

我国COVID-19疫情时空演变特征与趋势研究

——基于 Spatial Markov Chain 和 STL 时间序列模型

张小英, 巫细波*

广州市社会科学院, 广东 广州

收稿日期: 2021年11月14日; 录用日期: 2021年12月14日; 发布日期: 2021年12月24日

摘要

基于2020年1月24日~2021年3月4日省级行政区的COVID-19肺炎现有确诊病例数、累计确诊病例数、治愈数等统计数据, 本文采用GIS分析、空间马尔科夫链、STL时间序列模型等方法从时间和空间两个维度分析我国新型冠状病毒肺炎(简称COVID-19)疫情时空演变特征。研究发现: ① 全国COVID-19疫情大致分为“大规模快速爆发期、全国严格防控期、全国抑制期、局部复发期、常态化防控期、二次局部复发期、常态化防控期”等7个阶段, 绝大部分省份疫情变化特征与全国总体情况相一致, 个别省份因局部地区爆发疫情导致疫情变化特征表现出一定差异性。② 湖北春运期间的大规模人口流动是导致疫情在全国范围内快速扩张的主要原因, 湖北封城之前14天的百度迁徙规模指数与全国各省市区的累计确诊数(到2月11日)呈现显著正相关。③ 采用马尔科夫链模型分析各省市COVID-19疫情现存确诊数的结果显示, 4种疫情风险(高感染、较高感染、较低感染、低感染)保持不变的概率较为稳定且空间分布相对固定, 平均向下转移的概率高于向上转移概率, 反映了我国COVID-19现存确诊数量下降的趋势。④ 采用STL时间序列趋势分析法分析我国及典型省市的每周现存确诊病例数变化特征及趋势, 我国中后期现存确诊数总体呈现平稳趋势, 新增确诊病例主要来自境外输入病例, 输入性防控将是我国疫情防控重点。

关键词

COVID-19, 时空演变, 空间马尔科夫链模型, STL时间序列模型

Study on Trend and Characteristics of Spatio-Temporal Evolution of COVID-19 Epidemic in China

—Based on Spatial Markov Chain and STL Time Series Model

Xiaoying Zhang, Xibo Wu*

Guangzhou Academy of Social Sciences, Guangzhou Guangdong

*通讯作者。

Abstract

Based on statistical data including the number of active cases, accumulated confirmed cases and cured case of Novel Coronavirus Pneumonia (COVID-2019) in the provincial administrative region from January 24, 2020 to March 4, 2021, this paper uses methods including Geographic Information System (GIS) analysis, Spatial Markov Chain, STL time series model and so on to analyze spatial and temporal evolution characteristics of Novel Coronavirus Pneumonia in China. The study found that: ① The COVID-19 epidemic in China can be roughly divided into seven stages including large-scale rapid outbreak period, national strict prevention and control period, national suppression period, local recurrence period, normalized epidemic prevention period, second local recurrence period and normalized epidemic prevention period. The epidemic change characteristics of most provinces are similar to the nationwide's situation. Due to the outbreak of the local epidemic, the characteristics of epidemic changes in individual provinces show some differences. ② The high population mobility from Hubei during the Spring Festival transportation period are the main reasons for the rapid expansion of the epidemic. The Baidu Migration Scale Index for the 14 days prior to Hubei closure was significantly correlated with the cumulative diagnosis of provinces (by February 11). ③ The analysis results of the Markov chain model for active cases of COVID-19 in provinces show that the four epidemic risks (high infection, higher infection, lower infection, and low infection) have a relatively stable probability and a relatively fixed spatial distribution, and the average probability of downward transfer is significantly higher than the probability of upward transfer, reflecting the downward trend in the number of active cases of COVID-19 in China. ④ Based on the STL time series trend analysis method, this paper analyzes the change characteristics and trend of weekly confirmed cases in China and typical provinces. The number of confirmed cases in the middle and late stages of China is generally stable. The newly confirmed cases are mainly imported cases from abroad, and the focus of epidemic prevention and control is the prevention and control of imported cases.

Keywords

COVID-19, Spatio-Temporal Evolution, Spatial Markov Chain Model, STL Time Series Model

Copyright © 2022 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

2019 年底, COVID-19 疫情在武汉爆发, 迅速向国内外其他地区扩散。截至 2021 年 3 月 4 日 24 时, 我国累计确诊病例 101,046 例(不含台湾), 现有确诊病例 442 例, 累计治愈数 53,726 例, 累计死亡数 4837 例, 死亡率 3.78%。COVID-19 疫情具有较强传染性, 根据《中国-世界卫生组织新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 联合考察报告》显示, COVID-19 疫情的传播系数高达 2~2.5。自世界卫生组织于 2020 年 3 月 12 日宣布 COVID-19 疫情构成全球大流行以来, 除了东亚地区, 大部分国家和地区的疫情未得到有效防控, 全球 COVID-19 疫情已呈现常态化特征。截至 2021 年 2 月 4 日, 全球 200 多个国家和地区出现确

诊病例, 全球累计确诊数达到 11,611.57 万例、现有确诊数 2879.04 万例, 其中美国、巴西、印度等 3 国累计确诊病例数均超过 1000 万例, 俄罗斯、英国、法国、意大利、西班牙、土耳其等 18 个国家的累计确诊病例数均超过 100 万例。

COVID-19 疫情爆发以来, 国内外学者从流行病学、病理学、基因组学、临床医学、时空传播模型预测等各个角度开展了一系列研究, 为认识 COVID-19 病毒传播机制、病毒源头、基因序列以及影响病毒传播的风险因子等问题提供了科学参考。目前, 针对 COVID-19 疫情传播研究集中在构建传播模型及疫情趋势预测等方面。如杨政(2020)统计分析 2020 年 1 月 29 日~2 月 9 日全国 50 个城市感染 COVID-19 的确诊人数比率, 估计武汉市感染病毒的人员数量[1]。王霞等(2020)构建 COVID-19 传播复杂网络模型, 重点分析武汉及周边地区复工的可能时间节点和复工对二次暴发风险的影响[2]。范如国等(2020)、严阅等(2020)基于数量模型对 COVID-19 疫情进行了预测[3] [4]。

