

# 长株潭 COVID-19 疫情时空 演化与传播趋势分析



刘俊杰<sup>1,2,3</sup>, 李朝奎<sup>1,2</sup>, 方 军<sup>1,2\*</sup>, 武凯华<sup>1,2</sup>, 郝豪杰<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 4112012;

2. 湖南科技大学 测绘遥感信息工程湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 4112013;

3. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 利用本体建模的方法构建城镇公共安全事件链模型和传染病事件链传播模型, 分析传染病事件的发生对社会生活和工作的影响, 并选择典型案例分析其感染过程及原因, 最后对新冠病例在长株潭地区的时空扩散特征以及在各县区疫情传播和变动的空间差异进行分析。结果表明: ①长株潭各县区的疫情扩散格局和综合风险格局存在显著差异。主城区的扩散风险较高但综合风险处于中等水平, 部分农村地区的扩散风险较低, 较为安全。②由于长株潭主城区及周边县人口流动较大, 所引致的疫情状况相对风险较高。随着良好的管控措施的实施和疫情的发展, 需分析出疫情的动态发展, 有效地指导区域性的预防和控制以及与社会经济秩序的恢复相协调。

**关键词:** 新型冠状病毒; 本体建模; 人口流动风险; 时空扩散特征; 传播; 疫情动态

**中图分类号:** P208

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1672-4623 (2022) 04-0007-07

## Analysis of COVID-19 Epidemic Spatio-temporal Evolution and Transmission Trend in Changzhutan

LIU Junjie<sup>1,2,3</sup>, LI Chaokui<sup>1,2</sup>, FANG Jun<sup>1,2</sup>, WU Kaihua<sup>1,2,3</sup>, HAO Haojie<sup>1,2,3</sup>

(1. National-local Joint Engineering Laboratory of Geospatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Geo-information in Surveying, Mapping and Remote Sensing,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. College of Resources Environment and

Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** We used ontology modeling method to build urban public safety event chain model and infectious disease event chain propagation model, analyzed the impact of infectious disease incidents on social life and work, and chose typical cases to analyze the infection process and causes. Finally, the COVID-19 case spatio-temporal spread characteristics in the Changzhutan area and the spatial differences in the epidemic spread and changes in each county were analyzed. The results show: ① There are significant differences in the epidemic spread pattern and comprehensive risk pattern in the counties of Changsha, Zhuzhou and Tan. The proliferation risk in the main urban area is high but the overall risk is at a medium level. The proliferation risk in some rural areas is low and relatively safe. ② Under the influence of population movement, the main urban area of Changsha and Zhuzhou, and the surrounding counties have relatively high risks caused by population inflows and outflows. As the epidemic develops, it is necessary to evaluate the epidemic situation according to the population movement risks and dynamic epidemic risk division, to guide the prevention and control of regional epidemics and restoration of economic and social order promptly and effectively.

**Key words:** COVID-19, ontology modeling, population migration risk, spatio-temporal diffusion characteristics, spread, epidemic dynamics

关于 COVID-19 疫情的地理学研究正在逐步展开, 对 COVID-19 的部分研究集中于流行病学、病原学及传播动力学等, 对一些省份的新型冠状病毒肺炎的流行趋势进行分析<sup>[1-3]</sup>。由于现有的研究当中结合传染病事件链的传播分析与时空分析的研究较少, 所以

不能更全面地分析病例与病例之间的关系。针对上述问题, 本文对湖南省长沙、株洲、湘潭地区疫情的输入、扩散发展、逐渐稳定和下降 4 个阶段进行了时空演化与传播趋势分析, 通过分析湘潭市确诊病例之间的传播过程及原因, 探究新型冠状病毒的传播规律。

**收稿日期:** 2020-11-30。

**项目来源:** 国家重点研发计划 (2018YFB0505500, 2018YFB0505504); 湖南省教育厅资助科研项目 (19C0730)。

(\*为通信作者)

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

长沙、株洲、湘潭位于湖南省，长株潭自2020-01-20报告首例COVID-19确诊病例，截至8月31日，累计报告确诊病例367例。

### 1.2 数据来源

研究数据：①确诊病例数据。湖南省卫健委发布的疫情信息，本文收集了长沙、株洲、湘潭各区县时间截至2020-03-14的病例信息和部分湘潭市确诊病例之间的传播关系。②人口数据。收集湖南省统计局2019年人口数据、统计年鉴等相关统计数据。③空间数据。湖南省长株潭1:130万行政边界数据，行政单元至区县。

