

基于自然区块的城市热环境空间分异性研究

杨智威^{1,2}, 陈颖彪^{1,2*}, 吴志峰^{1,2}, 千庆兰¹, 黄清瑶¹

(1. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 2. 广东省地理国情监测与综合分析工程技术研究中心, 广州 510006)

摘要:通过有效解决建设用地子类划分,实现定量评价城市热环境的空间分异性,对改善城市生态环境、实现城市化的健康发展具有重要的意义和科学价值。论文以广州市为例,参考自然城市概念,基于5类兴趣点(Point Of Interest, POI)开放数据,结合城市建设用地分类标准,构建5类自然区块;在Landsat 8遥感影像地表温度反演的基础上,计算分析自然区块下地表热场等级分布格局、热场平均值及热环境足迹范围,以对城市热环境空间分异性进行评价。研究表明:①自然区块的构建,能准确地反映各类POI数据空间分布情况,能够实现对建设用地子类型的划分;②5类自然区块内部地表热场等级均以高温像元为主,但等级分布具有显著差异。同时,自然区块的热场平均值由高到低的排序为:工业区块>商业服务业区块>交通与道路区块>居住区块>公共管理与服务区块;③自然区块形成的高温集聚区,存在热量扩散现象,实际影响范围大于其物理边界,5类自然区块的热环境足迹范围具有分异性。热环境足迹影响范围由大到小排序为:工业区块>商业服务业区块>居住区块>道路与交通区块>公共管理与服务区块。研究结果可为微观尺度上分析城市热环境、改善城市生态环境、实现城市化的健康发展提供科学依据。

关键词:POI; 自然区块; 热环境; 空间分异; 广州

随着城市化进程的加快,城市人口迅速增加,建设用地面积快速扩张。城市下垫面的改变,使得城市内部气候发生显著变化,城市热岛效应日益严峻(Xiong et al, 2012; Mohan et al, 2015; 李元征等, 2016; 杨智威等, 2018)。城市热环境的变化已经受到广泛的关注,同时城市地表覆盖是一个复杂的系统,包含建设用地、林地、水体、耕地等类型。因此,研究各类型土地利用类型及其变化与城市热环境的关系一直是国内外学者关注的热点。

彭文甫等(2011)利用遥感技术提取成都市土地利用数据,并划分为林地、水田、耕地等7类,探讨不同用地类型与城市热环境之间的关系。Bokai等(2016)对德黑兰6类土地利用/土地覆盖的平均温度进行研究,阐述了地表覆盖与地表温度的相关性。Estoque等(2017)探究了东南亚大都会城市的地表

温度与不透水层和绿地丰富度在空间上的关系。陈世莉等(2017)将WRF气象数值模式应用于城市热岛效应强度变化的分析中,研究土地利用类型的变化对城市热岛效应的影响。郭冠华等(2015)探究非渗透地表与城市地表温度的关系方程,揭示了城市热环境季节变化规律。同时已有学者指出,建设用地等不透水层的扩张是加剧城市热岛效应的主要原因(Wang et al, 2016),与城市地表温度有显著的正相关性(Keeratikasikorn et al, 2018)。但建设用地是一个包含多种子类用地类型的集合,如居住用地、商业服务设施用地、工业用地、道路与交通设施用地等。深入研究各建设用地的子类型与地表温度的关系,有助于了解城市内部小尺度下的热环境空间分异情况。但相关数据的难获取性阻碍了进一步研究。

收稿日期:2019-02-18; 修订日期:2019-03-11。

基金项目:广东省自然科学基金项目(2016A030313551);国家自然科学基金项目(41671430, 41771127)。[Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province, No. 2016A030313551; National Natural Science Foundation of China, No. 41671430 and 41771127.]

第一作者简介:杨智威(1996—),男,福建三明人,硕士生,主要研究方向为城市生态与遥感应用。E-mail: yangzw9615@163.com

*通信作者简介:陈颖彪(1969—),男,吉林长春人,博士,教授,主要研究方向为GIS和RS应用技术。

E-mail: gzhuchenyb@126.com

引用格式:杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 2019. 基于自然区块的城市热环境空间分异性研究[J]. 地理科学进展, 38(12): 1944-1956. [Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, et al. 2019. Spatial variability of urban thermal environment based on natural blocks. Progress in Geography, 38(12): 1944-1956.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.12.010

而大数据的出现,为本文的研究带来了新的思路和方法,它具有大量化、多样化和快速化的特点(许泽宁等, 2016; 关雪峰等, 2018)。其中,兴趣点(Point Of Interest, POI)作为全新的地理空间大数据,具有数据量大、覆盖面广、识别精度高,以及易获取等特点(浩飞龙等, 2018)。此外,POI数据具有独特的地理空间位置(坐标点信息),能够细致、真实地反映人类社会经济活动(廖伟华等, 2017; 徐智邦等, 2018),在城市空间分析中具有重要意义(陈蔚珊等, 2016),为微观尺度下的城市研究提供可能。本文使用POI数据为基础,并参考自然城市(Natural City)的概念,提取各类POI数据形成的自然城市区域(本文称为自然区块),研究城市热环境的空间分异性。自然城市是指根据有意义的截断值,从海量地理信息中提取的自然衍生区域,或地表上的人类活动区域(Jiang, 2013)。与此同时,分形结构是自然城市构成的基础,它不同于传统的欧几里得几何,是一个本质上表示极少数最大、大多数较小的复杂结构(Jiang et al, 2018)。同时,基于自下而上产生的自然城市,在研究城市底层结构中更加优异(Jiang, 2015)。目前已有学者基于道路节点(Jiang et al, 2011)、街道街区(Jiang et al, 2012)、夜间灯光影像像元值(Wu et al, 2018)等提取出自自然城市,取得较为理想的效果。

本文以广州市为研究区域,基于Landsat 8遥感影像反演城市地表温度数据;以POI数据为基础,参考自然城市概念,结合城市建设用地分类标准,构建由各类型POI数据形成的5类自然区块;同时建立热环境足迹表征模型,探究各类自然区块的热环境足迹影响范围;以实现广州市热环境空间分异情况的定量评价。基于自然区块的城市热环境空间分异评价的研究,为解决建设用地子类划分问题提供一个新方案,为微观尺度上分析城市热环境提供可能,对改善城市生态环境、实现城市化的健康发展具有重要的意义和科学价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文选取广州市辖11区作为研究区,区域面积达7434.4 km²。广州位于中国华南地区,珠江3大支流交汇处,是广东省经济、教育、政治和文化中心;整体属亚热带季风气候,终年温暖湿润,年平均

气温20~22℃。至2017年,广州市常住人口达1449.84万人,城镇化率达86.14%,实现地区生产总值21503.15亿元;城市化水平高,人口高度集中,交通路网密集,城市地表引起的小气候变化在这一区域产生了明显的高温集聚现象。同时,作为中国经济最发达的城市之一,近年来广州内部基于位置信息的空间地理数据(如POI数据)不断地丰富和完善。

1.2 数据来源

本文使用Landsat 8遥感影像数据(卫星轨道行列号:122-044),对广州地表温度进行反演。依据POI数据的获取时间,以及综合影像质量选择2017年10月23日的影像,卫星过境时间为北京时间10:52左右。

本文所用的POI数据获取时间为2017年11月,基于百度地图数据开放平台获取,共收集广州市11区范围内POI数据约137.9万条。该数据集共有汽车服务、餐饮服务、购物服务、生活服务、公司企业、工厂、公共设施等18大类112子类的数据类型。根据国家建设用地分类标准(编号:GB 50137-2011),本文将POI数据进行清洗分类,聚合为5大类,其中商业服务业设施POI占大多数,其次是公共管理与公共服务设施POI。并通过手动随机抽取检查的方式,确保POI数据的质量。最终获取居住设施POI数据48735条(商务住宅、住宿服务),工业设施POI数据13395条(工厂),商业服务业设施POI数据985056条(汽车服务、汽车销售、摩托车服务、餐饮服务、购物服务、生活服务、公司企业),道路与交通设施POI数据57182条(交通设施服务、道路附属设施),以及公共管理与服务设施POI数据116649条(公共设施、政府机构及社会团体、科教文化服务、体育休闲服务、医疗保健服务、风景名胜)。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度反演

