

引用格式: Tan Leiqi, Zhou Liang, Li Li, *et al.* Influence of Urban Buildings Forms on Land Surface Temperature: From a Gradient Perspective[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1492–1503. [谭磊琪, 周亮, 李丽, 等. 基于梯度视角的城市建筑形态对地表温度的影响[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1492–1503.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1492

基于梯度视角的城市建筑形态对地表温度的影响

谭磊琪¹, 周亮^{1,2,3}, 李丽³, 袁博^{1,4}, 胡凤宁^{1,5}

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 广东 深圳 518034;

3. 中国科学院兰州分院, 甘肃 兰州 730000;

4. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

5. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为探索不同城市建筑形态对地表温度影响的梯度与城市间差异, 研究以西安、郑州、济南为研究区, 基于 Landsat-8 TIRS 影像和城市三维建筑数据, 通过多元线性回归模型分析了这3个城市中建筑形态对不同季节地表温度在城市整体和梯度尺度上的影响并比较其差异性: ①夏季和冬季中地表温度受城市建筑形态影响最大的城市分别为西安($R^2=0.414$)和济南($R^2=0.300$)。建筑覆盖率和平均建筑高度分别对3个城市夏季和冬季地表温度影响最大, 且分别表现为正向与负向影响。②对建筑覆盖率进行梯度分级后, 发现当覆盖率小于20%时, 建筑体积密度对3个城市有较强的降温作用; 当覆盖率处于20%—40%时, 平均建筑高度显著降低3个城市地表温度; 当覆盖率处于40%—60%时, 天空可视因子对3个城市有一定增温作用; 当覆盖率大于60%时, 平均建筑高度大幅度降低济南地表温度。③西安、济南、郑州低层建筑的平均地表温度分别为9.5℃、7.7℃、6.1℃, 3个城市的地表温度由低层到高层都呈下降趋势, 且每个梯度内西安的地表温度均高于郑州和济南。研究表明: 合理规划城市建筑形态, 有利于缓解中心城市地表温度过高的现象。

关键词: 地表温度; 城市形态; 建筑指标; 城市化; 空间分布

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1492-12

1 引言

快速的城市化进程造成并加剧了诸如交通拥挤、空气污染、热岛效应等一系列城市问题^[1-6]。其中, 热岛效应已成为城市生态问题中最严峻的问题之一, 其被描述为城市气温比周边郊区和农村地区气温更高的现象^[7-8], 对农业、能源消耗和城市可持续发展都产生严重影响, 严重威胁着城市居民的生活环境和健康^[9]。2019年, 黄河流域生态保护和高质量发展座谈会的召开指出, 积极构建开放合作新

格局是推动黄河流域沿线城市化进程的重要保证^[10]。西安、郑州、济南3个城市发展迅速, 城市边界及建成区面积不断扩张。2020年城市综合发展指标及城市GDP排名均位于全国前20, 目前, 3个城市立足黄河流域中心城市发展定位, 加强基础设施建设和多领域产业的合作, 积极推动沿黄地区城市群的快速发展。然而, 当前3个城市快速发展面临巨大挑战, 如产业基础薄弱、人地矛盾突出、热岛效应不断加剧等问题。快速城市化导致城市在二维(水平)和三维(垂直)方向上的景观特征发生显

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2022-09-21

基金项目: 甘肃省自然科学基金重点项目(21JR7RA281, 21JR7RA278), 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2020-05-067), 甘肃省2021年重点人才项目(2021RCXM073), 兰州交通大学(201806)优秀平台资助。

作者简介: 谭磊琪(1997—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事城市热环境研究。E-mail: tanleiqi888@163.com

通讯作者: 周亮(1983—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事城市遥感研究。E-mail: zhougeo@126.com

著变化^[11-15]。二维方向建筑面积的增加,三维方向地标性建筑以及高层居民楼和写字楼的涌现^[18],导致不透水面的快速增加进而加剧了城市地表温度(Land Surface Temperature, LST)升高^[7,19]。此外,截至2021年3月,中国常住人口城镇化率已达65%,大量人口涌向城市,人口城市化导致城市土地的进一步扩张与集聚,人类的生产生活需要消耗更多的能源,加速CO₂排放的同时促使地表温度进一步升高^[20],从而形成恶性循环。尤其是在夏季,酷热的天气促使居民通过空调等设备进行降温,向城市空间排放大量人为热,导致城市热岛效应加剧,使得夏季高温天气持续增加。因此,厘清城市建筑形态和城市地表温度之间的平衡关系是降低城市地表温度缓解热岛效应的必要措施,对确保城市化可持续和高质量发展至关重要^[21-23]。

城市建筑形态是指城市所有建筑所表现出来的具体空间形态^[4,24-26],其主要包括城市建筑水平和垂直方向的形态特征。目前,相关学者主要从两个方面广泛研究城市建筑形态和地表温度之间的关系。一方面从时空格局的角度进行研究^[5,19,27-33],例如2003—2018年北京市城市热岛的时空格局特征^[19]、基于多源空间数据的长沙市地表温度与城市建筑形态之间的关系^[34]、基于Landsat TM/OLI数据的福州市建筑景观格局与地表温度的关系等^[27],结果均显示城市建筑用地的增加和中心城区的扩张导致不透水表面的持续增加是影响LST持续升高的主要原因^[34-35]。以上研究都是基于长时间序列的遥感影像数据,监测地表温度在城市扩张过程中的演变特征,并对城市建筑形态与地表温度之间的时空异质性进行分析^[36-37]。另一方面从优化建筑形态指标进行研究,城市建筑形态指标是城市建筑在空间上的直观表达,可以有效刻画城市建筑的形态特征^[5,13,35,38-40]。如存在学者利用二维和三维建筑指标,研究不同季节和不同尺度下北京市五环内的建筑形态对城市热岛的影响^[38],选用的指标主要有建筑体积密度、最高建筑指数等,结果表明建筑体积密度对地表温度的影响最大,可以解释60%以上温度的变化,建筑体积密度显著影响风速,可有效降低地表温度;也有研究从二维和三维视角出发,研究南京市建筑规模和树木高度对地表温度的单独影响和联合影响^[41],选用的指标有建筑加权平均高度、天空可视因子等,结果显示建筑高度决定白天的地表温度,建筑和树木对地表温度的单独和联

合影响随着统计尺度的增加而加强。此外,杨俊等^[42]选用容积率和天空可视因子等建筑指标研究大连市城市建筑形态对地表温度的影响,结果表明地表温度与容积率呈最高正相关,与天空可视因子呈负相关,容积率小于0.6时,会显著改变风速,进而改变城市热环境。

