

新冠肺炎疫情的空间扩散过程与模式研究

王姣娥^{1,2}, 杜德林^{1,2}, 魏冶³, 杨浩然^{4,5}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024;
4. 华东师范大学中国现代城市研究中心, 上海 200062; 5. 华东师范大学城市与区域科学学院,
上海 200241)

摘要: 研究新冠肺炎疫情的空间扩散过程与模式对于防疫抗疫资源的合理配置、突发公共卫生事件的管理与应对以及未来公共卫生体系的完善具有重要意义。本文综合时间和空间尺度,从地理学视角研究了新冠肺炎疫情的城际空间扩散过程,归纳总结扩散模式,并揭示了其影响因素。研究发现:新冠肺炎疫情在中国的发展主要经历了6个阶段,并在空间上表现出邻近扩散、迁移扩散、等级扩散和廊道扩散等地理模式;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。新冠肺炎疫情的空间扩散过程和模式一定程度上是“流空间”网络下人类社会经济活动空间组织模式的一种反映,与地理邻近性、社会经济联系的跨区域性及人类活动的时空规律等密切相关。本研究以期为世界各国的疫情防控措施制定提供参考,也为中国未来应对公共卫生应急风险提供经验借鉴。

关键词: 疫情;地理邻近性;扩散;人口流动;交通

DOI: 10.11821/dlyj020200329

1 引言

2020年新型冠状病毒肺炎(COVID-19)在全球范围内蔓延,超过200个国家和地区先后出现疫情,表现出了大流行特征^[1,2]。疫情的发展给世界公共卫生环境和民众生命健康安全造成了严重的威胁,对社会经济发展造成了巨大的影响,引起了世界各国的广泛关注。中国在疫情防控应对措施方面具有突出表现,为世界疫情的防控做出了重要贡献。因此,归纳总结中国的疫情传播过程与模式,对各国疫情防控以及中国未来公共卫生体系应急风险的进一步完善具有重要的参考价值。疫情爆发以来,各类专业机构和科研人员针对疫情展开了广泛的研究,其中,关于疫情发展过程和趋势的研究对于疫情的预测、预警以及风险防控具有十分重要的作用。已有研究针对疫情的规模变化进行了趋势分析和研究^[3-7],并考虑了人口流动和分布、交通网络以及防控政策等方面的影响^[8-10],然而疫情的扩散不仅体现在规模和时间尺度,空间上的扩散也同样值得关注和研究^[11-13],这对于确定防控重点以及合理配置防控资源等具有重要意义。

扩散是一种通过时间和空间传播的现象^[14,15],在全球化和信息化背景下,客流、货流、信息流、金融流等各类要素资源在全球范围内快速流动,对人类活动的空间组织产生着深刻影响,使得城市间的相互联系和相互依赖程度也在不断加深,在一定程度上也

收稿日期: 2020-04-19; 修订日期: 2020-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(41722103)

作者简介: 王姣娥(1981-),女,湖南涟源人,研究员,博士生导师,研究方向为交通地理与区域发展等。

E-mail: wangje@igsnrr.ac.cn

影响了疫情的空间扩散过程。探索事物的时空规律及交互影响机制等是地理学的研究重点之一, 传染病的空间扩散通常与各类空间影响因子密切相关^[16,17]。因此, 充分利用地理学的专业优势, 揭示新冠肺炎疫情的空间扩散过程、归纳总结其地理模式, 对疫情防控等具有十分重要的意义。鉴于此, 本文以地级市为基本单元, 结合时间和空间尺度, 研究疫情在中国扩散的空间格局及演变特征, 并进一步基于传染源、传播途径和易感人群等传染病流行的基本环节, 探讨地理邻近性、人口流动、人口规模、交通网络、防控管理等影响因素的作用, 以期为世界疫情的防控提供借鉴经验, 也为中国未来公共卫生体系的完善以及突发公共卫生事件的管理与应对提供参考。

2 理论框架与研究数据

2.1 理论框架

疫情的空间扩散是一个经过时间和空间逐渐发展的过程, 各类空间影响因子在扩散过程中具有十分重要的影响作用^[14-16]。根据地理学第一定律, 地理邻近性会影响区域的空间关联性, 因此是疫情空间扩散的重要基础。在全球化和地域开放系统中, 随着交通与信息技术的不断进步, 各类要素克服空间摩擦实现了实时配置, 空间逐渐由静止封闭的“场所空间”向流动共享的“流空间”转变, 形成客流、货流、信息流等不同的地理流^[18,19], 对区域间的关联关系和依赖程度产生重要影响。交通网络作为人口流动和社会经济活动的重要载体, 会直接影响空间流要素的表达, 并在一定程度上改变或重构区域空间组织结构^[20], 影响区域关联关系。在地理邻近性以及社会经济关联关系等因素的共同影响下, 疫情的空间扩散过程通过数量规模、空间格局、时间演进等方面的变化, 形成一定的地理空间模式, 这在一定程度上也是对“场所空间”与“流空间”视角下人类活动的空间组织结构的具体体现。因此, 地理邻近性、社会经济活动的“流空间”组织等对疫情空间扩散模式具有重要解释意义。图1表达了疫情空间扩散过程的研究框架。

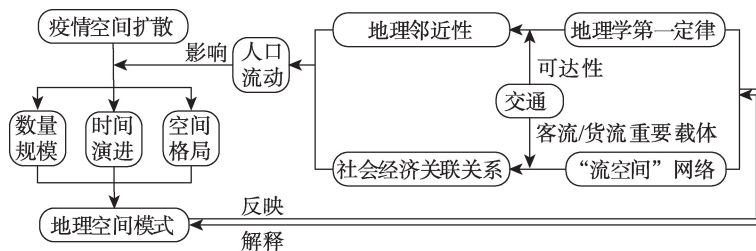


图1 疫情空间扩散的研究框架

Fig. 1 The research framework of the spatial diffusion of COVID-19

2.2 研究数据

新冠肺炎疫情数据。为准确分析全国疫情的空间扩散过程, 本文主要采用了每日新增确诊病例和累计确诊病例数据, 以地级市(包括直辖市、地级行政区和省辖县级行政区)为基本单元进行数据搜集和整理, 其中香港、澳门和台湾分别作为一个市域单元。考虑4月8日起武汉解除离汉离鄂通道管控措施, 研究主要集中于4月8日及以前, 数据主要来源于国家卫健委^[21]和各省市卫健委每日通报的疫情数据。