## 2 研究方法

搜集长株潭新型冠状病毒确诊病例信息、人口流动数据（包括确诊时间，确诊地点等），构建新型冠状病毒事件链，剖析具体病例之间的传播过程，以及对长株潭各区县发病率、人口流动比率、风险等级分布、热冷点区分布等进行空间可视化。

### 2.1 统计指标

利用相关统计指标，对长株潭新型冠状病毒确诊

病例信息、人口流动数据，包括确诊时间，确诊地点等进行统计。利用空间分析法得到各区县的发病率、人口流动比率、风险等级分布、热冷点区分布等，进而对各区县的疫情风险进行评估。计算方法如公式(1)、(2)和(3)<sup>[1]</sup>，其中人口流动规模用 $S$ 表示，常住人口数和年末户籍人口用 $C$ 和 $N$ 表示，人口流动比率、发病率分别用 $P$ 和 $I$ 表示，

分别用 $F$ 和 $E$ 表示长株潭地区确诊病例数和同时期内暴露人数， $k=1 \times 10^{-4}$ 来计算发病率。

$$S = C - N \quad (1)$$

$$P = \frac{S}{C} \quad (2)$$

$$I = \frac{F}{E} \times K \quad (3)$$

### 2.2 本体建模法

通过斯坦福大学最新发布的本体建模工具—ProtégéDesktop 5.5.0<sup>[4]</sup>，构建城镇公共安全事件链模型和传染病事件链传播模型。首先通过城镇公共安全事件链演化分析，归纳提取相关知识要素与框架体系，构建城镇公共安全事件链时空关联模型，描述城镇公共安全事件发生、发展、转移及相互耦合的时空演化过程。其构建过程如图1所示。

通过选取湘潭市病例信息之间的传播关系，解释病毒传播的客观规律。

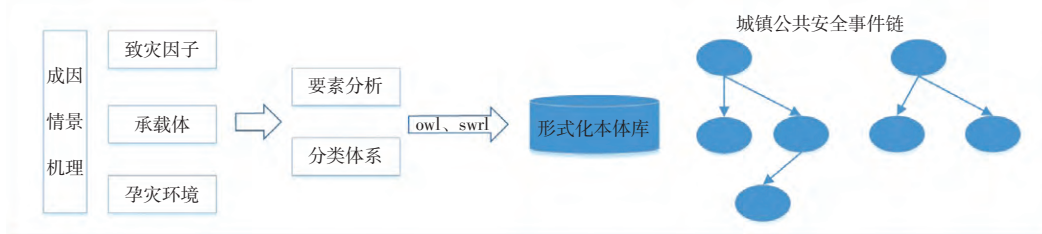


图1 城镇公共安全事件链模型构建方法

### 2.3 空间分析法

1) 基于人口流动引致的疫情潜在风险分析。由于人口流动的速率直接影响疫情的发展状况，人口的流入会对本地造成一定的风险，高风险地区的人口流出也会对其他地区造成风险，所以通过式(4)和式(5)<sup>[1]</sup>可得到人口流入和流出对内、外部影响的相对风险系数。

$$RR_i = \begin{cases} I & P < 0 \\ I \times (1 + P) & P \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$RR_o = \begin{cases} I & P > 0 \\ I \times (1 - P) & P \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中， $I$ 和 $P$ 分别表示发病率和人口流动比率； $RR_i$ 和 $RR_o$ 分别表示外部地区人口流入对长株

潭各区县造成的影响程度以及人口流出对外部地区造成的风险系数，

2) 热点分析(Getis-Ord \* iG)。利用热点分析方法对长株潭各区县疫情状况进行冷热点分析与识别，进而发现疫情发展规律，其计算公式为：(6)<sup>[7]</sup>

