

中国人口流动影响下的新冠病毒肺炎疫情 时空格局与防控效果数据分析

刘涛^{1,2}, 陈家醇^{1,2}, 靳永爱^{3*}, 肖雯^{1,2}

1.北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2.北京大学未来城市研究中心, 北京 100871;
3.中国人民大学人口与发展研究中心, 北京 100872

摘要: 本文研究我国新冠病毒肺炎疫情的时空动态、人口流动模式的异质性影响及防控政策的差异性有效性。研究发现, 疫情暴发阶段以跃迁式扩散为主, 而后由邻接式扩散主导, 二者的结合推动疫情达到高峰, 最终形成了发达省市、周边省份、人口大省等三类疫情热点区, 且边境地区的疫情输入风险也早有预兆; 长期在鄂务工者、经商者的返乡流与短期商务旅游流对不同地区、不同阶段的疫情发展具有异质性影响; 卫生防疫和社会治理体系的良性互动是疫情防控成功的关键所在。论文最后讨论了地理学时空动态分析的学科优势, 人口流动的结构分析对解读疫情扩散机制和构建公共卫生应急体系的关键作用以及大数据和传统数据互补融合的重要性。

关键词: 新冠疫情; 人口流动; 时空动态分析; 政策评估; COVID-19; 武汉; 湖北

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.03>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:
<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.20.V1>

1 前言

作为一项紧急重大的公共卫生事件, 新冠病毒肺炎疫情是对国家和地方治理能力的一次严峻考验^[1]。2020年1月20日明确“人传人”之后, 中央和地方政府采取果断举措, 各地迅速启动突发公共卫生事件一级响应、武汉等城市关闭出入通道、医护人员和医疗物资设备全国调配、各地城乡社区统一实行封闭或半封闭管理等^[2]。在各级政府、社会和全体居民的共同努力下, 疫情在2月上旬达到峰值, 并于2月底基本平息, 实现了抗击疫情的重要阶段性胜利^[3]。目前的防控重点已转向境外输入病例的甄别与防治, 以及社会生产和秩序恢复过程中的常态化防控。然而, 疫情仍在全球快速蔓延, 并很可能将持续1-2年甚至更长时间。更重要的是, 作为一种新型病毒和传染性疾病, 科学界对新冠病毒肺炎疫情

收稿日期: 2020-08-09; 修订日期: 2020-09-17; 出版日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(41801146); 北京大学新冠肺炎防控攻关专项; 教育部(18YJC840022); 英国研究理事会全球挑战研究基金(ES/P011055/1)

*通讯作者: 靳永爱 ABG-5542-2020, 中国人民大学人口与发展研究中心, jinyongai0416@ruc.edu.cn

数据引用方式: [1] 刘涛, 陈家醇, 靳永爱等. 中国人口流动影响下的新冠病毒肺炎疫情时空格局与防控效果数据分析[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(3): 224-240. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.03>.
[2] 刘涛, 靳永爱, 肖雯. 2020.1.19-2.22期间中国人口流动影响下的COVID-19时空格局与防控效果分析数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.20.V1>.

的传播规律仍然知之甚少，基于基本完成疫情暴发与防控全过程的中国案例的相关探索不仅有助于我国常态化防控机制的优化，有助于全球疫情的防控，也将有助于未来更加有效地应对类似疾病传播、提升公共卫生治理能力^[4]。

新冠疫情得到了多学科的研究关注^[5]，但很多科学问题仍未解决，尤其是地理学视角下的疫情传播时空动态性及其形成机制的研究较为缺乏。首先，疫情地图在社会媒体上广为传播，甚至成为地图的重要社会普及事件。但疫情相关的学术研究却很少涉及其空间特征，对地理距离、圈层特征、空间格局的认识和总结不够，尤其缺乏时空动态性的视角，而这些是科学认识疫情传播规律所不可或缺的一环^[6-7]。其次，人口的空间移动是疫情传播的主要途径，大量的研究关注了该因素的作用，认为人口移动能够在很大程度上解释疫情传播^[8-10]。但这些研究普遍混淆了长期迁移流动和短期商务旅游这两种人口移动模式，仅关注人口的总量而忽视了其内部结构特征，这将不仅导致对疫情传播的解释出现偏颇^[11-12]，更可能形成误导性的社会治理相关政策建议。此外，政策影响的研究多用于疫情的模拟^[13-14]，而具体政策的设计和运作机制常常被过度简化，难以深入评估多层次、多样化的政策作用，不利于政策经验的总结和未来政策的优化。

本文将利用全国各省（自治区、直辖市，以下简称“省”）每日数据描绘新冠疫情传播的时空动态，深入考察各种类型人口流动模式对疫情传播的异质性影响，并以处于疫情中心的湖北省各市州为例，分析疫情防控政策的差异性与有效性。

2 数据集元数据简介

《2020.1.19–2.22 期间中国人口流动影响下的 COVID-19 时空格局与防控效果分析数据集》^[15]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

3 数据研发方法

3.1 数据源

本文使用的每日疫情数据来源于各省卫生健康委的公开发布数据。由于一些省份的每日新增确诊病例数可能存在数据校核过程中的重报、漏报的问题，因此该指标未采用原始公布数据，而是根据当日和前一日公布的累计确诊数相减得到。已有研究发现，2月初的疫情高峰期之后，全国各地累计确诊人数的空间格局已经基本稳定；进一步的计算表明，2月15日之后，每日各省累计确诊人数的相关系数均为1.000，因此将疫情时空动态的研究期末设定为之后的一周，即2月22日，届时全国多数省份新增确诊人数均已降为零。但后续的政策分析中，则使用了4月疫情平息后的数据。

本文的分析还用到疫情之外的相关指标，其数据来源如下：人口迁移流动状况的表征指标是各地户籍人口中常住武汉、常住湖北其他地区的人口，数据来源于2015年全国1%人口抽样调查个体数据库中提取的武汉市和湖北省流动人口来源地分布状况。商务旅游流以各地星级饭店工作人员数量和铁路客运量表征，数据来源于中国统计年鉴。此外，分析中还使用了国家卫健委组织开展的2017年全国流动人口动态监测调查数据，该调查具有全国、各省及主要城市的代表性，样本量约17万人，是流动人口研究中最具代表性并被学界

广泛认可和使用的调查数据。

**表 1 《2020.1.19–2.22 期间中国人口流动影响下的 COVID-19 时空格局与
防控效果分析数据集》元数据简表**

条 目	描 述
数据集名称	2020.1.19–2.22 期间中国人口流动影响下的 COVID-19 时空格局与防控效果分析数据集
数据集短名	ChinaSpatialTemporalCOVID-19_2020.1.19-2.22
作者信息	刘涛 B-6318-2009, 北京大学城市与环境学院, liutao@pku.edu.cn 靳永爱 ABG-5542-2020, 中国人民大学人口与发展研究中心, jinyongai0416@ruc.edu.cn 肖雯 ABG-5448-2020, 北京大学城市与环境学院, chloexiao@pku.edu.cn
地理区域	中国
数据格式	.xls
数据集组成	数据年代 2020 数据量 122 KB ChinaSpatialTemporalCOVID-19_2020.1.19-2.22 数据文件是一个表格文件组成, 包括七个工作表, 分别是: 1) 1月19日–2月22日各省(自治区、直辖市)新冠肺炎疫情新增确诊病例数 2) 1月19日–2月22日各省(自治区、直辖市)新冠肺炎疫情累计确诊病例数 3) 1月19日–2月22日各省(自治区、直辖市)新冠肺炎疫情新增确诊率 4) 1月19日–2月22日各省(自治区、直辖市)新冠肺炎疫情累计确诊率 5) 各省(自治区、直辖市)新冠肺炎所有病例发病日到起始日(1月19日)的平均天数 6) 新冠肺炎确诊病例到武汉市的平均距离 7) 1月19日–2月22日各地理圈层新冠肺炎疫情状况
基金项目	国家自然科学基金(41801146); 北京大学新冠肺炎防控攻关专项; 教育部(18YJC840022); 英国研究理事会全球挑战研究基金(ES/P011055/1)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报(中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[16]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