上述研究主要从整个城市区域尺度上探究城市空间形态与地表温度的关系,通过二维和三维指标量化城市建筑指标,进一步分析城市建筑形态指标与地表温度之间的关系^[16,38]。然而,由于二维和三维建筑指标对不同季节地表温度的作用存在显著差异^[16,43],各类建筑形态指标在不同季节及梯度分级下的城市建筑形态与地表温度关系的探究仍然不够深入。因此,探究不同季节及不同梯度分级下,城市建筑形态对地表温度的影响,在未来城市化发展中具有至关重要的意义。

2021年7月,干旱少雨的陕西、河南、山东等地局部热环境发生改变,迎来持续性超强特大暴雨,给人民造成不可预估的财产损失。因此,本文以西安、郑州、济南为例,定量研究3个城市在街区尺度下,冬季与夏季城市建筑形态与地表温度的关系。首先对OSM道路网数据进行缓冲区分析得到分析单元——街区,根据前人已有的研究,我们选择了6个具有代表性的建筑指标作为自变量,分别为建筑加权平均高度、建筑覆盖率、容积率、建筑平均体积、建筑体积密度、天空可视因子,它们表明了二维和三维上的建筑形态特征^[5,41,44]。通过多元线性回归整体建模,探究夏季和冬季建筑形态与地表温度的关系。

结果显示建筑覆盖率显著影响3个城市夏季地表温度,且呈正相关,而平均建筑高度的增加可明显降低3个城市冬季的地表温度(图3)。与之前研究不同,本研究对影响夏季和冬季地表温度最显著的建筑指标——建筑覆盖率和平均建筑高度进行梯度分级建模,然后探究不同梯度下城市建筑形态与地表温度之间的关系,进一步剖析各梯度内建筑景观指标对季节性局部地表温度的影响^[14],最后分析城市建筑指标在不同梯度下对城市不同季节LST的影响作用^[38],从而对比3个中心城市在扩张过程中城市建筑形态与地表温度之间关系的空间异质性。为城市降温提供切实可行的调控措施,以期对未来城市化高质量发展提供参考。

2 研究区与数据

2.1 研究区

西安、郑州、济南分别是关中平原城市群、中原城市群、山东半岛城市群的核心城市,是除北京、天津之外,中国北方最具发展潜力的城市。3个城市皆响应国家战略的号召,携手打造国家中心城市群,积极推动沿黄区域经济的协同发展。西安位于黄河流域中游的关中盆地,是南北方的重要分界点,是西北发展最好的大都市;郑州地处中国腹地,是中部地区重要的中心城市、国家重要综合交通枢纽;济南是中国东部沿海经济大都市,地处京沪铁路与胶济铁路的交汇点。西安、郑州、济南都属于温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。截至2019年底,西安、郑州、济南的建成区面积分别达到 $7\times 10^6\text{ km}^2$ 、 $5.8\times 10^6\text{ km}^2$ 、 $7.16\times 10^6\text{ km}^2$ (2019年城市建设统计年鉴);西安、郑州、济南的常住人口分别达到1 295万、1 260万、920万人(全国第七次人口普查数据)。然而,3个城市在快速发展的过程

中均暴露出了相同的问题——地表温度不断升高。因受全球变暖和城市不透水面迅速增长的影响,3个城市夏季日最高气温超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间持续变长,且均超过10 d(西安、郑州、济南2020统计年鉴)。西安、郑州、济南市最热时间为7月^[12],月平均气温分别为 $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (西安、郑州、济南2020统计年鉴)。因此,研究选取了3个城市人口密度最大,建筑密度最高的主城区作为研究区(图1)。西安主城区的范围根据西安绕城高速和西三环划定,郑州主城区的范围依据郑州东三环、连霍高速及郊区立交划定,济南主城区的界定根据济南绕城高速及济南北立交和郭店立交等划定。

2.2 数据源

研究使用的数据主要包括中国行政区划图、建筑足迹数据、OSM道路网、Landsat 8影像。中国行政区划图来源于自然资源部标准地图服务网站(<http://211.159.149.56/index.html>):建筑足迹数据来自百度地图(<https://map.baidu.com/>),该数据包括建筑占地面积和建筑楼层数量。根据前人已有