这些研究成果为疫情科学判断、决策、救治、防控工作起到了积极推动作用, 目前基于时空分析方法的 COVID-19 疫情传播研究也日渐增多。王姣娥等(2020)、苏理云等(2020)、巫细波等(2020)则从省级、地级市层面研究了我国 2020 年上半年及下半年的 COVID-19 时空扩散特征[5] [6] [7] [8]。一些学者则以河南、广东、重庆、武汉、珠海等为案例地, 探讨了 COVID-19 疫情时空扩散特征及影响因素[9]-[13]。一些学者则以武汉、郑州等城市为例, 探讨特大城市疫情防控机制及防控对策[14] [15]。一些学者则探讨了交通水平、交通运输工具内部空间等因素对新型冠状病毒传播的影响[16] [17]。

总体上看, 学者对 COVID-19 疫情时空演变特征及传播路径等主题研究日益增多, 但是由于大范围长时间疫情数据获取难度大等因素影响, 已有对疫情时空传播研究主要聚焦于单个省份或者城市等微观区域范围, 对更大范围传染病时空传播规律的研究有待深化。当前, COVID-19 疫情在国内已经基本控制, 国内疫情防控形势趋于稳定, 而全球确诊病例数还在不断上升, 全球疫情防控形势依然严峻。在此背景下, 本文采用 GIS 分析、一般马尔科夫链和空间马尔科夫链、时间序列 STL 分解法等方法从时间和空间两个维度分析我国 COVID-19 疫情时空演变特征, 评估我国各级政府采取严格的非药物干预措施的管控效果, 有利于深化传染病的时空传播规律研究, 进一步拓展大传染病流行病学研究方法, 对未来科学应对其他传染病都有重要意义。

2. 研究区域、数据来源与研究方法

2.1. 研究区域及数据来源

本文研究区域主要是中国范围内 33 个省级行政区, 包括 4 个直辖市、22 个省、5 个自治区及港澳地区。截至 2021 年 3 月 4 日, 我国 31 个省市区及港澳地区均出现过 COVID-19 感染病例。各地区 COVID-19 确诊人数、治愈人数等数据来自丁香园发布的“COVID-19 肺炎疫情实时动态”(<https://ncov.dxy.cn/ncovh5/view/pneumonia>), 通过网络爬虫抓取并整理, 时间跨度为 2020 年 1 月 24 日到 2021 年 3 月 4 日共 406 天, 共 58 周, 可以较为系统地反映我国 COVID-19 疫情的年度变化特征。迁徙规模指数来自于百度地图慧眼(<https://qianxi.baidu.com/>), 其他统计数据来源于国家数据网站(<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>)。

2.2. 研究方法

马尔科夫链和空间马尔科夫链方法。马尔科夫链指概率统计学中具有马尔科夫性质的随机过程, 其主要特点就是即所谓的“无后效性”[18]。由于许多经济地理事件的变化过程具有或近似无后效性, 使得马尔科夫链在经济地理研究中得到越来越多的应用[19]。马尔科夫链方法的核心就是状态转移矩阵, 可分

为状态频数转移矩阵、概率转移矩阵和转移时间矩阵, 本文采用转移概率矩阵。空间马尔科夫链指在马尔科夫链基础上通过引入“空间滞后”[20]分析地理空间状态转移变化的方法。与马尔科夫转移链只有1个矩阵不同, 空间马尔科夫链转移概率矩阵有 N 个(N 为转态类型数量)。比较普通和空间马尔科夫链转移概率矩阵中的对应元素, 可以得出一个区域单元状态类型转移的概率大小及与邻近区域之间的关系, 从而分析以不同邻近区域为条件下的空间单元转移之间溢出效应[21]。对马尔科夫链、空间马尔科夫链转移概率矩阵的计算, 本文采用开源的矢量地理数据分析和空间计量软件包 PySAL (Python Spatial Analysis Library) 中的 GIDDY (Geospatial Distribution Dynamics)¹。

STL 时间序列趋势分析。 STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess) 是以鲁棒局部加权回归作为平滑方法的时间序列分解方法, 用以分析省级层面的每周现存确诊数据的变化特征及趋势, 本文采用 R 语言进行计算和分析[22]。

3. COVID-19 疫情的时空演变特征

3.1. 全国 COVID-19 疫情的总体情况

由于 COVID-19 疫情爆发正处 2020 年春运期间且武汉是我国主要的交通枢纽, 导致大量感染者快速扩散到全国, 确诊人数呈现快速增长趋势。全国现存确诊人数在 2 月 17 日达到峰值 58,016 例, 日均增长 17.5%, 表明在我国各级政府快速响应并出台严格管控措施后, COVID-19 疫情大约经过 30 天达到最大规模(图 1); 2 月 18 日后全国现存确诊数逐日下降, 到 3 月 15 日降为 1 万例左右, 日均下降 6.2%; 到 2 月 29 日首次降至 1 000 例左右, 日均下降 5.2%。

从全国总体情况来看, 累计确诊数的走势总体呈现先快速增长, 后缓慢增长的发展态势。1 月 24 日~2 月 17 日期间, 累计确诊数快速增长, 25 天中有 17 天新增确诊数超过 2000 例、8 天新增确诊数超过 3000 例, 新增确诊数最高达到 5090 例(排除统计口径调整情况); 2 月 17 日达到峰值, 2 月 19 日之后, 每天新增确诊数下降到 1000 例以内, 累计确诊数增长明显放缓, 截至 2021 年 3 月 4 日, 累计确诊病例 101,046 例, 日均增速为 1.17%。现有确诊数量走势总体呈现典型右偏分布特征, 疫情总体走势经历了“大规模快速爆发期、全国严格防控期、全国抑制期、局部复发期、常态化防控期、二次局部复发期、常态化防控期”等 7 个明显的变化阶段。具体为:

① 大规模快速爆发期(2020 年 1 月 24 日~2 月 17 日, 共 25 天)。由武汉开始在短时间内向全国大范围大规模快速爆发, 全国现存确诊数在 2 月 17 日达到峰值 58,016 例, 日均增长 17.5%。

② 全国严格防控期(2020 年 2 月 18 日~3 月 15 日, 共 27 天)。此阶段全国各级政府统筹实施“一盘棋”严格防控措施, 居民外出必须佩戴口罩, 小部分城市开始在部分行业复工复产, 在 3 月 15 日将现存确诊数降至 1 万例左右, 日均下降 6.2%, 此阶段也开始零星出现境外输入性确诊病例。

③ 全国抑制期(2020 年 3 月 16 日~6 月 10 日, 共 87 天), 大部分城市陆续复工复产, 现存确诊数据在 4 月 29 日首次控制在 1000 例以内, 6 月 10 日现存确诊数进一步下降至 100 例左右, 境外输入也得到较好控制。

④ 局部复发期(2020 年 6 月 11 日~8 月 16 日, 67 天)。现有确诊病例数由 6 月 11 日的 119 例增至 8 月 10 日的 2077 例(经过 61 天达到此阶段峰值), 其中北京新发地市场于 6 月 11 日出现确诊病例, 经过 26 天严格防控, 到 7 月 6 日北京的日新增确诊病例降至 0; 新疆乌鲁木齐于 7 月 17 日出现小规模疫情, 经过 31 天有效防控, 到 8 月 16 日的新增确诊病例数降为 0 例; 总体上看, 此阶段局部复发或新出现的疫情大约均在 1 个月以内得到有效防控。

¹GIDDY 网站: <http://giddy.readthedocs.io/en/latest/index.html>。

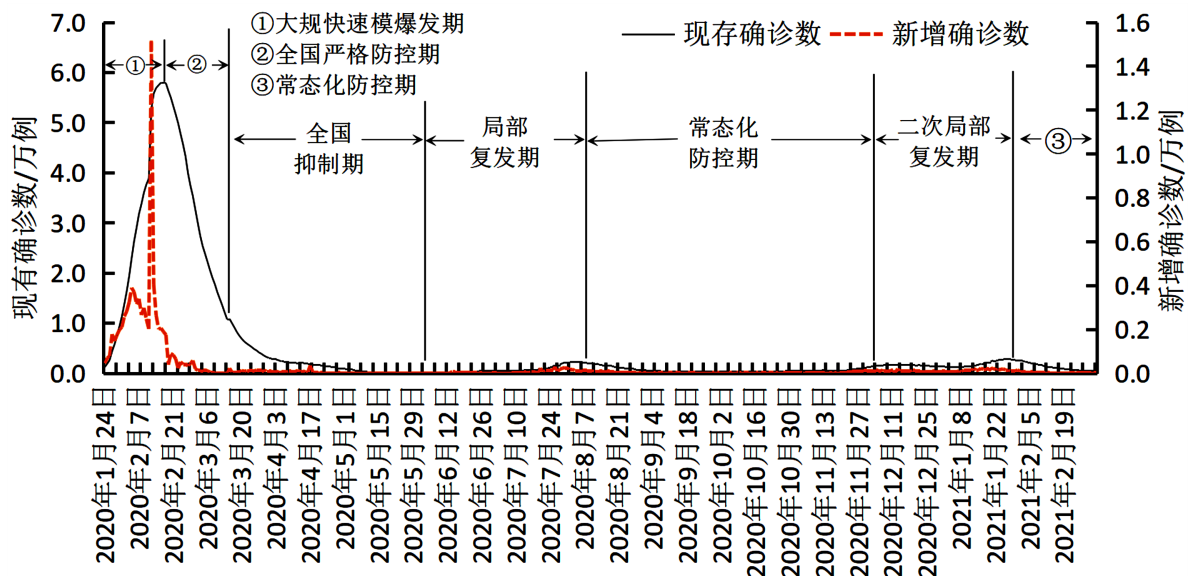


Figure 1. Changes in the number of active cases and daily new cases of COVID-19 in China (January 24, 2020-March 4, 2021)

图1. 全国 COVID-19 每日现存及新增确诊病例数变化(2020 年 1 月 24 日~2021 年 3 月 4 日)

⑤ 常态化防控期(2020 年 8 月 17 日-2020 年 11 月 20 日, 96 天)。现存确诊病例数在绝大部分时间低于 1000 例, 9 月 17 日降至最低 368 例, 此阶段防疫的重点在于境外输入的人员和冷链物资。

⑥ 二次局部复发期(2020 年 11 月 21 日~2020 年 2 月 17 日, 89 天)。由于在英国、南非等国家在 2020 年 9 月份发现了传染能力更强的变异 COVID-19, 而上海于 12 月 16 日首次在我国发现携带变异 COVID-19 的输入性确诊病例, 加上此阶段正值人流物流规模庞大的春运, 无症状感染者及出现了携带病毒的物流, 导致 1 月 3 日开始河北、黑龙江、吉林先后出现了明显的局部复发现象并于 1 月 26 日达到峰值 2922 例, 经严格防控, 我国现存确诊病例数据于 2 月 17 日再次降至 1000 例以内。其中, 河北于 2021 年 1 月 3 日检测到无症状确诊病例, 现存确诊数较快增长并于 1 月 21 日达到峰值 843 例, 经过严格防控, 新增确诊病例于 1 月 30 日降至 0 例; 黑龙江 1 月 13 日开始复发疫情, 2 月 2 日达到峰值 522 例, 经有效防控, 新增确诊病例与 2 月 7 日降至 0 例; 吉林则 1 月 16 日复发疫情并于 2 月 1 日达到峰值 350 例, 2 月 8 日新增确诊病例降至 0 例。

