DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.03.016

朱连华[1]　谭岩[1]　肖惠文[2]　王露薇[3]　李安琪[4]　何陈涛[2]

基于阶段式传播模型 COVID-19 防控措施的量化评估分析

摘要

基于病毒动力学传染机制,构建了考虑不同时期防控措施影响下的新型冠状病毒肺炎(COVID-19)阶段式传播模型.依据空间上的严重性将全国划分为三类疫情区,对各疫情区传染人数进行了阶段式模拟.结合上述模拟结果,进一步量化评估了各疫情区所采取的如武汉交通管制、对口支援湖北和小区封闭式管理等措施对抑制病毒传播的影响.结果表明,阶段式传播模型能够较好地模拟出各疫情区不同时期传染人数的变化特征,政府采取的交通管制和小区封闭式管理等防控措施大幅减少了传染人数,感染人数呈现出大幅下降的趋势,有效抑制了 COVID-19 的大规模扩散.

关键词

新型冠状病毒肺炎(COVID-19);SIR;SEIR;防控措施影响评估

中图分类号 O175;R183

文献标志码 A

收稿日期 2020-03-02

资助项目 国家重点研发计划(2017YFA0603804);国家自然科学基金(41875098);江苏省自然科学基金(BK20191394);江苏省统计研究重点课题(2019A005);大学生创新训练计划项目(201810300067Y)

作者简介

朱连华,男,博士,副教授,研究方向为统计诊断与预测分析.ahualian@ nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 数学与统计学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 长望学院,南京,210044

3 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044

4 南京信息工程大学 地理科学学院,南京,210044

0 引言

2019 年 12 月底,原因不明的病毒性肺炎病例在武汉被发现,随后这种传染病被国家卫生健康委命名为“新型冠状病毒肺炎”,英文名称为“COVID-19”(Corona Virus Disease 2019),与世界卫生组织命名一致.该病毒已被证实可以人传人,潜伏期也具有传染性且传染力比 SARS 强,又因为春运等客观因素,快速地以武汉为中心向全国蔓延,给全国人民带来恐慌.为了有效控制此次疫情,全国各地采取了大量措施:2020 年 1 月 23 日,武汉疫情防控指挥部发布 1 号通告,10 时起机场、火车站离汉通道暂时关闭,其他地方政府也陆续采取一系列的交通管制措施;防控专家通过网络及媒体传播防治的注意事项;居民自觉在家自我隔离,戴口罩出门,企业延期复工,人员聚集场所关停.截至 2020 年 2 月 27 日,全国累计确诊病例 78 962 例,累计死亡病例 2 791 例,累计治愈病例 36 482 例,疑似病例 2 308 例.因此,探讨 COVID-19 传染人数的演变特征与防控措施的量化影响评估将为应对疫情提供重要的参考与决策依据[1].

目前,围绕疫情演变的建模与防控措施影响分析,国内外学者开展了大量的研究.SIR 和 SEIR 动力学模型[2-5]因能够有效推断疫情的达峰时间和最终病例数,得到了广泛的应用.文献[6]采用分数阶 SEIR 传染病模型对传染病动态系统的传播过程进行描述,并且给出一种求解该模型的残差幂级数方法;文献[7]则提出了一个基于自然增长算法的数据驱动模型,并结合传统最小二乘法和经验模态分解确定了疫情走向,通过追踪流行病的变化得出疫情将在 13 d 后(2 月 5 日)达到高峰,然后进入下降趋势;文献[8]基于 Spearman 秩相关分析,发现广东省 3 d 前的人口迁入规模与 3 d 后发病率存在较高的相关性,相关系数高达 0.6;文献[9]针对 2020 年 1 月 25 日—2 月 8 日全国疫情情况,应用流行病学描述性分析方法从政府采取的措施角度分析了不同时期传染病传播特征的变换;文献[10]考虑到新型冠状病毒潜伏期也有感染性,建立了一种时滞动态传播模型,并指出隔离对疫情防控的重要性;文献[11]研究了截至 2020 年 1 月 22 日已报告确诊病例的人口学特征、暴露史和疾病时间表,构建了感染者流行病学的时滞分布,指出减少病毒传播还需做出相当大的努力.

基于上述讨论,本文将基于新型冠状病毒肺炎传播的动力学机制,构建考虑不同时期疫情防控措施影响的 COVID-19 阶段式传播模型.依据空间上的严重性,同时考虑到疫情的特殊性和湖北省尤其武汉春节期间人口迁徙状况,以湖北省为中心将全国分为三类疫情区,并对其传染人数进行了阶段式模拟.结合上述模拟结果,进一步量化评估了各疫情区自 2020 年 1 月以来所采取的如武汉交通管制、多方对口支援湖北和小区封闭式管理等举措对疫情防控的影响,这将为新型冠状病毒肺炎防控措施的制定提供科学参考依据.

1 新型冠状病毒肺炎阶段式传播模型

1.1 阶段式传播模型构建

1.1.1 考虑人口迁移的 M-SEIR 模型

人口迁移是病毒传播初期感染人数大幅增加的主要因素,该时期的模型构建着重要考虑感染者的人口迁移这个因素.相对于平常时期,此次疫情爆发恰逢农历春节,这个时间段全国存在着大规模的人口迁移."九省通衢"的武汉更是有大量人口迁入迁出,在 2020 年 1 月 23 日之前武汉的所有通行均不受限制,在这段时间内感染者也会从武汉扩散至全国各地,成为全国其他地区被传染的源头.本文将基于传统的 SEIR 模型建立考虑感染者人口迁移的传染病模型(M-SEIR),从而更好地刻画在武汉实施交通管制前 COVID-19 的传染扩散过程,其传播机制如图 1 所示.

