

基于多源数据的长沙市人居热环境效应 及其影响因素分析

熊 鹰^{1,2,3}, 章 芳^{1,2}

(1. 长沙理工大学建筑学院, 长沙 410076; 2. 国土资源评价与利用湖南省重点实验室, 长沙 410007;
3. 长沙理工大学资源环境与城乡规划研究中心, 长沙 410114)

摘要: 针对城市人居热环境效应研究缺乏从自然—人文多维因子组合综合评价分析的现状, 本文基于多源空间数据(Landsat 5、Landsat 8 卫星影像数据、POI空间大数据、数字高程模型等)反演长沙市2000年、2009年和2016年城市地表温度格局, 并快速获取与城市热环境密切相关的自然和人文因素共12个影响因子。应用标准差椭圆、空间主成分分析(PCA)等方法多角度分析了城市人居热环境效应及影响因素的联动关系。结果表明:① 2000—2016年共16年间热岛面积共增加547 km²、地表最高温度差达到10.1℃。城市热岛区的空间分布主要集中在城市建成区, 如工商业集中和人口密集的城市中心地区, 并呈现出地表温度从城市中心向郊区逐渐降低的热岛的空间分布格局, 出现多个高温中心点, 如五一广场商圈、长沙县星沙经济技术开发区、望城工业区、岳麓工业集中区、天心工业区等;② 2000—2016年热岛空间发展主轴保持在东北—西南方向, 2000—2009年热岛重心向西南偏移了2.7 km, 偏转角度为54.9°, 2009—2016年热岛重心向东北偏移了4.8 km, 偏转角度为60.9°。整体上, 长沙市热环境空间格局的变化和城市的建设强度的变化存在一定的关联;③ 通过主成分分析得出影响长沙城市热环境格局的因子为景观格局、城市建设强度、地形地貌3个主因子;④ 人文因素对于当前加剧热岛效应形成产生的促进作用明显大于自然因素的抑制作用, 综合作用下地区将升温0.293℃。影响城市人居热环境的因素众多, 多源数据有助于揭示城市热环境空间格局及演变规律, 深化对城市热岛效应成因分析认知, 明确人文和自然影响因素间相关关系和相关程度, 以此为改善城市人居环境质量提供科学依据。

关键词: 热环境; 自然—人文影响因素; 多源数据; 空间主成分分析(PCA); 长沙市

DOI: 10.11821/dlxb202011013

1 引言

快速城市化进程中, 城市交通、工业生产、居民生活等人类活动消耗了大量燃料, 由于低效利用与无序管理, 产生的“三废”以“面源”的形式排放至城市生态系统中, 致使城市人居环境问题凸显^[1], 加速城市热岛效应的产生和扩展。城市热岛效应会造成众多危害, 如长时间的高温影响人体舒适度, 增加高温热浪天气出现的频率, 加剧热岛环

收稿日期: 2019-10-12; 修订日期: 2020-07-13

基金项目: 国家社会科学基金项目(15BJY051); 国土资源评价与利用湖南省重点实验室开放课题(SYS-ZX-202002); 湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP18ZDI031) [Foundation: National Social Science Foundation of China, No.15BJY051; Open Topic of Hunan Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Utilization, No.SYS-ZX-202002; Research Project of Appraisal Committee of Social Sciences Research Achievements of Hunan Province, No.XSP18ZDI031]

作者简介: 熊鹰(1977-), 男, 湖南汉寿人, 博士, 教授, 主要从事城市人居环境、土地利用/覆盖变化与城市扩张等方面的研究。E-mail: csustxy@126.com

流对城市空气污染程度等,这对于构建健康、舒适、宜居及可持续的城市人居环境具有重要影响。热环境不仅直接关系到城市人居环境质量和居民健康状况,同时还对城市能源和水资源消耗、生态系统过程演变、生物物候以及城市经济可持续发展有着深远的影响^[2-5]。当前,城市人居热环境效应已成为地理学、环境科学、城市规划、建筑学等学科研究的热点之一^[6]。

国内外对于城市人居热环境效应及其影响因素开展了较为广泛的研究。Bokaie等^[7]认为自然地表被大面积的不透水面替代导致的城市地表异质性是形成城市热岛的根本原因;Baldinelli等^[8]研究发现,城市下垫面地表反照率的减小是形成城市热岛的重要原因;Yuan等^[9]使用美国Minnesota城市3个年度不同季节的TM/ETM+影像,将地表温度与植被覆盖度、不透水面之间的定量关系进行了比较分析;Grover等^[10]基于Landsat 7遥感影像反演孟买与德令哈市的城市地表温度,分析研究了热岛空间分布差异并将其与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)进行拟合,发现NDVI与热岛效应负相关性更为明显。周亮^[11]在分析北京城市景观格局演变的基础上,研究了城市扩张及其景观格局的改变对城市热岛效应空间分布的作用;张小飞等^[12]基于Landsat ETM+数据提取了深圳市植被覆盖、下垫面类型和地表温度等信息,并分析信息之间的作用关系,研究表明城市热岛效应的强度受下垫面、植被覆盖度的影响显著;肖凡^[13]通过提取遥感指数,分析其对地表温度变化的影响,结果表明提取的遥感指数与地表温度变化有关,相关性从高到低依次是归一化不透水面指数(Normalized Difference Impervious Surface Index, NDISI)、归一化建筑指数(Normalized Difference Building Index, NDBI)、改进归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)、NDVI。尽管国内外学者在城市人居热环境影响机制等方面开展大量研究,并取得了较丰硕成果。但已有研究多从单一影响因素出发,缺乏景观格局、城市建设、地形地貌、社会经济活动等自然与人文角度综合全面的分析。究其原因在于,城市人居热环境研究涉及到地理学、气象学、城市规划学、计算机科学、地统计学等众多学科,传统的研究手段和数据源无法将众多相对独立的知识有效整合并充分利用。

为此,本文在RS、GIS技术的支持下,以遥感影像空间数据、POI空间大数据等为基础数据源,结合应用标准差椭圆、空间主成分分析(PCA)等方法多角度探讨了城市人居热环境效应及影响因素,辨析识别自然—人文多维因子与城市热环境效应的联动关系,以期为更好地认识城市热环境格局及演化,理解城市热环境要素的内在发展规律与驱动机制,为城市规划、城市建设及提升人居环境质量等提供理论依据与决策支持。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域概况

长沙市位于湖南省东部偏北,湘江下游和湘浏盆地西缘,海拔在-16.8~326.1 m(图1、图2)。长沙市气候类型为亚热带季风气候,夏天炎热,冬季寒冷。市区年平均温度为约17.2℃,市区年平均降水量约1361.6 mm。研究区由于近年来城市建城区扩张迅速^[14],及汽车保有量和城市能



图1 长沙市遥感影像图
Fig. 1 Remote sensing image map of Changsha city

耗总量不断上升等原因导致其人居环境问题突出,为“四大火炉”之一。1951—2014年统计资料显示,长沙市年平均高温日30.6 d,年平均高温热浪事件达2.16次,热岛效应严重^[15]。如何缓解城市热环境效应,改善城市人居环境质量,是长沙市城市发展所面临的迫切而现实的问题。