⑦ 常态化防控期(2020 年 2 月 18 日~2021 年 3 月 4 日, 15 天)。经过 1 年多防疫, 我国已经建立起较为完善的 COVID-19 防控措施和应急体系, 加上机场、港口及物流仓储等领域的高风险人群已经普及疫苗, 此阶段防疫的重点仍然在于境外输入人员和冷链物资, 特别是变异 COVID-19 病毒。此阶段我国现存确诊病例主要分布于香港、上海、广东等地区。由于全球 COVID-19 疫情呈现常态化趋势且出现了多种传染能力更强的变异 COVID-19, 我国的常态化防疫仍然面临潜在风险。

随着 COVID-19 在全球范围内传播, 我国从 3 月 1 号开始出现由境外输入的确诊病例, 率先出现在北京, 3 月 2 日开始在浙江出现, 上海和甘肃则在 3 月 5 日开始出现, 截至 2021 年 3 月 4 日累计境外输入确诊病例达到 5040 例, 由于早期未建立起专门的境外输入防控措施, 仅 2020 年 3 月 4 月的境外输入病例数增长较快, 其他时间每日新增境外输入病例数不足 40 例(见图 2)。其中作为全球性大城市的上海累计输入确诊病例数较多, 达到 1431 例, 河北、新疆、广东等省市超过 800 例但不足 1000 例, 黑龙江、四川、吉林、陕西、内蒙古、福建、江西、北京、天津、安徽、重庆、浙江、山西等省市的累计输入确诊病例数超过 100 例且均不超 400 例, 仅西藏未出现境外输入性病例。

至 2021 年 3 月 4 日, 国内 COVID-19 累计死亡人数为 4837 例, 死亡率为 3.78%, 其中湖北死亡人数为 4512 例, 香港 201 例, 河南、黑龙江两个省份死亡人数为 22 例和 13 例, 其他省份死亡人数不超过 10 例, 西藏、青海、山西、江苏等省份未出现致死病例。可见, 在我国中央政府的统一部署及各级政府快速响应出台一系列严格管控、追踪确诊、及时救治措施之后, COVID-19 疫情大约经过 25~30 天(约 2 个 14 天潜伏期)达到最大规模后, 疫情得到了有效控制。

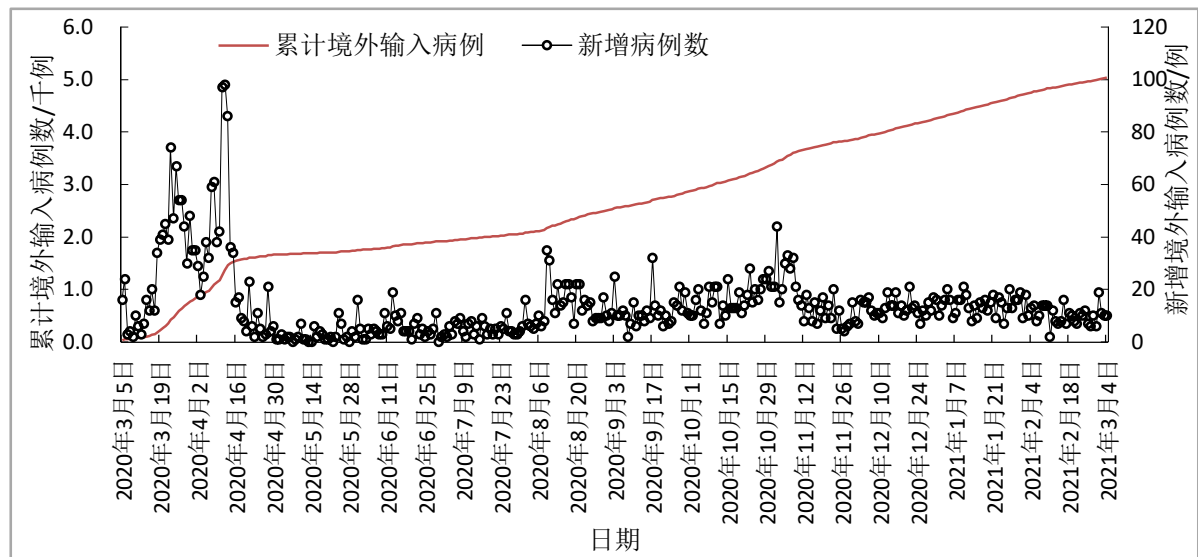


Figure 2. The number of accumulated confirmed cases and daily new cases of COVID-19 imported from abroad in China (March 5, 2020~March 4, 2021)

图 2. 全国 COVID-19 累计境外输入及新增病例数据(2020 年 3 月 5 日~2021 年 3 月 4 日)