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (6)$$

式中， $i$ 代表中心要素； $j$ 是邻域内的所有要素； $x_j$ 是要素 $j$ 属性值； $w_{i,j}$ 是要素 $i$ 和 $j$ 之间的空间权

重； $n$ 为要素总数； $G_i^*$ 统计是 $Z$ 得分。 $Z$ 得分越高，表示该区域处于热点聚类区， $Z$ 得分越低，表示该区域处于冷点聚类区。且： $S$ 是要素值的标准差， $\bar{X}$ 是要素值的平均数，其计算方法如式（7）和（8）<sup>[7]</sup>。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (8)$$

### 3 疫情时空演化与传播趋势分析

#### 3.1 构建城镇公共安全事件链模型

基于OWL描述语言的本体形式化表达，可将一个

事件链本体表示为：

Ontology={Concept, Property, Individual, Restriction}四元组 Concept：概念集合，灾害种类；Property：DataProperty 和 ObjectProperty；数据属性：属性字段，例如ID，灾害名称等；对象属性：事件与事件之间的关联关系，常用的对象属性有 kind-of、part-of、instance-of、attribute-of；Individual：为对象实例的集合，即某一个具体的事件（描述了事件与事件之间的约束关系）。以湖南省长株潭地区为例，研究突发自然灾害和事故灾难事件，构建以“新型冠状病毒肺炎（COVID-19）”为事故节点的传染病事件链模型。在疫情事件链模型中，疫情对社会的经济产生巨大影响，以及造成医疗资源紧张，失业率上升等，但也使得线上医疗，线上教育，线上商务等得到了较大的发展（如图2）。

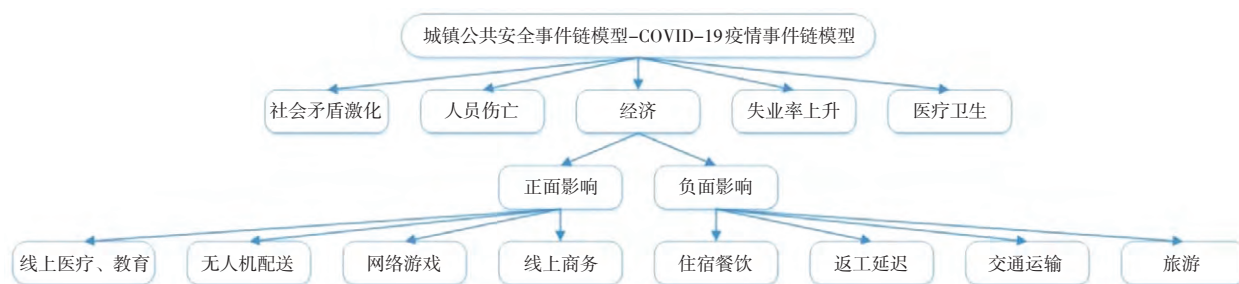


图2 城镇公共安全事件链模型

#### 3.2 构建传染病事件链传播模型

通过选取湘潭市病例信息之间的传播关系，利用本体建模的方法构建传染病事件链模型，解释病毒传播的客观规律，依据感染场所与接触关系特征将其划分为内部居住场所感染事件链模型、外部活动场所感染事件链模型、复合型感染事件链模型。以湘潭市病例数据为例构建传染病事件链传播模型如图4所示。

确诊病例之间以存在家庭关系为主，这是因为疫情暴发正值春节期间，返乡探亲、家人团聚等家庭活动增加了人员流动性和病毒在家庭内部的传播可能性；存在朋友和同事关系的发病案例极少，可见疫情期间小区封闭管理、企业停工停产等一系列措施有效阻断了病毒在朋友、同事之间的传播途径。

#### 3.3 病例总量及每日新增病历发展过程

利用文本分析法提取长株潭新冠肺炎病例总量及每日新增病历，长株潭市区累计报告新型冠状病毒肺炎确诊病例367例，图3是长株潭城市群新冠肺炎病例总量及每日新增病历发展过程，病例总数呈现先增