基于遥感影像获取地表温度,即利用星载或机载热红外传感器,记录地物热红外信息,反演地表温度的过程。Landsat 8卫星由美国国家航空航天局于2013年发射升空,携带有单独的热红外传感器TIRS (Thermal Infrared Sensor)。Landsat 8的第10、第11两个波段为热红外波段。但由于第11波段存在较大的定标不确定性,美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS),不建议使用基于双波段的劈窗算法,建议采用基于第10波段

的单波段算法进行地表温度的反演(Barsi et al, 2014)。覃志豪等(2001)研究表明,单窗算法具有较高的地表温度反演精度,能够真实反映区域地表温度差异情况。同时,相关研究表明,单窗算法应用在广州区域具有一定的可行性(钱乐祥等, 2005; 陈康林等, 2016)。该方法的计算公式如下(覃志豪等, 2001; Wang et al, 2015; 张棋斐等, 2018):

$$T_s = \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_i - DT_a\} / C \quad (1)$$

其中:

$$C = \tau\varepsilon \quad (2)$$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau] \quad (3)$$

$$T_i = K_2 / \ln(1 + K_1 / L_\lambda) \quad (4)$$

$$T_a = 16.0110 + 0.9262T_0 \quad (5)$$

$$L_\lambda = \text{gain} \cdot \text{DN} + \text{offset} \quad (6)$$

式中: T_s 表示反演出的地表温度; T_0 为卫星过境时地面气温; a 和 b 为 2 个变量, 温度变化范围为 0~70 °C 时, $a = -62.735657$, $b = 0.434036$; C 和 D 为变量参数, 由地表比辐射率 ε 和大气透射率 τ 推导可得, 其中 ε 使用归一化植被指数获取(钱乐祥等, 2005), τ 基于大气水分含量计算可得(覃志豪等, 2003); T_i 表示像元的辐射亮温, K_1 和 K_2 为定标常数, 对于 TIRS 热红外传感器, K_1 、 K_2 分别为 774.89 和 1321.08; T_a 表示大气平均作用温度, 采用覃志豪等(2003)提出的热带地区平均大气估算公式计算得到; L_λ 表示辐射强度值, gain 和 offset 分别表示增益值和偏移量, 可由遥感影像头文件获取, DN 为热红外波段影像像元灰度值。

1.3.2 地表热场等级划分

相较于等间距法, 均值-标准差法在城市热环境空间分布以及细节刻画上具有更优异的表现(陈松林等, 2009)。该方法利用地表平均温度与不同倍数标准差的相互组合, 对地表热场的等级进行划分。具体划分方法见表 1。根据温度由低到高顺序, 将地表热场分类结果依次命名为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级、VI 级以及 VII 级。同时, 为定量表示地表热场等级的相对强弱, 对 7 个等级由低到高分别赋值 1 至 7, 本文称之为地表热场值。基于地表热场值, 能够实现对区域内部精细尺度的地表热环境相对强弱的定量判断, 而地表热场值的平均值(热场平均值)能够实现定量评估区域整体情况。

1.3.3 自然区块推导

本文的研究基于各类型 POI 数据地理位置集聚的斑块, 称为自然区块。参考“自然城市”的提取

方法(Jiang et al, 2015; Miao et al, 2015; Long et al, 2018), 对广州市 5 种类型 POI 数据进行自然区块的推导。自然区块的推导过程, 共包括以下 4 个步骤:

① 基于 POI 数据建立一个庞大的不规则三角网(TIN); ② 将 TIN 数据转化为线段数据; ③ 根据首/尾断点法, 将长度小于平均值的线段(短边)进行提取; ④ 将提取出的短边进行分解, 形成全新的多边形结构, 成为一个独立的自然区块。推导过程如图 1 所示。

TIN 数据是一种根据区域内有限点集数划分为彼此相连的三角面的系统, 三角面的大小和形状取

表 1 均值-标准差法划分地表热场等级的方法

Tab.1 Usage of mean-standard deviation method to divide land surface heat fields

地表热场等级	划分方法
I 级	$T < A - 2.5SD$
II 级	$A - 2.5SD \leq T \leq A - 1.5SD$
III 级	$A - 1.5SD < T \leq A - 0.5SD$
IV 级	$A - 0.5SD < T \leq A + 0.5SD$
V 级	$A + 0.5SD < T \leq A + 1.5SD$
VI 级	$A + 1.5SD < T \leq A + 2.5SD$
VII 级	$T > A + 2.5SD$

注: T 表示地表温度反演值, A 为研究区地表温度平均值, SD 为地表温度标准差。

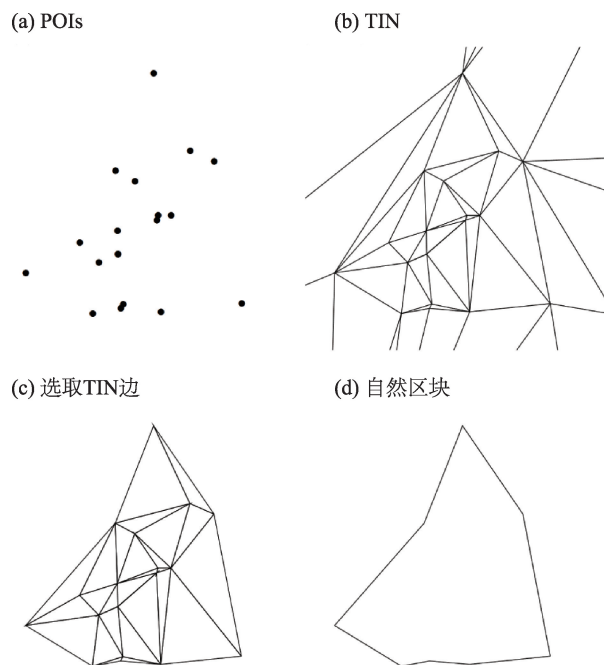


图 1 POI 推导自然区块的 4 个步骤

Fig.1 The four procedures for deriving natural blocks from point of interest (POI)

决于点的位置与密度。首/尾断点法是由 Jiang 等 (2013) 提出的一种全新分类方法, 该方法可应用于遵循重尾分布的数据。重尾分布是偏向右的统计分布, 例如幂律分布、对数正态分布、指数分布。首/尾断点法具体描述是, 对于一个从大到小排序的数据集而言, 它的平均值将整个数据集分成 2 个部分: 大于平均值的数据作为头部, 占整个数据集的少数; 而小于平均值的数据作为尾部, 占据绝大部分 (Jiang et al, 2018)。

1.3.4 热环境足迹表征

在建设用地区域形成的高温区或城市热岛区, 实际影响范围往往超过其物理覆盖边界 (Zhou et al, 2015)。Zhou 等 (2015) 最早提出城市热岛效应足迹的概念, 它被定义为从城市建成区到乡村或城市郊区的梯度上, 城市热岛效应显著的连续分布区域。本文以城市热岛足迹概念为基础, 构建热环境足迹表征模型, 以反映各类自然区块的热环境足迹影响范围。根据各类自然区块范围, 利用 ArcGIS 软件, 建立多环缓冲区 (环间距为 500 m, 环数为 10 环), 实现对自然区块上热环境梯度变化的定量分析。计算公式如下:

$$\Delta T_i = \frac{\sum_{k=1}^N T_{ik}}{N} - \frac{\sum_{k=1}^M T_{ak}}{M} \quad (7)$$

