

基于多源数据的城市时空加权人口活力探测及其影响因子分析

曹泳茵

广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年2月29日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年6月3日

摘要

针对城市活力研究缺乏考虑时空动态变化结合特征及影响人口活力的影响因子的MAUP问题的现状, 选取快速城市化的东莞市为研究区, 本文基于多源空间数据构建时空加权人口活力指数, 分析东莞市2021年人口活力时空格局特征, 并利用地理探测器模型探究15个自然-人文因子对人口活力强度的影响。研究表明: 时空加权人口活力指数方法相比热力平均值方法可以探测出更多的人口活力热点; 影响因子均具有尺度敏感性, 其中在大于500 m尺度时, 植被覆盖度、路网整合度和夜间灯光亮度等因子对于尺度变化更为敏感; 在500 m尺度以下时, 影响人口活力分布的三个主导因子为POI密度、功能混合度以及离公交站的距离; 社会经济活动强度越高、土地利用的混合度越低、交通可达性与流通性越大、土地利用类型较少且不单一、距离公共服务设施越近的区域人口活力越大。

关键词

城市活力, 时空格局, 影响因子, 地理探测器, MAUP

Urban Spatio-Temporal Weighted Population Vitality Detection and Its Influencing Factor Analysis Based on Multi-Source Data

Yongyin Cao

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Feb 29th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: Jun. 3rd, 2024

Abstract

In view of the lack of consideration of the MAUP problem of the combination characteristics of spatio-temporal dynamic changes and the influencing factors affecting population vitality, Dongguan City with rapid urbanization was selected as the research area. Based on multi-source spatial data, this paper constructed a spatio-temporal weighted population vitality index to analyze the spatio-temporal pattern characteristics of population vitality in Dongguan City in 2021. The effects of 15 natural and cultural factors on population vitality were explored by using a geographic detector model. The results show that the spatio-temporal weighted population vitality index method can detect more population vitality hotspots than the thermal mean method. The influencing factors were sensitive to scale change, and vegetation coverage, road network integration and night light intensity were more sensitive to scale change when the scale was more than 500m. Below 500m scale, POI density, functional mixing degree and distance from bus station are the three leading factors affecting population vitality distribution. The higher the intensity of social and economic activities, the lower the mixing degree of land use, the greater the accessibility and circulation of transportation, the less land use type but not single, and the closer to public service facilities, the greater the population vitality.

Keywords

Urban Vitality, Spatio-Temporal Weighted Population Vitality Index, Influencing Factor, Geographical Detector, MAUP

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“活力”源于生物学中表示生物维持生存的能力，后被引入城市规划领域，城市活力定义广泛多样且不断被更新完善，但是城市活力关键离不开人的行为活动，人类活动反映了人类参与城市生活的程度。Jacobs (1961)认为，城市必须有足够密集的人口集中才能实现城市活力。由于人类集聚和活动的程度的不同，城市存在着活力分布的空间分异[1]。我国城市化正处于高速发展时期，随之而来的是更加多元化的城市问题：城市收缩，“鬼城”，城市用地扩张过快和利用低效，公共资源配置不平衡，职住失衡等问题[2] [3] [4] [5]。随之导致的是城市活力的减退，城市活力是城市发展的重要指标与动力。评价城市活力一直是一个难题，在城市不断发展的过程中，人口也随之发展，为了让城市在更新背景下得到更好的发展，需要探测新的人口活力，激发新的城市活力，探究人口活力及其影响因素有助于提升城市活力。

目前国内有关城市活力研究的主要内容包括：一是运用深度学习或空间句法等各种模型分析方法挖掘时空大数据中的人口活力规律，对人口活力进行定量评价研究；二是运用不同的研究视角对活力空间进行研究。随着大数据的发展，兴起了利用手机信令数据、社交媒体数据等时空大数据对城市人口活力进行研究。早在2012年汪海、蒋涤非发表了国内第一个最完善的城市空间活力评价体系，基于问卷调查，从感官、社会、经济和文化4个角度遴选出城市公共空间活力影响因子，运用层次分析法和专家评分法，量化城市公共空间活力评价体系[6]；龙瀛等基于街道城市主义构建了街道活力定量评价的指标体系[7]；Pan等通过夜间灯光数据、兴趣点和统计数据基于偏最小二乘结构方程模型对成渝地区双城的城市活力驱动机制进行识别与分析，认为内外要素共同构成城市活力驱动机制，环境活

力和社会活力是提升活力的关键因素[8];学者们已在北京、上海、南京、武汉等大城市进行相关城市活力研究,如 Fan 等利用百度热力图(BHM)作为南京长江沿岸城市活力表征,使用 OLS 和 GWR 模型揭示城市滨水建筑环境对城市活力的有积极影响[9];Shi 等从经济、社会和环境三个方面选取评价指标采用偏差最大化法(DM)对上海市 2010 年~2019 年城市活力进行综合评价[10];学者们基于不同城市空间结构和组成评价城市活力,Yue 等以胡志明市和上海为例,基于人类活动、建筑环境及其关联的三个维度,采用投影寻踪模型对城市活力进行测量,并分析其空间格局[11];Xia 等在中国 15 个特大城市中探索多维城市形态与城市活力在街道层面的关系,通过城市规划、建筑形态和土地利用三个方面量化城市形态,利用餐厅数据和夜间灯光衡量活力,表明连通性、紧凑性、建筑布局、标志性建筑、交通设施、开放和绿色空间对城市活力至关重要[12];Cao 等利用人口数据和 POI 数据分析不同周边环境对城市活力的影响[13];许钊等基于城市网络分析(UNA)和 GWR 采用控制变量法分析武汉市中心城区道路网络中心性对人口活力的影响[14];吴志强等利用百度热力图进行上海中心城区的城市空间结构研究[15]。

可变量元问题(Modifiable areal unit problem, MAUP)指的是分析结果随着基本单元定义的不同而变化的问题,包括尺度效应和划区效应。最早被应用于生物多样性的研究中[16],有关 MAUP 的城市研究有:Gao 等利用地理探测器研究深圳市无桩共享单车使用的 MAUP 和 BE 因子的交互作用[17];Zhou 等利用移动定位数据探究 MAUP 对华南地区就业自我遏制(ESC)和职住平衡(JHB)空间变化的影响[18];齐丽丽等利用社会经济统计数据探测不同尺度下其热点的变化规律及其影响因子的 MAUP 效应[19]。

有关城市活力的研究已取得较为丰富的成果,但以下两个方面尚缺乏研究。一是大部分研究容易忽略城市活力的时空动态变化特征,有关城市时空人口活力研究较少;二是研究容易忽略城市人口活力影响因素在尺度上的变化,有关其在 MAUP(可塑性面积单元问题)会如何表现的研究尚少。

本文将百度热力图所反映的人口热力强度作为识别城市人口活力热点区域的依据,给予人口活力一个时间的权重,构建时空加权人口活力指数来代表人口活力强度,解决由于时间尺度上城市中不同功能区域对于人口活力的影响导致的误差问题。利用热点分析方法从全局与局部对时空加权人口活力进行时空特征分析;其次,基于地理探测器与多尺度地理加权回归模型,量化分析在多尺度下人口活力及本文选取的影响人口活力强度的 15 个影响因子之间关系的变化。

2. 研究区概况与数据源

2.1. 研究区域概况

本文选取东莞市主城区作为研究区域,东莞市是广东省辖地级市、特大城市,国务院批复确定的珠江三角洲东岸中心城市。从地理位置上看,东莞市位于珠江口东岸,北与广州、惠州两市接壤,南接深圳市,是粤港澳大湾区的重要节点城市,下辖 4 个街道(莞城、南城、东城和万江)、28 个镇,总面积达 2465 Km²。东莞作为粤港澳大湾区最中心的位置,东莞的一小时生活圈可以到达粤港澳大湾区的任何一个城市,东莞正好是处在广东省内两大城市广州与深圳之间。从城市发展看,在 2021 年度全国城市人口吸引力 TOP300 榜单中,除北上广深以外,东莞市位居第五,城市化程度较高。在《2021 城市商业魅力排行榜》中,作为 15 个新一线城市之一的东莞市,城市人口活跃度较高。

2.2. 数据来源及预处理

本文主要使用数据包括基础地理数据与网络开源数据两种类型数据,基础地理数据包括行政区划数据、东莞市路网、东莞市哨兵 2 号遥感影像、东莞市夜间灯光遥感数据[20],本文将数据投影为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影坐标系;网络开源数据如表 1,包括百度热力图、POI 数据、土地利用数据、合成孔径雷达数据等。考虑到周期相似性,本文选取 2021 年 2 月 2 日(工作日)和 2021 年 4 月 17

日(休息日)两天分别代表工作日和休息日,通过爬虫程序对热力图数据进行获取,截取时间为一天的7点至24点,间隔为1小时。该时间内未发生公共卫生事件或极端天气等影响人群活动的重大事件,数据具有一定的代表性。

