



# COVID-19疫情早期中国确诊时间的 时空特征及动态过程分析

张新<sup>1</sup> 林晖<sup>2</sup> 朱长明<sup>3</sup> 王劲峰<sup>4</sup> 李满春<sup>5</sup> 徐成东<sup>4</sup>  
胡茂桂<sup>4</sup> 孟斌<sup>6</sup> 曹春香<sup>1</sup>

1 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室,北京,100101

2 中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京,100041

3 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,江苏 徐州,221116

4 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

5 南京大学地理与海洋科学学院,江苏 南京,210023

6 北京联合大学应用文理学院,北京,100191

**摘要:**流行病学确诊时间能够反映一个国家和地方卫生部门的综合应急水平及理疗能力。基于中国疾病预防控制中心提供的中国大陆地区早期7万余个新型冠状病毒肺炎(coronavirus disease 2019, COVID-19)确诊和疑似病例诊疗时间记录数据,采用分区统计、空间制图、趋势模拟和显著性检验等分析手段,研究了COVID-19疫情早期在诊断时间的时空分布、空间分异和动态过程。研究结果表明:(1)COVID-19疫情早期从发病到确诊的平均确诊时间为7.35 d,其中湖北省为7.99 d,其他省份平均为5.68 d;从疑似到确诊的平均确诊时间为3.86 d,湖北省为4.08 d,其他省份为2.91 d。虽然湖北省的确诊时间要略微高于中国大陆地区平均水平,但是这种空间分异现象差异不是特别明显,各地平均确诊时间离散度仅为0.58 d。(2)COVID-19疫情早期确诊时间呈显著下降趋势(Slope=-0.78,  $P<0.01$ , 双尾),确诊时间由疫情暴发早期的2个月内快速下降至1 d左右,大大提高了COVID-19诊疗效率。(3)对出院病例的治愈时间与确诊时间进行Pearson相关分析,结果表明,治愈时间和确诊时间显著相关( $P<0.01$ , 双尾),这从侧面反映缩短确诊时间、早治早疗和及时诊疗可以有效提高治愈率。

**关键词:**新型冠状病毒肺炎;确诊时间;时空分析;动态过程

**中图分类号:**P208

**文献标志码:**A

重大公共传染性疫情防控的关键是时间和效率,它反映了各地卫生部门应对重大传染病的应急响应措施效率,体现了医疗部门的综合治疗能力。随着应对响应时间的增加,病毒在自然界暴露越久,潜在的感染风险就越大,感染人数将会呈几何级数增长<sup>[1]</sup>。流行病的确诊时间定义为患者从发病到确诊所需要的时间,在流行传染病防控的众多时间指标中,确诊时间是极其重要的指标之一<sup>[2-3]</sup>。降低社区暴露风险是传统的控制措施,是减少传染性疾病传播非常有效的途径<sup>[4]</sup>。没有确诊之前,潜在病例没有得到有效隔离和收治,发生人与人相互交叉感染概率较大,会加速病毒在物理空间的扩散;此外,潜在病例没有确

诊就得不到及时治疗,延误治疗时机,有效时间窗口将逐步收紧。因此在诊断治疗和集中收治的过程中耽搁时间越长,潜在后患问题就越大,无形中增加了病毒防控的难度和后续疫情控制的压力。研究和挖掘流行病的确诊时间时空特征,一方面可从侧面反映一个国家和地区卫生部门的应急响应水平及理疗能力,另一方面可以及时发现存在的问题和短板,对指导物资设备调配和实现科学高效防控等均有重要意义。

目前,新型冠状病毒肺炎(coronavirus disease 2019, COVID-19)已经在全球100多个国家和地区大流行传播,对人们的日常生产生活和社会经济的平稳健康运行造成了严重的影响<sup>[5]</sup>。由于各