人口流动与人口规模数据。武汉是中国最早发现新型冠状病毒感染肺炎患者的城市, 根据《新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案(试行第六版)》的诊断标准, 发病前14

天内有武汉及周边地区的旅行史或居住史是重要的参考依据之一。因此,本文搜集了武汉迁出人口流动以及各城市的人口规模数据。人口流动数据来源于百度迁徙 (<http://qianxi.baidu.com/>),考虑数据限制、春运人口流动的特点以及武汉自1月23日起采取了“封城”措施^[22]等,本文主要搜集了2020年春节前(1月10日至1月24日)武汉人口迁出数据,由于数据限制,获取武汉迁出人口前100位城市,共占武汉全部迁出人口的91.58%。各地市人口规模数据主要来源于2018年《中国城市统计年鉴》^[23],并采用各地市《国民经济和社会发展统计公报》进行补充。

交通数据。交通是居民出行和人口流动的重要基础,能够在一定程度上反映城市间的相互联系、相互作用和相互依赖关系,其中航空、高铁和长途汽车是常用的3种城际交通方式,且具有不同的技术经济特征,在空间上表现为适宜运输的优势距离不同^[20]。为便于对比不同交通方式之间的影响差异、分析交通网络对疫情扩散的关联关系,本文采用了2019年武汉对外的航空、高铁和长途汽车的时刻表数据,以一天时间内的班次频率来反映城市间的运输供给和关联关系,数据分别来源于Flightradar24 (<https://www.flightradar24.com/>)、中国铁路客户服务中心 (<http://www.12306.cn/mormhweb/>)、欣欣旅游网 (<http://www.cncn.com/>)。

3 新冠肺炎疫情空间扩散过程与格局

3.1 疫情发展阶段演变

自新冠肺炎疫情在武汉出现以来(图2),全国累计确诊病例逐渐增多,每日新增确诊病例在2月4日达到高峰。其中,湖北省是疫情最严重的地区,疫情发展态势与全国整体情况相近。在疫情扩散过程中,全国出现确诊病例的城市数量以“S型曲线”增长。基于疫情发展、扩散过程以及重大事件等,疫情可大致归纳为6个主要阶段:①武汉市内扩散阶段(1月18日及以前),在此期间国内其他城市尚未出现确诊病例;②空间多点快速扩散阶段(1月19日至1月26日),确诊病例的城市迅速增加至249个(68.2%),日均新增约31个城市;③确诊病例迅速增加阶段(1月27日至2月3日),全国日均新增确诊病例达到1400例以上;④确诊病例增幅波动下降阶段(2月4日至2月18日),每日新增确诊病例整体呈波动下降趋势,从3887例缩减为1753例;⑤疫情得到控制阶段(2月19日至3月1日),每日新增病例下降至1000例以内,全国现存病例数量逐渐减少;⑥境外输入成为重点(3月2日至4月8日),国内疫情基本稳定,每日新增确诊不足150例,且3月7日起进一步下降至50例以内,同时随着世界范围疫情的严重,境外输入逐渐成为重点,截至4月8日境外输入病例累计达1103例。

3.2 疫情空间扩散过程与格局

3.2.1 全国尺度 结合疫情的发展阶段,选择不同时间节点对其空间格局演变进一步进行分析(图3,见第1454页)。1月18日及以前全国仅武汉存在确诊病例,1月19日深圳开始出现疫情,此后出现疫情的城市数量快速增加,1月20日全国共8个城市出现疫情,主要位于珠三角、长三角、京津冀和武汉周边,1月21日城市数量进一步增加至24个,其中半数均为省会或直辖市,至1月26日出现疫情的城市数量超过200个,涉及东中部地区的大部分城市,且逐渐向西部地区扩散。此后确诊病例迅速增加,空间扩散变缓,至2月3日全国疫情基本形成以湖北省、长三角、珠三角、京津冀和成渝为严重地区的空间格局。在确诊病例增幅波动下降阶段,全国疫情的空间格局趋于稳定。总体而言,湖北省疫情最为严重,累计确诊病例占全国80%以上;其次为北京、重庆、上海、温州、广

