

# 基于手机定位数据的深圳市热浪人口暴露度分析

谢 铖<sup>1</sup>, 黄 波<sup>2,3,4\*</sup>, 刘晓倩<sup>1</sup>, 周 涛<sup>1</sup>, 王 宇<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 香港中文大学地理与资源管理系, 香港 999077;  
3. 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港 999077; 4. 香港中文大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

**摘要:**热浪作为城市化特征灾害之一,严重影响着城市居民的生命健康。目前针对热浪的研究主要聚焦基于静态数据的时空模式、风险管理和脆弱性评价分析方向,对动态人口暴露度的研究尚少。论文基于手机定位数据,首先融合深圳市逐时人口与气温时空分布模型,揭示热浪动态人口暴露度水平;其次,构建基于7类城市兴趣点(point of interest, POI)与不同时段人口分布的地理加权回归模型,初步分析了热浪环境下POI对人群行为模式的影响机制。结果显示:①相比于基准时段(2018年7月28日12:00~18:00),2018年7月26日至8月1日热浪平均辐射范围在7月29日以8.66倍速增长,至7月30日则以18.93倍速跃至峰值,覆盖区域整体呈现西部高于东部、南部低于北部的特征;②人口在不同时段均表现为明显的带状聚集分布态势,且人口暴露度与气温和人口的动态演变紧密关联,其暴露度同热浪扩散幅度相似,总体呈2.29倍等比增长,辐射范围包括南山区、福田区、罗湖区等城市商业、工业、住宅中心人口密集区域;③同类POI在不同时刻、不同POI在相同时刻对人群减少热浪暴露的移动交互行为具有明显的时空驱动机制差异及选择偏好特征。在持续性城市化背景下,该研究方法可为同类的城市灾害人口暴露度分析提供一定的科学参考。

**关键词:**手机定位数据;热浪;人口暴露度;POI;地理加权回归;深圳市

持续性城市化背景下,全球环境问题给人类生存生活带来诸多挑战。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)2014年第5次报告中表明1880—2012年,全球地表平均温度升高了0.85℃<sup>[1]</sup>。21世纪以来,热浪作为城市发展主要灾害之一,相继在印度、中国、欧洲等国家和地区爆发,并呈现出强度更激烈、频率更快、持续时间更长、范围更广的趋势<sup>[2-4]</sup>,对自然生态系统和人类健康均造成高度影响<sup>[5-6]</sup>,热浪现已成为城市灾害研究的热点领域之一<sup>[7-8]</sup>。

目前,国内外对热浪的研究核心集中于影响因子分析<sup>[9-10]</sup>、时空分布格局分析<sup>[8,11]</sup>、风险性评价<sup>[4,12]</sup>、

脆弱性(敏感性)评估<sup>[13-15]</sup>、暴露度研究<sup>[16-18]</sup>、适应性行为分析<sup>[19-20]</sup>等方面。而人群作为热浪危害的主要载体,尤其是幼龄、老年以及身体状况不佳等人群若持续暴露于在热浪环境中,其中暑、心血管疾病、呼吸道疾病发病率以及死亡率等反应会激增<sup>[21-22]</sup>。因此,分析人群在热浪环境中的时空暴露程度,识别灾害危险区,对预防和应对热浪影响、改善城市环境以及城市可持续发展有着重要意义。

近年来,热浪人口暴露风险研究开始发展。经典的风险评估框架为IPCC<sup>[23]</sup>第5次报告中提出的“灾害胁迫—社会脆弱性—暴露”体系。基于此,热

收稿日期:2019-02-18;修订日期:2019-05-14。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAJ05B04);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课题(KF-2015-01-011)。[Foundation: National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China, No. 2013BAJ05B04; The Project Supported by the Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, MNR, No. KF-2015-01-011.]

第一作者简介:谢铖(1993—),男,硕士生,研究方向为城市热环境与地理大数据分析。E-mail: gis2013@163.com

\*通信作者简介:黄波(1968—),男,博士生,长江学者讲座教授,研究方向为遥感图像融合、时空大数据分析、可持续城市空间规划等。E-mail: bohuang@cuhk.edu.hk

引用格式:谢铖,黄波,刘晓倩,等. 基于手机定位数据的深圳市热浪人口暴露度分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 231-242. [Xie Cheng, Huang Bo, Liu Xiaolian, et al. Population exposure to heatwaves in Shenzhen based on mobile phone location data. Progress in Geography, 2020, 39(2): 231-242.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.005

浪“暴露—敏感—适应能力”脆弱性以及“高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露”人群健康评价框架被提出<sup>[7,14]</sup>,2个体系均对热浪人口暴露危险性 & 脆弱性评估做了深入的探讨和分析。此外,陈倩等<sup>[24]</sup>基于风险评价模型对人群在热浪环境中的健康暴露风险进行了评估。同丽嘎等<sup>[25]</sup>利用遥感数据和统计人口数据建立了包头市热浪人口暴露风险评价模型。而以上研究均未定量分析人群在风险中的暴露水平高低,人群是热浪的主要影响群体之一,其暴露度的研究不可忽略。对此,基于气候和人口情景数据进行人口暴露度的研究开始兴起<sup>[16-18]</sup>,为热浪人口暴露度的发展进行了有益探索。由于气候变化、城市发展以及人口行为模式的动态演变特性,该方法在粗时间分辨率、大尺度空间的预测中表现良好,却很难衡量细时间分辨率、小尺度范围内热浪对人群暴露度的影响。同时基于行政单元的静态统计数据进行的研究导致数据滞后,不仅难以反映受灾区域近实时人口的暴露风险,同时也默认了相同区域人群暴露风险的一致性,也就无法更加精细化地在时空尺度度量灾害对人群的风险危害程度。大数据时代,随着传感网、移动互联网、无限通信等技术的快速发展<sup>[26]</sup>,手机定位数据、社交媒体签到数据、公交刷卡数据等富含人群时空位置信息的数据涌现,为精细尺度下人口在灾害中的动态暴露及移动行为模式研究提供了新的思路。

因此,针对以上不足,本文以深圳市2018年7月26日至8月1日期间一次热浪事件为例,基于该时段的逐时手机定位数据与逐时气象监测数据,结合2017年统计人口数据,提出一种基于1 km分辨率的网格人口暴露度分析方法,以期更加精细化地阐明实时人口与气温的时空演变特征以及热浪环境下人口暴露的热点区域,同时为热浪、空气污染、热岛效应等类似城市灾害事件人口的暴露度研究提供一定的科学基础。此外,建立了该时段实时人口与城市兴趣点(point of interest, POI)数据(具有地理信息的城市空间特征数据)的地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型,并探讨不同类型的城市POI对其移动行为模式的驱动机制变化规律,旨在为城市区域灾害事件的应急管理提供有益借鉴。

## 1 研究区域

深圳市(113°43′~114°38′E、22°24′~22°52′N)

