

引用格式:杨智威,陈颖彪,吴志峰,等.粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J].资源科学,2019,41(6):1154-1166. [Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, et al. Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1154-1166.] DOI: 10.18402/resci.2019.06.14

粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模

杨智威^{1,2},陈颖彪^{1,2},吴志峰^{1,2},郑子豪¹,李娟娟³

(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; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要:探究影响城市热岛空间格局的因子,及科学分析各因子的作用机制,对揭示城市热岛效应的机理有着重要意义。本文以粤港澳大湾区为研究区,综合利用数据空间化表达、空间叠置、地理探测器等方法,对影响城市热岛空间格局的因子开展研究,并构建地表温度与影响因子间的多元关系模型。结果表明,粤港澳大湾区的城市热岛强度等级呈现中间高四周低的空间分布格局,并在珠江入海口两岸形成半环状城市热岛带。本文选取的5种影响因子对城市热岛的空间格局皆具有较高的解释力,平均解释力排序为:单元人口密度(0.668)>建设用地面积占比(0.577)>单元路网密度(0.573)>植被面积占比(0.538)>水体面积占比(0.428)。所构建的多元关系模型,能较准确地反映城市热岛区域地表温度的分布状况,所拟合的地表温度结果与实际地表温度平均值的误差为0.34℃。

关键词:城市热岛;影响因子;空间格局;地理探测器;粤港澳大湾区

DOI: 10.18402/resci.2019.06.14

1 引言

随着城市化进程的不断加快,城市人口迅速增长,城市下垫面急剧改变,导致城市内部的气候特征发生显著变化,城市热岛效应因此产生^[1]。城市热岛效应表现为热量在城市内部集聚,温度明显高于郊区或农村区域^[2,3],并直接影响城市空气质量^[4]、局部气候^[5]、能源利用等^[6],城市居民因此面临着健康风险^[7]。已有研究表明,城市热岛效应受多种因子交互作用影响,包括人为因素、地理因素、气象因素等,其中受人为因素的影响最为显著^[8]。因此,探讨影响城市热岛空间格局的因子,有助于开展城市热岛效应的深度研究。

目前,国内外学者已开展大量城市热岛效应的研究,主要包括:基于遥感影像反演地表温度,并建立相关指数,研究土地覆盖类型与城市热岛效应之

间的关系^[9];基于数值模拟方法,利用架设的仪器获取观测数据并构建新指标,模拟城市地表热环境的演化过程^[10];基于气候、环境等因子,对城市热岛效应的形成进行评价^[11]。粤港澳大湾区作为包含香港、广州、深圳3个核心城市以及周边8个城市的特大城市群,具有显著的城市热岛效应。当前,与大湾区范围相似的珠三角区域早已开展城市热岛效应的研究。如贺丽琴等^[12]利用MODIS影像及不透水面积,研究珠三角地区城市热岛空间分布格局;张硕等^[13]构建城市热岛估算方法,开展对珠三角城市热岛效应的定量评估;牟雪洁等^[14]对珠三角区域的土地进行分类,分析城市热岛空间分布与土地利用类型之间的关系。当前基于珠三角区域开展的城市热岛效应研究,多关注于土地利用覆盖类型与城市热岛之间的关系。且现有研究尚未突破单一

收稿日期:2018-04-27;修订日期:2018-12-24

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)。

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

通讯作者:陈颖彪,男,吉林长春人,博士,教授,研究方向为遥感和地理信息系统应用。E-mail: gzhuchenyb@126.com

2019年6月

指标的范畴,忽略了城市热岛效应是在多种影响因子交互作用下产生的复杂现象。同时,现有研究较少涉及对城市热岛效应具有显著影响的人口因素。因此,开展影响城市热岛空间格局的因子研究,及其影响程度的定量表达尤为重要。

本文聚焦于粤港澳大湾区的城市热岛空间格局及影响因子的分析研究。该区域城市化水平高,人口和经济高度集聚,建成区面积大,交通网络密集,因此城市地表改变引起的小气候变化使大湾区出现了较为显著的热岛效应。首先,利用Terra卫星观测的MOD11A2平均地表温度8天合成产品,对区域内的地表温度进行城市热岛强度等级的划分。其次,参考国内外学者研究城市热岛所涉及的因子类型,以及大湾区社会、经济、环境的实际情况,选取单元人口密度、单元路网密度、建设用地面积占比、植被覆盖面积占比、以及水体面积占比5项指标作为探测因子,利用地理探测器探测各因子影响城市热岛空间格局的程度。最后,建立5项影响因子与城市热岛区域地表温度之间的多元关系模型。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

本文以粤港澳大湾区(111°21'E—114°53'E, 21°27'N—24°24'N)为研究区域开展实证研究(图1)。特殊的地理位置与发展机遇,使大湾区日益受到国

内外的广泛关注,其包括原珠三角城市群9市(广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山、江门),以及香港、澳门2个特别行政区,以“9+2”的形式构建世界级城市群。大湾区属亚热带气候,终年温暖湿润,年平均气温21~23℃,地势起伏较大,中部为平原,四周多丘陵、山地、岛屿。2017年粤港澳大湾区面积为5.6万km²,常住总人口约7000万人, GDP总量约10万亿元,是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一。

2.2 数据源

本文使用的地表温度数据为Terra卫星观测的MOD11A2平均地表温度8天合成产品,空间分辨率为1 km,由美国国家航空航天局(<http://landval.gsfc.nasa.gov/ProductStatus.php?ProductID=MOD11>)提供。该产品的精度优于1℃以内^[15],目前已被广泛应用于大范围的地表温度研究^[16,17]。综合考虑影像成像水平,本文对影像数据进行裁剪和处理,获得大湾区2016年4月份的地表温度数据。

目前,城市热岛空间格局影响因子的研究主要集中于土地覆盖类型与城市热岛间关系^[9]、环境因素对城市热岛的影响^[11]等方面。本文在前人研究的基础上,结合大湾区实际情况,选取与城市热岛关系最为密切的影响因子。首先,选取国内外学者研究涉及较多的土地利用类型,包括建设用地、植被以及水体3类用地。其次,因人为因素对城市热岛