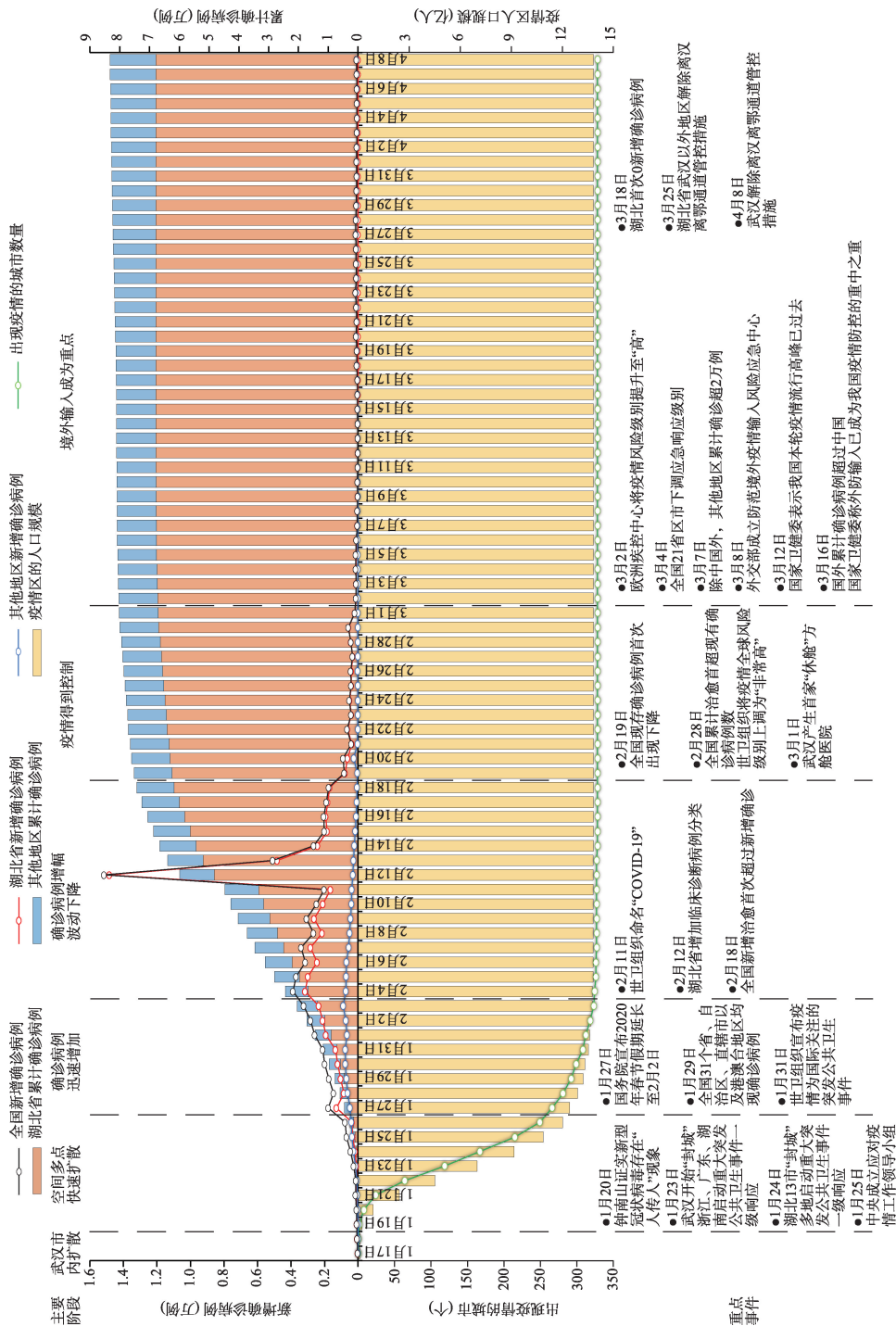


图2 疫情的发展阶段划分

Fig. 2 The development stages of COVID-19 in China

注：2月12日因病例诊断标准调整，故当日数据异常。

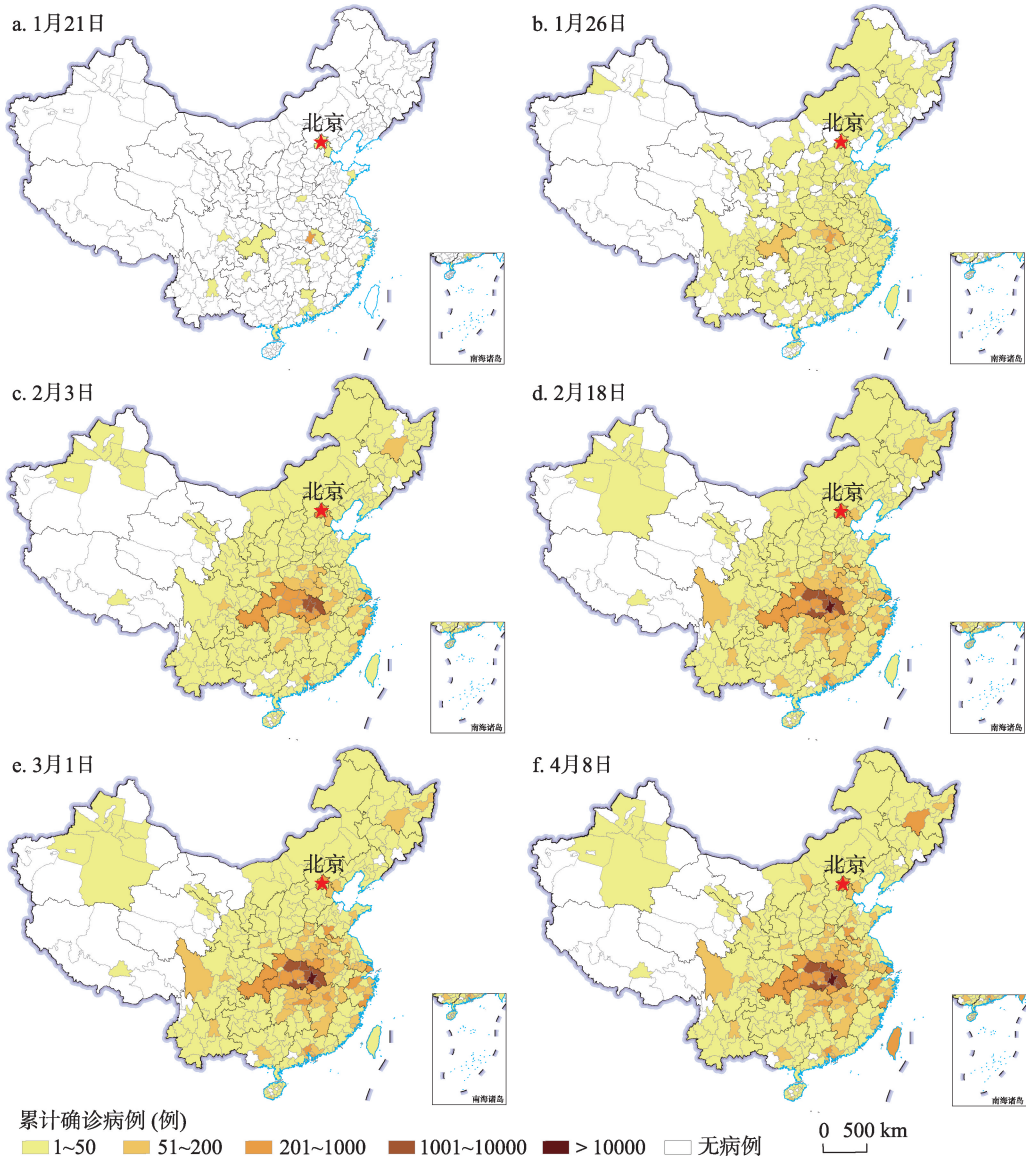


图3 疫情在中国的空间分布格局及变化

Fig. 3 Spatial distribution of COVID-19 in China and its dynamics

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS(2019)1827号）绘制，底图无修改。

州、深圳和哈尔滨等城市，累计病例均超过300例；累计确诊病例介于100至300例的城市中65.5%分布于河南、湖南、江西、浙江和安徽。

总体上，疫情的扩散表现为早期的空间多点扩散到后期的全面扩散、由中部到东部再至东北和西部的过程。同时，新冠疫情的发展表现出一定的空间集聚性特征，珠三角、长三角、京津冀、长江中游、中原、哈长等人口密集、社会经济活动聚集的城市群地区疫情较为严重。在空间形态上，疫情主要集中在以北上广和成渝地区为顶点的“菱形空间结构”内部，尤其是长江沿线、东部沿海和京广等交通干线地区。整体上，全国疫情形成以武汉为中心向外扩散的空间格局，各地区的省会城市或直辖市较早出现疫情且较为严重。

