

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.013

基于 Landsat 影像的合肥市地表温度空间特征分析

王璐¹, 吴兆福¹, 余敏¹, 张春菊^{1,2}, 张辰¹, 黄建伟¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 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 518000)

摘要: 文章以合肥市为例, 选择 2008—2020 年内 5 期 Landsat 影像, 对包河区、蜀山区、庐阳区、瑶海区 4 个行政区进行地物分类与地表温度反演; 采用地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型与标准差椭圆 (standard deviational ellipse, SDE) 分别分析不透水层对地表温度的影响程度及其空间分布演化特征。在 500 m 格网化划分尺度下, 4 个行政区不透水层与地表温度的 GWR 全局拟合系数 R^2 基本上大于 0.8, 其中包河区与庐阳区的 R^2 随时间变化相对稳定, 而蜀山区与瑶海区的 R^2 增加, 不透水层变化显著; 2008—2020 年, 不透水层对应 SDE 演化趋势与对应城区扩张趋势基本一致, 椭圆面积呈增长趋势, 这与合肥市由以主城区为主的发展模式变为多地区共同发展模式相关。研究结果可为合肥市未来城市规划提供参考。

关键词: 城市化发展; 不透水层; 地表温度; 地理加权回归 (GWR); 标准差椭圆 (SDE)

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)06-0801-07

Analysis of spatial characteristics of land surface temperature in Hefei City based on Landsat remote sensing images

WANG Lu¹, WU Zhaofu¹, YU Min¹, ZHANG Chunju^{1,2}, ZHANG Chen¹, HUANG Jianwei¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The five Landsat images from 2008 to 2020 of Hefei City were selected to analyze the spatial characteristics of land surface temperature (LST). The surface object classification and LST inversion for Baohe, Shushan, Luyang and Yaohai districts were conducted. Then, the geographically weighted regression (GWR) and standard deviational ellipse (SDE) methods were used to analyze the influence degree of impervious layer on LST and its spatial distribution and evolution characteristics, respectively. The results showed that the global fitting coefficients (R^2) between the impervious layer and LST of the four districts were all greater than 0.8 at the 500 m grid scale. The R^2 of Baohe district and Luyang district was relatively stable, while the R^2 of Shushan district and Yaohai district increased, and the impervious layer changed significantly. From 2008 to 2020, the evolution trend of the ellipse corresponding to the standard deviation of impervious layer was basically consistent with the expansion trend of the corresponding urban area, and the ellipse area showed an increasing trend. The distribution of areas with high heating effect of impervious layer showed a trend from single main urban area development mode to multi-area co-development mode in Hefei City. The research result could provide reference for the future urban planning of Hefei City.

Key words: urbanization development; impervious layer; land surface temperature (LST); geographically weighted regression (GWR); standard deviational ellipse (SDE)

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2023-03-20

基金项目: 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资助项目 (KF-2020-05-084); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (JZ2021HGTA0169)

作者简介: 王璐 (1997—), 女, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

黄建伟 (1992—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学讲师, 通信作者, E-mail: hjw1028@hfut.edu.cn.

随着城市化进程的不断发展,城市扩张过程加剧了城市热岛效应^[1]。由于植被、土壤等自然地表逐渐被建筑物等热容量大的不透水面所替代^[2],城市地表温度逐渐升高,进而引发城市热岛效应等一系列生态环境问题,影响人类居住环境空间分布格局^[3]。因此,研究城市地表温度的空间分布对城市可持续发展与城市规划具有重要意义。目前基于遥感影像开展的城市热环境研究主要集中在以下 3 个方面:

(1) 常用地表温度反演方法(主要包括辐射传导方程算法、单窗算法及分裂窗算法等^[4-7])的对比及验证。考虑到热红外传感器(thermal infrared sensor, TIRS)第 11 波段定标偏差较大,美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)建议使用单通道(TIRS 第 10 波段)进行地表温度反演^[8]。其中辐射传导方程算法具有较好的反演精度及牢固的物理基础,被广泛使用。

