



(OSID码)

• COVID-19 专栏 •

流行病学模型在突发公共卫生事件中的应用现状及问题剖析：以新型冠状病毒肺炎疫情为例

尹天露¹，刘朝杰²，张新国³，赵李伟¹，高晓欢⁴

【摘要】 背景 世界卫生组织于2020-03-11表示，新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情的暴发已经构成全球性“大流行”，本次疫情对各国的应急防控体系建设提出了巨大的挑战。流行病传播动力学特征的相关研究是目前全世界共同面对的极其重要的科学课题，有助于更好地对疫情进行掌控和防治，具有重要现实意义。但各国相关研究中使用的流行病学模型不尽相同，预测效果也不同。**目的** 通过范围综述的方法，系统梳理流行病学模型在COVID-19传播、预测中的应用现状及存在的问题，为健康中国背景下我国突发公共卫生事件的预测及预防提供经验借鉴。**方法** 计算机检索中国期刊全文数据库、维普中文科技期刊全文数据库、万方数据知识服务平台、中国生物医学文献数据库、PubMed、The Cochrane Library并手工检索相关文献，检索时间为数据库建库至2020年6月。通过阅读标题和摘要筛选合格的文献，提取相关数据进行分析。**结果** 最终纳入文献45篇，共涉及24个国家，分别为中国、美国、西班牙、意大利、法国、德国、英国、土耳其、伊朗、俄罗斯、巴西、加拿大、比利时、荷兰、瑞士、瑞典、丹麦、印度、韩国、智利、新加坡、日本、奥地利、挪威。模型类型有9大类，分别为仓室模型（SIR模型）、传播动力学模型（SEIR模型）、新时滞动力学模型（TDD-NCP模型）、逻辑增长模型（Logistic增长模型）、增长模型、自回归积分滑动平均模型（ARIMA模型）、指数平滑预测模型（Holt模型）、SEAIQR模型、其他模型。**结论** 从计算结果来看，这些模型的预测数据与实际数据存在一定的出入，但其从不同侧面为预测COVID-19疫情传播规律提供了借鉴。后期应考虑传播过程的随机性，提高模型的精确性；考虑潜伏期的传染性，提高模型的真实性和可靠性；考虑时空结构，提高模型的可扩展性。

【关键词】 肺炎；新型冠状病毒；流行病学模型；公共卫生事件；预测

【中图分类号】 R 563.19 **【文献标识码】** A DOI: 10.3969/j.issn.1008-5971.2020.08.002

尹天露，刘朝杰，张新国，等. 流行病学模型在突发公共卫生事件中的应用现状及问题剖析：以新型冠状病毒肺炎疫情为例[J]. 实用心脑血管病杂志，2020，28（8）：6-13. [www.syxnf.net]

YIN T L, LIU C J, ZHANG X G, et al. Application status and problem analysis of epidemiological models in public health emergencies: taking the COVID-19 epidemic as an example [J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2020, 28 (8) : 6-13.

Application Status and Problem Analysis of Epidemiological Models in Public Health Emergencies: Taking the COVID-19 Epidemic as an Example

YIN Tianlu¹, LIU Chaojie², ZHANG Xinguo³, ZHAO Liwei¹, GAO Xiaohuan⁴

1. Affiliated Hospital of Hebei University of Engineering, Handan 056002, China

2. Department of Health Management, La Trobe University, Melbourne 3086, Australia

3. Department of Epidemiology, Medical College, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

4. Beijing Huawei Tongke Medical Research Center, Beijing 100069, China

Corresponding author: GAO Xiaohuan, E-mail: ga Xiaohuan87@163.com

【Abstract】 Background The World Health Organization (WHO) said on 11 March 2020 that the outbreak of COVID-19 epidemic has constituted a global "pandemic", and this epidemic posed a huge challenge to the construction of emergency prevention and control systems in various countries. Research on the dynamics of epidemic transmission is an extremely important scientific topic facing the whole world, which is of great practical significance for better control and prevention of the epidemic. But the epidemiological models used in the relevant studies vary from country to country, and so do the predictions. **Objective** The main purpose of this paper is to systematically analyze the application status and problems of epidemiological models in the prediction of COVID-19 transmission through a method of scoping review, and provide experience for the

1.056002 河北省邯郸市，河北工程大学附属医院 2.3086 澳大利亚墨尔本市，澳大利亚乐卓博大学卫生管理系 3.056038 河北省邯郸市，河北工程大学医学院流行病学教研室 4.100069 北京市，北京华卫通科医学研究中心

通信作者：高晓欢，E-mail: ga Xiaohuan87@163.com

prediction and prevention of public health emergencies in our country under the background of Healthy China. **Methods** Computer retrieval of CAJ Full-text Database, CQVIP, Wanfang Data knowledge service platform, Chinese Biomedical Literature Database, PubMed, Cochrane Library and manual retrieval of relevant literatures, with a search period from the establishment of the database to June 2020. Through reading the titles and abstracts, the qualified literatures were selected and the relevant data were extracted for analysis. **Results** Finally, 45 studies were included, involving 24 countries, namely China, the United States, Spain, Italy, France, Germany, the United Kingdom, Turkey, Iran, Russia, Brazil, Canada, Belgium, the Netherlands, Switzerland, Sweden, Denmark, India, South Korea, Chile, Singapore, Japan, Austria, Norway. There were 9 types of models, namely SIR model, SEIR model, TDD-NCP model, Logistic growth model, growth model, ARIMA model, Holt model, SEAQIR model, and other models. **Conclusion** The published research provides references for predicting the spread of epidemic conditions from different aspects. However, there are some uncertainties conditions between the forecast data and actual data from the calculation results. Therefore, the randomness of the propagation process should be considered in the later stage to improve the accuracy of the model; the infectivity of the latent period should be considered to improve the authenticity of the model; the space and time structure also should be considered to improve the expandability of the model.