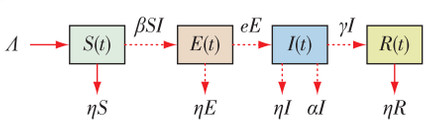


图 1 考虑人口迁移的 M-SEIR 模型传播机制

Fig. 1 Transmission mechanism for M-SEIR considering population migration

不难看出,在传统的 SEIR 模型中,易感人群的数量将会单纯地随着易感人群被感染而变换,在考虑了人口的迁移流动后,人群的规模将会受到一个输入人口的影响.潜伏人群的变化的输入来自于易感人群的确定感染,其输出则主要表现在潜伏人群度过潜伏期确诊的感染人群.感染人群的输入来自潜伏人群的输出,其输出表现在感染人群去世或是治愈.

依据图 1,可推出考虑人口迁移的传染病模型 M-SEIR 的微分方程组:

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\Lambda-\beta SI-\eta S,\\ \dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\beta SI-(e+\eta)E,\\ \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}=eE-(\gamma+\eta+\alpha)I,\\ \dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=\gamma I-\eta R,\\ S+E+I+R=N,\end{cases}\tag{1}$$

其中 S 为易感人群,E 为潜伏人群,I 为感染人群,R 为移除人群,Λ 为输入常数,η 为死亡率,β 为接触率,e 为潜伏者转为染病者的比例,γ 为染病者的恢复率,α 为人口迁移率.

1.1.2 考虑潜伏期具有传染力的 I-SEIR 模型

根据实际的确诊病例来看,新型冠状病毒的潜伏期长,且存在无症状感染者.在 2020 年 1 月 23 日即武汉采取交通管制后,因为是春节时期,尽管国家已经采取了一系列措施减少人口流动,但仍无法避免某些小范围的人员流动接触,而这一时期的感染病人往往都处在潜伏期,很大一部分可能并无感染症状,感染者在潜伏期中很有可能因接触大量人员从而导致病毒的扩散传播.因此,这个时间段内除了感染病人的传染之外,潜伏期患者是造成感染人数不断增加的一个重要因素.

在 M-SEIR 模型基础上,这里根据病毒的传染率以及潜伏期、感染期病人的平均接触人数来推算新的感染人数,将其作为潜伏期患者的输入.值得注意的是,随着武汉实行交通管制和全国推行小区封闭式管理的力度加强,居民外出的频率与概率大幅降低.因此,这里将染病期与潜伏期的有效接触率设为一个可变的参数,其取值随着时间的推移而逐渐变小.

依据上述假设,不难得到如图 2 所示的该时期传染病传播扩散机制.由此,针对湖北省在武汉实行交通管制后、非湖北省地区全面推行小区封闭式管理前这段时期的 COVID-19 感染情况,可在上述 M-SEIR 模型基础上建立考虑潜伏期具传染力和人口

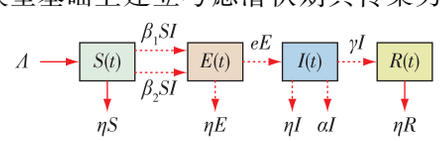


图 2 考虑潜伏期具有感染力的 I-SEIR 模型传播机制

Fig. 2 Transmission mechanism for I-SEIR considering infectivity of latent patients

迁移的传染病模型 I-SEIR:

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\Lambda-\beta_1 SI-\beta_2 SE-\eta S,\\ \dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\beta_1 SI+\beta_2 SE-(e+\eta)E,\\ \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}=eE-(\gamma+\eta+\alpha)I,\\ \dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=\gamma I-\eta R,\\ S+E+I+R=N,\end{cases}\tag{2}$$

其中 Λ 为输入常数,η 为死亡率,α 为人口迁移率,γ 为染病者的恢复率,e 为潜伏者转为染病者的比例,β_1、β_2 分别为染病期、潜伏期的有效接触率.

1.1.3 传染病隔离控制模型 MQ-SIR

对于湖北省,早期有很多潜伏期患者与他人接触,即便在后期采取一系列有效措施也很难控制,且多地出现了无症状感染者及无密切接触感染者的情况,因此国家开始抽调各地医疗力量前往湖北省支援,对所有居民进行详细排查,对有疑似感染症状的患者采取隔离措施.主要是对易感患者设置一个易感者隔离室仓 M,对感染者设置一个感染者隔离室仓 Q.对于非湖北省地区,全面推行小区封闭式管理:小区居民尽可能减少外出,非小区居民禁止进入该小区,有外出历史尤其前往湖北疫区的居民居家隔离 14 d,这些措施也实现了类似湖北省的隔离控制效果.

相对于上述考虑潜伏期具有传染力的时期,由于有效的隔离措施,该时期基本断绝了潜伏期病人,这里认为传染中潜伏人群 E 大幅减少,几乎可以忽略不计.同时因为在易感人群中进行详细的排查,此外感染人群也将输出为隔离人群 Q,这样就杜绝了感染者与其他人的接触,减少了病毒的进一步扩散.由此,可得如图 3 所示的该时期的同时考虑隔离感染者和易感者的传播控制机制示意图.

