

COVID-19疫情时空聚集性特征及影响因素分析 ——以重庆市为例

陈晓^{1,2}, 黄宇金^{2,3}, 李佳慧^{2,4}, 汪诗洋⁵, 裴韬^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟
重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟
重点实验室, 北京 100101; 5. 中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京 100049)

摘要:新型冠状病毒肺炎(COVID-19)在城市内部的病例时空聚集性特征及影响因素对于疫情防控具有重要参考价值。论文以重庆市为例,收集2020年1月21日—2月24日的458例COVID-19确诊病例数据,结合手机信令数据与空间环境数据,采用空间聚集性分析、因子分析与回归分析等方法,探究重庆市新冠疫情在街道尺度上的时空聚集性特征,并分析其影响因素。结果表明:①时间上,确诊病例前期增长较快,以外地输入为主,后期逐渐趋缓,以本地传播(包括街道间传播、街道内传播、家庭内传播)为主,其中家庭内传播占比最大(23%);②空间上,病例呈现显著的聚集特征,且聚集性逐渐增强,热点街道分布于重庆市西部、东北部;分类型来看,本地病例热点街道集中于人口密度较大、经济发展更好的西北部、西南部,外地输入病例热点街道集中于地理邻近湖北省的中部、东北部;③所有病例密度、本地病例密度、外地输入病例密度与因子分析所得4个因子(即城市交通因子、街道间活动因子、生活服务因子、居民分布因子)的回归结果显示,交通设施水平与病例密度存在密切关联,商店超市餐饮等生活服务地点与病毒传播显著相关,街道间活动是发生聚集性疫情的重要因素,而外地输入型病例多出现于人口密集区域。疫情防控中应根据不同区域疫情传播模式差异实施针对性措施,例如在重庆市中部、东北部关注外地输入防控,西北部、西南部以本地传播防控为重点;同时,应加强城市内部交通与街道居民接触密集区域的防控措施,有效防止疫情反弹。

关键词:新冠肺炎;聚集特征;街道尺度;重庆市

新型冠状病毒肺炎(COVID-19)在全球范围内蔓延,已有200多个国家先后出现确诊病例^[1]。COVID-19疫情的传播可以大致归纳为“病例聚集+流动扩散”的模式。最初暴发地(如本次国内疫情的暴发地武汉华南海鲜市场,北京6—7月二次疫情的新发地批发市场)的感染者通过社区传染可能形成疫情扩散的次级暴发点^[2],再通过人口的流动形成下一个次级暴发点,导致疫情在人口密集的大城市指数级暴发。因此,对于病例聚集区(尤其是社区尺度)的识别和原因分析,对于城市内部疫情防控

具有重要意义。

目前关于病例聚集的研究主要包括聚集的探测以及聚集的影响因素分析。病例聚集的探测常采用描述性统计分析、空间自相关分析和时空扫描统计等方法,研究尺度可划分为国家、省份、城市、区县、社区等。Kang等^[3]发现中国省级尺度疫情存在显著的空间相关性;Mo等^[4]使用时空立方体研究中国各城市的疫情热点区域;Xiong等^[5]发现湖北省病例聚集在武汉、孝感、鄂州等中心区域;Desjardins等^[6]使用SaTScan检测到美国各县市的疫情的活跃

收稿日期:2020-07-22;修订日期:2020-09-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(42041001,41525004,41421001)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42041001, 41525004 and 41421001.]

第一作者简介:陈晓(1998—),女,河北衡水人,博士生,主要研究方向为时空数据挖掘。E-mail: chenxiao@lreis.ac.cn

*通信作者简介:裴韬(1972—),男,江苏扬州人,研究员,主要研究方向为地理大数据挖掘、地统计分析。E-mail: peit@lreis.ac.cn

引用格式:陈晓,黄宇金,李佳慧,等. COVID-19疫情时空聚集性特征及影响因素分析:以重庆市为例[J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1798-1808. [Chen Xiao, Huang Yujin, Li Jiahui, et al. Clustering characteristics of COVID-19 cases and influencing factors in Chongqing Municipality. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1798-1808.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.002

集群。这些研究表明,疫情分布的空间聚集性在不同尺度呈现出不同的特点,值得进一步深入研究。

疫情聚集性影响因素研究的主要思路是将病例信息和地理要素相关联,研究者多使用多元回归、地理加权回归^[7]等方法,或采用仿真模型估计某种具体措施的实施对疫情的影响等^[8-9]。新冠肺炎暴发适逢春运,人口流动、交通运输、城市经济等因素对疫情暴发起到了推动作用。Jia等^[10]发现疫情早期中国各省的累积确诊病例与从武汉输入当地的人数相关系数为0.919,而与当地人口数的相关性不显著;王姣娥等^[11]研究中国各省的疫情空间扩散情况,发现地理邻近性、人口流动、人口规模、交通网络、疫情防控管理等因素对疫情的空间扩散具有显著影响;汪冉等^[12]证实河南省疫情与交通通达性呈现显著相关关系;Xiong等^[5]发现湖北各县市的疫情与人口、经济等因素相关;Mollalo等^[13]发现美国各县市家庭收入中位数、收入不平等性、护士从业者百分比、黑人女性百分比的分布对新冠肺炎发病率具有较高解释力;Pourghasemi等^[14]发现伊朗各省的汽车站、面包房、医院、清真寺、自动取款机、银行等地点分布与疫情关系最为密切;也有研究表明了社区防控措施对病毒传染的抑制作用^[15]。