【Key words】 Pneumonia; SARS-CoV-2; Epidemiological model; Public health event; Forecasting

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 的暴发及其在全国及世界范围内的扩散、传播造成了巨大的社会影响, 自 COVID-19 疫情暴发以来, 各地各层卫生机构采取了积极的防控救援建设行动。我国刘廷杰等^[1]、胡艳等^[2]、吴艳玲等^[3]、李映霞等^[4] 分别通过调查中国不同城市的 COVID-19 发病率、暴露史等疫情数据, 分析当地 COVID-19 确诊病例流行病学特征, 为当地疫情防控建设的提升提供了科学依据。研究流行病传播动力学特征有助于更好地对疫情进行掌控和防治, 是目前全世界共同面对的极其重要的科学课题, 通过对多个国家在 COVID-19 疫情中采用的不同流行病学模型的分析模式进行梳理、评价、比较, 总结各国经验, 并预测下一步的发展趋势, 同时构建 COVID-19 疫情变化趋势的合理预测模型, 对 COVID-19 疫情防控无疑具有重要的现实意义, 这不仅可对我国未来重大传染病的防控提供预测模型方法学参考, 而且也可对当前世界 COVID-19 疫情防控提供决策依据。本研究通过范围综述 (scoping review) 的方法, 系统地梳理了流行病学模型在 COVID-19 传播预测中的应用现状及存在的问题, 以期健康中国背景下我国突发公共卫生事件的预测及预防提供经验借鉴。

1 资料与方法

1.1 研究设计 本研究利用范围综述方法研究流行病学模型在 COVID-19 传播、预测中的应用进展及存在的问题。范围综述在解决探索性研究问题时优于系统综述。系统综述旨在对一个已知研究领域的信息进行整合, 从而回答某一特定问题的特定干预的有效性。相反, 范围综述锁定了特定研究领域中的关键概念、证据类型和研究间的差距。相对于系统综述而言, 范围综述包括系统地检索、选择和整合研究证据。

1.2 研究问题 流行病学模型在 COVID-19 传播、预测中的应用现状如何?

1.3 文献检索策略 (1) 初步确定检索词为“新型冠状病毒肺炎 (COVID-19)”和“预测 (prediction)”或“模型 (model)”。

(2) 执行最终文献检索策略。计算机检索中国期刊全文数据库、维普中文科技期刊全文数据库、万方数据知识服务平台、

本文价值:

(1) 本文对多个国家在新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情中采用的不同流行病学模型的分析模式进行梳理、评价、比较, 总结各国经验, 对预测 COVID-19 疫情下一步的发展趋势及构建其预测模型、COVID-19 疫情防控具有重要的现实意义。(2) 本文汇总了各国的防控建议, 可为当前世界 COVID-19 疫情防控提供决策依据。(3) 本文以 COVID-19 疫情为例, 研究流行病学模型在突发公共卫生事件中的应用现状及存在的问题, 为我国未来重大传染病防控提供预测模型方法学参考。

中国生物医学文献数据库、PubMed、The Cochrane Library 并手工检索相关文献, 检索时间为数据库建库至 2020 年 6 月。

1.4 文献筛选 通过阅读标题和摘要筛选合格的文献。文献纳入标准: 研究主题为 COVID-19 疫情的预测模型, 明确数据来源, 明确预测模型建立所用的方法。文献排除标准: 重复文献。

1.5 数据提取 数据提取内容主要包括第一作者、发表年份、数据来源、模型类型、疫情防控建议。

2 结果

2.1 一般情况 初步检索文献 519 篇, 删除重复文献 218 篇, 通过阅读标题和摘要筛选合格的文献 45 篇^[5-49] (见图 1)。纳入文献共涉及 24 个国家, 分别为中国、美国、西班牙、意大利、法国、德国、英国、土耳其、伊朗、俄罗斯、巴西、加拿大、比利时、荷兰、瑞士、瑞典、丹麦、印度、韩国、智利、新加坡、日本、奥地利、挪威。模型类型有 9 大类, 分别为仓室模型 (SIR 模型)、传播动力学模型 (SEIR 模型)、新时滞动力学模型 (TDD-NCP 模型)、逻辑增长模型 (Logistic 增长模型)、增长模型、自回归积分滑动平均模型 (ARIMA 模型)、指数平滑预测模型 (Holt 模型)、SEAQIR 模型、其他模型 [AI (a hybrid artificial-intelligence) 模型、离散变量随机概率方法、平滑指数模型、新发传染病传播动力学模型、手机定位大数据的捕获再捕获模型、Bernstein 基函数建模二阶导数模型、常微分方程框架组成的模型、the Verhulst

equation 模型、集合种群模型〕（见表 1）。

2.2 预测模型分析

2.2.1 SIR 模型 传播动力学模型被广泛应用于预测疫情发展趋势，其中，群体性模型的典型代表是 SIR 模型。该模型将人群分成易感者（记作“S”）、传染者（记作“I”）及康复者（记作“R”）3 个群体，并用确定性微分方程组来描述这 3 类人群在数量上的变化关系，其被广泛应用于各种传染病的建模分析中。文献〔5-11〕采用 SIR 模型进行 COVID-19 疫情预测，所得疫情防控建议见表 2。

2.2.2 SEIR 模型 在实际使用中，SIR 模型有很多派生形式，如增设了已经暴露但是并没有传染能力的暴露者（记作“E”），这样的模型称为 SEIR 模型；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接触易感人群概率的差异〔13〕。文献〔12-24〕采用 SEIR 模型进

