

· 疫情预警与防控 ·

## 新冠肺炎疫情的复杂性特征与分析研判

曹志冬<sup>1, 2, 3</sup>

曾大军<sup>1, 2, 3\*</sup>

张清鹏<sup>4</sup>

王月娇<sup>1, 2</sup>

1. 复杂系统管理与控制国家重点实验室/中国科学院自动化研究所, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 深圳人工智能与大数据研究院(龙华), 深圳 518110
4. 香港城市大学, 香港特别行政区 999077

**[摘要]** 新冠肺炎疫情已成为近百年来人类面临最严重的公共卫生危机。在这场遭遇战中, 课题组自疫情初期就参与了科技抗疫工作。本文论述了疫情传播流行的复杂性特征, 概要阐述了课题组参与新冠肺炎疫情应急保障的主要研究工作, 包括新冠肺炎传播特征与危害性评估、武汉封城前爆发规模及流向全国各地数量预测、国外疫情形势分析及北京新发地聚集性疫情分析研判。

**[关键词]** 新型冠状病毒肺炎; 复杂性; 疫情分析; 形势研判

21世纪以来, 中国经历了三场重大突发公共卫生危机: 2003年的SARS疫情、2009年的甲型H1N1疫情和2020年的新冠肺炎疫情。每一次危机都推动了中国公共卫生应急管理体系的跨越式发展。非典疫情后, 中国迅速建立起传染病网络直报系统, 建立了全球最庞大的生物监测体系<sup>[1, 2]</sup>, 在抵御人禽流感疫情、H7N9疫情、MERS和Ebola入侵方面发挥了巨大作用, 在国家生物安全方面为中国争取到了十多年的稳定发展期<sup>[3]</sup>。

生物监测体系是保障生物安全的重要基础和必要前提, 但不是充分条件。庞大的传染病监测数据不会自动给出疫情态势风险与预测预警结果, 传统的公共卫生统计分析方法也不足以解析不同时空区域异质分化的疫情动态演化过程, 因此, 中国亟需创新科技手段以增强国家应对重大疫情危机的应急管理。针对这一国家重大需求, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中明确提出“新发突发传染病防治”的重点领域<sup>[4]</sup>, 国家科技重大专项“艾滋病和病毒性肝炎等重大传染病防治”、国家科技重点研发计划“生物安全关键技术研发”、国家自然科学基金委员会重大研究计划“非常规突发事件应急管理研究”均布局资助了一批项目, 以推



**曹志冬** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员。研究方向: 公共卫生应急管理、社会计算与大数据。



**曾大军** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任、研究员。研究方向: 大数据、分布式人工智能与安全信息学。

动国家应对重大突发公共卫生危机的能力建设。在国家资助下, 地理信息科学、计算机科学、复杂系统科学、管理科学、认知心理学等交叉学科逐步引入流行病学研究<sup>[5-8]</sup>, 大数据和人工智能驱动的传染病研究开始得到重视<sup>[9]</sup>。很多学者以一种有别于传统疾控体系的新视角来重新审视、探索和挖掘突发公共卫生事件的系统性、复杂性、高不确定性等内在机理<sup>[10]</sup>, 在科学思维底层突破传统的“预测—应对”方法, 建立“情景—应对”型公共卫生应急管理的创新研究方法<sup>[11-13]</sup>, 由此推动了多学科交叉的公共卫生应急管理发展。

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-11-26

\* 通信作者, Email: dajun.zeng@ia.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(72025404、72042018和71621002)和北京市自然科学基金项目(L192012)的资助。

过去一百年来,随着人类科技的突飞猛进,人类在与病毒的斗争中取得了巨大成绩,一些亘古以来就存在的病毒接连被消灭。1979年,世界卫生组织(WHO)宣布天花已在全世界被彻底消灭<sup>[14]</sup>。2019年,WHO宣布Ⅲ型脊灰野病毒已在全球范围内被消灭<sup>[15]</sup>。人类似乎可以决定性地征服地球上的其他一切生命形态,然而,新冠肺炎疫情的突然爆发与全球大流行,再一次证明人类与病毒的斗争是一个永恒命题。

新冠肺炎疫情是新中国成立以来传播速度最快、感染范围最广、防控难度最大的一次重大突发公共卫生事件<sup>[16]</sup>,也是近百年来全球最严重的重大公共卫生事件<sup>[17]</sup>。在这场没有硝烟的遭遇战中,由于新冠肺炎病毒是一种新型病毒,科学认知处于空白状态,中国疫情早期防控处于被动状态,亟需快速及时地掌握新冠病毒的传播特征<sup>[18, 19]</sup>、传播途径<sup>[20-22]</sup>、总体危害性<sup>[23-25]</sup>、时空传播扩散模式<sup>[26-29]</sup>等流行规律。在高时效性的前提下,基于有限的疫情监测数据,利用计算分析模型科学评估疫情总体危害性,把握疫情动态风险变化,研判疫情形势,预测疫情发展趋势,是保障国家疫情应急决策的重大需求。