Table 1. Data sources

表 1. 数据来源

数据类型	数据名称	格式	有效数据量	来源介绍
网络开源数据	东莞市百度热力图	栅格	36幅	百度地图热力图简称百度热力图,来源百度地图开放平台,是一款以LBS平台(主要为百度系APP产品)手机用户的地理位置数据为基础,呈现用户在区域范围内实时的聚集程度的大数据可视化产品,可以反映城市人口的活动集聚范围与集聚强度。
	东莞市POI数据	矢量	47,826条	高德地图
	东莞市土地利用数据	矢量	1景	欧洲航天局(ESA)2020年WorldCover数据集全球10m分辨率的地表覆盖数据(https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover)
	东莞市合成孔径雷达数据	栅格	2景	欧空局哥白尼数据中心 https://scihub.copernicus.eu/

本文获取2021年东莞市主城区POI数据用于POI的密度与功能混合度计算。根据高德开发平台上正式发布的POI分类对照表以及城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137-2011),对POI数据进行重分类,分为公共服务类、风景名胜类、餐饮服务类、生活服务类、居住类、商务类、学校、医院、休闲娱乐类等9类,总计47,826条数据。

Sentinel-1A星载合成孔径雷达影像数据用于提取建筑区数据,影像的成像模式为干涉测量宽幅模式(IW),分辨率为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$,极化方式为VV极化,成像时间分别为2020年6月12日与2020年6月24日。使用不同时间、同一地区的2幅SAR影像进行干涉测量,可以对地表变化进行检测。在城市中,区域内相干值越高,说明该区域地物状况越稳定,则存在着稳定的建筑区域;越低,则代表着该区域地物变化较大,可能为车道、岩石草木、水域等[21]。先使用对2幅影像进行干涉计算,再对干涉图进行去平,去除平地效应造成的影像(图1(a));接着对相干值 γ 使用ANLS(Adaptive Non Local SAR Filtering, ANLS)滤波进行处理(图1(b)),加权去噪的迭代次数为3次,去除斑点噪声,得到完成滤波的相干值 γ ,代表着该区域的建成程度。设定相干值 γ 阈值 $=TV_\gamma$ 为0.5, $\gamma > 0.5$ 的区域为建成区,得到了二值化的相干值 γ_b (图1(c)),其中黑

$$\gamma_b = \begin{cases} 1, \gamma \geq TV_\gamma \\ 0, \gamma < TV_\gamma \end{cases} \quad (1)$$

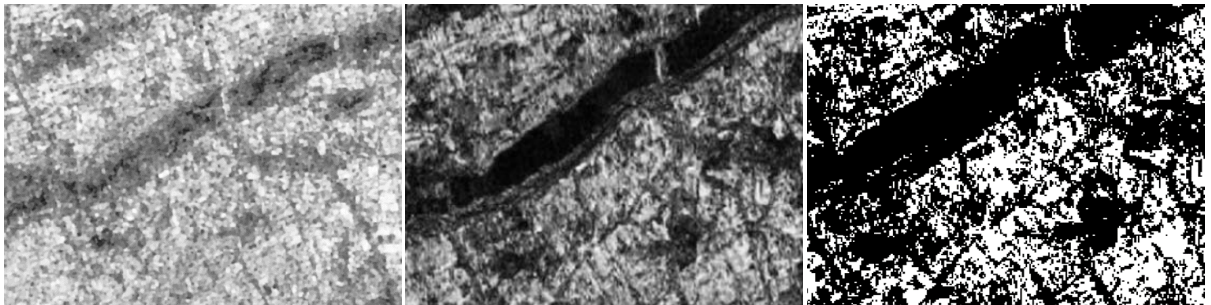


Figure 1. Extraction of built-up areas using Sentinel 1 data; (a) Goldstein; (b) ANLS; (c) Binarized built-up areas

图 1. 利用哨兵 1 号数据提取建筑区; (a) Goldstein; (b) ANLS; (c) 二值化建成区



Figure 2. Dongguan main city building area extraction results

图 2. 东莞主城区建筑区提取结果图

色区域代表水体和非建筑区，白色代表建筑。东莞主城区建筑区提取结果如图 2。

3. 研究方法

3.1. 时空加权人口活力指数

已有研究表明，城市中居民不仅一日之内，而且在一周的工作日与休息日之间的时空行为存在差异 [22] [23] [24]，人口活力的差异性主要体现在时间维度与空间维度上。

从时间维度上看，工作日的白天与夜间，休息日的白天与夜间四个时段的人口活力具有差异性；从空间维度上看，受到通勤等人口维持生计与进行户外活动的地点与居住地点之间的位置不同影响，同一时间内不同的城市功能区的人口活力具有差异性。为综合考虑城市人口活力的时空尺度差异性，本文构建时空加权人口指数来定量分析城市人口活力强度，进行人口的时空活力探测。

3.1.1. 热力平均值指数

热力平均值是指某段时间范围内的栅格(区域)热力值的平均值，其数值与人口数量成正比，构建的指数如公式(2)所示，依据不同的时间段划分热力平均值的计算公式如表 2 所示：

Table 2. Calculation formula for the average value of heat

表 2. 热力平均值计算公式

类型	时段	热力平均值计算公式
工作日	日间(07:00~17:00, 共 11 h)	$\bar{M}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{11} H_{i1}}{11}$
	夜间(18:00~24:00, 共 7 h)	$\bar{M}_2 = \frac{\sum_{i=1}^7 H_{i2}}{7}$
休息日	日间(07:00~17:00, 共 11 h)	$\bar{M}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{11} H_{i3}}{11}$
	夜间(18:00~24:00, 共 7 h)	$\bar{M}_4 = \frac{\sum_{i=1}^7 H_{i4}}{7}$

$$\bar{M}_j = \frac{\sum_{i=1}^n H_{ij}}{n} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,3,4) \quad (2)$$

式中： \bar{M}_j 表示某区域 j 时段的热力平均值； j 代表不同的时间段，当 $j=1$ 表示工作日日间时段，当 $j=2$ 表示工作日夜间时段，当 $j=3$ 表示休息日日间时段，当 $j=4$ 表示休息日夜间时段。 i 表示时刻。 H_{ij} 表示 j 时段 i 时刻该区域的热力值。其中日间时段为7点~17点(共11个小时)，夜间时段为18点~24点(共6小时)。

3.1.2. 时间权重指数

区域人口集聚现象受区域功能与时间影响，具有“潮汐效应”。这类波动区域，如政府工作部门、医院门诊部等，它们在局部时段中的高人口活力强度反映了这些区域承担了相应的城市功能，产生了应有的经济、社会价值，但其功能特征导致这些区域的人口活动强度具有“潮汐效应”。若对时空人口热力进行平均计算，会导致工作时段的人口集聚峰值被非工作时段的人口活动低值所抵消，会导致其被误判为低活力区域。本文通过时间权重的方法解决“潮汐效应”带来的人口活力误判问题。本文将全天划分为日间时段为7点~17点(共11个小时)，夜间时段为18点~24点(共6小时)，共划分出工作日日间时段，工作日夜间时段，休息日日间时段，休息日夜间时段四个时段。时间权重是指某一指定区域内在某一时段的热力值占总时段的热力值的比值(公式3)。

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^n H_{ij}}{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n H_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,3,4) \quad (3)$$

式中： j 代表不同的时间段，当 $j=1$ 表示工作日日间时段，当 $j=2$ 表示工作日夜间时段，当 $j=3$ 表示休息日日间时段，当 $j=4$ 表示休息日夜间时段。 i 表示时刻， H_{ij} 表示 j 时段 i 时刻该区域的热力值。

3.1.3. 时空权重人口活力指数

由于人口在休息时段时活力范围变化较为集中，不纳入活力时段考虑范围，本文将人口活动的时间定为人口活力更为丰富的日间时段的7点~17点(共11小时)，夜间时段的18点~24点(共7小时)，总共18小时。工作日的城市居民受到工作时间的约束，周一至周五的热力值数据呈现较大的相似性，休息日的居民活动在时间轴上出现整体向后偏移的现象[25]。本文获取2021年2月2日(工作日)和2021年4月17日(休息日)两天的百度热力图数据为例进行分析，时间区间为7点~24点，间隔为1小时。将四个时段的时间权重指数与热力平均值指数相乘，得到城市时空加权人口活力指数(公式4)。

$$VI = \sum_{j=1}^4 a_j * \bar{M}_j \quad (j=1,2,3,4) \quad (4)$$

式中， VI 代表时间权重人口活力指数， \bar{M}_j 表示某区域 j 时段的热力平均值， a_j 代表时间权重指数， j 代表不同的时间段。

3.2. 影响因子指标计算

根据前人研究，本文选取了15个人口活力影响因子指标，见表3。

3.2.1. 植被环境因子分析

归一化植被指数(NDVI)常用于精准农业与测量生物量，本文利用NDVI提取植被覆盖度，量化城市的植被环境(公式5)。

Table 3. Selection of indicators of factors influencing population vitality
表 3. 人口活力影响因子指标的选取