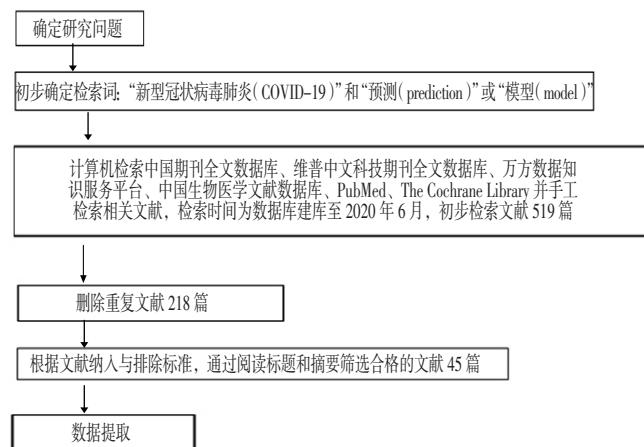


图 1 研究设计流程图

Figure 1 Research and design flow chart

表 3 应用 SEIR 模型进行 COVID-19 疫情预测所得疫情防控建议

Table 3 Recommendations for prevention and control of COVID-19 epidemic prediction by SEIR model

文献 (第一作者)	具体模型	疫情防控建议
游光荣 ^{〔12〕}	修正后的单-群体传染病 SEIR 模型	-
MANDAL ^{〔13〕}	SEIR 模型	需要进一步监控控制措施以减少与非洲的接触
KIM ^{〔14〕}	SEIR 模型	需要可以长期维持的非药物干预措施
LI ^{〔15〕}	基于 SEIR 模型的 e-ISHR 模型	隔离, 增加医院床位, 政府控制措施, 建立更多医院
HOU ^{〔16〕}	A well-mixed SEIR 模型	通过采取隔离等干预措施, 降低与潜在感染者的接触率, 可有效降低 COVID-19 感染的潜在峰值数量, 延缓高峰感染时间
CHATTERJEE ^{〔17〕}	SEIR 模型	通过立即建立非营利机构, 可以将总例数、住院例数、住 ICU 例数和死亡例数减少近 90%
CONTRERAS ^{〔18〕}	多组 SEIR 模型	
CAO ^{〔19〕}	SEIR 流行病学动力学模型	
GUERRERO-NANCUANTE ^{〔20〕}	广义 SEIR 模型	提前和推后采取公共卫生干预措施
YANG ^{〔21〕}	SEIR 模型和 LSTM 神经网络模型	
魏永越 ^{〔22〕}	改进后的 SEIR+CAQ 模型	
范如国 ^{〔23〕}	基于复杂网络理论的 SEIR 动力学模型	加强疫情防控的对策建议, 对精准做好疫情防控具有较好的指导作用
张宇 ^{〔24〕}	SEIR 模型	省级、市级累计确诊人数与人口迁徙强度有着较强的相关性, 表明交通对疫情传播具有一定的助推作用; 在交通运输工具有可能造成一定数量乘客被感染。采取隔离、降低乘客上座率等措施以降低乘客之间的接触机会, 可以有效降低乘客被感染的风险, 且效果明显好于通风和消毒措施。可见, 为了合理控制疫情沿交通线路传播, 在交通运输工具上应以降低上座率、加大乘客之间的乘坐距离、降低相互接触率等措施为主, 辅以增强通风和消毒措施

注: COVID-19= 新型冠状病毒肺炎; - 为无此项内容

表 2 应用 SIR 模型进行 COVID-19 疫情预测所得疫情防控建议

Table 2 Recommendations for prevention and control of COVID-19 epidemic prediction by SIR model

文献 (第一作者)	具体模型	疫情防控建议
BHANT ^{〔5〕}	简化的 SIR 模型	本研究观察到温度与疾病传染性有关, 建议疫情防控中注意环境温度的变化
KARAKO ^{〔6〕}	SIR 模型	在拥挤区域的时间减少到 4 h 以内, 将逐步遏制日本疫情
尹楠 ^{〔7〕}	SIR 模型	(1) 降低平均感染者数量; (2) 预防群体内的交叉感染和接触性感染; (3) 政府公共卫生政策的实施
张艳霞 ^{〔8〕}	改进的 SIR 模型方程和龙格库塔法	降低日接触率是最有效的疫情防控措施, 即采取全民相对隔离、少出门、戴口罩、早发现、早隔离、患者绝对隔离等方法, 通过勤洗手、多通风、锻炼身体等方式提高人们的自身免疫力, 从而有效降低日接触率
汪剑眉 ^{〔9〕}	SIR 扩展的非均匀感染模型	降低接触率是有效抑制疫情的核心杠杆
刘合财 ^{〔10〕}	隔离防控策略 SIR 模型	疫情防控中, 隔离防控策略是十分重要的
梅文娟 ^{〔11〕}	极限 SIR 预测模型	-

注: - 为无此项内容

行 COVID-19 疫情预测, 所得的疫情防控建议见表 3。

2.2.3 TDD-NCP 模型 CHEN 等^{〔25〕}及严闯等^{〔26〕}均提出采用 TDD-NCP 模型来描述 COVID-19 疫情的传播过程。刘可伋等^{〔27〕}将 TDD-NCP 模型用于研究部分省市的 COVID-19 疫情传播问题, 其通过增加模型的源项来模拟外来潜伏感染者对当地疫情的影响, 基于国家卫生健康委员会官方网站每日公布的累计确诊例数与治愈例数, 有效地模拟并预测了各地疫情的发展, 提出了基于 TDD-NCP 模型的再生数的两种计算方法, 并做了估计与分析, 发现疫情暴发初期再生数较大, 但随着各级政府防控力度的加大而逐渐减小; 最后, 分析了返程潮对上海疫情发展的影响, 并建议上海市继续加大防控力度, 以防疫情二次暴发。邵年等^{〔28〕}在 TDD-NCP 模型的