式中: ΔT_i 表示自然区块第 i 环缓冲区与整个研究区域的热场平均值之差; T_{ik} 表示自然区块第 i 环缓冲区的第 k 个像元地表热场等级; N 表示第 i 环缓冲区内的像元数总和; T_{ak} 为研究区域第 k 个像元地表热场等级; M 表示研究区域内的像元数总和。 ΔT_i 的大小可反映自然区块的热环境足迹影响范围: $\Delta T_i > 0$ 时, 缓冲区 i 范围内的热场平均值大于整个区域的平均值, 此时的缓冲区属于自然区块的热环境足迹影响范围; 反之, 当 $\Delta T_i < 0$ 时, 则认为自然区块的热环境足迹不足以影响这一区域。由于水体、林地、地形等会掩盖建设用地对地表温度的影响 (Zhou et al, 2015; 祝新明等, 2017), 在计算分析热环境足迹时, 已通过掩膜去除地表温度影像上的相关像元。

2 城市热环境空间分布与结构

本文基于 Landsat 8 TIRS 遥感影像, 对广州市 2017 年 10 月 23 日的地表温度进行反演。相关学者的研究表明, 地表温度与气温具有良好的一致性,

并且地表温度往往高于气温 1.3~2.1 °C (陈超等, 2013)。根据反演得到的地表温度数据, 计算得到整个区域的平均温度为 24.91 °C; 卫星过境时间 (北京时间 10:52 左右) 的实时平均气温值 (逐时记录, 选取 11:00 气温数据) 为 23.3 °C; 地表温度反演结果较为准确。同时, 利用均值-标准差法对地表热场等级进行划分 (图 2a); 以及去除水体、林地等干扰区域后的地表热场等级分布图 (图 2b)。

由图 2a 可以看出, 在原始地表热场等级的空间分布中, 大量低温像元 (地表热场等级 I~III) 在广州北部区域出现。剔除水体、林地等干扰像元后, 地表热场等级的数量在空间上的分布发生显著变化 (图 2b): 低温像元的数量减少明显; 高温像元 (地表热场等级 V~VII) 占据绝大部分区域, 在城市中心形成高温连片区。进一步对原始和剔除干扰像元的地表热场等级进行数量统计, 结果见表 2。原始影像中, 低温像元 (29.41%) 和高温像元 (29.94%) 所占比例相似, 都在 30% 左右; 而在剔除对地表温度干扰较大的水体、林地之后, 高温像元所占比例 (40.52%) 远大于低温像元比例 (12.50%)。

同时, 为定量表示地表热场等级的相对强弱, 将 7 个等级由低到高分别赋值 1~7。通过计算得知, 原始地表热场等级影像的热场平均值为 4.029, 而剔除水体、林地等干扰区域的地表热场等级影像的热场平均值达 4.386, 增幅显著。可见水体、林地等对城市热环境的掩盖效果明显, 剔除这一部分像元, 有助于后文更精确的研究。

3 自然区块下的城市热环境评价

3.1 不同 POI 类型推导下的自然区块

根据自然城市的概念, 对广州市 5 类 POI 数据进行自然区块的构建, 分别构建居住区块、工业区块、商业服务业区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块, 如图 3 所示。同时, 在 5 种类型 POI 数据的自然区块空间分布图下, 使用各类 POI 数据的核密度图作为底图, 以比较两者的空间分布联系。

各类自然区块在空间分布上与各类 POI 数据的核密度分布呈现高度耦合现象, 实现了对建设用地区类型的划分。居住区块、商业服务业区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块在空间上的分布具有趋同性。这 4 类 POI 数据在空间上联系

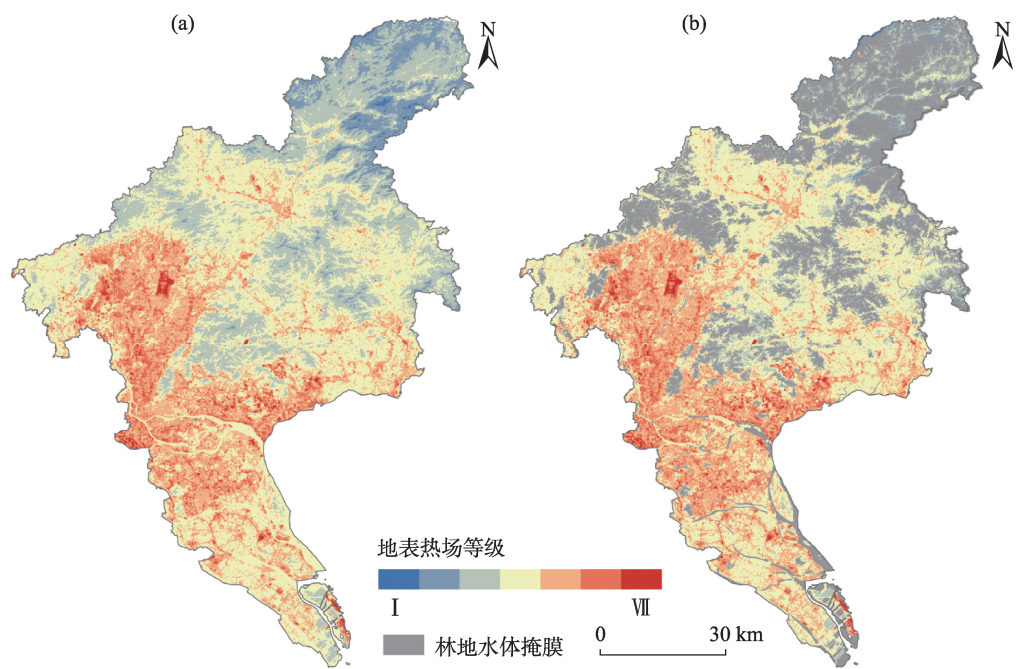


图2 广州地表热场等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land surface heat field levels in Guangzhou

紧密,集聚区不可避免地有所重叠,并在广州市中心城区以及各城镇区域中心形成大量自然区块。居住区块基于住宅小区等POI数据构建,在广州市各区皆有集中分布区域,形成中心连片分布、多核心小块分布的自然区块分布格局。作为居民生活的配套服务,商业服务业、道路与交通,以及公共管理与服务等POI数据形成的自然区块,与居住区块相互靠近或重叠。其中,商业服务业POI类型下的子类型众多,在空间上的分布更为扩散;而道路与交通,以及公共管理与服务POI数据在空间上的分布更为集中,分布范围更小。总体而言,4类自然区块的分布范围排序为:商业服务业区块>居住区块>道路与交通区块>公共管理与服务区块。而相较于其他4类区块,工业区块的分布范围少、分布面积

小。工业区块在海珠区、白云区、花都区分布较为明显,番禺区、增城区等的局部区域也有少量分布,而在天河区、黄埔区等第三产业较为发达区域,工业类型POI数据分布极少,没有形成空间集聚现象,工业区块在该区域较难成型。

3.2 自然区块下的地表热场等级格局

基于广州市地表温度反演结果划分后的地表热场等级数据,以及5类POI数据构建形成的自然区块,获取各类自然区块下地表热场等级分布格局(图4),并计算统计各类自然区块下的地表热场等级数据(表3)。

由图4可知,在5类自然区块内部,分布的地表热场等级皆以高温像元(V~Ⅶ级)为主,低温像元(I~Ⅲ级)分布不显著。但不同类型自然区块内部地表热场等级分布具有明显差异:中温像元(Ⅳ级)在居住区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块大量存在,在天河区西南部出现中温像元连片区;相比较而言,中温像元在商业服务业区块内分布较少,在工业区块内极少出现;工业区块内部的地表热场等级以高温像元为主,其中最高等级地表热场等级(Ⅶ级)覆盖范围广,在5类自然区块中最为明显;商业服务业区块的构建基础POI类型,是居民生活配套服务之一的商业服务业POI数据,空间分布范围与居住区块具有一定的耦合性,但其内