3.2.2 湖北省内 湖北是国内新冠疫情最为严重的地区, 在空间上表现出以武汉为中心向外围扩散的模式, 确诊病例表现出东多西少、北多南少的空间格局, 汉十高铁(武汉至十堰)和长江沿线的城市疫情相对较为严重(图4)。继武汉出现新冠疫情后, 邻近的黄冈市首先出现确诊病例, 其次为荆州、荆门、孝感、仙桃、宜昌和十堰等城市, 至1月27日湖北省内城市均发现有新冠疫情病例。从发现疫情的时间早晚分析, 整体上表现出以武汉为中心从东向西扩散的特征。从疫情严重程度分析(表1), 武汉市疫情表现最为严重, 4月8日累计确诊病例占湖北省比重超过70%, 其次为与武汉邻近的孝感和黄冈, 累计确诊病例均超过2900例, 荆州、鄂州、随州、襄阳和黄石等超过1000例, 宜昌、荆门和咸宁超过800例。这些疫情较为严重的城市主要分布在汉十高铁和长江沿岸。

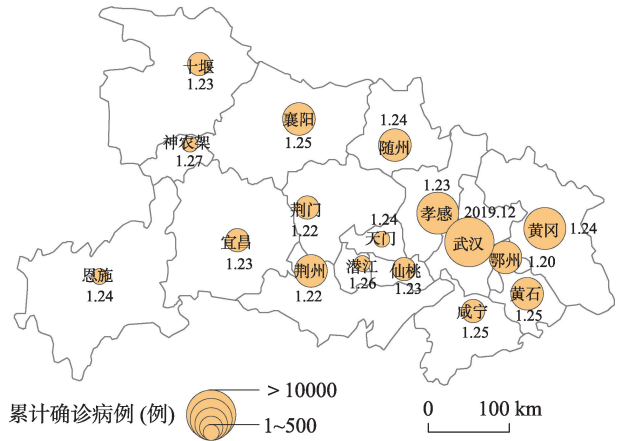


图4 湖北省疫情分布(截至4月8日)及首例确诊时间

Fig. 4 Total confirmed cases as of 8 April and the time of first confirmed case of the cities in Hubei province

注: 除武汉外, 湖北省其他城市首例确诊时间均为2020年1月。

表1 湖北省和其他地区疫情前10位城市(截至4月8日)

Tab. 1 Top 10 cities with cumulative confirmed cases in Hubei province and other regions (as of 8 April)

位序	湖北省		其他地区	
	城市	累计病例(例)	城市	累计病例(例)
1	武汉	50008	北京	588
2	孝感	3518	重庆	579
3	黄冈	2907	上海	552
4	荆州	1580	温州	504
5	鄂州	1394	广州	467
6	随州	1307	深圳	456
7	襄阳	1175	哈尔滨	325
8	黄石	1015	信阳	274
9	宜昌	931	杭州	266
10	荆门	928	济宁	260

4 新冠肺炎疫情空间扩散模式

基于时空尺度的演变特征分析, 新冠肺炎疫情在中国的空间扩散过程主要表现为邻近扩散、迁移扩散、等级扩散和廊道扩散4种模式(图5)。

4.1 邻近扩散

遵循地理学第一定律, 离武汉较近的城市越容易先出现疫情且表现较为严重。新冠疫情发展在全国和湖北省内均形成以武汉为中心向外扩散的空间格局, 表现出邻近性的扩散模式。从城市尺度分析, 2019年12月武汉发现疫情后, 其周边地区较早受到影响, 1月20日至27日武汉邻近的城市黄冈、荆州、荆门、孝感等相继出现确诊患者, 且后期也是国内疫情较为严重的城市。从省区尺度分析, 与湖北省相邻的重庆、河南、湖南、安徽、江西等也较早出现疫情且表现较为严重, 截至4月8日, 5省市的累计确诊病例占湖北省外全国其他地区的30%以上。