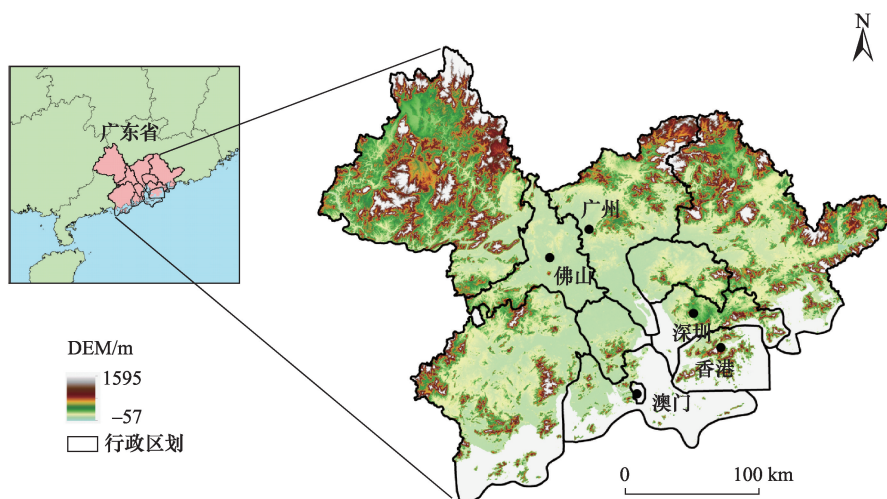


图1 粤港澳大湾区位置示意图

Figure 1 The Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area

效应的影响最为显著^[8],而大湾区人口众多且高度集中,同时交通路网密度大,且人口数量和路网密度均与人为因素密切相关,因此进一步选取单元人口密度及单元路网密度作为影响因子。

建设用地、植被及水体由遥感影像获取。运用遥感软件ENVI5.1,对拼接而成的2016年粤港澳大湾区 Landsat 8多光谱遥感影像进行监督分类,进而从中解译出建设用地、植被、水体及其他用地共4类。并使用Kappa系数评价土地分类结果,判读系数为0.87,土地分类精度较高,可满足本文研究要求。

单元人口密度的获取,即人口空间化,基于夜间灯光数据实现。本文选取的夜间灯光数据为NPP-VIIRS,该数据由美国国家地球物理数据中心(NGDC)(<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>)提供,影像分辨率约为500 m。该数据的卫星传感器增强了对微弱灯光的感知敏感度,且辐射探测的范围较宽,有效地解决了DMSP-OLS夜间灯光数据存在的过饱和问题,具有较高的数据质量。

本文研究所需的辅助数据还包括:交通路网数据、大湾区各区(县)级行政区划人口统计数据。其中,交通路网来源于交通部,并利用全球最大的地图开源数据平台OpenStreetMap的历史资料进行补充修正(<https://planet.openstreetmap.org/>);各区(县)级行政区划人口统计数据来自广东省统计局官网(<http://www.gdstats.gov.cn/tjsj/gdtjnj/>),以及香港(https://www.censtatd.gov.hk/home/index_tc.js)、澳门(http://www.dsec.gov.mo/home_zhmo.aspx)特别行政区官方网站所发布数据。

3 研究方法

3.1 城市热岛等级划分

目前等间距法和均值-标准差法被广泛运用于地表温度的等级划分^[18-20]。本文选取在热岛强度等级分级敏感性和细节表现力方面均优于等间距法的均值-标准差法^[21],该方法基于平均地表温度和不同倍数标准差的相互组合,对城市热岛强度等级进行划分。 T 为研究区地表温度数值,以 A (温度均值)、 $\pm 0.5sd$ (温度标准差)、 $\pm 1sd$ 为基本数据,将热岛强度等级从低到高划分为6级,依次命名为1级、2级、3级、4级、5级和6级(表1)。并对6个热岛强

表1 均值-标准差法划分城市热岛等级的方法

Table 1 Urban heat island intensity classification by mean-standard deviation of surface temperature

热岛强度等级	划分方法
1级	$T < A - sd$
2级	$A - sd \leq T \leq A - 0.5sd$
3级	$A - 0.5sd < T \leq A$
4级	$A < T \leq A + 0.5sd$
5级	$A + 0.5sd < T \leq A + sd$
6级	$T > A + sd$

度等级由低到高分别赋值1~6,实现定量描述。其中,本文将城市热岛强度等级3级以上,即等级为4、5、6级的区域,定义为城市热岛区域。

3.2 数据空间化表达

3.2.1 数据格网化

为了使各因子有效地与城市热岛的空间格局进行关联分析,本文根据研究区面积以及现有数据的空间分辨率,在研究区内构建边长为1 km的格网单元,以实现多源数据的统一(图2)。

具体操作如下:将空间分辨率为1 km的地表温度数据直接赋值在空间位置上对应的格网单元;利用ArcGIS软件,将夜间灯光数据NPP-VIIRS的像元重采样为1 km×1 km;以格网单元为边界对交通路网数据进行分割,获取各格网单元内的交通路网长度;各格网单元中的土地利用数据,以百分比的形式赋值在格网单元中;人口数据使用人口空间回归模型进行空间化处理,处理后的格网包含单元人口密度数据。

3.2.2 人口空间化

传统人口统计数据往往以行政区划为基本单元,其精度较低,不足以支撑研究需求,因此对人口统计数据进行空间化处理尤为关键。目前,已有大量学者开展人口空间化的实证研究。如黄安等^[22]结合土地利用数据,分析张家口市人口空间化的实际情况;Khomarudin等^[23]结合土地利用数据和人口统计数据,实现对人口分布的估计;廖顺宝等^[24]对土地利用、主要道路、海拔高度等影响人口分布的因子进行权重赋值,基于多源数据对青藏高原的人口进行空间化表达。上述研究为人口空间化提供了有效的思路和解决方案,但指标方法多基于传统的土地利用数据。而随着遥感技术的发展以及研究的