### 1 疫情传播流行的复杂性特征

疫情(本文所指疫情是针对呼吸道等通过人际

近距离密接传播的传染病,不包括通过虫蚊传播的传染病)本质是病毒在时空人群中传播感染的链式反应过程,从而使得病毒拥有无限扩张的能力,其危害性不仅在于既有感染的病例规模,更在于病毒人际传播的繁殖能力,其防控关键不限于医院收治感染病例,更在于及时发现社区中隐藏的潜在感染者。由于病毒暴露感染风险的个体差异性 & 人与人密切接触行为的异质性,疫情在不同时空区域人群中的动态传播流行高度不确定,是一个典型的复杂巨系统。下面以新冠肺炎疫情为例概要阐述疫情传播流行的复杂性特征。

基于中国—世界卫生组织新型冠状病毒肺炎联合考察报告<sup>[30]</sup>,对2019年底至2020年初中国新冠肺炎疫情爆发过程进行复盘,从“暴露—发病—确诊”三个时间维度来看整个流行过程,见图1。暴露时间指病毒侵入人体从而导致感染的初始时间,发病时间指感染病例出现发病症状的时间,确诊时间指核酸检测呈阳性从而确认被感染的时间。潜伏期是指从暴露到发病的时间长度,新冠病毒的平均潜伏期约为5天<sup>[31]</sup>。一般情况下,暴露时间是很难被追溯的,除非感染病例只有唯一暴露史,实际中具有唯一暴露史的病例只占很少数量,大多数病例具有多个病毒暴露史。故图1中的暴露时间曲线是通过发病时间减去平均潜伏期估计得到。发病时间和确

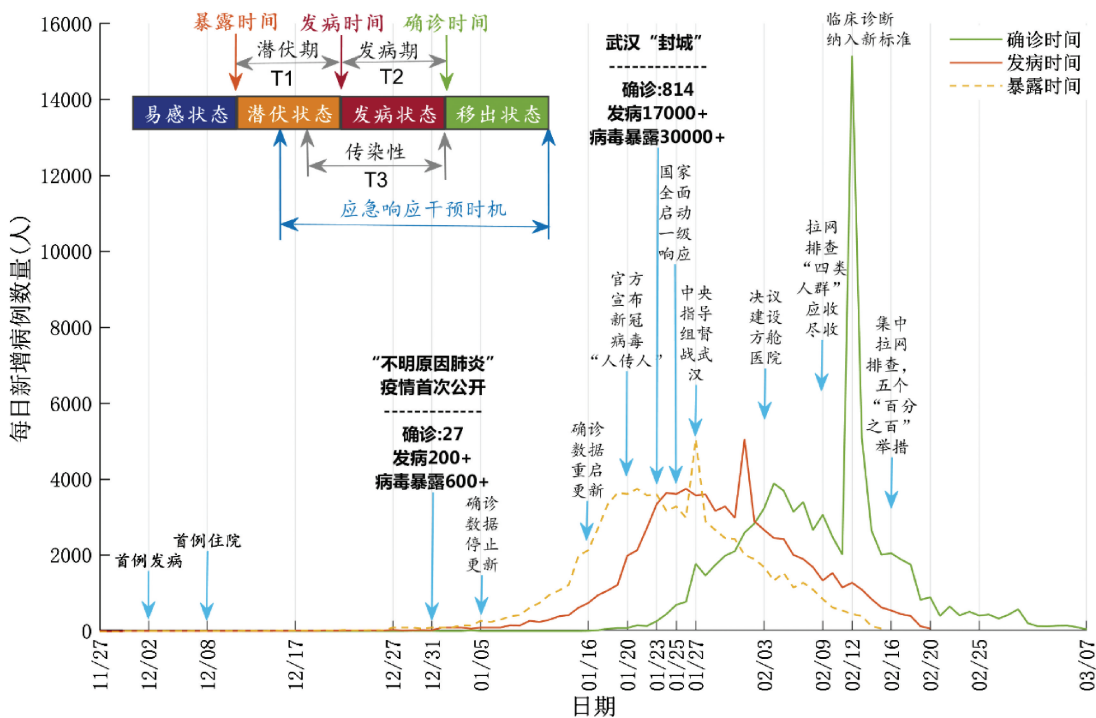


图1 中国新冠肺炎疫情传播流行过程

诊时间来自联合考察报告。

2019年12月31日,武汉卫健委公布《关于报送不明原因肺炎救治情况的紧急通知》时,累计确诊病例为27例,但出现症状的发病人数有200多人,病毒暴露过的潜在病例可能超过600人。2020年1月23日,武汉封城时,卫健委报告累计确诊病例814例,但出现症状的发病人数约1.7万,病毒暴露过的人群可能高达3万,大量潜在病例已通过春运人流输入全国各地,新冠病毒已扩散到全国一半的区县<sup>[22]</sup>。为什么疫情传播流行的真实风险与我们的直观感受相差如此之远? 主要因为疫情传播流行是一个高度复杂的动力学系统,它具有如下典型特征:

(1) 指数增长:一传十、十传百的病毒感染增殖过程是一个指数系统,感染规模随时间而指数增长,增幅以既有存量总规模为基础进行跃升。由于初始传播源数量稀少,故早期增长速度相对缓慢,但存量病例积累到一定规模后,迅速进入大规模爆发期。在新的增幅扩张面前,过去一切累积都将迅速变得渺小。这也是为什么在如今国外疫情增幅面前,中国全部新冠确诊病例数量似乎特别渺小的原因。疫情感染规模的指数增长方式意味着时间是疫情防控的决定性因素,早发现、早报告、早隔离、早治疗的“四早”措施是疫情防控的关键。

(2) 非线性:指数增长速度是极为惊人的,当病毒进入大规模爆发状态后,如果继续任其不受控制的自由传播,理论上会很快导致全球所有人口感染,感染者规模从一百万到十个亿与从一个病例到一千个病例所经历的时间长度基本一样。然而,实际中病毒传播不仅受到感染者的影响,而且受到易感者的影响。随着疫情扩散蔓延,感染者数量不断增多,对下一代感染者数量形成正反馈作用,同时易感者数量不断降低,对下一代感染者数量形成负反馈作用。于是,在非人为干预作用下,疫情传播流行在正负反馈的双重作用下非线性动态演化。当正反馈作用强于负反馈作用时,疫情处于流行状态,疫情会进一步加重;当正反馈作用弱于负反馈作用时,疫情将逐步缓和。隔离感染者就是为了消减正反馈作用,疫苗接种就是通过减少易感者数量来增强负反馈作用,通过正负反馈作用强弱对比的易位,达到有效遏制疫情的目标。

(3) 混沌性:初始条件对疫情传播流行过程影响巨大,一个微小扰动可能导致截然不同的疫情结局。即使知道目前一切疫情数据,掌握一切疫情知

识和规律,也只能在一个有限时间范围内对未来发展状态进行科学预测,随着时间延长,预测精度迅速下降,长时间的疫情精准预测是不现实的。可以说,疫情传播流行本质上和天气系统类似,是一个混沌系统。天气预报只能针对未来1~2周进行科学预测,而不能延伸到未来1~2年,而且需要不断将最新天气监测数据融合进预测模型从而滚动预测,疫情预测亦是如此。疫情传播系统的混沌性,意味着长期预测只能是基于特定约束条件的情景推演,不是真正的精准预测。例如,哈佛大学预测新冠肺炎疫情未来五年都将周期性地爆发流行,这不是精准预测,而是将周期性流感模式同化到新冠肺炎疫情爆发中的情景推演,只是未来可能出现的某种情景<sup>[32]</sup>。

(4) 涌现性:尽管疫情传播流行是如此复杂且高度动态变化,但其基本构成却又极其简单——感染者通过某种传播途径导致易感者成为新的感染者。一个简单的病毒复制规则,在大规模时空人群中反复迭代后,可以导致幻化万千的复杂疫情情景。这种从简单规则到复杂现象的内在机制和机理,无法通过还原论方法重现,而只能通过涌现观察分析推断,即观察分析特定环境中的大量个体在简单规则下互相作用后的群体行为。

疫情传播流行过程不是机械系统,而是病毒通过人与人密切接触进行链式反应的复杂巨系统,其传播扩散过程既受到病毒的生物学特性(传染性、潜伏期等)的影响,也受到气温、湿度等外部环境的影响,更加受到人与人的群体性聚集与密切接触等社会行为的影响。这三方面影响因素叠加在一起共同作用,因此,疫情动态演化存在高度不确定性。

现实疫情应对中,监测数据非常有限,由于“暴露—发病—确诊”的时间差,国家卫生健康委报告的确诊病例数据存在时间滞后性,对于实时疫情真实传播风险状态的反映严重不足,未知远大于已知。疾控系统普遍采用的公共卫生统计分析方法,主要根据流行病学调查数据挖掘病毒在“时间—空间—人群间”的暴露风险,它只能提供疫情时空传播过程在滞后一段时间后的切片式静态认知,而非疫情传播的即时状态,很难满足高时效性的公共卫生应急管理需求。

如何让疫情防控走在病毒传播前面是公共卫生应急管理亟需解决的重大科学问题。本文认为疫情传播系统是一个复杂系统而非简单系统,需要复杂性思维,从系统性角度对疫情时空传播系统进行整

体性表达和传播动力学建模,推演时空动态演化过程,基于对计算实验分析的涌现观察来把握疫情动态演化规律,利用动力学建模来反演、评估和预测疫情,根据疫情情景推演来优化设计科学防控策略。