一级指标	二级指标	三级指标	代号	
自然因素	植被环境	X1: 植被覆盖度	NDVI	
		X2: POI 密度	POI 密度	
	社会经济活动	X3: POI 功能混合度	POI 功能混合度	
		X4: 夜间灯光亮度	NLI	
		X5: 斑块丰富度指数	PR	
		X6: 蔓延度指数	CONTANG	
		X7: 斑块聚集度指数	AI	
	土地利用混合度	X8: 辛普森多样性指数	SIDI	
		X9: 整合度	NQPDA	
		X10: 穿行度	TPB	
	人文因素	交通特性	X11: 距离公交车站距离	bus
			X12: 距离地铁站距离	metro
		公共设施服务	X13: 建筑斑块密度	PD
			X14: 距离公园距离	Parks
			X15: 距离停车场距离	Parking

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

式中, $NDVI$ 表示植被覆盖度, NIR 表示近红外波段的反射值, R 为可见光红光波段的反射值。当 $NDVI$ 值为负数时, 可能是水体。另一方面, 如果 $NDVI$ 值接近 +1, 则可能是茂密的绿叶。当 $NDVI$ 接近于零时, 没有绿叶, 可能是不透水面区域。

3.2.2. 社会经济活动因子分析

1865 年德国物理学家克劳修斯提出了熵的概念, 熵表示的是一个系统内在的混乱程度, 信息熵是 C.E. Shannon (香农) 在 1948 年将热力学中熵的概念引入到了信息论中提出的概念, 为解释信息的信源的不确定性, 信息熵计算公式:

$$S(p) = -k \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \quad (6)$$

$S(p)$ 表示随机变量 p 的熵; P_i 为 p 取 P_i 的概率, 某件事情发生的概率, 即为在单位区域内某类功能的 POI 所占据该单位区域的总 POI 数量的比例。熵值越大, 不确定性越大, 即某类功能的 POI 所占比例越小, 则 POI 点功能混合度越大; 反之, 则越小。有研究表明, 中心城区整体功能混合程度较高[26], 则功能混合度越大, 表明越接近城市的中心区域, 本文通过计算 POI 点功能混合度来识别主城区的中心区域。核密度估计可以表示为:

$$f(d) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^2} k \left(\frac{d - C_i}{h} \right) \quad (7)$$

式中, $f(d)$ 为空间位置 d 处的核密度计算函数; h 为距离衰减阈值(即带宽, 本文设置为 500 m); n 为与位

置 d 之间距离小于或等于 h 的要素点数; k 函数表示空间权重函数。本文采用核密度分析对 POI 点分布热点进行探测, 设置像元大小 20 m, 搜索半径 500 m, 核密度值越大, 表示在该像元单元中 POI 点越多。

3.2.3. 土地利用混合度信息提取

土地利用的多样性在一定程度上决定了街道功能的多样性[27], 土地利用混合度对于研究人口活力的有一定的价值, 已有研究中有学者采用生物多样性指数度量土地利用混合度情况, 宁晓平通过 Hill Numbers 多样性指数可以从土地利用种类的丰富度、无序性以及聚集度三个方面度量土地利用混合情况[28]。王军等从斑块类型丰富度、多样性和均匀度指数描述景观多样性[29]。本文选取了聚集度指数、蔓延度指数、辛普森多样性指数以及丰富度指数四个与土地利用混合度相关性较大的景观指数以及用于描述建成环境中建筑密度的斑块密度指数。本研究利用土地利用数据包括树木、灌木、绿地、林地、建筑、

Table 4. Landscape pattern index
表 4. 景观格局指数

计算尺度	景观指数	计算公式及含义	取值
类型/景观	聚集度指数 (AI)	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max_{i \rightarrow j} g_{ij}} \right] (100) \quad (8)$ <p>反映了某一类型的斑块的集聚程度, 用于描述土地利用某种类型的集聚度, 如果景观是由许多离散小斑块组成, 则聚集度就小, 反之如果景观以少数大斑块为主或同一类型的斑块高度连接时, 聚集度的值就大, 因此聚集度指数能反映景观组分的空间配置特征。</p>	0~100
	斑块密度指数 (PD)	$PD = \frac{N}{A} \quad (9)$ <p>式中, PD 表示斑块密度, N 表示区域中 i 类型斑块的数量, A 表示区域总面积。用于描述建筑的景观破碎度, 即建筑密度。</p>	≥ 0
景观	蔓延度指数 (CONTAG)	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right] \times \left[\ln p_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln m} \right] \times 100 \quad (10)$ <p>式中, p_i 为 i 类景观的比重, m 为当前斑块的数量, g_{ik} 为斑块类型 i, k 两者的连接系数。用于分析景观格局中的不同斑块的集聚或扩散程度, 土地利用类型中不同类型斑块的集聚或扩散程度。聚集度越小, 土地利用混合度越大。</p>	0~100
	辛普森多样性指数 (SIDI)	$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (11)$ <p>式中, P_i 是斑块类型 i 在景观中出现的频率, s 是景观中斑块类型的总数。用于表示土地利用类型的分布均匀性, 其值越大, 则其组成的复杂性越大, 空间分布越均匀。</p>	≥ 0
	斑块丰富度指数 (PR)	$R = M \quad (12)$ <p>式中, M 为景观中斑块类型的数目。景观丰度反映景观中所有的斑块类型的总数。用于表示土地利用类型的数量, 丰富度越大, 土地利用混合度越大。</p>	≥ 1

裸地、水体、湿地八种类型反映城市物理环境特征, 经过目视解译以及精度验证后, 本文利用 Fragstats 4.2 软件计算的城市景观格局指数如表 4 所示, 获取土地利用混合度和建筑密度。

3.2.4. 交通特征分析

空间句法是在 20 世纪 80 年代由伦敦大学 Hillier 等人提出并发展起来的, 最初用于研究人在城市系统中的空间行为, 通过各种指标来度量城市空间的可达性, 本文利用扩展空间句法(Spatial Design Network Analysis, sDNA) [30], 对于东莞市主城区路网进行空间句法分析, 量化交通可达性与流通性等特征, 采用因子如表 5。

Table 5. Traffic Characterization Factor

表 5. 交通特征因子

指数	计算公式及含义
整合度	<p>整合度(NQPDA)指的是, 在一个小尺度空间里面与其他空间联系的紧密程度的大小。在路网中整合度代表某路网到搜索半径内其余路网的难易程度。整合度越高, 衡量了一个空间作为目的地吸引到达交通的能力越强, 表明该地区具有较高的拓扑整合能力、可达性或中心性, 对人流出行具有更大的吸引力。计算公式如下:</p> $NQPDA(X) = \sum_{y \in R_x} \frac{p(y)}{d(x, y)} \quad (13)$ <p>式中, $p(y)$ 为搜索半径 R 内节点 y 的权重, 在连续空间分析中, $p(y) \in [0, 1]$, 在离散空间分析中, $p(y)$ 取值为 0 或 1; $d(x, y)$ 为节点 x 到节点 y 的最短拓扑距离。搜索半径 R 设置为 500 m。</p>
穿行度	<p>穿行度(TPB)是对路网中被交通流穿行和通过的能力进行评估, 穿行度越高, 代表着路网的通过性越强, 承载着更多的通过性人车流, 具有较强的穿行性或流通性。</p> $OD(y, z, x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 位于 } y \text{ 到 } z \text{ 最短路径上} \\ \frac{1}{2}, & x \equiv y \neq z \\ \frac{1}{2}, & x \equiv y \equiv z \\ \frac{1}{3}, & x \equiv y \equiv z \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (14)$ $TPB_i(X) = \sum_{y \in I} \sum_{z \in R_y} OD(y, z, x) \frac{P(z)}{Links(y)}$ <p>式中, $OD(y, z, x)$ 为搜索半径 R 内通过节点 x 的节点 y 与 z 之间最短拓扑路径; $TPB_i(X)$ 为节点 x 的穿行度; $Links(y)$ 为每个节点 y 搜索半径 R 内的节点总数。</p>

3.2.5. 建成环境与公共服务设施因子分析

空间格局常在景观生态学中对具有空间异质性的生态学变量进行研究时使用。广义的空间格局包括景观组成单元的类型、数目以及空间分布与配置[31]。建筑的分布受到地形、规划、经济环境等因素的影响, 而这些因素也具有环境异质性, 导致建筑分布也具有空间异质性, 因此建筑的空间格局特征也能反映出一定的城市规划与建设过程。本文使用斑块密度(Patch Density, PD)对建筑斑块的空间格局进行量化, 衡量区域内的建筑环境。

本文利用欧氏距离分析公园、停车场、公共汽车站点、地铁站等人口活动密集的场所的每个要素类点到最近源的距离, 考虑到人的行动范围, 本文设置最大距离为 500 米, 即累积距离值不能超过的阈值,

超过该值则说明该点距离源大于 500 米则输出值为空，设置为 0 级。

3.3. 数据格网化

数据格网化处理是一种较为常见的数据离散化方法，地理格网作为一种统计分析的基础单元，将各类自然、人文要素信息集中到统一的单元中，实现多源、多尺度信息的融合与分析[32]。本文采用矩形规则格网作为基本格网单元，对数据进行格网化处理后，再放入地理探测器模型与多尺度地理加权回归模型中进行分析，且为研究 MAUP 问题，模拟在多尺度下影响人口活力的影响因子的影响力变化做了铺垫。