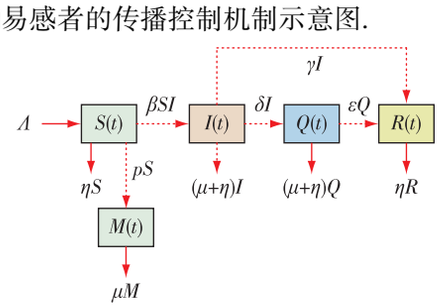


图 3 同时隔离感染者和易感者的 MQ-SIR 模型传播机制

Fig. 3 Transmission mechanism for MQ-SIR with isolating both infected and susceptible people

进一步,依据图 3 可以构建得到基于 SIR 的传染病隔离控制模型 MQ-SIR:

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\Lambda-\beta SI-(\eta+p)S,\\ \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}=\beta SI-(\gamma+\delta+\mu+\eta)I,\\ \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=\delta I-(\mu+\eta+\varepsilon)Q,\\ \dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=\varepsilon Q+\gamma I-\mu R,\\ \dfrac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t}=pS-\mu M,\end{cases}\tag{3}$$

其中 M、Q 分别代表从易感者类、染病者类中隔离出来的隔离人数情况,参数β、γ、ε、δ、p、μ 和 η 皆为正实数,β 为传染率,γ、ε 为移除率,δ、p 为隔离率,μ 为因病死亡率,η 为自然死亡率.

1.2 模型参数估计

显然,上述构建的 COVID-19 阶段式传播模型最终求解离不开病例初值和相应参数的确定.病例的初值包括易感人群 S、潜伏人群 E、感染人群 I 和移除人群 R,其初始数量只要根据实际情况给出即可.模型的参数则包含人口迁移率 α、疫病传染率 β、疾病恢复率 γ 等参数,是对于 COVID-19 传播特性的一种刻画,这些值的合理选定对整个模型的结果有着至关重要的影响.然而,受限于有效数据的缺乏,直接使用现有数据较难准确地估计模型各参数值.

因此,本文引入初始参数正向推演疫情扩散过程,并通过实际数据反演动态修正和求解得到模型最终参数估计值(图 4).首先,模型求解过程初始时,依据给定的病例初值和参数初始值计算得到模型的输出结果,将此结果得到的染病人数情况与真实的数据进行对比;其次,通过计算两者之间的均方差(MSE)衡量其误差大小,若 MSE 值低于设定阈值,输出参数,否则依据梯度下降法思想寻找新的参数,并重新推演;最后,重复上述过程,直至 MSE 低于设定的阈值,输出最终模型参数值.

2 防控措施影响的量化评估分析

本文的数据来源于国家卫生健康委员会官方网站提供的湖北省 2020 年 1 月 16 日至 2 月 27 日和湖北以外地区 2020 年 1 月 22 日至 2 月 27 日的病例统计数据.以下将首先分析此次传染病的时空特征,并依据严重程度和防控措施对疫区进行分类和划分阶段.其次,结合上述构建的阶段式传播模型,对各疫

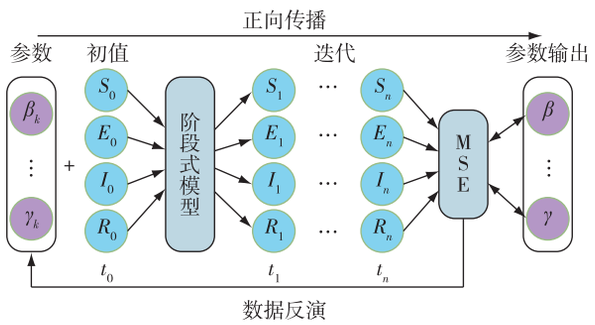


图 4　阶段式传播模型参数估计示意图

Fig. 4　Schematic diagram of parameter estimation for staged infection model

区传染人数进行阶段式模拟.结合模拟结果,量化评估武汉交通管制、对口支援湖北、小区封闭式管理等防控措施对病毒抑制和减少扩散的影响.

2.1　疫情的时空特征分析

图 5 给出了湖北 2020 年 1 月 16 日至 2 月 27 日和湖北以外地区 2020 年 1 月 22 日至 2 月 27 日 COVID-19 每日新增病例人数随时间变化曲线.不难看出,无论湖北还是湖北以外地区新增病例总体上呈现出先增加后减少的特征,其中湖北以外地区在 2 月 3 日前后新增病例达到最高峰.不同于湖北以外地区,湖北病例数呈现出双峰结构特征,分别在 2 月 4 日前后和 2 月 12 日前后达到新增病例最大,2 月 12 日病例的大幅增加与全国各地对口支援湖北以及湖北省临床诊断病例计入确诊病例有关.2 月 15 日后,全国各地病例均呈现显著下降趋势,可以说新型冠状病毒引发的传染情况得到了有效的控制.