2019年6月

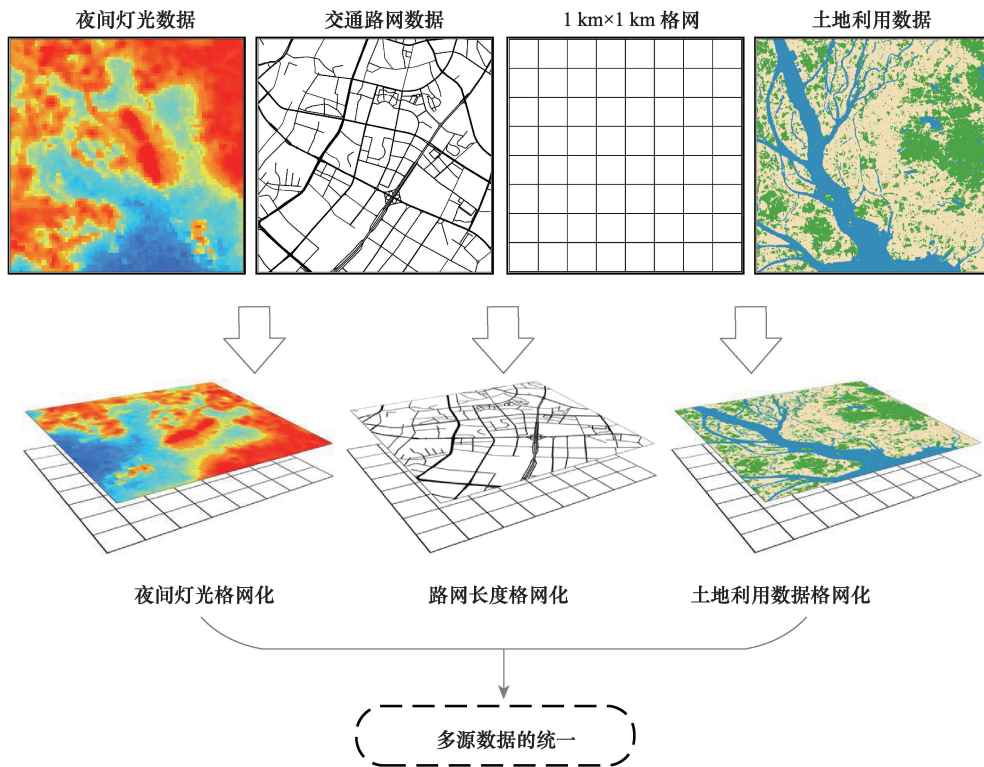


图2 格网化处理步骤

Figure 2 Rasterization of nightlight, road network, and land-use data

不断深入,夜间灯光数据在人口、经济、社会指标等方面的空间化应用越来越广泛^[25-27]。本文使用基于空间误差模型(SEM)的人口空间回归模型^[28,29],对大湾区人口进行空间化处理。该模型以夜间灯光数据为基础,基于二阶回归分析方法构建,更细致地考虑空间对象的相互关系,其公式为:

$$\begin{cases} Y = \rho W_1 + \beta X + \mu \\ \mu = \lambda W_2 + \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中: Y 为2016年大湾区各区(县)级的人口统计数据,其中香港、澳门、中山等面积较小的地区作为独立单元,不再细分; X 为区(县)的夜间灯光累计值; μ 为残差项; W_1 和 W_2 分别为 Y 和 μ 空间权重矩阵; ρ 、 β 和 λ 为空间回归系数; ε 为随机误差。此外,本文使用8领域的邻接方式构建空间权重矩阵 W , 当单元间处于邻接关系, $W=1$, 如不相邻, 则 $W=0$ 。将最终计算得到的空间回归系数,代入原始回归模型中,进而将格网单元的灯光亮度值代入 X , 即可求得各格网单元的人口数量回归值。

但各区(县)回归计算后的人口数据与实际统计数据存在偏差,故需对其进行修正,调整格网单

元回归人口数据,使得区(县)内格网单元人口数量总和与实际统计数据相一致。修正公式如下:

$$\begin{cases} P_{ij} = P_{ij} \times M_i \\ M_i = POP_i / \overline{POP}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{ij} 表示修正后的第 i 个区(县)的第 j 个格网单元人口数量; P_{ij} 为第 i 个区(县)的第 j 个格网单元回归人口数; M_i 为第 i 个区(县)的修正系数; POP_i 为第 i 个区(县)的实际人口统计值; \overline{POP}_i 为第 i 个区(县)的回归人口总数。人口空间化步骤如图3所示。

3.3 地理探测器

地理探测器由 Wang 等^[30]提出,最先用于探测地理因子对局部地域疾病空间分布的影响,共有4种类型:风险探测器、因子探测器、生态探测器、交互探测器。作为探测空间分异性驱动力的统计方法^[31],地理探测器已被广泛应用于自然环境、经济环境、社会环境等研究^[32-34],能够有效地探测某种因子是否影响某类指标的空间分布。本文尝试将地理探测器引入城市热岛的研究,在数据空间化的基础

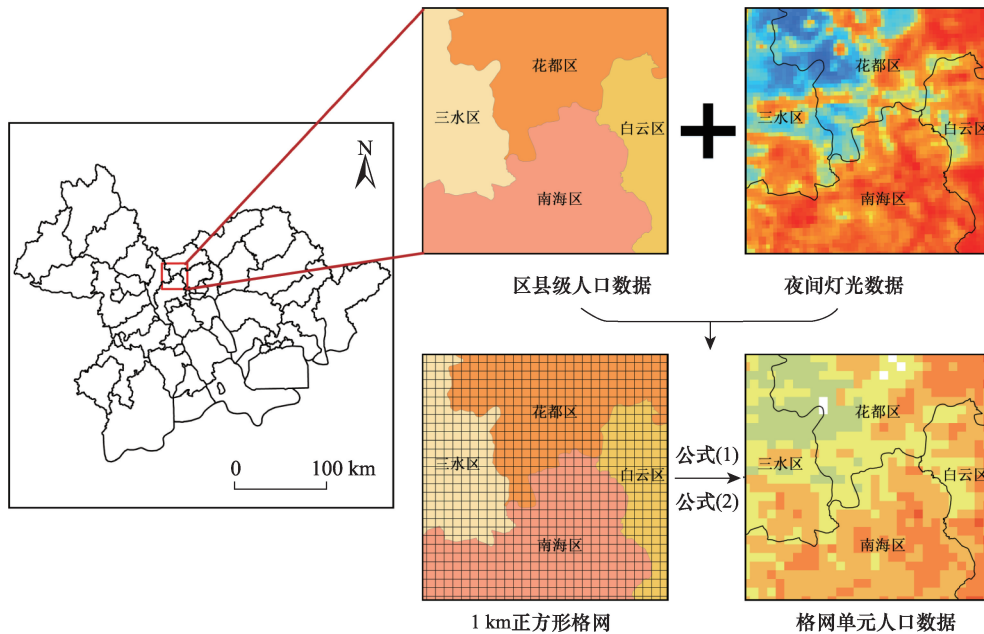


图3 人口空间化步骤

Figure 3 Rasterization of population data

上,利用因子探测器对各影响因子进行定量分析,进而得出各因子影响城市热岛空间格局的相对强弱程度,并验证所选因子的可行性。其公式为:

$$P_{D,T} = 1 - \frac{1}{n\sigma_T^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{T_{D,i}}^2 \quad (3)$$

式中: $P_{D,T}$ 为影响因子 D 对城市热岛区域地表温度 T 的解释力值; n 为样本总数; σ_T^2 为城市热岛区域地表温度的方差; m 为影响因子 D 的次级区域 i 的个数; $n_{D,i}$ 和 $\sigma_{T_{D,i}}^2$ 分别为次级区域的样本数和方差。 $P_{D,T}$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 数值越大表示该影响因子的解释力越大,即对城市热岛空间格局的影响越大。

根据上文所提及的因子选择原则,本文选取人类活动、交通路网、土地利用3种代表性类型,使用单元人口密度、单元路网密度、建设用地面积占比、植被面积占比、以及水体面积占比等5项指标作为代理变量,充当探测因子(图4)。