现有 COVID-19 疫情的研究多集中于流行病学特征分析、省市尺度病例特征分析、疫情防控政策评价等方面,对社区层面的时空聚集性特征关注不够,而微观层面影响因素的识别与分析可对社区防控起到重要的指导作用。为了揭示微观层面因素对聚集性的影响,本文选取重庆市为例进行研究。重庆市是湖北省的邻近城市,也是人口众多、下辖38个区县的特大城市,其城市内部的疫情传播具有典型性。本文的研究思路是基于城市街道的微观尺度,探究不同病例类型的时空聚集性特征,分析疫情传播的影响因素,揭示病例聚集性感染多发的内在原因,为城市疫情防控提供参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

重庆市是中国西南部重要的交通枢纽,与湖北省交界,交通往来密切。重庆市人口规模庞大,截至2019年,常住人口达到3124.32万人,移动电话普及率为118.60部/百人^[16]。重庆市下辖38个行政区县(图1),其中渝中区、渝北区、万州区、合川区经济

发达、人口众多。近年来重庆市推动区域共同发展,促进各区县经济增长与人口流动,自疫情暴发以来,重庆市成为疫情较为严重的区域之一^[17]。2020年春节假期后,复工复产促使人员流动增加和范围扩大,重庆市的疫情防控面临更大挑战^[18]。

1.2 研究数据

1.2.1 重庆市病例数据

2020年1月21日—2020年2月24日是重庆市疫情传播的主要阶段,2月25日重庆市的新增确诊病例已经清零。本文使用了2020年1月21日—2月24日重庆市卫生健康委员会网站(<http://wsjkw.cq.gov.cn/>)发布的官方数据,并在重庆市各区县公开发布的疫情通报(<http://h5.cqliving.com/live/detail/2272588.html>)中收集整理了重庆市确诊病例的个案信息。病例个案信息属性包括年龄、性别、居住地、是否有武汉旅居史、是否有湖北其他市旅居史、是否有湖北外其他区域旅居史、可能感染原因、确诊时间等。根据病例的旅居史及可能感染原因,可将病例分成2种不同的类型,即本地病例与外地输入病例。其中,依据感染途径,本地病例又分为街道间传播、街道内传播、家庭内传播。在1月21日—2月24日期间,重庆市共确诊576例病例,本文采用其中属性较为完整的458例病例进行分析,约占总确诊病例的80%,病例居住地位置如图1所示。

1.2.2 重庆市手机信令数据

本文获取了某通信公司2020年1月1日—2月29日手机信令数据,总用户数为15116289。基于该数据,计算了各街道的活跃用户数,并且推算了各街道之间的人群移动情况。手机信令数据中的空间位置均聚合至500 m×500 m网格,结合网格和街道边界的关系,可以判断各个网格所属的街道,计算出街道之间的交互强度。为验证数据的代表性,本文计算出街道活跃用户数与2010年第六次人口普查重庆市街道人口数的Pearson相关系数为0.768 ($P<0.001$),呈显著正相关关系。

1.2.3 重庆市空间环境数据

本文还使用了重庆市各街道、乡、镇(下文统一称街道)的矢量地图,2010年重庆市人口普查分乡、镇、街道资料,基于OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>)获取的重庆市路网数据,各类POI兴趣点数据(包括交通站点、住宅小区、商店超市),以及通过Google Earth Engine下载的2019年

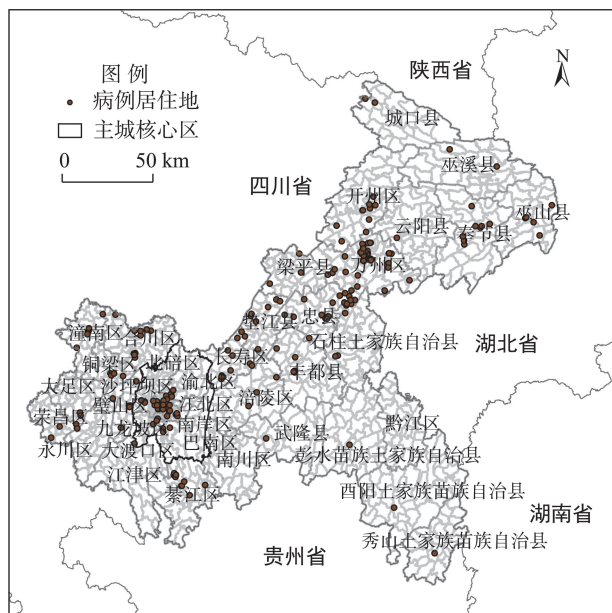


图1 重庆市确诊病例居住地理位置分布
Fig.1 Residential locations of confirmed cases
in Chongqing Municipality

1—12月的重庆市NPP/VIIRS夜间灯光遥感数据,其空间分辨率为450 m。

2 研究方法

本文从时间与空间2个角度,对疫情的聚集性特征进行分析(图2)。在时间上,本文分析了疫情传播模式的变化,即本地病例、外地输入病例比例的

趋势变化。在空间上,本文分析了聚集性趋势的变化、疫情空间聚集热点,并结合因子分析与多元回归的方法,探究了影响疫情空间分布的因素。

2.1 疫情聚集性变化趋势分析

本文使用病例位置点数据、街道尺度病例数目的面数据进行疫情聚集性趋势分析。选取最近邻距离比值(average nearest neighbor ratio, NNR)^[19]、全局莫兰指数(Moran's I 指数)^[20]作为衡量聚集性的指标,并绘制疫情的聚集性发展变化曲线。

对于病例位置的点数据,本文基于空间距离的方法,将相距最近的病例点对的距离平均值与随机分布模式下的最邻近距离进行比较,用其比值(NNR)来判断疾病的聚集性,其取值小于1表明越趋向于聚集,取值大于1表明越趋向于离散,取值越接近1,就表示随机的几率越大。

$$\text{NNR} = \frac{\sum_i d_i / N}{0.5 / \sqrt{N/A}} \quad (1)$$

式中: d_i 是某确诊病例*i*到其最邻近确诊病例的距离, N 为总病例数, A 是整个区域的面积。

对于街道尺度病例数面数据,选取全局莫兰指数识别确诊病例在街道尺度的全局空间自相关性。Moran's I 指数的大小反映了观测值在空间近邻时相似程度的大小,取值范围在 $[-1, 1]$ 之间,绝对值越大表示相关性越强,表示高值周围聚集着高值,低值周围聚集着低值。