后趋于平缓趋势，分别于2月13日到2月20日、2月23日、2月20日为高峰。

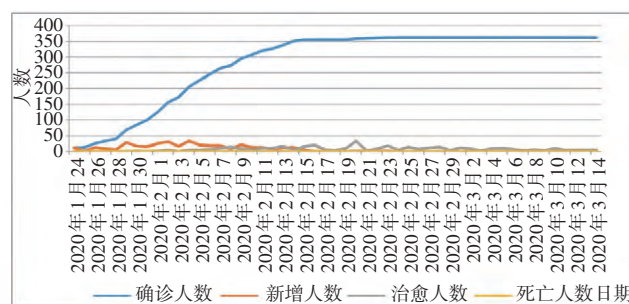


图3 长株潭新冠肺炎病例总量及每日新增病历发展趋势图

#### 3.4 长株潭各县区确诊病例与发病率的空间分布

湖南省长株潭各区县新型冠状病毒肺炎发病率的空间分布见图5。在长株潭各区县中，累积确诊人数在1~10人之间的有13个县区，10人以上的有10个县区。其中，确诊病例数最多的是长沙市芙蓉区、开福区和株洲市荷塘区，确诊病例分别为71人、59人和21人，总体来看，长沙市的发病率比较高，出现了局部病例高发现象。