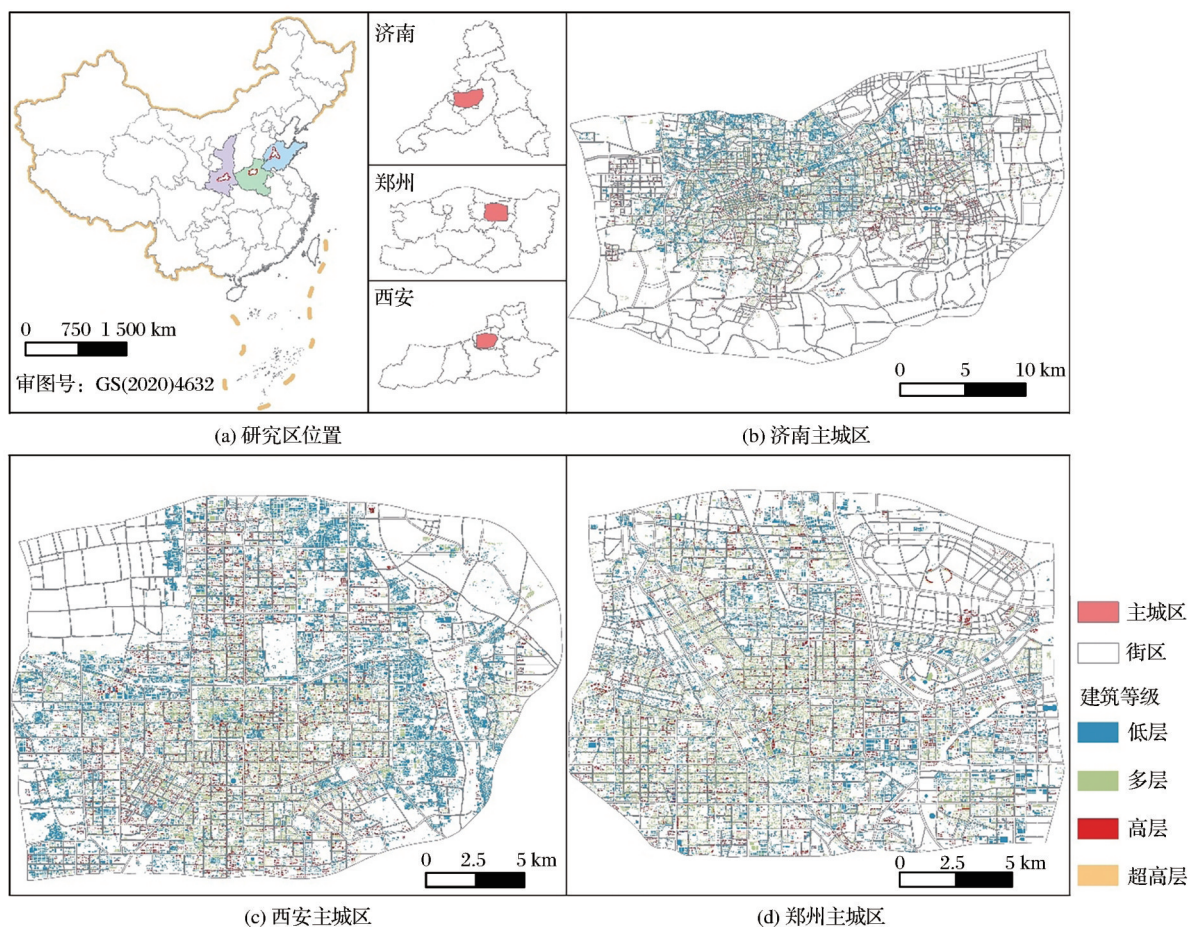


图1 研究区

Fig.1 The Study Area

研究^[5,12,14,38,40],结合建筑物众多且难以确定具体楼高等原因,本研究中,将每层楼的均高设定为3 m,乘以总建筑层数即作为建筑总高度。建筑物的位置属性和建筑高度信息通过高分2号影像和链家住宅APP并结合百度全景地图进行对比,验证了建筑高度和建筑位置属性,效果满意。此外,研究参考2019年《民用建筑设计统一标准》将建筑高度划分为4种类型:低层建筑(<10 m)、多层建筑(10—24 m)、高层建筑(24—90 m)、超高层建筑(>90 m),建筑分布情况如图1。2019年道路网数据来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>),主要用来划分分析单元一街区,采用的道路等级包括干道、主要道路、次要道路等。西安、郑州、济南的主城区分别被划分为667、770、1 191个街区(图1)。Landsat 8影像用于反演地表温度,数据分辨率为30 m,该数据来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。由于Landsat数据长达16 d的重访周期限制,以及云污染和影像成像时间天气条件的干扰,目前可用的影像较少,因此,我们选择了目前所能获取到影像的最佳时间段

进行实验。西安选用2018年7月25日和12月16日的Landsat 8影像;因郑州和济南2018年影像的云量大于10%,故郑州选用2019年7月7日和12月30日影像,济南选用2017年6月17日和12月10日影像代替。以上所选影像拍摄前一天均天气晴朗,研究区基本无云遮挡。

3 研究方法

3.1 城市建筑景观指标

西安、郑州、济南3个城市在水平方向城市边界的不断延伸和垂直方向建筑高度的增长导致城市建筑形态发生巨大变化。基于ArcGIS 10.5空间分析法,根据前人研究^[5,13,35,38-44]计算了各个街区内平均建筑高度(Average Building Height, AH)、建筑覆盖率(Building Coverage Ratio, BCR)、容积率(Floor Area Ratio, FAR)、平均建筑体积(Average Building Volume, AV)、建筑体积密度(Building Volume Density, BVD)、天空可视因子(Sky View Factor, SVF)6个三维建筑景观指标,建筑景观指标的具体含义如表1所示。

表1 建筑形态参数与描述

Table 1 Building morphology parameters and description

指标	计算公式	描述
平均建筑高度(AH)	$AH = \sum_{i=1}^n H_i / n$	表示楼房平均高度, H_i 代表分析单元内第 i 个建筑高度, n 代表分析单元内建筑个数
建筑覆盖率(BCR)	$BCR = \sum_{i=1}^n S_i / S_{AU} \times 100\%$	表示水平方向建筑的密集程度, S_i 代表第 i 个建筑的基地面积, S_{AU} 代表分析单元面积
建筑容积率(FAR)	$FAR = \sum_{i=1}^n S_i F_i / S_{AU}$	表示单位面积上的建筑容量, S_i 代表第 i 个建筑基地面积, F_i 代表建筑楼层数, S_{AU} 代表分析单元面积
平均建筑体积(AV)	$AV = \sum_{i=1}^n V_i / n$	表示平均建筑体积, V_i 代表分析单元内第 i 个建筑的体积, n 代表建筑个数
建筑体积密度(BVD)	$BVD = \sum_{i=1}^n V_i / S_{AU}$	表示一定区域内建筑密度指数, V_i 代表第 i 个建筑体积, n 代表建筑个数, S_{AU} 代表分析单元面积
天空可视因子(SVF)	在RStudio中利用horizon和raster模块进行计算 表示测量天空在给定点的周围环境遮挡程度,值在0-1之间	

3.2 地表温度反演

研究基于6幅Landsat 8影像,采用大气校正法对西安、郑州和济南的地表温度进行反演。根据前人已有研究^[45-46],利用辐射传输方程方法进行地表温度反演,且有研究报道利用辐射传输方程方法和大气校正工具,在已知地表发射率和大气相对清晰的情况下,可对Landsat 8热波段影像实现±2°以内的误差(citation),通过与分裂窗算法和单通道算法相比,基于辐射传输方程的方法在10波段反演LST

的精度最高,且均方误差均小于1K。因而,引用网站的大气参数计算结果进行地表温度反演认为是合理的。

其原理为:估计大气对地表热辐射的影响,将这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中消去,从而得到地表热辐射强度,再将其转化为相应的地表温度,并在街区尺度上进行计算。

地表温度可通过辐射传输方程计算,公式如下:

$$L_i = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_i] \tau + L^\uparrow \quad (1)$$

其中: ϵ 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为等效黑体辐亮度; T_s 为地表真实温度(K); τ 为大气在热红外波段的透过率; L^{\uparrow} 和 L^{\downarrow} 分别为大气上行辐亮度和下行辐亮度, L^{\uparrow} 、 L^{\downarrow} 和 τ 均可从大气校正参数网站获得 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>), ϵ 可通过计算 NDVI 和相应的植被覆盖度获得。

根据植被覆盖度计算 ϵ 的公式如下:

$$\epsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (2)$$

其中: P_v 为植被覆盖度, 通常使用如下公式计算:

$$P_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{Soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{Soil}}} \quad (3)$$

其中: NDVI 为归一化植被指数; $\text{NDVI}_{\text{Soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, NDVI_{veg} 则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值; 即纯植被像元的 NDVI 值。本文中的 NDVI_{veg} 和 $\text{NDVI}_{\text{Soil}}$ 分别取 0.7 和 0.05。

得到等效黑体辐亮度后, 可将 $B(T_s)$ 转换为地表温度 T_s , 公式如下:

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) - 273 \quad (4)$$

其中: K_1 为 $774.89 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; K_2 为 1321.08 K 。

3.3 多元线性回归分析

首先, 使用全子集回归方法在 R 语言中对地表温度有显著影响的建筑形态指标进行筛选, 结果得到平均建筑高度、建筑覆盖率、建筑容积率、平均建筑体积、建筑体积密度、天空可视因子等作为最佳指标组合。然后, 通过 SPSS 软件, 利用多元线性回归模型(公式 5)得到 3 个城市建筑形态指标与地表温度之间的线性关系。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (5)$$