(2) 地物覆盖类型与地表温度的相关性分析^[9-10]。针对不透水层、土壤、植被对地表温度的影响程度,可以利用线性回归和地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)分别从全局和局部角度进行分析^[11-12],结果表明,不透水层覆盖率与植被覆盖率分别与地表温度呈现正相关和负相关关系。

(3) 地表热环境时空变化特征分析^[13-14]。城市扩张导致不透水层面积增加,是导致城市热环境问题显著,进而引起城市热岛效应的主要原因。目前,基于地表温度反演的城市热环境时空变化格局相关研究中,空间定量分析很少,而标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)可以较好地定量反映空间结构发展状况。文献^[15]利用 SDE 研究长三角城市群绿色发展均衡状况,并分析其障碍因素;文献^[16]使用 SDE 来记录美国季节性龙卷风活动空间扩散的变化。

近年来,合肥市城市化进程快速发展,引起城市扩张,导致地表覆盖发生明显变化,也加剧了城市热岛效应^[17-18]。但是,基于热红外遥感影像的不透水层覆盖情况与地表温度变化之间的相关性不明确,对合肥市地表温度空间演化特征的相关定量研究较少。

本文利用辐射传导方程算法,对合肥市多期 Landsat 遥感影像进行地表温度反演,使用监督分类法提取不透水层及植被地物类型,通过 GWR 分析合肥市不透水层对地表温度的影响程度,对反演后不透水层、土壤、植被对应的地表温

度进行 SDE 时空变化格局定量分析,揭示合肥市近年来城市空间发展的演化特征,以期为合肥市未来的城市规划提供参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

合肥市(30°57'~32°32'N, 116°41'~117°58'E)位于中国华东地区、长江三角洲西侧,下辖 4 个行政区、4 个县,代管 1 个县级市,全市总面积为 11 445.1 km²;其属于亚热带季风性湿润气候,四季分明,气候适宜;地形上,以平原和丘陵为主,平均海拔为 20~40 m。合肥市 GDP 在 2008 年为不到 2 000 亿元^[19],到 2020 年突破万亿元^[20],截至 2020 年城镇化率^[21]已达到 76.33%。城市化进程加剧,植被、土壤面积缩小,不透水层面积扩张显著。本文主要对合肥市近年来发展较为迅速的包河区、瑶海区、庐阳区、蜀山区 4 个行政区进行分析,影像图如图 1 所示(<http://www.gscloud.cn>)。



图 1 2020 年合肥市 4 个行政区影像

1.2 数据源

选择合肥市 2008 年 10 月 15 日、2011 年 10 月 8 日 Landsat 7 ETM+ 影像和 2015 年 10 月 11 日、2018 年 10 月 3 日、2020 年 10 月 24 日 Landsat 8 OLI/TIRS 遥感影像进行地表温度反演和地物分类,遥感影像云量均小于 5%,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。以合肥市(31°46'N, 117°18'E)和巢湖市(31°37'N, 117°52'E)2 个站点对应影像成像时间前后 3 d 温度平均值作为温度反演的验证数据,

温度数据来源于全国温室数据系统(<http://data.sheshiyuanyi.com/WeatherData>)。

2 研究方法

2.1 辐射传导方程算法

对于辐射传导方程算法涉及的热红外数据,选择 Landsat 7 ETM+影像第 6 波段,Landsat 8 OLI/TIRS 影像第 10 波段。辐射传导方程算法又称为大气校正法,算法公式如下:

$$L_\lambda = \tau[\epsilon I(\lambda, T) + (1 - \epsilon)L_d] + L_u \quad (1)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{I(\lambda, T)} + 1\right)} \quad (2)$$

其中: L_λ 为传感器接收的辐射亮度,由真实辐射、大气上行辐射 L_u 及大气下行辐射 L_d 组成; τ 为大气透过率; ϵ 为地表比辐射率; $I(\lambda, T)$ 为黑体辐射亮度; T_s 为亮度温度; K_1 、 K_2 为卫星相关参数。2 种卫星使用的参数 K_1 、 K_2 见表 1 所列。