表 1 COVID-19 疫情预测模型汇总
Table 1 Summary of COVID-19 epidemic prediction models

模型类型	文献 (第一作者)	发表年份 (年)	数据来源	具体模型
SIR 模型	BHANT ^[5]	2020	英国、挪威、瑞典、丹麦、荷兰、法国、德国、意大利和西班牙	简化的 SIR 模型
	KARAKO ^[6]	2020	日本	SIR 模型
	尹楠 ^[7]	2020	仿真模拟	SIR 模型
	张艳霞 ^[8]	2020	中国	改进的 SIR 模型方程和龙格库塔法
	汪剑眉 ^[9]	2020	中国湖北省武汉市	SIR 扩展的非均匀感染模型
	刘合财 ^[10]	2020	中国	隔离防控策略 SIR 模型
SEIR 模型	梅文娟 ^[11]	2020	中国	极限 SIR 预测模型
	游光荣 ^[12]	2020	中国	修正后的单群体传染病 SEIR 模型
	MANDAL ^[13]	2020	印度	SEIR 模型
	KIM ^[14]	2020	韩国	SEIR 模型
	LI ^[15]	2020	中国湖北省 (除武汉市) 数据	基于 SEIR 模型的 e-ISHR 模型
	HOU ^[16]	2020	中国	A well-mixed SEIR 模型
	CHATTERJEE ^[17]	2020	印度	SEIR 模型
	CONTRERAS ^[18]	2020	智利	多组 SEIRA 模型
	CAO ^[19]	2020	中国湖北省	SEIR 流行病动力学模型
	GUERRERO-NANCUANTE ^[20]	2020	智利	广义 SEIR 模型
	YANG ^[21]	2020	中国	SEIR 模型和 LSTM 神经网络模型
	魏永越 ^[22]	2020	中国	改进后的 SEIR+CAQ 模型
	范如国 ^[23]	2020	中国	基于复杂网络理论的 SEIR 动力学模型
	张宇 ^[24]	2020	中国	SEIR 模型
TDD-NCP 模型	CHEN ^[25]	2020	中国	TDD-NCP 模型
	严阅 ^[26]	2020	中国	TDD-NCP 模型
	刘可伋 ^[27]	2020	中国上海市	TDD 模型
	邵年 ^[28]	2020	中国	TDD-NCP 模型
Logistic 增长模型	SHEN ^[29]	2020	中国 11 个省/市 (安徽省、北京市、重庆市、广东省、河南省、湖北省、湖南省、江苏省、江西省、上海市和浙江省) 以及其他 9 个国家 (伊朗、韩国、法国、德国、美国、意大利、西班牙、新加坡和日本) 的时间序列数据	Logistic 增长模型
增长模型	CHEN ^[30]	2020	美国	参数 Logistic 增长模型
增长模型	CÁSSARO ^[31]	2020	中国、奥地利、西班牙、比利时、意大利、德国、挪威	简单增长模型
	胡云鹤 ^[32]	2020	中国	动态增长率模型
	张琳 ^[33]	2020	中国	一般增长模型
ARIMA 模型	SINGH ^[34]	2020	美国、西班牙、意大利、法国、德国、英国、土耳其、伊朗、中国、俄罗斯、巴西、加拿大、比利时、荷兰和瑞士	ARIMA 模型
	CHINTALAPUDI ^[35]	2020	意大利	ARIMA 模型
Holt 模型	MARTINEZ ^[36]	2020	巴西	Holt 模型
	林挺葵 ^[37]	2020	中国广东省	Holt 双参数指数平滑模型
SEAQIR 模型	ZHANG ^[38]	2020	中国	SEAQIR 模型
	张原 ^[39]	2020	中国	SEAQIR 模型
其他模型	ZHENG ^[40] 、石耀霖 ^[41] 、王旭艳 ^[42] 、崔景安 ^[43] 、孟杰 ^[44] 、朱森 ^[45] 、CHEN ^[46] 、AMBİKAPATHY ^[47] 、SANCHEZ-CABALLERO ^[48] 、WU ^[49]	2020	中国、意大利和西班牙	AI 模型、离散变量随机概率方法、平滑指数模型、新发传染病传播动力学模型、手机定位大数据的捕获再捕获模型、Bernstein 基函数建模二阶导数模型、常微分方程框架组成的模型、the Verhulst equation 模型、集合种群模型

注: SIR 模型 = 仓室模型, SEIR 模型 = 传播动力学模型, TDD-NCP 模型 = 新时滞动力学模型, Logistic 增长模型 = 逻辑增长模型, ARIMA 模型 = 自回归积分滑动平均模型, Holt 模型 = 指数平滑预测模型

基础上,提出了基于随机动力学的时滞卷积模型和离散卷积模型,并基于中国疾病预防控制中心的相关研究结果和公开数据,反演出了 COVID-19 疫情的重要参数,拟合了武汉市及上海市 COVID-19 疫情的发展趋势。

2.2.4 Logistic 增长模型 SHEN^[29]利用中国 11 个省/市(安徽省、北京市、重庆市、广东省、河南省、湖北省、湖南省、江苏省、江西省、上海市和浙江省)以及其他 9 个国家(伊朗、韩国、法国、德国、美国、意大利、西班牙、新加坡和日本)的时间序列数据,采用非线性最小二乘法(NLS)估计参数的 Logistic 增长模型分析发现,Logistic 增长模型非常适合中国的数据,并且该研究能够提供 COVID-19 患者例数的估计并比较各地区之间的扩散速度。CHEN 等^[30]利用美国疾病控制与预防中心数据,采用参数 Logistic 增长模型对 COVID-19 疫情进行预测,结果显示,数据与模型拟合较好,证明了参数 Logistic 增长模型的效用;除了为公共卫生决策提供信息外,该研究的模型还增加了一个检测工具,以便更准确地捕捉 COVID-19 疫情的传播情况。