多元线性回归模型是指含有多个解释变量的线性回归模型, 用于解释被解释的变量与其他多个自变量之间的线性关系。公式(5)表示一种 P 元线性回归模型, 可以看出里面共有 P 个解释变量。被解释变量 y 的变化可以由两部分组成: 第一部分, 是由 P 个解释变量 x 的变化引起的 y 的线性变化部分, 第二部分, 是要解释由随机变量引起 y 变化的部分, 可以用 ϵ 部分代替, 称为随机误差, 公式中的参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 都是方程的未知量, 可以表示为偏回归常数和回归常数。

进一步利用多元线性回归模型探究不同城市建筑形态梯度等级下, 各建筑指标与季节性地表温度之间的空间分布特征。最后, 对比西安、郑州、济南 3 个城市的建筑形态与地表温度之间关系的空间

差异性。

4 结果与分析

4.1 地表温度的空间分布特征

西安、郑州、济南 3 个城市在夏季和冬季的地表温度空间分布差异十分显著(图 2)。夏季, 3 个城市工业区和人口密度大的主城区温度较高, 为高温区, 地表温度(Land Surface Temperature, LST)集中分布在 27.8°C — 57.4°C ; 冬季, 由于太阳辐射相比夏季减少, 除了工业园等区域局部高温外, 其他区域为低温区, LST 集中分布在 -1.8°C — 17.7°C 。夏季和冬季 LST 显著的区域在图 2 中用绿色圈框进行标注。

夏季, 西安主城区 82.9% 的区域地表温度超过 40°C , 西北与东南部地表温度最高, 东北部为灞河生态湿地公园, 对周围的环境产生一定的降温作用。郑州东北部为龙湖公园, 茂密的植被和大型水体使得该区域地表温度显著低于周围环境。济南主城区 87.7% 的区域地表温度超过 40°C , 地表温度最高的区域为东北部; 而具有大量植被的济南南部为低温区, 特别是高植被覆盖率的千佛山和龙洞风景区为周围环境提供了有效降温作用。

冬季, 西安市西北部为汉长安城遗址和工业厂区, 工业区产生大量热排放, 汉长安城遗址表面被大量裸土覆盖, 裸土内部孔隙大易受周围温度的影响, 且吸收太阳辐射时可快速升温, 促使该地区 LST 升高^[12], 而除西北部外其他区域 LST 普遍较低, 88.3% 的区域 LST 低于 10°C 。郑州冬季大部分地区的 LST 普遍较低, 西边一带状高温区为刘砦工业园区, 人为热排放较高, 故 LST 比周围区域高; 东北部地表温度高的原因是水体和湿地的升温/降温的速度都相对较小, 故温度的日变化差异小, 周边气温相对稳定。济南冬季 95% 的区域地表温度都小于 10°C , 东北部是以济钢集团和重汽集团为主的工业园区, 大量的能源消耗对周围环境产生显著的增温作用, 促使该区域地表温度偏高。

4.2 建筑指标对地表温度的影响

多元线性回归建模探究城市建筑形态与地表温度之间关系的结果显示(图 3), 城市建筑形态(Urban Building Form, UBF)指标在不同城市 and 不同季节对地表温度表现出不同程度的影响。总体上, 3 个城市中对夏季地表温度影响最大的指标均为建筑覆盖率, 且都表现出显著的正相关关系; 对

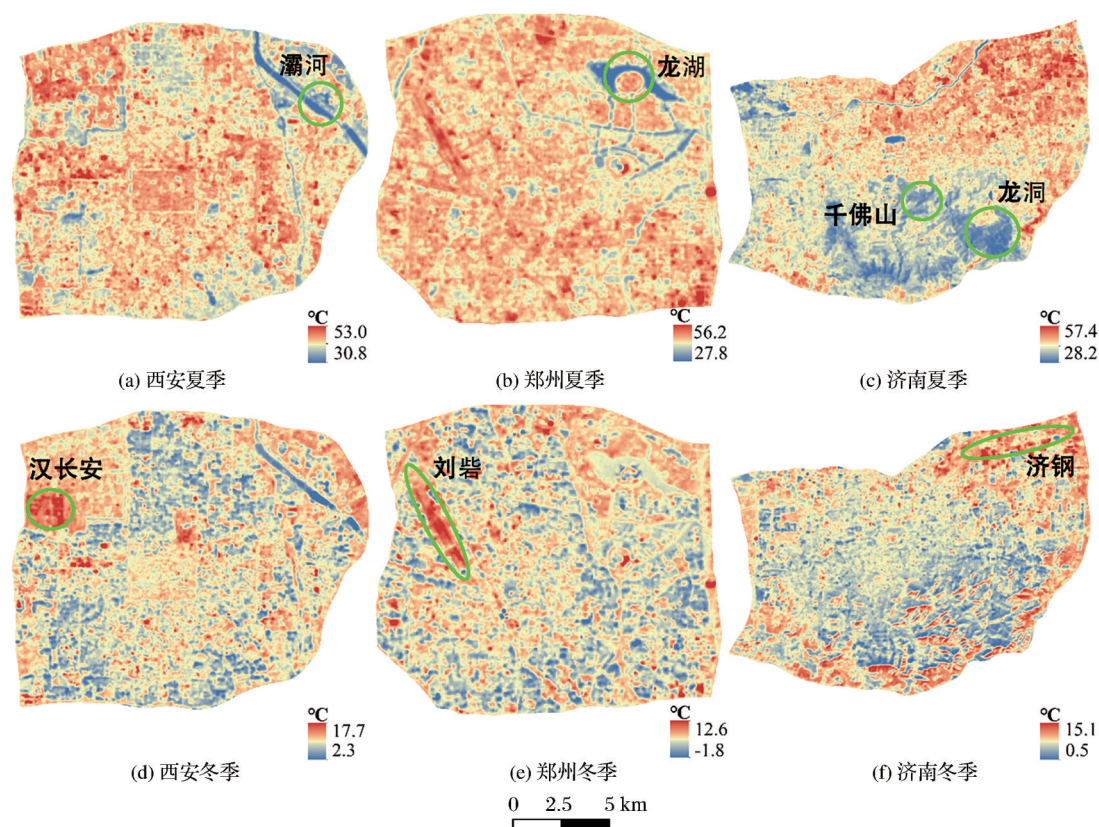


图2 西安、郑州、济南夏季冬季地表温度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land surface temperature in summer and winter in Xi'an, Zhengzhou and Jinan

冬季地表温度影响最大的指标为平均建筑高度,对地表温度都产生降温作用。而其余建筑指标在冬季和夏季与地表温度的关系则在不同城市间差异显著。

夏季,对于西安市,平均建筑体积和建筑覆盖率与地表温度呈正相关,平均建筑高度、建筑体积密度、天空可视因子与地表温度呈负相关(图3)。各建筑指标对LST的贡献程度大小为:BCR>AH>BVD>AV>SVF。而在郑州市,除平均建筑高度与地表温度呈负相关外,其余指标对LST的影响均为正相关,其中建筑覆盖率对LST的影响最为强烈,其标准化系数为0.4(数值越大表示指标对LST的影响程度越大)。济南市内,平均建筑高度、建筑覆盖率、天空可视因子对LST表现出较强的增温作用,而平均建筑体积和建筑体积密度对城市热岛表现出降温作用。