4 结果与分析

4.1 城市热岛空间格局

由粤港澳大湾区及各城市的城市热岛强度等级分布格局(图5)可知,大湾区的主要城市均出现显著的热岛效应。城市热岛强度等级呈现中间高

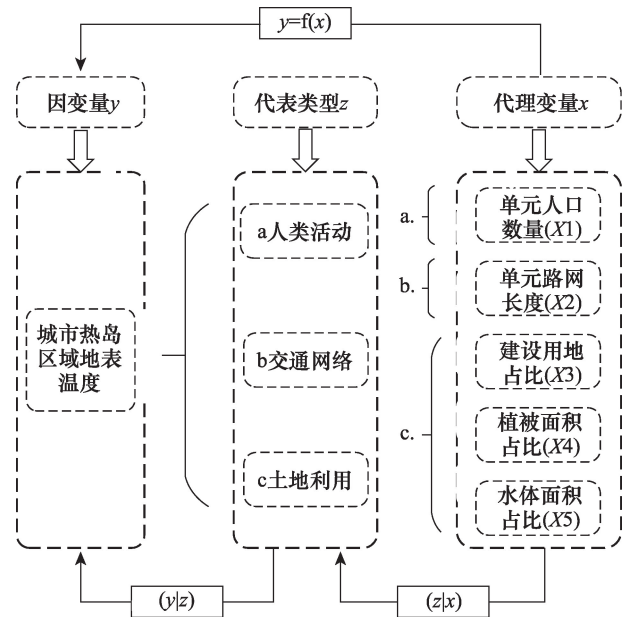


图4 代理变量图

Figure 4 Proxy variables

四周低的分布格局,并在珠江入海口两岸形成半环状城市热岛带。城市热岛区域连片集聚,形成广州—佛山热岛带、香港—深圳—东莞热岛带,以及中山—珠海热岛带。其中,广州—佛山、香港—深圳—东莞2个热岛带,无论是热岛范围还是热岛强度等级都最为显著。而肇庆、惠州、江门等大湾区外

2019年6月

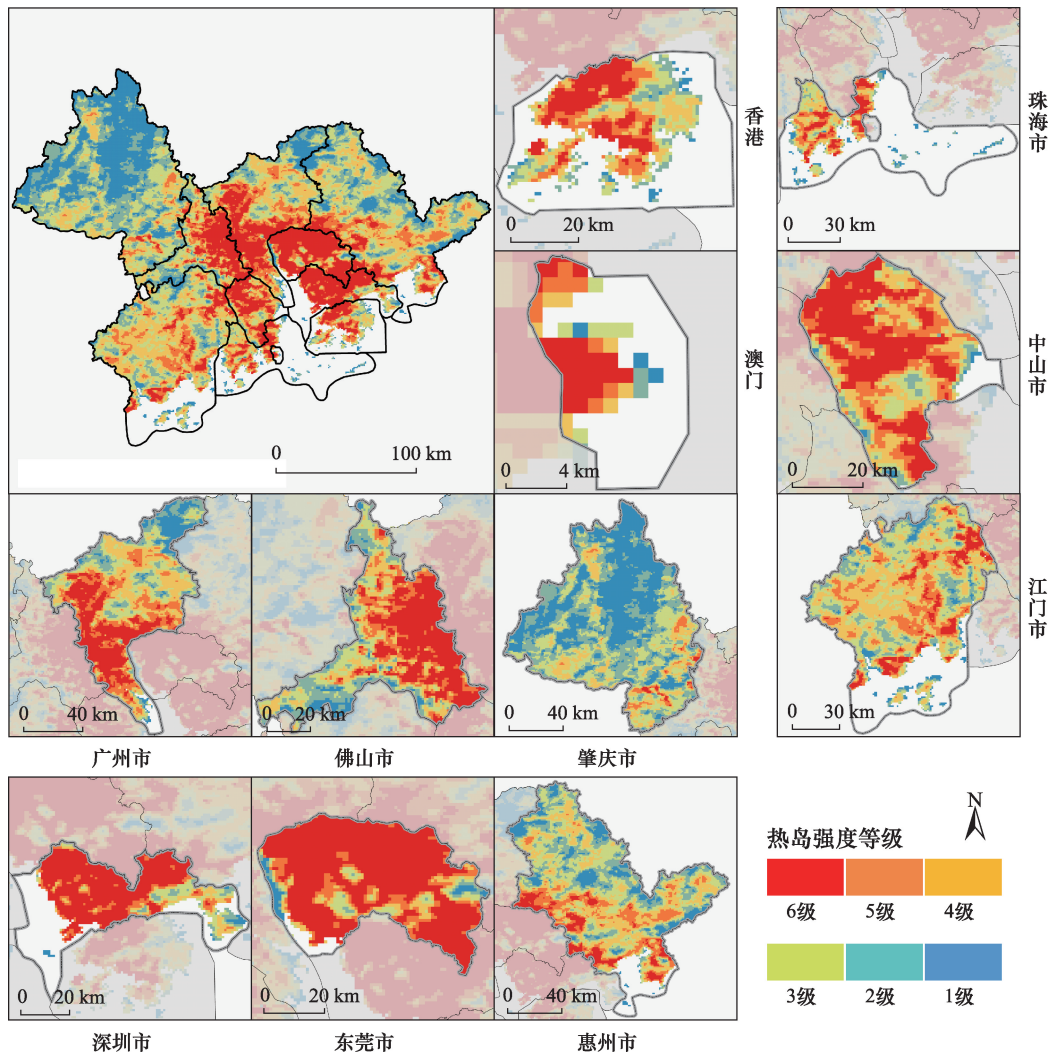


图5 城市热岛强度等级空间分布格局

Figure 5 Spatial distribution of urban heat island intensity classes

围城市,城市热岛效应不显著,未出现连片热岛带。

此外,为定量比较大湾区各城市的热岛状况,本文统计各城市不同热岛强度等级面积占比(表2)。由表2可知,在大湾区11个城市中,有8个城市热岛面积占比超过50%,大多数城市的热岛现象较为严重。其中广州、佛山两市,以及深圳、东莞两市在空间位置上相邻,但广州、深圳两个超大城市的城市热岛面积占比,分别小于佛山、东莞。澳门由于城市面积小,人口集中,且以建设用地为主,因此热岛强度等级整体较高。珠海、中山两市总体城市热岛面积占比高,同样属于热岛效应较为严重区域。而位于大湾区东北、西北和西南的肇庆、惠州、江门三市,城市热岛面积占比不大,均低于大湾区

的平均城市热岛面积占比,而热岛强度低等级区域的占比则远超大湾区的平均水平。

4.2 数据空间化结果分析

4.2.1 格网化结果

经过数据格网化处理后,格网与交通路网、建设用地面积占比、植被覆盖面积占比、水体面积占比等4类因子建立属性关联。各格网包含单元路网密度、建设用地面积占比、植被覆盖面积占比、以及水体面积占比数据,如图6所示。