长沙市下辖6区3县,其中宁乡市和浏阳市市中心与主城区空间距离较大,故本文选择长沙市6个行政区(岳麓区、开福区、芙蓉区、雨花区、天心区、望城区)和长沙县作为研究区,总面积约3903.39 km²,2018年末常住人口535.59万人。

2.2 数据来源及预处理

本文选取过境时间为北京时间2000年7月22日10:33AM、2009年8月21日10:46AM,条带号为123,形编号40、41号的Landsat 5 TM及2016年7月23日北京时间10:58AM,条带号为123,形编号40、41号的Landsat 8 OLI多光谱及热红外波段遥感影像。遥感影像成像时间为炎热夏季,天气晴好,研究区域云量均小于10%,遥感成像条件较好,借助ENVI 5.3软件对遥感影像进行辐射定标、大气校正及工作区裁剪等预处理。其他数据还包括2016年长沙市POI数据,利用Geosharp 1.0软件在高德地图上采集了2016年长沙市13大类POI数据,包含餐饮、生活娱乐、风景名胜区、公共服务设施、公司企业、购物中心、科教文体、金融保险、商务住宅、政府机构、住宿、体育休闲、医疗保健等大类;数字高程模型(DEM)数据,在ArcGIS 10.5中进行投影转换、镶嵌、工作区裁剪等;以及长沙市行政边界矢量图。为便于计算,统一将数据转换为横轴墨卡托(UTM)投影,椭球体为WGS84,分辨率为30 m,数据统一纳入至GIS数据库中,构建基础研究数据库。数据来源如表1所示。

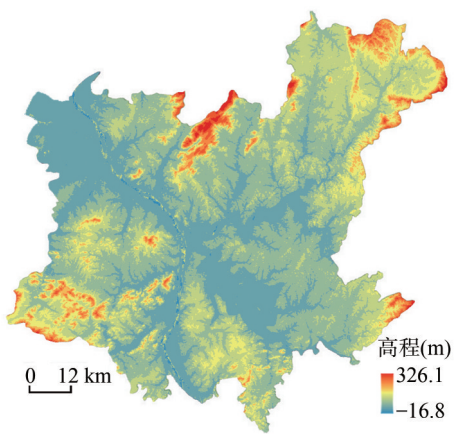


图2 长沙市DEM
Fig. 2 DEM of Changsha city

表1 数据来源
Tab. 1 Data sources

数据系列	数据名称	数据来源	用途	时间
遥感数据	Landsat 5 TM、Landsat 8 OLI TIRS	http://www.gscloud	反演地表温度、提取地表信息	2000年7月; 2009年8月; 2016年7月
	DEM数据	http://www.gscloud	计算高程、坡度	2016年
	长沙市行政边界矢量数据	中国地球系统科学数据共享网	提取研究区边界	2016年

3 研究方法

3.1 地表温度反演

本文选用大气校正法,Landsat 5 TM采用热红外波段6,Landsat 8 OLI采用TIRS 10波段进行地表温度反演,卫星机载传感器所接收到的热红外辐射亮度值L,由 L_{up} 、 L_{down} 和地面辐射经过大气传导后到达传感器的辐射亮度值这3部分构成。其计算公式^[16]如下:

$$L = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{down}] \tau + L_{up}$$
 (1)

$$T_s = K_2 / \ln(1 + K_1 / B(T_s))$$
 (2)

式中: $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; T_s 为地表温度; L_{up} 为大气上行辐射亮度; L_{down} 为大气下

行辐射亮度, K_1 、 K_2 为常量。其中 Landsat 5 TM 热红外波段 6 L_{up} 为 $0.38\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, L_{down} 为 $3.65\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, K_1 为 607.76, K_2 为 1260.56。Landsat 8 OLI 热红外波段 10 L_{up} 为 $1.25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, L_{down} 为 $2.37\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, K_1 为 774.89, K_2 为 1321.08。

3.2 地表信息获取

(1) 归一化差值不透水面指数 (NDISI), 不透水面是城市下垫面的主要组成部分, 主要包括交通道路和建筑物屋顶等, 可以阻止水渗透到地面以下。NDISI 的计算公式^[17]为:

$$NDISI = \frac{TIRS1 - (MNDWI + NIR + SWIR1)/3}{TIRS1 + (MNDWI + NIR + SWIR1)/3} \quad (3)$$

(2) 植被覆盖度 (FVC), 即地面植被叶片的垂直投影面积占计算总面积的比例。其计算公式为:

$$FVC = \left[\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad (4)$$

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5)$$

(3) 改进的归一化水体指数 (MNDWI), 即对含有水体信息的影像波段进行归一化差值处理。其计算公式如下:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (6)$$

(4) 归一化差值裸地与建筑指数 (NDBBI): 将遥感影像直接去除水体和植被信息, 对含裸地及建筑用地信息进行归一化差值处理。

$$NDBBI = \frac{1.5SWIR2 - (NIR + Green)/2}{1.5SWIR2 + (NIR + Green)/2} \quad (7)$$

式中: $Green$ 、 Red 、 NIR 、 $SWIR1$ 、 $SWIR2$ 、 $TIRS1$ 对应为 Landsat8 遥感影像中的第 3、4、5、6、7、10 波段。

(5) 景观格局指数, 即景观格局信息的详细反映, 包括景观结构特点和空间格局等指标, 采用景观格局指数研究景观分布特征及其变化, 构建景观结构与空间格局之间的关联, 是景观生态学研究中最重要指标^[18]。经过比选, 本文选择以下 4 种与城市热岛关联性较大的景观指数。

① 散布指数 (CONTAG): 即景观格局中不同斑块类型的聚集程度或扩展趋向。其计算公式如下:

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(p_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \times \ln(p_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \times 100 \quad (8)$$

式中: p_i 即斑块类型占比; g_{ik} 即斑块类型 i 、 k 像元之间连接系数; m 为当前斑块类型数。

② 香农多样性指数 (SHDI): 用来反映景观格局的复杂程度。其计算公式如下:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^n (p_i) \times \ln(p_i) \quad (9)$$

式中: n 为景观斑块的个数; p_i 为景观斑块类型 i 面积占整个景观斑块总面积的比例。

③ 离散度 (DIVISION): 某一景观类型中各斑块分布的分散度。其计算公式如下:

$$DIVISION = \frac{D_i}{A_i} \quad (10)$$

式中: D_i 即类型 i 的距离; A_i 即类型 i 的面积。

④ 斑块内聚力指数 (COHESION), 即衡量各斑块类型间的物理连通性。计算公式:

$$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100 \quad (11)$$

式中: p_{ij} 即第 ij 个斑块类型的占比; a_{ij} 即第 ij 个斑块的像元个数; A 为像元总数。

以上4个指数基于研究区的土地利用类型图由Fragstats 4.2计算, 土地利用类型图在ENVI5.3中使用监督分类法制作得出, 其整体精度达91.20%, Kappa系数为0.88, 满足使用要求。

(6) 地表反照率 (Albedo), 是入射太阳辐射能可以被地表反射的比率, 是决定地表吸收太阳辐射能和地表能量收支的重要参数。

$$Albedo = (0.356a_2 + 0.13a_4 + 0.373a_5 + 0.085a_6 + 0.072a_7) / 225 - 0.0018 \quad (12)$$