本文的分析还用到疫情之外的相关指标, 其数据来源如下: 人口迁移流动状况的表征指标是各地户籍人口中常住武汉、常住湖北其他地区的人口, 数据来源于 2015 年全国 1% 人口抽样调查个体数据库中提取的武汉市和湖北省流动人口来源地分布状况。商务旅游流以各地星级酒店工作人员数量和铁路客运量表征, 数据来源于中国统计年鉴。此外, 分析中还使用了国家卫健委组织开展的 2017 年全国流动人口动态监测调查数据, 该调查具有全国、各省及主要城市的代表性, 样本量约 17 万人, 是流动人口研究中最被学界广泛认可和使用的调查数据。

3.2 算法原理

针对各地每日的累计和新增确诊病例,本文分析的指标主要是病例总人数和发病率。确诊病例人数的意义在于疫情给地方医疗系统和社会治理带来的总体压力,同时也会对社会情绪和舆论造成重大影响。发病率是病例人数与当地户籍人口的比值,以每百万人病例数测量。本文选择户籍人口为分母的原因在于本次疫情恰逢春节,绝大多数流动人口都已回乡团聚;当然,除受疫情影响而大幅减少的商务旅游人员以外,有些异地落户者也会回乡团聚,导致户籍人口与各地春节和疫情期间的真实人口规模有所差异,但这种差异远小于流动人口回乡的规模,因此户籍人口比常住人口更能反映各地疫情期间的真实人口。发病率指标的意义不仅在统计上消除了各地人口规模的影响,真实反映了各地区每个人被感染的概率,反映了疫情给人们带来的风险和现实影响,而且各地的医疗和治理资源也与人口规模相配套,这种相对指标同样能够反映医疗和治理系统面临的压力水平。

为了描绘疫情的时空动态,本文采用加权平均的方法计算了两个指标:以每日各地确诊病例数量为权重,计算每日全国病例到武汉的平均距离,反映了每日病例向武汉靠近或远离的总体特征,也即疫情空间的时间演化过程;以各地每日确诊病例数量为权重,计算各地全部病例的确诊日期到起始日(1月19日)的平均天数,反映了各地疫情发生的总体时间特征,也即疫情暴发的空间扩散过程。二者计算公式如下:

$$D_i = \sum_j C_{ij} D_j / \sum_j C_{ij} \quad (1)$$

$$N_j = \sum_i C_{ij} N_i / \sum_i C_{ij} \quad (2)$$

式中, i 为日期, j 为省份, C_{ij} 为该日该省新增或累计确诊病例数; D_j 为 j 省几何中心到武汉的直线距离, D_i 为 i 日全国新增或累计病例到武汉的平均距离; N_i 为 i 日到起始日的天数, N_j 为 j 省全部病例确诊日期到起始日的平均天数。

类似地,本文还按照各省区市与湖北省的空间邻接特征将其划分为一级邻接、二级邻接及其他省区等三个圈层,计算各圈层疫情相关指标的逐日变动情况,反映疫情传播和空间扩散的圈层结构特征。绘制空间系列专题地图及分省疫情变动趋势色阶图,进一步考察省级层面的疫情扩散时空动态详细过程。通过散点图和多时点的相关分析,阐释人口迁移流动和商务旅游对各地疫情的异质性影响及其阶段性演变特征。上述中国分省每日疫情数据已在全球变化科学研究数据出版系统出版^[15]。

4 数据结果与分析验证

4.1 数据集组成

《2020.1.19–2.22 期间中国人口流动影响下的 COVID-19 时空格局与防控效果分析数据集》组成包括如表1所示。

4.2 数据结果分析

4.2.1 距离圈层动态

距离是空间关联的集中体现,很多传染性疾病的传播过程都表现出邻接扩散和距离衰减的特征。我们计算了每日新增、累计的确诊病例人数、发病率到武汉的平均距离,并按各省与武汉的空间邻接关系开展圈层差异分析,发现疫情传播的距离和圈层动态远比预期

情况更加复杂。

首先,以武汉为中心,疫情格局首先经历了由远及近的过程,而后才是由近及远的扩散。图1显示,累计、新增的病例人数和发病率均呈现出到武汉的平均距离先降后升的动态规律。早期的疫情暴发主要发生在距离较远但与武汉商务旅游联系较强的浙江、广东等省份,而后才是近距离的周边省份;在疫情暴发10天,即1月底之后,才出现新增病例到武汉距离逐步增加的态势,随后累计病例的相对距离也开始随之增加。

其次,发病率比病例人数到武汉的平均距离更远,反映了疫情的实际空间分布比病例数显示的情况更为均衡。在疫情的每个阶段,发病率加权的各省到武汉平均距离一直高于确诊病例人数加权的结果,且该差距从100 km左右逐步提高到150 km左右。这也充分证明,湖北周边省份疫情严重的现象在很大程度上是由于这些地区人口密度高、规模大造成的。在疫情后期,疫情的空间格局已经非常均衡,与到武汉的距离关系不大。图1的数据表明,此时以新增病例相应的发病率为权重计算的各省到武汉的加权距离达到1,100 km左右,与各省到武汉的平均地理距离非常接近;而此时,按新增病例人数加权计算的距离仍在1,000 km以下,据此仍会得到“疫情分布接近于武汉”的结论,形成舆论和政策的误导。当然,累计发病率仍然与各地到武汉的距离有关,相应的加权距离为885 km左右,但如果按照发病人数计算,加权距离则为736 km,基于后者而形成对距离效应的过度强调将同样是一种可能的误导。

最后,空间距离与疫情的关联性一直不高,对疫情扩散的解释力有限。每天各省的新增和累计病例人数与到武汉距离的相关系数普遍低于0.6,而去除周边省份人口规模普遍较大的因素之后,每天各省的新增和累计发病率与到武汉距离的相关系数一直低于0.45,不能通过1%显著性水平的统计检验,多日的统计结果甚至不能通过5%显著性水平的检验。可见距离在本次疫情中的重要性不高,与疫情扩散呈现一种典型的弱相关关系。