通过计算各省市累计确诊病例数和新增病例标准差,可以得到疫情的空间分布与防控的稳定性特征(图 6).由图 6a 可见,累计感染病例数呈现出以湖北省为中心的一个放射状特征,这与武汉春节人口出行呈现出高度的相关性,依据各地与传染源的距离即可判断疫情状况.作为武汉出行人口最多的湖北省感染情况显然最为严重,湖北省周边省市因为距离较近,人口流动带来了大量的输入性病例,受影响也较大,如广东、浙江、河南、湖南四地的确诊人数超过 1 000 人.我国西北部和西南部地区受到的影响较轻,且连续几天无新增病例.各地新增病例变化情况总体与累计病例一致,湖北省增长变化最大,其次是距离湖北省最近的河南、浙江、广东等地.不过值得注意的是,作为冬季旅游热点,距离疫区较远的黑龙江病例数增长日变化也不稳定,出现了较大的波动(图 6b).

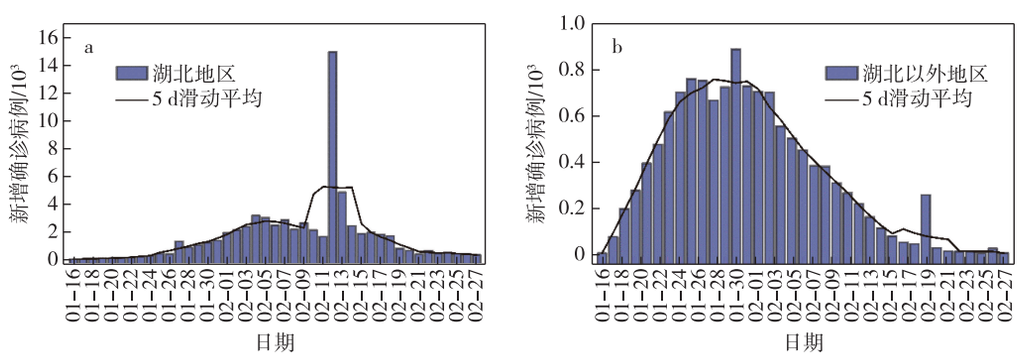


图 5　湖北省(a)和湖北以外地区(b)新增病例随时间变化图

Fig. 5　Changes of newly confirmed COVID-19 cases over time in Hubei (a) and other provinces of China (b)

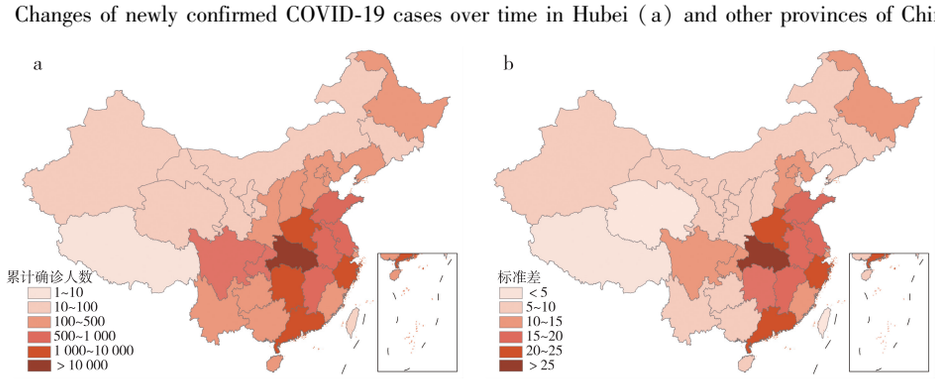


图 6　累计确诊病例(a)和疫情稳定性(b)的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of the accumulated confirmed COVID-19 cases (a) and epidemic stability (b)

各地在时间和空间上受武汉辐射影响的程度不同,这里按照警惕级别对全国进行三级疫情地区划分:湖北省列为第Ⅰ疫情区;距离湖北省较近的省市以及具有大量人口流动的发达地区列为第Ⅱ疫情区,如四川、安徽、澳门、北京、重庆、福建、广东、广西、河北、河南、湖南、江苏、江西、山东、上海、四川、香港和浙江;甘肃、贵州、吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、青海、山西、陕西、台湾、西藏、新疆、云南等省份受影响较小,本文将它们定义为第Ⅲ疫情区.

自 2020 年 1 月以来,政府推行了一系列的防控措施,为了量化研究其对抑制病毒传播的影响,这里对不同疫区依据时间划分为不同阶段.由于政策的影响,第 I 疫情区湖北省防控有着两个十分重要的时间点:第一个时期是 1 月 23 日所采取的武汉交通管制措施,第二个时期是 2 月 12 日前后全国各地对口支援湖北、打响湖北省保卫战以及临床诊断病例计入确诊病例.因此,这里选取 1 月 23 日武汉正式实行交通管制,2 月 12 日全国对口支援湖北、打响保卫战作为时间节点将第Ⅰ疫情区 COVID-19 传播划分为 3 个阶段.对于第Ⅱ、第Ⅲ疫情区所实行的政策主要是全国推行小区封闭式管理,这是切断病毒传播途径的一项重要举措,也直接影响了疾病防控,因此将第Ⅱ、第Ⅲ疫情区的新型冠状病毒传播分为两个阶段,即小区封闭式管理推行前和推行后.

2.2 疫情防控措施影响评估

在这次传染病的防控过程中,三次政策的调整对疫情防控起重要作用.这里应用前文构建的阶段式传播模型,分别对三个疫情区不同阶段的传染人数进行建模,获得各疫情区累计确诊病例在政策推行前后的变化趋势.通过与实际数据对比,评价模型对病毒传播特征刻画的合理性,并量化评估武汉交通管制和对口支援湖北对第Ⅰ疫情区湖北省、小区封闭式管理措施对第Ⅱ和第Ⅲ疫情区防控发挥的作用和影响.