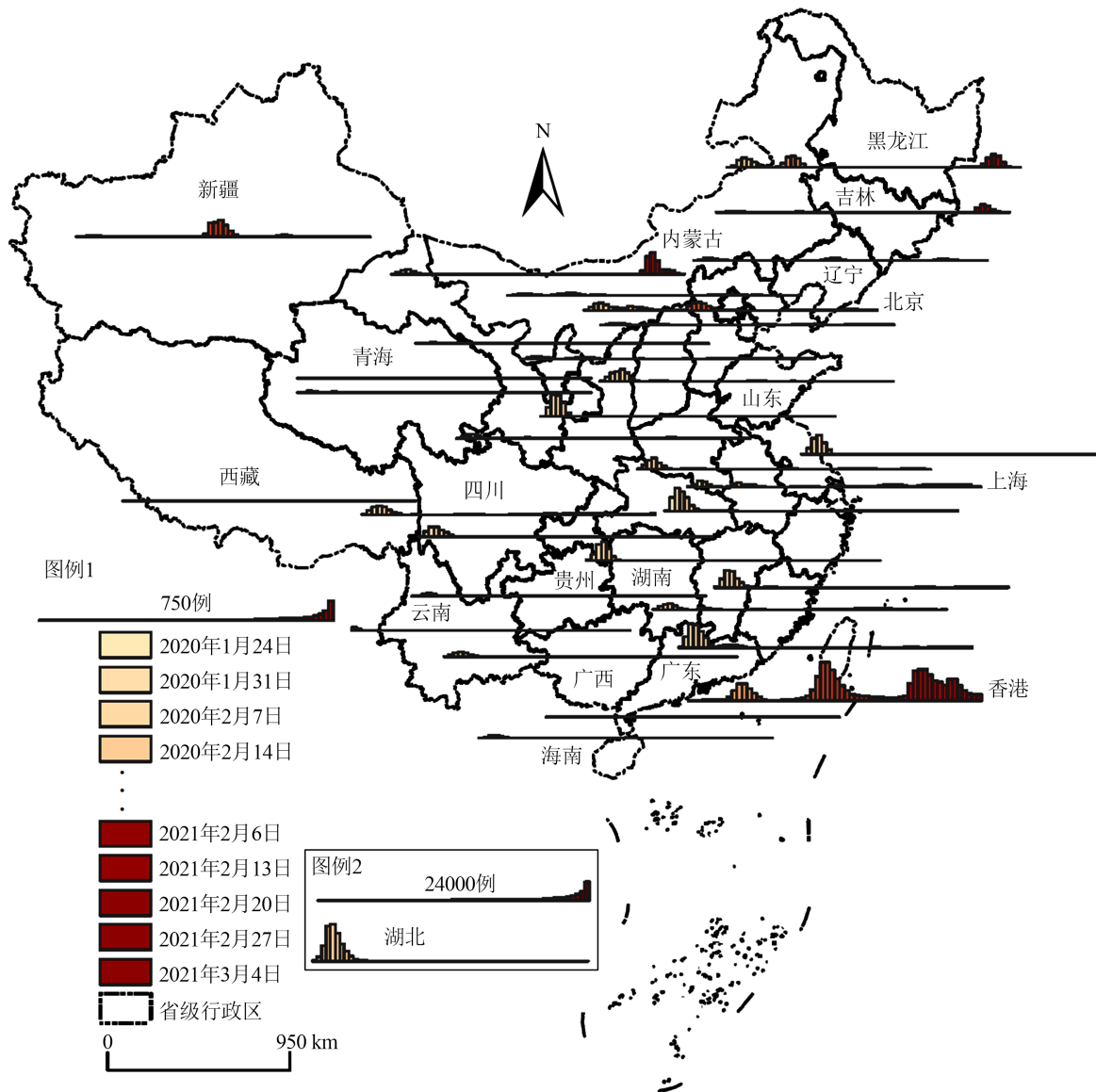
3.2. 省际层面 COVID-19 疫情的空间分布特征

从省际空间分布特征来看, COVID-19 疫情在全国范围内呈现非均衡扩散特征, 不同省市区疫情存在明显差异。总体而言, 我国早期省级层面的 COVID-19 感染病例数量与从湖北封城之前迁出到各省份的迁徙规模指数密切相关, 而中后期则受境外输入影响较为明显。根据百度迁徙地图的迁徙规模指数与各省份的累计确诊数量进行相关性分析可以发现, 我国 COVID-19 确诊病例数量快速增长与从湖北迁出到各省份的迁徙规模指数密切相关。从百度地图中收集 2020 年 1 月 13 日到 28 日从湖北迁出到各省份的迁徙规模指数, 以湖北迁入各省份的迁徙规模指数累计值为自变量, 以湖北封城 14 天后(2 月 11 日)各省份的累计确诊数为因变量进行回归分析, 可以发现两者具有高度相关性: $\text{累计确诊数} = \text{累计迁徙规模指数} * 129.67 + 96.5$ ($R^2 = 0.0087$, 通过 0.01 显著性水平检验), 从湖北迁出到各省份的累计迁徙强度指数看, 湖北封城前的迁出人口主要迁入到河南、湖南、广东、江西、重庆、安徽等地, 这些省份的累计确诊数也明显较高, 这点跟巫细波等(2020) [5]在地级市层面的研究结论基本一致。可见, 在一系列防控措施实施前 COVID-19 疫情率先在湖北尤其是武汉市发生传播, 随着大规模人口流动, 进一步扩散到国内其他省市区, 这个时期全国各省市疫情传播模式以外来输入性为主。

究其原因, 主要是 1 月 23 日~28 日期间, 武汉及湖北其他城市陆续封城, 国内 30 个省市启动一级公共突发事件响应, 迁出人流急剧下降, 关闭传染通道, 切断传染源。由于 COVID-19 病毒的潜伏期平均为 14 日, 在 28 日左右的流出人口中携带 COVID-19 病毒的人员在 2 月 10 日左右可以被识别出来。后续随着从武汉或者湖北进入各个省市区的人流量显著下降, 感染者数量也显著下降, 输入性传播显著

下降。2月17日左右, 各省市当天新增确诊数量逐步减少, 加上累计治愈出院人数逐步增加, 导致现有确诊数量开始呈下降趋势。可见, 自2020年1月23日起武汉及湖北各市陆续封城之后, 全国各省市实施了一系列综合防控措施, 包括早发现病例、追踪密切接触者并采取隔离管理措施, 尽可能增大社交距离, 少出门戴口罩勤洗手等措施, 在武汉及湖北省内其他城市采取的严格管控措施有效地阻止了感染者进一步向全国其他地区输出, 有效阻断了病毒在更广范围内传播扩散。

从省际时空演变特征及模式来看, 大部分省际层面的现存确诊数量变化呈现初期单峰演变模式, 全国、湖北等大部分省市的现存确诊数呈现这种模式, 还有中期单峰模式(如新疆)、后期单峰模式(如河北)、多峰振荡模式(如上海)、中后期多峰模式(如香港)、前中期三峰模式(如北京)及前中后期三峰模式(如黑龙江)等六种模式(见图3)。



注: 该图基于国家标准地图服务网站(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)下载的编号为GS(2019)1815号的地图制作。

Figure 3. Changes of active cases of COVID-19 in China (January 24, 2020~March 4, 2021)