个国家或地区对待 COVID-19 的防控措施力度、医疗水平以及应急响应速度等存在差异,其基本传染数和传染病倍增时间均存在较大的时空差异<sup>[6-9]</sup>。中国针对 COVID-19 疫情,各个省份第一时间陆续启动了重大突发卫生公共事件一级响应机制,制定了很多行之有效的科学防控措施,如居家管控、集中隔离、寻找密切接触者和加快病毒检测等全国一盘棋的联防联控和群防群控措施,取得了显著成效<sup>[10-12]</sup>。文献[13-14]表明,中国居家管控和集中隔离至少减少了数百万人的潜在感染。利用基于时空大数据的病例分布情况、病例活动轨迹测算等对个人进行健康自查、核查,通过网格化管理提供居民服务、引领社区治理等,让城市更智慧<sup>[15]</sup>。

由于疫情早期对 COVID-19 病毒的相关流行病学特征和传播机制信息尚未完全明确,缺乏快速确诊的方法,对病毒的医学实验室确诊主要是通过核酸检测,因此整个确诊方案过程比较繁琐,患者的确诊时间普遍较长且存在不确定性。利用地理空间大数据分析技术研究 COVID-19 疫情在中国大陆地区早期的确诊时间时空特征和动态特征规律,对认识中国应对 COVID-19 流行病疫情的防控措施力度和疫情变化趋势,科学评估各地卫生医疗应急的综合实力和治理能力水平等具有重要意义。为此,本文基于中国疾病预防控制中心(Chinese Center for Disease Control and Prevention, CDC)提供的 2019-12-08—2020-02-08 中国大陆地区 7 万余个确诊和疑似病例从发病到确诊的诊疗过程时间记录,采用分区统计、空间制图、相关分析和趋势分析等方法,研究了 COVID-19 疫情暴发早期中国大陆地区的确诊时间空间分布、动态轨迹和趋势分析,为中国 COVID-19 疫情的防控评估提供数据服务以及为大陆地区制定部署科学防控方案提供信息参考。

## 1 数据与方法

COVID-19 疫情诊疗记录病例数据来自国务院联防联控机制疫情防控组大数据分析专题组建立的中国大陆地区确诊和疑似病例诊疗数据库,数据统计截止时间为 2020-02-08,总计 78 889 条记录。所有病例诊疗记录内容包括首次出现相关症状的时间、疑似新冠肺炎的时间、确诊的时间、危重程度、治愈出院的时间、所属地区。所用数据由 CDC 提供,相关病例数据经过了严格的审查和脱敏,相关病例只有数字编号,地址只有

所属地行政代码。

根据 COVID-19 疫情早期的确诊过程——发病-疑似-确诊 3 个阶段,依据发病日期、疑似确诊日期和确诊日期,分别统计每个病例从发病到确诊和从疑似到确诊的时间。从发病到确诊的时间计算如下:

$$T_i = D_{qi} - D_{si} + 1 \quad (1)$$

式中,  $D_{qi}$  为确诊 COVID-19 的日期;  $D_{si}$  为首次出现相关发病症状的日期。从疑似到确诊的时间算法方法类同。

首先根据病例所属地在空间上进行分省分区统计平均确诊时间。考虑到湖北省的集中暴发情况和试剂检测数量负荷实况,分类计算了全国、湖北省和其他省份确诊时间的动态变化过程、趋势分析及显著性水平和突变检验。然后根据所属地行政代码属性链表,实现各地区病例确诊时间的空间制图分析。

根据每天确诊病例的平均确诊时间,采用一元线性回归模型对时间序列数据进行拟合,分析确诊时间的变化趋势特征,并对回归模型进行显著性  $t$  检验,以减少数据随机性和偶然性误差。同时运用 Pearson 参数方法进行确诊时间与治愈时间相互关系分析和显著性水平检验。其中变化特征趋势斜率( $R$ )的计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$R = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times T_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n T_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中,  $n$  为参与统计的数据期数;  $R$  为正值表示确诊时间呈增加趋势,为负值表示呈减少趋势,为零值表示呈恒定趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 确诊时间空间分布制图