2.2.5 增长模型 CÁSSARO 等^[31]利用中国、奥地利、西班牙、比利时、意大利、德国、挪威的疫情数据,采用简单增长模型进行 COVID-19 疫情预测,结果显示,根据第 1 例 COVID-19 患者的相关数据,几乎不可能预测疫情将如何演变,因为其涉及许多必须考虑的因素,如传播的动态、人口统计数据、社会流动性的限制、个人保护措施(使用防护口罩和卫生程序)、病毒潜伏时间、传播率、气象因素等。胡云鹤等^[32]采用简单灵活、广泛适用的动态增长率模型对海外重点国家的 COVID-19 疫情发展特点和趋势进行了分析,结果显示,防控措施的及时性和有效性将决定疫情走向,多数海外国家并没有利用好中国为世界争取的宝贵时间,如果维持现有防控水平,情况不容乐观。张琳^[33]采用一般增长模型拟合了 2020-01-15 至 2020-02-15 中国 COVID-19 的累计确诊人数及 2020-01-23 至 2020-02-15 中国累计疑似人数和中国累计密切接触人数,结果显示,模型与国家卫生健康委员会公布的数据吻合。

2.2.6 ARIMA 模型 SINGH 等^[34]采用 ARIMA 模型分析美国、西班牙、意大利、法国、德国、英国、土耳其、伊朗、中国、俄罗斯、巴西、加拿大、比利时、荷兰和瑞士的 COVID-19 疫情数据发现,除中国、瑞士和德国外,其他国家中的 COVID-19 确诊例数、死亡例数和康复率将增长一倍。CHINTALAPUDI 等^[35]利用意大利卫生部的官方数据,采用 ARIMA 模型对 COVID-19 疫情进行预测,结果显示,预测模型的准确率为 93.75%;到 5 月底,预测受感染患者可能达到 182 757 例,康复患者可能达到 81 635 例。

2.2.7 Holt 模型 MARTINEZ 等^[36]利用巴西 COVID-19 疫情数据,采用 Holt 模型进行 COVID-19 疫情预测。林挺葵等^[37]依据广东省卫生健康委员会截至 2020-02-18 24:00 的官方数据构建传染病动力学 SIR 模型,计算现阶段粤西地区及各地级市 COVID-19 的基本再生数(R_0),并采用 Holt 双参数指数平滑模型预测其发展趋势,结果显示,该模型预测较准确;预测在现有高效防控措施下,粤西地区及各地级市 COVID-19

疫情正在好转,有望在 2 月底出现“拐点”。

2.2.8 SEAQIR 模型 ZHANG 等^[38]、张原等^[39]采用随机 SEAQIR 模型分析 COVID-19 的独特传播动态及中国大陆干预措施的实施效果,随后又对世界各国的 COVID-19 疫情情况、控制再生数、无症状感染者占比以及在没有额外管控、部分管控和有效管控情况下 COVID-19 疫情的未来发展趋势进行分析,并预测各国 COVID-19 疫情对中国输入型病例的影响。

2.2.9 其他模型 ZHENG 等^[40]利用中国 COVID-19 疫情数据,采用 AI 模型进行 COVID-19 疫情预测。石耀霖等^[41]发展了一种离散变量随机概率方法,并对湖北省 COVID-19 疫情发展进行模拟和预测,指出春节后回城的农民工和学生诱发大的疫情回弹可能性不大;但是世界上一些国家正处在疫情可能暴发的阶段,国家应该对入境人员做好检查和隔离管控工作。王旭艳等^[42]采用平滑指数模型对 COVID-19 累计确诊病例数、累计治愈出院病例数、累计死亡病例数、重症病例数及危重症病例数进行拟合和预测,结果显示,湖北省 COVID-19 疫情的防控措施是有效的,指数平滑法拟合效果较好,可用于 COVID-19 疫情预测。崔景安等^[43]针对 COVID-19 等新发传染病传播动力学模型的实际应用问题,提出了与确诊病例实时数据相关联的接触数,优化了新发传染病传播动力学模型,提升了模型的实用价值,把实时数据信息应用于模型参数估计;并利用公开数据,采用动力学模型,预估广州、武汉 COVID-19 传播的峰值、最终规模、达峰时间,结果显示,这类接触数可推广应用于其他新发传染病,同时可揭示其暴发过程中不同时期的传播风险。孟杰等^[44]聚焦于构造基于手机定位大数据的捕获再捕获模型,估计特定区域 COVID-19 传染高危人群总量,并利用互联网企业提供的经脱敏处理的天津市手机 APP 定位大数据验证了该方法的实践有效性。朱森等^[45]通过对累计确诊病例人数与疑似病例人数的综合量化,提出了抗击 COVID-19 疫情信心指数,其可客观地反映人们对战胜 COVID-19 疫情的信心;在此基础上,以误差目标为要求,通过模拟构建的 Bernstein 基函数模型,结合物理意义上的速率概念,深入地 COVID-19 疫情的发展趋势进行了分析,并取得了良好的效果。CHEN 等^[46]利用国家卫生健康委员会官方网站数据,采用二阶导数模型进行 COVID-19 疫情预测,在这项研究中,作者使用了第 2 个导数模型来表征中国 COVID-19 疫情的流行情况,并在头 2 个月内累计诊断出病例。AMBIKAPATHY 等^[47]利用由常微分方程框架组成的模型对印度 COVID-19 疫情相关数据进行分析,结果显示,实施至少 21 d 的严格禁闭有望减少 COVID-19 的传播,然而需要进一步延长至少 42 d 的严格禁闭才能明显减少 COVID-19 的传播;放松封锁措施可能导致指数级传播,这给该国的卫生保健系统造成了沉重负担。SANCHEZ-CABALLERO 等^[48]利用 WHO 官方网站中中国、意大利和西班牙的 COVID-19 疫情数据,采用 the Verhulst equation 模型进行 COVID-19 疫情预测,并用该模型预测德国、法国和英国的 COVID-19 疫情,结果证明该模型是可靠的。WU 等^[49]依据武汉市输出到中国内地以外城市的 COVID-19 患者数据,提供了一个武汉传染模型(集合种群模型),并且预测了国

