

# 新冠肺炎疫情传播模型及防控干预措施的因果分析评估

游光荣<sup>1</sup>, 游翰霖<sup>1</sup>, 赵得智<sup>2</sup>, 廉振宇<sup>1</sup>

1. 军事科学院评估论证研究中心, 北京 100091

2. 军事科学院研究生院, 北京 100091

**摘要** 利用修正后的单群体传染病SEIR模型,对新型冠状病毒肺炎疫情在国内的传播趋势进行建模,模型较好地拟合了已发生情况并预测了疫情发展;基于修正后的SEIR模型,开展反事实推理,定量评估了武汉推后采取防控干预措施对国内疫情带来的影响。结果表明:基于建模仿真和因果推断方法,可以对重大突发公共卫生事件的决策和执行进行模拟与反演,提高各级政府应对重大突发公共卫生事件的社会治理能力。

**关键词** 新冠肺炎;SEIR模型;因果分析;反事实推理

2020年初,新型冠状病毒肺炎(简称新冠肺炎)疫情在武汉地区暴发。由于在传播初期对病毒特性认识不够、春节期间人口迁徙规模剧增等诸多因素,新冠肺炎疫情在全国范围内迅速传播扩散,截至2020年3月25日24:00,内地已造成累计81285人确诊、3287人病亡的严重损失<sup>[1]</sup>,在经济发展、社会稳定和对外交流等领域也产生了巨大冲击。面对突如其来的疫情,党中央高度重视,习近平总书记亲自指挥、亲自部署,各地区各部门闻令而动、快速反应,先后出台了《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)》《关于

加强新型冠状病毒感染的肺炎疫情社区防控工作的通知》《关于印发公共场所新型冠状病毒感染的肺炎卫生防护指南的通知》等多项政策文件,积极运用一揽子防控干预措施,统筹调配各类医疗防护和后勤保障资源,打响疫情防控的人民战争、总体战、阻击战。新冠肺炎疫情防控成为各领域学者共同关注的研究热点。中华预防医学会专家研究了新冠肺炎的流行病学特征,分析了疫情发展阶段、传播特点、临床特征和防控要点<sup>[2]</sup>。中国疾病预防控制中心学者通过梳理72314例新冠肺炎病例样本,修正了不同传播阶段实际感染者数据,研究了

收稿日期:2020-03-18;修回日期:2020-03-26

基金项目:中国科学院学部咨询项目(2020-ZW03-A-013)

作者简介:游光荣,研究员,研究方向为军事评估、管理科学与工程,电子信箱:13910742660@163.com

引用格式:游光荣,游翰霖,赵得智,等.新冠肺炎疫情传播模型及防控干预措施的因果分析评估[J].科技导报,2020,38(6):90-96;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.06.013

新冠肺炎感染与死亡病例在不同地区和人群中的分布<sup>[3]</sup>。生物学领域学者运用基因测序分析方法,比较了新型冠状病毒和 SARS-CoV 等相似冠状病毒的基因组序列,研究了冠状病毒谱系划分和变异与传播路径<sup>[4-6]</sup>。传播动力学模型被广泛应用于预测疫情发展趋势<sup>[7]</sup>,其中,SEIR 模型考虑了处于潜伏期的病毒携带者,区分了潜伏者和已发病的感染者在接触易感人群概率中存在的差异,适用于本次新冠肺炎疫情研究。范如国等<sup>[8]</sup>运用 SEIR 模型预测了武汉地区感染人数峰值和疫情传播拐点。魏永越等<sup>[9]</sup>通过区分轻症、普通、重症和无症状的感染者特点,提出改进后的 SEIR<sup>CA0</sup> 模型并将其应用于新冠肺炎疫情预测。钟南山团队<sup>[10]</sup>对比计算了考虑人口流动的 SEIR 模型和 LSTM 神经网络模型在新冠肺炎疫情发展预测中的效果,评估了提前和推后采取公共卫生干预措施对疫情发展的影响。