根据确诊病例的诊疗记录统计了 COVID-19 疫情早期的确诊时间,并完成了地级市尺度空间分布制图,如图 1 所示。图 1(a)为从发病到确诊的确诊时间地级市尺度分布图,图 1(b)为从疑似到确诊的确诊时间地级市尺度分布图。由图 1 可知,COVID-19 疫情早期的确诊时间存在一定差异,首次出现发病症状到最终确诊的时间,东部地区明显高于西部地区;从疑似到最终确诊的时间,中部地区呈现明显的积聚,湖北省内地级市的确诊时间高于其他地级市。

进一步分省统计确诊时间发现,COVID-19

疫情早期从发病到确诊的平均确诊时间为 7.35 d, 湖北省为 7.99 d, 其他省份的平均确诊时间为 5.68 d。从疑似病例到确诊的平均确诊时间为 3.86 d, 湖北省为 4.08 d, 其他省份的平均确诊时间为 2.9 d。在省级尺度下, 湖北省的确诊时间高于其他省份; 在地市级尺度下, 武汉市的确诊时间高于其他地级市。图 2 显示了各地区确诊时间距平, 反映了各个地区确诊时间的离散程度和大

小。由图 2 可以看出, 湖北、西藏、江苏、广东、福建、江西、甘肃、辽宁、吉林、浙江、海南、河南、山西、山东等省级确诊时间均高于平均水平; 武汉、鄂州、荆州、孝感、宜昌、荆门等地级市的确诊时间均高于湖北省平均水平。虽然湖北省的确诊时间要略微高于平均水平且各省市存在差异, 但是这种空间分异现象总体上不是特别的明显, 湖北省之外各地平均确诊时间的离散度为 0.58 d。