4.2 迁移扩散

随着交通技术的进步及区域社会经济联系的增强, 人口在全国范围内流动的时效性和便捷性快速提升, 可以在较短时间内抵达距离较远的地区, 从而实现人口的跨区域流

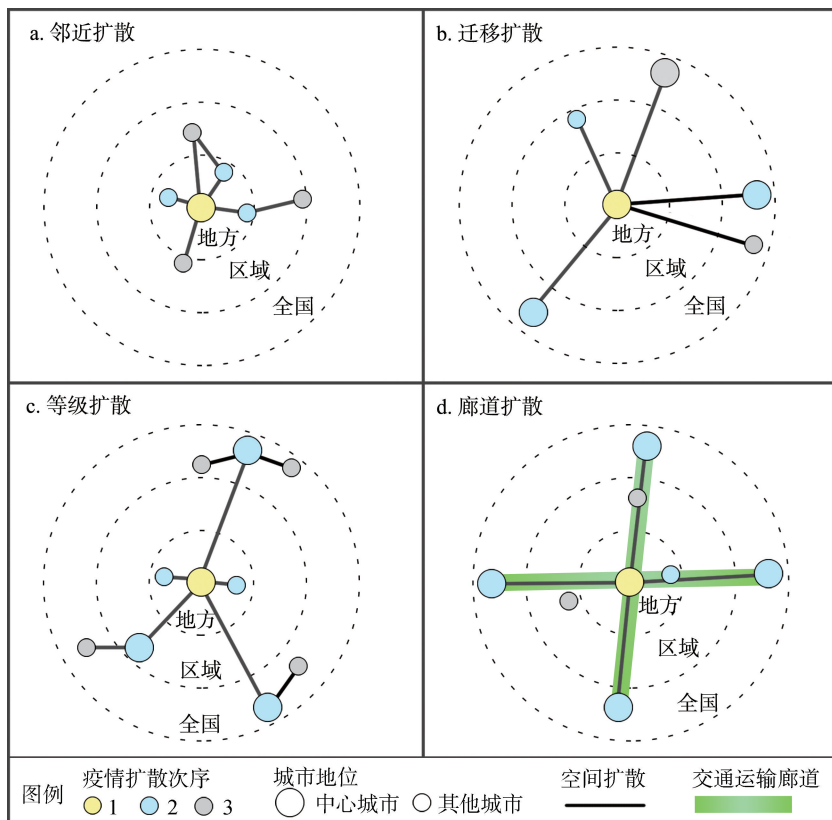


图5 疫情空间扩散模式

Fig. 5 Spatial spreading mode of COVID-19

动。新冠疫情伴随着人口流动进行跨区域的迁移扩散。早期在武汉出现疫情后，全国先后出现确诊病例的城市为深圳、北京、上海、黄冈、珠海、惠州和湛江等，除黄冈外所有城市均位于与武汉距离较远、但交通联系方便且保持着密切的社会经济联系与人口往来的区域。在全国尺度，省会和直辖市等区域中心城市也通常较早发现确诊病例，疫情扩散早期新增城市多分布于以长三角、珠三角、京津冀和成渝地区为顶点的“菱形空间结构”。另一方面，北京、重庆、上海、温州、广州、深圳和哈尔滨等是湖北省外疫情较为严重的城市，大部分与湖北省距离较远，但是交通运输便捷、社会经济联系密切的地区。

4.3 等级扩散

由于全国的社会经济联系、交通运输、人口迁移等“流网络”结构具有枢纽和等级结构特征^[24-27]，因此新冠疫情的传播也具有类似的空间扩散模式。从全国尺度分析，疫情主要经由区域中心城市、省会城市再扩散至其他地区，整体上形成以武汉为中心，长三角、珠三角、京津冀和成渝地区为顶点的等级扩散和近域递减结构，与中国的区域空间格局相似^[28]，也反映了社会经济的空间关联关系会形成相似的人口流动结构，从而也对疫情的空间扩散模式产生一定影响。具体而言，直辖市和省会城市通常是区域重要交通枢纽，在春运期间汇集和输送了大量客流，对疫情的扩散起到重要影响。直辖市和省会城市成为大部分地区首先出现确诊病例的城市，紧邻其后的是周边地区，从而表现出一定的层级扩散特征。例如海南省前50位确诊病例中，26例经海口中转扩散至其他地区^[29]。

4.4 廊道扩散

交通运输廊道往往承载着密集的人口流动,是疫情扩散的一种重要途径。交通廊道通常连接社会经济活动丰富、人口流动频繁的地区,随着高速交通的快速发展,其产生的时空收敛效应会在一定程度上降低地域空间的约束,提升城市间的连通性和相互联系程度,因而疫情扩散的风险也相对较大。在疫情扩散过程中,较早出现疫情的城市主要分布于沪汉蓉、京广、沪昆以及京沪等交通干线沿线地区,特别是沪汉蓉和京广高铁均经过武汉,对疫情的扩散有重要的影响,1月21日出现疫情的城市约一半来自沿线地区。在湖北省内,以汉十高铁和长江沿线的城市疫情出现较早且较严重,也体现了沿交通干线扩散的特征。

5 新冠肺炎疫情空间扩散影响因素

从疫情发现地、传播途径和易感人群等传染病流行的基本环节出发,并结合《新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案(试行第六版)》公布的流行病学特点:“目前所见传染源主要是新型冠状病毒感染的患者”“经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径”“人群普遍易感”,本文从地理邻近性、人口流动和人口规模、交通网络、防控管理探讨对疫情空间扩散的影响。

5.1 地理邻近性

考虑“发病前14天内有武汉及周边地区的旅行史或居住史”是确诊的重要参考依据之一,区域的地理邻近性对疫情的发展和扩散具有十分重要的影响。武汉是中国最早出现疫情的城市且确诊病例数量远高于其他地区,占全国比重超过60%,与武汉邻近的湖北省内其他城市的疫情也较为严重,除仙桃、天门、潜江和神农架林区4个湖北省直辖县级行政区外,其余13个州市累计确诊病例均超过600例,高于湖北省外其他地区的城市。从地理距离分析,以武汉为中心的100 km、200 km、300 km、400 km和500 km范围内的确诊病例累计占全国(除武汉外)比重分别为30.8%、43.2%、55.3%、62.1%和65.7%,表现出一定的距离衰减特征,反映了疫情的空间邻近扩散模式。

5.2 人口流动和人口规模

基于疫情“经呼吸道飞沫和接触传播是主要的传播途径”以及“人群普遍易感”的特点,人口的流动和空间分布对于疫情的扩散和严重程度具有重要影响。在春节前武汉迁出人口中(表2),69.24%流向省内其他城市,以孝感和黄冈最多,二者也是全国除武汉外疫情最严重的城市。在湖北省外的前10位流向城市中,包括北京、重庆、上海、信阳4个湖北省外累计确诊病例在前10位的城市,其他6个城市主要分布于河南和湖

表2 2020年春节前武汉迁出人口在湖北省和其他地区的前10位城市

Tab. 2 The top 10 cities inside and outside Hubei province by migrant population from Wuhan before the Spring Festival of 2020

位序	湖北省		其他地区	
	城市	占比 (%)	城市	占比 (%)
1	孝感	13.80	信阳	1.49
2	黄冈	13.04	重庆	1.27
3	荆州	6.54	长沙	1.02
4	咸宁	5.01	北京	0.86
5	鄂州	3.97	南阳	0.69
6	襄阳	3.93	上海	0.66
7	黄石	3.77	驻马店	0.66
8	荆门	3.30	郑州	0.59
9	随州	3.21	九江	0.52
10	仙桃	2.97	岳阳	0.52