2.2.1 武汉交通管制措施的影响分析

为了评估武汉交通管制措施对第Ⅰ疫情区湖北省的影响,这里选取 2020 年 1 月 23 日武汉进行交通管制措施前后的 1 月 16 日至 2 月 3 日作为研究时段.1 月 16 日至 1 月 23 日,这段时间为传播初期,属于病毒传染自然扩散状态,更多受到的是人口迁移因素带来的影响.在 1 月 23 日措施推出时,湖北省 COVID-19 累计感染病例已经达到 830 人,相比 1 月 16 日已经快速增长将近 20 倍.图 7 中红色曲线给出了考虑人口迁移的 M-SEIR 模型模拟曲线,对比这段期间实际病例数据(黑色散点),不难看出,模型较好地拟合出了初期的病毒传播状况.显然,如果继续放任 COVID-19 自然传播而不采取任何防控措施,那么累计感染病例数将持续快速增长.值得关注的是,这段时期正值在春节期间,依据往年惯例,将会有几百万武汉居民出行,如果不采取任何措施,也将给其他地区带来致命的大量输入病例.

1 月 23 日推出了交通管制措施后,武汉全市城市公交、地铁、轮渡、长途客运暂停运营,机场、火车站离汉通道暂时关闭.居民开始在家进行自我隔离,人口流动大幅减少,每人每日接触人数大幅减少.该时期 COVID-19 的传播除了来自于已感染者的传播,已被感染但尚在潜伏期的患者成为了疫情扩散的一个重要源头,这里使用考虑潜伏期具有感染力的 I-SEIR 模型对 1 月 16 日至 2 月 3 日的数据进行建模分析.由图 7 蓝色曲线可以看出,I-SEIR 模型模拟与实际确诊人数接近,真实再现了该时期的传染状况.

相较于 17 年前的非典,从 2002 年 12 月底发现到 2003 年 5 月 9 日开始施行应急条例共历时约 4 个月[12-13],本次疫情从发现首例病人到采取重大突发公共卫生事件一级响应仅不到 1 个月.对比 M-SEIR 和 I-SEIR 模型的模拟效果,可以发现 1 月 23 日武汉交通管制措施的推行成为两者变化的重要分界点.依据 M-SEIR 模型的模拟结果(红色曲线),如果不实施此干预政策,截至 2 月 3 日湖北省累计感染病例数就将高达 30 000 例左右.进行交通管制后确诊病例数得到较大的控制,尽管感染人数依然呈现上升趋势,但增速明显下降.截至 2 月 3 日湖北省实际累计确诊人数为 13 522 人,相对于不采取该干预措施,实际累计感染病例减少 50%以上,这也将间接大幅减少其他省市地区的病例输入,且延迟了此次传染病高峰的到来,为各地区争取了重要的防控备战时间窗口.

2.2.2 对口支援湖北对疫情确诊病例的影响分析

这里选取 2020 年 2 月 3 日至 2 月 27 日作为研究时段,用于评估全国对口支援湖北、湖北保卫战对湖北省疫情的影响.针对该时期累计确诊病例数量,图 8 给出了基于考虑潜伏期患者具有传染力的 I-SEIR 和传染病隔离控制 MQ-SIR 两个模型拟合的结果.可以发现,自 2 月 3 日到 2 月 11 日,湖北省累计确诊人数依然持续上升,但因武汉各种措施的实行,上升趋势略有放缓,上述所构建的 I-SEIR 模型依然

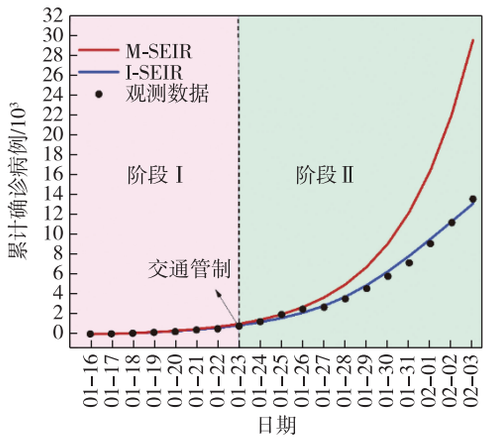


图7 武汉交通管制前后湖北省疫情变化模拟结果

Fig. 7 Simulation of accumulated confirmed COVID-19 cases in Hubei before and after the traffic control of Wuhan

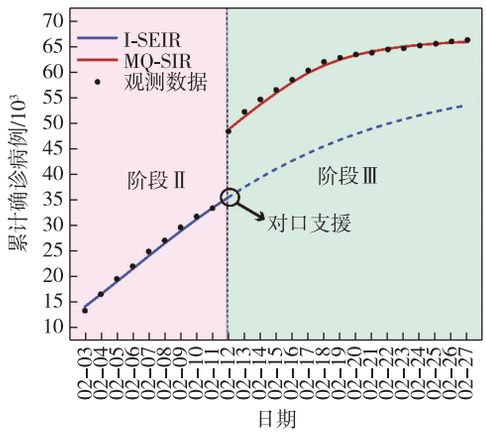


图8 对口支援、湖北保卫战前后湖北省疫情变化模拟结果

Fig. 8 Simulation of accumulated confirmed COVID-19 cases before and after the counterpart support to Hubei

能够较好地拟合该时期的特征(图8蓝色曲线).依据I-SEIR模型,截至2月27日湖北省累计确诊病例将达到53 050例,且依然处于继续上升中.