式中: a_i 为Landsat 8影像的第 i 波段的灰度值。

(7) 高程, 是指地面点到高度起算面的垂直距离, 温度与高程相关性较大, 即高程每上升100 m, 温度降低0.6 °C左右。

(8) 坡度, 指某地区地表起伏的幅度, 在ArcGIS 10.5软件坡度分析工具中计算得出。

(9) 社会经济活动指数, 该指数可用于评价区域内社会经济活动对城市热环境的影响, 本文利用长沙市POI数据表征社会经济活动指数, POI数据承载的城市社会经济部门的空间点位信息, 不仅可以表征人地系统要素的空间格局情况, 而且能够提供隐含在部门属性之中的人类活动及社会经济活动信息, 为研究者定量挖掘人类活动的空间分布信息提供可能^[19], 本文在ArcGIS 10.5软件中使用密度分析工具提取社会经济活动指数。

3.3 空间主成分分析

本文从影响城市地表温度的分布格局的自然因素和人文因素着手, 利用SPSS 24.0和ArcGIS 10.5软件进行相关性及空间主成分分析。空间主成分分析是一种通过计算将较多个指标变为几个独立的综合指标的方法^[20]。多元变量系统中的各主成分即相互独立的指标, 各主成分根据贡献度由大到小依次排序^[21-22]。

3.4 标准差椭圆

标准差椭圆法是研究空间数据分布特征和方向差异的空间计量分析方法, 主轴长度表示数据的空间分布方向及集聚离散程度, 转角角度表示空间数据变化的主导趋势方向^[23]。本文使用标准差椭圆法分析研究区2000年、2009年、2016年3个时期热环境标准差椭圆的演变, 并识别城市热岛发展方向和迁移轨迹。

4 结果与分析

4.1 城市热环境效应演变特征

4.1.1 城市地表温度分级方法 为了直观地描述研究区地表温度的差异情况, 本文采用ArcGIS 10.5中标准差法将地表温度划分为极低温区、低温区、较低温区、中温区、较高温区、高温区与极高温区7个等级, 具体分级如表2所示。根据2016年统计反演结果得出地温平均值为36.9 °C, 92%的区域的的地表温度在31~42 °C之间, 与当日空气温度(29~37 °C)具有较高一致性, 表明该方法反演的地表温度结果较可靠。根据热岛分级的规则, 由于研究区中温区、较高温区、高温区和极高温区为地表温度值普遍高于地表温度平均值的区域, 本文将这些区域视为城市热岛区。

表2 长沙市地表温度等级划分

Tab. 2 Classification of surface temperature in Changsha city

温度等级	极低温区	低温区	较低温区	中温区	较高温区	高温区	极高温区
温度区间	$T < u - 2.5std$	$u - 2.5std \leq T < u - 1.5std$	$u - 1.5std \leq T < u - 0.5std$	$u - 0.5std \leq T < u + 0.5std$	$u + 0.5std \leq T < u + 1.5std$	$u + 1.5std \leq T < u + 2.5std$	$T \geq u + 2.5std$

注： u 代表研究区地表温度平均值， std 代表地表温度标准差。

4.1.2 城市热环境空间分布特征 2000年、2009年与2016年遥感反演长沙市热岛空间分布如图3所示，由图可以看出，其热岛等级呈现不规则的环状分布，地表温度由中心向四周渐变的规律，最高温均出现在工业建筑密集及人流集中的区域，如长沙经开区、星沙产业基地和火车站商圈，最低温均出现在湘江水域及东北部森林公园。3个时期的城市热岛空间分布特征较相似，即代表城市热岛的4个温度区覆盖范围在建筑、人口集聚的城市建成区和城市交通道路沿线；较低温主要分布在江河、公园绿地、内湖及建成区以外的非建设用地等植被覆盖区域；而湘江和长沙县山地地区则基本被低温和极低温所覆盖，表现出明显的“冷岛”效应。根据三期时序图对比发现，2000—2016年中温区、较高温区、高温区、极高温区沿着城市建成区不断扩展，城市热岛覆盖范围的延展方向与长沙市建成区扩展方向基本相同。

2000年长沙市城市热岛覆盖范围较小，城市热岛区地表平均温度为34.5℃，而根据地表温度反演后分级，地表高温区集中于老城区（芙蓉区、雨花区、天心区、开福区、岳麓区）以及望城区、长沙县城市建成区，城区内地表最高温度达到52.5℃，城区内的“冷源”如山体平均温度为32.2℃，与城区地表最高温度相差20.3℃，而水体与之相差22.3℃。2009年高温区覆盖范围较2000年呈不规则环状扩展，平均地表温度较2000年增长1.4℃，城市中心区大部分区域被热岛覆盖，研究区平均地表温度35.9℃，城区内的山体与水体温度增至32.8℃与31.3℃，长沙经开区、星沙产业基地和火车站商圈为明显的高温集聚区，地表最高温59.8℃。至2016年，长沙市城市高温区分布进一步扩张，研究区地表平均温度达到36.9℃。热岛重心转移至长沙经济开发区和星沙产业基地，地表最高温达63.3℃。

根据长沙市热岛发展方向及质心迁移图（图4），2000—2016年热岛空间发展主轴保持在东北—西南方向，2000年到2009年热岛重心向西南偏移了2.7 km，偏转角度为54.9°，由于该时期岳麓高新区、北部金霞开发区高速发展，导致该地区地表温度的升高。2009—2016年热岛重心向东北偏移了4.8 km，偏转角度60.9°，主要是星沙开发区的发展，改变了热环境的空间格局。整体上，长沙市热环境空间格局的变化和城市的建设强度的变化存在一定的关联。

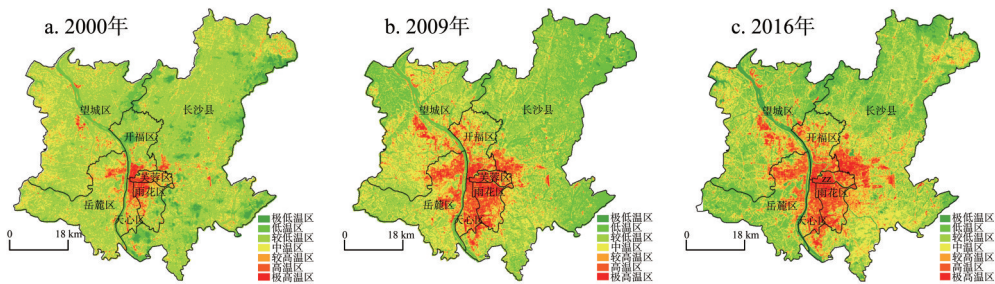


图3 2000年、2009年、2016年长沙市热岛空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heat island in Changsha city in 2000, 2009 and 2016