图3. 中国 COVID-19 现有确诊数变化示意图(2020年1月24日~2021年3月4日)

3.3. 基于空间马尔科夫链的时空演变分析

利用 PySAL 计算 2020 年 1 月 24 日~2021 年 3 月 4 日省际现存确诊数的普通和空间马尔科夫链转移矩阵, 其中空间滞后权重为距离权重, 空间滞后类型也同样离散化为 4 种类型(高感染、较高感染、较低感染、低感染, 分别用 C3、C2、C1、C0 表示), 结果如表 1。PySAL 还对空间马尔科夫链进行似然比和卡方检验, 结果显示空间马尔科夫均通过统计显著性检验, 其中似然比统计值为 56.909 (P 值为 0.006), 卡方检验统计值为 55.624 (P 值为 0.008)。

马尔科夫链的分析以表 1 右上角的 4*4 矩阵(2020 年 1 月 24 日~2021 年 3 月 4 日)为例进行分析, 对角线的数值均大于 0.913, 表明各类型疫情风险较为稳定, 不同感染程度疫情地区分布相对固定, 其中低感染地区维持现状的概率最大, 达到 0.983, 高感染地区维持现状的概率也较大, 达到 0.964。

从不同类型来看, 2020 年 1 月 24 日~2021 年 3 月 4 日期间, 低感染类型 C0 向上转移的平均概率为 0.016, 较低感染类型向上转移的平均概率为 0.052, 向下转移的平均概率为 0.035, 较高感染类型向上转移的平均概率为 0.033, 向下转移的平均概率为 0.038, 高感染类型向下转移的平均概率为 0.036, 可见, 较低感染类型、较高感染类型向下转移的概率高于向上转移概率, 说明我国 COVID-19 确诊数量总体下降的趋势。

Table 1. Markov transition probability matrix and transition time matrix for active cases of COVID-19

表 1. COVID-19 现存确诊数的马尔科夫转移概率及时间矩阵

空间滞后类型	概率转移矩阵				时间转移矩阵				
	C0	C1	C2	C3	C0	C1	C2	C3	
P(H0)	C0	0.983	0.008	0.007	0.001	2.1	107.6	146.4	220.1
	C1	0.035	0.913	0.051	0.001	66.2	12.9	84.0	169.7
	C2	0.01	0.028	0.928	0.033	117.9	102.0	6.0	98.5
	C3	0.002	0	0.034	0.964	146.8	142.6	54.1	3.7
P(LAG0)	C0	0.987	0.01	0.002	0.001	2.4	162.4	79.8	156.1
	C1	0.058	0.887	0.055	0	72.6	14.0	43.1	119.4
	C2	0.007	0.025	0.933	0.036	96.7	130.9	4.3	85.4
	C3	0.002	0	0.023	0.975	129.9	164.1	33.2	3.6
P(LAG1)	C0	0.985	0.004	0.01	0.001	2.4	83.1	75.5	193.9
	C1	0.034	0.91	0.051	0.004	66.2	6.5	37.7	160.8
	C2	0.017	0.02	0.929	0.034	82.3	56.8	3.5	125.7
	C3	0	0	0.03	0.97	99.3	78.1	23.3	7.3
P(LAG2)	C0	0.982	0.009	0.008	0.001	3.1	79.8	65.5	111.9
	C1	0.029	0.916	0.055	0	76.0	5.9	38.6	94.1
	C2	0.011	0.031	0.936	0.022	100.1	59.3	4.0	61.1
	C3	0.002	0	0.047	0.951	112.9	83.1	27.9	4.0
P(LAG3)	C0	0.977	0.01	0.009	0.003	2.1	107.6	146.4	220.1
	C1	0.027	0.927	0.045	0	66.2	12.9	84.0	169.7
	C2	0.007	0.036	0.916	0.041	117.9	102.0	6.0	98.5
	C3	0.004	0	0.041	0.954	146.8	142.6	54.1	3.7

4. 我国 COVID-19 疫情发展趋势分析

总体上看, 经过一年多的 COVID-19 疫情防控, 我国已经对 COVID-19 疫情建立了较为完善的防控措施及应急体系, 不管是初期的全国大规模范围快速爆发, 还是局部复发或新发疫情, 基本都可以在 2 个月以内得到有效防控。由于全球 COVID-19 疫情到 2021 年 3 月 4 日仍未出现拐点迹象, 大部分国家和地区的疫情仍未得到有效防控, 加上变异 COVID-19 病毒陆续出现, 输入性防控将是我国疫情防控重点, 但总体安全可控。为定量分析并研判我国 COVID-19 疫情发展趋势, 采用 STL 方法分析我国及典型省市的每周现存确诊病例数变化特征及趋势(见图 4)。从图 4(a)可以看出, 我国中后期现存确诊数总体呈现平稳趋势, 后期现存确诊数维持在 500 例左右, 新增确诊病例主要来自上海、广东、香港等地区的境外输入病例。经前面分析可知, 不管是中期北京(图 4(b))、新疆(图 4(h))、山东等地区的局部复发, 全国范围短期新增确诊病例均没能超过 2000 例且可以在 2 个月内得到有效防控, 而后期河北(图 4(e))、黑龙江(图 4(f))及吉林等地区局部复发全国范围内均未超过 1000 例且基本 1 个月左右得到有效。总体而言, 我国中后期现存确诊数总体呈现平稳趋势, 新增确诊病例主要来自境外输入病例。输入性防控将是我国疫情防控重点, 但总体安全可控。