3.4. 地理探测器

地理探测器是中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰研究团队开发的，是探测地理要素的空间分异性及其解释影响因子的驱动机理的一种空间统计学方法[33]。使用模型包括：

1) 因子探测：用于探测城市中人口活力的各类潜在因子 X 对时空加权人口活力指数 Y 的解释力度，用 q 值来度量，计算公式见公式 15：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (15)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2$$

式中，q 的值域为[0,1]，q 值越大，则表示该影响因子对城市研究区内人口活力的空间格局的影响力越大，解释力越强，反之则弱，q = 0 则说明两者无任何关联；h = 1, ..., L 为潜在因子的子区域数量；N_h 和 N 分别为子区域样本数与全区域样本总数；SSW 和 SST 则分别代表子区域的方差之和与全区域的总方差。

2) 风险区探测：用于评估两个不同人口活力潜在影响因子的子区域间的属性均值是否存在差异，用 t 值进行检验(公式 16)：

$$t_{\bar{y}_{h=1} - \bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (16)$$

式中， \bar{y}_h 代表子区域 h 内人口活力强度属性均值， n_h 为子区域 h 的样本个数，Var 则为方差。地理探测器要求输入变量为分类变量，即需对输入的连续型数据进行离散化处理。基于王劲峰等提出的数据离散化方法，本研究采用自然断点法对各影响因子的连续型数据进行离散化处理，将其分为 8 类。使用 ArcGIS Pro 2.8 中的 Create Fishnet 功能生成间隔为 100~1000 m 的渔网点数据，采样后提取变量数据至点，使用因子探测器与风险探测器模型对时空加权人口活力及其影响因子进行分析。

3.5. 多尺度地理加权回归(MGWR)

1997 年，Fotheringham 等提出地理加权回归模型，是处理空间异质性的主要方法之一，但是该方法具有一定的局限性，故 Fotheringham 等在 2017 年基于广义加性模型提出了多尺度地理加权回归，该方法不同于地理加权回归对于各个变量采用的最优带宽是相同的，而是对于不同自变量采用各自最优的带宽进行回归分析，从不同的空间尺度上解决问题[34]。

多尺度地理加权回归模型，如下公式 17：

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{boj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (17)$$

式中, $b\omega_j$ 代表了第 j 个变量回归系数使用的带宽。

4. 结果分析

4.1. 人口活力时空格局

4.1.1. 人口活力时空分析

为了进一步研究人口活力的时间和空间变化状况, 本文计算出时空加权人口活力指数对人口活力进行分析。图 3(a)和图 3(b)分别为早晨 8 点及下午 15 点人口热力分布, 对早晨 8 点到晚上 11 点时段的热力计算平均值后的可视化结果如图 3(c), 利用 ArcGIS Pro2.8 对时空加权人口活力指数计算并可视化结果如图 3(d)。

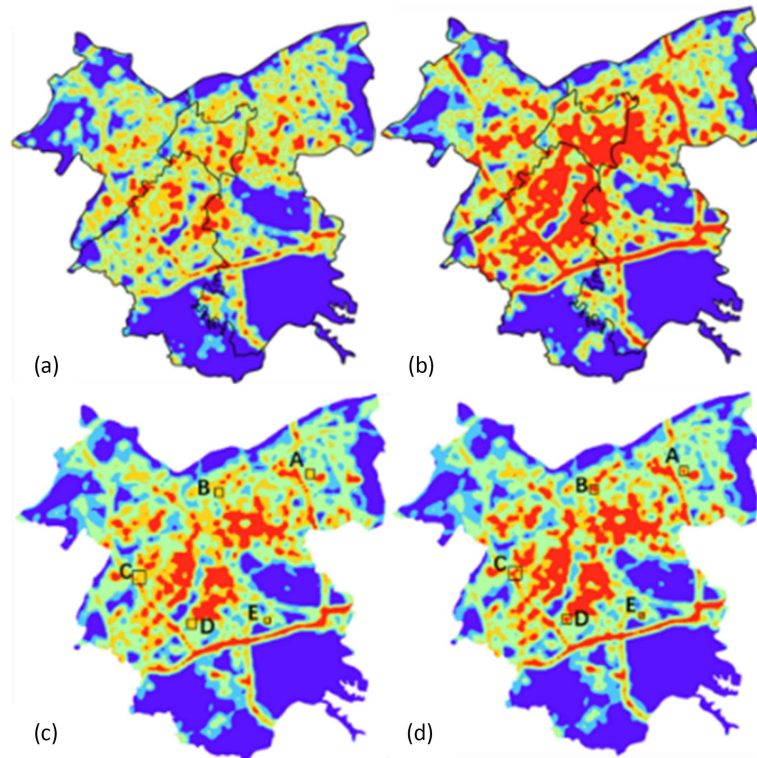


Figure 3. Comparison of results of urban population vitality distribution by different methods; (a) 8-hour population vitality map; (b) 15-hour population vitality map; (c) Average population vitality map; (d) Time-weighted population vitality map

图 3. 不同方法的城市人口活力分布结果对比; (a) 8 时人口活力图; (b) 15 时人口活力图; (c) 平均人口活力图; (d) 时空加权人口活力图

时空加权人口活力指数方法考虑了研究区域内的人口活动强度随时间变化而发生波动的问题[35], 如图 4(d), 在探测结果中出现了一些新的热点, 均为由于区域功能特征造成热力波动的热点区域。但这些热点区域在平均热力方法中未被探测出来(图 4(c)), 我们在保证样本点不过度集中的情况下, 选取了 5 个典型样本区域进行说明。这 5 个典型样本区域的实际城市功能涵盖工作区、居住区与医疗区, 均为良好地发挥其城市功能并且带来了大量社会经济价值的区域。

区域 A 的时空热点(图 4(d))位于东城区桑门工业区, 样本区域以东莞市睿门电子厂厂区为主体, 该厂主要工作制为长白班, 导致人口活动集中于工作日的日间, 为典型的区域内人口热力随时间发生变化

的工作区。区域 B、区域 C 与区域 D 都属于居住区。区域 B 为位于东城区的花园新村社区，该社区居委会始建于 1985 年，社区内凉亭、居民活动中心、羽毛球场、篮球场等居民生活设施齐全，为建设历史悠久、设施完备的大型居民小区，楼栋总数为 56 栋，居住人口约 6000 人，户籍人口约 1200 人，多为外来人口，通勤人口比例大。区域 C 为位于南城区的江南第一城小区，该社区规模庞大，楼栋总数为 90 栋，户数为 4183 户。社区内建筑类型以别墅、联排低楼层居民楼与高层塔楼为主。高层塔楼分布于西北部和和谐路沿线与西南部环城西路辅路沿线，呈条带状分布，区域内居住人口密度高；其余区域主要为别墅区与联排低楼层居民楼区，居住人口密度低。西南部环城西路辅路为东莞市环城交通线出口，车流量大，通勤导致的人口潮汐作用强。该辅路为东南向西北运行的单行道，居民如需要从江南第一城小区西北部进入，必须沿环城西路辅路往西北单向行驶进入小区西北部的和谐路。而小区东南部的金丰路与东北部的赵屋南路不与城市主干道直接相连，人口热力不如环城西路辅路与和谐路。区域 D 为位于南城区的世纪城国际公馆 3 期，为 2010 年落成的新居民区，主要建筑类型为塔楼，楼栋总数为 21 栋，房屋总数 1290 户。东南部的宏伟路与东北方向的国贸城、汇一城与时代城等高人口活动强度区域相连，居民主要出入口为东南部的南门，因此该区域与宏伟路沿线人口活动强度较高。

区域 E 为东莞市人民医院普济院区，为中国医院等级划分中最高等级的三级甲等医院，承担了大量的城市医疗功能，人口活动强度高，社会价值大。院区由一栋门诊楼、六栋住院楼与一栋体检中心组成。时空加权活力方法所探测出的区域 E 为位于光明路与新街路交界处的门诊楼，主要出诊时间为日间，出诊时间内人口活动强度大，造成区域内活动强度随时间波动大的现象，因此在平均热力方法中未能探测出该热点区域。但在时空加权人口活力探测中被较好地探测出了。