4.1.3 城市热环境时间演变特征 为更详细了解长沙城市热岛的时空演变，分别统计2000年、2009年、2016年各温度等级面积及比例，结果如表3所示。2000年、2009年及2016年长沙市较低温区面积比例分别为59.57%、36.64%及32.34%，期间较低温区分布面积及比例逐渐减少，减幅接近50%，并呈现较低温区向中温区演变的态势。而长沙市城市热岛区面积也存在明显变化，热岛总面积2000年为1060 km²，2009年增至1481 km²，2016年达到1607 km²，2000—2016年面积增加了547 km²，增幅达51.6%。在各地表温度中，中温区面积2000年为781.76 km²，2009年增加到871.76 km²，2016年达852.05 km²，2000—2016年中温区呈先增后减的波动变化，但总体呈增长趋势，期间面积增长了70.29 km²；较高温区面积2016年较2000年增加了约1.1倍，2009年较2000年面积增加约100 km²；高温区呈持续快速增长趋势，2000—2016年增加了213.46 km²，2016年较2000年增加了3.3倍，年均增幅达9.5%；极高高温区也呈持续增加之势，2009年的面积是2000年的3倍多；2000—2016年增加了72.27 km²，2016年较2000年增加了2.19倍，但2009—2016年增幅呈减少的态势。

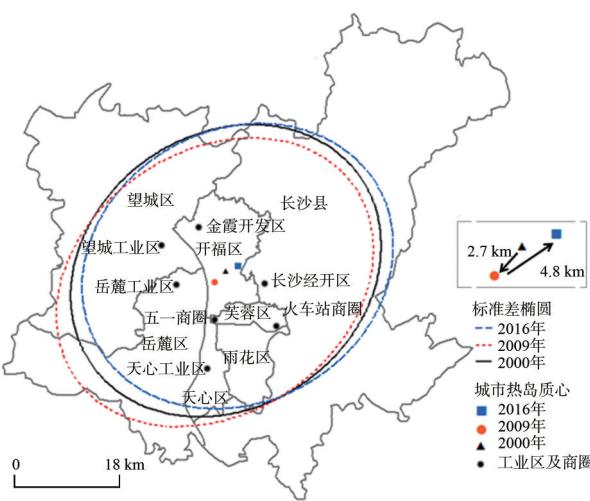


图4 2000年、2009年、2016年长沙市热岛发展方向与质心迁移
Fig. 4 Development direction and centroid migration of heat island in Changsha city in 2000, 2009 and 2016

表3 2000年、2009年、2016年长沙市地表温度面积及比例
Tab. 3 Surface temperature area and proportion in Changsha city in 2000, 2009 and 2016

年份	极低温区		低温区		较低温区		中温区		较高温区		高温区		极高高温区	
	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)
2000	76.04	1.93	456.42	11.59	2346.89	59.57	781.76	19.84	180.58	4.58	64.75	1.64	33.07	0.84
2009	11.67	0.30	1003.43	25.47	1443.27	36.64	871.28	22.12	280.12	7.11	227.68	5.78	102.07	2.59
2016	149.68	3.80	908.47	23.06	1274.13	32.34	852.05	21.63	371.64	9.43	278.21	7.06	105.34	2.67

根据各行政界限地表温度等级面积统计表（表4）及图5，其中雨花区、芙蓉区、天心区近16年来的平均热岛面积均超过了80%，热岛效应显著，2009年相较于2000年热岛面积有大幅提升，而2016年相较于2009年，除长沙县热岛面积增加较多外，其他行政区的面积变化不大或缓慢增加。这一时期，长沙县热岛面积增加较多的原因，主要受星沙经济技术开发区的城市建设（道路基础设施、房地产、工业化等）快速发展有重要影响，热岛效应呈现由中心城区向外围扩散的态势。

4.2 城市热环境影响因素

4.2.1 与影响因素相关性分析 任何事物的表象变化是由内外因协同作用的体现，所以探究城市人居环境效应的影响因素和驱动机制是分析城市人居环境效应演变的关键。影响城市热环境的因素众多，总的来看主要可归结为2类，一是导致城市地表温度升高，加剧城市热岛效应的正向因子。如城市建成区的扩张改变了下垫面类型，增加了不

表4 长沙市各行政区地表温度等级面积统计表(km²)

Tab. 4 Statistics of surface temperature grade area in each administrative district of Changsha city (km ²)												
等级区	芙蓉区			天心区			岳麓区			开福区		
	2000年	2009年	2016年	2000年	2009年	2016年	2000年	2009年	2016年	2000年	2009年	2016年
极低温区	0.15	0.00	0.49	0.00	0.00	6.12	0.00	0.00	17.67	6.85	0.09	7.86
低温区	0.79	0.39	0.95	7.42	6.15	1.85	27.41	43.35	160.79	28.27	16.24	15.77
较低温区	5.53	1.40	0.80	23.41	4.12	3.64	304.21	194.52	145.28	105.07	40.88	36.57
中温区	8.91	4.45	2.30	17.06	11.68	9.72	139.86	162.65	80.28	28.03	62.51	50.41
较高温区	13.39	9.15	8.78	14.02	16.26	16.52	34.94	55.74	62.31	13.59	37.60	42.48
高温区	8.98	16.99	16.29	9.85	26.46	28.14	10.31	47.48	45.48	6.77	27.05	32.25
极高温区	5.93	11.30	14.06	3.75	10.86	9.53	3.33	16.33	8.26	7.61	11.83	10.86

等级区	雨花区			望城区			长沙县		
	2000年	2009年	2016年	2000年	2009年	2016年	2000年	2009年	2016年
极低温区	1.63	0.00	0.24	1.04	0.02	65.80	66.37	11.55	51.51
低温区	7.96	0.30	1.30	83.00	213.84	249.37	301.57	723.16	478.44
较低温区	38.20	3.20	3.70	582.09	361.73	347.29	1288.38	837.42	736.84
中温区	24.50	13.72	9.03	275.08	304.85	211.57	288.31	311.42	488.74
较高温区	18.44	21.57	24.15	35.62	68.61	69.31	50.59	71.20	148.09
高温区	12.87	42.28	51.56	6.04	27.05	32.25	9.92	40.38	72.24
极高温区	7.48	30.00	21.09	2.61	9.39	9.89	2.35	12.38	31.64

透水面积；城市人口稠密，衣、食、住、行、汽车尾气、工业化生产等人类经济活动过程中产生的人为热源；城市气象因素是导致城市热岛效应的外在原因，但气象因素不会直接影响城市热环境，而是通过植被、地表反照率来引起城市人居热环境改变。另一类是降低城市地表温度，缓解城市热岛效应的负向因子。如植被覆盖、水体分布、高程等因素的数据连续型较好，可以较好地揭示城市人居热环境时空变化。当前，国内外研究分析认为下垫面性质改变和植被覆盖变化等自然因素和人口、经济、产业形态以及建筑布局、建筑密度和容积率等人文因素是影响城市人居热环境的重要因素^[10]。本文根据长沙市城市地形特点及区位特征选取相关自然因素与人文因素进行分析，具体指标如表5所示。其中，自然因素包括植被与水体、地形地貌，人文因素包括景观格局指数、城市建设强度、社会经济活动指数。景观格局指数包括离散度、香农多样数、散布指数、斑块内聚力指数。城市建设强度由归一化差值不透水面指数、归一化差值裸地与建筑指数、地表反照率指数表征；社会经济活动指数主要反映人类活动强度即社会经济发展状况对热岛影响，由POI密度指数表示。同时，长沙市3个年度的热环境效应分析显示，2016年热岛效应最明显，因此以2016年数据进行影响因素分析。

