

• 新冠肺炎(NCP)防治专栏



开放科学标识码
(OSID)

基于 SEIR 模型分析相关干预措施在 新型冠状病毒肺炎疫情中的作用

耿辉¹, 徐安定², 王晓艳¹, 张勇³, 尹小妹⁴, 马茂¹, 吕军⁵

(1. 西安交通大学 第一附属医院 体检部, 西安 710061; 2. 暨南大学 附属第一医院 神经内科, 广州 510630; 3. 西安交通大学 第一附属医院 国有资产办公室, 西安 710061; 4. 西安交通大学 第一附属医院 儿科, 西安 710061; 5. 暨南大学 附属第一医院临床
研究部, 广州 510630)

[摘要] 目的: 评价新型冠状病毒(2019-nCoV)肺炎疫情中相关干预措施的作用。方法: 收集 2019-nCoV 疫情数据, 分析 2019-nCoV 的传播特点, 利用 python 建立 SEIR 模型, 加入潜伏期传染率、感染人群变化率等新参数, 尝试分析防控手段的有效性。结果: 给出多种相关干预措施下疫情发展趋势的预测。模型显示, 基于严格限制出行的隔离措施能够减缓 2019-nCoV 发病曲线发展的趋势, 使潜伏和感染人群的峰值降低 45.71% 和 29.90%, 潜伏人群数量较快到达群峰; 模拟发现, 本次疫情的拐点将出现在 3 月初, 但对比 2019-nCoV 疫情实际数据, 疫情拐点或将提前出现。结论: 2019-nCoV 肺炎疫情的防控措施是有效的, 各地方政府应严格执行隔离制度, 切断传播途径, 巩固成果, 全力遏制 2019-nCoV 传播。

[关键词] 新型冠状病毒; python; SEIR 模型; 干预效果

[中图分类号] R183 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9965(XXXX)XX-0001-07

Analysis of the role of current prevention and control measures in the epidemic of new coronavirus based on SEIR model

GENG Hui¹, XU Anding², WANG Xiaoyan¹, ZHANG Yong³, YIN Xiaomei⁴, MA Mao¹, Lü Jun⁵

(1. Physical Examination center, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 2. Department of Neurology, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510630, China; 3. State-owned Assets Office, First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 4. Pediatrics, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 5. Department of Clinical Research, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510630, China.)

[Abstract] **Objective:** To evaluate the role of related interventions in the new coronavirus pneumonia (2019-nCoV) epidemic. **Methods:** By collecting 2019-nCoV epidemic data, analyzing the transmission characteristics of 2019-nCoV, using python to build a SEIR model, adding new parameters such as the

[收稿日期] 2020-02-08

[基金项目] 国家社会科学基金一般项目(16BGL183); 陕西省软科学研究计划一般项目(2017KRM211); 西安交通大学第一附属医院院基金(2019RKX-05)

[作者简介] 耿辉(1984—), 男, 工程师, 研究方向: 健康大数据, E-mail: 165313459@qq.com

通讯作者: 吕军, 男, 博士, 特聘研究员, 研究方向: 临床大数据挖掘, E-mail: lyujun2019@163.com; 马茂, 男, 博士, 教授, 研究方向: 健康管理, E-mail: mamacao2007@163.com

incubation rate of infection and the rate of change of infected people, and trying to analyze the effectiveness of current prevention and control measures. **Results:** The development trend of the epidemic situation under a variety of related interventions was successfully predicted. The model shows that the isolation measures based on strict travel restrictions can slow down the development trend of the new coronavirus curve, reducing the peak of latent and infected populations by 45.71% and 29.90%. The number of people will reach the peak of the population quickly; the inflection point of this epidemic will be found at the beginning of March in the simulation. Through the comparative analysis of the model and the actual data of 2019-nCoV, it is found that the actual inflection point may appear in advance. **Conclusion:** At present, the prevention and control measures of the new coronavirus pneumonia epidemic have achieved a certain effect. Local governments should continue to strictly implement the isolation system, cut off the transmission channels, consolidate the results, and make every effort to curb the 2019-nCoV transmission.