表 1 Landsat 7、Landsat 8 卫星参数 K_1 、 K_2 取值

遥感卫星	$K_1/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	K_2/K
Landsat 7	666.09	1 282.71
Landsat 8	774.89	1 321.08

τ 、 L_u 和 L_d 均可在美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官网(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)中通过输入影像成影时间及研究区中心经纬度获取。

将影像大致分为植被、水体、建筑物,水体的地表比辐射率值为 0.995,植被和建筑物地表比辐射率 ϵ_{veg} 、 $\epsilon_{building}$ 的计算公式分别为:

$$\epsilon_{veg} = 0.9625 + 0.0614P_V - 0.0460P_V^2 \quad (3)$$

$$\epsilon_{building} = 0.9589 + 0.0860P_V - 0.0671P_V^2 \quad (4)$$

其中, P_V 为植被覆盖度值。

为了验证算法的反演精度,将该算法计算结果与地面站实测温度进行对比。

2.2 GWR 分析

考虑到不透水层对城市地表温度空间分布及空间异质性的影响较大,而传统线性回归只能反映在区域上整体的拟合效果,难以反映局部空间关系,本文使用添加了地理位置信息函数的 GWR^[22-23],通过建立空间范围内每个空间格网处的局部线性回归方程来拟合不透水层覆盖率与地表温度值之间的关系,其中全局拟合系数 R^2 是根据每个格网处不透水层覆盖率与地表温度值之间的关系而得出的,GWR 模型表达式为:

$$Y_i = \beta_0(U_i, V_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(U_i, V_i)x_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

其中: (U_i, V_i) 为第 i 个点的坐标; β_0 为截距值; β_k 为第 i 个点的第 k 个回归系数; ϵ_i 为误差项; x_{ik} 为不透水层覆盖率; Y_i 为地表温度值。

对于 GWR 的空间尺度影响,根据文献[11]的研究结果,地表温度与地物覆盖率相关性研究的最佳格网单位长度为 500~650 m,文献[12]对武汉市的研究中,以 500 m 为格网单位长度。因此,本文以 500 m 为格网单位长度。

2.3 SDE 分析

考虑到不透水层及植被、土壤对地表温度的增温与降温效应^[9-10],分别提取不透水层及植被、土壤对应的温度点数据进行空间对比分析,将分类影像与温度影像导入 MATLAB 中,提取同一地物类型对应的温度点数, μ_B 、 μ_V 分别为全部不透水层及植被、土壤对应温度点的平均值, σ_B 、 σ_V 分别为全部不透水层及植被、土壤对应温度点的标准差。考虑到多年来地表覆盖变化可能引起对应点数的温度变化异常,为了反映整体变化趋势,对不同地物类型对应的温度数据进行统计分析,提取 1 倍标准差之内的地表温度点 $T(T_B \in [\mu_B - \sigma_B, \mu_B + \sigma_B], T_V \in [\mu_V - \sigma_V, \mu_V + \sigma_V])$ 开展分析,并将温度幅值作为权重参与 SDE 计算。

SDE 分析是对点数据的分布和方向特征进行时空分析,其中椭圆中心坐标($E_{SD}(x, y)$)和旋转角(θ)的表达式为:

$$E_{SD}(x, y) = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y)^2}{n}} \right] \quad (6)$$

$$\tan \theta = \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \right) + \left[\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i \right)^2 \right]^{1/2} \right\} / \left(2 \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i \right) \quad (7)$$

其中: (x_i, y_i) 为温度点的坐标; (X, Y) 为温度点的平均中心坐标; n 为格网内温度点的总数量; (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 为点的平均中心坐标与点坐标之间的差值。