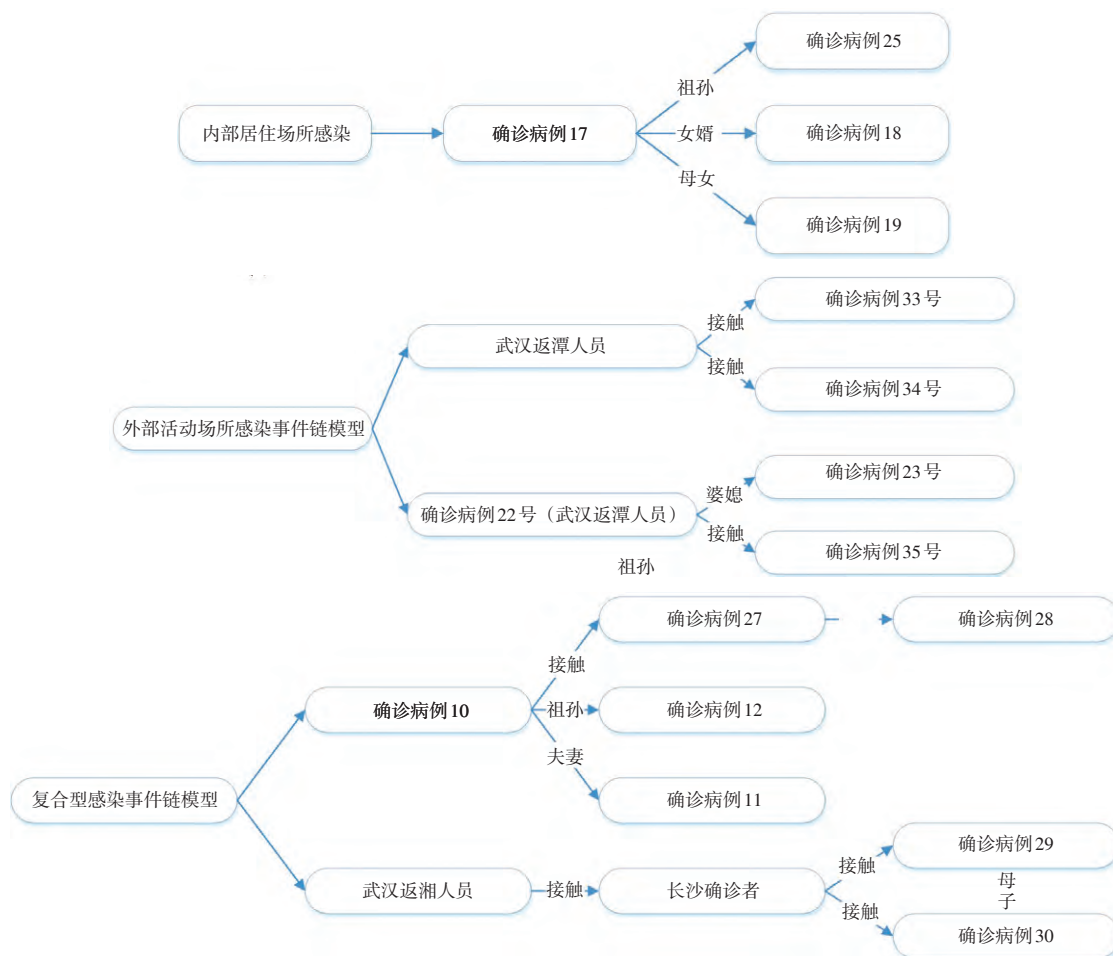


图4 传染病事件链传播模型

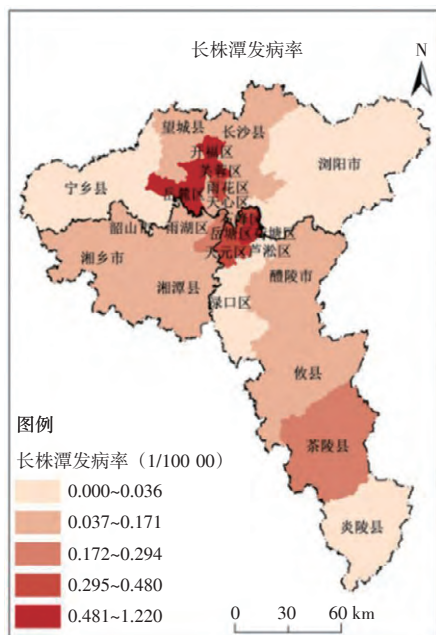


图5 长株潭各县区新冠肺炎疫情发病率的空间分布

疫情风险与防控任务受各个区县由于人口流动的差异性的影响,根据各区县常住人口数和确诊人数计算各区县的发病率,如图5可知,长株潭地区发病率最高的区域为芙蓉区,发病率为 $1.218\ 0\times 10^{-4}$ ,该区常

住人口为58.29万人,共有71例确诊病例,发病率为 $1.218\ 0\times 10^{-4}$ ;其次是开福区(确诊59人),该区常住人口69.08万人,发病率为 $0.854\ 1\times 10^{-4}$ ;荷塘区(确诊21人)常住人口29.75万人,发病率 $0.705\ 9\times 10^{-4}$ ;岳麓区和石峰区发病率分别为 $0.480\ 2\times 10^{-4}$ 和 $0.473\ 5\times 10^{-4}$ 。总体来看,发病率较高的县(区)主要在长沙市开福区、岳麓区、芙蓉区,株洲市荷塘区,这些区与主城区有很大的相关性。

### 3.5 基于人口流动的长株潭城市群疫情风险分析

1) 区县疫情风险的基本类型划分。由于新型冠状病毒的传播方式主要是通过人与人接触,人与物接触进行传播,且传播性极强,所以人口的流动是传播的重要因素。利用人口流动数据来计算长株潭地各县春节前后人口流入和流出、人口流动规模、人口流动比率等来表征人口流动水平。长株潭各县区人口流动比率分布状况见图4。

其中,长株潭的主城区及周边,尤其是株洲市荷塘区和长沙市岳塘区和芙蓉区主城区,人口呈现净流入;长株潭东部和中部大部分县区,比如湘潭市的湘潭县和湘乡市,长沙市的浏阳市,株洲市的渌口区

攸县人口为净流出。

长株潭地区第一产业是农林牧渔业，在农村地区有大量外出务工人员，春节期间有大量务工人员返乡，人口流动比率负值较大的区域分别为攸县、韶山市、浏口区等区县，是人口流出的主要区县。如图6所示，人口流动比率较大的区县分别为株洲市荷塘区，长沙市芙蓉区，流动人口分别占常住人口的48.27%和27.14%。

春节过后，各行各业陆续复工，人口的流动会对疫情造成影响，对于确诊病例较多的地区，人口流出对其他地区造成的风险相对较多。利用人口流动数据和确诊病例数据的相互关系对长株潭各区县相对风险系数进行划分，有利于疫情防控以及节后有序复工。各区县风险类型划分标准见表1，各类型的空间分布见图6。