[**Key words**] novelcoronavirus; python; SEIR model; intervention effect Prevention strategies

新型冠状病毒(2019-nCoV)是一种 β 属的冠状病毒,引起以肺部炎症病变为主的疾病,导致一系列与SARS相似的呼吸系统疾病症状,如呼吸困难、呼吸窘迫综合征或脓毒症休克,增加患者进入重症监护室(ICU)的概率和病死率^[1-2]。自2019年12月在湖北省武汉市发现2019-nCoV以来,疫情快速蔓延。国家卫生健康委员会疫情通报显示,截至2020年2月8日,确诊人数33 738人,密切接触者371 905人^[3]。为快速抑制病情蔓延,国家出台多种举措,如延长春节假期、企业延迟复工、学校延期开学、限制出行、居家隔离等。本文尝试从2019-nCoV的特点入手建立SEIR模型,分析目前防控手段的有效性。

1 对象与方法

1.1 数据来源

本文数据均取自国家卫生健康委员会官方网站2020年1月21日至2月8日公布的统计数据。随着2019-nCoV的快速传播,自1月25日开始,各地纷纷启动“重大突发公共卫生事件Ⅰ级响应”,自2月2日起更有多地限制社区居民外出,每家每天指派一人购买生活用品,因此我们认定从1月25日开始,病毒即进入有干预传播状态,自2月2日起,病毒进入强干预传播状态。

1.2 SEIR模型的建立

本文尝试使用SEIR模型揭示2019-nCoV的传播过程,鉴于2020年1月26日国家卫生健康委员会宣布2019-nCoV肺炎潜伏期具有传染性,因此本文设计了包含潜伏期传染性的SEIR流行病模型。模型

涉及4类人群:易感人群(S)、潜伏人群(E)、感染人群(I)、移除人群(R),假设康复概率是 γ ,易感者的感染概率是 β ,感染者接触的人数是 r ,潜伏者会传染易感者的概率为 β_2 ,潜伏者每天接触的人数是 r_1 ,另假设潜伏者的传染率与易感者的感染概率相同,则有如下微分方程组^[4]:

$$\begin{aligned} S_i &= S_{i-1} - r\beta I_{i-1}S_{i-1}/N - r_1\beta_2 E_{i-1}S_{i-1}/N \\ E_i &= E_{i-1} + r\beta I_{i-1}S_{i-1}/N - \alpha E_{i-1} + r_1\beta_2 E_{i-1}S_{i-1}/N \\ I_i &= I_{i-1} + \alpha E_{i-1} - \gamma I_{i-1} \\ R_i &= R_{i-1} + \gamma I_{i-1} \end{aligned}$$

其中, i 是2019-nCoV传播的天数, N 是总人数, $N = S_i + I_i + R_i + E_i$, S_i , E_i , I_i , R_i 分别表示第 i 天时易感人群人数、潜伏人群人数、感染人群人数、移除人群人数, α 表示潜伏者转化为感染者的概率。

1.3 确定方程相关参数

总人口 N :人口数据来源为中华人民共和国国家统计局公布的2018年年末武汉人口数据,共计883.73万人^[5]。

感染概率 β 、 β_2 以及潜伏者转化为感染者的概率 α 的计算:在实际生活中,因采取了干预措施,假设感染者平均每天接触人数为 $r=10$,潜伏者接触人数 $r_1=10$,疫情期,易感人群数目等于总人数减去感染和潜伏人群,感染人群的变化率为 $dI/dt = \beta I_i S_i / N - \gamma I_i \approx (\beta - \gamma) I_i$,依据国家卫计委在疫情爆发期公布的数据进行拟合后估算 $\beta = \beta_2 \approx 0.045$ 。依据 $\alpha = I_i / E_i$ 计算得到 $\alpha \approx 0.10$ 。

基本再生数 R_0 的估算: R_0 是指在发病初期,当所有人均为易感者时,一个病人在其平均患病期内

所传染的人数^[6]。基于 SEIR 模型,由公式 $R_0=1+\lambda T_g+P(1-P)\times(\lambda T_g)^2$ 计算 R_0 值,其中 λ 是早期感染率, $\lambda=\ln Y(i)/i$, $Y(i)$ 是截至到 i 时刻的感染人数, $Y(i)$ 取值来自国家统计局实际公布人数,潜伏期用 T_L 表示,感染期表示为 T_i ,生成时间 T_g 的计算可近似于 T_L 和 T_i 的序列间隔,计算得出 $T_g\in(7.0,8.4)$, P 为潜伏期占生成时间的比值,即 $P=T_L/T_g$,由公式计算可得 2019-nCoV 的 P 值为 0.70,将 P 值代入 R_0 公式计算可得 $R_0\approx 2.38-2.72$ ^[7-8]。本文预测的感染人数来自 Python 建立 SEIR 模型进行参数拟合后的预测结果。