本文中,SDE 走向代表地物分布趋势,椭圆覆盖面积表示集聚范围,椭圆旋转角度表示集聚方向;定义椭圆旋转角度为在 WGS-84(World Geodetic System,世界大地测量系统)坐标系下以南北轴按顺时针旋转与椭圆长轴重合的角度,用以反映全局特征。

3 实验结果与分析

3.1 辐射传导方程算法反演精度验证与地表覆盖

辐射定标、大气校正、图像裁剪等影像预处理工作都在 ENVI 5.3 软件中进行,根据辐射传导方程算法反演合肥市 5 期影像的地表温度,并与站点温度对比分析。结果表明:反演温度与实测温度拟合系数为 0.98,但是反演温度比站点实测温度偏高 7°C 左右,误差可能与陆地热辐射和大气影响有关^[24]。因此,可以使用辐射传导方程算法反演的地表温度进行空间特征分析。

采用监督分类中支持向量机结合目视解译的方法,将研究区地物分为水域、植被、土壤、不透水层 4 种,4 种地物的分类精度均高于 90%,Kappa 指数均高于 0.9。结合温度反演结果,可进一步分析城市热环境突出原因^[25]。本文以包河区 2020 年的地表温度与地物分类结果为例进行分析。包河区 2020 年 10 月 20 日地表温度与地物分类如图 2 所示。

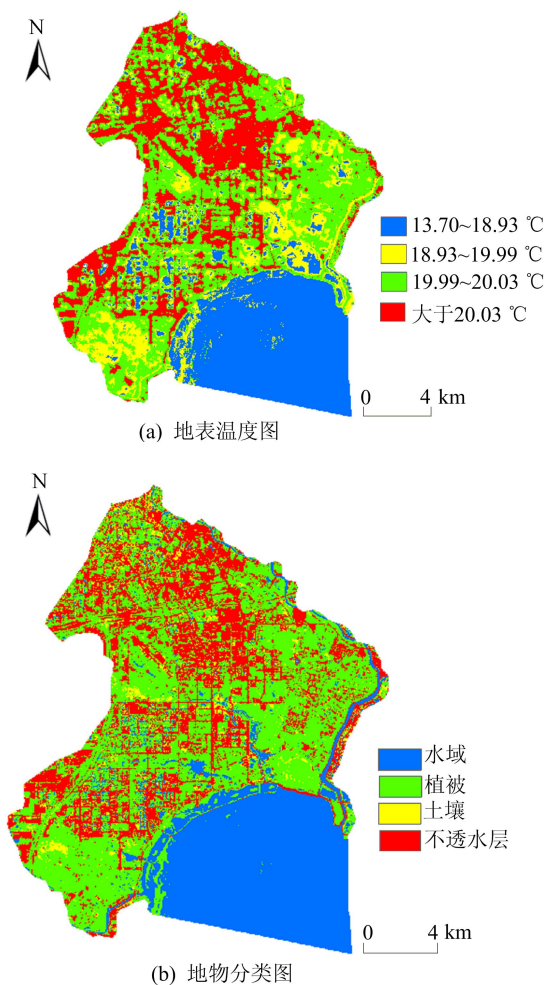


图 2 包河区 2020 年 10 月 20 日地表温度与地物分类

(1) 不透水层主要分布在城市中心商业区,植被、土壤则分布在城市绿地植被、郊区农田及自然地表处,不透水层地表温度相对于植被、土壤等自然地表温度偏高,符合客观规律。