表2 地表热场等级统计

Tab.2 Statistics of land surface heat field levels

地表热场等级	原始数据		剔除干扰后数据	
	数量	比例/%	数量	比例/%
I 级	19004	0.23	4040	0.07
II 级	474344	5.79	66110	1.10
III 级	1917824	23.39	678199	11.33
IV 级	3332268	40.65	2812505	46.98
V 级	1822772	22.24	1797897	30.03
VI 级	549189	6.70	546626	9.13
VII 级	81771	1.00	81553	1.36

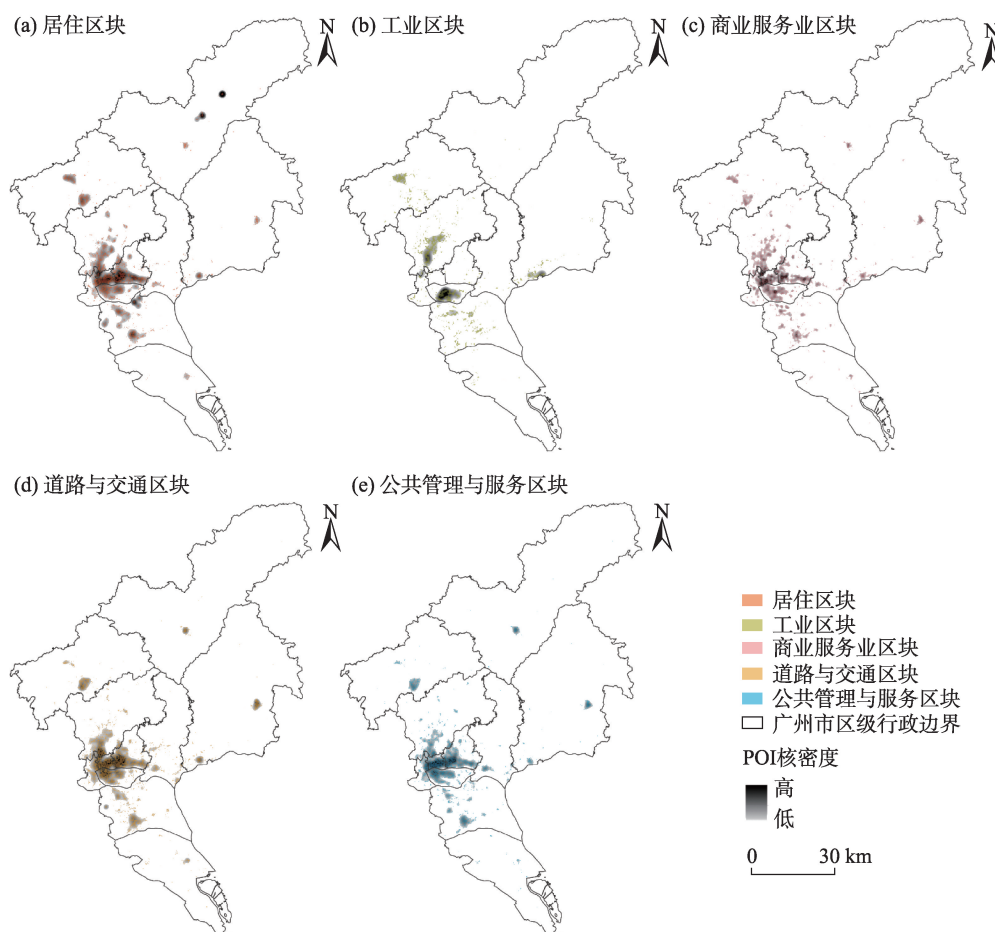


图3 5种类型自然区块的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of five types of natural blocks

部的地表热场等级与居住区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块有所区别,少量分布中温像元,大量高温像元在空间上广泛分布。

通过表3统计结果,深入定量分析5类自然区块内部的地表热场等级格局。5类自然区块的高温像元数量均占据所有地表热场等级数量的90%以上,低温像元数量不足1%。居住区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块的各地表热场等级的占比相似,其中IV级占比均超过5%,V级占比达60%以上,但最高等级占比皆不足1%。同时,上述3类自然区块在各地表热场等级数量上存在细微差别:中温像元在居住区块的占比略高于道路与交通区块以及公共管理与服务区块;而道路与交通区块的VI、VII级地表热场等级占比相较于居住区块以及公共管理与服务区块高出5%左右。根据具体数值的分析,发现各地表热场等级在商业服务业区块内部与居住区块、道路与交通区块、以及公共管理与服务区块内分布具有明显差异:中温像元在商业服

务业区块的占比较少,不足上述3类自然区块的一半;而VI、VII级地表热场等级在商业服务业区块的占比之和超过40%,远大于上述3类自然区块。工业区块在5类自然区块中,各地表热场等级占比最为不同:工业区块内高温像元占比最高,达99%以上,几乎不存在低温像元;地表热场等级VI、VII级占比分别达58.07%以及5.53%,2类等级占比之和高达60%以上,远超其余4类自然区块。进一步计算自然区块内部的热场平均值,发现5类自然区块内部的热场平均值均超过5,皆大于研究区域整体热场平均值4.386。其中工业区块热场平均值最高,达5.683;其次为商业服务业区块,达5.395;道路与交通区块及居住区块分别达5.242和5.184;公共管理与服务区块的热场平均值最低,仅为5.168。由此可知,城市建设用地的热场平均值远大于区域热场平均值,但不同建设用地子类区块的热场平均值具有明显差异。其中,在生产活动中会产生大量热量的工业区块,其热场平均值最为突出。5类自然区