然而,由图8不难看出,湖北省累计确诊人数由2月11日的33 366人大幅增加至2月12日的48 206人,这与全国各地对口支援湖北、打响疫情保卫战以及湖北省临床诊断病例计入确诊病例有关.作为疫情重灾区,随着来自全国各地的医疗人员和医疗物资的不断到来,使得对病人的收治能力和对潜在COVID-19患者的检测能力得到明显的提高.因为医疗人员和医疗物资的严重不足,此前实际上被感染但不能得到确诊的大量病例此时被确诊.

2月12日前后,政府开始投入大量人力物力对所有居民进行详细排查,对所有疑似感染症状的患者采取了强有力的隔离措施,I-SEIR模型已经不再适用2月12日之后的病毒传播过程.为此,这里使用传染病隔离控制模型MQ-SIR对2月12日后的COVID-19累计感染人数进行建模,由图8红色曲线可以看到MQ-SIR较好地再现了确诊病例数的变化.截至2月27日,湖北省实际累计确诊病例人数达到了65 914例,相对于I-SEIR趋势(图8蓝色曲线)累计确诊病例数提高了24.2%.但可以明显发现,2月12日到2月27日尤其2月20日后新增病例人数明显趋缓,多方对口支援、湖北保卫战等措施有效控制了病毒的蔓延.

2.2.3 小区封闭式管理的影响分析

相对于湖北省,其他疫情区也相应推出了一些防控措施,这其中影响最大的莫过于2020年1月底2月初尤其2月3日前后全国推行的小区封闭式管理措施:小区居民尽可能减少外出,非小区居民禁止进入小区,有外出历史尤其是有湖北省疫区旅行史的居民实行居家隔离14 d.为了分析小区封闭措施对第Ⅱ、第Ⅲ疫区防控的影响,这里选取1月22日至2月27日作为研究时段,其中选取2月3日作为小区封闭式管理措施执行前后的时间节点.

对于第Ⅱ疫情区,受到湖北省的影响比较大,由于距离相对较近,人口流动比较频繁,湖北省的感染病例尤其一些潜伏期患者流入,还是使得疫情向外省快速扩散.COVID-19累计感染人数变化2月3日前总体与湖北省类似,增长速度呈现不断增速状态.自1月22日开始增加,2月3日累计病例数就已经达到了5 543例.在这段时期内,人口迁移以及潜伏期患者传染扮演着重要角色,因此采用I-SEIR模型拟合其演变特征.而自2月3日开始,随着全国小区封闭式管理措施的广泛推行,潜伏期患者因为大规模居家隔离而大幅减少了感染他人的几率.针对2月3日至2月27日病例人数,这里采用考虑小区封闭式管理政策的MQ-SIR模型进行建模.

图9a给出了第Ⅱ疫情区基于I-SEIR和MQ-SIR模型的累计确诊病例人数拟合结果,两者均较好地再现了该地区实行小区封闭式管理前后的确诊病例变化特征.依据I-SEIR模型可得2月3日后的模拟结果,不难发现,如果政府不采取强有力的措施,感染人数将会继续大幅增加,截至2月27日累计确诊病例将高达30 960人,且依然没有减缓趋势.随着2月3日前后全国推行小区封闭式管理,感染人数增速明显变缓,快速迎来疫情拐点,2月16日后新增病例每日就开始低于100人.截至2月27日,第Ⅱ疫情

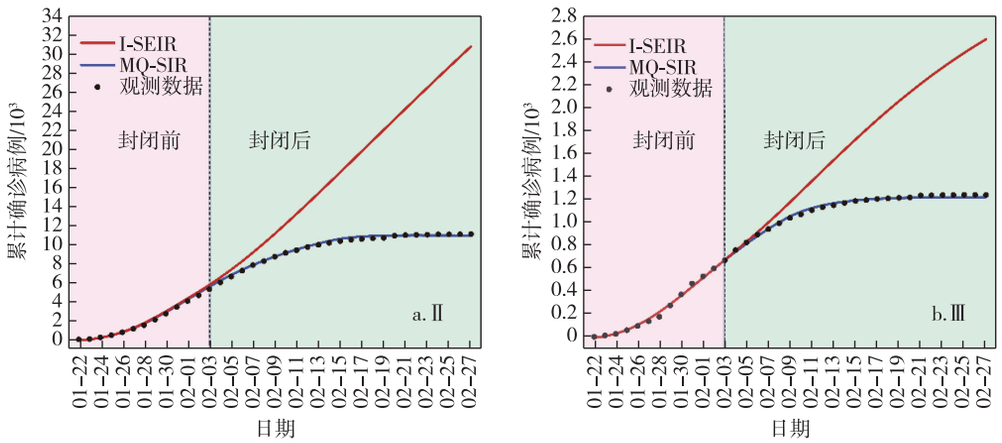


图 9　小区封闭式管理前后第Ⅱ(a)、第Ⅲ(b)疫情区疫情变化模拟结果

Fig. 9　Simulation of accumulated confirmed COVID-19 cases in area Ⅱ (a) and Ⅲ (b) before and after the closed community management

区累计病例仅为 11 117 例,相对于不采取任何措施,实际累计感染病例减少 70%左右,小区封闭式管理政策效果显著.