(2) 植被、土壤等自然地表覆盖率从主城区到近城区再到郊区逐步增高,其空间分布格局对分析不透水层及植被、土壤的 SDE 都产生重要影响。

3.2 GWR 分析

由于包河区、庐阳区水系较为发达,包含巢湖、董铺水库等众多不透水层地表覆盖率为 0 的区域,会对实验结果产生影响^[12],在包河区、庐阳区以不透水层地表覆盖率、水域地表覆盖率作为自变量;而在蜀山区、瑶海区以不透水层地表覆盖率作为自变量。GWR 模型的全局拟合系数 R^2 结果如图 3 所示。 R^2 可以反映不透水层对地表温度的影响程度, R^2 值越大,表明影响程度越大。由图 3 可知:4 个行政区全局 R^2 基本达到 0.8 以上,不透水层覆盖度与地表温度之间存在明显的正相关关系;在时间特征上,2008—2020 年,包河区与庐阳区的 R^2 变化较为平稳,均在 0.9 以上;而蜀山区与瑶海区的 R^2 整体呈现递增趋势,表明不透水层面积对地表温度的影响程度整体呈现增加趋势。

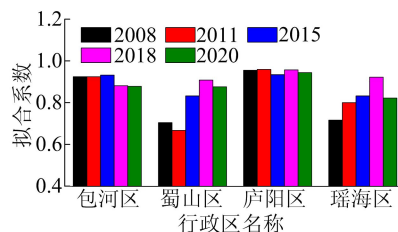


图 3 合肥 4 个行政区 GWR 模型全局拟合系数

3.3 SDE 分析

3.3.1 不透水层异常点的分布与点数提取

为了进一步分析异常点分布位置,选取包河区某街道分类影像作为底图,其不透水层对应地表温度异常点分布如图 4 所示。图 4 中,零散点为不透水层对应地表温度超过和低于 1 倍标准差的极高温、极低温的温度异常点。由图 4 可知:温度异常点的空间分布较为离散;极高温点主要分布在城市中的水泥地、混凝土、沙砾等处,在城市住宅小区中会成块出现;极低温点一般出现在沥青路面等处。考虑到合肥市 2008—2020 年地表覆盖变化显著,同一空间该点对应的温度数据也

发生明显变化,不利于地表温度空间特征的定量分析,因此,分别计算不透水层及植被、土壤对应的1倍标准差以内(保证该点对应的温度基本稳定、地物类型没有发生变化)的点,进行空间椭圆分析。

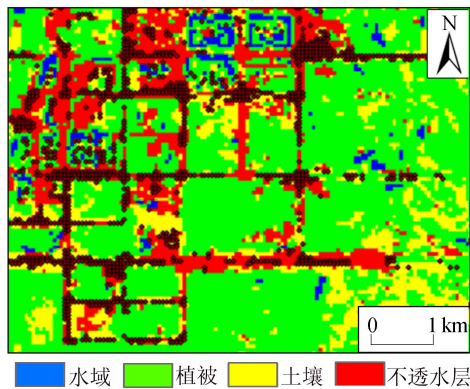


图4 包河区某街道不透水层对应地表温度异常点分布

采用MATLAB软件提取1倍标准差以内不透水层及土壤、植被温度点数,结果如图5所示。

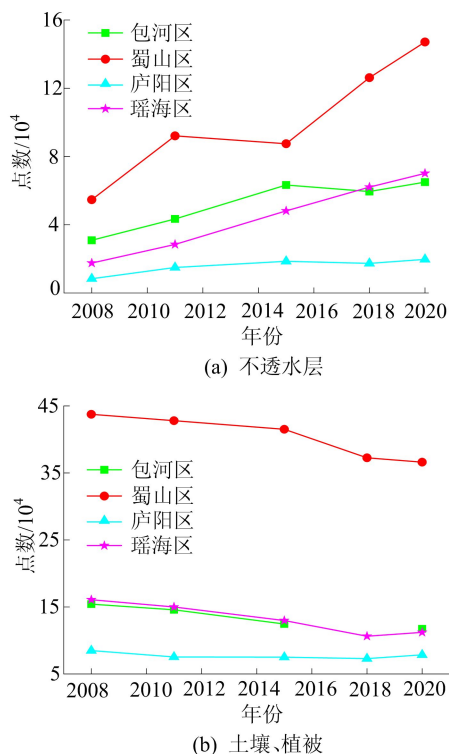


图5 4个行政区不透水层及土壤、植被温度点数年变化趋势

由图5可知,合肥市4个行政区的不透水层对应温度点数呈现逐年增加的趋势,而植被、土壤对应的温度点数逐年减少,这在一定程度上反映出近年来合肥市城市化进程不断加快的状况。以蜀山区2008—2020年结果为例,不透水层点数增