已有的研究成果为疫情防控科学决策提供了

有益的参考,但对干预措施的作用机理和实际管理中多要素相互影响的因果关系分析不够,SEIR 模型中未区分治愈人群和病亡人群。此外,由于病毒检测条件的限制,确诊病例数据与实际感染者人数存在数量偏差和时间延迟,需要综合不同来源信息对输入数据进行修正;流动人口中既包含易感者和潜伏者,也须考虑实际已经发病但未检测确诊的感染者。基于以上问题,本文尝试综合运用因果图模型和修正后的 SEIR 模型,在预测疫情发展趋势的同时评估疫情防控干预措施产生的影响。

## 1 国内新冠肺炎疫情传播建模

在生物数学领域,对单一群体传染病,有 SI、SIS、SIR、SEIR 等 4 个基本动力学模型(表 1),以及在此基础上衍生或改进的模型。

表 1 单一群体传染病动力学模型比较<sup>[7]</sup>

模型	群体分类	基本假设	模型假设及适用范围
SI	易感者 S、感染者 I	(1) 疾病随时间的变化比自然出生、自然死亡随时间变化显著,从而忽略后者;	在基本假设基础上,增加了感染者难以治愈的假定。例如艾滋病
SIS	易感者 S、感染者 I	(2) 一个病人单位时间内能传染的易感者数目与环境中易感者总数成正比;	在 SI 模型的基础上,增加了感染者可以康复且康复后不具有免疫力的假定,例如流感
SIR	易感者 S、感染者 I、康复者 R	(3) 单位时间内从感染人群移出的人数与感染者人数成正比	在 SI 模型的基础上,增加了感染者康复后具有终身免疫力的假定,例如水痘
SEIR	易感者 S、潜伏者 E、感染者 I、康复者 R		在 SIR 模型的基础上,增加了感染后存在潜伏期的考虑,例如 SARS、新冠肺炎

选定传染病动力学 SEIR 模型作为基础进行修正,研究武汉和国内其他地区(不含港澳台地区)新冠肺炎疫情的演化过程。经典的 SEIR 模型考虑了 4 类人群,即疫情暴发地区的易感人群(S)、潜伏人群(E)、感染人群(I)以及康复后体内产生抗体的免疫人群(R),人群总数为 N。考虑到本次疫情防控将降低死亡率作为主要目标,以及因果推理的需要,在 SEIR 模型中加入病亡人群(D)、流入人群(N<sub>in</sub>)、流出人群(N<sub>out</sub>)变量。修正后的 SEIR 模型