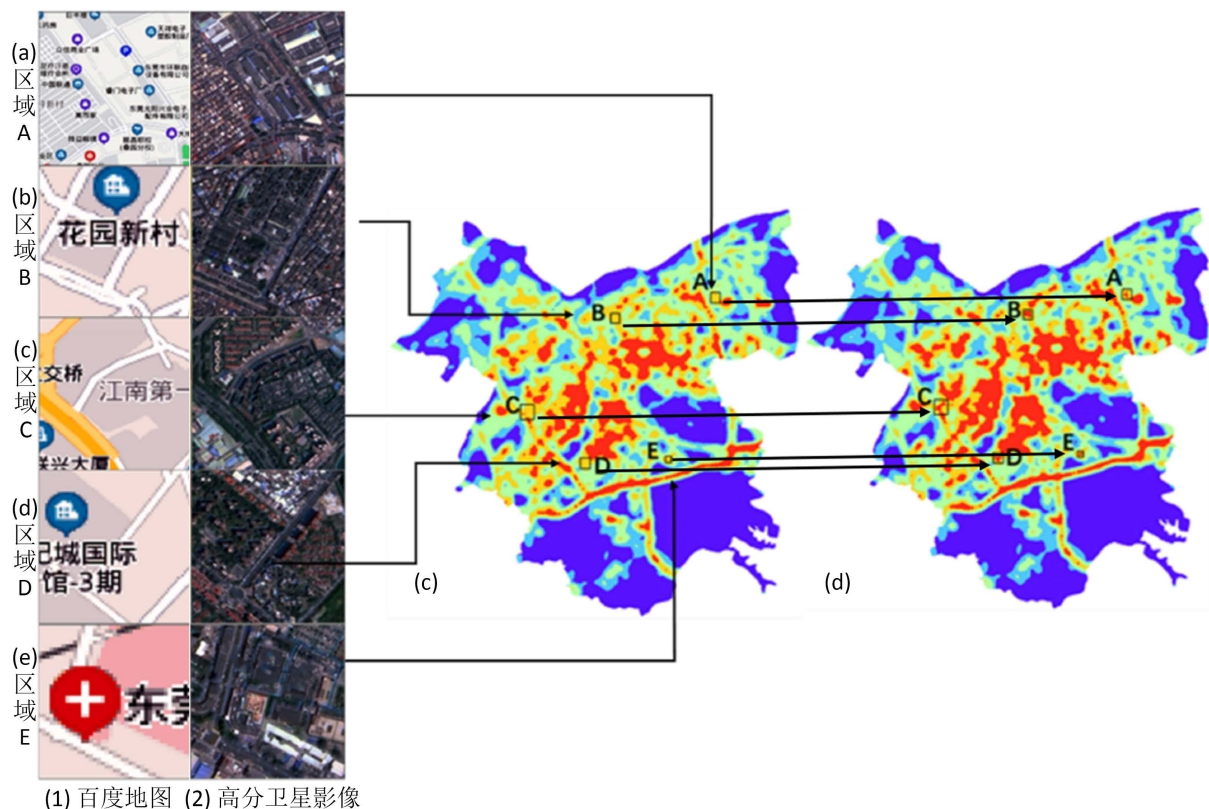


Figure 4. Actual hotspot areas detected by spatio-temporally weighted population vitality methods; (c) Average population vitality map; (d) Time-weighted population vitality map

图 4. 时空加权人口活力方法探测出的热点区实际情况；(c) 平均人口活力图；(d) 时空加权人口活力图

4.1.2. 时空分异特征分析

本文采用全局 Getis-Ord General G 与局部 Getis-Ord G_i^* 方法对东莞市主城区的人口活力空间分布特征进行分析, 城市人口活力强度符合热点分析聚类模式统计特征, 用于检验的 Z 值得分等于 1039.06, 为明显高聚类特征, 且 P 值为 0, 符合 99% 置信度。

为了进一步明晰东莞市主城区人口活力的空间异质性, 对人口活力进行可视化如图 5, 不同强度的人口活力的空间分布变化显著, 总体呈现中间高, 外围低, 西北高, 东南低, 人口活力高值较为明显且集聚的片区位于东城地铁站口附近商圈(图 5-A 区域)、莞太路与鸿福路交接路口附近商圈(图 5-B 区域)、鸿富路地铁站口附近商圈(图 5-C 区域)三个区域。

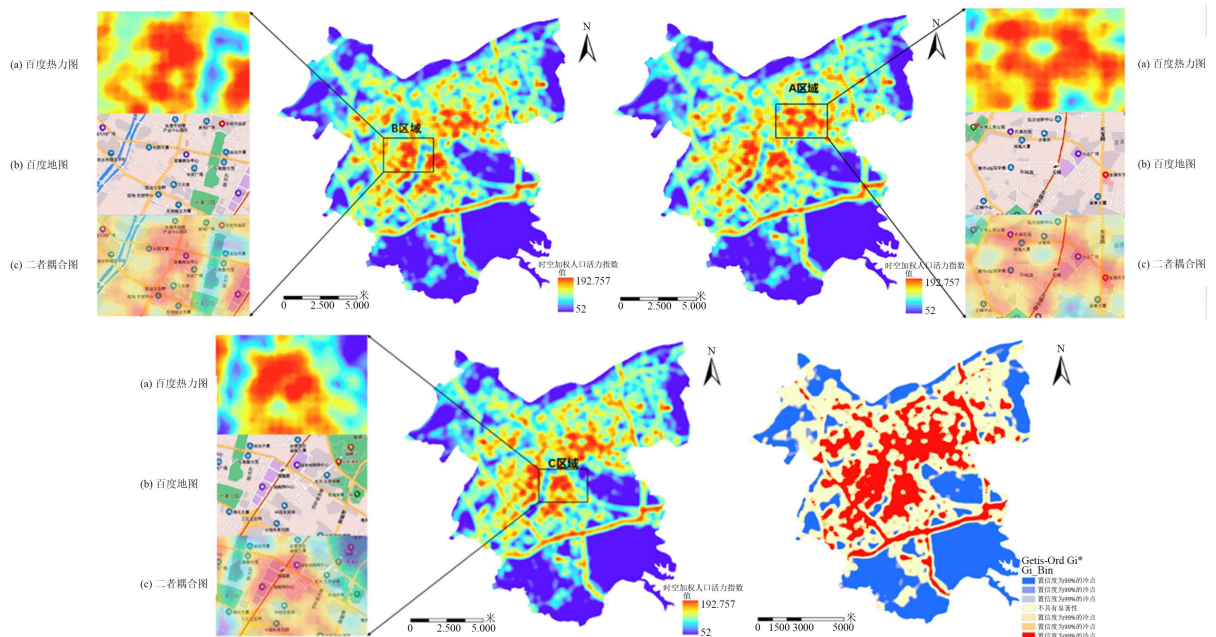


Figure 5. Distribution of population vitality hotspots in main urban areas of Dongguan city (upper left) and time-weighted population vitality results; The boxes show the shopping area near the Dongcheng subway station entrance (Area A), the shopping area near the intersection of Guantai Road and Hongfu Road (Area B), and the shopping area near the Hongfu Road subway station entrance (Area C), respectively.

图 5. 东莞市主城区人口活力热点区域分布(左上图)与时空加权人口活力结果;

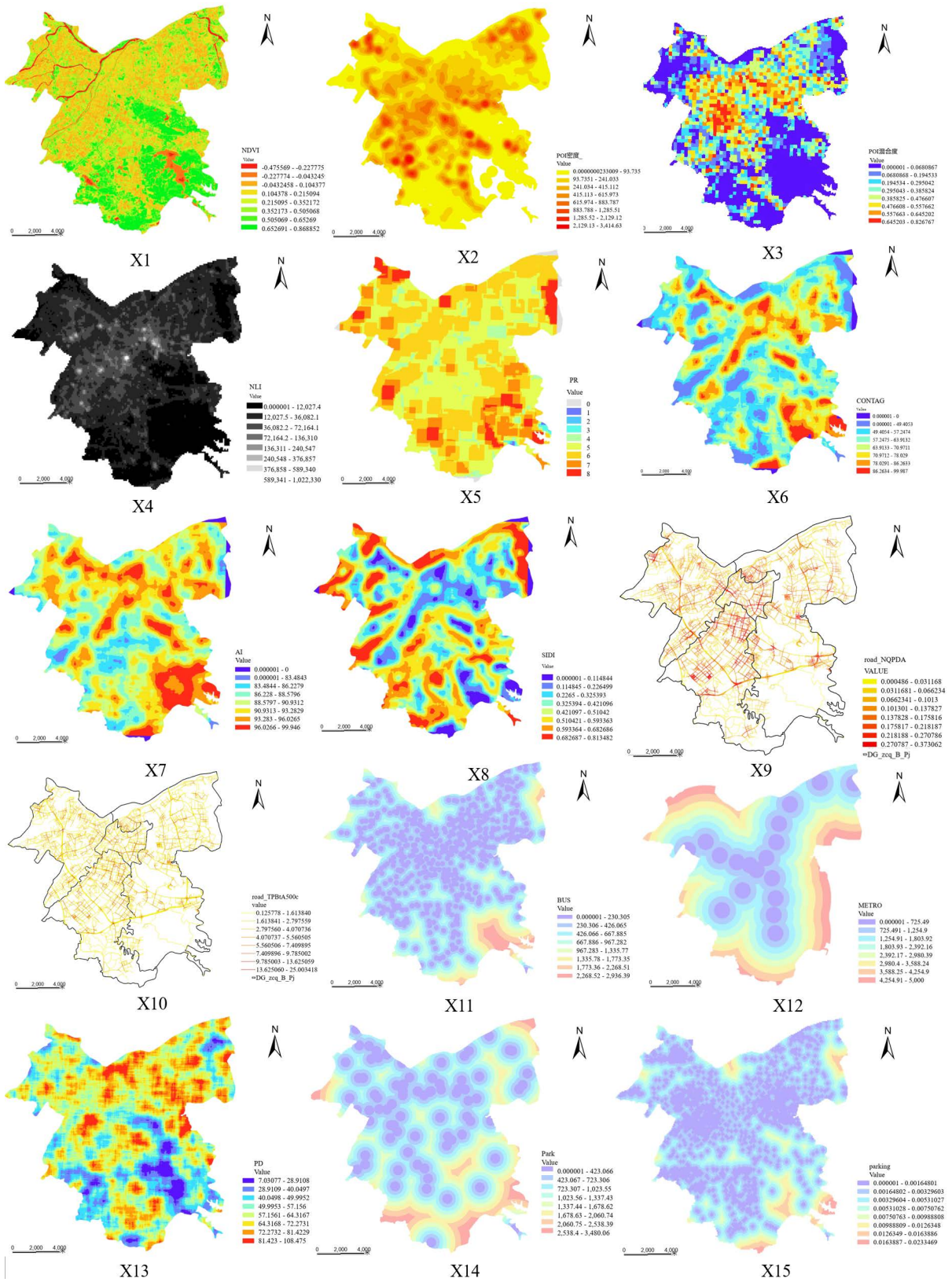
方框分别为东城地铁站口附近商圈(A 区域)、莞太路与鸿福路交接路口附近商圈(B 区域)、鸿富路地铁站口附近商圈(C 区域)