2 结果

据方程确定相关参数后,拟合 SEIR 模型计算 R_0

结果如表 1 所示,并将相关参数代入 Python 建立 SEIR 模型进行参数拟合后的预测结果如图 1 所示。

表 1 基于 SEIR 模型的基本再生数及关键参数
Table 1 Basic regeneration numbers and key parameters based on the SEIR model

数据来源	T_g	$Y(i)$	i	R_0
国家统计局动态数据	7.0	33738	63	2.4
国家统计局动态数据	8.4	33738	63	2.7

2.1 停工停学但不限制出行措施实行后 2019-nCoV 的爆发趋势

在采取停工停学但不限制出行防控措施下 2019-nCoV 的爆发趋势如图 1 所示,疫情会在 2 月底附近迎来顶峰,并且感染人数将远超目前的情况。

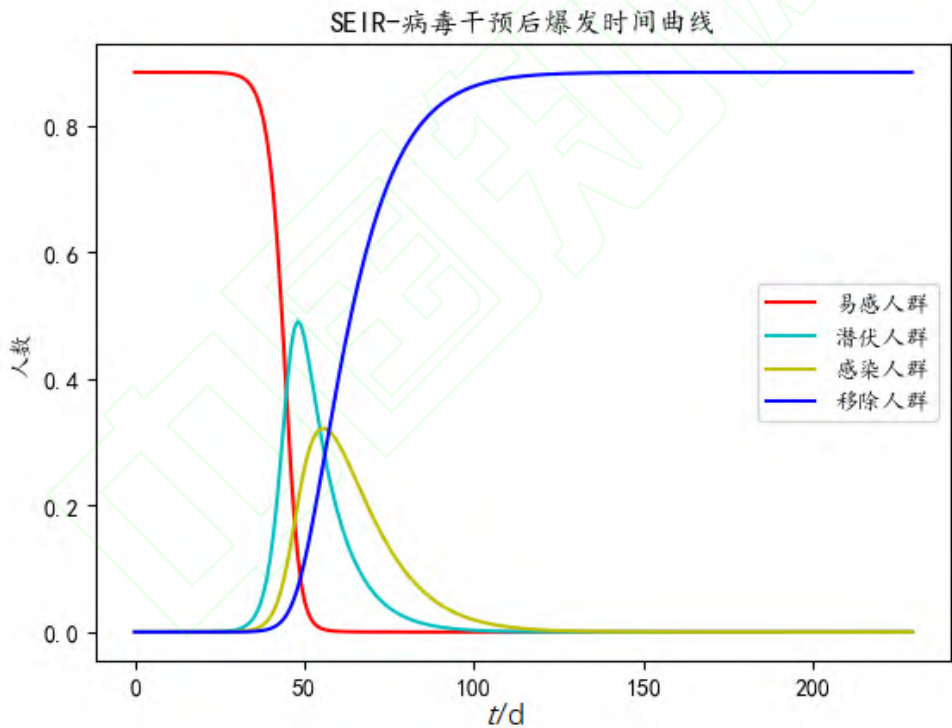


图 1 不限出行措施实行后 2019-nCoV 的爆发趋势
Figure 1 Outbreak trend of 2019-nCoV after the implementation of unlimited travel measures

2.2 在限制出行措施下 2019-nCoV 的爆发趋势

图 2 显示了限制出行措施,即 2 月 2 日起限制社区居民外出,每家每天指派一人购买生活用品政策,假设感染者平均每天接触人数 $r=3$,潜伏者接触人数 $r_1=5$,治愈率较之前有所提高,从国家卫生健康委员会疫情通报数据上显示,治愈率提高 25%,即:

γ 从 0.095 提高了 25 个百分点至 0.11875,还可以观察到,在限制社区出行后,感染曲线明显平滑减缓,潜伏和感染人群的峰值分别降低了 45.71% 和 29.90%,我们还发现潜伏者的峰值和感染者的峰值相差一周左右,潜伏者的峰值更快到达,成为本次疫情拐点的标志。此外,模型的峰值出现在第 107