冬季,对于西安市,除平均建筑高度与地表温度呈负相关外,其余4个建筑指标与LST皆呈正相关,其对LST的影响程度大小为:AH>BCR>SVF>BVD>AV。济南市平均建筑体积在冬季对LST的增温作用显著强于夏季的降温作用(AV冬夏标准化系数分别为:0.087、-0.016),主要原因是冬季

城市的供暖系统产生大量热排放。而冬季平均建筑高度对地表温度的降温效果显著强于夏季的增温效应(AH冬夏标准化系数分别为-0.3、0.036)。此外,建筑体积密度在冬季的标准化系数为-0.4,显著降低周围环境温度,其对LST的影响作用强于建筑平均高度。郑州市平均建筑高度的标准化系数为-0.3,其对LST在冬夏两季都有显著的降温作用,与西安和济南不同,建筑覆盖率对郑州冬季的LST表现出降温作用,容积率对郑州夏季和冬季LST有较强的增温效果。

4.3 夏季建筑覆盖率梯度分级下建筑指标与LST之间的关系

建筑覆盖率对3个城市夏季地表温度都表现出显著正相关,且其影响大于其他建筑指标。因此,为了探讨不同BCR梯度等级下其余指标对夏季地表温度的影响,研究根据《建筑设计规则》中对不同高度楼层建筑覆盖率的要求以及居民宜居标准,将BCR均分为4个梯度等级,B1:覆盖率为0—0.2、B2:覆盖率为0.2—0.4、B3:覆盖率为0.4—0.6、B4:覆盖率为0.6—0.8,BCR不同梯度等级下建筑指标与夏季地表温度间关系的多元线性回归建模结果

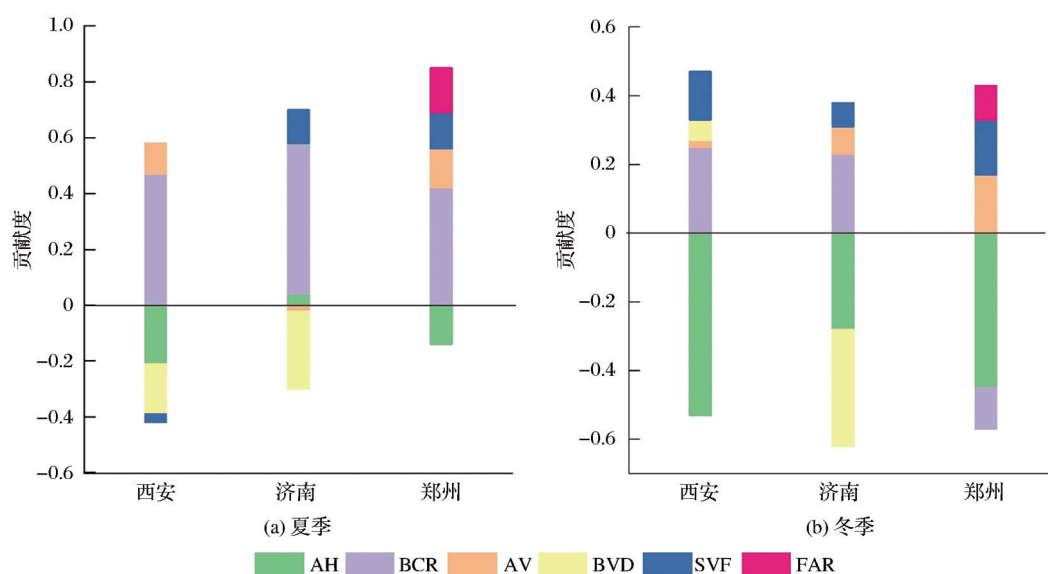


图3 西安、郑州、济南冬夏建筑指标对地表温度贡献度

Fig.3 Contribution degree of building index to surface temperature in Winter and summer in Xi'an, Zhengzhou and Jinan

如图4所示。

B1梯度下,建筑体积密度是影响地表温度最显著的建筑指标,且与3个城市地表温度均呈负相关。平均建筑高度对西安和济南地表温度的影响关系较为显著(西安负相关,济南正相关)。平均建筑体积和建筑高度对郑州的地表温度则表现出较弱的升温作用。B2梯度下,3个城市的各个指标对LST的正向/负向影响基本相同:平均建筑高度和建筑体积密度的增加会显著降低LST,平均建筑体积和天空可视因子与地表温度呈正相关。B3梯度下,平均建筑高度对西安和郑州的LST影响较为显著(西安负相关,郑州正相关),建筑容积率只对济南的地表温度有较为显著的降温作用,而与西安和郑州LST的相关性不显著。本研究中只有济南市的建筑覆盖率达到B4梯度,该梯度下,BCR对济南LST产生了降温效果,这与前3个梯度和总体回归模型中BCR与LST的正相关关系截然不同(图4)。在此梯度中平均建筑高度的标准化系数为1.6,其对济南地表温度的降温作用占据主导地位。

不同BCR梯度等级下,部分建筑指标对3个城市的地表温度具有相对一致的作用。B1和B2梯度下,建筑体积密度与3个城市的LST呈负相关,有一定的降温作用,平均建筑体积和天空可视因子对3个城市的增温贡献大于降温贡献;B1—B3梯度下,建筑覆盖率对3个城市地表温度的作用都与总体回归模型的结果相似,即表现为正相关,平均建筑高度对3个城市的增温贡献相对较高,建筑体积

密度对3个城市地表温度的升温/降温作用各不相同,且B1最强。

然而,也有部分建筑指标在不同BCR梯度下对LST的影响存在显著差异。首先,当建筑覆盖率增加到B4梯度时,其与LST之间的线性关系就发生转变,由总体正相关转为负相关;其次,建筑高度随着梯度等级的增加与LST的相关性越明显;再次,不同梯度等级内,不同城市的建筑指标与地表温度存在不同的变化规律,如B2梯度下,建筑体积密度对西安、济南、郑州都有降温作用,而在B3梯度下,建筑体积密度与西安呈正相关,与郑州呈负相关,与济南不相关;与B1和B2梯度不同,天空可视因子是正向影响郑州LST最为突出的建筑指标,且对郑州LST的影响作用强于西安和济南。最后,建筑容积率只会在特定的B3梯度下对济南地表温度产生一定的冷却效果。

4.4 冬季平均建筑高度梯度分级下地表温度的变化特征

建筑平均高度在冬季对3个城市的地表温度都呈负相关且影响程度最为剧烈。按照2019年《民用建筑设计统一标准》对每个街区中的平均建筑高度进行分类,将研究区中的建筑分为低层、多层与高层建筑,采用箱型图统计不同城市不同建筑高度梯度下的地表温度变化。