## 2 新冠肺炎疫情分析研判

新冠肺炎疫情爆发后,课题组第一时间投入到了科技抗疫工作,综合利用时空大数据分析、传播动力学系统建模、情景模拟计算实验、时空统计计量、断层样本无偏估计等方法和技术,针对新冠肺炎病毒总体危害性、武汉封城前爆发规模、全国各地疫情形势、新发地聚集性疫情形势分析等疫情应急中迫切关注的问题开展了研究,形成了一系列疫情分析研判报告,研究成果为中国的疫情防控决策提供了信息化支撑<sup>[33-36]</sup>。以下概要阐述代表性工作。

### 2.1 新冠肺炎传播的危害性评估

课题组建立传播动力学估计模型得到武汉新冠肺炎疫情早期爆发的再生数  $R=4.08$  (置信区间:  $3.37\sim 4.77$ ),病死率为  $6.5\%$ ,人传人的最早时间可能为 2019 年 12 月上旬<sup>[34]</sup>。为了对比分析,根据北京和广州非典疫情数据,利用同样方法计算得到在爆发性增长阶段北京非典疫情的再生数  $R=2.76$ 、广州非典疫情的再生数  $R=3.01$ ,可见武汉新冠肺炎疫情的传播能力显著强于非典疫情。为了量化评估新冠肺炎病毒的总体危害性,课题组对照武汉市模拟了一个 1100 万易感人口的初始爆发场景,构建了 COVID-19 和 SARS 的人工疫情系统,利用计算实验方法推演出新冠肺炎导致的潜在感染人数和死亡人数都将显著超过 2003 年的非典疫情。

由此,课题组综合利用数据和模型分析得到研究结论:新冠肺炎的传播能力和总体危害性显著高于 2003 年非典,将这一研究结论及时上报,向中国政府进行了早期预警<sup>[33]</sup>。新冠肺炎疫情爆发早期,国内外普遍认为新冠肺炎疫情危害性不会高于非典疫情。当时 WHO 和欧美公共卫生专家的主流观点认为新冠肺炎疫情的再生数为  $1.4\sim 2.5$ <sup>[37]</sup>,中国疾病预防控制中心发表在 *The New England Journal of Medicine* 的论文认为再生数只有  $2.2$ <sup>[38]</sup>。课题组关于新冠病毒传播特征与危害性的早期研究结论与当时主流不符,但实际疫情验证了我们的结论更加科学合理,目前已有很多国际知名流行病学家正面引用并肯定我们的研究结论<sup>[37,39]</sup>。新冠肺炎疫情危害性的准确评估对于中国新冠肺炎疫情早期防控有重要价值和意义。

为了回顾分析新冠肺炎传播的基本特征,课题组系统收集并整理了 106 篇有关中国新冠肺炎疫情传播特性研究的预印本和期刊论文,利用 meta 分析估计得到新冠肺炎的基本再生数  $R=3.18$  (置信区间:  $2.85\sim 3.53$ ),潜伏期为 5.44 天 (置信区间:  $4.98\sim 5.99$ ),感染期为 6.25 天 (置信区间:  $5.09\sim 7.51$ ),病死率为  $4.51\%$  (置信区间:  $3.41\%\sim 6.29\%$ )<sup>[35]</sup>。

### 2.2 武汉封城前爆发规模及流向全国各地数量预测

新冠肺炎疫情爆发时,正值中国春运——全球最大规模的人口流动。1月20日确认出现明显人传人时,全国各地接连发现武汉关联的确诊病例,武汉确诊病例数量也快速增长,国家急需掌握武汉疫情爆发到底已造成多少人感染,以及各地流入了多少病例。1月29日,课题组发现全国主要发病省份和湖北省内主要发病地级市的累计确诊病例数量与 7 天前(当时国家卫生健康委公布的平均潜伏期)从武汉累计流入的人口数量高度正相关,利用武汉输往全国各地的人口流量可以很好地解释过去一周来中国各地的累积确诊病例增长数量。课题组进一步发现,1月29日全国(除湖北省)的人口感染率(确诊病例除以武汉流入人口数量)为  $0.12\%$  (置信区间:  $0.09\%\sim 0.15\%$ ),具有很好的一致性,近似服从正态分布;湖北(除武汉)的人口感染率为  $0.047\%$ ,武汉市的人口感染率为  $0.025\%$ 。从人口感染率来看,全国(除湖北省):湖北(除武汉):武汉市 =  $4.8:1.8:1$ ,由此推断:武汉存在严重医疗挤兑,检出严重不足,确诊数据失真较为严重。湖北(除武汉)同样存在检出不足问题。相对而言,全国(除湖北省)流入病例数量较为有限,以一省之力来追踪、筛查和检测是比较充分的,确诊病例数据能够较为真实地反映新冠肺炎疫情风险。因此,课题组建立了无偏估计的时空计量模型,利用全国(除湖北省)的真实风险纠偏武汉和湖北各地的确诊病例数据,由此测算出武汉封城前的潜在感染者数量为 18 556 (置信区间:  $14\ 134\sim 22\ 978$ ) 人。根据从武汉流入全国各地的春运人口数据预测得到了全国各地流入的潜在感染者数量,根据模型估计,武汉封城以后留存于武汉市的潜在感染者数量为 9 900 至 13 500 人。由于检出严重不足,大量应检未检的发热病例聚焦在医院进一步导致了医院交叉感染。