分析城市热环境影响因子与地表温度之间的相关性，本文通过 ArcGIS 10.5

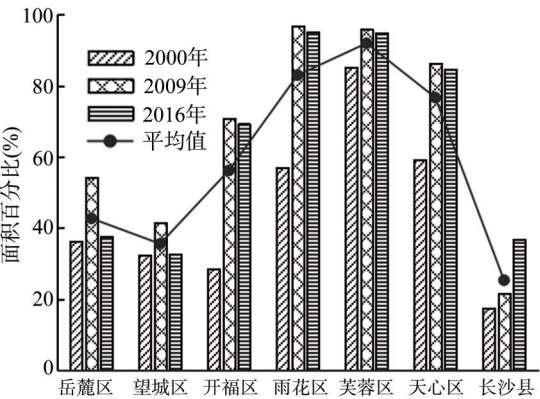


图5 2000年、2009年、2016年长沙市各行政区热岛面积百分比

Fig. 5 Percentage of heat island area in administrative districts of Changsha city in 2000, 2009 and 2016

表5 长沙市城市热环境影响因素指标

Tab. 5 Index of urban thermal environmental impact factors in Changsha city

一级指标	二级指标	三级指标
自然因素	植被与水体	植被覆盖度(FVC)
		改进归一化差异水体指数(MNDWI)
	地形地貌	数字地表高程(DEM)
		坡度
人文因素	景观格局指数	散布指数(CONTAG)
		香农多样性指数(SHDI)
		离散度(DIVISION)
	城市建设强度	斑块内聚力指数(COHESION)
		归一化差值不透水面指数(NDISI)
		归一化差值裸地与建筑指数(NDBBI)
	社会经济活动	地表反照率(Albedo)
		兴趣点密度指数(POI)

在研究区范围内利用 Data Management Tools 模块中采样工具随机选取了 700 个样本点，并分别获取各个点位置处的指数值和地表温度值，再将数据导入到 SPSS 24.0 中进行 Pearson 相关性分析，得到各指数与地表温度的 Pearson 相关系数（表 6）。自然环境要素中的 FVC、MNDWI、高程、坡度以及人文要素中景观格局的离散度、香农多样性指数、散布指数与地表温度之间呈现显著的负相关关系，即这些影响因子越大，与之对应的地表温度越低，表明植被、水体和地势高具有缓解城市热岛效应的降温作用，这与现有大部分研究结果一致；归一化不透水面指数、归一化差值裸地与建筑指数、POI、斑块内聚力指数、地表反照率与地表温度之间呈现显著的正相关关系，这些指数反映地表的建设强度和人类活动对城市人居环境效应的影响，在高强度建城区人类活动产生的热量，难以较快散热，易引起城市热岛现象。

表6 影响因子与地表温度之间的 Pearson 相关性分析

Tab. 6 Analysis of the correlation between factors and surface temperature

影响因子	NDISI	FVC	MNDWI	NDBBI	POI	高程	坡度	离散度	香农多样性数	散布指数	斑块内聚力指数	地表反照率
Pearson 相关系数	0.369**	-0.508**	-0.326**	0.815**	0.519**	-0.514**	-0.270**	-0.276**	-0.373**	-0.338*	0.433**	0.395**

注：**表示相关性在 0.01 水平显著（双边检测）；*表示相关性在 0.05 水平显著（双边检测）。

考虑到各种参数的量纲不统一，且有正值和负值的区别，按统计学的要求对各参数进行正规化处理，需将它们的数值统一量化到 0~1 之间，公式为：

当影响因子与温度成负相关时，
$$N' = 1 - \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \tag{13}$$

当影响因子与温度成正相关时，
$$N' = \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \tag{14}$$

式中：N'为正规化处理后的数值，取值在 0~1 之间；N 为原值；N_{min} 为最小值；N_{max} 为最大值。

图 6 为各指数数据进行正规化处理后的空间分布图。据图 6 可知：① 生态环境指标：植被覆盖度与研究区植被分布位置、丰度一致，建成区数值较小，郊区数值较大，改进归一化差异水体指数的分布与研究区水体、水田大体一致；② 地形地貌指标：高程在研究区四周数值较大，说明研究区为盆地地形，坡度与高程存在正向相关性；③ 景观

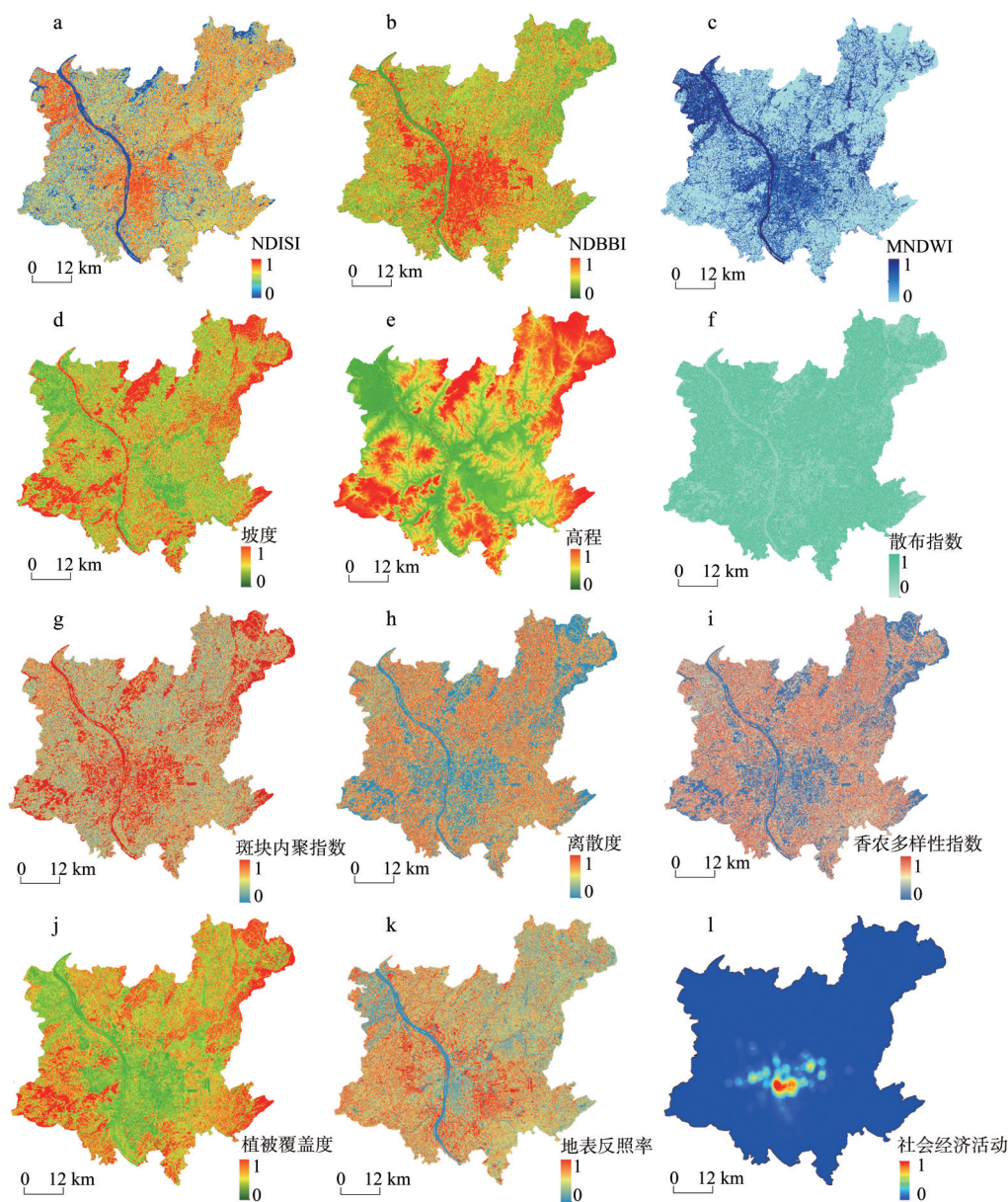


图6 长沙市城市热环境影响因素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of urban thermal environmental impact factors in Changsha city