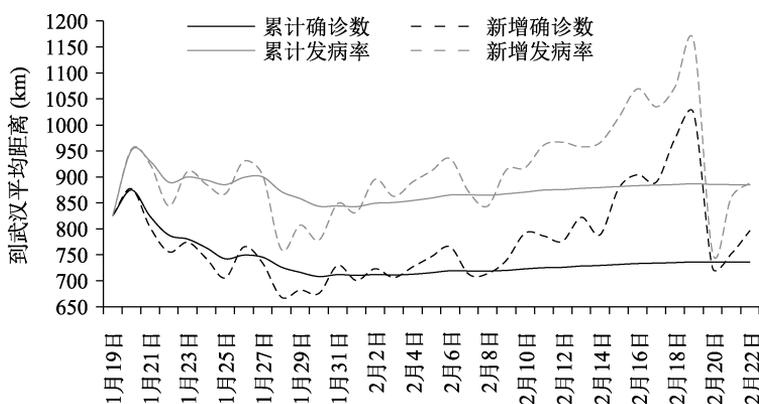


图1 新冠病毒感染者到武汉市城区中心平均距离图

从各省与武汉空间邻接关系的圈层差异来看,各空间圈层的疫情发展动态基本同步,体现了全国一体化防控的有效性和必要性。图2显示,各圈层的疫情几乎同步暴发,都在1月22日左右开始新增病例的快速增长;之后的10天左右,即1月底2月初,疫情同步

达到新增的高峰和累计的趋稳状态。之后各地新增病例同步进入下行区间，均经历了两周左右的时间，即在 2 月 20 日左右，各圈层的新增确诊病例均降到个位数，只有山东省任城监狱的特殊情况导致二级邻接圈层的偶然性回升。总体而言，各圈层不仅都经历了快速暴发并极速增长之后立即较快下降的历程，而且各阶段基本同步。这从两个方面反映了全国一体化防控的效果：一方面，各地疫情从暴发到基本消失的时间都在 1 个月左右，也即病毒潜伏期的 2 倍，说明各地发现疫情之后都进行了有效且高效的遏制，病毒未形成持续性的传播；另一方面，全国疫情动态的同步性则不仅说明地区之间的人口交流规模不大，未形成疫情严重地区向周边的大规模二次扩散，而且由于各地疫情水平差别不大，即使人口跨地区移动从未完全切断，也成功避免了地区之间的二次传播。

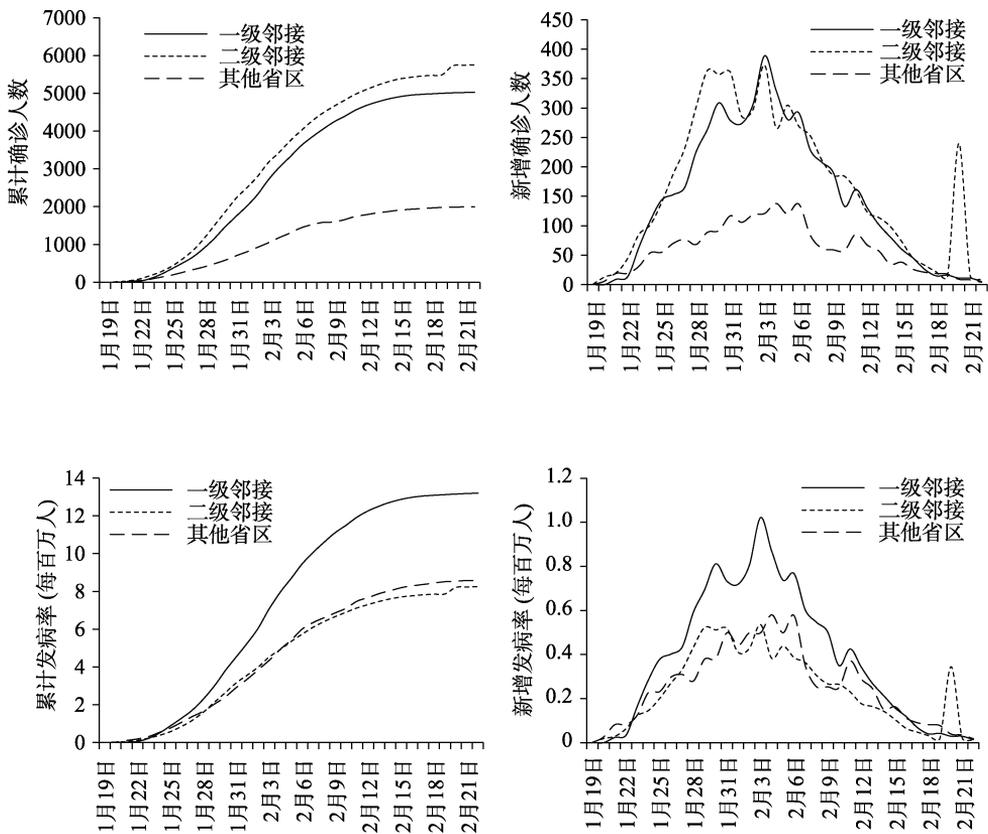


图 2 与武汉市邻接的各圈层疫情动态比较图

湖北邻省的发病率约是其他地区的 1.6 倍，二级邻接与其他省区并无差异。在基于各省与湖北省邻接关系划分的三个圈层中，一级邻接的安徽、河南、江西、湖南、重庆、陕西等 6 省市与二级邻接的 12 个省区市的确诊病例人数接近（表 2）。在疫情接近尾声的 2 月 22 日，两个圈层分别累计有 5,028 人和 5,751 人被确诊，后者甚至高于前者；两个圈层在同时达到疫情高峰的 2 月 3 日分别有 389 人和 373 人被确诊，同样非常接近。然而，一级邻接 6 省市总人口仅有 3.81 亿，而二级邻接 12 省区市的总人口规模则高达 6.97 亿，相似的确诊人数并非反映两个圈层的疫情严重程度相似，而是二级邻接省份的整体情况远好

于一级邻接省份。在消除人口规模的影响后，二级邻接圈层的累计发病率约为每百万人口 8.3 人，不仅远低于一级邻接圈层的 13.2，甚至略低于其他省区 8.6 的平均水平；每日新增的发病率峰值也表现出类似的规律，三个圈层的峰值水平分别为每百万人口 1.02、0.53 和 0.58 人。

4.2.2 省区格局动态

在距离武汉市区远近和圈层分析的基础上，进一步从省级层面分析疫情空间格局的动态变化，考察各圈层的内部差异及其演化过程，可以更深刻地理解疫情传播的时空规律；各省疫情发生的时间特征则是对疫情传播时空规律的直观总结。二者的结合也有助于更明确地识别影响疫情传播的主要因素和动力。

表 2 与武汉市邻接的各圈层疫情总体特征比较

	户籍人口 (亿人)	累计确诊 (2月22日)		新增确诊的峰值		
		人数	发病率 (每百万人)	峰值日期	人数	发病率 (每百万人)
一级邻接	3.81	5,028	13.20	2月3日	389	1.02
二级邻接	6.97	5,751	8.25	2月3日	373	0.53
其他省区	2.56	1,997	8.58	2月4日	138	0.58

此次新冠肺炎疫情在暴发、发展、高峰和平息的四个阶段表现出不同的空间格局，总体上并非邻接扩散主导下的核心外围结构，而是多种空间模式混合的结果，反映了疫情传播的多种因素和动力。在疫情暴发阶段，跃迁式扩散对疫情热点的影响超过邻接式扩散。从 1 月 25 日的疫情格局地图可见 (图 3)，湖北以外的首批暴发点包括浙江、广东、海南、北京和上海，浙江成为第一个确诊人数过百的省份，而此时广东省的确诊人数也达到 98 人。这些地区的初期发病率远高于湖北周边省市，后者只有重庆市暴发较早。这些疫情初期暴发地的共同特点是经济发达并拥有国家级的超大中心城市或冬季旅游热点地，均与湖北和武汉有密切的商务旅游联系。