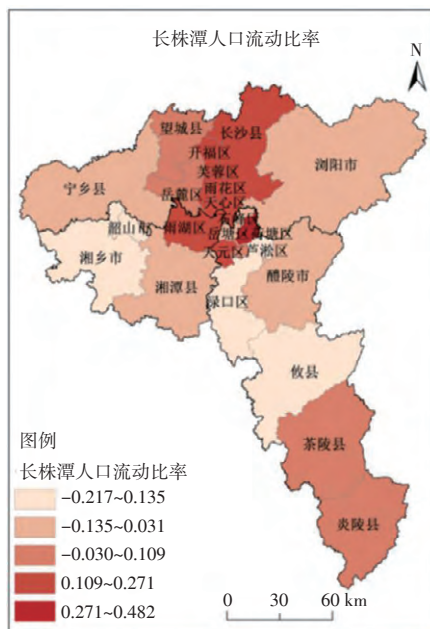


图6 长株潭人口流动比率图

表1 考虑确诊病例与人口流动风险类型划分标准

类型	确诊病例（人）	人口流动
高风险人口流入区	≥21	人口流入
高风险人口流出区	≥21	人口流出
中风险人口流入区	11~20	人口流入
中风险人口流出区	11~20	人口流出
低风险区	≤10	-

2) 区县疫情风险动态调整。搜集长株潭地区截至2月13日和2月18日的确诊病例数据，并对各个区县的风险系数可视化，如图7a所示长株潭地区人口流出分布风险图；图7b表示长株潭地区各县区人口流入引致的风险分布。在人口流出情况下，相对风险较高的区县依次是芙蓉区、开福区，荷塘区，

岳麓区。其中人口流入情况下，本地相对风险较高的区县依次是芙蓉区、开福区，荷塘区，岳麓区。其中图7c表示长株潭地区在截至2020-02-13各县区风险类型，根据确诊人数和人口流动相对风险系数的组合关系，对各县区风险类型进行划分。2月13日，本地相对风险较高的区县依次是芙蓉区、开福区，荷塘区，岳麓区、雨湖区（图7c）。总体来看，颜色较深的区域为长沙市主城区及周边县，湘潭市和株洲市等主城区，颜色越深表示人口流入和流出所引致的相对风险都较高。

2月14日至2月18日，长株潭地区累计新增确诊病例28例，各地疫情防控取得重要进展，新增病例普遍有大幅度下降，疫情风险发生一定变化。2020-02-18~2020-02-24，长株潭新增确诊人数已经下降到个位数（0例）的水平。因此，有必要根据疫情形势，对各区县疫情风险类型进行调整，以便统筹疫情防控和社会经济秩序的恢复。基于表1的风险类型划分标准，根据5d来长株潭各区县新增确诊病例情况，对风险等级进行调整。调整依据为，以2月18日的风险类型划分为基础，若近5d累计新增确诊病例不超过1例，则下调一个风险等级；低风险区新增确诊病例不超过1例，则保持风险等级不变；若近5d累计新增确诊病例达到2个及其以上，则高风险区不变，中、低风险区则分别调高一个风险等级。

依据上述规则，图7d显示了2020-02-18长株潭各区县疫情风险变动情况。其中，高风险下调为中风险的区县为开福区，中风险下调为低风险包含4个区县，维持低风险不变的有11个区县，维持高风险不变的有3个区县。值得注意的是，株洲市荷塘区由中风险上调为高风险；茶陵县和泸松区由低风险上升到中风险。

### 3.6 热点分析

使用热点分析探究区县尺度确诊人数分布特征如图8所示，其中99%置信水平的热点区分布于长沙市望城区、开福区、长沙县；95%置信水平的热点分布在雨湖区、芙蓉区、雨花区、天心区、株洲市石峰区、荷塘区；90%置信水平的热点分布在岳麓区、岳麓区，冷点区主要是湘潭县、茶陵县、醴陵市、浏阳市、泸松区等。总体来看，区县尺度发病率呈离散型、斑块状分布，主要聚集于南部区县；热点区主要分布于长株潭中南部，呈现以长沙市主城区为圆心的圆团状分布。这主要受人口密度及流动强度的影响，与长株潭风险评价结果一致。