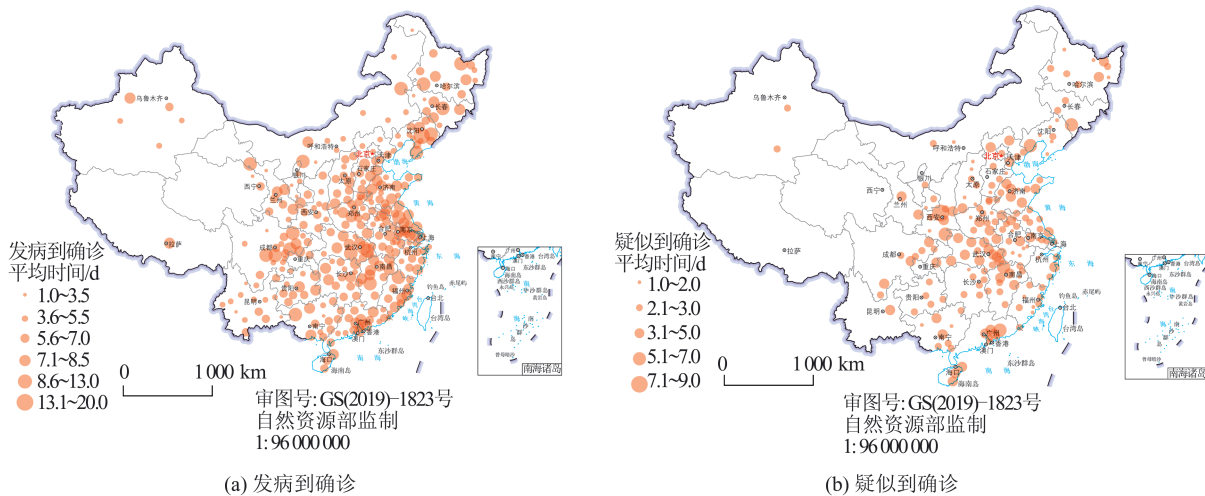


图 1 COVID-19 早期确诊时间空间分布图

Fig.1 Spatial Distribution of Early Outbreak Epidemic Diagnosis Time of COVID-19

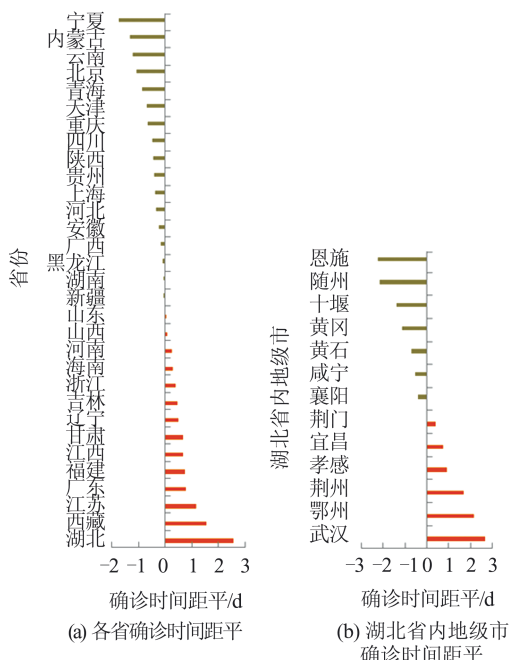


图 2 COVID-19 早期确诊时间距平

Fig.2 Anomalies of Early Outbreak Epidemic Diagnosis Time of COVID-19

2.2 确诊时间的动态变化过程

COVID-19 疫情暴发早期确诊时间箱线图及动态过程拟合曲线见图 3。图 3(a) 为从发病到确诊的时间曲线; 图 3(b) 为从疑似到确诊的时间曲

线。从图 3 可以看出, 由于刚开始对 COVID-19 病毒缺乏了解和认识, 确诊时间耗时较长; 但在时间动态过程上确诊时间呈现快速下降的态势, 平均确诊时间降低至 1 d 左右, 所有患者基本上 1~2 d 就能够准确确诊。而疑似到确诊的时长也由刚开始的最长 18 d 的记录下降到 1 d, 所有疑似病例基本实现了当天清空。COVID-19 早期确诊时间变化趋势  $R$  为  $-0.78 (P < 0.01, \text{双尾})$ 。

进一步将湖北省和其他省份的确诊时间分开统计, 得到相应的时间曲线, 如图 4 所示。图 4(a) 为湖北省从发病到确诊的时间曲线; 图 4(b) 为其他省份从发病到确诊的时间曲线; 图 4(c) 为湖北省从疑似到确诊的时间曲线; 图 4(d) 为其他省份从疑似到确诊的时间曲线。

由图 4 可知, 疫情早期从发病到确诊以及从疑似到确诊的耗时均比较长, 且湖北省要略高于其他省份。但是, 在变化过程上, 湖北省内外的动态趋势高度相似, 随着时间的推移, 确诊时间快速下降, 当前各地区的确诊时间基本趋同, 所有首次发病和疑似病例均能够在 1~2 d 之内确诊。而其他省份从疑似到确诊的动态曲线在 1 月 27 日有个低谷反弹, 这主要是受到传统春节的影响所致。