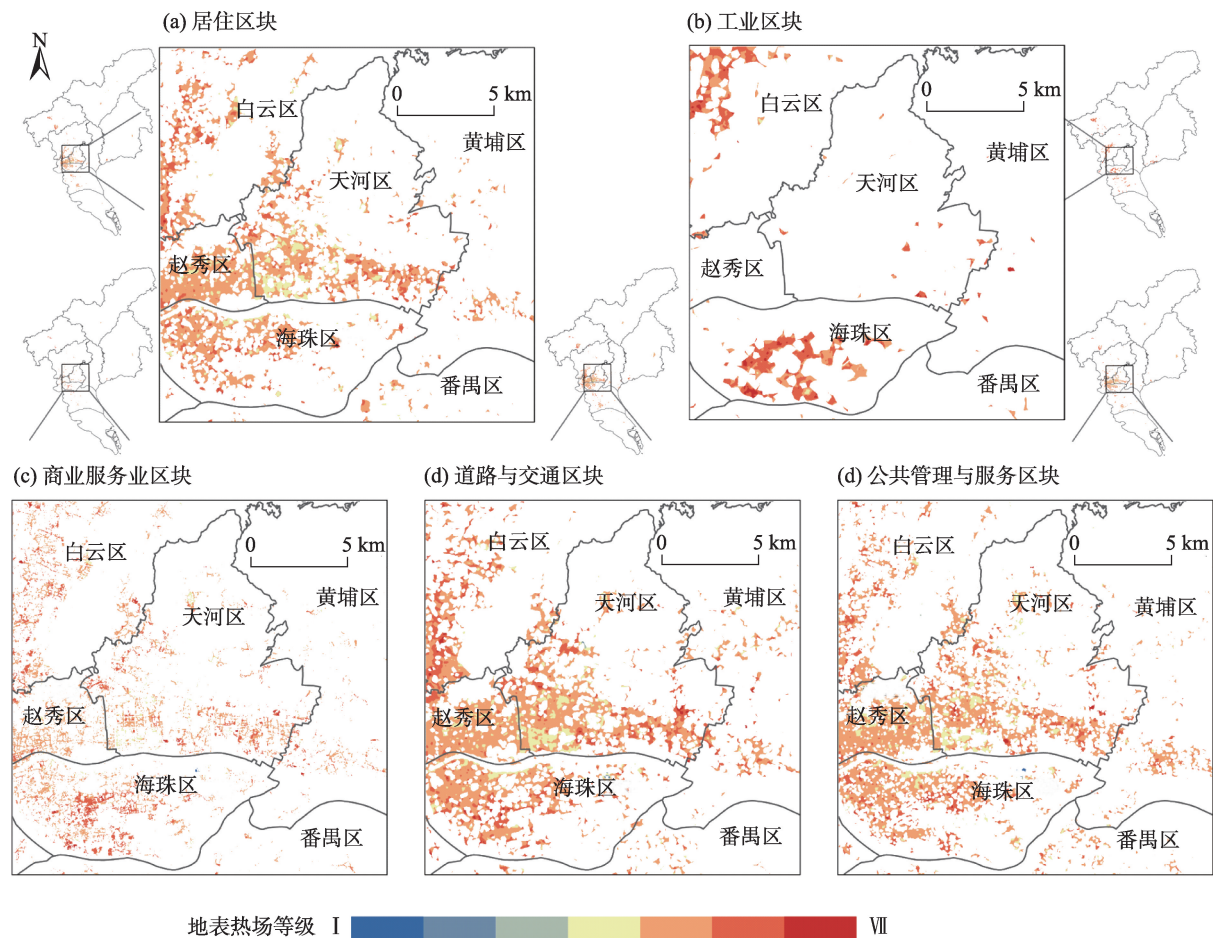


图4 自然区块下地表热场等级空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution of land surface heat field levels in natural blocks

表3 自然区块下地表热场等级数量统计

Tab.3 Statistics of the number of land surface heat field levels in natural blocks

地表热场 等级	居住区块		工业区块		商业服务业区块		道路与交通区块		公共管理与服务区块	
	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%
I 级	0	0	0	0	22	0.03	4	<0.01	39	0.03
II 级	0	0	0	0	1	<0.01	27	0.01	6	<0.01
III 级	22	0.01	0	0	13	0.02	96	0.05	59	0.04
IV 级	11546	7.77	430	0.43	2692	3.22	12477	6.66	11401	7.34
V 级	98683	66.43	35868	36.16	47015	56.20	118375	63.21	106785	68.78
VI 级	37744	25.41	57604	58.07	31997	38.25	54543	29.12	36144	23.28
VII 级	553	0.37	5300	5.53	1923	2.30	1755	0.94	816	0.53

块下的热场平均值由高到低的排序为:工业区块>商业服务业区块>道路与交通区块>居住区块>公共管理与服务区块。

4 自然区块下热环境足迹分异性

在建设用地区域存在热扩散现象,所形成的高

温集聚区,实际影响范围大于其物理边界。本文构建热环境足迹表征模型,分别以5类自然区块为中心,利用多环缓冲区,分析自然区块上热环境的实际影响范围,探究各类自然区块的热环境足迹分异性。各类自然区块的多环缓冲区环间距为500 m,共计10环,如图5所示。随着距离的增加,热量扩散强度不断减弱,计算自然区块的每一环缓冲区下

的热场平均值,通过与研究区域整体的热场平均值进行比较,分析各类自然区块的热环境足迹范围和

相对强弱,表4对各缓冲区内热场平均值进行统计,图6对各缓冲区与研究区域整体热场平均值的

表4 自然区块缓冲区下热场平均值和面积统计
Tab.4 Statistics of thermal field average value and area in the buffer zones under natural blocks

缓冲区 距离/m	热场平均值				
	居住 区块	工业 区块	商业服务业 区块	道路与 交通区块	公共管理 与服务区块
500	5.116	5.242	5.111	5.077	4.963
1000	4.758	4.886	4.788	4.654	4.486
1500	4.518	4.679	4.581	4.405	4.231
2000	4.369	4.558	4.465	4.268	4.087
2500	4.287	4.505	4.365	4.154	3.938
3000	4.193	4.428	4.254	4.061	3.822
3500	4.131	4.324	4.149	4.008	3.689
4000	4.053	4.261	4.091	3.937	3.611
4500	4.016	4.219	4.056	3.911	3.589
5000	3.983	4.192	4.051	3.834	3.487

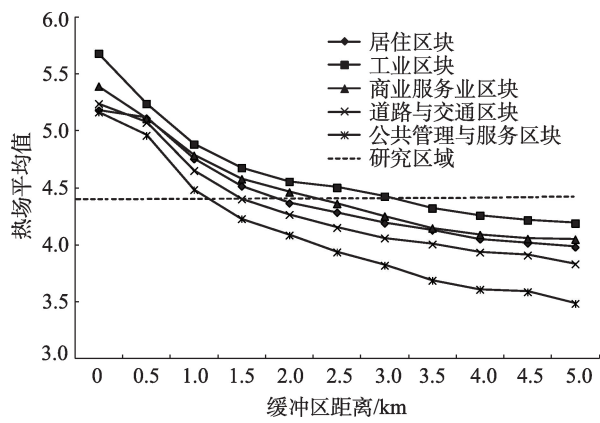


图6 热场平均值随缓冲区距离增加的变化趋势
Fig.6 Change of thermal field average value with the increase of buffer zone distance