在疫情发展的第二阶段，跃迁式扩散的热点地区继续强化，邻接式扩散效应开始显现。1 月底，京沪浙粤依然是疫情最为严重的省市，其中京沪浙的累计发病率超过每百万人口 10 人，而浙江和广东的确诊病例均超过了 500 人，这些阶段性突破全都发生在跃迁式扩散的热点地区。与此同时，湖北周边省市疫情快速发展，湖南、江西、重庆的累计发病率超过每百万人口 5 人，河南和湖南的确诊病例数分别达到 422 人和 389 人，仅次于浙江和广东，初步形成了湖北周边的疫情热点圈层。但是，这种圈层特征并不典型，一方面，邻接湖北的安徽省和陕西省的疫情并不明显地比其他省区更严重，另一方面，山东、江苏、福建、四川等非邻接省份的疫情同样快速发展。

在疫情达到高峰的第三阶段，跃迁式扩散和邻接式扩散两种主导模式呈现均衡态势。经过 2 月上旬的高峰期，湖北周边省份疫情严重性充分显现，而前期形成的跃迁式热点地区的疫情状况依然突出。从累计确诊人数来看，广东、浙江、河南成为确诊超过 1000 人的前三个省份，湖北周边的湖南、安徽、江西则紧随其后，确诊病例均超过 800 人。从每百万人的发病率来看，超过 20 的三个省市依然是京沪浙，广东和海南也超过 10；但此时湖

北周边的江西、重庆、湖南、安徽四省市的发病率同样超过了每百万人口 10 人，形成较为明显的邻接热点圈层。

在疫情逐步平息的第四阶段，最终的疫情格局呈现出四个典型特点：第一，跃迁式扩散形成了持续稳定的疫情最严重地区，包括京津沪浙粤琼六省市。其中，广东和浙江确诊人数均超过千人，分列首位和第三；每百万人发病率超过 20 的京沪浙均是这类地区，海南和广东的发病率分列第五和第七，天津市“后来居上”，发病率也达到 12.9，位列第 11。第二，湖北周边省份疫情普遍较为严重，且多为人口大省，感染者众，形成疫情高发的邻接圈层。其中，河南、湖南、安徽、江西四个大省的累计确诊人数均达到或接近千人，位列前六，重庆市人口基数较小，依然有 573 人确诊，人数排位第九；五省市每百万人发病率均在 10 人以上，只有与湖北和武汉地理障碍较大、经济联系较少的陕西省发病率位列中游，确诊人数在 250 人左右。第三，山东、江苏、四川等人口大省的疫情也值得关注，虽然这些省份的发病率均处于中游，但由于人口基数较大，确诊病例也都超过 500 人，位列前 10。第四，黑龙江省是前两类热点地区之外唯一进入发病率前 10 的省份，其边境管控的疏漏早有迹象，疫情暴发以来的发病率排序持续上升，2 月上旬即进入全国前 10，可能因其地处偏远、人口基数较小，且邻国俄罗斯的疫情信息发布迟缓，导致该省受到国外疫情的影响显著。

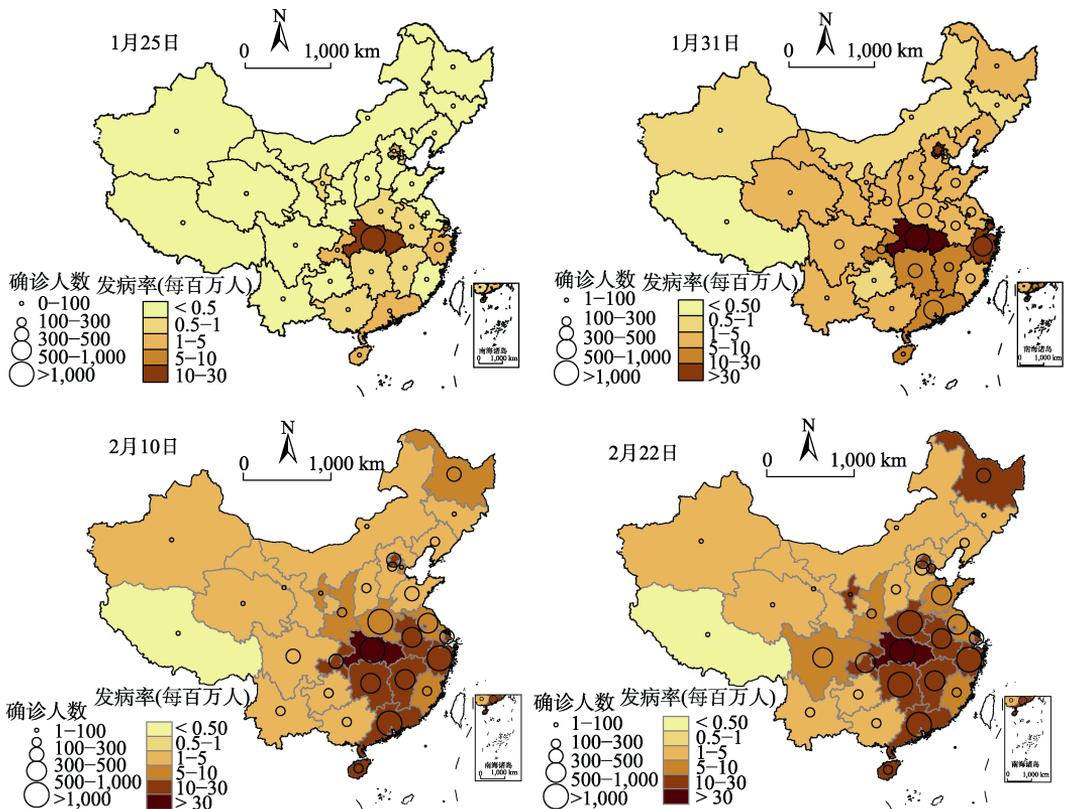


图 3 中国发生的新冠病毒肺炎疫情空间格局的阶段特征对比图

(注：本图基于 GS(2019)1831 号标准底图制作，底图无修改，下同)

利用各省全部病例确诊日期到起始日的平均天数，得到相应的各省平均确诊日，可以看出各地疫情发展动态的整体特征及全国疫情格局变动的规律性。图4的结果展现出如下特征：首先，各地疫情发展动态具有高度同步性，几乎所有省份的病例平均确诊时间都在2月上旬，尤其集中在3-5日，这与图2显示的分圈层规律相吻合，也即这种同步性规律不仅反映在各圈层之间，也发生在大多数省份，体现了全国一体化的防控策略及其有效性。其次，湖北周边邻接省份的平均确诊时间高度一致，只有与湖北联系最为紧密、防控措施最为严格的湖南省及疫情状况一直相对较轻的陕西省比其他四省市略早一天。再次，二级邻接和其他省区没有表现出明显的圈层特征，但省际差异非常明显。其中疫情整体偏早的省份包括两类：一是暴发最早、防控最早且非常严格有效的浙江省，类似的北京、上海、广东的防控效能低于浙江，但相对于前期暴发的严重性而言，这些省市后期新增确诊病例并不多，因此整体发病节奏也较早；二是与湖北和武汉联系较少、疫情一直相对并不严重的福建、辽宁、青海、西藏、甘肃等省区。疫情控制最晚的省份普遍距离湖北较远，且原因各异：贵州和新疆疫情一直并不严重，只是与湖北联系较少，病例的增加更多来源于其他省份的输入，因此节奏较晚；河北和山东的防控效果一直比较滞后，且山东省在2月20日一次性爆出监狱200个案例，导致其平均发病时间大幅推迟，也间接反映了该省防控的疏漏；黑龙江的情况则如上所述，跨境输入病例在2月上旬和中旬持续增加，暴露出防疫的薄弱环节。