内和全球流行病的公共卫生风险,旨在为社会和非药物干预提供预防措施。

3 深入分析及展望

3.1 研发预测模型的意义与作用 第一,模型可以揭示未来不同时段 COVID-19 疫情的总体发展状况(恶化还是缓解)、到达“拐点”的时刻以及未来的感染人数、潜伏期人数、发病期人数、地区 COVID-19 疫情走势等关键信息。第二,从模型计算出的参数可以表征不易直接观察到的 COVID-19 疫情动态参数,帮助理解并预测不同时期的 COVID-19 疫情特点,如有效再生数、 R_0 、感染者被医院收治比例等。第三,模型能够预测不同措施对 COVID-19 疫情发展的影响:不同时期的措施对模型参数的影响不同,这会直接在指标的发展曲线上反映出来。以上均可以辅助公共卫生、应急、疾控等部门和其他相关决策者制定 COVID-19 疫情防控策略,如落实在具体地点上的医疗投入、是否限制流动、对个人采取的防护建议、复工复学的可能性等。

笔者通过深入分析发现,已发表的文献从不同侧面为预测 COVID-19 疫情传播规律提供了借鉴,但是从计算结果来看,这些预测数据与实际数据存在较大出入^[5-49]。此外,在模型构建上均存在共同缺陷,主要包括以下几点:首先,均是基于均匀混合的假设,即认为各类人群的接触概率完全相同,均采用确定性微分方程模型来描述病毒传播过程,没有考虑病毒传播过程的随机性。其次,没有考虑 COVID-19 在潜伏期具有明显的传染性这一特点。此外,在模型构建过程中,均没有分析模型中重要参数的可识别性问题。如果部分参数是不可识别的,那么对这些参数的估计结果将严重依赖于所选择的初始值,进而降低了模型预测结果的可信度。同时,模型依据数据的权威性、检测数据是否涵盖预测地区的真实数据以及各个国家/地区防控措施的不同均会影响模型的预测效果。

3.2 展望 基于分析结果,后期应从以下几个方面深入研究以优化和改进 COVID-19 的传播机制模型:(1)考虑传播过程的随机性,提高模型的精确性。因此,随机性依然在病毒的传播过程中起着难以忽视的作用,在模型中加入随机性是有意义的。(2)考虑潜伏期的传染性,提高模型的真实性和模型中应该考虑潜伏期携带者与无症状感染者存在及其传染性、重症与轻症患者的转化以及医学追踪与隔离过程中存在的时滞。综合考虑这些现实因素,可使模型能够更加真实地描述实际情况。(3)考虑时空结构,提高模型的可扩展性。可以基于现有模型,引入多个城市及其在空间/交通上的联系,刻画人口在城市间的流动规律及其带来的疾病传播,包括交通工具上疾病的传播,使得模型能够符合实际情况。

在具体的建模过程中,需要依据病毒的传播方式来构建合适的模型。但是新型冠状病毒的传染性很强,且潜伏期就具有传染性,而且其具体的传播方式还没有完全被掌握^[9],这些均对准确建模提出了挑战。建议从病毒基因数据入手,基于病毒发育树来分析感染发生的时间,从而更加准确地描述传播过程。此外,基于临床数据的研究(如文献^[49]等)也能够提供关于病毒传播过程如 R_0 和代际间隔等要素的重要

信息,这些均能够帮助建立更加准确的模型。

COVID-19 疫情正在蔓延,确诊人数仍然在不断增长。相信通过建立准确、可靠的数学和统计模型,能够正确把握疾病的流行规律,从而制定科学、高效的防控措施,早日取得疫情防控战斗的胜利。

作者贡献:尹天露、刘朝杰、高晓欢进行文章的构思与设计;尹天露、高晓欢撰写论文,进行论文的修订,对文章整体负责、监督管理;张新国、赵李伟、高晓欢进行数据收集与整理;尹天露进行英文的修订。

本文无利益冲突。

参考文献

- [1] 刘廷杰,侯银续,高培,等.涡阳县新型冠状病毒肺炎流行病学分析[J].安徽预防医学杂志,2020,26(3):216-219,241.DOI:10.19837/j.cnki.ahyf.2020.03.015.
- [2] 胡艳,岑章建,周巾力,等.信阳市新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J].河南预防医学杂志,2020,31(7):481-483.DOI:10.13515/j.cnki.hnjpm.1006-8414.2020.07.001.
- [3] 吴艳玲,魏峰,李琦,等.承德市新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J].河北医学,2020,26(6):887-892.
- [4] 李映霞,谭文艳,刘勋,等.郴州市新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J/OL].上海预防医学.[2020-07-17].<https://doi.org/10.19428/j.cnki.sjpm.2020.20159>.
- [5] BHANOT G, DELISI C. Predictions for Europe for the COVID-19 pandemic from a SIR model [J]. medRxiv, 2020: 2020.05.26.20114058. DOI: 10.1101/2020.05.26.20114058.
- [6] KARAKO K, SONG P P, CHEN Y, et al. Analysis of COVID-19 infection spread in Japan based on stochastic transition model [J]. Biosci Trends, 2020, 14(2): 134-138. DOI: 10.5582/bst.2020.01482.
- [7] 尹楠.基于 SIR 模型的有限区域内新冠肺炎疫情传播仿真模拟[J].统计与决策,2020,36(5):15-20. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2020.05.003.
- [8] 张艳霞,李进.基于 SIR 模型的新冠肺炎疫情传播预测分析[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2020,37(1):94-101. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7872.2020.01.015.
ZHANG Y X, LI J. Prediction and analysis of propagation of novel coronavirus pneumonia epidemic based on SIR model [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2020, 37(1): 94-101. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7872.2020.01.015.
- [9] 汪剑眉,李钢.新冠肺炎非均匀感染力传播模型与干预分析[J].电子科技大学学报,2020,49(3):392-398.
WANG J M, LI G. A transmission model of COVID-19 with heterogeneous force of infectiousness and intervention analysis [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 392-398.
- [10] 刘合财.基于隔离防控策略下的新冠肺炎 COVID-19 传染模型[J].贵阳学院学报(自然科学版),2020,15(1):117-120. DOI: 10.16856/j.cnki.52-1142/n.2020.01.027.
- [11] 梅文娟,刘震,朱静怡,等.新冠肺炎疫情极限 IR 实时预测