格局指数：离散度、香农多样性指数、散布指数及斑块内聚指数空间分布与研究区土地利用类型存在相关性，反映了研究区城市景观的集聚度与破碎度；④ 城市建设强度：归一化不透水面指数、归一化差值裸地与建筑指数、地表反照率的空间格局与城市下垫面类型有关，高值在建筑密集区聚集；⑤ 社会经济活动：POI指数空间分布与城市建成区大体一致，与人口密集区、道路交通干线重合。

4.2.2 空间主成分分析(PCA) 在表7中，城市人居热环境各影响因素通过空间主成分分析，得出前3个主成分特征值大于1，这3个主成分可以反映城市人居热环境空间格局的组成。长沙市热环境格局受自然和社会因素影响主要包括这3个主因子。

表8显示了每个主成分包含原来12个变量的信息载荷情况。主成分所对应的系数越大, 包含原变量的成分越高, 由此可以具体分析各个主成分的组成。据表8, 影响长沙市中心城区热环境格局的因子为景观格局、城市建设强度、地形地貌3个主因子(图7)。

据图7可知, 第一主成分集中反映了景观格局对研究区城市人居热环境的影响, 长沙市中心城区景观类型以建设用地、耕地、林地和水域为主, 下垫面的性质及各景观类型的分布格局对城市热环境影响显著, 其中以绿地景观格局影响为主, 根据表8香农多样性指数和斑块内聚力指数得分情况可知, 香农多样性指数较大, 斑块内聚力指数较小, 说明绿地景观格局占景观类型的面积比例较少, 影响城市降温, 导致地表温度趋高。第二主成分可概括为城市建设活动产生的热量对热环境的影响, 包括建筑指数、不透水指数等, 空间分布与城市建成区大体一致。第三主成分是地形地貌中坡度和高程对热环境的影响, 长沙市地势中间低, 四周高, 城市发展空间受限, 加之盆地特殊的地形特征, 空气流动性较差, 不利于热量扩散, 对城市热环境影响较大。根据表8, 前3个主成分同指标间的线性关系为:

表 7 主成分的特征值和贡献率
Tab. 7 Characteristic value and contribution rate of principal components

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	贡献率(%)	累积贡献率(%)	特征值	方差百分比(%)	累积贡献率(%)
1	3.557	29.644	29.644	3.557	29.644	29.644
2	2.637	21.978	51.622	2.637	21.978	51.622
3	1.893	15.778	67.400	1.893	15.778	67.400
4	0.991	8.254	75.654			
5	0.786	6.554	82.208			
6	0.762	6.354	88.562			
7	0.514	4.286	92.848			
8	0.428	3.569	96.417			
9	0.259	2.159	98.575			
10	0.134	1.114	99.689			
11	0.030	0.246	99.935			
12	0.008	0.065	100.000			

表 8 主成分得分载荷矩阵
Tab. 8 Principal component scoring load matrix

影响因子	第1主成分	第2主成分	第3主成分
POI密度指数	0.085	0.207	-0.295
归一化水体指数	-0.506	-0.470	0.136
植被覆盖指数	0.395	-0.457	0.284
离散度	0.930	-0.175	-0.219
香农多样性	0.936	-0.188	-0.227
散布指数	0.511	0.054	-0.180
斑块内聚力指数	-0.918	0.193	0.004
归一化不透水指数	0.431	0.687	0.243
坡度	-0.206	-0.600	0.432
高程	0.086	-0.269	0.762
地表反照率	-0.144	0.817	-0.125
归一化差值裸地与建筑指数	0.192	0.699	-0.331

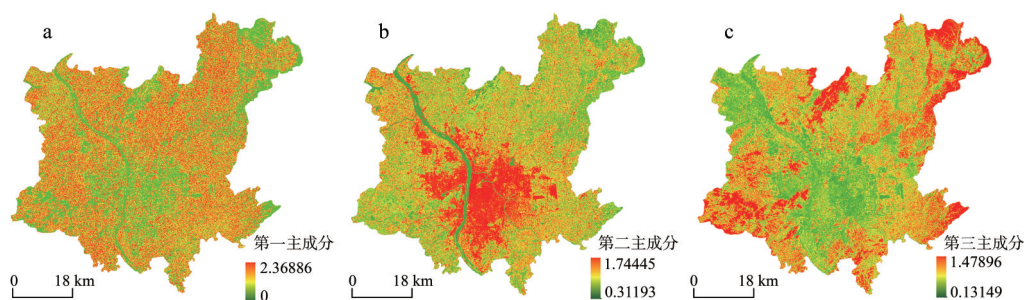


图7 前三个主成分的空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution patterns of the first three principal components

$$F_1 = 0.085x_1 - 0.506x_2 + 0.395x_3 + 0.930x_4 + 0.936x_5 + 0.511x_6 - 0.918x_7 + 0.431x_8 - 0.206x_9 + 0.086x_{10} - 0.144x_{11} + 0.192x_{12} \quad (15)$$

$$F_2 = 0.207x_1 - 0.470x_2 - 0.457x_3 - 0.175x_4 - 0.188x_5 + 0.054x_6 + 0.193x_7 + 0.687x_8 - 0.600x_9 + 0.269x_{10} + 0.817x_{11} + 0.699x_{12} \quad (16)$$

$$F_3 = -0.295x_1 + 0.136x_2 + 0.284x_3 - 0.219x_4 - 0.227x_5 - 0.180x_6 + 0.234x_7 + 0.243x_8 + 0.432x_9 + 0.762x_{10} - 0.125x_{11} - 0.331x_{12} \quad (17)$$

4.2.3 主成分模拟与地表温度的关系 为了进一步检验主成分因子对城市热环境空间格局的拟合效果,进行线性回归拟合分析。根据上述各个主导因子的得分,在ArcGIS 10.5中使用地图代数工具计算得出主成分模拟综合指数,并对随机获取的700个样本点进行数值提取,然后将各主成分模拟指数的样本点值与归一化地表温度值导入到SPSS 24.0中进行回归拟合分析。由表9的回归系数和检验结果可知,长沙市地表温度与上述自然和人文影响因素的回归方程拟合度较好,回归方程 F 值为957.765,前3个主成分显著性系数都小于1%,且方差膨胀因子(VIF)小于10,模型不存在多重共线,因此这3个主成分是影响城市人居热环境的重要因素。