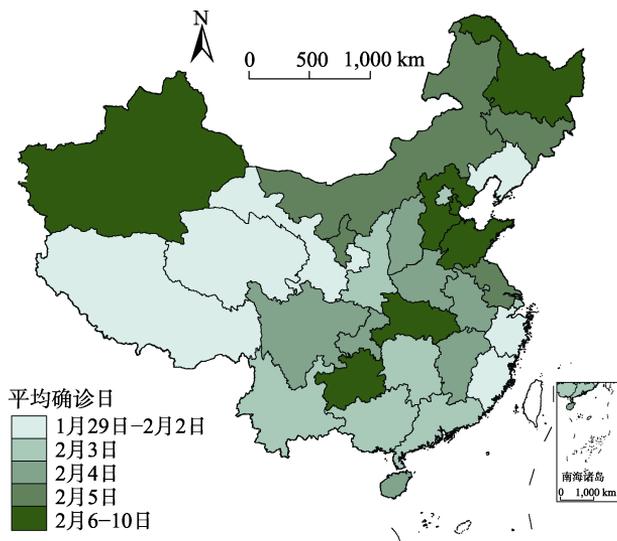


图4 中国各省新冠病毒肺炎患者的平均确诊日期

5 人口流动模式对疫情空间动态的影响

在确诊病例的空间格局分析中，我们观察到跟武汉的空间距离与确诊人数及发病率之间的相关性并不强，意味着其他因素可能在病毒传播中起到了更重要的作用。实际上，与多数传染性疾病类似，新型冠状病毒的快速、大范围传播主要途径还是人际传播，疫情中心与各地之间的人员往来则是各地疫情状况的关键因素。值得注意的是，人员流动有很多

种形式，既包括长期的外出务工经商，也包括短期的商务、旅游、探亲等，长期或短期流动者内部同样存在一些群体差异，不同人群的流动行为对疫情传播的影响强弱和模式不同，需要分别考察。此外，在疫情暴发初期，新冠肺炎病毒已经广泛传播到湖北省内各地，因此不应仅考虑各地与武汉的人员联系，而应将视野拓宽到湖北全省。

5.1 常住湖北的流动人口

新冠疫情暴发之时正值春节，长期外出务工的流动人口回乡过年可能是疫情扩散到各地的重要途径。图5展示了各省户籍人口中流动到武汉和湖北其他市州的人数与该省累计确诊人数的关系。首先，各地与武汉及湖北其他市州的长期人口联系对该地疫情状况均具有很强的解释力，两组相关系数均在0.59左右，高度相关，证实了仅关注武汉将不足以解释人口返乡过节对疫情传播的影响。其次，人口流动迁移对空间临近性的偏好是疫情空间分布圈层格局的主要形成机制。一方面，湖北周边的河南、湖南、安徽、江西、重庆等省市是武汉和湖北省流动人口的主要来源地，这种紧密的人口联系导致了邻接圈层疫情最为严重；另一方面，距离湖北省最远的吉林、宁夏、内蒙古、西藏、青海等地区疫情最轻也是因为这些地区与武汉和湖北各市州的人员联系向来不多，传播途径有限。最后，广东、浙江是偏离拟合线最严重的省份，说明流动人口总量的解释力仍然不足，流动人口内部结构或短期人员流动的影响同样不容忽视。

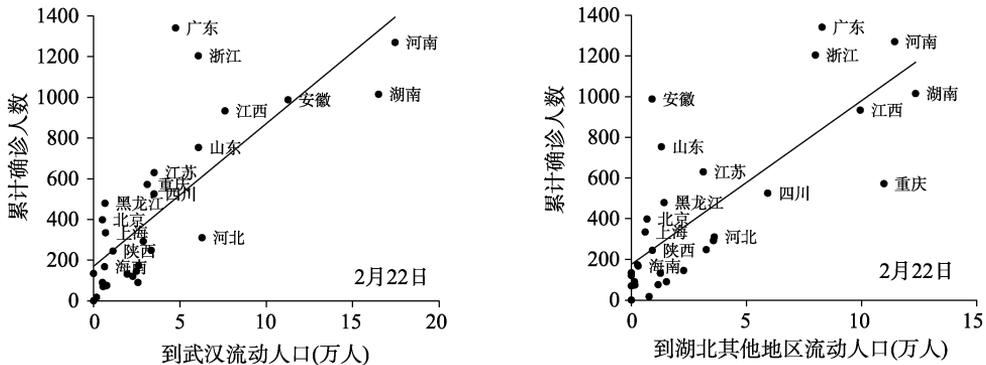


图5 各省到武汉和湖北其他地区的流动人口与确诊人数的关系

5.2 长期在鄂的经商人员

虽然广东、浙江的户籍人口长期居住在武汉或湖北其他市州的数量少于湖北周边的湖南、江西、安徽等省，但疫情却比后者更为严重。这种错位促使我们进一步考察了人口迁移流动的原因构成，发现温州、台州等地的浙江人到武汉、湖北其他市州的务工者较少，经商者更多。我们从国家卫健委开展的全国流动人口动态监测调查数据中找到了证据（图6）。流动到湖北的浙江人中，57.4%经商，22.9%务工，二者之比为2.51；而湖北所有流动人口的经商和务工比重分别为36.2%和43.0%，二者之比仅为0.84；广东来鄂的经商者和务工者之比为1.60，也是其他地区来鄂人员的2倍，且家庭化迁移的比例更高。虽然来鄂务工者和经商者均为长期在鄂的流动人口，但与以务工为主的流动人口相比，这些经商者虽然绝对规模不大，但对疫情扩散的影响却远高于务工者。一方面，经商者在疫情暴发地

更容易广泛接触当地人口，被感染的概率很高；另一方面，经商者回到老家后的本地流动性更强，走亲访友的次数多、范围广，因此其传染力也远高于务工人员。通过对长期在鄂的流动人口进行分解分析，能够为广东和浙江这类在鄂人口规模不大、疫情却最早暴发也最为严重地区的新病毒传播机制提供有效解释。

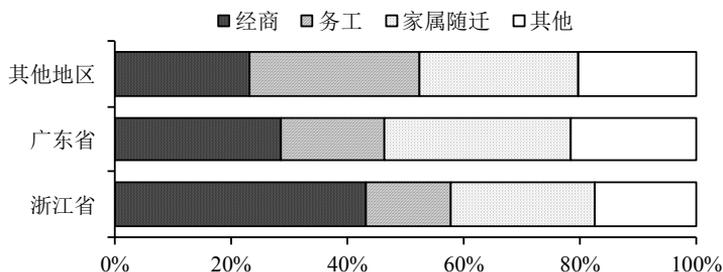


图6 各地户籍人口到湖北的流动原因构成对比图

5.3 短期商务旅游人员

在人口流动因素中，除了长期务工经商者的返乡流之外，短期的城际商务旅游也是一个不可忽视的因素。我们选用各省星级饭店从业人数和铁路客运量表征商务和旅游的人流强度，考察其与确诊人数的关系，同样发现了显著的线性相关关系，相关系数分别达到0.45和0.60，与长期人口流动迁移的影响程度非常接近（图7）。因此，疫情暴发地与全国各地的旅游和商务往来应该是导致病毒扩散的另一个因素。其中广东最为典型，尽管上面看到广东到武汉市和湖北省的流动人口规模并不突出，长期在鄂人口中的经商者比例也低于浙江，但是确诊人数却很多，其商务旅游中心的地位在疫情传播过程中起到了很大作用，是短期人员流动带动疫情传播的典型案列。