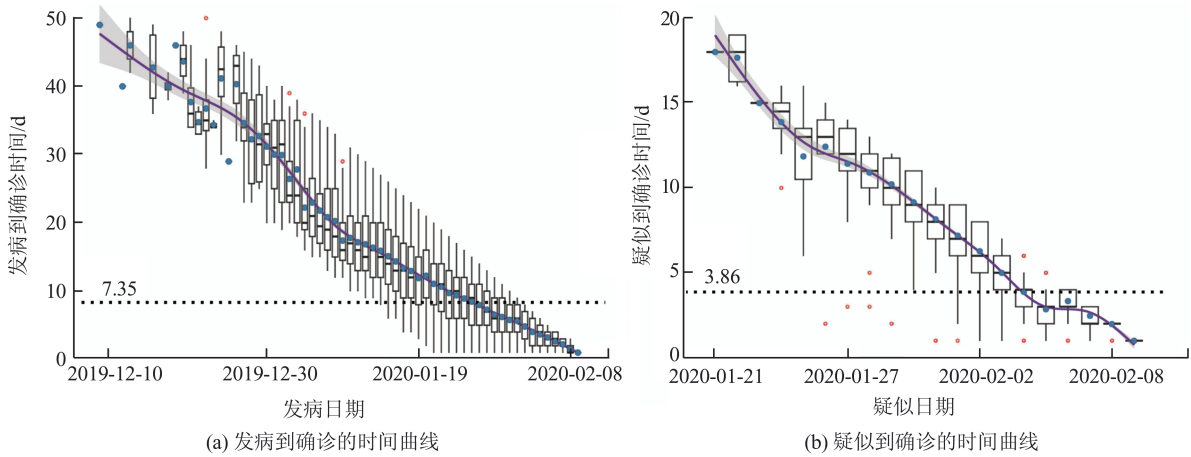


图3 确诊时间箱线图及动态拟合曲线

Fig.3 Box Plot and Dynamic Fitting Curve of Epidemic Diagnosis Time

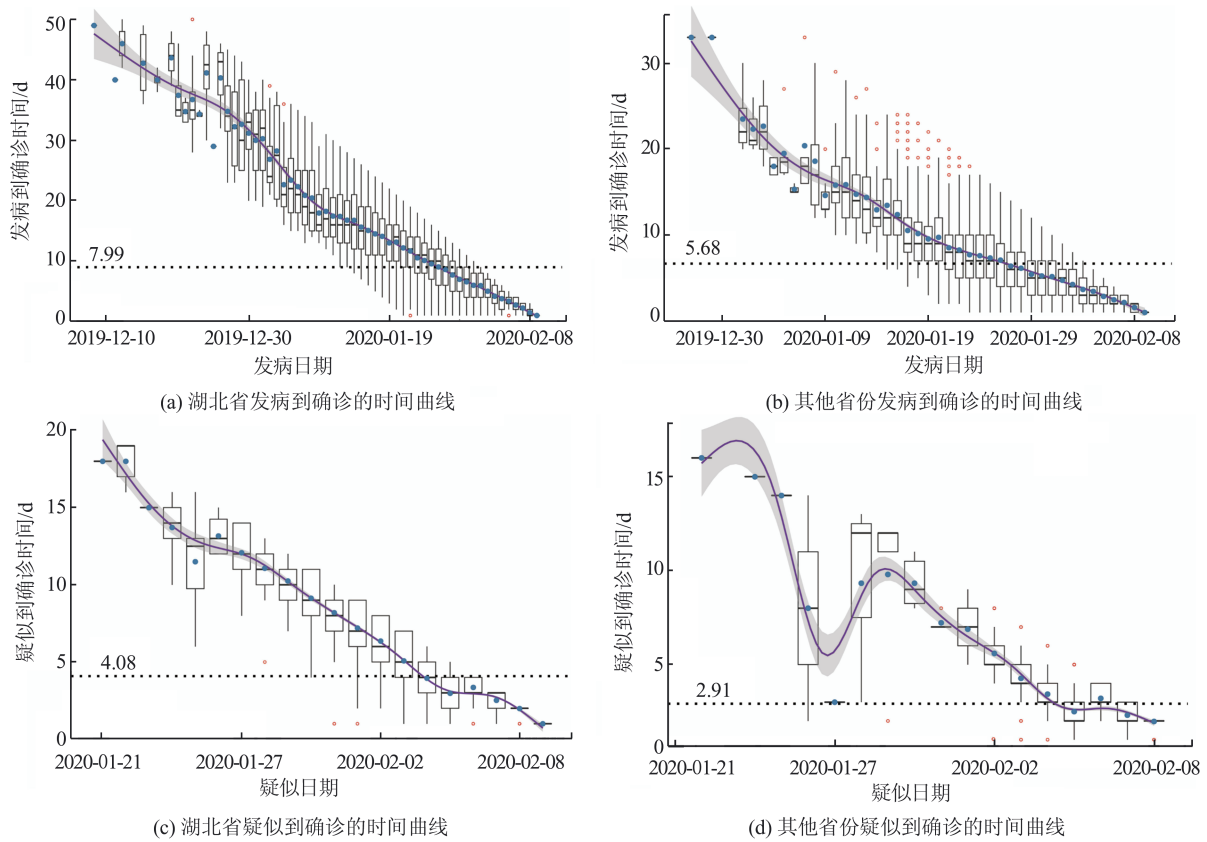


图4 湖北省和其他省份的确诊时间曲线

Fig.4 Epidemic Diagnosis Time Series of Hubei Province and Other Provinces

2.3 COVID-19确诊时间与治愈时间关系分析

根据现有的治愈病例数据统计分析了从确诊到治愈出院的时间,结果显示当前中国大陆地区的平均治疗时间为8.98 d。对比分析了省级尺度治愈时间与确诊时间的关系,绘制了省级尺度确诊时间和治愈时间的散点图,如图5所示。由图5可以看出,治愈时间与确诊时间存在着一定关联,进一步通过Pearson相关统计表明,COVID-19暴发早期的确诊时间和治愈时间显著相关( $R=0.625, P$

$<0.01$ , 双尾)。

3 结语

应对COVID-19重大传染性疫情的关键是时效,病毒的传播与扩散过程在地理学本质上是疫情时空演变过程问题。疫情暴发以来,中国政府及时成立了国务院应对COVID-19疫情联防联控工作机制,采取了一系列科学有效的防控措施,

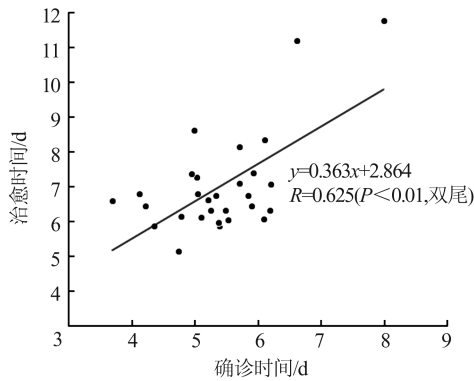


图5 COVID-19 确诊时间与治愈时间的散点图

Fig.5 Scatter Plot Between Epidemic Diagnosis Time and Healing Time