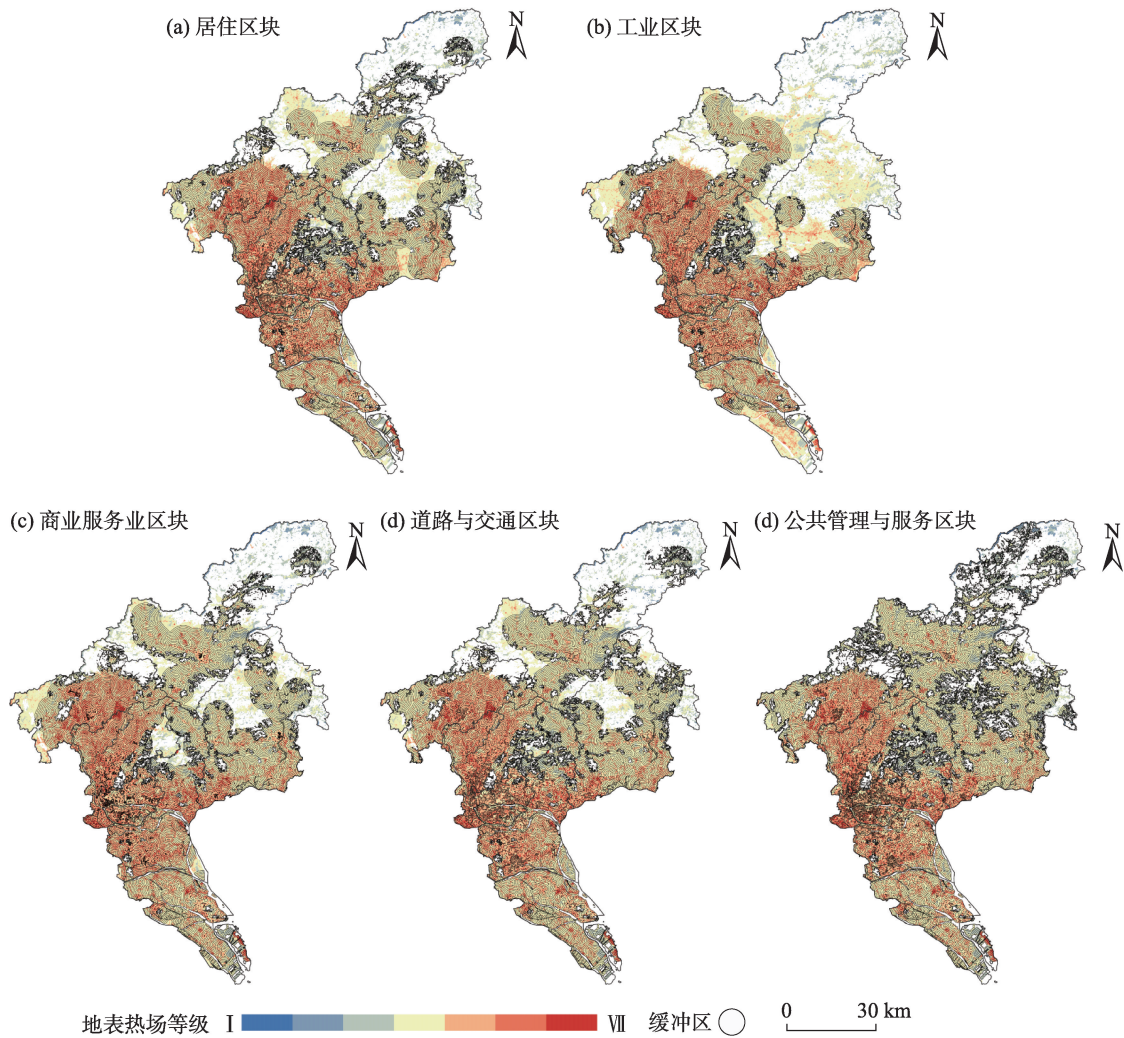


图5 自然区块的10个缓冲区划定
Fig.5 Delineation of 10 buffer zones in natural blocks

比较进行更为直观的展示。

整个研究区域的热场平均值为4.386,以此为基准,判断各类自然区块缓冲区的热场平均值强度。由表4以及图6可知,随着缓冲区与自然区块距离的增加,缓冲区内的热场平均值皆呈现不断递减的趋势。其中,居住区块下,随着缓冲区距离的增加,热场平均值的递减率经历了快速到平缓的过程;在第2环缓冲区范围内递减率达到7%的峰值。工业区块下,随着距离增加,热场平均值下降明显;在第1、2环缓冲区内的递减率均超过6%,其中第1环缓冲区内递减率高达7.76%,在5类自然区块中,下降最为显著。相较于其余自然区块,商业服务业区块下,热场平均值基本保持较为稳定的递减率,平均递减率为2.8%。随着缓冲区距离的递增,道路与交通区块、公共管理与服务区块下,前期热场平均值递减率处于高值,减少量较大,降幅显著,后期递减率趋向平稳。比较5类自然区块下热场平均值变化情况可以得知,自然区块内部产生的热环境,对周围区域具有明显影响,但影响范围有一定差异,5类自然区块的热环境足迹具有分异性。根据5类自然区块最后一环缓冲区,即第10环缓冲区类的热场平均值,可以初步判断工业区块的热环境足迹范围最广,而居住区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块第10环缓冲区热场平均值较低,其中公共管理与服务区块的热环境足迹范围可能最小。

当缓冲区内的热场平均值大于整个研究区域热场平均值时,我们认为此时的缓冲区依旧处于自然区块的热环境足迹影响范围之下。基于上述概念,根据表4中统计的各类自然区块的每一环缓冲区热场平均值,以及前文计算的研究区域热场平均值,结合图6,进一步分析各类自然区块的热环境足迹范围,比较其分异性。根据统计结果,居住区块、工业区块、商业服务业区块、道路与交通区块以及公共管理与服务区块下的缓冲区中,热场平均值大于整体研究区域热场平均值的环数,分别为3环、6环、4环、3环、2环。其中,工业区块的热环境足迹范围最广,在第6环缓冲区内的热场平均值为4.428,仍大于整个研究区域热场平均值4.386,热量向外扩散明显。居住区块、道路与交通区块的热环境足迹范围相似,2类自然区块下在第4环缓冲区内的热场平均值分别为4.369、4.268,均小于研究区域整体热场平均值;而在2类自然区块的热环境足迹影响范围内的第3环缓冲区,居住区块下的热场

平均值4.518,大于道路与交通区块下的热场平均值4.405。因此,居住区块的热环境足迹范围略大于道路与交通区块的热环境足迹范围。商业服务业区块的热环境足迹范围仅次于工业区块,在第4环缓冲区内的热场平均值较整体研究区域热场平均值大0.079,热环境足迹影响范围大致在第4和第5环缓冲区之间。公共管理与服务区块的热环境足迹范围只影响至第2环缓冲区,相较于其余4类自然区块,热量向外扩散效果不显著。总体而言,5类自然区块的热环境足迹影响范围由大到小的排序为:工业区块>商业服务业区块>居住区块>道路与交通区块>公共管理与服务区块。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于Landsat 8遥感影像反演广州市地表温度数据,以POI数据为基础,参考自然城市的概念,结合城市建设用地分类标准,构建5种类型自然区块,定量计算分析自然区块内部的地表热场等级格局、热场平均值,以及每类自然区块下热环境足迹范围,综合探究城市热环境的空间分异情况。

基于5类POI构建形成的自然区块,分布区域集中在非水体、非林地区域,在空间分布上与各类POI数据的核密度分布呈现高度耦合现象,较好地实现了对建设用地子类型的划分。

地表热场等级在自然区块内,以高温像元为主(90%以上),低温像元分布范围小(不足1%)。此外,5类自然区块内的热场平均值均大于研究区域整体热场平均值,皆超过5,由高到低的排序为:工业区块>商业服务业区块>交通与道路区块>居住区块>公共管理与服务区块。由此判断,城市建设用地的热场平均值远大于区域整体热场平均值,但不同建设用地子类区块的热场平均值具有明显差异。其中,在生产活动中会产生大量热量的工业区块,其热场平均值最为突出。

自然区块形成的高温集聚区,存在热量扩散现象,实际影响范围大于其物理边界。5类自然区块的热环境对外影响程度不同,热环境足迹范围具有分异性。总体而言,5类自然区块的热环境足迹影响范围由大到小的排序为:工业区块>商业服务业区块>居住区块>道路与交通区块>公共管理与服务区块。因此,在5类自然区块中,工业区块不仅自身

热场平均值最高,同时热量扩散效果显著,其对外围区域的热量辐射能力也最强。

5.2 讨论

建设用地等不透水面的扩张,是加剧城市热岛的主要原因(Wang et al, 2016)。建设用地与城市热环境相互关系的研究,已取得较多研究成果,但仍然存在待解决的问题。其中,建设用地是一个包含多种子类用地类型的集合,如居住用地、商业服务设施用地、工业用地、道路与交通设施用地等,但由于其数据的难获取性,建设用地子类型与城市热环境之间关系的研究十分有限。杨敏等(2018)通过解析北京市地表温度,发现工厂区是高温与亚高温分布密集区,且对城市热岛效应的影响远大于住宅区。王琳等(2018)以钢铁重工业区迁移为研究案例,比较工业区迁移前后城市热岛比例指数的变化情况,发现迁移后,区域的热岛效应显著降低,生态环境质量明显好转。Rao等(2018)以工业城河北武安作为研究区,以煤炭、钢铁厂区域形成的工业用地作为研究对象研究,结果表明,工业用地在导致高温和极高温地表温度中起主导作用。以上学者针对建设用地子类型,研究与城市热环境之间的关系,取得一定的成果,但以单个或多个工厂区域为研究对象,提取工业用地的方法无法有效应用在大范围区域。