单元路网密度高值格网集中分布在大湾区中心区域,形成广州—佛山、香港—深圳2个高密度区域,其余区域格网的单元路网密度则较低。珠江两岸的格网单元,建设用地面积占比高,形成以中山

表2 各区域城市热岛强度等级结果统计

Table 2 Statistics of urban heat island intensity classes in various regions

区域	城市热岛强度等级面积占比/%					
	6级	5级	4级	3级	2级	1级
香港	28.30	17.94	20.49	18.53	11.82	2.92
澳门	47.37	17.54	14.04	10.53	5.26	5.26
广州	21.77	19.34	19.73	16.94	12.47	9.75
佛山	35.65	14.99	15.59	15.97	13.04	4.76
肇庆	0.57	2.18	10.18	22.95	28.39	35.73
深圳	62.59	12.00	8.96	9.59	4.88	1.98
东莞	70.62	12.33	6.83	5.11	2.32	2.79
惠州	6.83	11.94	23.46	26.46	19.29	12.02
珠海	20.73	19.84	22.22	18.44	9.38	9.39
中山	40.76	21.37	21.64	10.44	4.61	1.18
江门	7.64	15.63	32.19	26.65	13.11	4.78
粤港澳大湾区	15.94	11.50	19.26	21.14	17.19	14.97

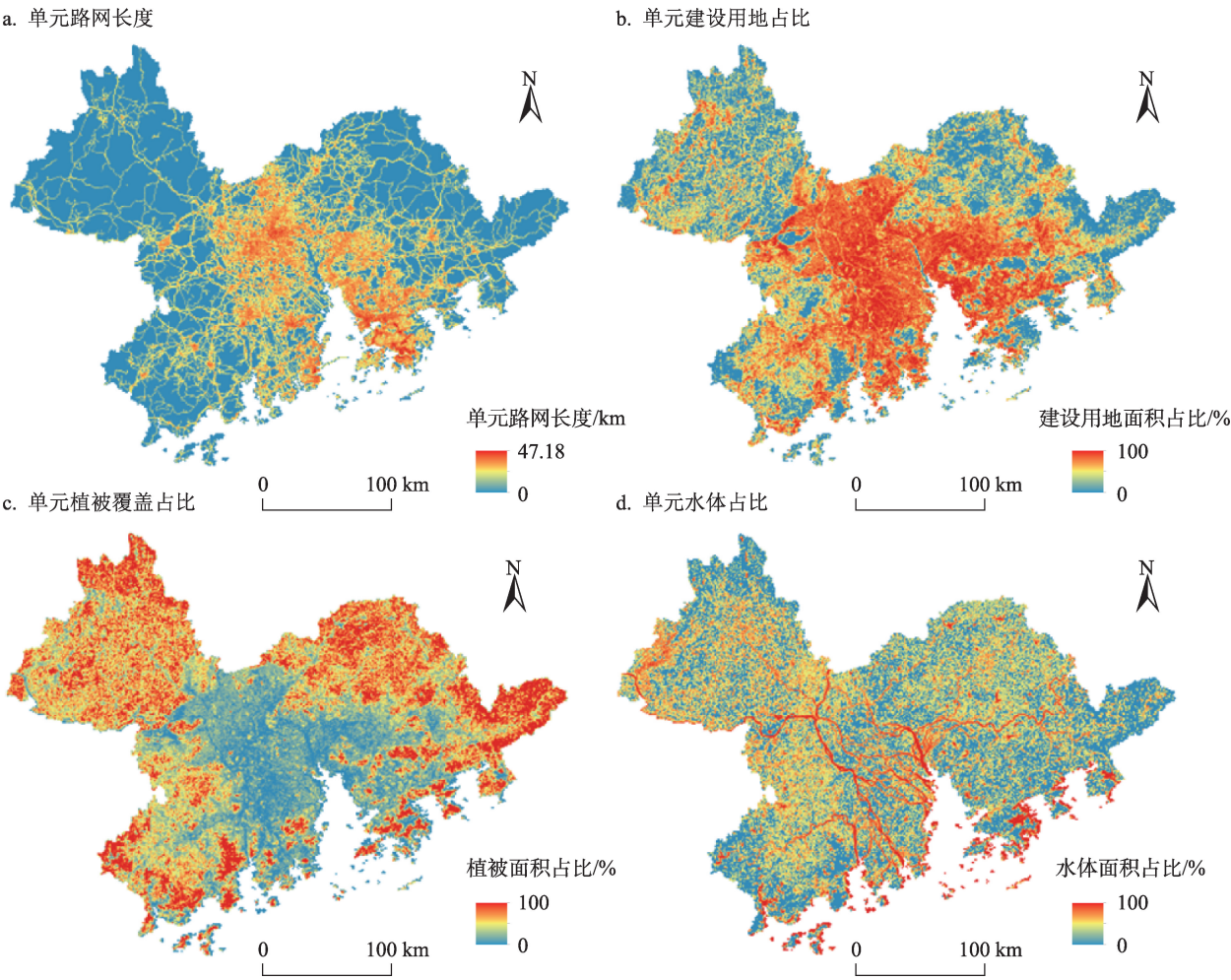


图6 格网化后的4项影响因子分布图

Figure 6 Spatial distribution of the values of four influencing factors at the 1 km x 1 km grid level length of roads, proportion of construction land area, proportion of vegetation cover, and proportion of surface water area .

2019年6月

—佛山—广州—东莞—深圳—香港为条带、大范围分布的建设用地面积占比高值格网集聚区。而大湾区北部与西部的格网,建设用地面积占比相对较低。在大湾区范围内,未出现植被覆盖面积占比高值格网大范围连片分布区域,中心区域分布大量植被覆盖面积占比低值格网,而肇庆、江门、惠州3市则存在数量较多的小范围高值格网。此外,由于大湾区地处亚热带季风区,区域整体降雨量丰富,因此除珠江干流及其主要支流流经的格网拥有较高的水体面积占比外,其余格网的水体面积占比为平均。

4.2.2 人口空间化结果

本文利用人口统计数据、夜间灯光数据、土地

利用数据等多源数据,通过构建人口空间回归模型,对人口数据进行空间化处理,得到大湾区各格网的人口数量,获取单元人口密度分布情况(图7)。

由图7可知,大湾区的人口密度分布极不均衡。在大湾区外围城市,除中心城区存在零星人口集聚现象外,其余区域的人口密度较低。如图7(a)所示,肇庆市除中心城区人口密度较高外,其外围区域的人口密度明显降低。单元人口密度高值格网集中分布在大湾区中部,且存在连片分布现象,其中以广州、佛山、东莞、深圳、香港最为显著。深圳和香港分布大量单元人口密度高值格网,该区域不仅人口数量多,且土地面积较小,因此,单元格网所包含的人口数量较多,导致人口密度较高,如图7