位于中国南部海滨,毗邻香港,下辖10个区(包括9个行政区和1个新区),总面积约1997.47 km<sup>2</sup>,属亚热带季风气候,夏季高温多雨,年平均气温22.4℃,历史极高温为38.7℃(1980年7月10日),年平均降雨量1966.4 mm。夏季受副热带高压影响,炎热天气普遍,极易出现极端高温天气。深圳市作为中国改革开放建立的第一个经济特区,40 a间,从边陲小渔村发展成为国际化现代大都市,并在内地与全球经济发展中扮演着重要的角色。而随着深圳市“撤镇改街”政策的实施,其以100%的城市化率<sup>[27]</sup>位居中国城市化水平榜首,快速的城市化导致深圳平均最高气温的升温速率达到0.145℃/10 a<sup>[28]</sup>。此外,根据百度地图<sup>[29-30]</sup>发布的2018年第三季度(7—9月)及年度中国城市活力研究报告显示,深圳市人口吸引力指数在第三季度及全年均排名全国第一。同时深圳市明显的人口扩张趋势<sup>[31]</sup>,也增加了其人口暴露于城市气象灾害的危险性。

## 2 数据及方法

### 2.1 基础数据

#### 2.1.1 气象站点数据

本文涉及的气温数据来源于深圳市气象局,其气象站点分布如图1所示。考虑到台风天气带来的影响,本文基于中国气象局对热浪的定义标准<sup>[32]</sup>:连续3 d日最高温≥35℃为热浪,并结合2018年第三季度深圳市气象局发布的高温以及台风预警信息(表1),对热浪事件进行筛选。

经过筛选,2018年第三季度深圳市气象局热浪预警总计2次(7月28日—8月3日、8月6日—8月9日),台风预警5次(表1)。但在首次热浪事件中,大规模监测到35℃以上高温的气象站点已经在7月31日开始锐减,直到8月2日仅有个别站点短时监

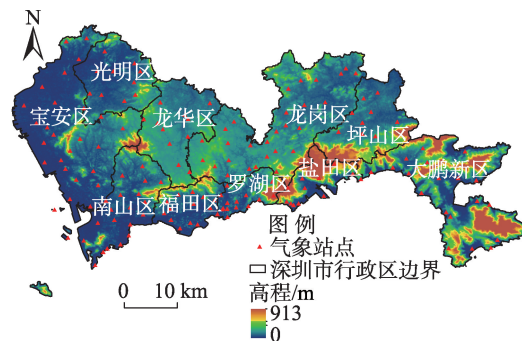


图1 深圳市高程及气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations and elevation of Shenzhen

表1 深圳市2018年第三季度高温及台风预警信息

Tab.1 High temperature and typhoon warning information for the third quarter of 2018 in Shenzhen

编号	发布时间	取消时间	预警类型	发布区域是否覆盖全境陆地
1	2018-07-11T05:20	2018-07-12T18:00	高温	是
2	2018-07-16T17:00	2018-07-18T06:10	台风	否
3	2018-07-17T12:25	2018-07-17T20:00	高温	是
4	2018-07-21T07:45	2018-07-22T15:55	高温	是
5	2018-07-22T17:00	2018-07-24T11:00	台风	是
6	2018-07-28T11:45	2018-08-03T17:45	高温	是
7	2018-08-06T09:05	2018-08-09T19:30	高温	是
8	2018-08-09T17:00	2018-08-15T17:00	台风	是
9	2018-08-25T09:00	2018-08-26T15:30	高温	是
10	2018-09-11T11:00	2018-09-13T06:30	台风	否
11	2018-09-14T12:30	2018-09-17T14:10	台风	是
12	2018-09-14T09:10	2018-09-15T20:00	高温	是

测到高温,难以覆盖全市陆地及大部分范围;第二次热浪强度较弱,监测到高温的站点甚少;此外,台风登陆时未监测到高温。因此本文以2018年7月26日至2018年8月1日作为一次非台风热浪周期(包括热浪前一中一后3个时间点)为例,获取该时段的逐时气温监测数据。

2.1.2 统计人口数据与手机定位数据

常住人口统计数据来源于深圳市各行政区2017年发布的统计年鉴。此外,由于基于位置服务的微信、QQ、腾讯地图等应用程序的广泛使用,高精度的手机定位数据为研究精细化的人群时空分布提供了较好的数据支撑。本文使用个人隐私删除后覆盖整个深圳市的实时手机定位数据,其采集时段与气温监测数据一致,采集时间间隔为5 min,同时为了保证与气温逐小时分辨率的一致性,数据被整合为每小时的手机定位数据集。

2.1.3 城市POI数据

城市POI数据来源于高德地图,时间节点为2018年,涵盖交通设施、购物场所、科教文化等11种与人群日常活动息息相关的主要城市POI数据,如表2。

2.2 热浪人口暴露度分析

2.2.1 逐时气温空间分布

由于气象监测站点非均匀分布于研究区,为了

阐明热浪环境下人口的时空暴露特征,本文选取了日内高温集中时段(即12:00~18:00)的站点监测数据,基于普通克里金法进行空间插值,以此获得覆盖整个深圳市区域的气温时空分布图,其时间分辨率为1 h,空间分辨率1 km。

2.2.2 逐时人口分布估算

人口分布作为研究人群聚集与消散行为模式的主要基础,能为城市突发事件(如踩踏、卫生事件)、城市灾害(内涝、热岛效应、热浪)、城市规划设计等方面提供决策辅助。由于手机定位数据受地理环境(如地下空间屏蔽、高大建筑物遮挡、信号干扰)、使用者年龄(老人、幼儿一般较少使用诸如微信、QQ、微博等社交媒体平台)<sup>[33]</sup>、职业和个人行为差异等因素制约,其并不能表征城市的实际人口数量。因此,本文在Chen等<sup>[34]</sup>的研究基础上,将研究区分割成1 km×1 km网格,定义每个网格内每小时的人口总数为人口加权与手机定位数据之和,得到的所有网格人数之和应介于统计人口与管理人口之间,能更好地描述人口的动态分布特征,其计算公式如下:

$$pw_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij}} \quad (1)$$

$$PT_{ij} = pw_{ij} \times p_{total} + p_{ij} \quad (2)$$

式中:pw<sub>ij</sub>为人口权重,p<sub>ij</sub>表示第i时刻编号j的网格中手机定位数,PT<sub>ij</sub>为第i时刻编号j网格中的人口总数,p<sub>total</sub>为深圳市年末统计常住人口数。

2.2.3 人口暴露度估算

热浪作为一个持续性的高温天气过程,受性别、年龄、文化程度、健康状况、职业类型、工作环境等因素影响,人体对热浪的感知、适应能力、应对方式存在很大的差别<sup>[19]</sup>。热浪人口暴露度是人口、时间、高温3个因素共同作用的函数,因此本文定义动态人口暴露度为每小时35℃及以上高温网格内的人口数,其计算公式如下:

$$PE_{ij} = \frac{PT_{ij} \times T_{\geq 35^\circ C}}{t} \quad (3)$$

式中:PE<sub>ij</sub>为第i时刻编号j网格人口暴露度,PT<sub>ij</sub>表示第i时刻编号j网格中的人口数,T<sub>≥35℃</sub>代表气温在35℃及以上的所有网格,t为时间(h)。

表2 深圳市城市POI类型

Tab.2 Types of points of interest (POIs) in Shenzhen

类型	交通设施	购物场所	科教文化	餐饮	商务住宅	医疗保健	生活服务	风景名胜	酒店住宿	金融服务	公司企业
数量/个	37356	4661	26684	75030	27453	20326	56695	2514	12622	14183	141700