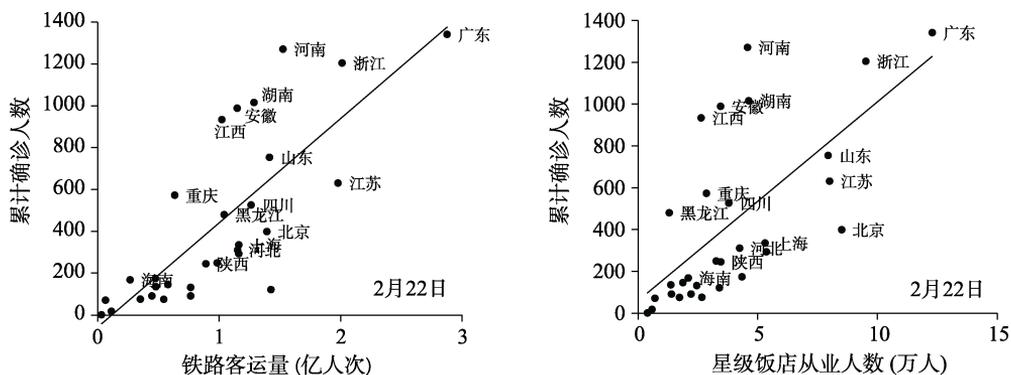


图7 铁路客运量和星级饭店从业人数与确诊人数的关系

5.4 各类人口流动对疫情影响的阶段性

上述各类长期或短期人口流动与疫情传播的关系具有稳定性和动态性（图8）。首先，长期和短期人口流动对疫情传播具有相似的解释力，两组指标与各地累计确诊人数的相关系数非常接近，在疫情传播机制分析中不应偏废。其次，各地与武汉人口联系对其疫情状

况的解释力持续上升，但与湖北其他市州人口联系的影响则保持稳定，后者的总体解释力甚至强于前者，可见初期湖北省内疫情传播几乎没有得到有效控制，但从武汉回乡的长期务工经商者则经历了相对较长的潜伏期，这可能与武汉疫情的严重性有较大关联。此外，到武汉距离对疫情分布格局的解释力始终低于各种人口流动指标，可见空间距离背后更重要的是地区间的人员交流。最后，城镇化水平对各地确诊人数的影响一直很小，且在不断降低，则反映了全国各地普遍有效控制了病毒的本地化传播，并未出现人口居住形态越密集、疫情传播越严重的情况。

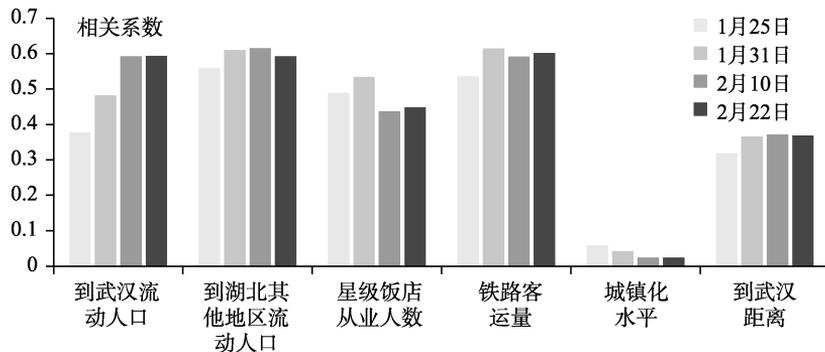


图8 人口相关指标与各地疫情相关性的变动对比图（2020年1月25日至2月22日）

6 政策分析：以湖北各市州为例

各地对人口城际和城内流动的有效管控是我国新冠病毒肺炎疫情迅速得到控制的关键原因，但这种管控的力度和有效性仍然具有地方差异。我们对武汉及湖北各市州的人口流动管控政策进行了梳理和分析，一方面能够解释这些疫情严重地区的防控措施与本地疫情状况的关系，另一方面也能进一步解释上述人口从湖北流动到其他省市导致的全国性疫情时空动态。

6.1 武汉市防控政策与疫情动态

从防控不力到严格有效管控并逐渐控制疫情，武汉的防控政策一直受到全国高度关注，也是各地疫情防控政策的重要参考。根据时间线梳理相关重大事件，能够总结疫情防控过程的关键时点和防控策略转变；与武汉市疫情曲线的对照分析则能够进一步评估疫情防控的得失，为公共卫生事件应对提供参考。

第一个政策关键期在于1月20–23日。以科学态度直面疫情，以武汉封城为关键节点，迅速形成全面抗疫的高度共识。1月19日之前，民众防护意识不强。1月20日，钟南山院士公开宣布新型冠状病毒感染的肺炎肯定存在人传人现象，社会各界开始警觉；当日，习近平主席做出重要指示，要把人民群众生命安全和身体健康放在第一位，制定周密方案，组织各方力量开展防控，采取切实有效措施，坚决遏制疫情蔓延势头。国家卫健委发布2020年第1号公告，将新型冠状病毒感染的肺炎纳入《中华人民共和国传染病防治法》规定的乙类传染病，采取甲类传染病的预防、控制措施，并自即日起每天汇总发布各省发布新增

病例数量；武汉市也成立新冠肺炎疫情防控指挥部。1月23日，机场、火车站等离汉通道关闭，武汉封城，以前所未有的强力手段控制疫情传播；同日，武汉市决定建立火神山医院。更重要的是，最高层的政治决策、顶级医学专家的科学论断、主管部门的信息公开态度达成了一项关键效果：促使各级政府和社会各界迅速形成全面抗疫的高度共识。事实证明，这种全民共识的凝聚对疫情防控至关重要。

第二阶段的核心工作是建立科学有效的疫情防控体系，耗时约两周，即1月24日至2月6日。事后总结可以发现，聚焦传染病防控的三大任务的实施是很有效的，即收治隔离患者、切断传播途径、保护易感人群，逐步建立了科学有效的疫情防控体系。具体而言，在患者的收治隔离方面，在火神山医院的基础上，1月25日决定建立雷神山医院，二者分别于2月4日和8日正式启用；1月24日，首批军队和省市医疗队出征武汉，之后各省陆续支援以保障武汉收治能力；2月2日，湖北宣布将集中所有疑似病例，并对拒绝配合隔离者强制执行；3日，武汉建立“方舱医院”，用于收治轻症患者，并于2日后正式启用。在切断传播途径方面，1月23日，武汉各种客运交通暂停运营；26日，中心城区实行机动车禁行管理；相应地，2月2日，驻鄂部队开始承担武汉市民生活物资配送供应任务。在保护易感人群方面，2月4日，武汉市建立起132个隔离点；2月6日，武汉开展全民体温监测工作。

疫情防控体系的快速建立得益于中央的高度重视，习近平多次开会研究部署疫情防控工作，党中央于1月25日成立应对疫情工作领导小组，组长李克强总理2日后即亲赴武汉考察指导。疫情防控体系的快速建立更得益于决策者对科学的高度尊重，几乎所有举措都有足够的科学基础和针对性，保证了疫情防控体系的有效性。疫情防控体系的快速建立还得益于全社会的信任和支持，来自各地的医疗队、建筑队与武汉市民并肩应对，使得各项举措均能得到有效实施。