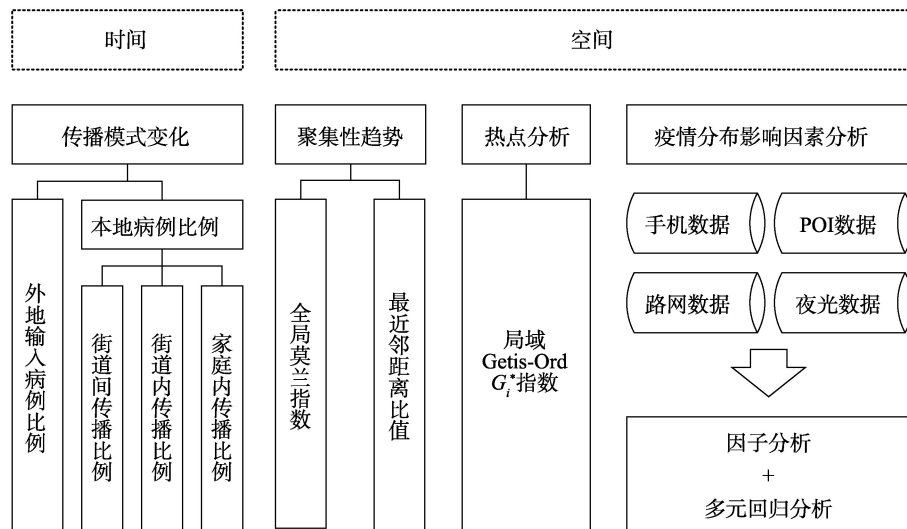


图2 研究方法框架图

Fig.2 Flowchart of the research method

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 为不同街道单元的累计确诊病例数; \bar{x} 为不同街道单元累计确诊病例数目的平均值; n 为街道单元数; w_{ij} 为街道单元 i 和 j 之间的空间权重, 用来度量空间单元之间的邻近关系, 在此使用 K 最近邻接权重矩阵, K 取 8, 并设置权重为反距离(幂为 2)。

2.2 疫情空间聚集性热点分析

本文使用局域 Getis-Ord G_i^* 指数识别确诊病例在街道尺度上的热点。其基本原理是, 计算某个要素在指定范围内的相邻要素总和, 将之与所有要素的总和相比较, 从而分析该要素在局部的空间聚集特征。若 G_i^* 值得分为正且较大, 说明空间单元 i 为高值聚集单元, 反之则为低值聚集单元。

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_j w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_j x_j^2}{n} - \bar{x}^2} \sqrt{\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (3)$$

式中: w_{ij} 为街道单元 i 和 j 之间的空间权重, 在此使用的空间权重与计算 Moran's I 指数的权重相同。

2.3 疫情空间分布的影响因素分析

本文分析了街道尺度下疫情分布的影响因素, 选取了 8 个变量(表 1), 使用 KMO 和 Bartlett 球形度检验因子分析方法的适用性^[21]。KMO 值检验变量间相关性, KMO 越接近于 1, 则相关性越强、偏相关性越弱, 越适合进行因子分析; Bartlett 球形度检验各个变量是否独立, 其近似卡方观测值表征变量相关系数矩阵与单位矩阵之间是否存在显著差异。本文选择主轴迭代法作为因子提取方法。然后进行多元回归分析^[22], 采用各个因子得分作为自变

量, 各街道单元病例密度(即病例数除以街道面积)作为因变量, 并对比了不同因子对本地病例与外地输入病例的影响力。

3 确诊病例的聚集性特征

为了揭示重庆市疫情发展的时空聚集特征, 本节首先分析了重庆市病例的时序变化, 之后通过 Moran's I 指数、NNR 指数刻画空间聚集性特征, 最后使用 G_i^* 指数识别聚集热点街道。

3.1 时间特征

研究时段内, 官方公布病例数据与本文收集病例数据变化趋势几乎一致(图 3), 这保证了本文数据的可靠性。重庆市累计病例数前期波动增加, 后期增速放缓。不同类型确诊病例比例变化如图 4 所示, 疫情前期以外地输入病例为主, 疫情中后期传播方式以本地传播为主。在本地传播病例中, 疫情前期主要是街道间传播、街道内传播, 中期家庭内传播增加迅速, 后期 3 种传播方式保持稳定, 家庭内传播比例最高, 街道内传播比例最低。病例变化规律受到公共卫生响应事件影响, 1 月 23 日武汉市采取的“封城”措施、1 月 24 日重庆市启动的重大突发公共卫生事件 I 级响应、2 月 7 日重庆市全面推行的小区封闭式管理措施^[23], 对于重庆市疫情防控起到积极作用^[24-25]。

研究时段内, 每日 Moran's I 指数、NNR 指数均在 0.005 水平显著, 且表现出阶段性特征(图 5)。疫情前期, Moran's I 指数迅速增大, 重庆市病例分布表现出快速聚集的趋势; 疫情中后期, Moran's I 指数保持平稳, 病例分布保持稳定的较高聚集水平。NNR 指数的变化趋势也说明了重庆市病例分布聚

表 1 原始变量的选择和描述

Tab.1 Selection and description of primitive variables

变量名称	含义
活跃手机用户密度	根据夜间停留时间提取的各街道居住手机用户数除以街道面积
街道间交互强度	其他街道流入街道 i 的手机用户数除以街道面积
夜光指数	各街道夜间灯光量的总量除以街道面积
路网密度	各街道道路的长度除以街道面积
交通站点 POI 密度	各街道交通站点 POI 数除以街道面积
住宅小区 POI 密度	各街道住宅小区 POI 数除以街道面积
商店超市 POI 密度	各街道商店超市 POI 数除以街道面积
餐饮服务 POI 密度	各街道餐饮服务 POI 数除以街道面积