相对于第Ⅱ疫情区,第Ⅲ疫情区总体特征相似但感染人数要少很多,这里同样采用 I-SEIR 和 MQ-SIR 刻画小区封闭式管理前后疫情的变化.由图 9b 可见,第Ⅲ疫区 2 月 3 日累计确诊病例为 673 例,全面推行小区封闭式管理措施后,新增病例增速就已经明显趋缓,2 月 15 日后每日新增病例数已经可以控制在 10 例左右,截至 2 月 27 日累计病例数仅为 1 277 例.然而,依据 I-SEIR 模型,截至 2 月 27 日累计确诊病例将达到 2 582 例,且依然在上升中.可见,相比不采取措施,小区封闭式管理使得实际累计确诊病例下降 50%左右,且有效控制了病毒的蔓延势头.

2.2.4　防控措施对疫情趋势的影响

这里我们依据 2020 年 2 月 15 日至 2 月 27 日每日新增确诊病例数据,继续使用 MQ-SIR 模型对第Ⅰ、第Ⅱ和第Ⅲ疫情区 COVID-19 感染人数变化趋势进行模拟,用于探讨防控措施对疫情趋势的影响(图 10).不难发现,随着小区封闭式管理、对口支援湖北等措施的持续推行,全国各省市累计确诊病例增长势头均得到了控制,新增病例也都进入快速下降通道.

依据 MQ-SIR 模型输出结果,目前来说,2 月 27 日后第Ⅰ疫情区湖北省累计病例尽管依然会持续增加,防控阻击战依然面临着巨大的压力,但多项防控措施尤其全国对口支援使得湖北省感染人数增速呈现大幅下降趋势,到 3 月下旬、4 月上旬增速将趋于零(图 10 黑线).相对于湖北省,第Ⅱ疫情区(图 10 红线)从 2 月下旬开始每日新增人数就已经进入持续减少状态,3 月中上旬新增病例增速接近于尾声.与第Ⅱ疫情区情况类似,第Ⅲ疫情区病例本身较少,加上得力的防控措施,是全国最早进入下降趋势通道的地区(图 10 蓝线).

值得关注的是,尽管防控措施的有力推行有效抑制了病毒的迅速传播,但因为不同地区疫情程度的不同,尤其第Ⅰ疫情区湖北省每日新增病例数仍然在增加,疫情防控措施依然不能懈怠.此外,当前正处于各地员工复工、复产返程的高峰期,不排除出现感染人数小幅度攀升、波动的状况.各省市还需要密切关注返城人口的来源地与去向以及各地区的确诊病例人数的动态变化,有针对性地采取各种防控措施[14].

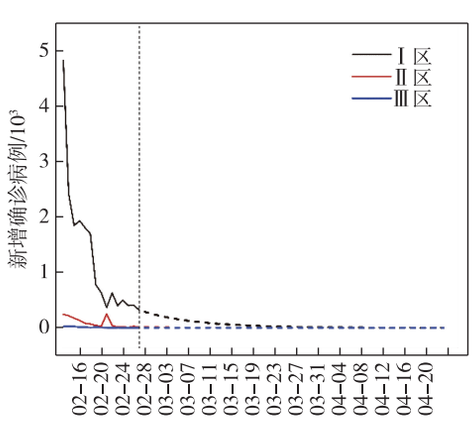


图 10　第Ⅰ、第Ⅱ、第Ⅲ疫情区 COVID-19 趋势模拟分析

Fig. 10　Trend simulation of newly confirmed COVID-19 cases in area Ⅰ, Ⅱ, and Ⅲ

3 结论

本文基于新型冠状病毒肺炎传播动力学机制,构建了考虑不同时期防控措施影响下的 COVID-19 阶段式传播模型;依据疫情在空间上的严重性,以湖北省为中心将全国分为三类疫情区,并对其确诊病例人数进行了阶段式模拟;量化评估了各疫情区自 2020 年 1 月以来所采取的如武汉交通管制、对口支援湖北和小区封闭式管理等措施对抑制病毒传播的影响.结果显示:

1)随着武汉交通管制、对口支援湖北以及小区封闭式管理等措施的推行,COVID-19 在全国不同疫情区呈现出明显分阶段特征.为此,本文构建了包含考虑人口迁移的 M-SEIR、考虑潜伏期具有传染力的 I-SEIR 以及传染病隔离控制的 MQ-SIR 的阶段式传播模型,模拟结果显示其能够较好地再现各疫情区不同时期感染病例变化特征.

2)政府采取的交通管制、对口支援湖北和小区封闭式管理等措施在减少传染人数、抑制 COVID-19 扩散等方面发挥着重要的作用.其中,截至 2020 年 2 月 3 日,交通管制措施就使得湖北省实际确诊病例减少一半以上,且间接大幅减少了其他省市地区的病例输入,为此次阻击战争取到了重要的备战时间窗口;小区封闭式管理措施的推行则使得非湖北各地区的病例增速得到大幅扭转,快速迎来了疫情拐点,相对于不采取措施,截至 2 月 27 日实际累计感染病例减少 50%~70%左右;而全国对口支援湖北措施,也有力地支持了湖北打响疫情保卫战.