(记为 SEIRD 模型)动力学过程如图 1 所示,其微分方程见式(1)。

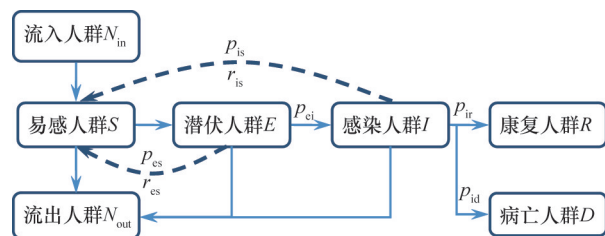


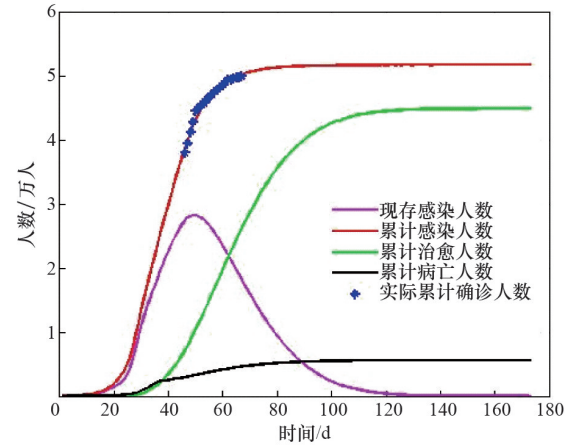
图 1 SEIRD 模型动力学过程

$$\begin{cases}
 \frac{dS(t)}{dt} = N_{in}(t) - N_{out}(t)S(t)/[S(t) + E(t) + I(t)] - \\
 \quad r_{is}p_{is}I(t)S(t)/N(t) - r_{es}p_{es}E(t)S(t)/N(t) \\
 \frac{dE(t)}{dt} = -N_{out}(t)E(t)/[S(t) + E(t) + I(t)] + \\
 \quad r_{is}p_{is}I(t)S(t)/N(t) + r_{es}p_{es}E(t)S(t)/N(t) - \\
 \quad p_{ei}E(t) \\
 \frac{dI(t)}{dt} = p_{ei}E(t) - p_{ir}I(t) - p_{id}I(t) - N_{out}(t)I(t)/ \\
 \quad [S(t) + E(t) + I(t)] \\
 \frac{dR(t)}{dt} = p_{ir}I(t) \\
 \frac{dD(t)}{dt} = p_{id}I(t) \\
 \frac{dN(t)}{dt} = N_{in}(t) - N_{out}(t) - p_{id}I(t)
 \end{cases}
 \quad (1)$$

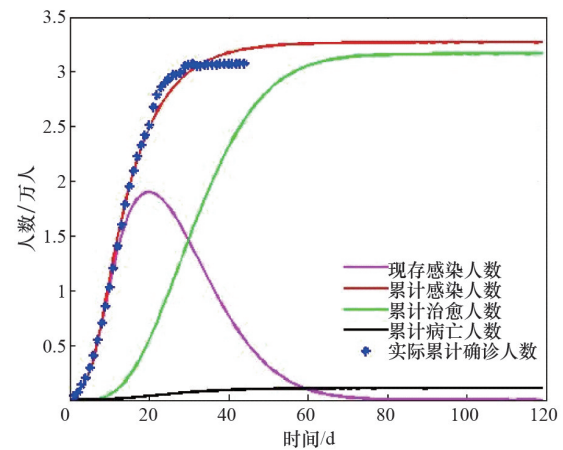
SEIRD 建模假设为: (1) 武汉地区感染者基本来自本地, 武汉之外地区初始时期以输入性病例为主; (2) 一个病人单位时间内能传染的易感者数目与环境内易感者总数成正比; (3) 感染者可以康复且康复后具有终身免疫力; (4) 易感者感染后经过一定的潜伏期才成为感染者; (5) 此疾病随时间的变化比自然出生、自然死亡随时间的变化显著(从而忽略后者)。

SEIRD 模型主要参数值设定: (1) 综合现有病例统计数据 and 专家经验, 将潜伏期设为 10 天, 假定潜伏者转为感染者概率服从均匀分布; (2) 潜伏者与易感者传染率主要取决于病毒特性, 根据抽样密切接触者确诊的概率, 均设为 2.69%; (3) 武汉地区以 2020 年 1 月 26 日加强交通管控, 2 月 13 日方舱医院等医护资源相继投入使用, 2 月 19 日实现全面管制且应收尽收作为 3 个主要时间节点分段设定潜伏者日接触率; 武汉之外地区则以 2020 年 1 月 29 日各地区实施一级响应; 2 月 3 日和 2 月 12 日中央政治局常委会专题部署作为 3 个主要时间节点分段设定; 具体数值通过数据拟合确定; (4) 由于大部分感染者已被集中收治, 其日接触率设为潜伏者的 1/10, 2 月 13 日后武汉地区加强医疗收治, 感染者日接触率降为最小值 0.001; (5) 新增病例治愈概率根据出院人数和在诊人数, 通过趋势外推法计算; (6) 新增死亡概率根据实际死亡病例数计算, 武汉之外地区死亡概率设为 0.19%, 2 月 4 日前武汉地区死亡概率为 1.69%, 其后为 0.31%。

针对图 1 构建的微分方程, 运用 MATLAB 语言进行编程, 拟合疫情数据(截至 2020 年 3 月 8 日), 并推演得到结果, 如图 2 所示。



(a) 武汉地区(横轴“0”对应 2019 年 12 月 31 日)