### 2.2.4 城市POI相关性分析

为进一步揭示热浪环境下人口的时空分布特征,本文利用与人群活动密切相关的城市POI数据,探寻其对热浪环境下的人群聚集与消散移动行为模式的驱动机制。由于传统的回归分析不能较好地定量描述空间变量的关系,而地统计学中,基于普遍应用的地理加权回归模型对此能作出较好的解释,因此本文结合11类城市主要POI数据,分析其对人群移动行为模式的影响程度。同时,为了避免解释变量多重共线性问题(膨胀系数VIF小于7.5认为不存在多重共线性,大于7.5则表示较强或严重多重共线性)以及对人口移动吸引力影响不显著的因素,首先对11个解释变量(POI数据)进行多重共线性和相关性筛选。最终筛选诊断结果如表3所示,可以看出,交通设施、餐饮、医疗保健、生活服务之间存在较强的共线性,且风景名胜因子与其相关性较弱,因此采取逐步回归的方式,剔除多重共线性强、相关程度较低的解释变量,筛选出最优的解释变量集合进行地理加权回归分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 热浪分布特征

#### 3.1.1 气温站点逐时最高温变化特征

由图2可以看出,站点最高气温呈现显著的小时变化特征,且高温集中出现在12:00~18:00之间。气象监测站点在该热浪周期内均普遍记录到35℃以上的高温,7月28—30日记录到35℃及以上

表3 人口与城市POI相关性及变量间共线性检验结果

Tab.3 Results of correlation between population and urban points of interest (POIs) and collinearity test between variables

解释变量	相关性		多重共线性	
	相关系数	相关性强弱	膨胀系数(VIF)	共线性强弱
交通设施	0.710	强	8.49	较强
购物场所	0.780	强	6.66	无
科教文化	0.702	强	7.35	无
餐饮	0.810	极强	19.87	较强
商务住宅	0.781	强	5.70	无
医疗保健	0.772	强	13.22	较强
生活服务	0.801	极强	32.65	较强
风景名胜	0.268	弱	1.32	无
酒店住宿	0.578	较强	2.24	无
金融服务	0.585	较强	3.49	无
公司企业	0.746	强	3.52	无

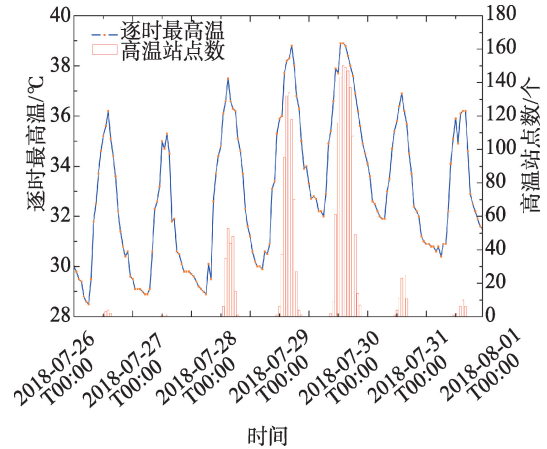


图2 逐时最高温与高温站点数

Fig.2 Hourly highest temperature and the number of high temperature stations

高温站点数分别有53、132、150个。此外,7月29、30日13:00~17:00除大鹏新区、福田区、坪山区外的7个行政区均监测到38℃以上高温。从监测到高温的站点数而言,29和30日均有一半以上站点记录到持续性高温,其中30日13:00~16:00监测到高温的站点均大于140个,最高达到150个,约占总站点数的86%,有77个站点记录到37℃以上高温,最高达到39.3℃。

#### 3.1.2 热浪时空分布特征

尽管7月26、27日均有部分气象站点检测到超过35℃的高温,但在整个研究范围内7个时刻未出现明显高温现象,只有26日14:00存在极小范围高温。纵观整个热浪过程,以7月28日14:00为开端,29日逐渐增强,30日达到峰值,共持续3d。7月26日和31日仅在14:00出现短暂高温,其余时段气温介于29~35℃,而7月27日和8月1日无显著高温现象。表4为此次热浪周期日内12:00~18:00热浪覆盖范围面积百分比随时间演变统计结果,可以看出,热浪持续的3d中,以7月28日12:00~18:00为

表4 热浪覆盖面积百分比

Tab.4 Percentage of coverage of heatwaves (%)

日期	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
2018-07-26	0	0	2.94	0	0	0	0
2018-07-27	0	0	0	0	0	0	0
2018-07-28	0	0	1.00	10.88	4.10	14.70	0.45
2018-07-29	0	0	52.62	86.52	86.52	74.14	1.00
2018-07-30	83.42	100	99.76	100	91.90	91.95	53.70
2018-07-31	0	0	2.72	0	0	0	0
2018-08-01	0	0	0	0	0	0	0

基准时段,热浪覆盖范围从7月29日14:00开始扩大,增速为8.66倍,至7月30日,大范围热浪辐射影响较前2日提前2 h出现,其平均波及范围占比高达88.68%,增速为18.93倍,并在13:00~15:00达到当日峰值后,开始出现下降趋势,但至18:00仍有53.70%的范围受热浪影响。

由于篇幅有限,本文以该热浪周期日内14:00气温空间分布(图3)为例进行说明。可以看出,深圳市高温区(大于35℃)与较高温区(33~35℃)整体呈现西部高于东部、南部低于北部的特征。盐田区盐田街道、沙头角街道,罗湖区东湖街道、莲塘街道以及龙岗区横岗街道等依山临海且工业密度分布较少的区域较其他区域受热浪影响程度较低。持续性的高温则主要集中在宝安区沙井和石岩街道、南山区沙河和西丽街道、罗湖区西北区、光明区马田和光明街道以及坪山区坑梓、龙田、石井街道,而这些区域均存在较密集的工业园区,其产生的大量人为热可能导致了该区域气温高于其他区域。

### 3.2 热浪周期日内12:00~18:00逐时人口密度时空分布特征

基于逐时手机定位数据和统计人口数据加权

计算,得到深圳市热浪周期日内12:00~18:00时段逐时人口空间分布情况,通过计算各个时段的全局Moran's *I*指数,在0.01显著水平下,其值介于0.689~0.746,说明人口分布存在较高的聚集性。图4为该周期日内14:00时人口密度分布图,可以看出,人口空间分布趋于相对稳定态势,高于5000人/km<sup>2</sup>的区域整体趋势表现为以福田区华强北街道为原点,沿龙岗区西部至龙华和光明区中部经宝安区、南山区、罗湖区沿海区域的带状分布。

对单个网格分析显示,超过100000人/km<sup>2</sup>的网格位于福田区华强北、园岭以及罗湖区桂园街道商业、交通枢纽区域;人口分布稀少较离散的主要区域则位于盐田区和大鹏新区,这与杨喜平等<sup>[35]</sup>对深圳市人群聚集消散时空分布模式研究结果基本一致。图5表示热浪时段各时刻人口平均密度演化趋势,该热浪周期7 d内的平均人口密度均值为7126人/km<sup>2</sup>,除热浪前2日(7月28、29日)外,其余5 d同时刻的平均人口密度整体呈现较规则的正“U”形变化。而这2日恰逢周末,外出返深人员高峰在17:00出现,18:00达到峰值(7月28日为7642人/km<sup>2</sup>,7月29日为7443人/km<sup>2</sup>)。