本文研究发现,城市热环境在各类自然区块中存在空间分异现象。具体表现在自然区块内部的地表热场等级分布、热场平均值以及热环境足迹范围。其中,工业区块内部分布大量高温像元,热场平均值以及热环境足迹范围均大于其余4类自然区块。产生这一现象的原因,可能是因为在工业区块上产生了大量的能源消耗,热量向外排放明显且在空间小范围内集聚,使局部地表引起的小气候变化形成较为明显的热岛效应。同时,本文在研究过程中,发现作为居民生活的配套服务,商业服务业、道路与交通以及公共管理与服务等POI数据形成的自然区块,在空间上与居住区块虽然相互靠近或重叠。但是,这4类自然区块的热场平均值以及热环境足迹范围存在明显差异。其中,商业服务业区块内的热场平均值、热环境足迹影响范围均仅次于工业区块,这或许与人为热排放的影响密切相关。人为热排放广义上指人类对能源利用的不充分,从而导致排放至周围区域的废热。人为热排放数据细分成分包括人类自身新陈代谢、车辆排放、生活排放等(Butler, 2007)。同时人为热排放是城市热岛形

成的重要因子(刘嘉慧等, 2018),其强度与人类活动以及人口数量密切相关(孙然好等, 2017)。而商业服务业区块,基于购物、餐饮、企业等海量POI数据构建形成,因此大量人口在这一区域集中,商业活动频繁,车流量大,人类活动活跃,这些因素的作用增强了商业服务业区块内的人为热排放强度,进而影响区域热环境。

此外,文中使用基于POI数据构建的自然区块,能摆脱土地利用数据的束缚,实现对不同建设用地子类型内部热环境的探测。文中构建的热环境足迹表征模型,从区域内部热环境为出发点,探究热量向外扩散所影响的范围,为研究城市热环境空间分异性提供了一个新的视角。研究成果为解决建设用地子类划分问题提供一个新的方案,为微观尺度下研究城市热环境提供条件。

虽然本文对基于自然区域的城市热环境空间分异性评价取得一定成果,但还存在一些问题有待解决和深入研究。由于各类POI数据在空间上的紧密联系,自然区块的划分结果不可避免地存在空间重叠现象。此外,由于POI数据类型种类的局限,本文并未对所有建设用地子类型进行自然区块的构建,未来将通过使用更多类型的开放数据(如社交媒体位置数据、夜间灯光数据、遥感影像数据等)进行研究。同时,由于数据收集的缺失,并未涉及时间维度上的研究,在后续将加强这部分的研究。

参考文献(References)

- 陈超, 周广胜. 2013. 1961—2010年桂林气温和地温的变化特征 [J]. 生态学报, 33(7): 2043-2053. [Chen C, Zhou G S. 2013. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 33(7): 2043-2053.]
- 陈康林, 龚建周, 陈晓越, 等. 2016. 广州城市绿色空间与地表温度的格局关系研究 [J]. 生态环境学报, 25(5): 842-849. [Chen K L, Gong J Z, Chen X Y. 2016. The pattern relationship research of green space and surface temperature in Guangzhou City. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(5): 842-849.]
- 陈世莉, 李郇, 赖安琪, 等. 2017. 广佛同城化发展的热岛效应研究 [J]. 地理科学进展, 36(6): 720-731. [Chen S L, Li X, Lai A Q, et al. 2017. Guangzhou-Foshan urban integration and its urban heat island effects. *Progress in Geography*, 36(6): 720-731.]
- 陈松林, 王天星. 2009. 等间距法和均值-标准差法界定城市热岛的对比研究 [J]. 地球信息科学学报, 11(2): 145-150.

- [Chen S L, Wang T X. 2009. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island. *Journal of Geo-information Science*, 11(2): 145-150.]
- 陈蔚珊, 柳林, 梁育填. 2016. 基于POI数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析 [J]. *地理研究*, 35(4): 703-716. [Chen W S, Liu L, Liang Y T. 2016. Retail center recognition and spatial aggregating feature analysis of retail formats in Guangzhou based on POI data. *Geographical Research*, 35(4): 703-716.]
- 关雪峰, 曾宇媚. 2018. 时空大数据背景下并行数据处理分析挖掘的进展及趋势 [J]. *地理科学进展*, 37(10): 1314-1327. [Guan X F, Zeng Y M. 2018. Research progress and trends of parallel processing, analysis, and mining of big spatiotemporal data. *Progress in Geography*, 37(10): 1314-1327.]
- 郭冠华, 吴志峰, 刘晓南. 2015. 城市热环境季相变异及与非渗透地表的定量关系分析: 以广州市中心区为例 [J]. *生态环境学报*, 24(2): 270-277. [Guo G H, Wu Z F, Liu X N. 2015. Seasonal variations of urban heat environment and its relationship to impervious surface: A case study of Guangzhou core urban area. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(2): 270-277.]
- 浩飞龙, 王士君, 冯章献, 等. 2018. 基于POI数据的长春市商业空间格局及行业分布 [J]. *地理研究*, 37(2): 366-378. [Hao F L, Wang S J, Feng Z X, et al. 2018. Spatial pattern and its industrial distribution of commercial space in Changchun based on POI data. *Geographical Research*, 37(2): 366-378.]
- 李元征, 尹科, 周宏轩, 等. 2016. 基于遥感监测的城市热岛研究进展 [J]. *地理科学进展*, 35(9): 1062-1074. [Li Y Z, Yin K, Zhou H X, et al. 2016. Progress in urban heat island monitoring by remote sensing. *Progress in Geography*, 35(9): 1062-1074.]
- 廖伟华, 聂鑫. 2017. 基于大数据的城市服务业空间关联分析 [J]. *地理科学*, 37(9): 1310-1317. [Liao W H, Nie X. 2017. Spatial association analysis for urban service based on big data. *Scientia Geographica Sinica*, 37(9): 1310-1317.]
- 刘嘉慧, 赵小锋, 林剑艺. 2018. 基于地表能量平衡的厦门岛城市功能区人为热排放分析 [J]. *地球信息科学学报*, 20(7): 1026-1036. [Liu J H, Zhao X F, Lin J Y. 2018. Analysis of anthropogenic heat discharge of urban functional regions based on surface energy balance in Xiamen Island. *Journal of Geo-information Science*, 20(7): 1026-1036.]
- 彭文甫, 周介铭, 罗怀良, 等. 2011. 城市土地利用与地面热效应时空变化特征的关系: 以成都市为例 [J]. *自然资源学报*, 26(10): 1738-1749. [Peng W F, Zhou J M, Luo H L, et al. 2011. Relationship between urban land use and spatiotemporal change characteristics of surface heat effect: A case study of Chengdu City. *Journal of Natural Resources*, 26(10): 1738-1749.]
- 钱乐祥, 丁圣彦. 2005. 珠江三角洲土地覆盖变化对地表温度的影响 [J]. *地理学报*, 60(5): 761-770. [Qian L X, Ding S Y. 2005. Influence of land cover change on land surface temperature in Zhujiang Delta. *Acta Geographica Sinica*, 60(5): 761-770.]
- 覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua, 等. 2003. 单窗算法的大气参数估计方法 [J]. *国土资源遥感*, 15(2): 37-43. [Qin Z H, Li W J, Zhang M H, et al. 2003. Estimating of the essential atmospheric parameters of Mono-Window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6. *Remote Sensing for Land & Resources*, 15(2): 37-43.]
- 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon K, 等. 2001. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法 [J]. *地理学报*, 56(4): 456-466. [Qin Z H, Zhang M H, Arnon K, et al. 2001. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data. *Acta Geographica Sinica*, 56(4): 456-466.]
- 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 2017. 人为热排放对城市热环境的影响研究展望 [J]. *生态学报*, 37(12): 3991-3997. [Sun R H, Wang Y N, Chen T T. 2017. Impacts of anthropogenic heat emissions on urban thermal environment: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 37(12): 3991-3997.]
- 王琳, 徐涵秋, 李胜. 2018. 重钢重工业区迁移对区域生态的影响研究 [J]. *遥感技术与应用*, 33(3): 387-397. [Wang L, Xu H Q, Li S. 2018. Effects of relocation of Chongqing iron and steel group industrial area on regional ecological quality. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(3): 387-397.]
- 徐智邦, 周亮, 蓝婷, 等. 2018. 基于POI数据的巨型城市消防站空间优化: 以北京市五环内区域为例 [J]. *地理科学进展*, 37(4): 535-546. [Xu Z B, Zhou L, Lan T, et al. 2018. Spatial optimization of mega-city fire station distribution based on Point of Interest data: A case study within the 5th Ring Road in Beijing. *Progress in Geography*, 37(4): 535-546.]
- 许泽宁, 高晓路. 2016. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法 [J]. *地理学报*, 71(6): 928-939. [Xu Z N, Gao X L. 2016. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data. *Acta Geographica Sinica*, 71(6): 928-939.]
- 杨敏, 杨贵军, 王艳杰, 等. 2018. 北京城市热岛效应时空变化遥感分析 [J]. *国土资源遥感*, 30(3): 213-223. [Yang M, Yang G J, Wang Y J, et al. 2018. Remote sensing analysis of temporal-spatial variations of urban heat island effect over Beijing. *Remote Sensing for Land & Resources*, 30(3): 213-223.]