幅为169%,土壤、植被点数降幅为16%。

由图5并结合图3分析可知:蜀山区、瑶海区不透水层增长幅度变化较大,而拟合系数整体呈现递增情况,拟合系数增加与不透水层覆盖率增加有关;包河区、庐阳区不透水层变化相对平缓,因此拟合系数也趋于稳定。

3.3.2 SDE结果分析

运用SDE对合肥市4个行政区城市化空间格局演化趋势进行分析。2008—2020年4个行政区不透水层及植被、土壤对应1倍标准差以内的地表温度点SDE结果如图6所示,底图为2020年地物分类图;不透水层对应地表温度点SDE参数见表2所列。

(1)包河区不透水层及土壤、植被中心稳定,但是不透水层椭圆覆盖面积明显扩张,旋转角度由2008年的5°顺时针增加至2020年的19°。不透水层变化区域主要对应包河区北部的主城区,新增不透水层主要对应巢湖以北的滨湖新区、紧邻滨湖发展的包河经济开发区,表明包河区城市发展进程逐渐向东北、西南部偏移。

(2)蜀山区不透水层中心变化幅度相对于其他3个区比较明显,椭圆面积对应的集聚范围扩大135.25 km²,集聚方向稳定在以东南方向为主的120°左右,并有小幅度的逆时针(向西北方向)变化趋势。不透水层主要集中在合肥市经济技术开发区(经开区)、国家级合肥高新技术产业开发区(高新区)、政务文化新区(政务区)、正在建设中的合肥科学城及位于西北方向的新桥国际机场。

(3)庐阳区2008—2011年不透水层主要集中在东部地区,集聚方向稳定在90°,但在2011—2020年,椭圆方向向西北方向偏移16°。椭圆集聚范围由2008年的44.43 km²扩大到2020年的70.39 km²,表明庐阳区经济发展主要集中在北二环以南的高贸金融城和北部的庐阳经济开发区。

(4)瑶海区不透水层椭圆特征趋于稳定,椭圆集聚方向逐渐向东部偏移,稳定在170°,集聚范围扩大23.75 km²。不透水层主要集中在中部,表明瑶海区近年持续推进旧城更新,中部靠东部地区相继出现的科技产业、商贸城带动了瑶海区发展。

综上所述,4个行政区的土壤、植被椭圆特征趋于稳定,椭圆集聚方向与不透水层相似,集聚范围无显著变化;不透水层的椭圆中心趋向于稳定,椭圆分布特征与城市发展进程一致,椭圆覆盖范围有明显扩张趋势,主要集中在未被用于经济发展的