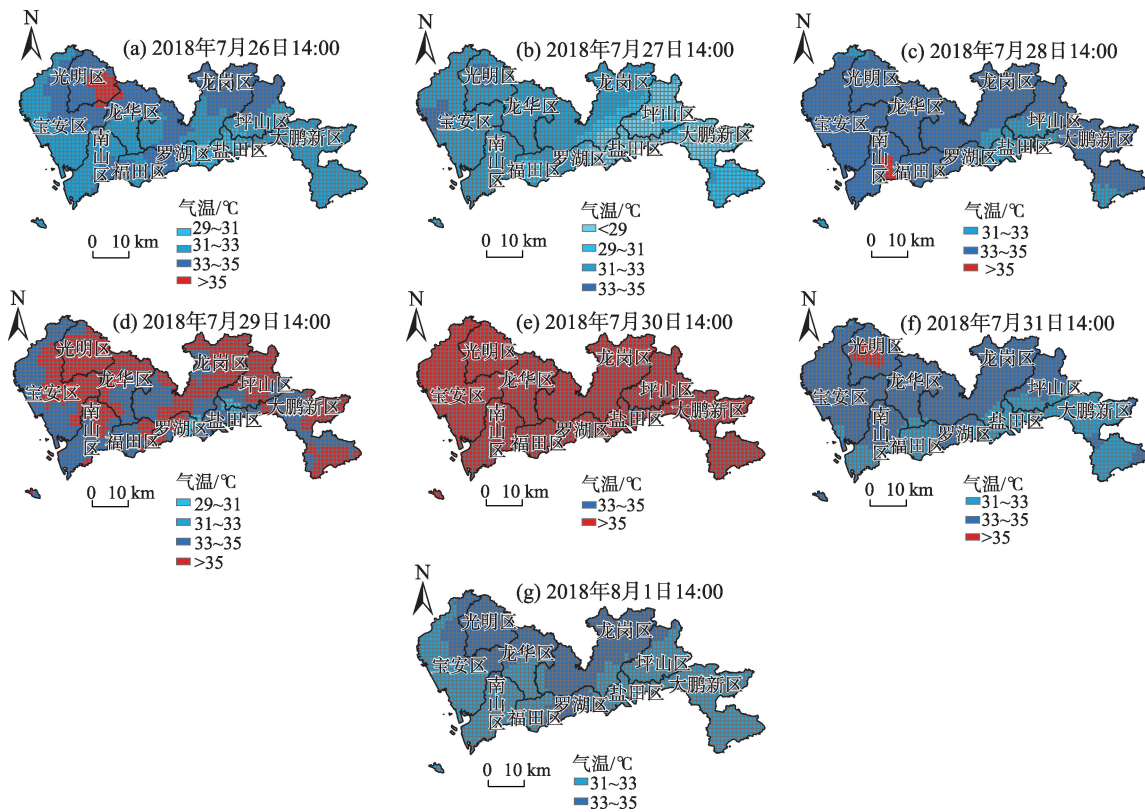


图3 热浪周期日内14:00时气温空间分布

Fig.3 Spatial distribution of diurnal temperature at 14:00 during the period of heatwaves

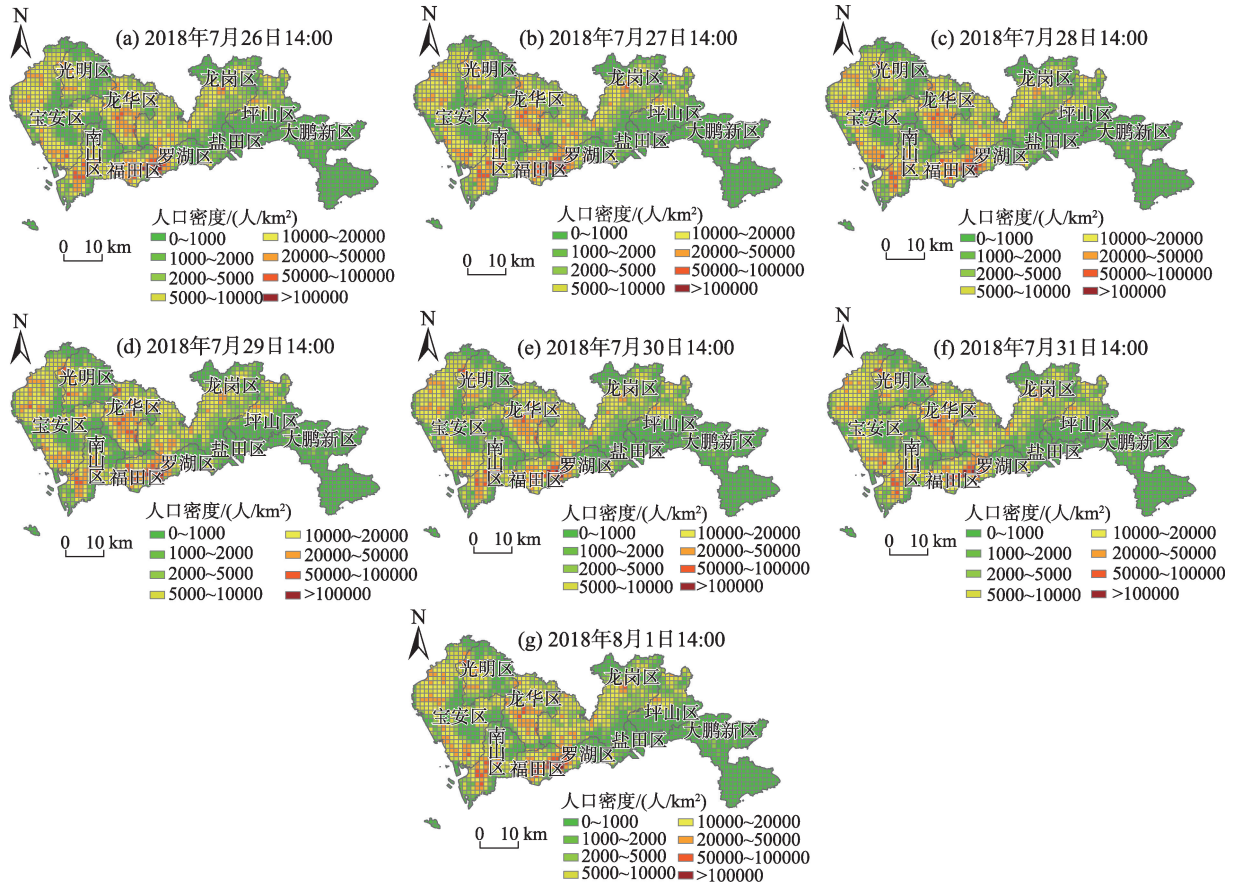


图4 热浪周期日内14:00时人口密度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of diurnal population density at 14:00 during the period of heatwaves

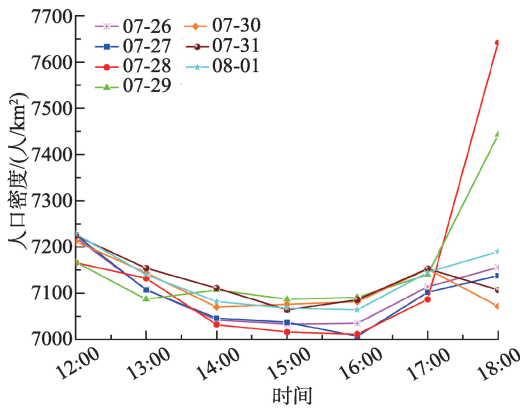


图5 热浪周期12:00~18:00逐时平均人口密度

Fig.5 Average population density from 12:00 to 18:00 during the period of heatwaves