表9 回归系数及检验结果

Tab. 9 Regression coefficient and test results

影响因子	未标准化系数		标准化系数 Beta	t	显著性	共线性统计	
	B	标准误差				容差	VIF
常量	0.361	0.010	—	35.175	0.000	—	—
第1主成分	0.116	0.007	0.327	15.442	0.000	0.625	1.601
第2主成分	0.012	0.008	0.031	1.471	0.000	0.644	1.553
第3主成分	-0.289	0.011	-0.640	-26.032	0.006	0.463	2.159

注: $R^2 = 0.805$; $F = 957.765$; 显著性系数小于1%。

为比较各主成分不同量纲指标间的作用程度,本文采用标准化回归模型:

$$S = 0.327F_1 + 0.031F_2 - 0.640F_3 \quad (18)$$

将上述主成分公式(15)~公式(17)代入公式(18),模型进一步转化为:

$$S = 0.223x_1 - 0.267x_2 - 0.068x_3 + 0.439x_4 + 0.446x_5 + 0.284x_6 - 0.444x_7 + 0.007x_8 - 0.362x_9 - 0.468x_{10} + 0.058x_{11} + 0.296x_{12} \quad (19)$$

由式(19),以上12个影响因子每变化1个单位,长沙市地温度将分别变化0.223、-0.267、-0.068、0.439、0.446、0.284、-0.444、0.007、-0.362、-0.468、0.058及0.296。据此分析,研究区人文因素加剧城市热岛效应,其中3个景观格局指数的正向影响较为突出,

贡献度分别为0.439、0.446和0.284, POI指数 x_1 、归一化不透水指数 x_8 、归一化差值裸地与建筑指数 x_{12} 、地表反照率指数 x_{11} 正向作用较小。在自然因素中, 高程 x_{10} 与坡度 x_9 贡献作用较大, 水体与地表植被贡献度之和明显高于高程和坡度, 对长沙市城市热岛效应起负向影响。

结合以上各因子作用程度, 以上人文和自然12个影响因子每变化1个单位, 将使得温度变化1.753及-1.460个单位, 在这12个影响因子的作用下整体升温0.293℃, 即人文因素对加剧热岛效应形成的影响程度要大于自然因素。在自然和人文因素的共同作用下, 根据温度变化单位, 将两者作用程度按比例变化, 可知, 当人文因素作用程度降至原来的80%, 自然因素增至原来的20%时, 温度下降显著。具体如表10所示。

表10 不同作用下的城市温度效应				
Tab. 10 Urban temperature effect under different actions				
人文因素		自然因素		温度
作用程度	变化比例(%)	作用程度	变化比例(%)	(℃)
1.754	100	-1.460	100	0.293
1.5786	90	-1.606	110	-0.0274
1.4032	80	-1.752	120	-0.3488

5 结论与讨论

5.1 结论

本文针对城市人居环境效应已有研究中数据来源较为单一、影响因素分析单一等特点, 以城市化快速发展的长沙市为研究对象, 应用多源遥感数据高精度模拟长沙市地表温度场, 结合土地利用类型数据、数字高程数据等多源空间数据, 综合利用遥感定量反演和空间主成分分析等方法, 快速准确地获取与城市热环境密切相关的自然和人文因素共12个影响因子, 在此基础上, 采用主成分分析的方法探讨热环境成因机理及驱动机制, 从而定量与定性相结合对长沙市人居环境效应进行综合分析, 为城市规划、改善人居环境质量以及夏季高温灾害管理和城市应急响应提供决策支持。

(1) 2000—2016年长沙市热岛呈现出中心向外辐射, 热岛面积共增加547 km²、地表最高温度差达到10.1℃, 城市热岛区域主要集中在城市已建区, 如工商业集中和人口密集的区域, 并呈现出地表温度从城市中心向郊区逐渐降低的热岛空间分布格局, 出现多个高温中心点如五一广场商圈、长沙火车站、长沙县星沙经济技术开发区、望城工业区、岳麓工业集中区, 天心工业区等。

(2) 2000—2016年热岛空间发展主轴保持在东北—西南方向, 其中2000—2009年热岛重心向西南偏移了2.7 km, 偏转角度为54.9°, 由于该时期岳麓高新区、北部金霞开发区高速发展, 导致该地区地表温度升高; 2009—2016年热岛重心向东北偏移了4.8 km, 偏转角度60.9°, 主要是星沙开发区的发展, 改变了热环境的空间格局。整体上, 长沙市热环境空间格局的变化和城市的建设强度的变化存在一定的关联。

(3) 人文因素加剧了当前长沙市城市热岛效应形成, 其对热岛效应的贡献度大于自然因素的贡献度, 两者相互作用下研究区地表温度将升温0.293个单位。人文因素中其中3个景观格局指数的正向影响较为突出, 贡献度分别为0.439、0.446和0.284, POI指数、归一化不透水面指数、归一化差值裸地与建筑指数地表反照率指数正向作用较小。而自然因素对长沙市热岛效应的发展起负向作用, 其中高程、坡度的抑制作用显著, 水体与地表植被抑制作用之和明显高于高程和坡度的抑制作用。

5.2 讨论与建议

(1) 城市化导致地表覆盖类型及土地利用类型变化, 由此引起城市大气动力学特征

以及下垫面热交换性质的变化,进而影响热岛效应的形成与发展。因此,适当控制城市建设强度,合理控制建设用地增长规模,增加非建设用地面积,推进集约、绿色、低碳的土地利用方式等^[6],有助于缓解城市热环境效应。根据以上城市热岛成因机制的研究结果,改善城市热环境,应加强保护和维护公园、绿地、河道、湿地等自然生态环境系统,适量增加水体、绿地等生态用地面积;通过将绿地均匀化、分散化、边界不规则化、集中化来提高绿地的降温效果^[22];优化城市空间结构与形态,凸显长沙市“山水洲城”布局特点,控制城区建筑物高密度发展;基于盆地地形特点,合理规划城市建筑布局与排列组合,合理调控能耗布局,积极引导城市通风廊道与海绵城市建设等。

(2)城市是一个由基础设施、人类活动和社会联系组成的复杂动态系统^[24]。城市热环境效应是人为活动和局地气候等多因素共同作用的结果,基于多源数据研究城市人居环境效应有助于反映上述影响因子对热岛空间格局及演变规律,分析与探索热岛效应的成因与机理。本文有助于深化对城市人居环境效应的时空演变及驱动机制的认知,揭示人文和自然影响因素间相关关系和相关程度。因受资料、数据获取等方面的影响,后续研究还需进一步深入,如增加工业用地密度、建筑密度、容积率等影响因子的分析,城市热环境格局演变趋势的预测分析,城市热岛预警机制的确立,以及结合地面实地观测数据与遥感影像数据建立拟合模型提高地表温度反演精度,降低城市热岛的调控技术和策略等,以使城市人居环境效应影响因素及形成机理的研究更加全面。

参考文献(References)