天,从12月12日武汉市卫健委进行的回顾式调查发现第一例患者发病,判断其感染病毒时间应大致

在12月初甚至更早的时间,所以,推断出模型疫情拐点出现在3月初。

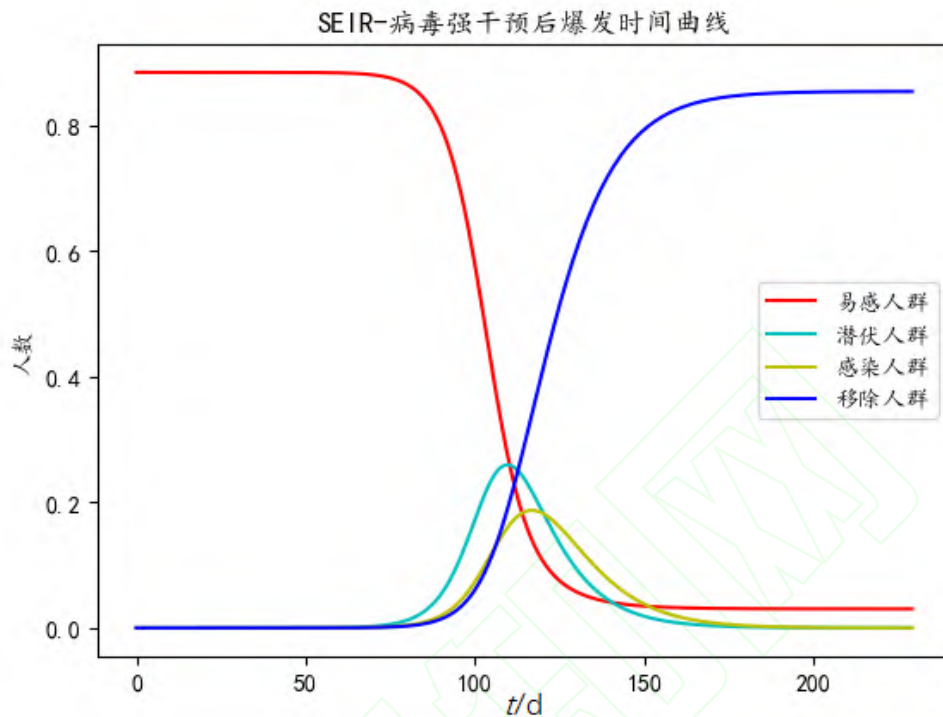


图2 限制出行措施下疫情变化趋势

Figure 2 Trend of epidemic situation under travel restrictions

图3显示了实际和预测确诊病例的变化趋势,实际确诊病例已经出现了下降,显示疫情已经得到

明显的控制,真实疫情拐点或将提前。

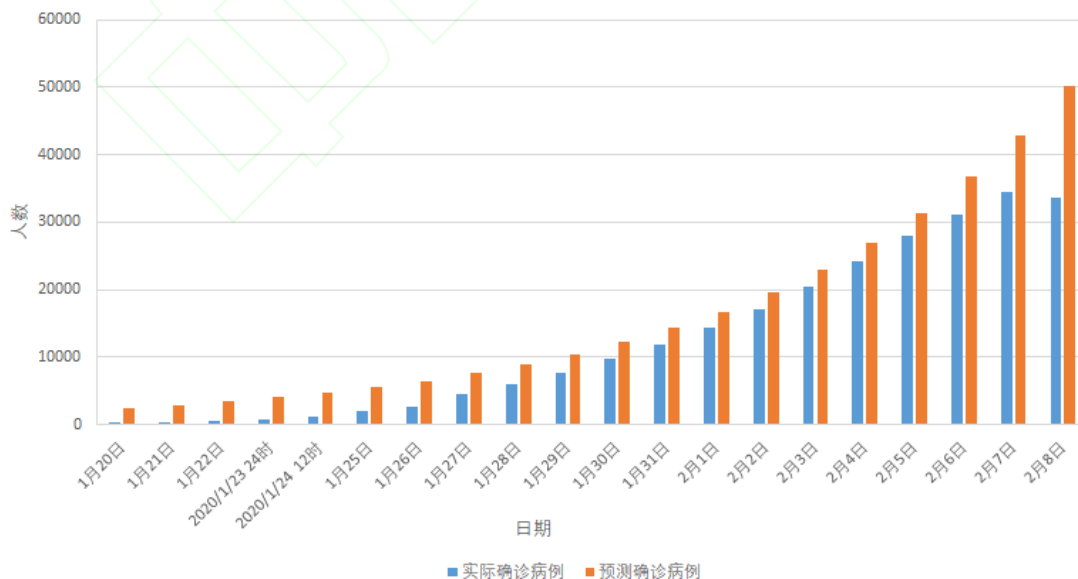


图3 实际和预测确诊病例变化趋势

Figure 3 Trends in actual and predicted confirmed cases

图4显示了严格限制出行措施下真实疫情的变化趋势,数据来源于国家卫生健康委员会官方网站^[3],我们发现,疑似病例已出现平缓趋势,并且从2月4号以来不再增长并在2月8日出现了下降,表明疑似病例峰值已经出现,密切接触者仍是以较高比