### 3.3 热浪周期日内12:00~18:00逐时人口暴露度时空演化特征

为了阐明热浪周期内人口暴露度时空分布情况,本文将低于35℃的区域定义为热浪零暴露区,处于该环境下的人群则相应地被视作不会受到危害;同时在该时段部分热浪区域若存在无人分布的现

象,人口暴露度则计为0,最终将包含人口分布的热浪区域视作高暴露区,并对其进行了12:00~18:00逐时人口暴露度百分比分析,统计结果如表5所示。通过对比图6,判断动态人口逐时暴露度与逐时高温作用范围一致,最强热浪人口暴露度为7月30日,逐时平均人口暴露度百分比高达90.98%,其次为29、28日,逐时平均人口暴露度百分比分别为43.34%、6.28%,其余时段逐时平均暴露度较低或不

存在热浪暴露。以深圳市在该热浪周期日内14:00时气温、人口密度空间分布情况为背景,结合同时刻的人口暴露度空间分布(图6),发现热浪的后2日(7月29、30日),持续性热浪集中区如龙岗区龙城街道北部、坪山区坪山街道、石井街道西北部以及南山区西丽北等人口活动密度较低的区域,其人口暴露度不显著,逐时暴露度介于1~5000人/(km<sup>2</sup>·h);以华强北街道为中心的城市CBD、地铁、公交等轨道交通网络密集地,以及龙华街道西北部人口暴露度持续高于20000人/(km<sup>2</sup>·h),特别地,福田区园岭、华强北街

表5 热浪周期 12:00~18:00 逐时人口暴露度百分比  
 Tab.5 Percentage of population exposure from 12:00 to 18:00 during the period of heatwaves (%)

日期	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
2018-07-26	0	0	1.47	0	0	0	0
2018-07-27	0	0	0	0	0	0	0
2018-07-28	0	0	1.54	15.00	5.61	20.31	1.47
2018-07-29	0	0	45.12	93.26	93.17	70.69	1.16
2018-07-30	77.43	100.00	99.80	100.00	97.72	97.55	64.33
2018-07-31	0	0	2.43	0	0	0	0
2018-08-01	0	0	0	0	0	0	0

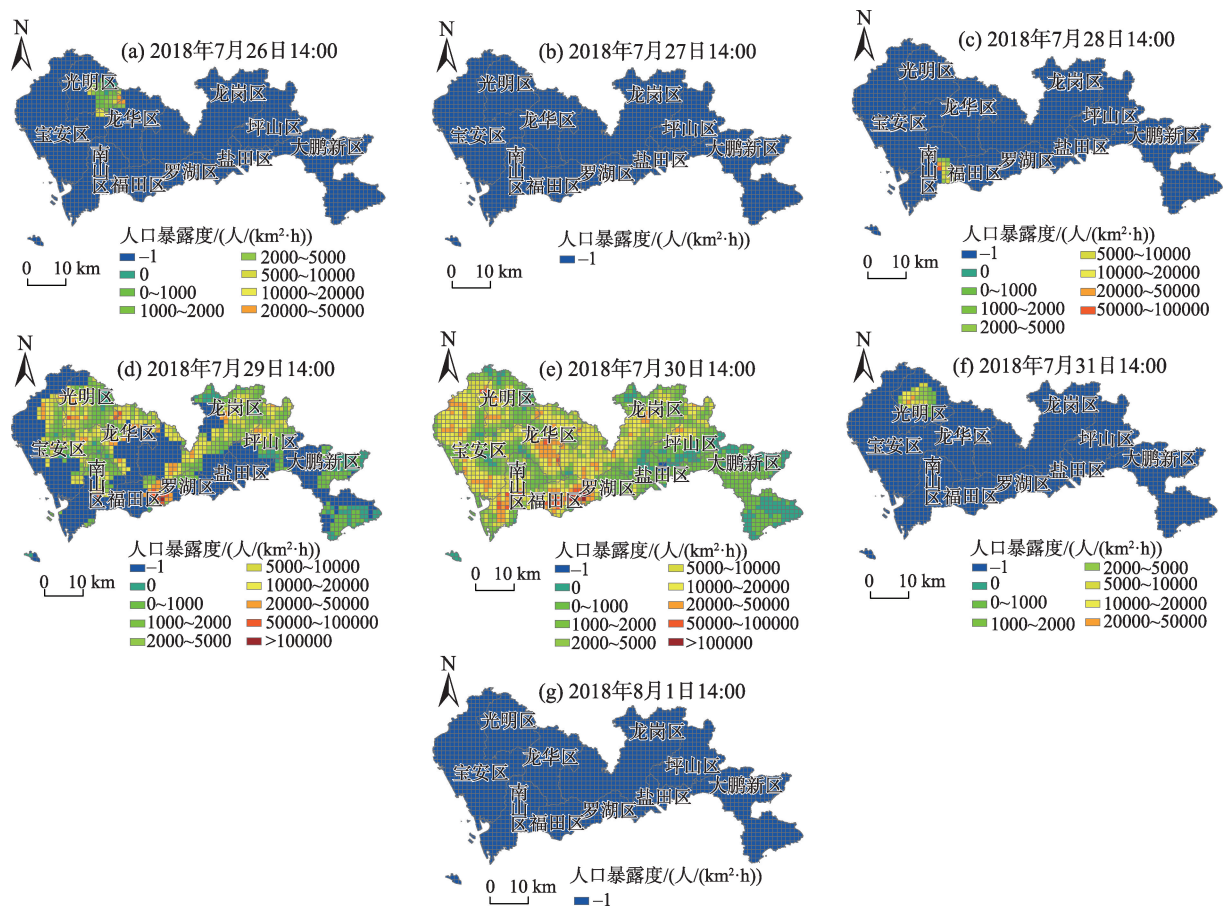
道以及罗湖区桂园街道覆盖区域人口暴露度始终高于 100000 人/(km<sup>2</sup>·h)。此外,大鹏新区尽管受热浪影响,但该地区在此时段的人口暴露度处于 0~1000 人/(km<sup>2</sup>·h)的较低水平态势,同时盐田区、罗湖区莲塘街道及龙岗区龙华街道东南部等区域虽然保持较高的人口密度,但该范围热浪效应不明显,平均气温较低,因此长时间受持续性热浪影响程度低。

### 3.4 城市POI对人口移动行为模式的影响分析

以人口分布为因变量,11类城市POI数据为解释变量,通过筛选得到交通设施、购物场所、科教文化、商务住宅、酒店住宿、金融服务以及公司企业7个最优解释变量集合。以此分时段进行地理加权回归分析,采用高斯核函数自适应方法、AICc 准则计算带宽建立了热浪周期 12:00~18:00 时段 7 个时刻共计 49 个模型,其模型校正 R<sup>2</sup> 变化特征如图 7 所示,所有模型中最低校正 R<sup>2</sup> 为 0.7740,且模型标准化残差在 0.05 显著水平下呈随机分布,拟合效果较好,最优模型的校正 R<sup>2</sup> 为 0.9084,表示模型最高能解释因变量(人口分布)总方差的 90.84%。

图 8 为地理加权回归模型中 7 类城市 POI 对人口移动行为的平均影响系数随时间变化规律,该系数表征了不同城市 POI 对居民在其间的移动交互影响程度,其主要变化规律为:

(1) 城市居民移动规律作为时间地理学和行为地理学研究的主要内容<sup>[6]</sup>,因人和环境而异的选择



注:图例中标注为“-1”所示区域表示热浪零暴露区。

图6 热浪周期日内 14:00 时人口暴露度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of diurnal population exposure at 14:00 during the period of heatwaves