自然地表处;在整体表现上,2020 年包河区、蜀山区、庐阳区椭圆长轴较 2008 年明显增大,表明不透

水层分布在西南—东北、东南—西北、东南—西北方向明显扩张,城市发展方向以其为主导。

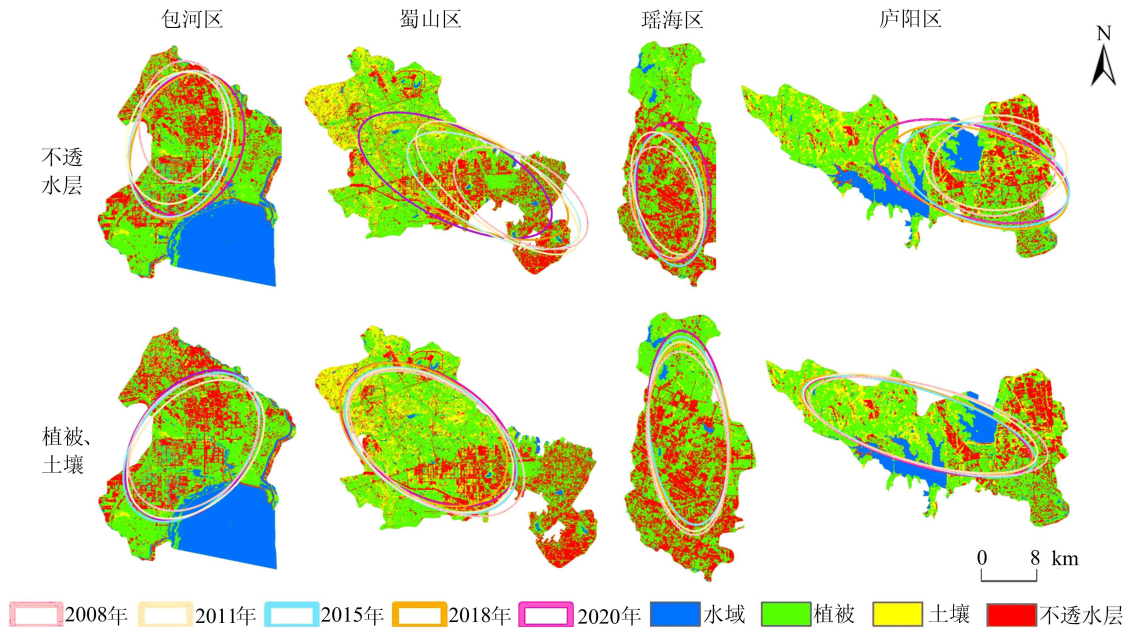


图 6 2008—2020 年合肥市 4 个行政区不透水层及植被、土壤对应地表温度点 SDE 分布

表 2 2008—2020 年合肥市 4 个行政区不透水层对应地表温度点 SDE 参数

行政区	参数	2008 年	2011 年	2015 年	2018 年	2020 年
包河区	面积/km ²	85.850	110.670	128.210	123.930	135.210
	旋转角/(°)	5.300	17.100	19.900	17.100	19.600
	中心纬度/(°)	31.791	31.776	31.768	31.770	31.771
	中心经度/(°)	117.309	117.304	117.312	117.308	117.315
蜀山区	面积/km ²	208.650	264.240	279.430	318.440	343.900
	旋转角/(°)	121.300	127.500	119.100	115.600	117.300
	中心纬度/(°)	31.821	31.835	31.831	31.845	31.852
	中心经度/(°)	117.199	117.162	117.156	117.123	117.095
庐阳区	面积/km ²	44.430	51.840	63.240	64.660	70.390
	旋转角/(°)	89.100	90.500	106.700	108.000	106.000
	中心纬度/(°)	31.910	31.914	31.906	31.905	31.909
	中心经度/(°)	117.254	117.255	117.247	117.242	117.237
瑶海区	面积/km ²	71.470	75.380	85.130	88.320	95.220
	旋转角/(°)	165.000	162.900	170.200	176.400	174.300
	中心纬度/(°)	31.900	31.909	31.903	31.906	31.910
	中心经度/(°)	117.344	117.346	117.349	117.349	117.354

4 结 论

(1) 辐射传导方程算法适用于合肥市的地表温度反演,合肥市热环境分布特征与城市化建设方向一致,主城区温度较高,郊区温度偏低,不透水层地表温度高于土壤、植被等自然地表。

(2) 不透水层与地表温度的 GWR 分析表明,合肥市 4 个行政区的整体拟合系数基本达到 0.8,包河区与庐阳区拟合系数随时间变化较为稳定,达到 0.9,而蜀山区与瑶海区拟合系数呈现递

增趋势。不透水层的变化对合肥市 GWR 的整体拟合系数数值有重要影响。

(3) SDE 分析结果表明,合肥市 4 个行政区不透水层椭圆集聚范围明显增加,其演化趋势与城市扩张趋势一致,其中蜀山区椭圆集聚范围与中心变化幅度较其他 3 个区更为显著,主要呈现向西北方向扩展。