第三阶段的政策重点在于完善防控措施、稳定社会秩序，持续时间也是2周左右，至2月19日。一方面，以持久战的方式严格执行并不断完善防控体系。2月7日，国家卫生健康委宣布了新的救助模式，16省“一省包一市”，从“统一调度”向“对口援助”转变，充分发挥地方政府的积极性和创造性；10日，16省增加为19省。2月11日，全市住宅小区实行封闭管理，并于16日扩展到所有城乡社区；17日，制定严格公共场所关闭管理措施。另一方面，积极回应社会关切，稳定社会情绪和秩序。2月7日，李文亮去世当日被做出工伤认定，国家监察委员会赴武汉市作全面调查；2月8日和13日，分别对湖北省和武汉市主要领导进行调整，进一步的疫情排查、建院增床等工作更加顺利，中旬后期已经做到“床等人”，标志着疫情防控跑赢了扩散。

第四阶段自2月下旬开始，政策已趋完善，疫情稳定趋缓，3月初即开始社会秩序恢复工作。3月8日，湖北除武汉市外新增确诊和疑似病例双清零；十天后，全省新增确诊首次清零并极少反复。11日，湖北省开始实施分区分级差异化防控，企业分类分时有条件复工复产；17日，各省医疗队陆续撤离湖北；25日，武汉市以外地区解除离鄂通道管控措施；4月8日，武汉解除离汉离鄂通道管控措施。4月26日，武汉在院新冠肺炎患者清零。

5月中下旬，武汉全市990万人进行了核酸检测，无确诊病例。

武汉的新冠病毒肺炎疫情曲线反映了上述防控政策的关键作用（图9）。首先，早期突如其来的新冠疫情造成的感染群体，对医疗系统形成了重大的压力，救治系统、社会舆情一度出现恐慌情绪。应对疫情，防控政策的科学性和系统性是武汉疫情得以及时控制的根本保证。1月下旬至2月上旬的一系列针对流行病学基本原理的系统性政策，使得传染源、传播路径、易感者同时得到了控制，出现之后两周之内完全控制疫情，确诊病例快速下降的局面。此外，防控系统建立之后的持续完善和一直坚持控制了疫情传播链的延伸，没有出现社会聚集性感染和疫情的二次峰值。最后，社会和医疗体系的良性互动至关重要。社会信任得以快速重建，保证了社会稳定和全民支持；医疗和传染病防控系统也实现了快速反应，二者相互支持、互为保障，也是武汉乃至全国疫情防控成功的重要原因。

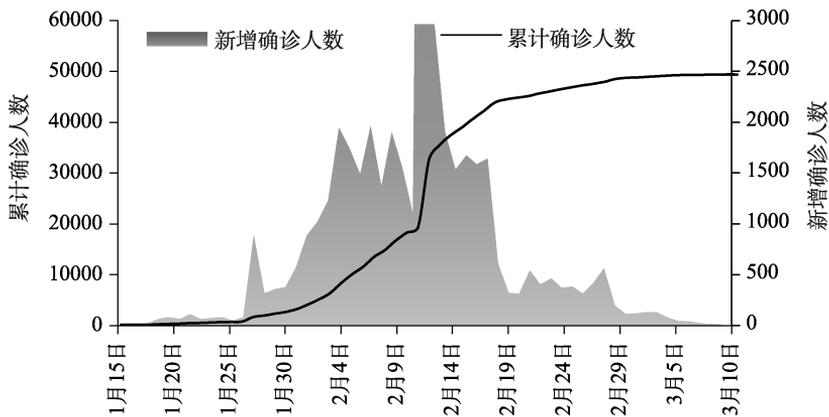


图9 武汉市疫情动态曲线图（2020年1月15日至3月10日）

6.2 湖北各市州应对策略与疫情差异

与武汉和国内其他地区类似，湖北各市州在应对疫情上采取的措施大体都是限制人员流动（封城封村）、大范围排查、隔离收治等几类。但各城市的控制效果却差异明显，市级层面上采取措施的时间、执行力度、执行强度以及因地制宜的后续政策是解释疫情防控效果差异的关键因素。

截至4月26日武汉在院患者清零，湖北省内各市州累计确诊人数占户籍人口的比例即发病率如图10所示，武汉市每万人中发病人数为53.5人，排在第二的是鄂州市，每万人有12.4人感染，第三位是孝感市，鄂州和孝感都是紧邻武汉的城市。而排在最后三位的分别是：潜江市（1.9人/万人），神农架区（1.4人/万人），恩施州（0.6人/万人）。神农架区地处深山，人烟稀少，感染率低在情理之中，但是潜江作为一个距离武汉只有150 km、交通便利、人口稠密的城市，发病率排在倒数第三，用跟武汉之间的人口流动、经济往来等一些指标很难解释。恩施州虽然离武汉距离远，并且以山区地形为主，但也是省内人口超400万的六市州之一，在武汉务工的人数达10万人。防控措施上的差异则可能是发病率差异的一项重要原因。

湖北省内对疫情的强力控制从封城开始，各地普遍实行，但时序有所差异。武汉“封城”的次日，即1月24日，湖北全省启动重大突发公共卫生事件一级响应，同日，荆门、咸宁、黄石、恩施、孝感、宜昌、随州与十堰等市纷纷宣布“封城”。5天后，襄阳于1月28日起，暂停运营市内所有的渡口渡船、旅游客船，成为最后的“准封城”者，至此整个湖北基本全面封锁。

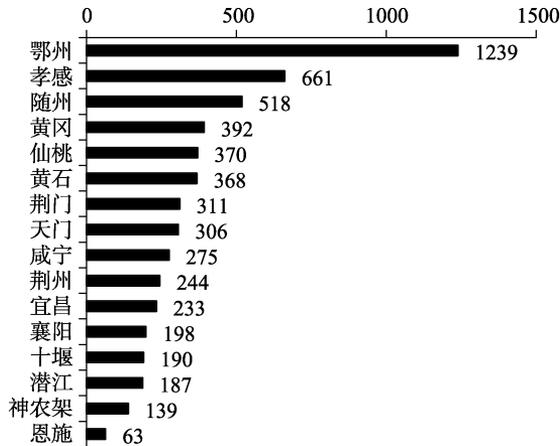


图10 除武汉外湖北省各市州新冠病毒肺炎发病率（每百万人）对比图

实际上，早在1月17日，潜江就第一时间封城，并实行禁足令，要求民众居家隔离，同时还及时收治病人、尽早隔离。正是这几项快速的、有力的措施，潜江的疫情防控成效显著，是武汉周边感染发病率最低的城市，也是全省疫情最轻的城市之一。在疫情后期，潜江市又率先实行“清零”行动，于2月27日采取经济措施激励潜在人员主动报告，保证及时收治，成为湖北最早实现无新增和确诊清零的城市之一。