南。这也在一定程度上解释了疫情发展的邻近扩散和迁移扩散模式，与武汉邻近的城市疫情严重，且距离较远的北京和上海等城市也较为严重。

整体上，武汉迁出人口的分布与各地疫情严重程度具有显著相关性（表3和图6），各地确诊病例数与武汉迁出人口占比的Pearson相关系数达0.968，同时二者表现出明显的线性相关关系，拟合曲线 R^2 达0.9378，相关性极强。此外，由于人群普遍易感，各地人口规模也会对疫情扩散产生一定影响，各地市（武汉除外）人口规模与确诊病例的Pearson相关系数较低，但显著性较高。

表3 疫情扩散与人口流动和交通的Pearson相关性

Tab. 3 Pearson correlation of COVID-19 with population mobility and transportation

疫情扩散	人口流动和规模		与武汉联系交通网络		
	武汉迁出人口	城市人口规模	航空运输	高铁列车	长途汽车
累计确诊病例	0.968**	0.210**	0.437**	0.443**	0.631**
首例确诊时间	-0.115*	-0.171**	-0.532**	-0.250**	-0.086

注：*、**分别表示在0.05、0.01水平上显著（双尾）；累计确诊病例截至4月8日；时间尺度以1月19日（武汉之外最先出现确诊病例的时间）为1，此后逐日加1。

5.3 交通网络

交通是居民出行和人口流动的重要载体，在运输过程中，旅客处于相对密闭和聚集的环境，因而对疫情传播会产生重要影响。基于航空运输、高铁列车和长途汽车，可以发现各地疫情发展与连接武汉的交通网络具有显著的相关性。在疫情严重程度方面，各地市累计确诊病例数与航空运输、高铁列车和长途汽车呈显著的正相关关系，Pearson相关系数依次增大，长途汽车在短距离运输具有一定优势，灵活度较高，并且通常形成以省会为中心的运输空间结构，省级行政边界具有明显的约束作用^[20,30]，高铁和航空则分别是在中等距离和远距离具有一定运输优势，这与疫情在全国的空间扩散格局相一致。从时间尺度分析，各地市首例确诊病例的时间与航空和高铁运输呈显著负相关，且以航空的相关系数较大，结合疫情的发展，体现了在疫情扩散初期航空和高铁具有重要影响，较早出现疫情的城市主要分布于珠三角、长三角和京津冀等地区，其次多为各地的省会和直辖市，这与航空运输在一定程度上突破地理空间约束、高铁在省会或直辖市之间联系紧密相一致，也体现了疫情的空间等级扩散和廊道扩散模式。

5.4 疫情防控管理

控制传染源、切断传播途径、保护易感人群是疫情防控的关键，行政干预则是有效的实施手段。中国公共卫生体系经过多年的发展，基本形成了较为完善的组织架构，2018年全国医院数和基层医疗卫生机构分别达3.3万和94.36万个^[31]。公共卫生管理水平也在不断提高^[32]，公共卫生管理体系在本次疫情的防控工作中发挥了重要作用。自2020年1月23日以来，全国各省级行政区相继启动重大突发公共卫生事件一级响应，采取了一系列的防控措施，包括交通运输管制、流动人员管理、限制或禁止集会和集会等人群聚集活动等，例如武汉采取了“封城”措施，暂停城市公交、地铁、轮渡、长途客运，关闭机场、火车站离汉通道，随后湖北省各地市也相继实施类似措施，避免了疫情的进一步扩散。另一方面，新冠肺炎疫情的发展也暴露了当前中国公共卫生管理存在的一些问题和需要进一步完善的地方^[33]，例如健全突发公共卫生事件的应急管理机制、完善信息公开和管理制度等。

6 结论与讨论

新冠肺炎疫情给全球社会经济活动以及民众生命健康安全造成了巨大的影响。中国作为新冠肺炎疫情早期集中爆发的地区，研究其在空间上的扩散过程与空间格局，归纳总结其空间扩散模式，并揭示其空间扩散的影响因素，对制定有效的疫情防控措施具有十分重要的意义。研究发现：

新冠肺炎疫情在中国主要经历了6个发展阶段，整体表现出邻近扩散、迁移扩散、等级扩散和廊道扩散的地理空间模式。这些模式与地理学第一定律“地理邻近性”以及全球化、信息化和交通高速化共同推动下的“流空间”网络密切相关。在全球化与开放地域系统中，跨空间的社会经济联系越来越紧密，借助便捷、快速和完善的高速交通网络，人口流动呈现出快速、跨区域和层级性的特征，并形成一定的空间级联结构和沿交通廊道的分布特征^[20,24-25]，从而导致新冠肺炎疫情在全国城际尺度表现出迁移扩散、等级扩散和廊道扩散的地理模式。进一步地，研究揭示了地理邻近性、人口流动、人口规模、交通网络、疫情防控措施等因素对疫情的空间扩散过程和速度具有显著影响。其中，交通网络是人口流动的重要载体，而春节期间的返乡人口流、旅游流等也与疫情扩散具有一定的关系，如温州人在武汉经商返乡、冰雪旅游季造成黑龙江的疫情严重等现象，在一定程度上也都表现为疫情的跨区域迁移扩散模式。

此次新冠疫情的空间扩散过程和模式在一定程度上也是人类经济活动空间组织模式和级联系统的一种反映，与地理邻近性、社会经济联系强度以及人类活动的时空规律等均密切相关。本文从地理学视角研究疫情的城际空间扩散过程、模式及影响因素，以期为世界各国的疫情防控措施制定提供参考，也为中国未来应对公共卫生应急风险提供经验借鉴。

致谢：真诚感谢二位匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力，评审专家对本文的时间节点选取、结果分析以及结论梳理方面的修改意见，使本文获益匪浅。