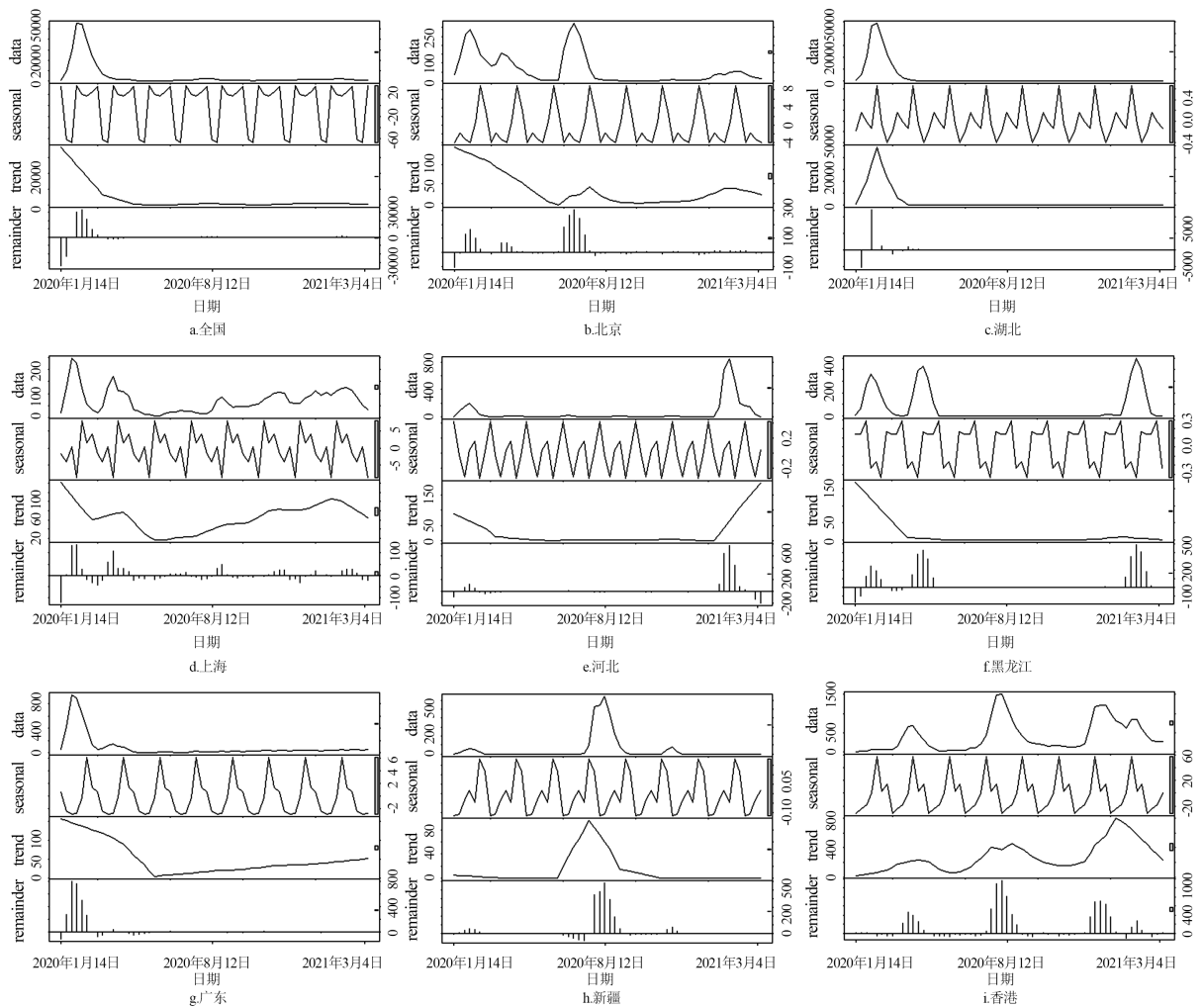


Figure 4. Analysis for the number of active cases of COVID-19 at provincial level based on STL model

图 4. 基于 STL 模型的省级现有确诊数分析

5. 结论与启示

5.1. 结论

基于2020年1月24日~2021年3月4日国内31个省市区(不含港澳台地区) COVID-19 现有确诊病例数、累计确诊病例数、治愈数等面板数据,采用GIS分析、一般马尔科夫链和空间马尔科夫链、时间序列STL分解法等方法从时间和空间两个维度分析在我国各级政府采取严格防控措施期间,我国COVID-19疫情扩散时空演变特征。研究发现:①全国COVID-19确诊数经历了“大规模快速爆发期、全国严格防控期、全国抑制期、局部复发期、常态化防控期、二次局部复发期、常态化防控期”等7个明显的变化周期,COVID-19疫情大约经过25~30天(约2个14天潜伏期)达到最大规模后,疫情得到了有效控制。绝大部分省份疫情变化特征与全国总体情况相一致,个别省份因局部地区爆发疫情导致疫情变化特征表现出一定差异性。②春运期间的大规模人口流动是导致疫情在全国范围内快速扩张的主要原因,湖北封城之前14天的百度迁徙规模指数与全国各省市区的累计确诊数(到2月11日)呈现显著正相关;③利用PySAL计算2020年1月24日~2021年3月4日省际现存确诊数的空间马尔科夫链通过统计显著性检验,马尔科夫链转移概率矩阵分析结果显示,各类型(高感染、较高感染、较低感染、低感染)疫情风险较为稳定,维持现状的概率大于0.913,不同感染程度疫情地区分布相对固定,其中低感染类型维持现状的概率最大,较低感染类型、较高感染类型向下转移的概率高于向上转移概率,说明我国COVID-19确诊数量总体下降的趋势。④采用时间序列STL分解法分析我国及典型省市的每周现存确诊病例数变化特征及趋势显示,我国中后期现存确诊数总体呈现平稳趋势,新增确诊病例主要来自境外输入病例。输入性防控将是我国疫情防控重点,但总体安全可控。