课题组利用春运时空人流耦合了以武汉为中心的全国各地疫区,由此建立了时空传播动力学模型,

由此预测出武汉市可能会有约5万人感染<sup>[36]</sup>。实际检出存在严重低估,疏漏了大量应检未检的潜在感染病例,因此建议进一步加强检测与收治。2月底,中国世界卫生组织联合考察报告对2月20日前新冠肺炎疫情在中国的流行过程进行了全面回顾<sup>[30]</sup>,根据考察报告可以发现,1月23日的发病人群数量为1.74万,3月底武汉市确诊病例约5.1万。实际疫情较好地验证了课题组关于武汉疫情感染规模估计和未来趋势预测的结果,为新冠肺炎疫情应急决策提供了技术参考。

### 2.3 全国各地差异化疫情风险与形势研判

武汉封城后,中国31个省、直辖市、自治区相继启动了突发公共卫生事件一级应急响应,全国上下突然进入“暂停”状态,对社会生产和生活造成前所未有的严重冲击,国家亟需掌握疫情动态风险,准确研判疫情形势,从而指导疫情防控和复工复产。一系列迫切问题亟待科学回答:已经启动的国家一级应急响应措施是否发挥了显著作用并足够逆转疫情?疫情形势何时可以得到有效控制?疫情拐点何时出现?疫情何时归零?

在防控措施既已实施的条件下,确诊病例数量的爆发性增长(甚至是超常规增速)有两种可能:其一,防控措施失效,病毒继续扩散蔓延,确诊病例数量随之激增;其二,防控措施发挥了重要作用,由于加强检出导致潜在感染病例被提前发现,确诊病例数量也会激增。确诊病例激增的同一现象背后却是完全不一样的疫情演化逻辑,疫情形势研判也是截然相反的——前者是疫情形势恶化,后者是疫情形势好转。武汉封城后的一周内,武汉每日新增确诊病例数量先从100以下激增到892例,随后连续三天只有300多例;湖北(除武汉)一直快速增长;全国(除湖北省)也在快速增长,但增速越来越慢。

根据武汉、湖北(除武汉)和全国(除湖北省)在感染病例规模与检出能力匹配方面存在明显差异的特性,课题组提出把全国疫区分成三类区域来分别研判各地疫情形势,而不是笼统地根据全国确诊数量变化来整体分析。1月29日,课题组提出“一个关于新型冠状病毒感染肺炎疫情风险与形势研判的新思路——从武汉疫区潜在感染规模分析全国疫情风险”,其核心思想是:各地疫情形势复杂、难以准确把握的主要原因是疫情风险结构认识不清晰,由此提出一个新思路,即各地疫情风险主要由存量(武汉流入的潜在感染者)和增量(本地二代、三代感染者)两部分构成,通过辩证认识存量与增量随时间的

转化关系,可以科学研判过去一周来全国各地的疫情形势,并敏锐感知未来1~2周的疫情风险动态变化。

1月31日,课题组向中国政府报告关于武汉封城后一周的疫情形势研判,核心观点是:武汉封城一周来,中国各地区(包括武汉市)的累计确诊病例爆发性增长,不是真实的疫情风险状态,只是反映了从武汉流入的潜在感染者的筛查与检出速度,检出速度越快,潜在感染者导致的风险消除越快,这恰是疫情积极防控并取得成效的信号。目前,湖北省内尚有超过12000的存量未被检出,防控重点应是存量与增量并举,预计疫情严峻形势至少还将维持3~5周;湖北省外的存量已不多,正在逐步转入本地扩散阶段。因此,防控重点应以控制本地二代、三代感染者为主,预计湖北省外疫情形势可能很快缓解,未来一周内会见到显著成效。举一反三,课题组进一步建议全国各地疫情应急部门亟需科学辨识本地的存量与增量关系,从而准确把握各地所处的疫情风险等级,发现疫情防控的关键薄弱点,由此制定针对性的管控措施。事实证明,课题组在疫情早期防控关键时间节点做出的疫情形势分析研判是符合实际的。课题组早期提出的基于“存量”和“增量”的疫情防控思路,与中央指导组提出控增量、消存量、防变量“三量管控”指导方针思想较为一致<sup>[40]</sup>。