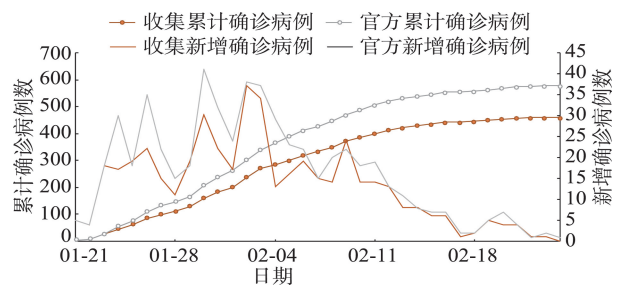


图 3 1 月 21 日—2 月 24 日重庆市累计确诊病例数、新增确诊病例数变化

Fig.3 Change of cumulative confirmed cases and new confirmed cases in Chongqing Municipality, 21 January to 24 February

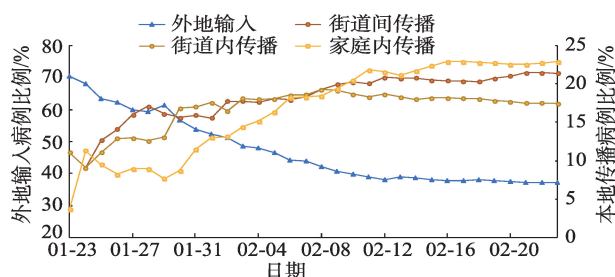


图4 1月23日—2月24日重庆市不同类型确诊病例比例变化

Fig.4 Change of proportion of different kinds of cases in Chongqing Municipality, 23 January to 24 February

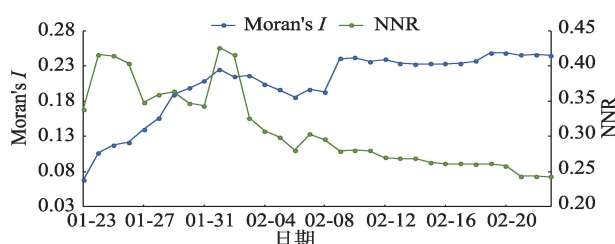


图5 1月23日—2月24日重庆市各街道累计病例的聚集性趋势变化

Fig.5 Clustering trend of cumulative cases in different residential communities of Chongqing Municipality, 23 January to 24 February

集性逐渐增强,然后保持在较高水平。产生该现象的原因是,重庆市疫情前期,大量相对分散的外地病例输入,紧接着本地疫情暴发,家庭内、街道内、街道间的较短距离的疫情传播成为主导,导致病例聚集性不断增强。疫情中后期各项防控措施取得效果,病例增速放缓,且以短距离传播为主,从而病例分布聚集性保持较高水平。另外,Moran's I 指数

与本地病例比例的 Pearson 相关系数高达 0.910 ($P < 0.001$),NNR 指数与本地病例比例的 Pearson 相关系数为 -0.855 ($P < 0.001$),这说明随着疫情发展,本地病例比例持续增加,病例分布的聚集性也在持续增强,疫情的本地传播与其在地理聚集性上的变化呈现出相同趋势。

3.2 空间分布特征

重庆市共有 1031 个街道,其中仅 141 个街道有病例,占比 13.7%,重庆市大部分街道未发生疫情传播,防控情况良好。各街道所有病例数目的分布如图 6a 所示,发生疫情的街道的平均病例数为 3.2 个,病例数最多的是綦江区文龙街道(17 个病例),其次是万州区太白街道(16 个病例)、万州区钟鼓楼街道(14 个病例),之后是奉节县永安街道(11 个病例)。从病例数量结构上看,病例数范围是 1~5 个的街道共有 112 个,占比为 79.4%;范围是 6~10 个的街道共有 25 个,占比为 17.7%;范围是 11~17 个的街道共有 4 个,占比为 2.8%。从不同类型病例分布情况来看(图 6b、6c),本地病例和外地输入病例在重庆市的街道分布相似性很高,均较为集中地分布在重庆市的西部和北部的街道。外地输入病例比本地病例分布更为分散,且在重庆市的中部分布较多,在南部仍有少许分布,而本地病例在重庆市的西部分布较多。从各区县受疫情影响程度来看(表 2),病例主要集中于万州区、渝北区、忠县、长寿区、开州区、江北区、合川区、垫江县的街道。万州区疫情最为严重,有病例的街道数为 25 个,占万州区街道数目的 48.1%,其他疫情较为严重的区县主要位于重庆市的西部和北部。

G_i^* 指数通过比较指定范围内要素和区域内所

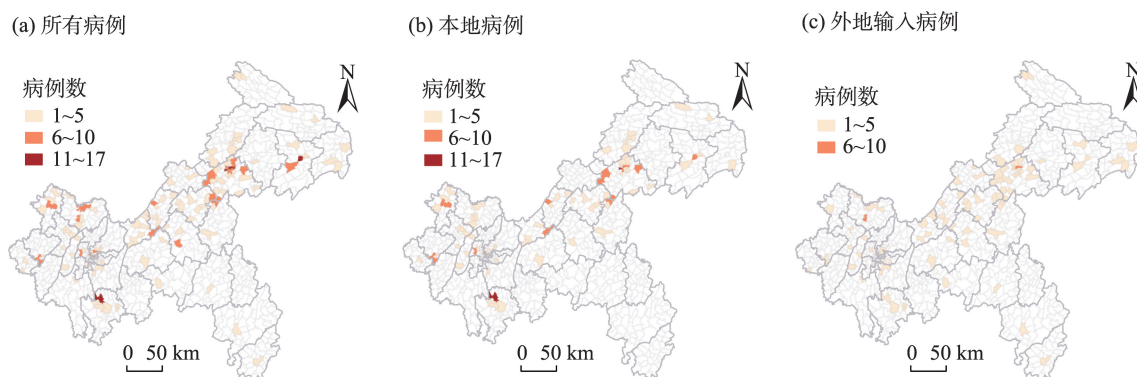


图6 重庆市确诊的(a)所有病例、(b)本地病例及(c)外地输入病例空间分布
Fig.6 Spatial distribution of (a) all confirmed cases, (b) local confirmed cases, and (c) imported confirmed cases in Chongqing Municipality