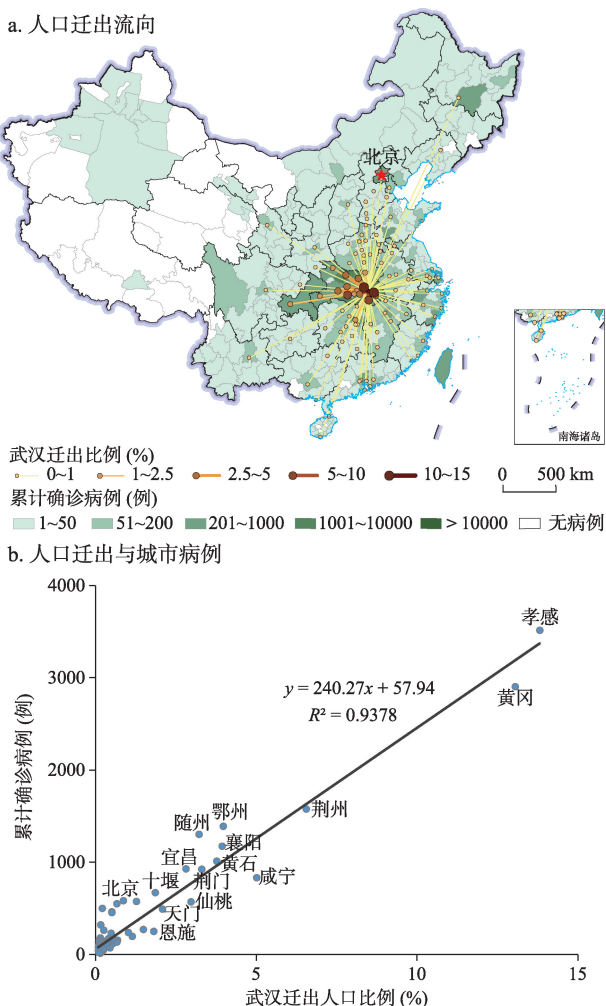


图6 2020年春节前武汉迁出人口与疫情空间分布 (截至4月8日)

Fig. 6 Migrant population from Wuhan before the Spring Festival of 2020 and the confirmed cases in different cities (as of 8 April)

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图 (审图号：GS(2019)1827号) 绘制，底图无修改。

参考文献(References)

- [1] World Health Organization (WHO). WHO director-general's opening remarks at the media briefing on COVID-19-11 March 2020. (2020-03-11) [2020-04-19]. <https://www.who.int/zh/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19-11-march-2020>.
- [2] World Health Organization (WHO). Situation report. (2020-04-08) [2020-04-19] <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200408-sitrep-79-covid-19.pdf>.
- [3] 王霞, 唐三一, 陈勇, 等. 新型冠状病毒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. 中国科学: 数学, 2020, 50: 1-10. [Wang Xia, Tang Sanyi, Chen Yong, et al. When will be the resumption of work in Wuhan and its surrounding areas during COVID-19 epidemic? A data-driven network modeling analysis. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50: 1-10.]
- [4] 严闯, 陈瑜, 刘可伋, 等. 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. 中国科学: 数学, 2020, 50(3): 1-8. [Yan Yue, Chen Yu, Liu Keji, et al. Modeling and prediction for the trend of outbreak of NCP based on a time-delay dynamic system. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50(3): 1-8.]
- [5] 喻夜, 张贵清, 刘庆珍, 等. 基于时变参数-SIR模型的2019-nCoV疫情评估和预测. 电子科技大学学报, (2020-02-10) [2020-04-19]. doi: 10.12178/1001-0548.2020027. [Yu Zi, Zhang Guiqing, Liu Qingzhen, et al. The outbreak assessment and prediction of 2019-nCoV based on time-varying SIR model. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*. (2020-02-10). [2020-04-19]. doi: 10.12178/1001-0548.2020027.]
- [6] Zhao S L, Chen H. Modeling the epidemic dynamics and control of COVID-19 outbreak in China. medRxiv. (2020-02-27) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.02.27.20028639.
- [7] Batista M. Estimation of the final size of the COVID-19 epidemic. medRxiv. (2020-02-28) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.02.16.20023606. 2020-2-16.
- [8] Yuan H Y, Hossain M P, Tsegaye M M, et al. Estimating the risk on outbreak spreading of 2019-nCoV in China using transportation data. medRxiv. (2020-02-01) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.02.01.20019984.
- [9] Ai S, Zhu G, Tian F, et al. Population movement, city closure and spatial transmission of the 2019-nCoV infection in China. medRxiv. (2020-02-04) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.02.04.20020339.
- [10] Du Z, Wang L, Cauchemez S, et al. Risk for transportation of 2019 novel coronavirus (COVID-19) from Wuhan to cities in China. medRxiv. (2020-01-28) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.01.28.20019299.
- [11] 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. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 200-203. [Zhou Chenghu, Pei Tao, Du Yunyan, 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.]
- [12] 曹春香, 李小文, 闫琬, 等. 地理空间信息与SARS疫情走势. 遥感学报, 2003, 7(4): 241-244. [Cao Chunxiang, Li Xiaowen, Yan Xiu, et al. Geo-spatial information and analysis of SARS spread trend. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 241-244.]
- [13] Muniz-Rodriguez K, Chowell G, Cheung C H, et al. Epidemic doubling time of the COVID-19 epidemic by Chinese province. medRxiv, (2020-02-05) [2020-04-19]. doi: 10.1101/2020.02.05.20020750.
- [14] Brooks C P, Antonovics J, Keitt T H. Spatial and temporal heterogeneity explain disease dynamics in a spatially explicit network model. *The American Naturalist*, 2008, 172(2): 149-159.
- [15] 顾朝林, 朱杰, 孙一飞, 等. 新冠肺炎疫情拐点或已越过. (2020-02-15) [2020-04-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/TdOyvk9an7sdiugEWD8oyA>. [Gu Chaolin, Zhu Jie, Sun Yifei, et al. (2020-02-15) [2020-04-19]. The tipping point of covid-19 may have been passed. <https://mp.weixin.qq.com/s/TdOyvk9an7sdiugEWD8oyA>.]
- [16] 曹志冬, 王劲峰, 高一鹤, 等. 广州SARS流行的空间风险因子与空间相关性特征. 地理学报, 2008, 63(9): 981-993. [Cao Zhidong, Wang Jinfeng, Gao Yige, et al. Risk factors and autocorrelation characteristics on severe acute respiratory syndrome in Guangzhou. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 981-993.]
- [17] 曹志冬, 王劲峰, 高一鹤, 等. 广州SARS流行过程的空间模式与分异特征. 地理研究, 2008, 27(5): 1139-1149. [Cao Zhidong, Wang Jinfeng, Gao Yige, et al. Spatial pattern and heterogeneity risk of severe acute respiratory syndrome epidemic in Guangzhou. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1139-1149.]
- [18] 裴韬, 舒华, 郭思慧, 等. 地理流的空间模式: 概念与分类. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 30-40. [Pei Tao, Shu Hua, Guo Sihui, et al. The concept and classification of spatial patterns of geographical flow. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(1): 30-40.]
- [19] Castells M. Globalisation, networking, urbanisation: Reflections on the spatial dynamics of the information age. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2737-2745.