从时空维度阻断疫情传播、抑制疫情扩散。本文结合国务院联防联控机制疫情防控组大数据分析专题组的实际工作,以确诊时间为切入点,基于截止到2020-02-08中国大陆地区各省市确诊和疑似病例的诊疗记录数据,深入分析了COVID-19早期确诊时间的空间分布特征和时长的动态变化。

由于早期COVID-19疫情在湖北省集中暴发,且疑似患者数量积累较多,涉及到检测设备紧缺和各种人力和物力资源的调配,导致COVID-19早期在湖北省的确诊时间偏高。湖北省和其他省份确诊时间的空间差异主要受到潜在被感染规模和密切接触者数量的影响。总体上,COVID-19确诊时间空间差异不明显,且随着时间的推移,这种差异越来越小,目前大多数病例基本能够做到当天确诊,尤其是疑似病例日日清零。中国大陆地区各个省份的确诊时间显著降低的动态轨迹过程一方面体现了COVID-19诊疗技术取得了突破性进展;另一方面体现了中国政府针对COVID-19疫情应急措施的提升和综合防控治疗能力的加强。结合确诊时间和治愈时间的关系以及有关学者的研究结论<sup>[12-13]</sup>,综合说明缩短诊断时间、及时诊疗、早诊早治是提高治愈率的一个非常有效的措施。

致谢:特别感谢全国政协十二届全国委员会王钦敏副主席、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励惠国研究员对本文相关工作的指导;十分感谢国务院联防联控机制疫情防控组大数据分析工作专题组牵头单位中国电子科技集团公司电子科学研究院吴曼青院士、张龙研究员、刘弋峰研究员等同仁的指导和帮助;非常感谢中国科学院空天信息创新研究院吴一戎院士、周翔研究员、柳钦火

