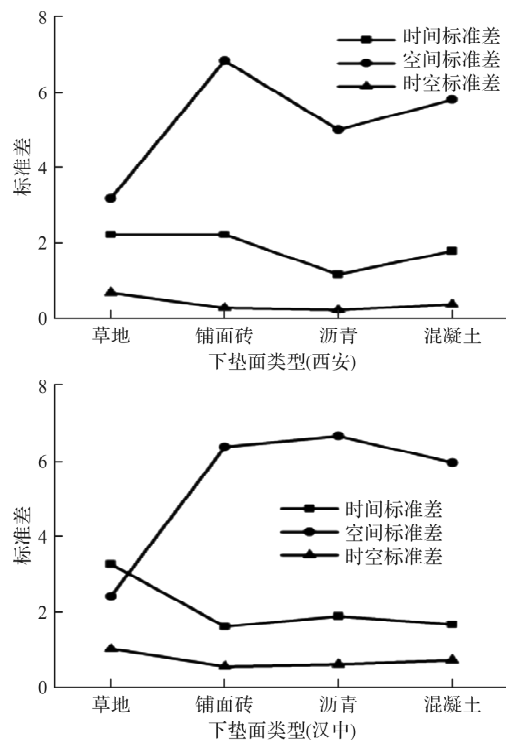


图6 西安与汉中不同下垫面地表温度的标准差

Fig. 6 Standard deviation of surface temperature of different underlying surfaces in Xi'an and Hanzhong

西安与汉中各下垫面的时空标准差如图6所示。时间标准差反映下垫面温度变化的稳定性,标准差小则表明该下垫面稳定,全天变化小。空间标准差反映下垫面与测试区域总体热环境的接近程度,标准差小则说明与总体热环境情况较为接近。时空标准差小则表明该下垫面随地域的变化程度

越弱。

西安时间标准差由小到大依次是沥青、混凝土、铺面砖、草地；汉中依次是混凝土、铺面砖、沥青、草地。草地在不同地区的材料本身差异较小，在西安和汉中都是随热环境变化最显著。而沥青在不同地区生产差异最大，体现出材料变化带来的显著热作用变化。汉中除草地外三种下垫面的时间标准差比西安更为接近，这可能是因为汉中空气较为湿润，导致人工下垫面的热扩散率整体较为接近，相对应的时间标准差也较为接近^[20]。

西安空间标准差由小到大依次是草地、沥青、混凝土、铺面砖；汉中依次是草地、混凝土、铺面砖、沥青。草地因随环境变化最显著，因此在两地都体现出与区域温度最接近。同样沥青体现出明显的材料地区差异。分析综合性的时空标准差发现，两地的草地标准差都最大，随气候变化最显著。而西安沥青、汉中铺面砖的时空标准差最小，随气候变化程度越小，则热环境稳定性较好。

5 结论

(1)地表温度是城市下垫面辐射热作用的集中体现。材质的差异，导致不同下垫面的地表温度和长短波辐射强度存在较大差异，下垫面的热流强度变化趋势与短波辐射强度保持正相关；

(2)空气相对湿度与长短波辐射量呈负相关性；长短波辐射与气温呈正相关性，短波辐射与气象因子呈现更为显著的相关性。对比下垫面材质，空气相对湿度对长短波辐射的影响更为显著；

(3)下垫面材质的反射率与长短波辐射强度呈负相关性，并且对长波辐射影响最大；导热系数和比热容对长短波辐射的影响相近，影响程度小于吸收率；

(4)下垫面材质吸收率与短波辐射强度呈正相关性，且影响最显著；

(5)草地的辐射热环境随气候变化最显著。西安沥青、汉中铺面砖的热作用稳定性好。

参考文献 References

- [1] 杨雅君, 邹振东, 赵文利, 等. 6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 881-889.
YANG Yajun, ZOU Zhendong, ZHAO Wenli, et al. Comparative study on thermal environmental effects of