例增长,证明仍需执行强防控手段限制出行,静待密切接触者拐点来临,解除医学观察人群曲线平缓,证明医学观察方法日益谨慎,医学观察人员目前增长趋势减缓,证明疫情有逐渐被控制。

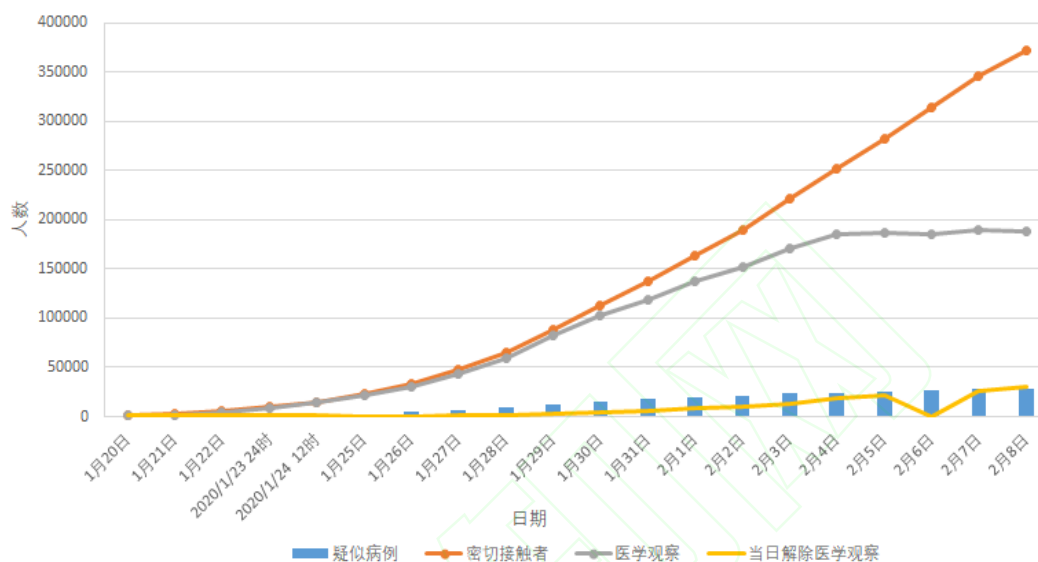


图4 严格限制出行措施下真实疫情变化趋势

Figure 4 Trend of true epidemic situation under strict travel restrictions

图5显示了真实疫情中重症、死亡、出院人数比例的变化趋势,数据来源于国家卫生健康委员会官方网站^[3],我们发现随着治疗经验和手段的不断丰富,全国医院紧急驰援武汉的情况下,治愈人数比