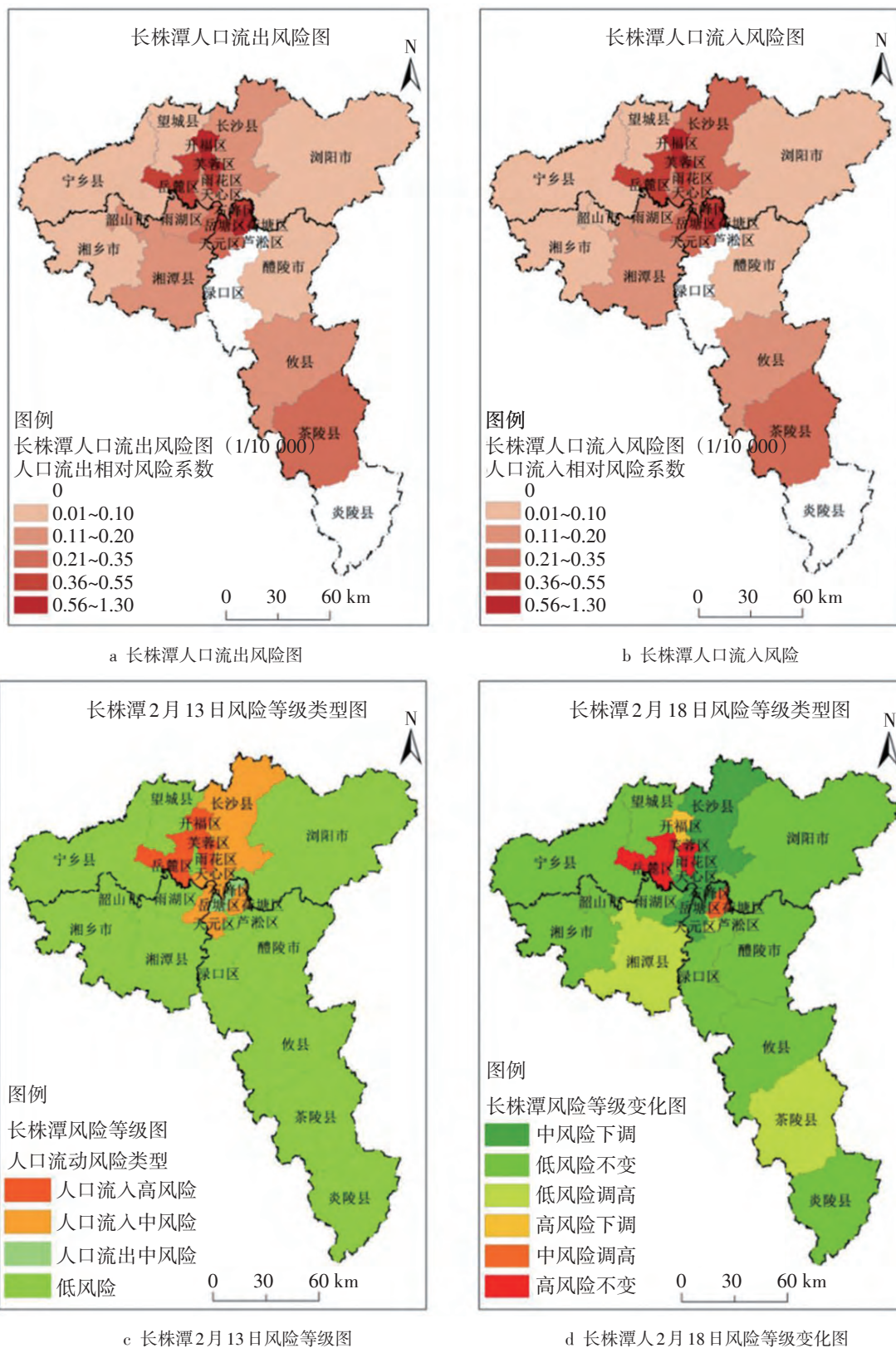


图7 长株潭疫情风险图



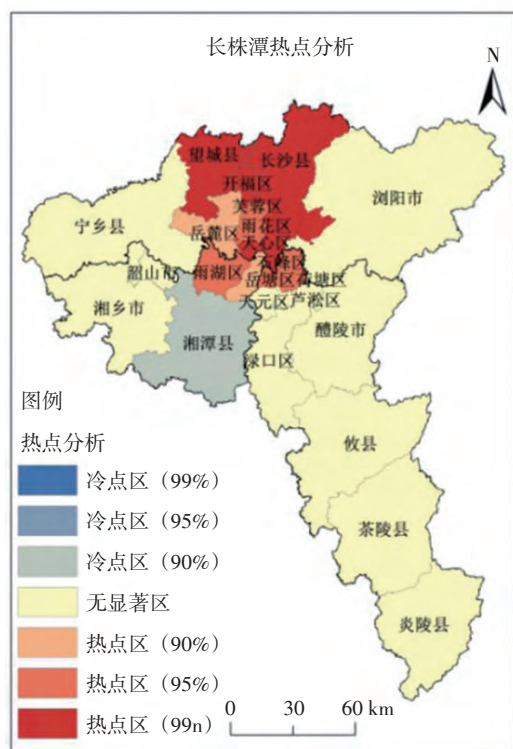


图8 长株潭热点分析图

## 4 结 论

本文以长株潭 367 例新冠肺炎的病例数据为例,利用本体建模的方法对湖南省长株潭 367 例新冠肺炎的病例构建传染病事件链传播模型,并利用探索性数据分析方法对其进行分析,得出如下结论:

1) 通过构建城镇公共安全事件链模型和传染病事件链传播模型,分析出此次疫情对经济、交通、就业等方面产生的一些影响,以及具体病例之间的传播过程。选择典型案例分析其感染过程及原因,对辅助管控长株潭各县区 COVID-19 疫情发展,以及后期的隔离措施、交通限制对传染病事件链起到了断链的作用。

2) 基于人口流动的长株潭各区县疫情风险分析,首先得出病例总量集聚区和人口流入、流出所引起的高风险区主要分布于长沙市主城区及周边县,湘潭市和株洲市等主城区,遵循与湖北省地理邻近和网络邻近的特征,且扩散形式大多为家庭式集聚性扩散,其次对各区县疫情风险类型进行调整,以更好地统筹疫情防控和社会经济秩序的恢复。

3) 使用热点分析探究区县尺度确诊人数分布特征,得出热点区主要分布于长株潭中南部,呈现以长

沙市主城区为圆心的圆团状分布,这主要受人口密度及流动强度的影响,且与长株潭风险评价结果一致。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 曹盛力,冯沛华,时朋朋. 修正 SEIR 传染病动力学模型应用于湖北省 2019 冠状病毒病(COVID-19)疫情预测和评估[J]. 浙江大学学报(医学版),2020,49(2):178-184
- [3] 刘逸,李源,黎卓灵,等. 新冠肺炎疫情在广东省的扩散特征[J]. 热带地理,2020,40(3):367-374
- [4] 徐享忠,杨建东,汤再江. 基于 OWL 的本体建模与推理研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2017,31(5):81-85