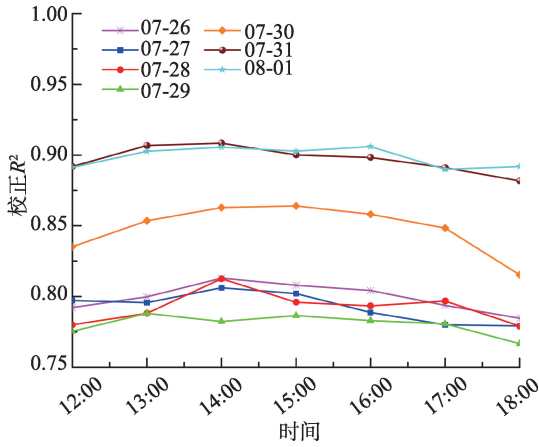


图7 热浪周期地理加权模型回归校正  $R^2$

Fig.7 The correction  $R^2$  of geographically weighted regression model during the period of heatwaves

最佳规避热浪进行降温的时间和方式显得重要,而居民通常以建筑为中心,并受建筑所承灾的运营功能吸引而形成不同的时空移动规律,客观上体现出城市建成环境与居民之间的相互作用<sup>[27]</sup>。在该热浪周期日内研究时段(12:00~18:00),酒店住宿影响系数存在明显的正负值差异,而基于该时段平均人口密度变化趋势(图5)可以发现,7月30日至8月1日3 d逐时平均人口密度均普遍高于其余4 d 同时

刻的值,因此认为酒店住宿为旅游休闲、商务出差、会议等人群提供的功能并不是直接吸引人口在热浪期间移动行为差异的原因。而购物场所(商场、超市、普通市场)在热浪的前2日影响系数较非热浪日对应的各时段并无显著区别,但平均影响系数在各时刻均远高于其余类型的POI,由于该设施能为城市居民提供购物、娱乐、休闲等多元化的生活服务功能,可以从侧面反映出该设施对人口活动具有明显的吸引力。此外,交通设施(停车场、公交站、地铁站等)、金融服务(ATM、银行、证券交易场所等)、公司企业等POI的影响系数无论发生热浪与否均无明显差异,尽管这类设施承载的功能具有一定的单一性和针对性,但其室内空间与购物场所类似,通常配备了相关的制冷降温设备,能在一定程度减少人群在移动交互行为中暴露于热浪的危险。

(2) 同类POI对人口的移动行为影响存在明显差异。购物场所、商务住宅以及公司企业3类POI的影响系数均在12:00和18:00形成该时段的波峰,在15:00达到波谷,对于购物场所,出现此情况的概因,认为除内部工作人员处于上班状态、较少使用移动设备外,非工作人群在其中进行相关活动时对于移动设备的依赖性减弱,而住宅区的居民在该时

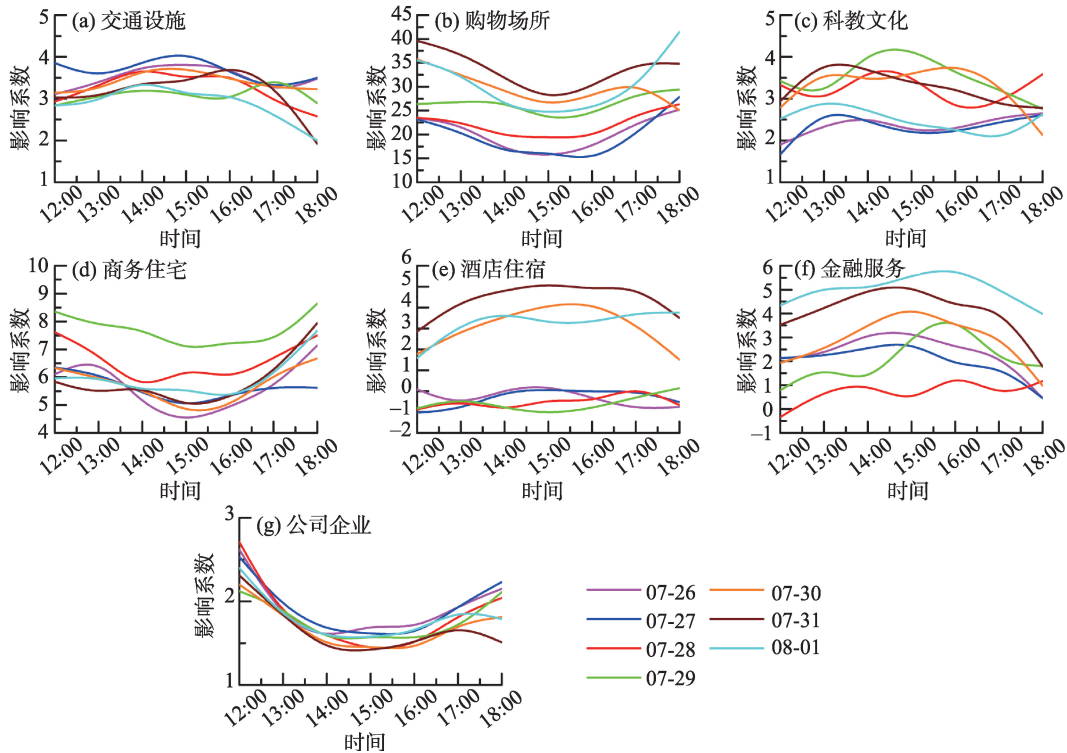


图8 12:00~18:00城市POI对人口移动行为平均影响系数

Fig.8 Average influence coefficient of points of interest (POIs) on population movement behavior from 12:00 to 18:00



段可能在午睡或者进行其他休闲活动,故影响系数会形成“U”形分布。特别地,无论热浪发生与否,公司企业的影响系数整体变化规律无明显差异,由于该时段属于正常的上班时间,说明工作人员在这期间使用移动设备的频率下降,但交通设施和金融服务则表现出与之相反的规律。科教文化在热浪前2日则呈现明显的“双峰”变化趋势,12:00下降,15:00再次达到峰值,这些差异客观反映出居民在同类设施中使用移动设备的规律。

(3) 不同类的POI在对人口移动行为的影响呈现不同的时段分异特征。从图8中可以看出,购物场所、商务住宅以及公司企业影响系数在12:00—18:00呈现“正U形”演变,而其余4类POI大致呈现“倒U形”变化。结合人口暴露度的时间演变规律可知,15:00刚好是热浪期人口暴露度的峰值,这说明在高温达到峰值之前以及峰值减弱后,室外暴露风险削弱,相应的POI对人口的移动吸引力增加;作为POI之间的交互通勤工具(私家车、公共交通、自行车等)以及就此产生的金融服务场所的吸引力也就形成与之相反的演变规律,同时这也反映出居民在城市POI之间的移动交互特性。

从上述规律可以看出,人群在热浪与非热浪期间在不同的POI之间的时空分布差异,客观反映了人群在不同POI区域之间的通勤移动活动的交互特征及选择偏好,在不同时段不同环境对其选择性行为存在互异的驱动机制,而这种人群在POI之间的时空聚集消散行为为城市的空间规划和利用赋予了灾害应急需求的属性。