(b) 武汉之外地区(横轴“0”对应 2020 年 1 月 23 日)

图 2 基于 SEIRD 模型的国内新冠肺炎疫情传播过程

仿真结果表明, 在不考虑境外输入等情况下, 按照当前趋势发展, 武汉地区 2020 年 6 月上旬之前在院治疗人员全部出院; 武汉之外地区 2020 年 5 月上旬之前在院治疗人员全部出院。

## 2 疫情防控干预措施的因果分析评估

结合此次疫情传播特征和 SEIRD 模型主要参数, 考虑防控干预措施与传播态势演化的逻辑因果关系, 如图 3 所示。

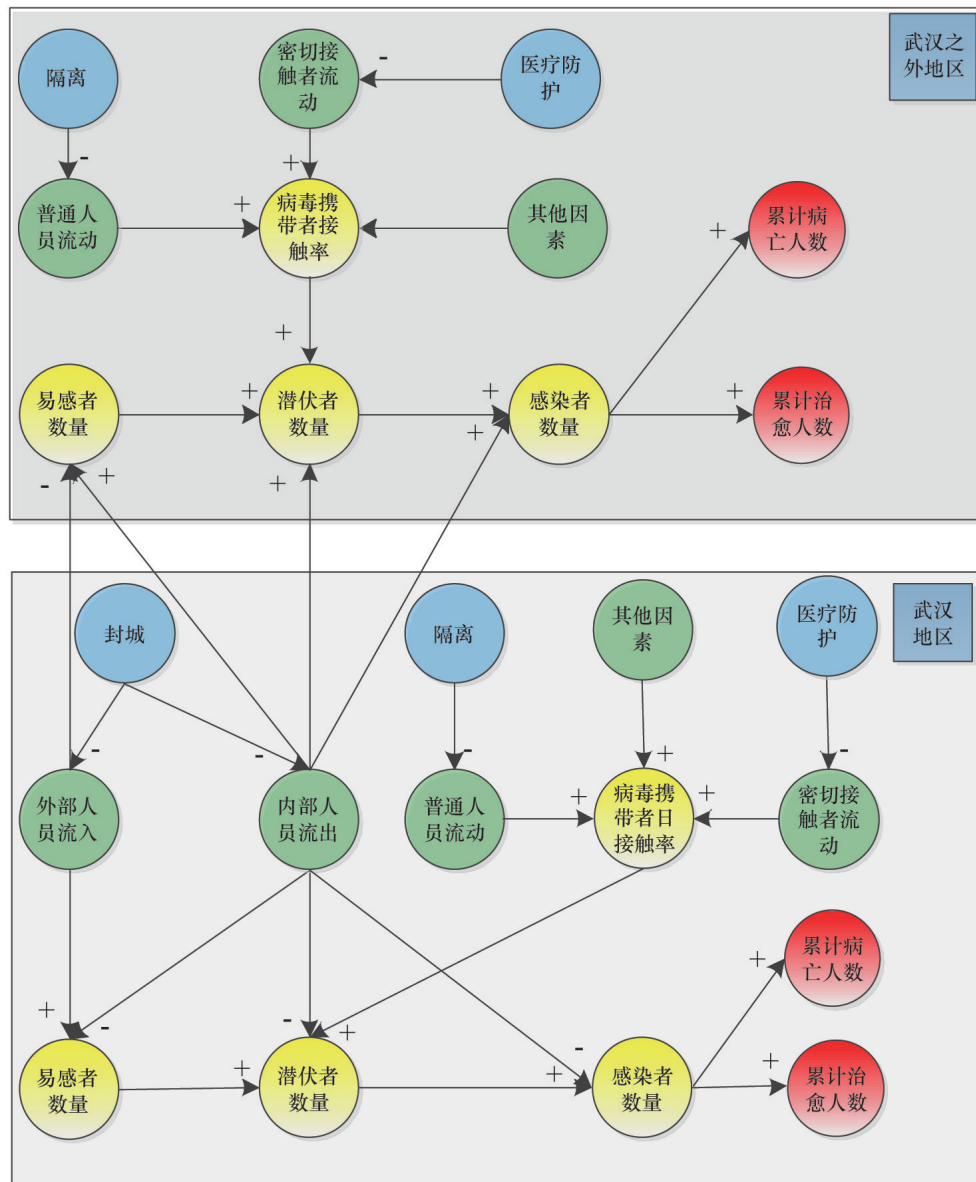


图3 疫情防控干预措施与疫情传播过程的因果图

基本假设:(1) 武汉加强交通管制措施,控制了人口在武汉和武汉之外地区的双向迁徙,这些措施除影响武汉地区的各类人群绝对数外,还会影响武汉之外地区的易感人群、潜伏人群、感染人群初始值;(2) 以加强社区管控为标志的隔离措施,直接反映地区的组织管理能力,可显著降低潜伏者与易感人群的接触率;(3) 建设和运营定点收治医院,反映医疗资源及其利用效率,可有效降低已确诊的感染者与易感人群的接触率,“应收尽收”措施几乎能够收治所有感染者和部分潜伏者;(4) 新冠

病毒在大规模传播阶段无显著变异,医疗救治仍以提高病人免疫力为主,尚未研制出特效药,暂不考虑干预措施对治愈率和病亡率的直接影响。

基于上述假设,在不改变病毒特性和医疗救治条件的前提下,用反事实推理手段定量评估交通管制、隔离和医护资源补充等措施对武汉和武汉之外地区疫情防控态势的影响。

## 2.1 交通管制措施对疫情传播的影响

假设武汉推后5天实施交通管制,大量潜伏者和感染者离开武汉输入到各地,国内疫情防控难度

加大。模型分析表明:在该假设下,武汉地区人数较现实情况净减约280万(流出人口增加约350万、流入人口增加约70万)。按实际情况下病毒感染率时间分布估算,预计增加流出病毒携带者(未确诊)7400余人,武汉地区累计感染人数预计减少38.9%(约20000人),病亡人数预计减少41.7%(约2320人);相应武汉之外地区累计感染人数预计增加超过104%(约34200人),病亡人数预计增加超过102%(约1100人);从而导致全国累计感染人数增长约16.8%(约14200人),病亡人数下降约18.5%(约1220人)。具体结果如图4所示。