研究员、潘洁研究员、骆剑承研究员、杨崇俊研究员、邵丽静老师、洪永欣同学,以及南京大学陈焱明副教授、中山大学张清凌教授、清华大学赵红蕊教授、西南交通大学朱庆教授等多位专家和学者对本文相关工作的帮助和指导。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Xin, Lin Hui, Wang Jinfeng, et al. Scientific and Technological Strategies Proposal for the Construction of Digital Public Health Emergency Management System in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(5): 633-639(张新,林晖,王劲峰,等.中国数字化公共卫生应急管理体系建设的科技策略建议[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2020,45(5):633-639)
- [2] Yao Shuxiang, Philip Taylor, Qiao Youlin, et al. Analysis of the Time from Suspected Diagnosis of Lung Cancer in Yunnan Tin Miners [J]. *Bulletin of Chinese Cancer*, 2000(5): 210-211(姚树祥, Philip Taylor, 乔友林,等.云锡矿工肺癌发现可疑到确诊时间分析[J].*中国肿瘤*,2000(5):210-211)
- [3] Li Manquan, Chen Xiaogang. The Application of the Exclusion Test Diagnosis Method in the Rapid Diagnosis of Infectious Diseases [J]. *Chinese Journal of Frontier Health and Quarantine*, 2006(5): 275-281(黎满全,陈小刚.排除检查诊断法在传染病快速诊断中的应用[J].*中国国境卫生检疫杂志*,2006(5):275-281)
- [4] Wang J F, McMichael A J, Meng B, et al. Spatial Dynamics of an Epidemic of Severe Acute Respiratory Syndrome in an Urban Area [J]. *Bulletin of the World Health Organization*, 2006, 84(12): 965-968
- [5] Chen Xikang, Yang Cuihong, Bao Qin, et al. Analysis of the Impact of the New Coronary Pneumonia Epidemic on the Chinese Economy and Countermeasures [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200210003(陈锡康,杨翠红,鲍勤,等.新冠肺炎疫情对中国经济的影响分析与对策建议[J].*中国科学院院刊*,2020,DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.20200210003)
- [6] Kamalich M R, Gerardo C, et al. Epidemic Doubling Time of the 2019 Novel Coronavirus Outbreak by Province in Mainland China [OL]. MedRxiv, DOI: 10.1101/2020.02.05.20020750
- [7] Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, 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
- [8] Yang Y, Lu Q, Liu M, et al. Epidemiological and Clinical Features of the 2019 Novel Coronavirus Outbreak in China [OL]. MedRxiv, DOI: 10.1101/2020.02.10.20021675v2
- [9] Shi Yaolin, Cheng Huihong, Huang Luyuan, et al. Using a Discrete Stochastic Model to Study the Epidemic Dynamics of COVID-19 in Hubei, China [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(2):145-154(石耀霖,程惠红,黄禄渊,等. 用离散随机模型研究湖北新冠肺炎 COVID-19 流行病动力学特征[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(2):145-154)
- [10] Zhu Xiaoli, Huang Cui, Ma Lili, et al. Research Advances of Novel Coronavirus Disease (COVID-19) [J]. *China Biotechnology*, 2020, 40(1/2):38-50(朱小丽,黄翠,马丽丽,等. 新型冠状病毒病(COVID-19)研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2020, 40(1/2):38-50)
- [11] CNS. Many Provinces Have Initiated a First-Level Response Mechanism for Major Public Health Emergencies [EB/OL]. [2020-01-24]. <http://www.chinanews.com/gn/2020/01-24/9068940.shtml>. (中国新闻社. 多省份启动重大突发公共卫生事件一级响应机制[EB/OL]. [2020-01-24]. 中新网)
- [12] Tang Sanyi, Xiao Yanni, Peng Zhixing, et al. Prediction Modeling with Data Fusion and Prevention Strategy Analysis for the COVID-19 Outbreak [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2020, 41(4):480-484(唐三一,肖燕妮,彭志行,等. 新型冠状病毒肺炎疫情预测建模、数据融合与防控策略分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(4):480-484)
- [13] Borame L, Joel R, Annelies W. Institutional, Not Home-Based, Isolation Could Contain the COVID-19 Outbreak [J]. *The Lancet*, 2020, 395(10 236): 1 541-1 542
- [14] Tian H, Liu Y, Li Y, et al. An Investigation of Transmission Control Measures During the First 50 Days of the COVID-19 Epidemic in China [J]. *Science*, 2020, 1 126(10):abb6105
- [15] Li Deren, Shao Zhenfeng, Yu Wenbo, et al. Public Epidemic Prevention and Control Services Based on Spatiotemporal Location Big Data Make Cities Smarter [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(4):475-487, 556(李德仁,邵振峰,于文博,等. 基于时空位置大数据的公共疫情防控服务让城市更智慧[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4):475-487, 556)
- [16] Bao A, Huang Y, Ma Y, et al. Assessing the Effect of EWDP on Vegetation Restoration by Remote Sensing in the Lower Reaches of Tarim River [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 261-275