例有了明显的上升,重症和死亡人数比例在不断下降,近期重症比例升高的原因是,感染人数不再上升,重症人数虽然减少,但是比例略有上升,综合表明病毒疫情正在被逐渐控制。

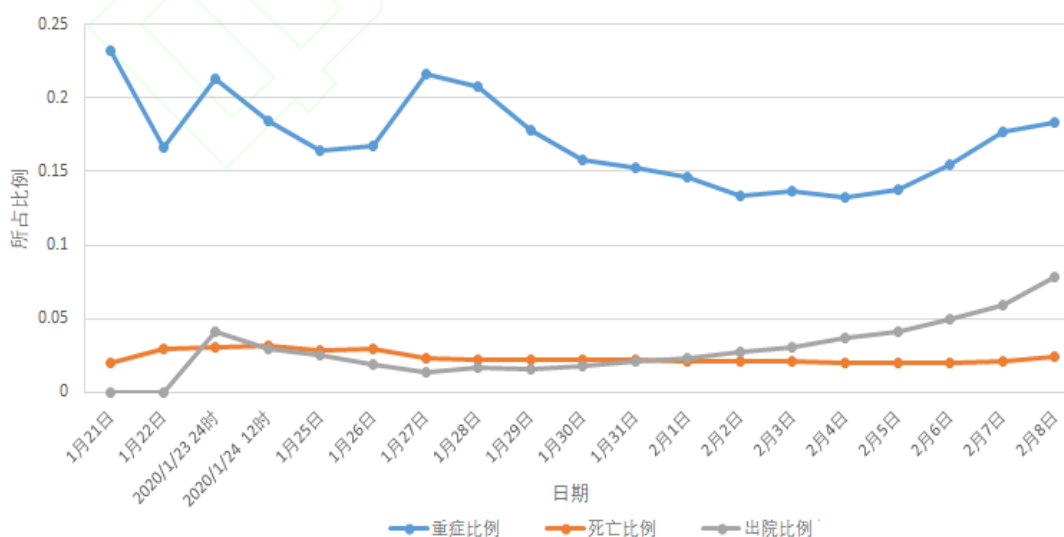


图5 重症、死亡、出院人数比例的变化趋势

Figure 5 Trends in the proportion of severe, fatal, and discharged patients

3 讨论

本文应用 Python 建立潜伏期具有传染性的 SEIR 模型,根据国家卫生健康委员会疫情通报数据计算模型参数,得出本次疫情相关预测数据,并和实际数据进行了对比分析,得出以下结论:

模型显示减少潜伏和患病者接触的易感人群数量,更够减缓疫情发展速度,并使潜伏和感染人群的峰值将分别降低 45.71% 和 29.90%。因此,疫情一旦爆发应及时采取相应等级的应急响应举措,以减缓疫情发展及减少疫情峰值发病人数^[9]。相对 SARS 疫情从 2002 年 12 月底发现到 2003 年 5 月 9 日温家宝总理签署国务院第 376 号令,公布施行《突发公共卫生事件应急条例》,历时 4 个月^[10],本次从发现 2019-nCoV 疫情到全国各地政府纷纷启动进入采取的措施仅历时一个月,阻止疫情蔓延非常及时高效。预测模型实际确诊病例人数的拐点出现在 3 月初,但国家及时出台强力的管控举措,及早限制出行、居家隔离、提示及强制出行戴口罩等防护措施切断病毒传染途径,大幅度减少潜伏和感染人群与易感人群的接触人数^[11],使实际确诊病例比预测病例出现大幅度下降,预示疫情拐点或将提前。

模型显示,随着治愈率的上升,疫情也将尽早得到控制。从图 5 真实疫情中重症、死亡、出院人数比例图发现,在实际疫情中随着医疗经验和手段的增加,重症和死亡人数减少,出院人数增多,治愈率上升了 25%,提示疫情可控,SARS 病毒的毒株分离用了近 5 个月时间^[12],而 2019-nCoV 病毒从 2020 年 1 月 2 日中国疾控中心病毒病所拿到武汉肺炎疫情第一份标本到 1 月 24 日,全球首发了第一株 2019-nCov 病毒毒株信息,毒株分离成功到向全世界公布仅用了一个月时间^[13],这一重要信息公布使 2019-nCov 疫苗的研制成功更进了一步,进一步验证疫情可控。

应增加大众的医疗知识学习,提高群众传染病疫情防范意识^[11],在疫情期间做好自我防护,主动拒绝食用野生动物,从源头切断病毒传播来源。2 月 7 日上午华南农业大学针对新型冠状病毒肺炎疫情影响发现从穿山甲中分离出的毒株与新冠毒株相似度达 99%^[14],本次研究结果表明穿山甲是新型冠状病毒的潜在中间宿主。对本次疫情的源头防控具有重大意义,为相关政策从野生动物管控、重大疫情防控的角度出发,建立健全的监管机制,加强疫病防控知识教育和培训,有效防范人与野生动

物交叉感染疫源、传播疫病等,提供了强有力的科学依据。

本文通过收集 2019-nCoV 在各级防控状态下的国家卫生健康委员会疫情通报数据代入 SEIR 模型得到 2019-nCoV 的基本再生数,应用 Python 建立潜伏期具有传染性的 SEIR 模型,得出本次疫情相关预测数据,发现预测结果的潜伏人群比感染人群更快达到峰值,这与实际的数据相符。本文建模过程中,因缺少二次感染人群数据,无法加入模型估算二次感染率,未来需更多微观感染数据对模型参数进行调整。