5.2. 启示

通过分析我国31个省市区(不含台湾地区)在2020年1月24日~2021年3月4日COVID-19疫情的时空扩散特征,认为在我国中央政府的统一部署及各级政府采取积极的防控措施作用下,全国疫情得到了有效控制。现阶段,我国疫情防控进入常态化阶段,基本没有本地新增病例,但全球疫情仍处于持续上升期,我国疫情防控工作仍不可掉以轻心。基于本文研究结论得到几点政策启示。一是及时采取非药物干预防控措施,有效遏制疫情在空间上的扩散。COVID-19疫情具有感染性强、传播速度快、感染范围广等显著特点,由于早期未采取严格的防控措施,又值春运人口大规模流动,使得疫情由湖北向周边地区传播,并经高铁、航班等交通通道快速扩散到广东、浙江、安徽、上海等省市区,表现为确诊人数与湖北到各省份的迁徙强度显著相关。随后我国采取了省、市、县、镇及村多层次、网络化防控措施,湖北各城市陆续封城,其他省市区采取交通出行限制措施,取消大型集会活动,延迟学校开学,保持社交距离,倡导少出门、出门佩戴口罩、勤洗手等,开展密切接触者追踪排查和14天甚至21天隔离观察,按照应收尽收原则加强病患救治等一系列防控措施,严格有效阻断病毒传播通道,切断病毒感染源,有效控制了疫情的传播速度和范围,在25~30天时间内使我国疫情实现了从爆发到有效控制的良好局面,体现了我国防疫措施的有效性。当前,国际疫情还在继续扩散的情况下,现阶段我国应高度重视境外高感染地区的输入性传播风险,全面加强冷链和物流环节防控,防止国内疫情出现反弹。在做好外防输入、内防反弹的同时,加快推进新冠疫苗接种,构建免疫屏障。二是疫情传播表现出显著空间相关性,分区分级防控策略应考虑邻近地区传染风险。COVID-19疫情传播空间差异化特征明显,不同地区的疫情发展存在差异,这也为现阶段局部地区疫情爆发,全国不同区域动态划分不同等级风险区,实施差异化的管控策略提供了理论依据。同时,研究表明地区疫情发展受邻近地区疫情影响,在划分不同等级风险区应考虑周边区域的疫情形势影响,邻近高感染地区的区域应加强疫情防控力度,并根据疫情发展形势,

动态调整疫情风险等级, 对管控政策进行响应调整。三是利用数字技术助力科学防控, 快速跟踪排查疫情。当前, 数字技术为 COVID-19 疫情科学防控工作提供了有利支撑, 各省市通过利用大数据、云计算、人工智能等数字技术手段, 结合人口流动、交通、公安等大数据, 实现动态把握疫情扩散动态、实时监测疫情蔓延趋势、及时发布疫情相关数据, 通过疫情轨迹动态追踪排查有效精准摸查防控对象, 这些均有效降低了疫情传播, 提高疫情防控效率。数字技术还为一线救治、物资调配、复工复产等提供了解决方案。未来人口规模大、人口流动强度大的地区重大传染病疫情防控压力大, 而数字技术具有快速收集、筛选、处理海量信息等优势可以为科学防疫提供有力支撑, 未来要重视加强 5G、云计算、大数据中心等为代表的新一代数字基础设施建设, 推动数字技术与公共卫生应急管理体系深度融合, 为疫情应急响应、疫情监测、疫情风险排查、物资调配等防疫工作提供有力保障。

基金项目

本文得到国家社会科学基金项目(20BTJ055)和广州市社科规划 2021 年度课题(2021GZGJ31)资助。

参考文献

- [1] 杨政, 原子霞, 贾祖瑶. 基于迁徙数据估计武汉感染 COVID-19 的人员数量[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 330-338.
- [2] 王霞, 唐三一, 陈勇, 冯晓梅, 肖燕妮, 徐宗本. COVID-19 肺炎疫情下武汉及周边地区何时复工?数据驱动的网络模型分析[J]. 中国科学: 数学, 2020, 50(7): 969-978.
- [3] 范如国, 王奕博, 罗明, 张应青, 朱超平. 基于 SEIR 的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 369-374.
- [4] 严阅, 陈瑜, 刘可伋, 罗心悦, 许伯熹, 江渝, 程晋. 基于一类时滞动力学系统对新型冠状病毒肺炎疫情的建模和预测[J]. 中国科学: 数学, 2020, 50(3): 385-392.
- [5] 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.
- [6] 苏理云, 郭雯. 中国各省新型冠状病毒肺炎累计确诊人数的空间聚集及时空格局演变分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(4): 51-58+65.
- [7] 巫细波, 赖长强, 葛志专. 政府严控期我国地级市 COVID-19 疫情的时空集聚、演变及自相关效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(2): 246-258.
- [8] 巫细波, 张小英, 葛志专, 赖长强. 我国 COVID-19 疫情时空演变特征研究——基于 314 个城市 329 天面板数据[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(1): 1-6.
- [9] 刘勇, 杨东阳, 董冠鹏, 张航, 苗长虹. 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.
- [10] 刘逸, 李源, 黎卓灵, 韩芳菲. 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.
- [11] 陈晓, 黄宇金, 李佳慧, 汪诗洋, 裴韬. 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.
- [12] 李欣, 周林, 贾涛, 吴昊, 邹宇量, 秦昆. 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.
- [13] 刘郑倩, 叶玉瑶, 张虹鸥, 郭洪旭, 杨骥, 王长建. 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.
- [14] 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.
- [15] 赵宏波, 魏甲晨, 王爽, 刘雅馨, 李光慧, 苗长虹. 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.
- [16] 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.
- [17] 张宇, 田万利, 吴忠广, 陈宗伟, 王冀. 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.

- [18] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [19] Le Gallo, J. (2004) Space-Time Analysis of GDP Disparities among European Regions: A Markov Chains Approach. *International Regional Science Review*, **27**, 138-163. <https://doi.org/10.1177/0160017603262402>
- [20] 张新林, 仇方道, 王长建, 王佩顺. 长三角城市群工业生态效率空间溢出效应及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1791-1800.
- [21] Rey, S.J. and Anselin, L. (2007) PySAL: A Python Library of Spatial Analytical Methods. *The Review of Regional Studies*, **37**, 5-27. <https://doi.org/10.52324/001c.8285>
- [22] Cleveland, R., Cleveland, W., McRae, J. and Terpenning, I. (1990) STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics*, **6**, 3-73.