3)防控措施的得力推行,使得全国感染人数增速呈现出快速下降的趋势,但因为不同地区疫情程度不同,尤其湖北省每日新增病例依然在增加,加上目前处于员工复工、复产返程的高峰期,不排除感染人数小幅度攀升和波动的情况.各省市依然要密切关注疫情动态变化,有针对性地采取各项防控措施,保持科学防控不懈怠.

参考文献

References

[1] 程晓敏,李芊璘,陆家海.从 2019 新型冠状病毒病疫情谈新发传染病防控策略[J].传染病信息,2020,33(1):22-26
CHENG Xiaomin, LI Qianlin, LU Jiahai. Prevention and control strategies for emerging infectious diseases based on the outbreak of coronavirus disease 2019 [J]. Infectious Disease Information, 2020, 33(1): 22-26

[2] 杨慧,唐明,许伯铭.自适应网络中的流行病传播动力学研究综述[J].复杂系统与复杂性科学,2012,9(4):63-83
YANG Hui, TANG Ming, XU Boming. Epidemic dynamics on adaptive networks: a short review [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2012, 9(4): 63-83

[3] 蔡全才,姜庆五,徐勤丰,等.定量评价 SARS 干预措施效果的传播动力学模型[J].中华流行病学杂志,2005,26(3):153-158
CAI Quancai, JIANG Qingwu, XU Qinfeng, et al. To develop a model on severe acute respiratory syndrome epidemics to quantitatively evaluate the effectiveness of intervention measures [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2005, 26(3): 153-158

[4] Magal P, Seydi O, Webb G. Final size of a multi-group SIR epidemic model: irreducible and non-irreducible modes of transmission [J]. Mathematical Biosciences, 2018, 301: 59-67

[5] Tang B, Wang X, Li Q, et al. Estimation of the transmission risk of 2019-nCov and its implication for public health interventions[J]. SSRN Electronic Journal, 2020. DOI: 10.2139/ssrn.3525558

[6] 李琳娜,王欢,黄琼丹,等.分数阶 SEIR 传染病模型的残差幂级数解法[J].数学的实践与认识,2019,49(15):306-317
LI Linna, WANG Huan, HUANG Qiongdan, et al. Residual power series solution of fractional SEIR infectious disease model [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(15): 306-317

[7] Huang E, Qiao F L. A data driven time-dependent transmission rate for tracking an epidemic: a case study of 2019-nCoV[J]. Science Bulletin, 2020, 65(6): 425-427

[8] 王宣焯,廖聪慧,李志慧,等.广东省新型冠状病毒肺炎早期流行与时空分布情况初步分析[J].热带医学杂志,2020,20(4):427-430,571
WANG Xuanzhuo, LIAO Conghui, LI Zhihui, et al. Preliminary analysis on the early prevalence and spatial distribution of new coronavirus pneumonia in Guangdong province[J]. Journal of Tropical Medicine, 2020, 20(4): 427-430, 571

[9] 陈一凡,曹广文.全国新型冠状病毒肺炎发病趋势初步分析[J].上海预防医学,2020,32(2):147-150
CHEN Yifan, CAO Guangwen. Incidence trend of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2020, 32(2): 147-150

[10] CHEN Yu, JIN Cheng, JIANG Yu, et al. A time delay dynamical model for outbreak of 2019-nCoV and the parameter identification [J]. Applicable Analysis, 2020. DOI: 10.1080/00036811.2020.1732357

[11] Li Q, Guan X H, Wu P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. New England Journal of Medicine, 2020, 382(13): 1199-1207

[12] 王行兵,胡燕,吴满琳.隔离措施对北京 SARS 疫情控制影响的仿真分析[J].计算机仿真,2005,22(11):299-302
WANG Xingbing, HU Yan, WU Manlin. Imitation analysis of the impact of the isolation measure on the control of

SARS epidemic in Beijing[J]. Computer Simulation, 2005,22(11):299-302
[13] Naheed A, Singh M, Lucy D. Numerical study of SARS epidemic model with the inclusion of diffusion in the system[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 229:480-498
[14] ZHAO Shi, LIN Qianyin, RAN Jinjun, et al. Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: a data-driven analysis in the early phase of the outbreak [J]. International Journal Infectious Diseases, 2020, 92: 214-217. DOI:10.1016/j.ijid.2020.01.050

Quantitative assessment and analysis on the prevention-control measures of COVID-19 based on staged transmission model

ZHU Lianhua[1] TAN Yan[1] XIAO Huiwen[2] WANG Luwei[3] LI Anqi[4] HE Chentao[2]
1 School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
2 Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
3 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
4 School of Geographical Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A staged transmission model for Corona Virus Disease 2019 (COVID-19) was built based on virus infection dynamics considering prevention and control measures during different periods. The whole country is classified into three level of epidemic areas according to the seriousness of COVID-19, and the number of infected people in each epidemic area is simulated in a staged way. Based on analysis of the simulation results, the impact of measures taken in each epidemic area, such as the traffic control in Wuhan, the counterpart support to Hubei, and the closed community management, on the suppression of virus transmission was further evaluated. The results show that the staged transmission model can well model the changing characteristics of the number of infected people during different periods in each epidemic area. The prevention and control measures practiced by government, such as the traffic control in Wuhan and the closed community management, have significantly inhibited the spreading of COVID-19, indicated by the substantial downward trend in the number of infected people.

Key words Corona Virus Disease 2019 (COVID-19); SIR; SEIR; impact assessment of prevention and control measures