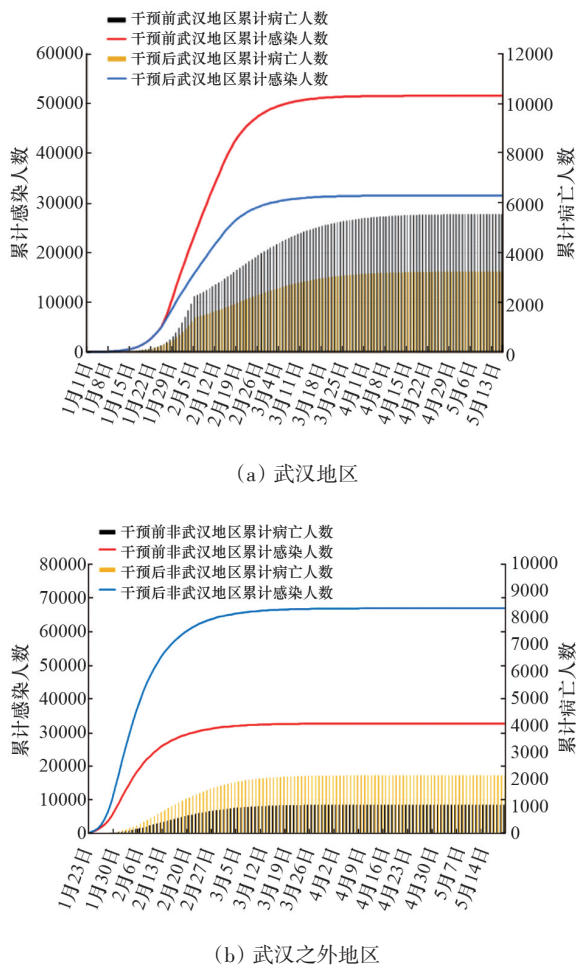


图4 假设武汉推后5天实施交通管制对疫情传播的影响

从感染人数和病亡人数看,推后实施交通管制,似能暂时一定程度上降低武汉地区的疫情风险,但结合社会舆论、疫情蔓延、经济发展等因素综

合考虑,全国医疗资源将难以集中支援湖北和武汉地区;如果考虑到潜伏者在迁徙时乘坐火车、飞机等密闭交通工具中的传播风险,向武汉之外地区流出的病毒携带者会更多;而且,后期各地疫情暴发后,全国医疗资源在武汉和武汉之外地区的配置决策更加困难;如果再考虑各地疫情暴发带来对全国的次生影响,很可能造成经济发展速度更长时间、更大幅度的减缓。由此可以看出,正因为党中央及时作出加强疫情防控决策,才未导致全国性新冠病毒大流行,稍有迟疑后果将非常严重。

## 2.2 社区隔离干预措施对疫情传播的影响

采取社区隔离措施能够降低病毒携带者与易感人群接触率,有效减少感染和病亡病例数量。从普遍性的隔离措施看,2020年1月26日开始隔离实现无差别的社区防控,2月19日完成全面管制、应收尽收,感染者和大量密切接触者被收治隔离。模型分析表明:如果普遍性干预措施推后5天,武汉地区累计感染人数预计增加超过211%(约109300人),病亡人数预计增加超过154%(约8590人),具体结果如图5所示。

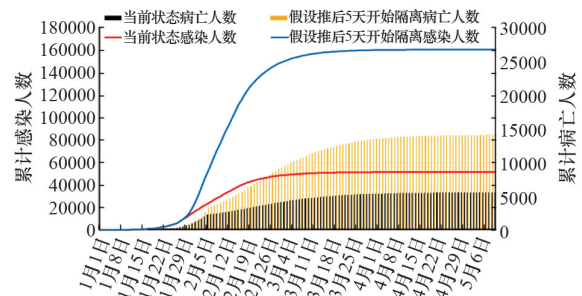


图5 假设武汉推后5天实施社区隔离对疫情传播的影响

## 3 综合评估

基于因果关系改进的传染病动力学模型可较好复盘国内新冠肺炎疫情,并具有一定的预测功能。经典的SEIR模型针对的是无(或不改变)干预措施下的社会传播过程,因疫情期间政府施加了强干预,影响机理比较复杂,很难通过直接调整参数拟合得到反映真实情况的模型。通过将参数调整

与干预措施进行因果关联,基于因果图分段调整模型参数,不仅使模型拟合更加准确,更为反事实推理提供了基础。初步预测(图2):在国内疫情不出现反弹且严控境外输入的前提下,国内疫情即将结束;武汉保卫战将于120天左右(即4月底至5月初)取得决定性胜利,武汉之外地区将在80天左右(即4月中上旬)基本阻断疫情。

通过因果推断与传染病动力学模型相结合,可以定量开展干预措施的反事实推理。假如武汉提前或推后采取干预措施,将对武汉以及全国疫情产生重要影响。定量分析表明:一是交通管制措施对全国而言非常及时有效。假如武汉推后5天实施交通管制,全国累计感染人数增加近1/5,尽管武汉地区累计感染人数会有近40%的减少,但武汉之外地区累计感染人数和病亡人数增加超过1倍;二是社区隔离遏制效果明显。假如武汉推后5天采取普遍性隔离措施,武汉地区累计感染人数将增加超过2倍,病亡人数将增加超过1.5倍。根据因果图模型分析,在病毒大规模传播后,部署方舱医院等医护资源不仅可以降低死亡率、增加治愈率,还可以降低接触率,具有遏制疫情效果。