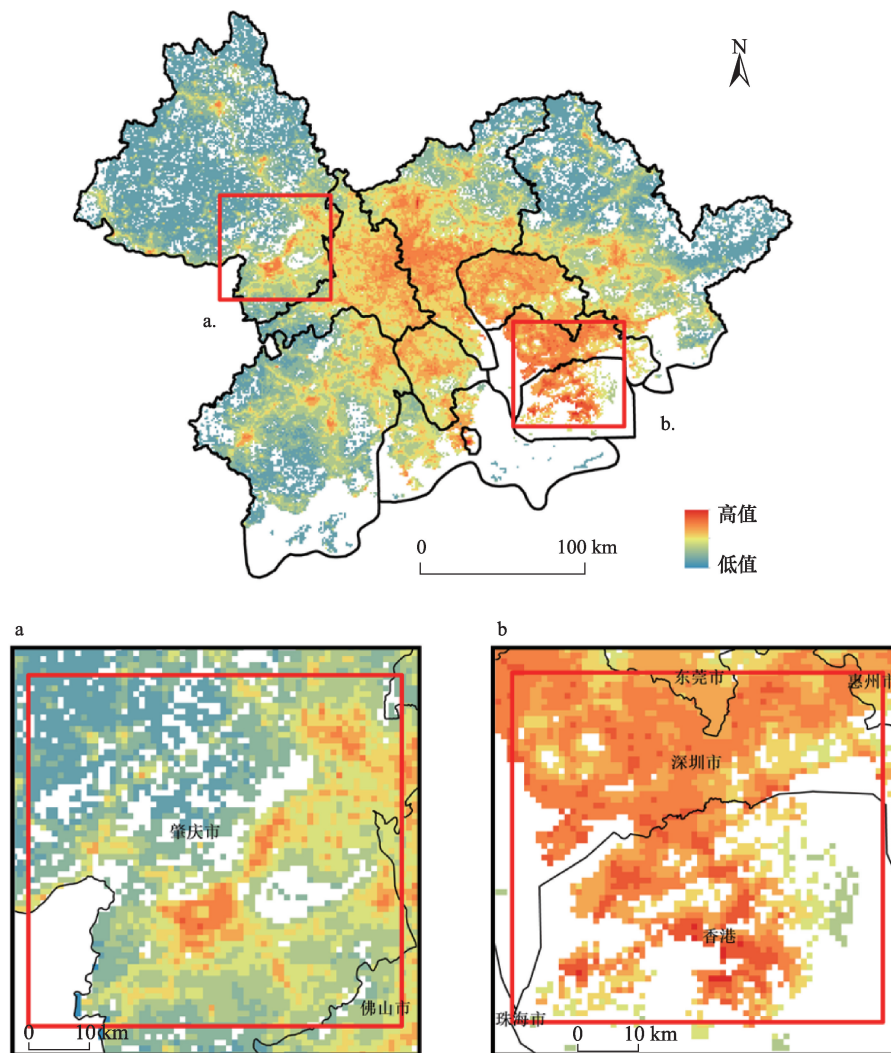


图7 粤港澳大湾区人口密度分布图

Figure 7 Population density distribution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area

(b)所示。

4.3 地理探测器分析结果

4.3.1 探测因子分级

本文利用地理探测器对5项影响因子进行分析,以计算各因子影响城市热岛空间格局的相对强弱程度。此外,由于地理探测器的探测因子需为数值类型,因此需对格网化处理后的数据进行分级处理。因单元路网密度、建设用地面积占比以及人口密度与地表温度呈正相关关系,植被面积占比、水体面积占比与地表温度之间为负相关关系。因此,本文对植被覆盖面积占比、水体面积占比在分级时,采取逆序赋值法^[33]。最后,基于自然间隔点分级法,将以上5项探测因子分别划分为6级,并以1~6依序赋值。

4.3.2 探测结果

在城市热岛区域的格网中,以随机点的形式选取部分格网作为探测的样本数据。分别选取3000个、5000个、7000个、9000个格网作为随机样本数,计算4组随机样本下的各因子解释力,并求得5项因子的平均解释力(表3)。

由表3可知,各探测因子对城市热岛空间格局的平均解释力(q statistic)排序为:单元人口密度(0.668) > 建设用地面积占比(0.577) > 单元路网密度(0.573) > 植被面积占比(0.538) > 水体面积占比(0.428)。其中,单元人口密度(0.668)的平均解释力优于其余探测因子,较建设用地面积占比,单元路网密度,植被面积占比以及水体面积占比的平均解释力分别高出15.8%,16.6%,24.2%和56.1%。这表明在研究区范围内,单元人口密度对城市热岛空间格局的影响程度最强。此外,与人类活动密切相关的建设用地面积占比以及单元路网密度,也与城

市热岛分布之间有较强的相关性。而植被和水体面积占比的平均解释力较其他探测因子而言相对较小。

4.4 城市热岛影响因子的多元建模

根据地理探测器的探测结果,本文所选的5项影响因子对城市热岛的空间格局皆具有较高的解释力,验证了所选因子的可行性。其中,单元人口密度的平均解释力最高,即城市热岛区域的单元人口密度与地表温度显著相关。因此,本文利用多种函数对两者间相互关系进行描述,进而探究两者间的回归方程^[13]。提取3000个随机点数据,基于指数、线性、对数、多项式等函数进行拟合,发现对数函数的拟合效果最佳,二者相关系数 R 最好,达0.644,同时显著性水平高,其公式为:

$$T_1 = 0.7872 \ln(X_1) + 23.761 \quad (4)$$

式中: T_1 为城市热岛区域地表温度的初步回归值; X_1 为格网单元人口密度。

将格格网单元人口密度代入式(4)计算,得到城市热岛区域各格网的地表温度初步回归值,统计后发现回归结果与实际温度值相比较低,存在相对偏差。在所有3000个样本数据中,有2568个样本的初步回归值低于实际值,比例达85.6%,平均较实际值低1.83℃。因此,只使用单元人口密度拟合,存在低估城市热岛区域地表温度的情况。为此,进一步将单元路网密度、建设用地面积占比、植被覆盖和水体面积占比作为独立变量,对 T_1 与实际地表温度之间的差值进行线性拟合,进而实现对结果的修正。相对温度差值与4类影响因子之间的拟合计算公式为:

$$T_2 = 1.5118 + 0.065X_2 + 0.679X_3 - 0.482X_4 - 0.443X_5 \quad (5)$$

表3 随机样本汇总

Table 3 Random sampling summary

随机样本数	因子解释力(q statistic)				
	单元人口密度	单元路网密度	建设用地面积占比	植被面积占比	水体面积占比
3000	0.679	0.593	0.551	0.523	0.447
5000	0.697	0.527	0.579	0.577	0.396
7000	0.631	0.555	0.583	0.503	0.382
9000	0.665	0.617	0.595	0.549	0.487
平均	0.668	0.573	0.577	0.538	0.428