- [1] Shen Qingji, Zhang Xin, Zhou Yuantian. Urban ecological crisis: Characteristics, factors and analysis. *Urban Planning Forum*, 2012(6): 23-33. [沈清基, 张鑫, 周原田. 城市危机: 特征、影响变量及表现剖析: 基于生态环境危机的视角. *城市规划学刊*, 2012(6): 23-33.]
- [2] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, 2008, 29(1): 41-55.
- [3] White M A, Nemani R R, Thornton P E, et al. Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems*, 2002, 5(3): 260-273.
- [4] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [5] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 2001, 70(3): 295-310.
- [6] Peng Baofa, Shi Yishao, Wang Hefeng. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1461-1471. [彭保发, 石忆邵, 王贺封. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律: 以上海市为例. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.]
- [7] Bokaie M, Zarkesh M K, Arasteh P D, et al. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 23: 94-104.
- [8] Baldinelli G, Bonafoni S. Analysis of albedo influence on surface urban heat island by space borne detection and airborne thermography. *New Trends in Image Analysis and Processing-ICIAP 2015 Workshops*, 2015.
- [9] Grover A, Singh R B. Analysis of urban heat island (UHI) in relation to normalized difference vegetation index (NDVI): A comparative study of delhi and mumbai. *Environments*, 2015, 2: 125-138.
- [10] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 375-386.
- [11] Zhou Liang. Study on landscape pattern evolution and heat island effect in the process of urbanization in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. [周亮. 北京市城市化过程中的景观格局演变及热岛效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.]
- [12] Zhang Xiaofei, Wang Yanglin, Wu Jiansheng, et al. Study on land surface temperature vegetation cover relationship in urban region: A case in Shenzhen city. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 369-377. [张小飞, 王仰麟, 吴建生, 等. 城市地域地表温度—植被覆盖定量关系分析: 以深圳市为例. *地理研究*, 2006, 25(3): 369-377.]

- [13] Xiao Fan. Study on the change of Changsha heat island effect based on multi-index [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016. [肖凡. 基于多指数的长沙市热岛效应变化研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.]
- [14] Zhou Guohua, He Yanhua. Characteristics and influencing factors of urban land expansion in Changsha. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1171-1180. [周国华, 贺艳华. 长沙城市土地扩张特征及影响因素. *地理学报*, 2006, 61(11): 1171-1180.]
- [15] Fu Shuai, Jiang Yong, Zhang Xiaquan, et al. Statistics analysis of heat wave events in Changsha in recent 64 years. *Meteorological Science and Technology*, 2016, 44(6): 991-997. [傅帅, 蒋勇, 张小泉, 等. 近64年长沙市高温热浪事件统计分析. *气象科技*, 2016, 44(6): 991-997.]
- [16] Jin Diandian, Gong Zhaoning. Algorithms comparison of land surface temperature retrieval from landsat series data: A case study in Qiqihar, China. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(5): 830-841. [金点点, 宫兆宁. 基于Landsat系列数据地表温度反演算法对比分析: 以齐齐哈尔市辖区为例. *遥感技术与应用*, 2018, 33(5): 830-841.]
- [17] Xu Hanqiu. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 1150-1153. [徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(11): 1150-1153.]
- [18] Zheng Xinqi, Fu Meiju. *Spatial Analysis Technique of Landscape Pattern and Its Application*. Beijing: Science Press, 2010. [郑新奇, 付梅巨. 景观格局空间分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [19] Xue Bing, Li Jingzhong, Xiao xiao, et al. Overview of man-land relationship research based on POI data: Theory, method and application. *Geography and Geo-information Science*, 2019, 35(6): 51-60. [薛冰, 李京忠, 肖晓, 等. 基于兴趣点(POI)大数据的人地关系研究综述: 理论、方法与应用. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(6): 51-60.]
- [20] Lu Shouyi. *Geographic Information System*. Beijing: Higher Education Press, 2004. [陆守一. 地理信息系统. 北京: 高等教育出版社, 2004.]
- [21] Feng Xiaogang, Sa Liwei, Shi Hui. Study on the urban heat island effect based on the PCA of multi-purpose. *Journal of Xi'an Architecture and Technology University*, 2012, 44(4): 507-511. [冯晓刚, 撒利伟, 石辉. 基于多元目标的主成分分析的热岛效应成因研究: 以西安市为例. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 44(4): 507-511.]
- [22] Pan Jinghu, Li Baojuan. Simulation and analysis of human dimensions of urban thermal environment in valley-city: A case study of Lanzhou City. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 662-670. [潘竞虎, 李宝娟. 基于空间PCA的兰州市热环境人文驱动因素分析. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 662-670.]
- [23] Zhao Lu, Zhao Zuoquan. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8): 979-986. [赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究. *地理科学*, 2014, 34(8): 979-986.]
- [24] Jiao Liming, Li Zhehui, Xu Gang, et al. The characteristics and patterns of spatially aggregated elements in urban areas of Wuhan. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1432-1443. [焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式. *地理学报*, 2017, 72(8): 1432-1443.]

Thermal environment effects of urban human settlements and influencing factors based on multi-source data: A case study of Changsha city

XIONG Ying^{1,2,3}, ZHANG Fang^{1,2}

(1. College of Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. Hunan Key Lab of Land & Resource Evaluation & Utilization, Changsha 410007, China;

3. Research Center of Resource Environment and Urban Planning, Changsha 410114, China)

Abstract: In view of the lack of comprehensive evaluation and analysis from the combination of natural and human multi-dimensional factors, the urban surface temperature patterns of Changsha in 2000, 2009 and 2016 are retrieved based on multi-source spatial data (Landsat 5, Landsat 8 satellite image data, POI spatial big data, digital elevation model, etc.), and 12 natural and human factors closely related to urban thermal environment are quickly obtained. The standard deviation ellipse method and spatial principal component analysis (PCA) method are used to analyze the effect of urban human residential thermal environment and the linkage of its influencing factors. The results show that: (1) During the 16 years from 2000 to 2016, the heat island area increased by 547 km², and the maximum surface temperature difference reached 10.1 °C. The spatial distribution of urban heat island was mainly concentrated in urban built-up areas, such as industrial and commercial areas and densely populated urban centers. The spatial distribution pattern of heat island is gradually decreasing from the urban center to the suburbs. There were many high-temperature centers, such as Wuyi square business circle, Xingsha economic and technological development zone in Changsha County, Wangcheng industrial zone, Yuelu industrial concentration zone, and Tianxin industrial zone. (2) From 2000 to 2016, the main axis of spatial development of heat island maintained in the northeast-southwest direction. From 2000 to 2009, the center of gravity of heat island shifted 2.7 km to the southwest, and the deflection angle was 54.9°; the center of gravity of heat island shifted to the northeast by 4.8 km, and the deflection angle was 60.9°. On the whole, the change of spatial pattern of thermal environment in Changsha was related to the change of urban construction intensity. (3) Through the principal component analysis method, it was concluded that the factors affecting the urban thermal environment pattern of Changsha were landscape pattern, urban construction intensity and landform. (4) The promotion effect of human factors on the formation of heat island effect was obviously greater than that of natural factors. Under the comprehensive effect, the temperature would rise by 0.293 units. There are many factors influencing the urban human settlements thermal environment. Multi-source data could help to reveal the spatial pattern and evolution law of urban thermal environment, deepen the understanding of the causes of urban heat island effect, and clarify the correlation and degree between human and natural factors, so as to provide scientific supports for the improvement of the quality of urban human settlements.

Keywords: thermal environment; natural-human factor; multi-source data; spatial principal component analysis; Changsha city