有要素的差异来识别疫情的热点区域。图 7 展示了重庆市所有病例、本地病例、外地输入病例的热点图。在所有病例热点图中,共识别出 26 个街道为热点(高值)区域,并通过显著性检验($P<0.05$)。热点街

道分布在 12 个区县,占重庆市所有区县的 31.6%,主要位于重庆市的东北部、西北部、西南部。万州区(10 个)、綦江区(3 个)、奉节县(3 个)、潼南区(2 个)含有的热点街道数量较多,大足区、垫江县、丰都县、江北区、沙坪坝区、石柱土家族自治县、长寿区、忠县均只有 1 个热点街道(表 3)。虽然江北区、万州区、长寿区确诊病例街道占该区县街道的比例均超过 40%,但仅万州区热点街道占比超过 15%,说明重庆市的疫情核心区相对较少。而渝北区、开州区、合川区虽然确诊病例街道数量较多,但是却没有识别出热点街道,说明这些区域相对远离疫情核心区。

对本地病例和外地输入病例进行热点分析发现,本地病例共识别出 18 个热点街道,主要分布在万州区(6 个)、沙坪坝区(3 个)、奉节县(2 个)、綦江区



图 7 重庆市确诊的(a)所有病例、(b)本地病例及(c)外地输入病例热点街道分布
Fig.7 Hot spot residential community distribution of (a) all confirmed cases, (b) local confirmed cases, and (c) imported confirmed cases in Chongqing Municipality

表 3 重庆市所有确诊病例热点街道情况
Tab.3 Hot spot residential communities of all confirmed cases in Chongqing Municipality

区县名	热点		确诊病例	
	街道数量/个	占区县街道比例/%	街道数量/个	占区县街道比例/%
万州区	10	19.23	25	48.08
綦江区	3	9.38	5	15.63
奉节县	3	9.38	5	15.63
潼南区	2	9.09	4	18.18
大足区	1	3.70	2	7.41
垫江县	1	3.85	6	23.08
丰都县	1	3.23	3	9.68
江北区	1	8.33	6	50.00
沙坪坝区	1	3.85	3	11.54
石柱土家族自治县	1	3.13	3	9.38
长寿区	1	5.56	8	44.44
忠县	1	3.45	8	27.59

(2个)。外地输入病例共识别出19个热点街道,主要分布在万州区(6个)、巫山县(3个)、南岸区(2个)、忠县(2个)。空间分布上,本地病例和外地输入病例均在万州区、奉节县、垫江县、江北区的热点街道较多,主要是重庆市的东北部和西部。除此之外,本地病例在沙坪坝区、綦江区、大足区、石柱土家族自治县、潼南区的热点街道较多,集中于重庆市的西北部、西南部,外地输入病例在巫山县、南岸区、忠县、丰都县、合川区、渝北区的热点街道较多,集中于重庆市的中部、东北部边界。本地病例与外地输入病例热点街道的空间分布差异说明了两种传播模式的影响因素以及内在机制不同。重庆市东部、北部直接与湖北省连接,地理邻近性使得区域间联系极为紧密,易形成外地输入病例热点区域,而重庆市的西部人口密度较大,经济发展程度高,这些条件有利于疫情的本地传播,易形成本地病例的热点区域。

4 疫情空间分布的影响因素分析

本文收集了若干表征基础性要素的数据,鉴于数据间相关性较强,本文首先应用因子分析方法提取因子,继而使用多元线性回归模型分析病例密度与这些因子的统计关系。这2种方法的结合运用提升了模型的稳定性与可解释性。

4.1 因子分析

为了分析空间聚集性的影响因素,本文使用反映社会经济与人口活动的的数据提取了8个变量(表4)。对上述8个变量分别进行标准化,计算KMO值为0.885,表明变量间的相关性较强;计算Bartlett球形度检验的近似卡方观测值为853.5,在0.01水平

下认为变量间线性相关,故可以使用因子分析。本文提取的因子1~因子4分别解释了原方差的23.2%、20.4%、19.3%、16.2%,累积方差载入为79.1%,充分概括了原变量的信息。因子载荷矩阵如表4所示。因子1在夜光指数、住宅小区密度载荷较大,命名为居民分布因子;因子2在商店超市POI密度、餐饮服务POI密度载荷较大,命名为生活服务因子;因子3在路网密度、交通站点POI密度载荷较大,命名为城市交通因子;因子4在活跃手机用户密度、街道间交互强度载荷较大,命名为街道间活动因子。这4个因子从意义上表现出清晰的层次特征,所提取的因子对新冠肺炎传播诸要素概括较为全面、准确。

4.2 多元线性回归

本文使用多元线性回归方法研究全部病例、本地病例、外地输入病例与4个因子的关系。为避免零病例数对回归结果的影响,选取141个确诊病例数大于零的街道作为样本。在这些样本中,本地病例为零的样本数为48个,占比为34%;外地输入病例为零的样本数为42个,占比为30%。所有病例密度、本地病例密度、外地输入病例密度与上述4个因子的多元线性回归结果如表5所示,其决定系数 R^2 均大于0.5,表明这些因子的解释力较好。