- 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 2018. 粤港澳大湾区建设用地的扩张与城市热岛扩张耦合态势研究 [J]. 地球信息科学学报, 20(11): 1592-1603. [Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, et al. 2018. The coupling between construction land expansion and urban heat island expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay. *Journal of Geo-information Science*, 20(11): 1592-1603.]
- 张棋斐, 文雅, 吴志峰, 等. 2018. 高密度建成区湖泊水体的热缓释效应及其季相差异: 以广州市中心城区为例 [J]. 生态环境学报, 27(7): 1323-1334. [Zhang Q F, Wen Y, Wu Z F, et al. 2018. Seasonal variations of the cooling effect of water landscape in high-density urban built-up area: A case study of the center urban district of Guangzhou. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(7): 1323-1334.]
- 祝新明, 王旭红, 周永芳, 等. 2017. 建成区扩张下的西安市热环境空间分异性 [J]. 生态学报, 36(12): 3574-3583. [Zhu X M, Wang X H, Zhou Y F, et al. Spatial variability of thermal environment in Xi'an under the build-up area expansion. *Chinese Journal of Ecology*, 36(12): 3574-3583.]
- Barsi J, Schott J, Hook S, et al. 2014. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. *Remote Sensing*, 6(11): 11607-11626.
- Bokaie M, Zarkesh M K, Arasteh P D, et al. 2016. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran [J]. *Sustainable Cities & Society*, 23: 94-104.
- Butler D. 2007. Energy efficiency: Super savers: Meters to manage the future [J]. *Nature*, 445: 586. doi: 10.1038/445586a.
- Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. 2017. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of South-east Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 577: 349-359.
- Jiang B. 2013. Head/tail breaks: A new classification scheme for data with a heavy-tailed distribution [J]. *Professional Geographer*, 65(3): 482-494.
- Jiang B. 2015. Head/tail breaks for visualization of city structure and dynamics [J]. *Cities*, 43(3): 69-77.
- Jiang B, Jia T. 2011. Zipf's law for all the natural cities in the United States: A geospatial perspective [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(8): 1269-1281.
- Jiang B, Liu X T. 2012. Scaling of geographic space from the perspective of city and field blocks and using volunteered geographic information [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(2): 215-229.
- Jiang B, Ma D. 2018. How complex is a fractal? Head/tail breaks and fractional hierarchy [J]. *Journal of Geovisualization & Spatial Analysis*, 2(1): 6. doi: 10.1007/s41651-017-0009-z.
- Keeratikasikorn C, Bonafoni S. 2018. Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery [J]. *Remote Sensing*, 10(3): 440. doi: 10.3390/rs10030440.
- Long Y, Zhai W X, Shen Y, et al. 2018. Understanding uneven urban expansion with natural cities using open data [J]. *Landscape and Urban Planning*, 177: 281-293.
- Miao Y F. 2015. The evolution of natural cities from the perspective of location-based social media [J]. *Professional Geographer*, 67(2): 295-306.
- Mohan M, Kandya A. 2015. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 506: 453-465.
- Rao Y H, Xu Y, Zhang J J, et al. 2018. Does subclassified industrial land have a characteristic impact on land surface temperatures? Evidence for and implications of coal and steel processing industries in a Chinese mining city [J]. *Ecological Indicators*, 89: 22-34.
- Wang C Y, Myint S, Wang Z H, et al. 2016. Spatio-temporal modeling of the urban heat island in the Phoenix Metropolitan area: Land use change implications [J]. *Remote Sensing*, 8(3): 185. doi: 10.3390/rs8030185.
- Wang F, Qin Z H, Song C Y, et al. 2015. An improved Mono-Window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data [J]. *Remote Sensing*, 7(4): 4268-4289.
- Wu W J, Zhao H R, Jiang S L. 2018. A Zipf's law-based method for mapping urban areas using NPP-VIIRS nighttime light data [J]. *Remote Sensing*, 10(1): 130. doi: 10.3390/rs10010130.
- Xiong Y Z, Huang S P, Chen F, et al. 2012. The impacts of rapid urbanization on the thermal environment: A remote sensing study of Guangzhou, South China [J]. *Remote Sensing*, 4(7): 2033-2056.
- Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, et al. 2015. The footprint of urban heat island effect in China [J]. *Scientific Reports*, 5: 11160. doi: 10.1038/srep11160.

Spatial variability of urban thermal environment based on natural blocks

YANG Zhiwei^{1,2}, CHEN Yingbiao^{1,2*}, WU Zhifeng^{1,2}, QIAN Qinglan¹, HUANG Qingyao¹

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Province Engineering Technology Research Centre for Geographical
Conditions Monitoring and Comprehensive Analysis, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Addressing the issue of subdivision of construction land for quantitative evaluation of spatial variability of urban thermal environment is of great significance for improving the ecological environment of cities and realizing the healthy development of urban areas. In this study, we used Landsat 8 remote sensing imageries to retrieve the surface temperature data of Guangzhou City. Based on the concept of natural city combined with the classification standard of urban construction land, we identified five types of natural blocks based on the open data of point of interest (POI). On this basis, the distribution pattern of land surface heat field levels, thermal field average value of natural blocks, and thermal environment footprint range were calculated and analyzed to evaluate the spatial variability of the urban thermal environment of the city. The results show that: 1) The identification of natural blocks may accurately reflect the spatial distribution of all kinds of POI and realize a meaningful division of the sub-types of construction land. 2) Land surface heat field in the five types of natural blocks was dominated by high temperature pixels (more than 90%), and the distribution range of low temperature pixels is small (less than 1%). But the distribution of the heat field levels was significantly different across the natural blocks. In the residential, road and traffic, and public management and service natural blocks, the proportion of land surface heat field levels was similar; the proportion of mesothermal pixels in the commercial and services natural block was less than half of the above three types of natural blocks. The proportion of high temperature pixels in the industrial natural block was the highest, reaching 99%, and there was no low temperature pixel. The order of thermal field average value of natural blocks from high to low is: industrial natural block > commercial and services natural block > road and traffic natural block > residential natural block > public management and service natural block. 3) Heat diffusion exists in the high temperature agglomeration area formed by natural blocks, and the actual influence range is larger than its physical boundary. The thermal environment footprint range of the five types of natural blocks was different. The thermal environment footprint of industrial natural block was the widest, and the 6th ring buffer zone was still in the scope of impact. While the thermal environment footprint of public management and service natural block only affects the 2nd ring buffer zone, compared with the other four types of natural blocks, the effect of heat diffusion was not significant. The influence range of thermal environment footprint from large to small is: industrial natural block > commercial and services natural block > residential natural block > road and traffic natural block > public management and service natural block. The result of this study may provide some scientific basis for the analysis of urban thermal environment, the improvement of urban ecological environment, and the healthy development of urbanization.

Keywords: point of interest (POI); natural block; thermal environment; spatial variability; Guangzhou City