- [5] 陈琦,吴杨,陈楚鼎,等. 湖北省新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J]. 公共卫生与预防医学,2020,31(3):1-5
- [6] 崔芳芳,何贤英,高景宏,等. 河南省 1272 例新型冠状病毒肺炎流行病学特征[J]. 中华医院感染学杂志,2020(15):2 247-2 251
- [7] 王皎贝,李钢,王建坡,等. 陕西省 COVID-19 疫情时空演化与风险画像[J]. 热带地理,2020,40(3):432-445
- [8] 赵善露,高立冬,罗垚炜,等. 湖南省新型冠状病毒肺炎聚集性疫情流行特征分析[J]. 实用预防医学,2020,27(5):517-520
- [9] 黄成. 超图视角下的事故灾难类突发事件链模型研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2019
- [10] 姜坤. 情景驱动的并发型突发事件链建模方法[D]. 大连:大连理工大学,2019
- [11] 马晓霏,仲秋雁,曲毅,等. 基于情景的突发事件链构建方法[J]. 情报杂志,2013,32(8):155-158
- [12] She Jun, Jiang Jinjun, Ye Ling, et al. 2019 Novel Coronavirus of Pneumonia in Wuhan, China: Emerging Attack and Management Strategies[J]. Clinical and Translational Medicine, 2020, 9(1):19
- [13] Yang Wentao, Deng Min, Li Chaokui, et al. Spatio-Temporal Patterns of the 2019-nCoV Epidemic at the County Level in Hubei Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(7):2 563

**第一作者简介:** 刘俊杰 (1993—), 研究生, 研究方向为城镇公共安全事件链与智能应急预案联动技术。