在所有病例结果中,病例密度与城市交通因子、生活服务因子和街道间活动因子显著相关。城市交通因子的影响力最高,表明交通对疫情传播的促进作用较强,特别是在春运期间,交通站点人员流量大,疫情风险较高;街道间活动因子也对疫情传播有较大贡献,表明居民跨街道的较长距离活动也是疫情扩散的重要因素,与上文对街道间传播的分析一致;生活服务因子也促进了疫情传播,居民

表4 因子载荷矩阵
Tab.4 Factor loading matrix

变量名称	因子载荷				共同度
	居民分布因子	生活服务因子	城市交通因子	街道间活动因子	
活跃手机用户密度	0.56	0.48	0.31	0.56	0.97
街道间交互强度	0.38	0.34	0.48	0.70	0.98
夜光指数	0.62	0.31	0.53	0.27	0.84
路网密度	0.35	0.22	0.64	0.38	0.73
交通站点POI密度	0.08	0.15	0.38	0.09	0.18
住宅小区POI密度	0.74	0.43	0.22	0.31	0.87
商店超市POI密度	0.42	0.68	0.40	0.27	0.88
餐饮服务POI密度	0.40	0.68	0.41	0.30	0.88

表 5 病例密度与因子得分的多元线性回归结果

Tab.5 Multiple linear regression results of case density and factor scores

	所有病例密度		本地病例密度		外地输入病例密度	
	系数	P	系数	P	系数	P
截距	-0.154	0.025	-0.143	0.093	-0.282	<0.001
居民分布因子	0.081	0.085	-0.143	0.009	0.120	<0.001
生活服务因子	0.314	<0.001	0.381	<0.001	0.115	0.002
城市交通因子	0.673	<0.001	0.951	<0.001	0.187	<0.001
街道间活动因子	0.288	<0.001	0.478	<0.001	0.081	0.054
多元 R^2	0.560		0.651		0.543	
调整 R^2	0.547		0.636		0.523	

宴饮、购物等活动增大了人与人之间的接触机会,有相互传染的可能。本地病例的结果与所有病例结果类似,但各个因子的系数均比所有病例高,说明本地传播受到城市交通因子、生活服务因子与街道间活动因子的影响更大。除了城市交通因子和生活服务因子,外地输入病例密度与居民分布因子的相关性也较为显著,表明外地输入病例在各街道的分布与居民分布具有一致性。

5 结论与讨论

本文从时间和空间 2 个维度对重庆市确诊病例进行了街道尺度的分析。从时间维度看,1 月 21 日—2 月 24 日,重庆市新增病例经历了波动增长和逐渐减少 2 个阶段,疫情前期以外地输入病例为主,疫情中后期以本地病例为主。本地病例中,家庭内传播病例比例逐渐增高,并维持在 23%。Moran's I 指数、NNR 指数的趋势变化都说明了重庆市病例分布的聚集性特征在疫情前期不断增强,并在中后期保持较高的水平。这是因为重庆市疫情各阶段主导的传播模式不同,并且采取隔离等防控措施取得了良好的效果。其他城市的疫情传播特征与重庆市类似,珠海市以家庭聚集扩散为主要方式^[26],郑州市以家庭聚集与密集接触性为主^[27]。

从空间维度看,重庆市确诊病例分布街道集中于重庆市的西部、北部,包括万州区、渝北区、忠县、长寿区、开州区、江北区、合川区、垫江县等地,而热点街道集中于重庆市的西部、东北部,包括万州区、綦江区、奉节县、潼南区。分病例类型看,本地病例和外地输入病例的街道分布大多在重庆市的西部、北部,但外地输入病例比本地病例分布更为分散,且在重庆市中部分布较多,在南部也有少许分布。

热点街道分布反映出更为清晰的聚集特征,具体表现为:本地病例和外地输入病例的热点街道均较多分布于重庆市的东北部和西部,但本地病例热点街道较多地分布在沙坪坝区、綦江区等地,集中于重庆市人口密度较大、经济发展更好的西北部、西南部,而外地输入病例热点街道较多地分布在巫山县、忠县、丰都县等地,集中于与湖北省相连接的重庆市中部和东北部边界。刘勇等^[28]也识别出河南省与湖北省地理邻近、网络邻近的区域是病例高聚集区。重庆市内病例的空间分布格局呈现出与王姣娥等^[1]的研究相似的临近扩散、迁移扩散、等级扩散等特征,而廊道扩散在城市尺度上并不明显。

从疫情空间分布的影响因素分析来看,本文使用因子分析法从 8 个原始变量中提取 4 个因子,较单因素分析^[12]更为全面、均衡地反映了街道尺度的诸地理要素信息。相比于逐步回归与地理加权回归^[7],本文对正交因子的多元线性回归所得系数值更稳定,基于回归结果的分析也更加可靠。对所有病例密度、本地病例密度和外地输入病例密度的回归结果表明,病毒传播与交通设施水平具有强烈关联,这也印证了疫情与交通通达性的相关性^[12],应特别关注交通站点的疫情防控;街道间活动因子也是本地病例传播的重要因素,需要减少亲友之间的走访,限制人与人之间的接触频率,避免病毒因城市内人口流动而迅速扩散;超市、餐饮等生活物资供应地点与病毒传播关系密切,应当做好消毒工作,并提醒公众注意自身防护;人口密集地区更要格外重视对外来人员的登记检测。本地病例与外地输入病例的影响因素存在差异:本地病例受街道间活动的显著影响,外地输入病例则与人口分布显著相关,由此可知,将本地与外地输入病例分类讨论是十分必要的。