- [20] 王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束. 地理学报, 2019, 74(12): 2482-2494. [Wang Jiaoe, Du Delin, Jin Fengjun. Comparison of spatial structure and linkage systems and geographic constraints: A perspective of multiple traffic flows. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2482-2494.]
- [21] 国家卫生健康委员会. 新型冠状病毒肺炎疫情防控. (2020-04-08) [2020-04-19]. http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml. [National Health Commission of People's Republic of China. Control of COVID-19. (2020-04-08) [2020-04-19]. http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml.]
- [22] 武汉市新型冠状病毒感染的肺炎疫情防控指挥部. 武汉市新型冠状病毒感染的肺炎疫情防控指挥部通告(第1号). (2020-01-23) [2020-04-19]. http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2020/gzxxgzbd/zxtb/202001/t20200123_2014402.shtml. [Wuhan epidemic prevention and control headquarters. Announcement of Wuhan epidemic prevention and control headquarters (First). (2020-01-23) [2020-04-19]. http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2020/gzxxgzbd/zxtb/202001/t20200123_2014402.shtml. 2020-1-23.]
- [23] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018. [Urban Social and Economic Investigation Department of National Provincial Bureau of Statistics. *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [24] 金凤君. 基础设施与经济社会空间组织. 北京: 科学出版社, 2012. [Jin Fengjun. *Spatial Organization of Infrastructure, Economy and Society*. Beijing: Science Press, 2012.]
- [25] 王姣娥, 焦敬娟, 黄洁, 等. 交通发展区位测度的理论与方法. 地理学报, 2018, 73(4): 666-676. [Wang Jiaoe, Jiao Jingjuan, Huang Jie, et al. Theory and methodology of transportation development and location measures. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 666-676.]
- [26] 王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较. 地理学报, 2017, 72(8): 1508-1519. [Wang Jiaoe, Jing Yue. A comparative research of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [27] 王姣娥, 焦敬娟, 金凤君. 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响. 地理学报, 2014, 69(12): 1833-1846. [Wang Jiaoe, Jiao Jingjuan, Jin Fengjun. Spatial effects of high-speed rails on interurban economic linkages in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1833-1846.]
- [28] 樊杰, 王亚飞, 梁博. 中国区域发展格局演变过程与调控. 地理学报, 2019, 74(12): 2437-2454. [Fan Jie, Wang Yafei, Liang Bo. The evolution process and regulation of China's regional development pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2437-2454.]
- [29] 海南省卫生健康委员会. 确诊病例迁徙途径. (2020-03-20) [2020-04-19]. <http://wst.hainan.gov.cn/yqfk/index/index/qianyiyi.html>. [Hainan Health Commission. Migration route of confirmed cases. (2020-03-20) [2020-04-19]. <http://wst.hainan.gov.cn/yqfk/index/index/qianyiyi.html>.]
- [30] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式. 地理学报, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*. 2017, 72(2): 224-241.]
- [31] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019. [National Provincial Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [32] 赵同香, 王海英. 2001-2016年我国卫生政策变迁. 中国现代医生, 2017, 55(24): 133-135. [Zhao Tongxiang, Wang Haiying. Changes of health policies in China from 2001 to 2016. *China Modern Doctor*, 2017, 55(24): 133-135.]
- [33] 赵路. 加强我国公共卫生管理的若干建议. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 190-194. [Zhao Lu. Suggestions on strengthening public health management in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(2): 190-194.]

The development of COVID-19 in China: Spatial diffusion and geographical pattern

WANG Jiaoe^{1,2}, DU Delin^{1,2}, WEI Ye³, YANG Haoran^{4,5}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, 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. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 4. The Center for Modern Chinese City Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 5. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The study of the spatial diffusion and geographical mode of COVID-19 is of great significance for the rational allocation of health resources, the management and response of public health emergencies, and the improvement of public health system in the future. Based on multiple spatio-temporal scale, this paper studied the spatial spreading process of COVID-19 between cities and its evolution characteristics in China, and then explored its influencing factors. The results are shown in the following: the inter-city spreading process of COVID-19 in China mainly experienced six stages, namely, stage I: diffusion in Wuhan, stage II: rapid multi-point diffusion in space, stage III: rapid increase of confirmed cases, stage IV: gradual decrease of new confirmed cases, stage V: the epidemic under control, and stage VI: cases imported from overseas. In the context of globalization and open regional system, the social and economic development of regions are closely related to each other. With the development of fast and convenient high-speed railway network, the spatial characteristic of population migration shows a cross-regional and hierarchical pattern, and forms a certain spatial cascade structure along the transport corridor. Accordingly, the spatial spread of COVID-19 mainly shows the characteristics of adjacent diffusion, relocation diffusion, hierarchical diffusion, and corridor diffusion. The study found that geographical proximity, population migration and population size, traffic network, epidemic prevention and control measures have significant influence on the spatial diffusion process of COVID-19. Among different modes of transportation, airplanes play a greater role than others in the early stage of the epidemic. In addition, the population flow during the Spring Festival had a certain impact on the spread of the epidemic. In conclusion, to some extent, the spatial spread process and pattern of COVID-19 epidemic reflects the spatial organization pattern of social and economic activities under the "space of flows" network, which is closely related to the geographical proximity, the social and economic linkages between regions, and the spatial and temporal patterns of human activities. From the perspective of geography, this paper analyzed the inter-city spread pattern of COVID-19 epidemic and provided some implications for prevention and control measures against the epidemic in other countries, and also offered some suggestions for China to deal with public health emergency risks in the future.

Keywords: epidemic; geographical proximity; diffusion; population flow; transport