3个城市低层建筑地表温度的均值均高于多层和高层(图5)。西安低层、多层、高层建筑的平均LST分别为9.5℃、9.0℃、8.1℃;济南低层、多层、高

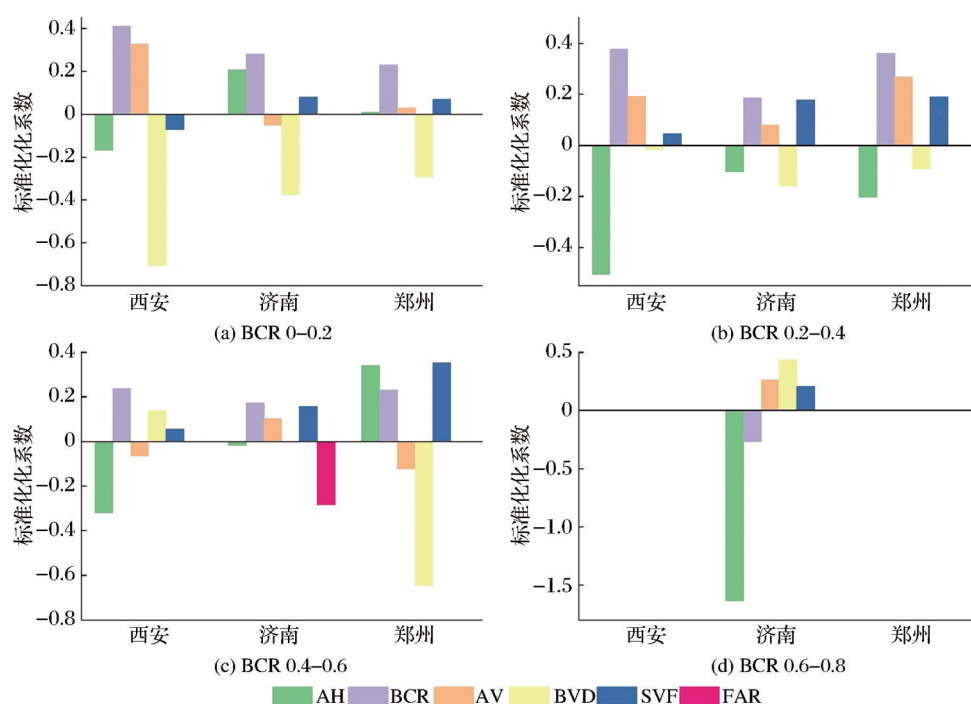


图 4 BCR 梯度等级下景观指标与地表温度关系

Fig.4 Relationship between landscape index and land surface temperature under BCR gradient grade

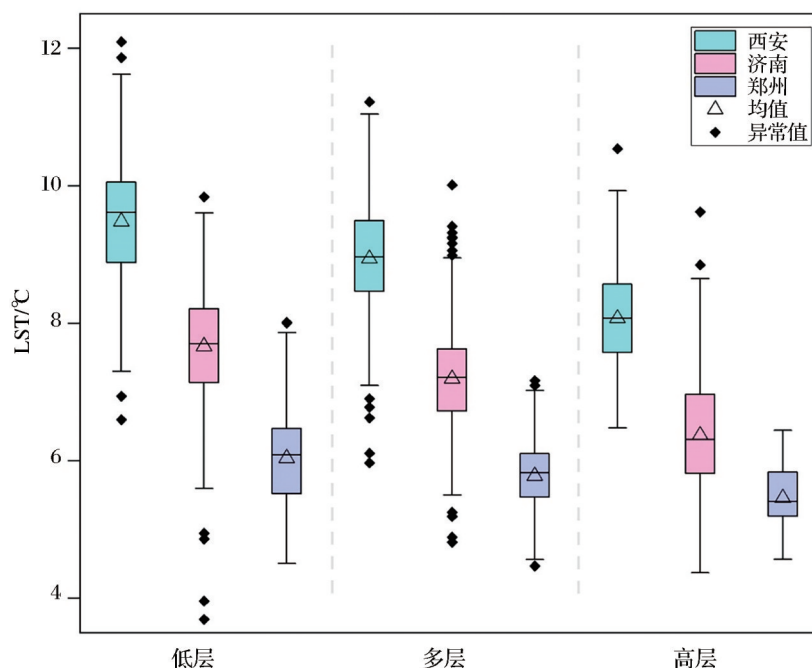


图 5 平均建筑高度梯度等级下地表温度分布特征

Fig.5 Characteristics of surface temperature distribution under gradient grade of average building height

层建筑的平均 LST 为 7.7℃、7.2℃、6.4℃;郑州低层、多层、高层建筑的平均 LST 为 6.1℃、5.8℃、5.5℃。由此可见,西安的地表温度在冬季高于郑州和济南。3个城市低层建筑区域的地表温度普遍较高。但是,建筑高度越高,其对地表温度的冷却作用越明显。由低层到高层,3个城市地表温度都呈现显

著下降趋势,且在不同的建筑高度梯度内,西安、济南、郑州依次呈现出地表温度下降的趋势。

5 结论与讨论

5.1 结论

研究比较了西安、郑州、济南 3 个中心城市建筑

形态对夏季和冬季地表温度的影响,并探讨了夏季建筑覆盖率和冬季平均建筑高度梯度等级下,各建筑指标和地表温度之间关系的差异,主要结论如下:

(1)城市建筑形态与地表温度的关系表现为:建筑覆盖率和平均建筑高度分别对3个城市夏季和冬季地表温度影响最大,且分别表现出显著的正相关和负相关。不同季节,夏季西安的建筑指标对地表温度影响最大(拟合系数 $R^2=0.414$),冬季济南的建筑指标对地表温度影响最为显著($R^2=0.300$)。郑州的建筑指标对地表温度的影响较低(冬季和夏季 R^2 分别为0.085和0.172)。

(2)夏季,B1-B3梯度中建筑覆盖率都呈现较强的增温作用。西安和郑州的地表温度受建筑指标的影响均大于济南,其拟合系数 R^2 分别为0.29和0.25。单独分析不同梯度时,B1,建筑体积密度对3个城市有较强的降温作用;B2,平均建筑高度对3个城市有强烈的降温作用;B3,平均建筑高度、容积率、建筑体积密度分别对西安、济南、郑州有较强的降温作用。B4,建筑覆盖率对济南表现出一定的降温作用,济南地表温度受建筑指标的影响最大, R^2 为0.95。

(3)冬季,西安的地表温度高于郑州和济南,3个城市在不同平均建筑高度梯度下的地表温度存在相对一致的变化趋势。3个城市低层建筑的平均地表温度均高于多层和高层,西安、济南、郑州的低层平均地表温度分别为 9.5°C 、 7.7°C 、 6.1°C ,且从低层到高层建筑类别的街区平均地表温度呈现逐渐下降的趋势。