- 模型[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 362-368.
- MEI W J, LIU Z, ZHU J Y, et al. Extreme IR model for COVID-19 real-time forecasting[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 362-368.
- [12] 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.
- YOU G R, YOU H L, ZHAO D Z, et al. Dynamic model of COVID-19 transmission and assessment of control interventions based on causal analysis[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(6): 90-96. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.06.013.
- [13] MANDAL M, JANA S, NANDI S K, et al. A model based study on the dynamics of COVID-19: prediction and control[J]. Chaos Solitons Fractals, 2020: 109889. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.109889.
- [14] KIM S, SEO Y B, JUNG E. Prediction of COVID-19 transmission dynamics using a mathematical model considering behavior changes in Korea[J]. Epidemiol Health, 2020, 42: e2020026. DOI: 10.4178/epih.e2020026.
- [15] LI S J, SONG K, YANG B R, et al. Preliminary assessment of the COVID-19 outbreak using 3-staged model e-ISHR[J]. J Shanghai Jiaotong Univ Sci, 2020, 25(2): 157-164. DOI: 10.1007/s12204-020-2169-0.
- [16] HOU C, CHEN J X, ZHOU Y Q, et al. The effectiveness of quarantine of Wuhan City against the corona virus disease 2019 (COVID-19): a well-mixed SEIR model analysis[J]. J Med Virol, 2020, 92(7): 841-848. DOI: 10.1002/jmv.25827.
- [17] CHATTERJEE K, CHATTERJEE K, KUMAR A, et al. Healthcare impact of COVID-19 epidemic in India: a stochastic mathematical model[J]. Med J Armed Forces India, 2020, 76(2): 147-155. DOI: 10.1016/j.mjafi.2020.03.022.
- [18] CONTRERAS S, VILLAVICENCIO H A, MEDINA-ORTIZ D, et al. A multi-group SEIRA model for the spread of COVID-19 among heterogeneous populations[J]. Chaos Solitons Fractals, 2020, 136: 109925. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.109925.
- [19] CAO S, FENG P, SHI P. Study on the epidemic development of corona virus disease-19 (COVID-19) in Hubei province by a modified SEIR model[J]. Journal of Zhejiang University (Medical Sciences), 2020, 49(2): 178. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9292.2020.02.05.
- [20] GUERRERO-NANCUANTE C, MANRÍQUEZ P R. An epidemiological forecast of COVID-19 in Chile based on the generalized SEIR model and the concept of recovered[J]. Medwave, 2020, 20(4): e7898. DOI: 10.5867/medwave.2020.04.7898.
- [21] 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]. J Thorac Dis, 2020, 12(3): 165-174. DOI: 10.21037/jtd.2020.02.64.
- [22] 魏永越, 卢珍珍, 杜志成, 等. 基于改进的 SEIR+CAQ 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.
- [23] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于 SEIR 的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 369-374. DOI: 10.12178/1001-0548.2020029.
- FAN R G, WANG Y B, LUO M, et al. SEIR-based COVID-19 transmission model and inflection point prediction analysis[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 369-374. DOI: 10.12178/1001-0548.2020029.
- [24] 张宇, 田万利, 吴忠广, 等. 基于改进 SEIR 模型的新冠肺炎疫情沿交通线路传播机制[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 150-158. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.014.
- [25] CHEN Y, CHENG J, JIANG Y, et al. A time delay dynamical model for outbreak of 2019-nCoV and the parameter identification[J]. J Inverse Ill-Posed Probl, 2020, 28(2): 243-250. DOI: 10.1515/jiip-2020-0010.
- [26] 严阅, 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[J]. 中国科学: 数学, 2020, 50(3): 385-392.
- [27] 刘可伋, 江渝, 严阅, 等. 局部新冠肺炎时滞模型及再生数的计算[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 453-460.
- LIU K J, JIANG Y, YAN Y, et al. A time delay dynamic model with external source and the estimation of reproductive number for the outbreak of novel coronavirus pneumonia[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(3): 453-460.
- [28] 邵年, 钟敏, 程晋, 等. 基于 FUDAN-CCDC 模型对新冠肺炎的建模和确诊人数的预测[J]. 数学建模及其应用, 2020, 9(1): 29-32.
- [29] SHEN C Y. Logistic growth modelling of COVID-19 proliferation in China and its international implications[J]. Int J Infect Dis, 2020, 96: 582-589. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.04.085.
- [30] CHEN D G, CHEN X G, CHEN J K. Reconstructing and forecasting the COVID-19 epidemic in the United States using a 5-parameter Logistic growth model[J]. Glob Health Res Policy, 2020, 5: 25. DOI: 10.1186/s41256-020-00152-5.
- [31] CÁSSARO F A M, PIRES L F. Can we predict the occurrence of COVID-19 cases? Considerations using a simple model of growth[J]. Sci Total Environ, 2020, 728: 138834. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138834.
- [32] 胡云鹤, 孔京, 杨路, 等. 动态增长率模型与海外新冠疫情分析[J]. 应用数学学报, 2020, 43(2): 452-467.
- HU Y H, KONG J, YANG L, et al. A dynamic growth rate model and its application in global COVID-19 epidemic analysis[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2020, 43(2): 452-467.
- [33] 张琳. 新冠肺炎疫情传播的一般增长模型拟合与预测[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 345-348. DOI:

- 10.12178/1001-0548.2020037.
- ZHANG L. Fitness of the generalized growth to the COVID-19 data [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020, 49 (3): 345-348. DOI: 10.12178/1001-0548.2020037.
- [34] SINGH R K, RANI M, BHAGAVATHULA A S, et al. Prediction of the COVID-19 pandemic for the top 15 affected countries: advanced autoregressive integrated moving average (ARIMA) model [J]. *JMIR Public Health Surveill*, 2020, 6 (2): e19115. DOI: 10.2196/19115.
- [35] CHINTALAPUDI N, BATTINENI G, AMENTA F. COVID-19 virus outbreak forecasting of registered and recovered cases after sixty day lockdown in Italy: a data driven model approach [J]. *Wei Mian Yu Gan Ran Za Zhi*, 2020, 53 (3): 396-403. DOI: 10.1016/j.jmii.2020.04.004.
- [36] MARTINEZ E Z, ARAGON D C, NUNES A A. Short-term forecasting of daily COVID-19 cases in Brazil by using the Holt's model [J]. *Rev Soc Bras Med Trop*, 2020, 53: e20200283. DOI: 10.1590/0037-8682-0283-2020.
- [37] 林挺葵, 吴家园, 刘华锋, 等. 粤西地区及各地级市新型冠状病毒肺炎疫情发展趋势预测分析—基于 Holt 双参数指数平滑模型的研究 [J]. *实用心脑血管病杂志*, 2020, 28 (2): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5971.2020.02.004.
- LIN T K, WU J Y, LIU H F, et al. Prediction of epidemic trend of COVID-19 in Western Guangdong and other prefecture-level cities: a study based on Holt two-parameter exponential smoothing model [J]. *Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease*, 2020, 28 (2): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5971.2020.02.004.
- [38] ZHANG Y, YOU C, CAI Z, et al. Prediction of the COVID-19 outbreak based on a realistic stochastic model [EB/OL]. [2020-07-17]. https://www.researchgate.net/publication/339926120_Prediction_of_the_COVID-19_outbreak_based_on_a_realistic_stochastic_model.
- [39] 张原, 尤种, 蔡振豪, 等. 新冠肺炎 (COVID-19) 新型随机传播动力学模型及应用 [J]. *应用数学学报*, 2020, 43 (2): 440-451.
- ZHANG Y, YOU C, CAI Z H, et al. A new stochastic dynamics model for COVID-19 and its application [J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 2020, 43 (2): 440-451.
- [40] ZHENG N N, DU S Y, WANG J J, et al. Predicting COVID-19 in China using hybrid AI model [J]. *IEEE Trans Cybern*, 2020, 50 (7): 2891-2904. DOI: 10.1109/TCYB.2020.2990162.
- [41] 石耀霖, 程惠红, 黄禄渊, 等. 用离散随机模型研究湖北新冠肺炎 COVID-19 流行病动力学特征 [J]. *中国科学院大学学报*, 2020, 37 (2): 145-154. DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.02.001.
- SHI Y L, CHENG H H, HUANG L Y, et al. Using a discrete stochastic model to study the epidemic dynamics of COVID-19 in Hubei, China [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37 (2): 145-154. DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.02.001.
- [42] 王旭艳, 喻勇, 胡樱, 等. 基于指数平滑模型的湖北省新冠肺炎疫情预测分析 [J]. *公共卫生与预防医学*, 2020, 31 (1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2483.2020.01.001.
- WANG X Y, YU Y, HU Y, et al. COVID-19 analysis and forecast based on Exponential Smoothing Model in Hubei Province [J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2020, 31 (1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2483.2020.01.001.
- [43] 崔景安, 吕金隆, 郭松柏, 等. 新发传染病动力学模型——应用于 2019 新冠肺炎传播分析 [J]. *应用数学学报*, 2020, 43 (2): 147-155.
- [44] 孟杰, 杨贵军, 乔婷婷, 等. 基于捕获再捕获模型的新冠肺炎传染高危人群估计 [J]. *应用数学学报*, 2020, 43 (2): 251-264.
- MENG J, YANG G J, QIAO T T, et al. Estimation of high-risk groups of COVID-19 infection based on capture-recapture model [J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 2020, 43 (2): 251-264.
- [45] 朱森, 朱建平. 基于 Bernstein 模型的新冠肺炎 (COVID-19) 疫情发展研究 [J]. *应用数学学报*, 2020, 43 (2): 402-414.
- ZHU M, ZHU J P. Research on the development of coronavirus (COVID-19) epidemic based on Bernstein model [J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 2020, 43 (2): 402-414.
- [46] CHEN X G, YU B. First two months of the 2019 coronavirus disease (COVID-19) epidemic in China: real-time surveillance and evaluation with a second derivative model [J]. *Glob Health Res Policy*, 2020, 5: 7. DOI: 10.1186/s41256-020-00137-4.
- [47] AMBIKAPATHY B, KRISHNAMURTHY K. Mathematical modelling to assess the impact of lockdown on COVID-19 transmission in India: model development and validation [J]. *JMIR Public Health Surveill*, 2020, 6 (2): e19368. DOI: 10.2196/19368.
- [48] SANCHEZ-CABALLERO S, SELLES M A, PEYDRO M A, et al. An efficient COVID-19 prediction model validated with the cases of China, Italy and Spain: total or partial lockdowns? [J]. *J Clin Med*, 2020, 9 (5): E1547. DOI: 10.3390/jcm9051547.
- [49] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study [J]. *Lancet*, 2020, 395 (10225): 689-697. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9.
- (收稿日期: 2020-07-05; 修回日期: 2020-08-06)
(本文编辑: 崔丽红)