### 2.4 海外新冠肺炎疫情形势分析与重点国家疫情跟踪研究

3月初,国外疫情开始恶化,尤其是意大利疫情极有可能沦陷。对此,中国政府亟需掌握国外疫情动态形势,了解新冠肺炎疫情全球大流行是否会出现?如果出现会有什么影响?中国该如何有效应对?针对这一命题,课题组全面对比分析了新冠肺炎全球扩散数据和2009年甲型H1N1全球大流行数据。3月5日,根据疫情严重性和全球扩散范围的技术角度,课题组判断新冠肺炎疫情全球大流行事实上已经到来,预计世界卫生组织很快将公布全球大流行。根据国外疫情防控的艰巨性和长期性,课题组认为中国需要面对输入性风险远大于国内本土传播风险的另一场战役,而且是一场持久战,中国已进入“内防反弹、外防输入”的双线“作战”模式,由此建议国家尽早制定长远应对战略。

随着海外疫情形势的不断恶化,东方近邻国家——韩国<sup>[41]</sup>、伊朗<sup>[42]</sup>、日本<sup>[43]</sup>相继成为海外疫情焦点,早期输入性病例也大多与这些国家关联。因此,课题组对这三个国家疫情进行了跟踪预测,动态

更新疫情形势分析研判,并编撰成疫情预测分析简报。随后,意大利、西班牙、德国、法国、英国等欧洲国家疫情相继沦陷,正式拉开了新冠肺炎疫情全球大流行的序幕,为此,课题组的海外预测国家适时增加了这些欧洲疫情严重国家。美国疫情大规模爆发对中国影响巨大,课题组不仅跟踪预测了美国整体疫情形势,对美国的疫情形势分析还精细到了每个州。由于俄罗斯疫情爆发导致很多新冠感染病例从黑龙江陆地口岸输入,课题组进一步将陆地接壤国家的疫情纳入了海外疫情动态跟踪分析预测范畴。

随着新冠肺炎疫情全球大流行愈演愈烈,病毒几乎渗透到了全球每一个国家和地区<sup>[44]</sup>。一些国家抗疫取得阶段性成效,成功遏制住了疫情,而另一些国家则大规模爆发,还有一些国家在有效控制住疫情后又出现大幅反弹。由于各国抗疫策略的不同,全球各国疫情形势高度分化,不同利益集团的疫情态势差异可能对中国全球化政策有很大影响。因此,课题组分别针对“一带一路”沿线、金砖国家、G7、G20、APEC等国际联盟和组织的疫情发展形势进行了动态跟踪分析,阐释了国外疫情格局变化可能带来的长远影响。

### 2.5 北京新发地聚集性疫情形势分析及经验教训

6月11日,北京市新发地出现聚集性疫情,疫情传播速度之快、形势之复杂、防控之难甚于武汉华南海鲜市场疫情爆发<sup>[45]</sup>。6月16日和22日,课题组分别对新发地聚集性疫情的传播能力、爆发规模和未来趋势进行了估计和预测,形成了研究报告,主要结论为:北京新发地疫情聚集性的潜在危害性超过武汉疫情,人群传播能力更强,感染病例增速更快;6月11日首例确诊前,估计已有超过150人被感染;新发地疫情发现时尚处于早期爆发阶段,北京市应急响应非常及时,课题组预测,乐观情况下的新发地疫情整体爆发规模约371人,预计疫情归零在7月中旬。根据北京市疾病预防控制中心的疫情监测数据,新发地聚集性疫情累计感染368例(确诊335例,无症状感染者33例),7月6日疫情归零。事实证明,课题组对新发地聚集性疫情形势的把握和预测是科学合理的。

通过对比分析新发地聚集性疫情和华南海鲜市场疫情,可以发现两者在锁定疫情爆发中心时基本处于同一态势,且新发地疫情防控难度甚至更大,但由于采取了不同的应急响应措施,两者结局迥异。由于对新冠病毒早期认知空白,只是怀疑存在物传人,人传人迟迟没有得到确认,加之对新型病毒的危

害性估计不足,使得华南海鲜市场聚集性疫情应急处置不科学,错过了最后机会,经验教训惨痛:武汉市在锁定华南海鲜市场后,尽管关闭了市场,但没有及时控制隔离全部市场相关人员及过去两周内去过市场的顾客,也没有有效追踪隔离密切接触者。新发地疫情防控中充分借鉴了早期防控经验教训,早期疫情暴露后,在确诊病例只有个位数时前瞻性地判断出这不是一起零星散发,而是来势凶猛、有一定规模的聚集性疫情爆发,并依据新发地市场的密接关联程度制定了科学围堵策略,及时对全部新发地市场相关人员及密切接触者进行了隔离、检测和医学观察,快速追踪两周内去过新发地市场的潜在风险人群。事实证明,这一果决措施是逆转疫情的关键之举,及时收拢了几乎所有潜在感染者,传播链被及时切断,从而快速控制了疫情。