5.2 讨论

研究在整体和梯度尺度上分析了西安、郑州、济南3个城市的建筑形态与地表温度之间的关系,在一定程度上揭示了3个城市的发展对地表温度的影响机制。研究发现,通过降低建筑物高度和容积率,增大天空可视因子,增加特殊材质的绿色屋顶和增加建筑表面的湿度和反照率,以及建立各建筑物之间的生态绿道等方式可以明显缓解地表温度。另外,在不同容积率梯度内,通过改变城市建筑景观指标的配置可以显著降低地表温度,特别是三维建筑指标。受城市本身经济、人地、资源等综合影响,在当前高密度城市建设下,合理优化城市建筑的大小、形状和方向,进而改善街区内部的通风对流可达到缓解地表温度过高的现象。然而,受当前

数据的限制,研究没有考虑夜间城市形态对地表温度的影响;另外研究仅选择了6个建筑指标。在后续的研究中可以尝试增加不同类型建筑景观指标的数量和其他景观指标种类(蓝绿空间、土地利用等)^[47-48],结合植被形态特征、蒸散量、当地气候背景等多方面驱动因素,进一步研究城市空间形态与地表温度之间的复杂关系。本文使用道路生成分析单元,忽略了主干道不透水面的升温效应,也没有探讨分析单元内部的植被形态特征在三维方向上和建筑指标的联合效应与地表温度之间的关系;对建筑覆盖率和平均建筑高度指标梯度进行了等级分类研究,仅讨论了6个指标当中的主要指标影响,未考虑不同高度下,建筑覆盖率相同的情况。应进一步在建筑覆盖率梯度等级下进一步划分分子梯度来研究各建筑指标与地表温度间的关系差异。只对建筑景观指标进行了梯度等级分类,未考虑将城市建成区划分为不同的局部气候类型,研究不同季节不同梯度内对城市地表温度的贡献差异,进一步研究不同城市内不同气候区之间的建筑景观格局与地表温度之间的关系^[24,28,49-50]。

参考文献(References):

- [1] Feng R, Wang F, Zhou M, *et al.* Spatiotemporal effects of urban ecological land transitions to thermal environment change in mega-urban agglomeration[J]. *Science of The Total Environment*, 2022: 156158. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2022. 156158.
- [2] Wang Meiya, Xu Hanqiu. Study on the random forest regression model of land cover and thermal environment in megacities[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(2): 379-388.[王美雅, 徐涵秋. 超大城市土地覆盖与热环境的随机森林回归模型研究[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2): 379-388.]
- [3] Lin J Y, He X Y, Lu S Y, *et al.* Investigating the influence of three-dimensional building configuration on urban pluvial flooding using random forest algorithm [J]. *Environmental Research*, 2021, 196: 110438. DOI: 10.1016/j. envres. 2020. 110438.
- [4] Xu Y, Ren C, Ma P F, *et al.* Urban morphology detection and computation for urban climate research [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 212-224. DOI: 10.1016/j. landurbplan.2017.06.018.
- [5] Yang Jun, Guo Andong, Xi Jianchao, *et al.* Spatial-temporal differentiation of three-dimensional urban landscape pattern: A case study of Zhongshan District in Dalian [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 646-656.[杨俊, 国安东, 席建超, 等. 城市三维景观格局时空分异特征研究——以大连市

- 中山区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(4): 646-656.]
- [6] Li Yao, Pan JingHu, Luo Jing. Urban heat environment and surface energy balance analysis of Xi'an based on LDCM remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(5): 868-875.[李瑶, 潘竟虎, 罗晶. 基于Landsat 8影像和能量平衡的西安市热场格局研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 868-875.]
- [7] Lu Y P, Yue W Z, Liu Y, *et al.* Investigating the spatiotemporal non-stationary relationships between urban spatial form and land surface temperature: A case study of Wuhan, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103070. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103070.
- [8] Feng Zhangxian, Wang Shijun, Jin Shanhe, *et al.* Effects of urban morphology and wind conditions on land surface temperature in Changchun[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 902-911.[冯章献, 王士君, 金珊合, 等. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 902-911.]
- [9] Li Chao, Li Xuemei, Tian Yalin, *et al.* Time and space fusion model comparison of temperature vegetation drought index[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 832-844.[李超, 李雪梅, 田亚林, 等. 温度植被干旱指数时空融合模型对比[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 832-844.]
- [10] Lu Dadao, Sun Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436.[陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436.]
- [11] Kong F, Chen J, Middel A, *et al.* Impact of 3-D urban landscape patterns on the outdoor thermal environment: A modeling study with SOLWEIG[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2022, 94: 101773. DOI: 10.1016/j.compenvurbysys.2022.101773.
- [12] Yuan B, Zhou L, Dang X W, *et al.* Separate and combined effects of 3D building features and urban green space on land surface temperature[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113116. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113116.
- [13] Wang Cuiping, Wang Haowei, Zheng Yuanmao. Evaluation and optimization of three-dimensional spatial distribution for urban complex: A case study on the coastal zone of Xiamen Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8119-8129.[王翠平, 王豪伟, 郑渊茂. 城市建筑群三维空间布局评价与优化——以厦门岛滨海地带为例[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8119-8129.]
- [14] Liu Y P, Chen C, Li J J, *et al.* Characterizing three dimensional (3-D) morphology of residential buildings by landscape metrics[J]. Landscape Ecology, 2020, 35: 2587-2599. DOI: 10.1007/s10980-020-01084-8.
- [15] Song J C, Chen W, Zhang J J, *et al.* Effects of building density on land surface temperature in China: Spatial patterns and determinants[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 198: 103794. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103794.
- [16] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 577: 349-359. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.195.
- [17] Zhu Z Z, Zhou D, Wang Y P, *et al.* Assessment of urban surface and canopy cooling strategies in high-rise residential communities[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125599.
- [18] Shen Zhongjian, Zeng Jian. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 566-583.[沈中健, 曾坚. 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 566-583.]
- [19] Liu X, Zhou Y Y, Yue W Z, *et al.* Spatiotemporal patterns of summer urban heat island in Beijing, China using an improved land surface temperature[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120529. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120529.
- [20] Xu X C, Ou J P, Liu P H, *et al.* Investigating the impacts of three-dimensional spatial structures on CO₂ emissions at the urban scale[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143096. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143096.
- [21] Li Yongkang, Wang Xinjun, Ma Yanfei, *et al.* Downscaling land surface temperature through AMSR-2 observations by using machine learning algorithms[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 474-487.[李永康, 王新军, 马燕飞, 等. 基于机器学习算法的AMSR-2地表温度降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 474-487.]
- [22] Li Da, Lin Longzhen, Lin Zhen, *et al.* EKC test of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3965-3974.[李达, 林龙圳, 林震, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展的EKC检验[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3965-3974.]
- [23] Wang Penglong, Gao Feng, Huang Chunlin, *et al.* Progression sustainable city assessment index system for SDGs[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 784-792.[王鹏龙, 高峰, 黄春林, 等. 面向SDGs的城市可持续发展评价指标体系进展研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 784-792.]
- [24] Lu Yang, Yang Jiansi, Huang Xin, *et al.* Assessing the effects of urban morphology on Land Surface Temperature in local Climate Zones[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1412-1422.[卢阳, 杨建思, 黄昕, 等. 面向局部气候带的城市形态对地表温度的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1412-1422.]
- [25] Huang X, Wang Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China[J]. ISPRS Journal of

- Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 152: 119–131. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010.
- [26] Yang J, Wang Y C, Xue B, *et al.* Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: Different climate background perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148791. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148791.
- [27] Pan Minghui, Lan Siren, Zhu Liying, *et al.* Influence of landscape pattern types on heat island effect over central Fuzhou City[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2635–2646.[潘明慧, 兰思仁, 朱里莹, 等. 景观格局类型对热岛效应的影响——以福州市中心城区为例[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2635–2646.]
- [28] Jiang Sida, Zhan Wenfeng, Yang Jun, *et al.* Urban heat island studies based on local climate zones: A systematic overview [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1860–1878.[江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1860–1878.]
- [29] Wang Y N, Yi G H, Zhou X B, *et al.* Spatial distribution and influencing factors on urban land surface temperature of twelve megacities in China from 2000 to 2017[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107533. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107533.
- [30] Tran H, Uchiama D, Ochi S, *et al.* Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8: 34–48. DOI: 10.1016/j.jag. 2005. 05.003.
- [31] Chen X, Zhang Y P. Impacts of urban surface characteristics on spatiotemporal pattern of land surface temperature in Kunming of China[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 87–99. DOI: 10.1016/j.scs.2017.03.013.
- [32] Zhang X M, Estoque R C, Murayama Y. An urban heat island study in Nanchang City, China based on land surface temperature and social-ecological variables[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 557–568. DOI: 10.1016/j.scs. 2017. 05.005.
- [33] Hou L, Yue W Z, Liu X. Spatiotemporal patterns and drivers of summer heat island in Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 7516–7527. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3094559.
- [34] Xiong Ying, Zhang Fang. Thermal environment effects of urban human settlements and influencing factors based on multi-source data: A case study of Changsha city[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2443–2458.[熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2443–2458.]
- [35] Yao Yonghui, Zhang Baiping, Han Fang. MODIS-based air temperature estimation in the Hengduan Mountains and its spatio-temporal analysis [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 917–927.[姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于Modis地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 917–927.]
- [36] Qiao Zhi, Huang Ningyu, Xu Xinliang, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 475–489.[乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003—2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 475–489.]
- [37] Wang X, Du P J, Chen D M, *et al.* Characterizing urbanization-induced land surface phenology change from time-series remotely sensed images at fine spatio-temporal scale: A case study in Nanjing, China (2001–2018)[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122487. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020. 122487.
- [38] Cao Q, Luan Q Z, Liu Y P, *et al.* The effects of 2D and 3D building morphology on urban environments: A multi-scale analysis in the Beijing metropolitan region [J]. Building and Environment, 2021, 192: 107635. DOI: 10.1016/j.buildenv. 2021.107635.
- [39] Liu Y X, Peng J, Wang Y L. Efficiency of landscape metrics characterizing urban land surface temperature [J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 180: 36–53. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.08.006.
- [40] Sun F Y, Liu M, Wang Y C, *et al.* The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: Relative contributions and marginal effects[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120706. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120706.
- [41] Chen J K, Zhan W F, Jin S G, *et al.* Separate and combined impacts of building and tree on urban thermal environment from two-and three-dimensional perspectives [J]. Building and Environment, 2021, 194: 107650. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107650.
- [42] Yang J, Yang Y X, Sun D Q, *et al.* Influence of urban morphological characteristics on thermal environment[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103045. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103045.
- [43] Alexander C. Influence of the proportion, height and proximity of vegetation and buildings on urban land surface temperature [J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2021, 95: 102265. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102265.
- [44] Guo J M, Han G F, Xie Y S, *et al.* Exploring the relationships between urban spatial form factors and land surface temperature in mountainous area: A case study in Chongqing city, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102286. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102286.
- [45] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Mattar C, *et al.* Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10): 2195–2210. DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.022.

- [46] Barsi J A, Barker J L, Schott J R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument [J]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 5: 3014–3016. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294665.
- [47] Yao L, Li T, Xu M X, *et al.* How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: An urban heat island study in Beijing, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 52: 126704. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126704.
- [48] Wu C Y, Li J X, Wang C F, *et al.* Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133742. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133742.
- [49] Yang J, Wang Y C, Xiu C L, *et al.* Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123767. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123767.
- [50] Hu D, Meng Q, Schlink U, *et al.* How do urban morphological blocks shape spatial patterns of land surface temperature over different seasons? A multifactorial driving analysis of Beijing, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 106: 102648. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102648.

Influence of Urban Buildings Forms on Land Surface Temperature: From a Gradient Perspective

Tan Leiqi¹, Zhou Liang^{1,2,3}, Li Li³, Yuan Bo^{1,4}, Hu Fengning^{1,5}

(1.Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2.Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation of Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518034, China;

3.Lanzhou Branch Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China;

4.Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

5.National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To explore the gradient and difference of the influence of different urban building forms on LST, Xi'an, Zhengzhou, Jinan as the research area, based on Landsat 8 TIRS images and urban 3D building data. Based on the multiple linear regression model, the influences of building form on LST in different seasons in the three cities were analyzed and the differences were compared: (1) the cities with the largest influence on LST in summer and winter were Xi'an ($R^2=0.414$) and Jinan ($R^2=0.300$). The building coverage rate and average building height have the greatest impact on LST in summer and winter, respectively, with positive and negative impacts. (2) After the gradient classification of building coverage, it is found that when the coverage rate is less than 20%, the building volume density has a strong cooling effect on the three cities; When the coverage rate is 20%—40%, the average building height significantly reduces the surface temperature of the three cities. When the coverage rate is 40%—60%, the sky visible factor has a certain warming effect on the three cities, when the coverage rate is greater than 60%, the average building height greatly reduces the surface temperature of Jinan. (3) The average surface temperature of low-rise buildings in Xi'an, Jinan and Zhengzhou is 9.5 °C, 7.7 °C and 6.1 °C, respectively. The surface temperature of the three cities shows a downward trend from low-rise to high-rise, and the surface temperature of Xi'an is higher than that of Zhengzhou and Jinan in each gradient. The research shows that rational planning of urban building form is beneficial to alleviate the phenomenon of high surface temperature in central cities.

Key words: Land surface temperature; Urban form; Building indicators; Urbanization; Spatial distribution