## 4 结论

构建了改进传染病传播动力学模型,运用反事实推理方法评估了交通管制、社区隔离等防控干预措施对疫情蔓延趋势的影响。通过因果推断与现有模型相结合还可以解决其他同类问题,丰富对防疫决策有关问题的认识。上述分析验证了因果推断与现有模型相结合是可行的。该方法还可以用于分析:假如提前采取交通管制、社区隔离、部署方舱医院和火神山医院等医护资源以及采取一揽子组合策略,能够在多大程度上增加治愈人数、遏制病亡风险;假如中国推后采取干预措施,或者放松普遍性隔离措施,将对全球疫情产生的影响;假如美国、韩国、意大利、伊朗等国更加严格地借鉴中国抗疫经验,将对缓解全球疫情产生的影响;等等。

基于建模仿真和因果推断方法,可以对重大突发公共卫生事件的决策和执行进行模拟与反演,提

高各级政府应对重大突发公共卫生事件的社会治理能力。此外,分析新冠肺炎在全球传播现状与发展趋势,评估境外输入型病例对国内疫情防控造成的潜在风险,研究统筹国内与国外、经济发展与疫情防控的对策建议,将成为后续相关研究关注的问题。

**致谢** 军事科学院卜先锦、方立群、蔡春晓、王伟、冯占英、徐池等对本文作出一定贡献。

## 参考文献(Reference)

- [1] 国家卫生健康委员会. 疫情防控动态[EB/OL]. (2020-03-26). <http://www.nhc.gov.cn>.
- [2] 中华预防医学会新型冠状病毒肺炎防控专家组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征的最新认识[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 139-144.
- [3] 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[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 145-151.
- [4] Yu W, Tang G, Zhang L, et al. Decoding evolution and transmissions of novel pneumonia coronavirus using the whole genomic data[J]. ChinaXiv 2020, doi: 10.12074/202002.00033.
- [5] Tang X, Wu C, Li X, et al. On the origin and continuing evolution of SARS-CoV-2[J]. National Science Review, 2020, doi: 10.1093/nsr/nwaa036.
- [6] Zhou P, Yang X, Wang X, et al. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin [J]. Nature, 2020, 579: 270-273.
- [7] Anderson R M, Anderson B, May R M. Infectious diseases of humans: Dynamics and control[M]. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [8] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于SEIR的新型肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, doi: 10.12178/1001-0548.2020029.
- [9] 魏永越, 卢珍珍, 杜志成, 等. 基于改进的SEIR<sup>CAO</sup>传染病动力学模型进行新型冠状病毒肺炎疫情趋势分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(4): 470-475.
- [10] Yang Z, Zeng Z, 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.

## Dynamic model of COVID-19 transmission and assessment of control interventions based on causal analysis

YOU Guangrong<sup>1</sup>, YOU Hanlin<sup>1</sup>, ZHAO Dezhi<sup>2</sup>, LIAN Zhenyu<sup>1</sup>

1. Center for Assessment and Demonstration Research, Academy of Military Science, Beijing 100091, China

2. School of Graduate, Academy of Military Science, Beijing 100091, China

**Abstract** A modified SEIR model of single-population infectious disease (SEIRD) is proposed to investigate the transmission trend of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Chinese Mainland, whose outbreak originated in Wuhan, Hubei Province. The SEIRD model performs well in fitting training data and can be used to predict the future transmission trend. The counterfactual inference is applied to assess the control interventions based on SEIRD model. Using the quantitative analysis results, the effect on COVID-19 transmission can be assessed systematically under the adjustable control interventions, such as delaying the Wuhan Lockdown. Finally, the conclusions are summarized: the assessment approach combining modeling & simulation and causal inference is applicable in the bidirectional deduction study of decision-making and implementation in major public health emergencies (MPHE), which contributes to improve the social governance capabilities handling with MPHE of the governments in each level.

**Keywords** COVID-19; SEIR models; causal analysis; counterfactual inference ●



(责任编辑 刘志远)