## 3 结 语

新冠肺炎是一种新型传染病,中国新冠抗疫又是遭遇战,在早期认知极度匮乏且时效性要求极高的极端环境下,要克服疫情传播流行的复杂性,在很短时间内基于有限的确诊病例数据做出符合实际情况的科学分析研判是极其困难的。在全国抗击新冠肺炎疫情表彰大会上,习近平总书记强调,“实施史无前例的严格管控,作出这一决策,需要巨大的政治勇气,需要果敢的历史担当”。国家实施疫情防控的重大决策之所以需要勇气和担当,而不是笃信下的必然之举,就在于极端严苛环境下的复杂疫情形势存在高度不确定性。充分利用数学模型和大数据、人工智能等信息化手段控制疫情传播流行的复杂性,从而降低疫情形势分析研判的高度不确定性,是重大突发疫情危机下快速应急决策的重大科学问题,亟待多学科交叉的科技研究。

## 参 考 文 献

- [1] 董言,姚华. 中国传染病网络直报的现状与发展. 疾病预防控制通报, 2012, 27(1): 92-94.
- [2] 徐建. 网络直报系统在早期发现传染病暴发中的应用. 疾病监测, 2006, 21(4): 212-216.
- [3] 信息中心直报业务系统管理室. 中国传染病直报系统平稳运行十周年. 疾病监测, 2014, 29(3): 214.
- [4] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年). (2002-02-09)/[2020-08-19]. [http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content\\_183787.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm).
- [5] 陈璟浩. 突发公共事件网络舆情演化研究. 武汉: 武汉大学, 2014.

- [6] 方立群, 曹春香, 陈国胜, 等. 地理信息系统应用于中国大陆高致病性禽流感的空间分布及环境因素分析. *中华流行病学杂志*, 2005, 26(11): 839—842.
- [7] 刘德海, 王维国, 孙康. 基于演化博弈的重大突发公共卫生事件情景预测模型与防控措施. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(5): 937—946.
- [8] 倪顺江. 基于复杂网络理论的传染病动力学建模与研究. 北京: 清华大学, 2009.
- [9] Su K, Xu L, Li G, et al. Forecasting influenza activity using self-adaptive AI model and multi-source Data in Chongqing, China. *EBioMedicine*, 2019, 47: 284—292.
- [10] 许骏. 基于复杂网络的传染病突发事件应急管理研究. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [11] 钟永光, 毛中根, 翁文国, 等. 非常规突发事件应急管理研究进展. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(5): 911—918.
- [12] Xie T, Ni M, Zhang Z, et al. Parallel simulation decision-making method for a response to unconventional public health emergencies based on the scenario-response paradigm and discrete event system theory. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2019, 13(5—6): 1017—1027.
- [13] Wang X, Liu Y, Zhang H, et al. Public health emergency management and multi-source data technology in China. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2017: 1—8.
- [14] Breman JG, Arita I, Unit SE, et al. The confirmation and maintenance of smallpox eradication, WHO/SE/80. 156. Geneva: World Health Organization, 1980.
- [15] Greene SA, Ahmed J, Datta SD, et al. Progress toward polio eradication-worldwide, January 2017-March 2019. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2019, 68(20): 458.
- [16] 习近平. 在统筹推进新冠肺炎疫情防控和经济社会发展工作部署会议上的讲话. (2020-02-23)/[2020-08-19]. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-02/23/c\\_1125616016.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-02/23/c_1125616016.htm).
- [17] World Health Organization. WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19—27 July 2020. (2020-07-27)/[2020-08-19]. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--27-july-2020>.
- [18] Guan W, Ni Z, Hu Y, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(18): 1708—1720.
- [19] 中国疾病预防控制中心新型冠状病毒肺炎应急响应机制流行病学组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(2): 145—151.
- [20] Chan JFW, Yuan S, Kok KH, et al. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster. *The Lancet*, 2020, 395(10223): 514—523.
- [21] Chen N, Zhou M, Dong X, et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *The Lancet*, 2020, 395(10223): 507—513.
- [22] Huang C, Wang Y, Li X, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 2020, 395(10223): 497—506.
- [23] Fauci AS, Lane HC, Redfield RR. Covid-19—navigating the uncharted. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382: 1268—1269.
- [24] Wei M, Yuan J, Liu Y, et al. Novel coronavirus infection in hospitalized infants under 1 year of age in China. *Journal of the American Medical Association*, 2020, 323(13): 1313—1314.
- [25] Wu Z, McGoogan JM. Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72—314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *Journal of the American Medical Association*, 2020, 323(13): 1239—1242.
- [26] Sun K, Chen J, Viboud C. Early epidemiological analysis of the coronavirus disease 2019 outbreak based on crowdsourced data: a population-level observational study. *The Lancet Digital Health*, 2020, 2(4): e201—e208.
- [27] Wang G, Zhang Y, Zhao J, et al. Mitigate the effects of home confinement on children during the COVID-19 outbreak. *The Lancet*, 2020, 395(10228): 945—947.
- [28] Hellewell J, Abbott S, Gimma A, et al. Feasibility of controlling COVID-19 outbreaks by isolation of cases and contacts. *The Lancet Global Health*, 2020, 8(4): e488—e496.
- [29] Gilbert M, Pullano G, Pinotti F, et al. Preparedness and vulnerability of African countries against importations of COVID-19: a modelling study. *The Lancet*, 2020, 395(10227): 871—877.
- [30] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 中国—世界卫生组织新型冠状病毒肺炎(COVID-19)联合考察报告. (2020-02-29)/[2020-08-19]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3578/202002/87fd92510d094e4b9bad597608f5cc2c.shtml>.
- [31] 宋倩倩, 赵涵, 方立群, 等. 新型冠状病毒肺炎的早期传染病流行病学参数估计研究. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(4): 461—465.
- [32] Kissler SM, Tedijanto C, Goldstein E, et al. Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the postpandemic period. *Science*, 2020, 368(6493): 860—868.
- [33] 陆成宽. 曹志冬: 信息化科技抗疫急先锋. (2020-06-01)/[2020-08-19]. [http://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-06/01/content\\_445921.htm?div=-1](http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-06/01/content_445921.htm?div=-1).