2019年6月

式中: T_2 为 T_1 与实际地表温度间的差值; X_2 为单元路网密度,单位为千米; X_3 为建设用地面积占比; X_4 为植被面积占比; X_5 为水体面积占比。

综合城市热岛区域的单元人口密度与地表温度拟合公式以及相对温度差值与4类影响因子拟合公式,5类影响因子与城市热岛区域地表温度间的多元关系模型可表示为:

$$T = T_1 + T_2 = 25.273 + 0.7872 \ln(X_1) + 0.065X_2 + 0.679X_3 - 0.482X_4 - 0.443X_5 \quad (6)$$

利用上述多元关系模型计算得到的地表温度拟合值,与实际地表温度之间的平均误差为 0.34°C 。因此,将该多元关系模型运用于城市热岛区域地表温度与人口密度、路网密度以及3类土地利用类型面积占比的研究中具有可行性。

为进一步比较城市热岛区域的拟合地表温度和实际地表温度,基于上述多元关系模型推导大湾区城市热岛区域的拟合地表温度,发现拟合结果与实际地表温度分布情况吻合度高(图8)。由图8(a)和图8(b)城市热岛区域拟合地表温度与实际地表温度对比可知,城市热岛区域的拟合地表温度接近实际地表温度情况,因此所建立的多元关系模型能够较准确地反映城市热岛区域的地表温度状况。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以粤港澳大湾区为研究区域,基于Terra卫星观测的MOD11A2平均地表温度8天合成产品,根据均值-标注差法对区域内的地表温度进行城市

热岛强度等级的划分,并将热岛强度等级3级以上区域定义为城市热岛区域。综合利用数据空间化表达、空间叠置、地理探测器等方法,研究各因子对城市热岛空间格局的影响程度,并通过构建多元关系模型,获取城市热岛区域的拟合地表温度。研究结论如下:

(1)大湾区城市热岛强度等级呈现中间高四周低的分布格局,在珠江入海口两岸,形成了半环状城市热岛带。同时,在大湾区11个城市中,共有8个城市热岛面积占比超过50%。城市热岛区域连片集聚,形成广州—佛山、香港—深圳—东莞、以及中山—珠海热岛带。

(2)基于地理探测器探测,5项探测因子对城市热岛区域空间格局均具有较高的解释力,平均解释力排序为:单元人口密度(0.668) > 建设用地面积占比(0.577) > 单元路网密度(0.573) > 植被覆盖面积占比(0.538) > 水体面积占比(0.428)。其中单元人口密度对城市热岛空间格局的影响程度最强,建设用地面积占比以及单元路网长度也表现出与城市热岛空间格局之间具有较强的相关性。

(3)基于多元关系模型,使用5项影响因子推导得到的大湾区城市热岛区域的拟合地表温度,与实际地表温度之间的平均误差为 0.34°C 。所拟合的地表温度结果与实际地表温度的空间分布情况吻合度高。因此,本文构建的多元关系模型能较准确地反映城市热岛区域的地表温度状况。

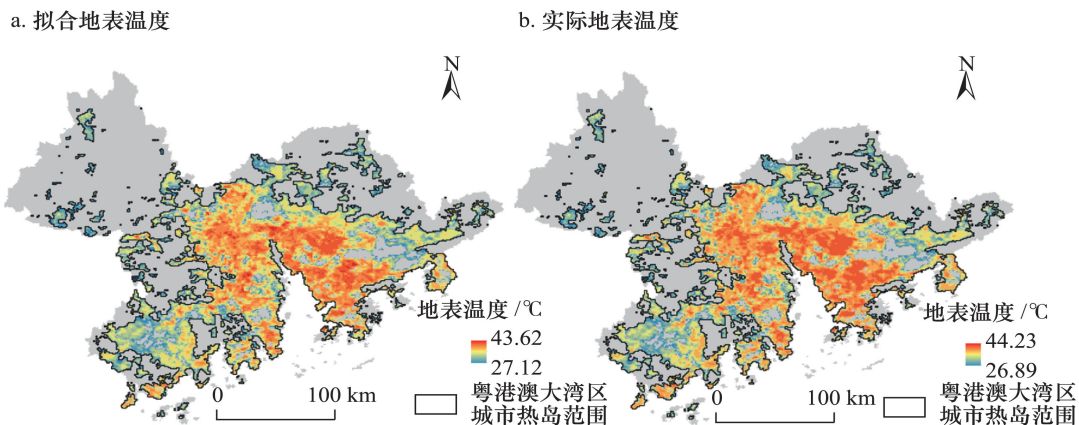


图8 拟合城市热岛地表温度及实际地表温度对比图

Figure 8 Comparison of the fitted land surface temperature and observed land surface temperature

5.2 讨论

本文探究5项影响因子对城市热岛空间格局的影响。研究表明,单元人口密度、建设用地面积占比以及单元路网密度与城市热岛区域地表温度呈正相关关系,而植被及水体面积占比则与城市热岛区域地表温度呈现负相关关系,这与前人的研究结果相一致。此外,本文在此基础上,进一步量化各类因子对城市热岛空间格局的影响程度。结果表明,与城市热岛区域地表温度呈正相关的3项影响因子,对城市热岛区域空间格局的影响程度有所差异(单元人口密度>建设用地面积占比>单元路网密度),但对城市热岛区域空间格局的平均解释力均大于与城市热岛区域地表温度呈负相关关系的植被覆盖面积占比及水体面积占比。

但本文还存在一些有待解决的问题,即:实际影响城市热岛空间格局的因子远超过本文讨论的这5项;同时受数据获取所限,本文未对研究区域开展多时相研究,无法分析时相的改变,是否会导致各影响因子解释力的变化。因此,进一步考虑影响因子类型,以及开展多时相的分析,是今后深入研究的方向。

参考文献(References):