恩施州的感染率和病死率之低均位居全省前列。全州2017年户籍人口401万，仅有252人感染新冠肺炎，7人死亡，这在很大程度上也得益于警觉度高、治疗和防控措施得力。湖北省2018年城镇化率是60.3%，而恩施州仅为44.9%，这也意味着农村的疫情防控尤为重要，加上春节农村村民之间相互串门、拜年是传统习俗，阻止疫情在农村传播就面临更大挑战。笔者在疫情期间一直滞留恩施州，现场观察发现，当地城乡社区一级的人员流动和疫情管控严格而有效，尤其在乡村地区，以村为单位的宣传、排查、人员出入管控措施都得到了严格执行。恩施州重视疫情防控政策的动态调整和配套政策的制定实施，比如对各村进行全封闭管理的同时，由镇统一配送生活物资；从购买感冒药登记到全州售卖咳嗽、发烧等有关的感冒药品。此外，在地方公共卫生管理上，恩施卫健委主任的医学背景可能也是相对于其他城市的优势。

相比之下，黄冈在前期的应对疫情表现上可以用“慢半拍”来形容，公共卫生管理系统反应迟缓、对疫情的严重性认识不足，错过最佳的防疫期。黄冈在早期的发病率在湖北省内除了武汉外高居榜首，2月2日成为除武汉外全国第二个确诊病例数破千的城市。当然，后期工作进入正轨后，疫情也逐渐控制下来，但依然有较高的感染率。

7 讨论与结论

基于全国各省每日疫情数据,本文分析了我国新冠病毒疫情传播的时空动态并,考察了人口流动模式对疫情传播的异质性影响,并以湖北省各州市为例分析了疫情防控政策的差异性与有效性。研究发现,(1)疫情的空间格局动态并非邻接扩散主导下的核心外围结构,而是多种空间模式混合的结果,反映了疫情传播的多种因素和动力。疫情暴发阶段以跃迁式扩散为主,而后才出现明显的邻接式扩散,两种扩散模式的结合推动疫情达到高峰,在逐步平息之时形成了京津沪浙粤等高度发达地区、湖北周边省份、人口大省等三类疫情热点区,且东北边境地区的输入病例风险也早有预兆。(2)空间距离与疫情的关联性不高,主要通过人口流动影响疫情格局。长期在鄂务工者、经商者的返乡流与短期商务旅游流对不同地区、不同阶段的疫情发展具有异质性影响,将人口的结构性和疫情的时空动态分析相结合才能有效解释疫情的扩散机制和调控效果。(3)对湖北各州市防控政策与疫情动态的差异性分析表明,防疫政策的及时性、科学性、系统性、持续性缺一不可,而信任支持下的社会稳定和全民参与同样不可或缺,医疗卫生和社会治理体系的良性互动是疫情防控成功的关键所在。

上述结论也引发我们的诸多思考:首先,简单直观的疫情地图展示与严谨深入的时空动态分析有本质区别,后者需要地理学者的专业分析,不仅能够发现总结疫情传播的特征和规律,更能对疫情传播机制和防控政策效果产生直接的深刻认知,体现地理学空间分析的学科优势。

其次,人口流动带动病毒传播是疫情扩散的基本路径,科学研究不应停留在这种简单的相关关系,只有深入剖析人口流动的结构性和特征才能真正理解疫情扩散的机制、解释疫情的时空动态。其中尤其重要的是区分长期永久的人口流动迁移和短期日常的商务旅游人流,前者只有春节返乡的特定时间才会影响疫情传播,只有人口主要流入地和流出地才会有严重影响,而后者的影响则可能发生在任何时间、任何地点。相应地,务工经商的流动人口不应作为疫情防控的重点人群,更不应因此受到制度或社会的排斥,日常商务旅游人流才是公共卫生事件应急体系建设中需要关注的重点群体。

最后,本文利用大数据分析疫情的时空动态,利用统计数据 and 调查数据对其开展了有效的解释,可以看作大数据和传统数据相结合的一种尝试。实际上,笔者的相关研究也发现,利用百度迁徙等大数据对疫情动态的解释力并不优于传统数据。相对而言,前者具有更高的时效性,有利于时空动态的分析;而后者的指标更为丰富,能够支持人口流动的结构性和分析,对疫情动态的解释更为深入^[17]。疫情分析的案例充分表明,大数据和传统数据并无优劣之分,更不互相排斥,二者的深度融合、优势互补对于社会科学的研究更为重要。

作者分工:刘涛、靳永爱对数据集的开发做了总体设计;肖雯、陈家醇、刘涛采集和处理了疫情数据;刘涛、靳永爱设计了模型和算法;刘涛、陈家醇、靳永爱撰写了数据论文等。

参考文献

- [1] Chen, S. M., Yang, J. T., Yang, W. Z., *et al.* COVID-19 control in China during mass population movements at New Year [J]. *The Lancet*, 2020, 395(10226): 764–766. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30421-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30421-9).
- [2] 杨冕, 谢泽宇. 新冠肺炎疫情防控对中国人口流动的影响——基于百度地图迁徙大数据的实证研究[J]. *人口研究*, 2020, 44(4): 74–88.
- [3] Shi, Q. J., Liu, T. Should internal migrants be held accountable for spreading COVID-19? [J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2020, 52(4):695–697. <https://doi.org/10.1177/0308518X20916764>.
- [4] 欧阳桃花, 郑舒文, 程杨. 构建重大突发公共卫生事件治理体系: 基于中国情景的案例研究[J]. *管理世界*, 2020, 36(8): 19–32.
- [5] Sirkeci, I., Yucesahin, M. M. Coronavirus and migration: analysis of human mobility and the spread of Covid-19 [J]. *Migration Letters*, 2020, 17(2): 379–398. <https://doi.org/10.33182/ml.v17i2.935>.
- [6] 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.
- [7] Zhou, C. H., Su, F. Z., Pei, T., *et al.* COVID-19: Challenges to GIS with big data [J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.005>.
- [8] Qiu, Y., Chen, X., Shi, W. Impacts of social and economic factors on the transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in China [J]. *Journal of Population Economics*, 2020, 33(4): 1127–1172. <https://doi.org/10.1007/s00148-020-00778-2>.
- [9] 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.
- [10] Jia, J. S., Lu, X., Yuan, Y., *et al.* Population flow drives spatio-temporal distribution of COVID-19 in China [J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 389–394. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2284-y>.
- [11] Shi, Q. J., Dorling, D., Cao, G. Z., *et al.* Changes in population movement make COVID-19 spread differently from SARS [J]. *Social Science & Medicine*, 2020, 255: 113036. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113036>.
- [12] Dowd, J. B., Andriano, L., Brazel, D. M., *et al.* Demographic science aids in understanding the spread and fatality rates of COVID-19 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(18): 9696. <https://doi.org/10.1073/pnas.2004911117>.
- [13] Fang, H. M., Wang, L., Yang, Y. Human mobility restrictions and the spread of the novel coronavirus (2019-nCoV) in China [J]. *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*, 2020, No. 26906. <https://www.nber.org/papers/w26906>.
- [14] Yang, Z. F., Zeng, Z. Q., Wang, K., *et al.* Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, 12(3): 165–174. <https://dx.doi.org/10.21037%2Fjtd.2020.02.64>.
- [15] 刘涛, 靳永爱, 肖雯. 2020.1.19–2.22 期间中国人口流动影响下的 COVID-19 时空格局与防控效果分析数据集[J/DB/OL]. *全球变化数据仓储电子杂志*, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.20.V1>.
- [16] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [17] 刘涛, 靳永爱. 人口流动视角下的中国新冠疫情扩散时空动态——传统数据和大数据的对比研究[J]. *人口研究*. 2020, 44(5): 34–49.