## 4 结论和展望

本文选取深圳市作为热浪研究区,并假定其为一个全通勤平面,以2018年第三季度(7—9月)一次热浪事件为例,利用深圳市统计人口数据、逐时气温监测数据、逐时手机定位数据以及城市POI数据,并将后4类数据空间化至 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的网格中。基于高温分布特性与人口加权模型定性和定量分析了热浪影响下逐时人口暴露度情况,同时在此基础上建立逐时地理加权回归模型探寻了热浪环境下7类城市POI对人口移动行为的驱动机制,主要结论如下:

(1) 深圳市此次热浪事件存在较明显的时空分布差异,整体呈现爆发迅速且消退快的特点。此次

热浪日内高温集中于12:00~18:00,且辐射范围以西部高于东部、南部低于北部为主,沿海地区热浪持续时长不及内陆区域。大范围热浪从7月28日14:00开始,止于7月30日18:00,7月26日及7月31日仅在14:00出现极小范围热浪,其余时段均无明显热浪现象。以7月28日12:00~18:00为基准时段,平均热浪覆盖范围从7月29日14:00开始扩大,增速为8.66倍,至7月30日,增速为18.93倍,其平均波及范围占比高达88.68%。

(2) 在时间维度变化上,人口暴露度整体呈现先增后减的趋势。以7月28日12:00~18:00为热浪开始基准时段,人口暴露度在7月29日明显增加,逐时平均人口暴露度百分比增长了5.91倍,至7月30日达到90.98%的峰值,增加了13.50倍,总体呈2.29倍等比数列增长。在空间维度上,高人口暴露度集中于南山区、福田区、罗湖区等城市商业、工业、商务住宅等人口活动密集区,低暴露度则位于坪山区、盐田区、大鹏新区等沿海且多山区域。

(3) 热浪环境下7类主要城市POI对人口的移动行为驱动表现出明显的时序规律。同类POI在热浪与非热浪期的不同时段对人口的影响存在差异,不同类的POI在相同时段对人口的移动行为存在“正U形”与“倒U形”的演变规律,这些差异说明了人口应对热浪暴露影响时在不同的POI之间的移动交互行为存在选择偏好。而这种在居住地、工作地以及活动场所等之间的通勤行为时空分异及偏好,客观反映了城市基础设施布局对居民应对城市灾害有较大影响,因此根据城市灾害的人口高暴露热点区域及人口聚集消散时段,可为城市基础设施的合理配置及资源分配提供参考。

相较于以往基于行政单元,利用静态数据进行热浪人口暴露度的研究,本文采用多源城市数据,基于网格对人口加权的估算方法进行改进,得到的值介于统计人口与管理人口之间,能更加精细地反映实时人口的分布情况,同时引入城市POI对热浪人口行为驱动机制进行了初步探索,考虑到城市灾害的应急管理具有实时和及时的特点,研究方法对揭示热浪等城市突发灾害热点区域以及对人口暴露的影响具有实践指导意义。

然而,本文的研究还存在一些不足:①假定了研究区气温的时空分布演变不受城市下垫面的影响,即未将城市土地利用进行分类以及区分建筑室内外气温差异,因此得出的热浪人口暴露度比实际

情况更高;② 本文目前只考虑了将人口暴露度作为热浪危险性评价的指标,事实上热浪对人口的影响还与人群所处的实时环境(包括孕灾过程的气象、地理、社会人文因素)以及性别、年龄、职业、收入水平等关联。因此,基于本文的研究结果,在后续的研究中,将更加细致地综合评价热浪对人口暴露度的影响,其方法也能为其他类似的研究提供较好的研究模式参考。

### 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Geneva, Switzerland, 2014.
- [2] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century [J]. *Science*, 2004, 35: 994-997.
- [3] Lin L J, Ge E, Liu X P, et al. Urbanization effects on heat waves in Fujian Province, Southeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 210: 123-132.
- [4] 金星星, 祁新华, 陆玉麒, 等. 福建省高温热浪风险评估与空间分异研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1820-1829. [Jin Xingxing, Qi Xinhua, Lu Yuqi, et al. Evaluation and spatial differentiation of heat waves risk of Fujian Province. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(12): 1820-1829. ]
- [5] 聂羽, 韩振宇, 韩荣青, 等. 中国夏季热浪持续天数的年际变化及环流异常分析 [J]. *气象*, 2018, 44(2): 294-303. [Nie Yu, Han Zhenyu, Han Rongqing, et al. Interannual variation of heat wave frequency persistence over China and the associated atmospheric circulation anomaly. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(2): 294-303. ]
- [6] Stillman J H. Heat waves, the new normal: Summertime temperature extremes will impact animals, ecosystems, and human communities [J]. *Physiology*, 2019, 34(2): 86-100.
- [7] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 165-174. [Xie Pan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment: Research progress and framework. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 165-174. ]
- [8] 周洋, 祝善友, 华俊玮, 等. 南京市高温热浪时空分布研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(11): 1613-1621. [Zhou Yang, Zhu Shanyou, Hua Junwei, et al. Spatio-temporal distribution of high temperature heat wave in Nanjing. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(11): 1613-1621. ]
- [9] Founda D, Santamouris M. Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012) [J]. *Scientific Reports*, 2017, 27(1): 10973. doi: 10.1038/s41598-017-11407-6.
- [10] Zhao L, Oppenheimer M, Zhu Q, et al. Interactions between urban heat islands and heat waves [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 034003. doi: 10.1088/1748-9326/aa9f73.
- [11] 李双双, 延军平, 杨赛霓, 等. 1960—2016年秦岭—淮河地区热浪时空变化特征及其影响因素 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(4): 504-514. [Li Shuangshuang, Yan Junping, Yang Saini, et al. Spatiotemporal variability of heat waves and influencing factors in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016. *Progress in Geography*, 2018, 37(4): 504-514. ]
- [12] Savic S, Markovic V, Seceov I, et al. Heat wave risk assessment and mapping in urban areas: Case study for a midsized Central European city, Novi Sad (Serbia) [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(3): 891-911.
- [13] Lemonsu A, Vigiú V, Daniel M, et al. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France) [J]. *Urban Climate*, 2015, 14(4): 586-605.
- [14] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1041-1051. [Xie Pan, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1041-1051. ]
- [15] 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 等. 耦合适应力的福州市高温脆弱性评估 [J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 830-849. [Shui Wei, Chen Zhichun, Deng Jieming, et al. Evaluation of urban high temperature vulnerability of coupling adaptability in Fuzhou, China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 830-849. ]
- [16] Jones B, O'Neill B C, McDaniel L, et al. Future population exposure to US heat extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 652-655.
- [17] 黄大鹏, 张蕾, 高歌. 未来情景下中国高温的人口暴露度变化及影响因素研究 [J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1189-1200. [Huang Dapeng, Zhang Lei, Gao Ge. Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1189-1200. ]
- [18] 张蕾, 黄大鹏, 杨冰韵. RCP4.5情景下中国人口对高温暴露度预估研究 [J]. *地理研究*, 2016, 35(12): 2238-2248. [Zhang Lei, Huang Dapeng, Yang Bingyun. Future population exposure to high temperature in China under