4.2. 东莞市城市人口活力影响因子分析

城市环境是人类活动的基础, 城市环境对人类活动的吸引力和能力是决定城市活力质量和程度的关键因素[36]。复杂多样的环境变量影响人口活力的变化, 因此人口活力的影响因子研究是分析人口活力时空格局演变、完善城市更新规划、激活城市活力的基础。根据国内外有关研究成果[14] [27] [28] [37] [38] [39]与东莞市城市特点, 本文共选取了 15 个自然和人文因素方面(一级指标)的指标, 分别从植被环境、社会经济活动、土地利用混合度、交通特性、建成环境、公共设施方面(二级指标), 计算结果见图 6。

4.3. 可塑性面积单元问题(MAUP)分析

本文选用 100~1000 m 的格网大小分别对影响因子进行分析, 说明在不同空间尺度下 15 个影响因子对人口活力的解释力有所不同, 结果可视化如图 7 所示。本文通过地理探测器的因子探测器分析在 MAUP



尺度效应下东莞市主城区不同影响因子对人口活力强度的影响,由图7与表6中可以看出,从整体上看,影响因子的解释力 q 值有随着网格尺度的增大而增大的趋势。但是,随着网格尺度的增大,影响因子的解释力开始逐渐呈现不稳定的趋势[17]。小于500m尺度下,影响因子解释力排序较为稳定,但大于500m尺度下影响因子的解释力排序波动较大。其中POI密度、POI混合度和距离公交车站的距离排序较为稳定,对人口活力影响力较强。

Table 6. Magnitude and growth rate of explanatory force q at 100m and 1000m grid scales
表 6. 100m 和 1000m 格网尺度下解释力 q 值大小与增长率

因子	100m	1000m	增长率	因子	100m	1000m	增长率
X1	0.1154	0.1503	↑3.49%	X9	0.0836	0.0931	↑0.94%
X2	0.4653	0.4376	↓2.78%	X10	0.0627	0.0626	↓0.01%
X3	0.3399	0.3086	↓3.13%	X11	0.2927	0.3610	↑6.83%
X4	0.2078	0.2054	↓0.24%	X12	0.2018	0.2725	↑7.07%
X5	0.1776	0.2243	↑4.67%	X13	0.0528	0.1198	↑6.70%
X6	0.0906	0.0984	↑0.77%	X14	0.1390	0.1476	↑0.86%
X7	0.0496	0.0848	↑3.52%	X15	0.2020	0.2538	↑5.18%
X8	0.1390	0.1769	↑3.79%				

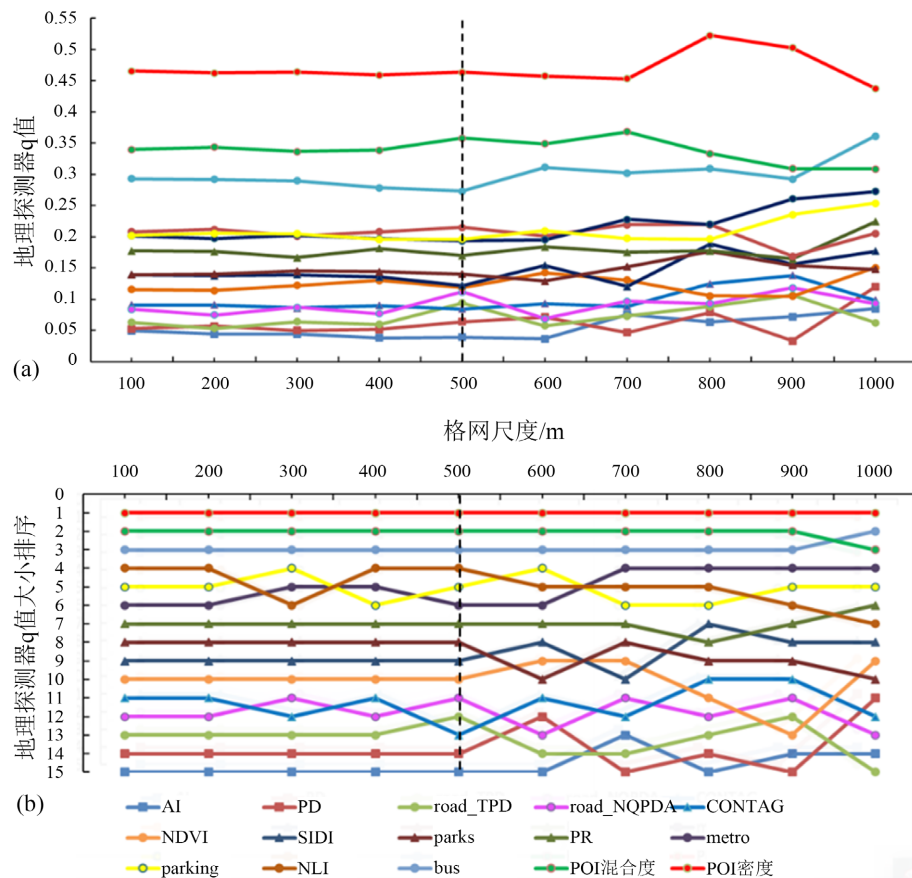


Figure 7. Results of the explanatory power of the impact factors at different scales (a) and their ranking (b)

图 7. 在不同尺度下影响因子的解释力结果(a)及其排序(b)

各影响因子对于人口活力影响力的尺度敏感性如图 7 所示, 地理探测器的 q 值大小表示的是因子对人口活力的影响力大小, 值越大, 则表明影响力越大, 反之则小; q 值的大小排序表示的是因子对于人口活力影响的相对重要性, 排序越靠前, 则表明该因子相对其他因子来说更重要; q 值的大小排序波动大小表示的是因子的影响力的相对稳定性。

4.4. 影响因子对人口活力影响的解释力分析

因子探测器 500 × 500 m 的空间尺度下的结果见表 7, 在 500 × 500 m 的尺度下, 各影响因子对人口活力分布格局的解释力排序为:

POI 密度(0.4632) > POI 功能混合度(0.3577) > BUS(0.2728) > NLI (0.2149) > Parking (0.1964) > METRO (0.1933) > PR(0.1698) > Parks (0.1400) > SIDI (0.1220) > NQPDA (0.11188) > NDVI (0.1186) > TPB (0.0942) > CONTAG (0.0844) > PD (0.0639) > AI (0.0392)。POI 点密度具有最高的 q 值 0.4632, 说明在 14 个变量里面 POI 点的密度是决定人口活力的最重要的因子, 其次是 POI 点的功能混合度与离最近公交车站的距离两个因子。而 AI 具有最低的 q 值 0.0392, 说明对时空加权人口活力指数的影响小。每个指标 q 值对应的 p 值代表了这个指标的显著性, 小于 0.1 代表显著, 14 个指标结果都为接近于 0, 说明指标均较显著。

Table 7. Spatially stratified heterogeneity and factor detector results (500m × 500m)

表 7. 空间分层异质性及因子探测器结果(500m × 500m)

	NDVI	POI 密度	POI 混合度	NLI	PR	CONTAG	AI	SIDI
q	0.1186	0.4632	0.3577	0.2149	0.1698	0.0844	0.0392	0.1220
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0031	0.000
	NQPDA	TPB	BUS	METRO	PD	Parks	Parking	
q	0.1118	0.0942	0.2728	0.1933	0.0639	0.1400	0.1964	
p	0.0343	0.0580	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

4.5. 影响因子对人口活力影响的风险性评估

风险探测器揭示了各影响因子内部不同类别分区间的显著性差异, 风险区探测结果见表 8, 根据风险区探测器的结果结合 MGWR 多尺度回归分析结果, 研究发现:

植被覆盖度(X1)、POI 密度(X2)、POI 功能混合度(X3)、夜间灯光亮度(X4)、蔓延度指数(X6)、路网整合度(X9)、穿行度(X10)、建筑斑块密度(X13)因子对于人口活力强度的影响为正向影响; 在有植被覆盖的情况下, NDVI 正值, 即级别越高植被覆盖率越大; 云层、水体等使得 NDVI 值为负值, 即级别越小植被覆盖率越小; 在有岩石、裸地等的情况下, NDVI 为 0 值, 即处于级别 III, 此时的人口活力强度最大, 说明植被覆盖率(X1)高或者低的区域人口活力强度都不高, 而在不透水面上的人口活力较高, 植被环境并不是影响人口活力的主要原因。建筑斑块密度指数(X13)的级别越高, 其值越大, 即建筑密度越大, 人口活力强度相对越大, 反之, 人口活力强度越小。说明建筑越密集的区域, 人口活力强度越大, 反之则越小。随着 POI 密度(X2)、POI 功能混合度(X3)、夜间灯光亮度(X4)、土地利用斑块蔓延度(X6)与聚集度(X7)5 个影响因子的级别越高, 数值越大, 人口活力强度都有随之增大的趋势。交通可达性中整合度(X9)、穿行度(X10)的值越小, 等级越低, 则人口活力强度相对越低, 反之, 值越大, 等级越高, 则人口活力强度相对越高。说明社会经济活动强度越高、土地利用的混合度越低、交通可达性与流通性越大的区域, 人口活力强度越大。而本文时空分异特征分析出来的东城地铁站口附近商圈(图 5-A 区域)、莞太路与鸿

福路交接路口附近商圈(图 5-B 区域)、鸿富路地铁站口附近商圈(图 5-C 区域)三个区域正是符合以上条件的区域,所以人口活力强度较大。而斑块丰富度指数(X5)、斑块聚集度指数(X7)、辛普森多样性指数(X8)、距离公交车站距离(X11)、距离地铁站距离(X12)、距离公园距离(X14)这 6 个因子对于人口活力强度的影响为负向影响。土地利用混合度指数中斑块丰富度指数(X5)的级别越高,丰富度指数其值越大,即斑块类型数量越多,人口活力强度有随之下降的趋势,当斑块丰富度指数(X5)为III级时,人口活力强度最大;为 I 级与 II 级时,人口活力强度最小。

辛普森多样性指数(X8)级别越高,即其值越大,人口活力强度也有随之下降的趋势,当其为 II 级时,土地利用类型分布越不均匀,复杂性越小,人口活力强度最大;为VIII级(最高级)时,即其值越大,土地利用类型分布越均匀,复杂性越大时,人口活力强度反而越小。说明土地利用类型分布越不均匀且复杂性小、即土地利用类型较少且不单一,人口活力强度较大;土地利用类型越单一或者土地利用类型数量越多,分布均匀且复杂性越大时,人口活力强度越小。距离公交车站(X11)、地铁站(X12)、公园(X14)与停车场(X15)的距离越近,即其值越小,级别越低,则人口活力强度越大;反之随着距离越远,级别越高,人口活力强度越小。这些指标都说明交通设施、公园与停车场等公共服务设施的距离对人口活力强度有着一定的影响,且距离越近人口活力强度越大。

Table 8. Population vitality and mean values of impact factors under different categories (500 × 500 m)

表 8. 影响因子在不同类别下的人口活力与均值(500 × 500 m)

因子	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	均值
X1	<u>70.87096</u>	77.90327	108.8733	106.674	105.2413	105.5865	96.64861	77.28106	93.63488
X2	<u>71.71334</u>	108.9525	121.4575	133.3627	132.1658	132.1527	138.132	-	111.2521
X3	<u>70.62818</u>	115.3317	107.5901	114.7244	112.4422	116.3396	124.4016	132.015	111.6841
X4	<u>73.28507</u>	102.508	120.4829	117.2779	139.848	-	-	-	103.4177
X5	<u>52</u>	<u>52</u>	125.9023	113.8787	97.31504	76.19929	64.72343	-	83.16551
X6	<u>70.79314</u>	80.46996	90.5756	102.882	107.7583	106.1479	115.743	83.99832	94.79599
X7	<u>72.23877</u>	78.0342	96.50625	99.35146	101.9748	101.8303	104.378	83.81654	92.26623
X8	87.24993	118.789	110.5786	110.2459	105.4428	97.30834	85.40575	<u>71.11926</u>	98.2674
X9	<u>100.7329</u>	109.2871	126.4069	136.6696	133.4999	136.7857	150.1848	151.908	126.6849
X10	109.7797	<u>105.2214</u>	127.9084	117.2321	132.2798	134.9892	112.4177	136.379	118.9885
X11	114.274	109.7833	92.20595	74.39874	60.67197	56.77668	<u>52.01413</u>	52.11501	76.52993
X12	123.988	115.3031	105.007	100.5136	84.39148	84.27285	<u>76.74665</u>	89.90516	94.73982
X13	83.03584	<u>82.57431</u>	87.12142	96.04489	103.887	105.9873	107.672	107.2792	96.70022
X14	111.293	106.0084	109.7905	100.3051	87.37856	76.71613	<u>62.11711</u>	73.53775	90.89339
X15	110.355	109.1411	89.11514	83.76717	62.45081	55.45578	55.52563	<u>52.05653</u>	77.23341

注: 带有下划线数据“ ”代表最小值, 倾斜数据代表最大值, “-”代表空值。

5. 结论与讨论

5.1. 讨论

1) 对比图 3(a)及图 3(b)可以看出, 东莞市主城区内, 同一日内大部分区域早上 8 点的人口活动强度低于下午 15 时的人口活动强度。人群的行为活动的发生与活动的路径是存在规律的, 如大部分人的工作

通勤行为发生在晨间，休息行为发生在夜间。这种规律会导致同一区域内的人口活力随着时间的变化而发生波动[40]。在一座城市中，假设人口的数量是固定的，一个区域内人群集聚程度上升的同时会导致另一个区域的人群集聚程度下降；这是由于不同的功能区所承载的城市机能不同，如居住区主要承担居住、休息功能；商业区主要承担居民的购物、休闲娱乐、健身等功能，部分承担工作功能；中心商务区主要承担工作功能。

2) 各影响因子在不同格网尺度下的 q 值大小均发生改变，各影响因子均有尺度敏感性，表明城市人口活力的影响因子的 MAUP 问题具有研究意义；而 POI 密度、POI 混合度、离公交车站的距离三个因子是较为稳定的因子，其 q 值的大小及其排序变化幅度较小，其他因子随着格网尺度变化幅度较大，特别是在大于 500 m 的格网尺度的时候，包括植被覆盖度、土地利用辛普森多样性、路网整合度、穿行度和夜间灯光亮度等，说明这些因子对于格网尺度变化更为敏感。在植被环境(X1: 植被覆盖度)、建成环境(X13: 建筑斑块密度)、公共服务设施类别(X12: 距离地铁站距离)中，当格网尺度大于 500 m 时，其相对重要性随格网尺度的变大而变大，说明想要提高远距离的人口活力(格网尺度大于 500 m 时)，应该要重视植被、建成环境因素及公共服务设施的建设；在社会经济活动类别中(X2: POI 密度、X3: POI 混合度、X4: 夜间灯光亮度)，当格网尺度大于 500 m 时， q 值大小有降低的趋势，在这些尺度下，社会经济活动的影响力逐渐减少，对于人口活力的吸引力也由于距离原因而降低，说明想要提高近距离的人口活力(格网尺度小于 500 m 时)，应该重视社会经济活动 POI 的建设。

综上所述，综合考虑各影响因子对人口活力影响力的相对重要性和相对稳定性，因为：① 当格网尺度小于 500 m 时，各影响因子 q 值大小排序趋于相对稳定(图 7-b)，当格网尺度大于 500 m 时， q 值大小排序变化幅度较大；② 当格网尺度等于 500 m 尺度时，对于部分影响因子的 q 值增长率较高，当格网尺度大于 500 m 时不同的影响因子的 q 值大小呈现多次波动(图 7-a)；③ 人口活力解释的是人的活动，人口活力作为个体时空行为进行研究，为更准确地分析人口活力及其影响因子之间的关系应该选择尽可能精细的尺度进行分析。

最终选择 500 m 为较适合本研究的空间格网尺度，并基于该尺度进行因子探测器和风险区探测器分析。

5.2. 结论

本研究构建了一种既考虑时间尺度又考虑空间尺度的时空加权人口活力评价模型，更精确地测量人口活动强度，减弱了人群中个体行为的“潮汐效应”的影响，利用热点分析方法从全局与局部对时空加权人口活力进行时空特征分析；其次，基于地理探测器与多尺度地理加权回归模型，量化分析人口活力及本文选取的影响人口活力强度的 15 个影响因子之间的关系，并且考虑因子在不同尺度下对人口活力的影响力情况，用多尺度格网进行空间尺度模拟，最后得出主要的结论如下：

1) 东莞市主城区的人口活力呈现出“中间高，四周低，西北高，东南低”的集聚分布特征。人口活力高值较为明显且集聚的区域包括东城地铁站口附近商圈(图 6-A 区域)、莞太路与鸿福路交接路口附近商圈(图 6-B 区域)和鸿富路地铁站口附近商圈(图 6-C 区域)。