重庆市作为西部特大城市,人口流动频繁,其极大的疫情风险值得重点关注^[29]。本文基于更精细的街道尺度研究疫情传播过程与路径,对于类似大城市疫情精准化防控具有指导价值。依据分析结果,本文提出如下建议:疫情传播具有聚集性特征,可根据不同传播模式实施针对性措施,如在区域层面,重庆市中部、东北部是外地输入传播的防控重点,而西北部、西南部是本地传播的防控重点。在内容层面,城市交通、街道间交互是本地疫情防控的重点内容,应当长期坚持公共交通的防控措施,并注意街道人群交互密集区域的疫情检查,而外地输入防控措施应以城市间交通为重点内容,适当关注城市内交通、对社区外来人员进行筛查等^[30]。

本文研究存在一定的局限性:病例信息不完整或缺失的个案信息并未使用,会造成研究结果存在一定的偏差;所选取的原始变量与病毒传播之间为间接联系,线性回归的决定系数 R^2 还有提升空间,所得系数不能做因果性解读;本文揭示了多个变量对疫情传播的影响的相对大小,其内在机制有待进一步从流行病传播角度深入探讨。

参考文献(References)

- [1] WHO. Coronavirus disease (COVID-19) situation reports [EB/OL]. 2020-03-12[2020-07-22]. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200312-sitrep-52-covid-19.pdf?sfvrsn=e2bfc9c0_4.
- [2] 周成虎,裴韬,杜云艳,等.新冠肺炎疫情大数据分析与区域防控政策建议[J].中国科学院院刊,2020,35(2): 200-203. [Zhou Chenghu, Pei Tao, Du Yuyan, et al. Big data analysis on COVID-19 epidemic and suggestions on regional prevention and control policy. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 200-203.]
- [3] Kang D, Choi H, Kim J-H, et al. Spatial epidemic dynamics of the COVID-19 outbreak in China [J]. International Journal of Infectious Diseases, 2020, 94: 96-102.
- [4] Mo C, Tan D, Mai T, et al. An analysis of spatiotemporal pattern for COVID-19 in China based on space-time cube [J]. Journal of Medical Virology, 2020, 92: 1587-1595.
- [5] Xiong Y, Wang Y, Chen F, et al. Spatial statistics and influencing factors of the COVID-19 epidemic at both prefecture and county levels in Hubei Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(11): 3903. doi: 10.3390/ijerph17113903.
- [6] Desjardins M R, Hohl A, Delmelle E M. Rapid surveillance of COVID-19 in the United States using a prospective space-time scan statistic: Detecting and evaluating emerging clusters [J]. Applied Geography, 2020, 118: 102202. doi: 10.1016/j.apgeog.2020.102202.
- [7] 李欣,周林,贾涛,等.城市因素对COVID-19疫情的影响:以武汉市为例[J].武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 826-835. [Li Xin, Zhou Lin, Jia Tao, et al. Influence of urban factors on the COVID-19 epidemic: A case study of Wuhan City. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 826-835.]
- [8] Chinazzi M, Davis J T, Ajelli M, et al. The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak [J]. Science, 2020, 368: 395-400.
- [9] Kraemer M U G, Yang C-H, Gutierrez B, et al. The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China [J]. Science, 2020, 368: 493-497.
- [10] Jia J S, Lu X, Yuan Y, et al. Population flow drives spatiotemporal distribution of COVID-19 in China [J]. Nature, 2020, 582: 389-394.
- [11] 王姣娥,杜德林,魏冶,等.新冠肺炎疫情的空间扩散过程与模式研究[J].地理研究,2020,39(7): 1450-1462. [Wang Jiao'e, Du Delin, Wei Ye, et al. The development of COVID-19 in China: Spatial diffusion and geographical pattern. Geographical Research, 2020, 39(7): 1450-1462.]
- [12] 汪冉,张明鑫,李浩.河南省交通通达水平对新型冠状病毒传播的影响[J].河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 68-77. [Wang Ran, Zhang Mingxin, Li Hao. The influence of Henan's traffic access level on SARS-CoV-2 transmission. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(6): 68-77.]
- [13] Mollalo A, Vahedi B, Rivera K M. GIS-based spatial modeling of COVID-19 incidence rate in the continental United States [J]. Science of the Total Environment, 2020, 728: 138884. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138884.
- [14] Pourghasemi H R, Pouyan S, Heidari B, et al. Spatial modelling, risk mapping, change detection, and outbreak trend analysis of coronavirus (COVID-19) in Iran (days between 19 February to 14 June 2020) [J]. International Journal of Infectious Diseases, 2020, 98: 90-108.
- [15] Lai S, Ruktanonchai N W, Zhou L, et al. Effect of non-pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China [J]. Nature, 2020, 585: 410-413.
- [16] 重庆市统计局. 2019年重庆市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. 2020-03-19[2020-07-22]. http://www.cq.gov.cn/zqfz/gmjj/tjgb/202004/t20200402_6963113.html. [Chongqing Municipal Bureau of statistics. Statistical bulletin of Chongqing national economic and social development in 2019. 2020-03-19[2020-07-22]. http://www.cq.gov.cn/zqfz/gmjj/tjgb/202004/t20200402_6963113.html.]
- [17] Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Re-