合肥市 4 个行政区的地表温度空间特征变化表明,合肥市近年来城市化发展迅速,城市扩张加剧,由原来的以主城区发展为中心转变为以滨湖

新区、国家级合肥高新技术产业开发区、政务文化新区、庐阳经济开发区等地区共同发展,这些地区地表温度明显高于其他区域,将成为城市生态环境治理重点。城市化发展迅速会导致城市热环境问题显著,因此合肥市在快速发展的同时应合理规划与治理,并制定城市可持续协调发展的有效措施。本文在遥感数据的地面验证以及与热岛强度的联合研究方面还存在不足,对地理信息、水文、气象等因素缺乏综合分析,这些都是进一步研究的方向。

[参 考 文 献]

- [1] DU J, XIANG X Y, ZHAO B Y, et al. Impact of urban expansion on land surface temperature in Fuzhou, China using Landsat imagery[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102346.
- [2] 杨玉婷, 汤家法, 边金虎, 等. 加尔各答市地表温度与不透水面比例季相相关性研究[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 79-89.
- [3] 宫阿都, 李京, 王晓娣, 等. 北京城市热岛环境时空变化规律研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(6): 15-18.
- [4] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(4): 12-17.
- [5] CHATTERJEE R S, SINGH N, THAPA S, et al. Retrieval of land surface temperature (LST) from Landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 264-277.
- [6] 覃志豪, 张明华, KARNIELI A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 456-466.
- [7] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J A, SKOKOVIC D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [8] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(8): 1591-1617.
- [9] 韩贵锋, 梁保平. 地表温度与植被指数相关性的空间尺度特征: 以重庆市为例[J]. *中国园林*, 2011, 27(1): 68-72.
- [10] 裔传祥, 胡继超, 李小军. 土地覆盖类型对城市热岛效应的响应分析[J]. *测绘通报*, 2018(1): 72-76, 116.
- [11] WANG J, ZHAN Q, GUO H, et al. Characterizing the spatial dynamics of land surface temperature-impervious surface fraction relationship[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45: 55-65.
- [12] 樊智宇, 詹庆明, 刘慧民, 等. 武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2): 226-235.
- [13] 于明洋, 卢晓琛, 邢华桥, 等. 济南市中心城区地表热环境时空变化分析[J]. *测绘科学*, 2021, 46(4): 100-107, 157.
- [14] HUANG M H, CHEN J J. Spatial and temporal change analysis of urban heat island effect in Wuhan city[J]. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 42: 705-712.
- [15] 王淑婧, 李俊峰. 长三角城市群高质量绿色发展的均衡性特征及障碍因素[J]. *自然资源学报* 2022, 37(6): 1540-1554.
- [16] MOORE T W, MCGUIRE M P. Using the standard deviational ellipse to document changes to the spatial dispersion of seasonal tornado activity in the United States[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, 2: 21.
- [17] 王慧慧. 合肥市 1992-2018 年城市扩张对城市热环境影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [18] 刘紫涵. 基于时空融合技术的合肥市热岛效应时空演变分析[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [19] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴: 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009: 141.
- [20] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴: 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 64.
- [21] 水库浪子. 安徽省合肥市面积及城市概况(合肥的发展潜力有多大)[EB/OL]. (2023-03-17)[2023-03-18]. <http://klgsy.com/n/10282.html>.
- [22] FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E, BRUNSDON C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis [J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [23] KUO P F, SHEN C W, QUADRIFOGLIO L. Modeling the spatial effects on demand estimation of Americans with disabilities act paratransit services[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2352: 146-154.
- [24] 黄曦涛, 张瑜. 西安市城市热岛效应强度定量研究与应用[J]. *测绘科学*, 2021, 46(9): 144-149.
- [25] 李海峰, 李永树, 卢正, 等. 河流廊道景观的热环境效应分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(4): 51-54, 133.

(责任编辑 张淑艳)