- [1] Fan H, Sailor D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(1): 73–84.
- [2] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370–384.
- [3] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1–24.
- [4] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756–760.
- [5] Kanda M. Progress in urban meteorology: A review[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan (Series II)*. 2007, 85: 363–383.
- [6] Unger J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach[J]. *Climate Research*, 2004, 27(3): 253–264.
- [7] Li D, Sun T, Liu M F, et al. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, DOI: 10.1088/1748–9326/10/5/054009.
- [8] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(3): 507–516.
- [9] 曹峥, 廉丽姝, 顾宗伟, 等. WRF 土地利用/覆被数据优选及其在城市热岛模拟中的应用[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1785–1796. [Cao Z, Lian L S, Gu Z W, et al. Selection of WRF land use/cover data and usage in urban heat island simulations[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1785–1796.]
- [10] Bonafoni S, Baldinelli G, Verducci P. Sustainable strategies for smart cities: Analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies[J]. *Sustainable Cities & Society*, 2017, 29: 211–218.
- [11] Guattari C, Evangelisti L, Balaras C A. On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects on building energy performance: A case study of Rome (Italy)[J]. *Energy & Buildings*, 2017, 158: 605–615.
- [12] 贺丽琴, 杨鹏, 景欣, 等. 基于MODIS影像及不透水面积的珠江三角洲热岛效应时空分析[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 140–146. [He L Q, Yang P, Jing X, et al. Analysis of temporal-spatial variation of heat island effect in Pearl River Delta using MODIS images and impermeable surface area[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(4): 140–146.]
- [13] 张硕, 刘勇洪, 黄宏涛. 珠三角城市群热岛时空分布及定量评估研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1157–1166. [Zhang S, Liu Y H, Huang H T. Research on quantitative evaluations and spatial and temporal distribution of heat islands for the Pearl River Delta agglomeration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1157–1166.]
- [14] 牟雪洁, 赵昕奕. 珠三角地区地表温度与土地利用类型关系[J]. *地理研究*, 2012, 31(9): 1589–1597. [Mou X J, Zhao X Y. Study on the relationship between surface temperature and land use in Pearl River Delta[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(9): 1589–1597.]
- [15] Wan Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 36–45.
- [16] Van Hove L W A, Jacobs C M J, Heusinkveld B G, et al. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration[J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 91–103.
- [17] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区建设用地扩张与城市热岛扩张耦合态势研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(11): 1592–1603. [Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, et al. The coupling between construction land expansion and urban heat island expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(11): 1592–1603.]

2019年6月

- [18] 李丽光, 王宏博, 贾庆宇, 等. 辽宁省城市热岛强度特征及等级划分[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1345–1350. [Li L G, Wang H B, Jia Q Y, et al. Urban heat island intensity and its grading in Liaoning Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1345–1350.]
- [19] 张勇, 余涛, 顾行发, 等. CBERS-02 IRMSS 热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 789–797. [Zhang Y, Yu T, Gu X F, et al. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 789–797.]
- [20] 于琛, 胡德勇, 曹诗颂, 等. 2005–2016年北京中心城区热岛时空格局及影响因子多元建模[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1485–1494. [Yu C, Hu D Y, Cao S S, et al. Spatio-temporal pattern of heat island and multivariate modeling of impact factors of Beijing downtown from 2005 to 2016[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(11): 1485–1494.]
- [21] 陈松林, 王天星. 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, 2009, 11(2): 145–150. [Chen S L, Wang T X. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 145–150.]
- [22] 黄安, 许月卿, 孙丕苓, 等. 基于多源数据人口分布空间化研究: 以河北省张家口市为例[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2186–2196. [Huang A, Xu Y Q, Sun P L, et al. Spatial distribution of population specialization based on multi-source data: A case study of Zhangjiakou City[J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2186–2196.]
- [23] Khomarudin M R, Strunz G, Ludwig R, et al. Hazard analysis and estimation of people exposure as contribution to tsunami risk assessment in the West Coast of Sumatra, the South Coast of Java and Bali[J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, 2010, 37(3): 337–356.
- [24] 廖顺宝, 孙九林. 基于GIS的青藏高原人口统计数据空间化[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 25–33. [Liao S B, Sun J L. GIS based spatialization of population census data in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 25–33.]
- [25] 高义, 王辉, 王培涛, 等. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2517–2523. [Gao Y, Wang H, Wang P T, et al. Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2517–2523.]
- [26] 周玉科, 高锡章, 倪希亮. 利用夜间灯光数据分析我国社会经济发展的区域不均衡特征[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(6): 1107–1113. [Zhou Y K, Gao X Z, Ni X L. Analyzing regional inequality of socioeconomic development in China with nighttime light[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(6): 1107–1113.]
- [27] 赵金彩, 钟章奇, 卢鹤立, 等. 基于夜间灯光的城市居民直接碳排放及影响因素: 以中原经济区为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2100–2114. [Zhao J C, Zhong Z Q, Lu H L, et al. Urban residential CO₂ emissions and its determinants: A case study of Central Plains Economic Region[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 2100–2114.]
- [28] 李翔, 陈振杰, 吴洁璇, 等. 基于夜间灯光数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(10): 1298–1305. [Li X, Chen Z J, Wu J X, et al. Grid-ding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(10): 1298–1305.]
- [29] 杨智威, 陈颖彪, 千庆兰, 等. 人口空间化下的公共医疗服务水平匹配度评价: 以广州市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(2): 74–82. [Yang Z W, Chen Y B, Qian Q L, et al. Evaluation of the matching degree of the public medical service level based on population spatialization: A case study of Guangzhou[J]. Geography and Geo-information Science, 2019, 35(2): 74–82.]
- [30] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107–127.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134. [Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134.]
- [32] 方叶兵, 王礼茂, 牟初夫, 等. 中国石油终端利用碳排放空间分异及影响因素[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2233–2246. [Fang Y B, Wang L M, Mou C F, et al. Determinants of spatial disparities of petroleum terminal utilization carbon emissions in China[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2233–2246.]
- [33] 杨丰硕, 杨晓梅, 王志华, 等. 江西省典型县域经济差异影响因子地理探测研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 79–88. [Yang F S, Yang X M, Wang Z H, et al. Geographic detection of impact factors of economic differences among typical counties in Jiangxi Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(1): 79–88.]
- [34] 郑子豪, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法[J]. 遥感学报, 2018, 22(1): 161–173. [Zheng Z H, Chen Y B, Wu Z F, et al. Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNI[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(1): 161–173.]

Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area

YANG Zhiwei^{1,2}, CHEN Yingbiao^{1,2}, WU Zhifeng^{1,2}, ZHENG Zihao¹, LI Juanjuan³

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Centre for Geographical Conditions Monitoring and Comprehensive Analysis, Guangzhou 510006, China;

3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: To explore the influence of various factors on the spatial differentiation of urban heat island intensity, and to reveal the impact mechanism of the factors, spatial expression, spatial overlay, and geographical detector methods were used in this study. The impact of five influencing factors on the spatial differentiation of urban heat island intensity in the study area was examined, and a multivariate relationship model was constructed. The results show that the intensity of urban heat island in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area is high in the central part and low in the surroundings, which has formed a semicircular urban heat island belt on both sides of the estuary of the Pearl River. According to the results of the geographical detector analysis, the five selected factors have a high explanatory power on the spatial differentiation of the urban heat island intensity at the 1 km×1 km grid scale, in the order of population density (0.668) > proportion of construction land area (0.577) > length of roads (0.573) > proportion of vegetation cover (0.538) > proportion of surface water area (0.428). The constructed multivariate relationship model can accurately reflect the distribution of land surface temperature in urban heat island area, and the error between the modeling result and the observed average land surface temperature is 0.34℃.

Key words: urban heat island; influencing factors; spatial pattern; geographical detector; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area