- sponse, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(2): 145-151.
- [18] 陆步来, 王劲峰, 曾光. 疾病空间聚集性研究方法 [J]. 疾病监测, 2010, 25(5): 394-397. [Lu Bulai, Wang Jinfeng, Zeng Guang. Approaches to study disease clustering in space. Disease Surveillance, 2010, 25(5): 394-397.]
- [19] 王劲峰. 空间分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 55-56. [Wang Jinfeng. Spatial analysis. Beijing, China: Science Press, 2006: 55-56.]
- [20] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 1992, 24: 189-206.
- [21] 何晓群. 多元统计分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 99. [He Xiaoqun. Multivariate statistical analysis. Beijing, China: China Renmin University Press, 2004: 99.]
- [22] 王斌会. 多元统计分析与R语言建模 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2010: 55-58. [Wang Binhui. Multivariate statistical analysis and R language modeling. Guangzhou, China: Jinan University Press, 2010: 55-58.]
- [23] 杨雨琦, 孙琦, 王悦欣, 等. 重庆市新型冠状病毒肺炎(NCP)疫情分析与趋势预测 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 135-140. [Yang Yuqi, Sun Qi, Wang Yuexin, et al. Epidemic situation analysis and trend forecast of New Coronavirus Pneumonia (NCP) in Chongqing. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(1): 135-140.]
- [24] 赵序茅, 李欣海, 聂常虹. 基于大数据回溯新冠肺炎的扩散趋势及中国对疫情的控制研究 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 248-255. [Zhao Xumao, Li Xinhai, Nie Changhong. Backtracking transmission of COVID-19 in China based on big data source, and effect of strict pandemic control policy. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(3): 248-255.]
- [25] 游光荣, 游翰霖, 赵得智, 等. 新冠肺炎疫情传播模型及防控干预措施的因果分析评估 [J]. 科技导报, 2020, 38(6): 90-96. [You Guangrong, You Hanlin, Zhao Dezhi, et al. Dynamic model of COVID-19 transmission and assessment of control interventions based on causal analysis. Science & Technology Review, 2020, 38(6): 90-96.]
- [26] 刘郑倩, 叶玉瑶, 张虹鸥, 等. 珠海市新型冠状病毒肺炎聚集发生的时空特征及传播路径 [J]. 热带地理, 2020, 40(3): 422-431. [Liu Zhengqian, Ye Yuyao, Zhang Hong'ou, et al. Spatio-temporal characteristics and transmission path of COVID-19 cluster cases in Zhuhai. Tropical Geography, 2020, 40(3): 422-431.]
- [27] 赵宏波, 魏甲晨, 王爽, 等. 大城市新冠肺炎疫情风险评估与精准防控对策: 以郑州市为例 [J]. 经济地理, 2020, 40(4): 103-109, 124. [Zhao Hongbo, Wei Jiachen, Wang Shuang, et al. The risk assessment of COVID-2019 epidemic in metropolis and precise prevention and control measures: A case study of Zhengzhou City. Economic Geography, 2020, 40(4): 103-109, 124.]
- [28] 刘勇, 杨东阳, 董冠鹏, 等. 河南省新冠肺炎疫情时空扩散特征与人口流动风险评估: 基于1243例病例报告的分析 [J]. 经济地理, 2020, 40(3): 24-32. [Liu Yong, Yang Dongyang, Dong Guanpeng, et al. The spatio-temporal spread characteristics of 2019 novel coronavirus pneumonia and risk assessment based on population movement in Henan Province: Analysis of 1243 individual cases reports. Economic Geography, 2020, 40(3): 24-32.]
- [29] 卿菁. 特大城市疫情防控机制: 经验、困境与重构: 以武汉市新冠肺炎疫情防控为例 [J]. 湖北大学学报(哲学社会科学版), 2020, 47(3): 21-32. [Qing Jing. Analysis on epidemic prevention and control mechanism of megacity: Based on the predicament, effect and reconstruction of Wuhan's combat COVID-19. Journal of Hubei University (Philosophy and Social Sciences), 2020, 47(3): 21-32.]
- [30] 张宇, 田万利, 吴忠广, 等. 基于改进SEIR模型的新冠肺炎疫情沿交通线路传播机制 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 150-158. [Zhang Yu, Tian Wanli, Wu Zhongguang, et al. Transmission mechanism of COVID-19 epidemic along traffic routes based on improved SEIR model. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 150-158.]

Clustering characteristics of COVID-19 cases and influencing factors in Chongqing Municipality

CHEN Xiao^{1,2}, HUANG Yujin^{2,3}, LI Jiahui^{2,4}, WANG Shiyang⁵, PEI Tao^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Clustering characteristics of COVID-19 cases within cities and influencing factors are of significant referential value for epidemic prevention and control. In this study, we conducted spatial clustering analysis, factor analysis, and regression analysis on 458 COVID-19 confirmed cases from 21 January to 24 February 2020, and we used mobile phone signaling data, and environmental data to analyze the spatiotemporal variability of epidemic characteristics in Chongqing Municipality at the residential community scale and the influencing factors. The results show that: 1) Temporally, the number of confirmed cases showed a rapid increasing trend in the beginning, and most of the cases were imported cases. In the late stage, the increase rate lowered, and the main trend turned into local transmission (including inter- community, intra- community, and intra- family transmissions), among which intra- family transmissions made up the largest portion (23%). 2) Spatially, the cases showed significant clustering characteristics, and aggregation level increased with time. The hot spots of all cases were distributed in the west and northeast Chongqing. The hot spots of local cases were mainly concentrated in the northwestern and southwestern regions where population density and economic development level were higher, while the hot spots of imported cases were mainly concentrated in the central and northeastern regions adjacent to Hubei Province. 3) The regression results between the density of all cases, local cases, imported cases and four factors obtained by factor analysis (urban traffic factor, intra-community activity factor, service provision factor, and residents' distribution factor) provide some insights. Transportation facility level was closely related to the density of confirmed cases. Service places such as stores, supermarkets, and restaurants significantly contributed to the spread of the virus. Inter-community transmission was an important factor in local clustering of cases, while imported cases mostly occurred in densely populated areas. Hence, targeted measures should be adopted for future epidemic prevention and control according to various epidemic transmission patterns in different regions, such as paying attention to imported cases in the central and northeastern parts of Chongqing, and focusing on avoidance of local transmission in northwest and southwest. Moreover, measures should be strengthened in the areas with dense urban traffic and resident population to effectively prevent the outbreak from rebounding.

Keywords: COVID-19; clustering characteristics; residential community scale; Chongqing Municipality