2) 本研究探讨了 15 个影响人口活力强度的因素对人口活力的尺度效应和划区效应的影响。通过综合比较，选择了 500 m 和自然断点法作为最适宜的格网尺度和划区方法。研究表明，POI 密度、POI 功能混合度和离公交车站的距离是影响人口活力强度的重要因素。而植被、土地利用多样性、交通便利和社会经济活动强度等因素在不同空间尺度下对人口活力的影响具有敏感性。

本研究的不足之处在于：第一，部分影响人口活力的环境因素、交通等级等因素由于研究区域的局限，在本研究中并未纳入分析，可在日后研究中进一步分析。第二，数据的精度问题。由于本文采用多

源数据, 受到时间与研究区域的局限, 如土地利用类型等数据精度可能存在不足。第三, 数据的时间匹配问题, 由于数据来源不同, 受到时间差异的影响, 在时间匹配上可能存在不足。综上, 城市规划人员应在城市规划设计中考虑通过建设社会经济活动区域, 从而提高近距离尺度的空间活力; 增加公共设施服务与完善建成区域从而提高远距离的尺度的空间活力。

参考文献

- [1] Jacobs, J. (1961) *The Death and Life of Great American Cities*. Random House, New York.
- [2] 刘昕哥. 收缩背景下城市活力时空演变及影响机制[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [3] 钟婷, 李成楠, 姚南, 杨山力. 国土空间规划背景下城镇低效用地识别方法探索——以成都市中心城区为例[J]. *四川环境*, 2020, 39(6): 140-150.
- [4] 陈鹏宇, 陈梦玲. 基于路网空间属性的交通公平性研究——以南京市为例[C]//面向高质量发展的空间治理——2021 中国城市规划年会论文集(06 城市交通规划). 武汉: 华中科技大学, 华诚博远工程技术集团有限公司, 2021: 570-578.
- [5] 梁弘, 崔鹤, 赵培松, 吴运超, 张晓东. 基于时空大数据的多尺度职住平衡研究——以北京市为例[C]//创新技术·赋能规划·慧享未来——2021 年中国城市规划信息化年会论文集. 北京: 北京市城市规划设计研究院, 北京城垣数字科技有限责任公司, 北京市城市规划设计研究院数字技术规划中心, 2021: 307-316.
- [6] 汪海, 蒋涤非. 城市公共空间活力评价体系研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2012, 9(1): 56-60.
- [7] 龙瀛, 周垠. 街道活力的量化评价及影响因素分析——以成都为例[J]. *新建筑*, 2016(1): 52-57.
- [8] Pan, H., Yang, C., Quan, L. and Liao, L.H. (2021) A New Insight into Understanding Urban Vitality: A Case Study in the Chengdu-Chongqing Area Twin-City Economic Circle, China. *Sustainability*, **13**, Article 10068. <https://doi.org/10.3390/su131810068>
- [9] Fan, Z., Duan, J., Luo, M., et al. (2021) How Did Built Environment Affect Urban Vitality in Urban Waterfronts? A Case Study in Nanjing Reach of Yangtze River. *International Journal of Geo-Information*, **10**, Article 611. <https://doi.org/10.3390/ijgi10090611>
- [10] Shi, J., Miao, W., Si, H. and Liu, T. (2021) Urban Vitality Evaluation and Spatial Correlation Research: A Case Study from Shanghai, China. *Land*, **10**, Article 1195. <https://doi.org/10.3390/land10111195>
- [11] Yue, W., Chen, Y., Thy, P.T.M., et al. (2021) Identifying Urban Vitality in Metropolitan Areas of Developing Countries from a Comparative Perspective: Ho Chi Minh City versus Shanghai. *Sustainable Cities and Society*, **65**, Article ID: 102609. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102609>
- [12] Xia, C., Zhang, A. and Yeh, A.G.O. (2022) The Varying Relationships between Multidimensional Urban Form and Urban Vitality in Chinese Megacities: Insights from a Comparative Analysis. *Annals of the American Association of Geographers*, **112**, 141-166. <https://doi.org/10.1080/24694452.2021.1919502>
- [13] Cao, Y. and Lee, S. (2021) Analysis of Urban Vitality and Its Determinant Factors Using POI Big Data in Seoul, Korea. *Journal of Korea Planning Association*, **56**, 87-102. <https://doi.org/10.17208/jkpa.2021.12.56.7.87>
- [14] 许钊, 刘耀林, 银超慧, 安睿, 仝照民. 武汉市中心城区道路中心性对人口活力的影响研究[J]. *特区经济*, 2021(12): 90-95.
- [15] 吴志强, 叶锺楠. 基于百度地图热力图的城市空间结构研究——以上海中心城区为例[J]. *城市规划*, 2016, 40(4): 33-40.
- [16] 朱锦懋, 姜志林. 闽北森林群落物种多样性的可塑性面积单元问题[J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 304-311.
- [17] Gao, F., Li, S., Tan, Z., et al. (2021) Understanding the Modifiable Areal Unit Problem in Dockless Bike Sharing Usage and Exploring the Interactive Effects of Built Environment Factors. *International Journal of Geographical Information Science*, **35**, 1905-1925. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1863410>
- [18] Zhou, X. and Yeh, A.G.O. (2021) Understanding the Modifiable Areal Unit Problem and Identifying Appropriate Spatial Unit in Jobs-Housing Balance and Employment Self-Containment Using Big Data. *Transportation*, **48**, 1267-1283. <https://doi.org/10.1007/s11116-020-10094-z>
- [19] 齐丽丽, 柏廷臣. 社会经济统计数据热点探测的 MAUP 效应[J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1317-1326.
- [20] Wei, J., He, G., Long, T., et al. (2018) Potentiality of Using Luojia 1-01 Nighttime Light Imagery to Investigate Artificial Light Pollution. *Sensors*, **18**, Article 2900. <https://doi.org/10.3390/s18092900>
- [21] 杨建思, 柳帅, 王艳东, 廖明生. 融合多源大数据的武汉城市空置区域评估与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2020,

- 22(5): 997-1007.
- [22] 柴彦威, 张雪. 北京郊区女性居民一周时空间行为的日间差异研究[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 725-732.
- [23] 申悦, 柴彦威, 郭文伯. 北京郊区居民一周时空间行为的日间差异[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 701-710.
- [24] 邹思聪, 张姗姗, 甄峰. 基于居民时空行为的社区日常活动空间测度及活力影响因素研究——以南京市沙洲、南苑街道为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 580-596.
- [25] 张程远, 张淦, 周海瑶. 基于多元大数据的城市活力空间分析与影响机制研究——以杭州中心城区为例[J]. 建筑与文化, 2017(9): 183-187.
- [26] 胡晓鸣, 黎小龙, 蔚芳. 基于 POI 的城市功能区及其混合度识别研究——以重庆市核心城区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 164-173.
- [27] Guo, X., Chen, H. and Yang, X. (2021) An Evaluation of Street Dynamic Vitality and Its Influential Factors Based on Multi-Source Big Data. *International Journal of Geo-Information*, **10**, Article 143. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030143>
- [28] 宁晓平. 土地利用结构与城市活力的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [29] 王军, 邱扬, 杨磊, 邸超, 余莉. 基于 GIS 的土地整理景观效应分析[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 258-264.
- [30] 古恒宇, 沈体雁, 周麟, 陈慧灵, 肖凡. 基于 GWR 和 sDNA 模型的广州市路网形态对住宅价格影响的时空分析[J]. 经济地理, 2018, 38(3): 82-91.
- [31] 邬建国. 景观生态学: 格局, 过程, 尺度与等级[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [32] 兀伟, 邓国庆, 武晓莉. 地理格网及在统计分析中应用的探讨[J]. 测绘标准化, 2015, 31(3): 22-26.
- [33] 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.
- [34] 沈体雁, 于瀚辰. 空间计量经济学[M]. 第 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2019.
- [35] 申悦, 柴彦威. 基于 GPS 数据的北京市郊区巨型社区居民日常活动空间[J]. 地理学报, 2013, 68(4): 506-516.
- [36] Ou, G., Zhou, M., Zeng, Z., et al. (2021) Is There an Equality in the Spatial Distribution of Urban Vitality: A Case Study of Wuhan in China. *Open Geosciences*, **13**, 469-481. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0249>
- [37] 周博. 城市热点区域空间分布特征与驱动机制研究[C]//面向高质量发展的空间治理——2020 中国城市规划年会论文集(05 城市规划新技术应用). 广州: 广州市城市规划勘测设计研究院, 2021: 341-350.
- [38] 王娜, 吴健生, 李胜, 王宏亮, 彭子凤. 基于多源数据的城市活力空间特征及建成环境对其影响机制研究——以深圳市为例[J]. 热带地理, 2021, 41(6): 1280-1291.
- [39] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 古恒宇, 何泓浩. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, 40(3): 75-83.
- [40] Zhao, Y. and Cai, Y.W. (2013) Residents' Activity-Travel Behavior Variation by Communities in Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, **23**, 492-505. <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0616-7>