- six urban underlying surfaces[J]. Journal of Peking University(Natural Science Edition), 2017, 53(5): 881-889.
- [2] LIU Xia, W Chunlin, J Yuanshu, et al. Study on annual variation and simulation of temperature in four urban underlying surfaces[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(3): 373-378.
- [3] 王咏薇, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 土地利用变化对城市气象环境影响的数值研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2006(6): 562-581.
WANG Yongwei, JIANG Weimei, JI Chongping, et al. Numerical study on the impact of land use change on urban meteorological environment[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science Edition), 2006(6): 562-58.
- [4] 徐永明, 刘勇洪. 基于TM影像的北京市热环境及其与不透水面的关系研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 639-643.
XU Yongming, LIU Yonghong. Research on the relationship between thermal environment and impervious surface in Beijing based on TM images[J]. Journal of Ecological Environment, 2013, 22(4): 639-643.
- [5] 孙仕强, 刘寿东, 王咏薇, 等. 城、郊能量及辐射平衡特征观测分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(4): 445-454.
SUN Shiqiang, LIU Shoudong, WANG Yongwei, et al. Observation and analysis of characteristics of urban and suburban energy and radiation balance[J]. Yangtze River Basin Resources and Environment, 2013, 22(4): 445-454.
- [6] 王菲菲, 赵小锋, 刘秀广, 等. 城市地表净辐射通量的季相变化及与地表覆盖格局的关系研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(8): 1160-1168.
WANG Feifei, ZHAO Xiaofeng, LIU Xiuguang, et al. Research on the seasonal change of urban net surface radiation flux and its relationship with the land cover pattern[J]. Journal of Earth Information Science, 2018, 20(8): 1160-1168.
- [7] 周莉, 江志红, 李肇新, 等. 中国东部不同区域城市群下垫面变化气候效应的模拟研究[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 596-610.
ZHOU Li, JIANG Zhihong, LI Zhaoxin, et al. Simulation study on climate effect of urban agglomeration underlying surface change in different regions of eastern China[J]. Atmospheric Science, 2015, 39(3): 596-610.
- [8] 崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 等. 城市不同下垫面的能量平衡及温度差异模拟[J]. 地理研究, 2012, 31(7): 1257-1268.

- CUI Yaoping, LIU Jiyuan, ZHANG Xuezhen, et al. Simulation of energy balance and temperature difference of different urban underlying surfaces[J]. *Geographic Research*, 2012, 31(7): 1257-1268.
- [9] PENG Li, XU Zhengzhou, CHEN Heming. Analysis on thermal environment of underlying surface and PM_{2.5} concentration in community park of Beijing in winter[J]. *Journal of Landscape Research*, 2020, 12(6): 41-46.
- [10] ZHANG Hao, YAO Jupeng, XU Tiantian, et al. Research on the influence of underlying surface reflectivity on the thermal environment of campus[C]//International Symposium on Advance in Materials Science (IAMS 2016). Shanghai: Tongji University Press, 2016.
- [11] 范舒欣, 李坤, 张梦园, 等. 城市居住区绿地小微尺度下垫面构成对环境微气候的影响——以北京地区为例[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(10): 100-109.
- FAN Shuxin, LI Kun, ZHANG Mengyuan, et al. The impact of the composition of the micro scale underlying surface of urban residential green space on the environmental microclimate: Taking Beijing as an example[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(10): 100-109.
- [12] HUANG M, LI J, HE X A. The influence of underlying surface on land surface temperature: A case study of urban green space in Harbin[J]. *Energy Procedia*, 2019, 157: 746-751.
- [13] LINDBERG F, HOLMER B R, THORSSON S. Characteristics of the mean radiant temperature in high latitude cities: Implications for sensitive climate planning applications[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(5): 613.
- [14] LAU K L, LINDBERG F, RAYNER D, et al. The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: A study of three European cities[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(7): 799-814.
- [15] YAO R, WANG L, HUANG X, et al. Less sensitive of urban surface to climate variability than rural in Northern China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 650.
- [16] KONARSKA J, LINDBERG F, LARSSON A, et al. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees: application for outdoor thermal comfort modelling[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2014, 117(3/4): 363-376.
- [17] 刘加平. 建筑物理[M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- LIU Jiaping. Building physics[M]. 4th ed. Beijing: China Construction Press, 2009.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB50176—2016[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2016.
- [19] 黄良美, 黄海霞, 项东云, 等. 南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J]. *生态环境*, 2007(5): 1411-1420.
- HUANG Liangmei, HUANG Haixia, XIANG Dongyun, et al. Daily variation law of four underlying surface temperatures in Nanjing and urban heat island effect[J]. *Ecological Environment*, 2007(5): 1411-1420.
- [20] 刘大龙, 马岚, 刘加平. 城市下垫面对夏季微气候影响的测试研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(1): 107-112.
- LIU Dalong, MA Lan, LIU Jiaping. Test study on the impact of urban underlying surface on summer microclimate[J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2020, 52(1): 107-112.

(编辑 吴海西)