- RCP4.5 scenario. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 35 (12): 2238-2248. ]
- [19] 金星星, 祁新华, 程煜, 等. 流动人口对高温热浪影响的感知与适应: 以福州市为例 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 111-117. [Jin Xingxing, Qi Xinhua, Chen Yu, et al. The perception and adaptation of floating population to heat waves: A case study in Fuzhou. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 32(4): 111-117. ]
- [20] 彭朝琼, 余淑苑, 廖玉学, 等. 深圳市2014年居民热浪期间适应性行为调查 [J]. 中国公共卫生, 2017, 33(5): 802-805. [Peng Chaoqiong, Yu Shuyuan, Liao Yuxue, et al. Adaptive behaviors during heat waves among residents of Shenzhen City, 2014. *Chinese Journal of Public Health*, 2017, 33(5): 802-805.]
- [21] Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, et al. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities [J]. *Environment International*, 2015, 75: 103-109.
- [22] Arbuthnott K G, Hajat S. The health effects of hotter summers and heat waves in the population of the United Kingdom: A review of the evidence [J]. *Environmental Health*, 2017, 16(S1): 119. doi: 10.1186/s12940-017-0322-5.
- [23] IPCC. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [24] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1475-1484. [Chen Qian, Ding Mingjun, Yang Xuchao, et al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11): 1475-1484. ]
- [25] 同丽嘎, 李雪铭, 斯琴, 等. 高温热浪暴露风险评价: 以内蒙古包头市为例 [J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 284-292. [Tong Liga, Li Xueming, Si Qin, et al. Risk assessment of population exposure to heat wave: A case of Baotou City, Inner Mongolia, China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 284-292. ]
- [26] 陈丽娜, 吴升, 陈洁, 等. 基于手机定位数据的城市人口分布近实时预测 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 523-531. [Chen Lina, Wu Sheng, Chen Jie, et al. The near-real-time prediction of urban population distributions based on mobile phone location data. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(4): 523-531. ]
- [27] 田俊荣, 刘泰山, 白之羽, 等. 鹏城展翅再高飞(壮阔东方潮, 奋进新时代: 庆祝改革开放40年) [N/OL]. 人民日报, 2018-05-21(1). [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2018-05/21/nw.D110-000renmrb\\_20180521\\_6-01.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2018-05/21/nw.D110-000renmrb_20180521_6-01.htm). [Tian Junrong, Liu Taishan, Bai Zhiyu, et al. Pengcheng spread wings and flew high again (Expanding the oriental tide, striving for the new era: Celebrating 40 years of reform and opening-up). *People's Daily*, 2018-05-21(1). [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2018-05/21/nw.D110-000renmrb\\_20180521\\_6-01.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2018-05/21/nw.D110-000renmrb_20180521_6-01.htm). ]
- [28] 俞文政, 刘海涛. 近35年深圳市气候变化与城市化发展的关联性 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 85-91. [Yu Wenzheng, Liu Haitao. Correlation between urbanization and climate change of Shenzhen in nearly 35 years. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 50(1): 85-91. ]
- [29] 百度地图, 中国城市规划设计研究院. 2018年Q3中国城市活力研究报告 [R/OL]. 百度地图慧眼. <http://huiyan.baidu.com/reports/2018Q3chengshi.html>. 2018-11-08. [Baidu Map, China Academy of Urban Planning & Design. China urban vitality research report, 2018Q3. Baidu Map Huiyan. <http://huiyan.baidu.com/reports/2018Q3chengshi.html>. 2018-11-08. ]
- [30] 百度地图, 中国城市规划设计研究院. 2018年第四季度&年度中国城市活力研究报告 [R/OL]. 百度地图慧眼. <http://huiyan.baidu.com/reports/2018nianduchengshi.html>. 2019-01-25. [Baidu Map, China Academy of Urban Planning & Design. China urban vitality research report, 2018. Baidu Map Huiyan. <http://huiyan.baidu.com/reports/2018nianduchengshi.html>. 2019-01-25. ]
- [31] 林琿, 张鸿生, 林殷怡, 等. 基于城市不透水面-人口关联的粤港澳大湾区人口密度时空分异规律与特征 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1644-1652. [Lin Hui, Zhang Hongsheng, Lin Yinyi, et al. Spatio-temporal changes of gridded urban population in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on impervious surface-population correlation. *Progress in Geography*, 2018, 37(12): 1644-1652. ]
- [32] 中国气象局. 高温科普五: 什么是高温热浪 [R]. 北京: 中国气象报社, 2011. [China Meteorological Administration. High temperature science five: What is high temperature heat wave. Beijing, China: China Meteorological News, 2011. ]
- [33] Cai J X, Huang B, Song Y M. Using multi-source geospatial big data to identify the structure of polycentric cities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 210-221.
- [34] Chen B, Song Y M, Jiang T T, et al. Real-time estimation

- of population exposure to PM<sub>2.5</sub> using mobile and station-based big data [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 573. doi: 10.3390/ijerph15040573.
- [35] 杨喜平, 方志祥, 赵志远, 等. 城市人群聚集消散时空模式探索分析: 以深圳市为例 [J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(4): 486-492. [Yang Xiping, Fang Zhixiang, Zhao Zhiyuan, et al. Exploring urban human spatio-temporal convergence-dispersion patterns: A case study of Shenzhen City. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(4): 486-492.]
- [36] 张子民, 周英, 李琦, 等. 城市局域动态人口估算方法与模拟应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(4): 503-509. [Zhang Zimin, Zhou Ying, Li Qi, et al. An estimation method of dynamic population within an urban local area. *Journal of Geo-information Science*, 2010, 12(4): 503-509.]
- [37] 吴健生, 李博, 黄秀兰. 小城市居民出行行为时空动态及驱动机制研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(2): 176-184. [Wu Jiansheng, Li Bo, Huang Xiulan. Spatio-temporal dynamics and driving mechanisms of resident trip in small cities. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(2): 176-184.]

## Population exposure to heatwaves in Shenzhen based on mobile phone location data

XIE Cheng<sup>1</sup>, HUANG Bo<sup>2,3,4\*</sup>, LIU Xiaoqian<sup>1</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Department of Geography and Resource Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;
3. Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;
4. Shenzhen Research Institute, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

**Abstract:** As one of the characteristic disasters of urbanization, heatwaves seriously affect the life and health of urban residents. Existing research on heatwaves mainly focuses on the spatial and temporal pattern based on static data, risk management, and vulnerability assessment, and studies on dynamic population exposure are relatively few. This study first integrated spatial and temporal distribution models of population and temperature hourly in Shenzhen to reveal the dynamic population exposure to heatwaves based on mobile phone location data. Then a set of geographically weighted regression models in different time were built based on seven types of points of interest (POIs) and population distribution to explore the influencing mechanisms of POIs on crowd behavior patterns during the heatwaves. The results show that: 1) Compared with the baseline (12:00 to 18:00 on 28 July 2018), the average radiation range of the heatwaves increases by 8.66 times on 29 July, and jumped to the peak of 18.93 times on 30 July from 26 July to 1 August 2018. The overall coverage shows that temperature in the west was higher than the east and temperature in the south was lower than the north. 2) Population distribution exhibited an obvious zonal distribution of aggregates in different time periods, and population exposure was closely related to the dynamic evolution of temperature and population. The population exposure was similar to that of heatwaves, showing 2.29 times proportional growth. The coverage included densely populated urban commercial, industrial, and residential centers such as Nanshan District, Futian District, and Luohu District. 3) The same type of POIs at different times and the different types of POIs at the same time showed obvious spatial-temporal differences as driving mechanisms and selection preferences in the interactive mobility behavior of reducing population exposure. Under the background of sustainable urbanization, this research can provide a scientific reference for the analysis of population exposure to similar urban hazards and disasters.

**Keywords:** mobile phone location data; heatwaves; population exposure; POI; geographically weighted regression; Shenzhen