- [34] Cao Z, Zhang Q, Lu X, et al. Estimating the effective reproduction number of the 2019-nCoV in China. *MedRxiv*, 2020; 2020.01.27.20018952.
- [35] Wang Y, Cao Z, Zeng D, et al. The collective wisdom in the COVID-19 research: comparison and synthesis of epidemiological parameter estimates in preprints and peer-reviewed articles. *medRxiv*, 2020; 2020.07.22.20160291.
- [36] Cao Z, Zhang Q, Lu X, et al. Incorporating human movement data to improve epidemiological estimates for 2019-nCoV. *MedRxiv*, 2020; 2020.02.07.20021071.
- [37] Liu Y, Gayle AA, Wilder-Smith A, et al. The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. *Journal of Travel Medicine*, 2020, 27(2): 1—4.
- [38] Qun L, Guan X, Wu P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(13): 1199—1207.
- [39] Wang C, Pan R, Wan X, et al. Immediate psychological responses and associated factors during the initial stage of the 2019 coronavirus disease (COVID-19) epidemic among the general population in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1729.
- [40] 中国长安网. 陈一新: 武汉战疫的指导和督查要因时制宜、因势而动、创新完善. (2020-02-27)/[2020-10-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1659649413673743528&wfr=spider&for=pc>.
- [41] Shim E, Tariq A, Choi W, et al. Transmission potential and severity of COVID-19 in South Korea. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, 93: 339—344.
- [42] Zhuang Z, Zhao S, Lin Q, et al. Preliminary estimation of the novel coronavirus disease (COVID-19) cases in Iran: a modelling analysis based on overseas cases and air travel data. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, 94: 29—31.
- [43] Legido-Quigley H, Asgari N, Teo YY, et al. Are high-performing health systems resilient against the COVID-19 epidemic?. *The Lancet*, 2020, 395(10227): 848—850.
- [44] World Health Organization. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. (2020-08-05)/[2020-10-23]. <https://covid19.who.int/>.
- [45] Tan W, Niu P, Zhao X, et al. Reemergent cases of COVID-19—Xinfadi Wholesales Market, Beijing municipality, China, June 11, 2020. *China CDC Weekly*, 2020, 2(27): 502—504.

## Complex Characteristics and Situation Judgement of the COVID-19 Epidemic

Cao Zhidong<sup>1, 2, 3</sup>      Zeng Dajun<sup>1, 2, 3\*</sup>      Zhang Qingpeng<sup>4</sup>      Wang Yuejiao<sup>1, 2</sup>

1. *The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

2. *School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3. *Shenzhen Artificial Intelligence and Data Science Institute (Longhua), Shenzhen 518110*

4. *School of Data Science, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077*

**Abstract** The Coronavirus Diseases 2019 (COVID-19) has become the most serious public health crisis in the last 100 years. Our team has been fully devoted to confronting this emergency since the beginning of the outbreak in January 2020. This paper discusses the complex characteristics of the spatio-temporal spread of the infectious diseases. We introduce the main results of our research on COVID-19 epidemic, including the estimation of the epidemic size in Wuhan and other places in China before the lockdown, the examination of overseas epidemics, and the evaluation of the cluster outbreaks in Beijing.

**Keywords** COVID-19; complexity; epidemiological analysis; situation judgment

(责任编辑 刘敏)

\* Corresponding Author, Email: dajun.zeng@ia.ac.cn