## Spatiotemporal Characteristics and Dynamic Process Analysis of Epidemic Diagnosis Time of COVID-19 at Early Stage in Chinese Mainland

ZHANG Xin<sup>1</sup> LIN Hui<sup>2</sup> ZHU Changming<sup>3</sup> WANG Jinfeng<sup>4</sup> LI Manchun<sup>5</sup>  
XU Chengdong<sup>4</sup> HU Maogui<sup>4</sup> MENG Bin<sup>6</sup> CAO Chunxiang<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Institute of Electronic Science, China Electronic Technology Group Corporation, Beijing 100041, China

3 School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

4 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

5 School of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

6 College of Arts and Science, Beijing Union University, Beijing 100191, China

**Abstract:** Epidemic diagnosis time can scientifically evaluate and comprehensively reflect the emergency level and physical therapy capacity of a national or local health department. Based on the diagnosis and treatment time records of more than 70 000 diagnosed or suspected cases of coronavirus disease 2019(COVID-19) provided by the Chinese Center for Disease Control and Prevention (CDC), this paper uses regional statistics, spatial mapping, trend simulation, and significance testing to analyze the temporal and spatial distribu-

tion, spatial differentiation and dynamic process of the early diagnosis time of COVID-19 in Chinese mainland. Results show that: (1) The average epidemic diagnosis time for COVID-19 outbreak from early onset to diagnosis is 7.35 days. Among them, Hubei Province is 7.99 days, and the average diagnosis time in other provinces is 5.68 days. The average time from suspect to diagnosis is 3.86 days, 4.08 days in Hubei, and 2.91 days in other provinces. Although the epidemic diagnosis time in Hubei Province is slightly higher than the average, the difference in spatial differentiation is not particularly noticeable. The average dispersion of diagnosis time is only 0.58 days. (2) The dynamic process of COVID-19 diagnosis time shows a significant decrease trend (Slope =  $-0.78$ ,  $P < 0.01$ , two-tailed), and the diagnosis time quickly drops to 1 day within 2 months of the early outbreak. This greatly improves the efficacy of epidemiological diagnosis. (3) Pearson correlation analysis between epidemic diagnosis time and healing period shows significantly related ( $P < 0.01$ , two-tailed). Early diagnosis and early treatment can reduce the time for patients to heal. All patients are treated in time to effectively improve the cure rate. The above research results indicate that: Chinese government has steadily promoted the overall prevention and control of the epidemic, and achieved remarkable results. Efficient diagnosis reduces the natural exposure time of the virus, reduces the time to cure and the probability of potential cross-infection. It has laid a solid foundation for the prevention and control of the epidemic in China in a short period of time and the nationwide resumption of work and production.

**Key words:** coronavirus disease 2019(COVID-19); epidemic diagnosis time; spatiotemporal analysis; dynamic process

**First author:** ZHANG Xin, PhD, professor, majors in geographic space-time analysis and simulation research. E-mail: zhangxin@radi.ac.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2017YFB0504201); the National Natural Science Foundation of China(61473286).

**引文格式:** ZHANG Xin, LIN Hui, ZHU Changming, et al. Spatiotemporal Characteristics and Dynamic Process Analysis of Epidemic Diagnosis Time of COVID-19 at Early Stage in Chinese Mainland[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 791-797. DOI:10.13203/j.whugis20200255(张新, 林晖, 朱长明, 等. COVID-19 疫情早期中国确诊时间的时空特征及动态过程分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 791-797. DOI:10.13203/j.whugis20200255)