[参考文献]

- [1] HUANG C, WANG Y, LI X, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China[J]. The Lancet, 2020.1.24. DOI: 10.1016/S0140-67362030183-5
- [2] 中华人民共和国传染病防治法[J]. 中华老年口腔医学杂志, 2005(01):56-58.
Law of the People's Republic of China on Prevention and Control of Infectious Diseases[J]. Chinese Journal of Geriatric Stomatology, 2005(01):56-58.
- [3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 截至 2 月 8 日 24 时新型冠状病毒肺炎疫情最新情况[EB/OL]. [2020-02-09]. http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml
NATIONAL HEALTH COMMITTEE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Update on the Outbreak of New Coronavirus Pneumonia as of 24:00 on February 8[EB/OL]. [2020-02-08]. http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml
- [4] 知乎. 在家宅着也能抵抗肺炎! 玩一玩 SEIR 传染病模型[EB/OL]. [2020-02-03]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/104268573? night=1>
ZHI HU. I can fight against pneumonia at home! Play SEIR infectious disease model[EB/OL]. [2020-02-03]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/104268573? night=1>
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 主要城市年度数据“武汉”(2018 [EB/OL]. [2020-02-03]. <http://data.stats.gov.cn/search.htm? s=武汉>
NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Annual data of major cities "Wuhan" (2018 [EB/OL]. [2020-02-03]. <http://data.stats.gov.cn/search.htm? s=武汉>
- [6] 白振国. 周期传染病模型的基本再生数[J]. 工程数学学报, 2013, (2): 175-183. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3085.2013.02.003.

- BAI Zhenguo. Basic Reproduction Number of Periodic Epidemic Models [J]. CHINESE JOURNAL OF ENGINEERING MATHEMATICS, 2013, (2): 175-183. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3085.2013.02.003.
- [7] 周涛,刘权辉,杨紫陌,等.新型冠状病毒感染肺炎基本再生数的初步预测[J/OL].中国循证医学杂志:1-6 [2020-02-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1656.r.20200204.1640.002.html>.
- ZHOU T, LIU Q H, YANG Z M, et al. Preliminary prediction of the basic reproduction number of the Wuhan novel coronavirus 2019-nCoV [J/OL]. Chinese Journal of Evidence-Based Medicine: 1-6 [2020-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1656.r.20200204.1640.002.html>.
- [8] 徐恭贤,冯恩民,王宗涛,等.SARS流行病的SEIR动力学模型及参数辨识[J].黑龙江大学学报(自然科学版),2005(04):459-462+467.
- XU G X, FENG E M, WANG Z T, et al. SEIR dynamic model of SARS epidemic and its parameter identification. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2005(04):459-462+467.
- [9] 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 X B, HU Y, WU M L. 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.
- [10] 刘长永.小汤山"非典"医院七昼夜建成[J].中国经济周刊,2009,(38):91.
- LIU C Y. Xiaotangshan "SARS" Hospital Completed Seven Days and Nights [J]. China Economic Weekly, 2009, (38):91.
- [11] 欧阳芬,吴荷玉,杨英,等.基于新型冠状病毒肺炎快速传播的应对措施[J/OL].全科护理:1-2 [2020-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1349.R.20200131.1319.002.html>.
- OU Y F, WU H Y, YANG Y, et al. The countermeasures based on the rapid spread of new coronavirus pneumonia [J/OL]. Chinese General Practice Nursing: 1-2 [2020-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1349.R.20200131.1319.002.html>.
- [12] 王立贵,张霞,郝荣章,等.传染病疫情现场预测预警系统的构建[J].医疗卫生装备,2012,33(7):10-11.
- WANG L G, ZHANG X, HAO R Z, et al. Construction of field prediction and early warning system for infectious disease epidemic situation [J]. Medical and Health Equipment, 2012, 33 (7): 10-11.
- [13] 中国疾病预防控制中心.【抗疫】在一线,疾控勇士与新型冠状病毒赛跑[EB/OL].[2020-02-01].http://www.chinacdc.cn/yw_9324/202002/t20200201_212137.html
- CHINESE CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. [Anti-epidemic] frontline, warriors of disease control and new coronavirus race [EB/OL]. [2020-02-01]. http://www.chinacdc.cn/yw_9324/202002/t20200201_212137.html
- [14] 吴少敏,钟哲.华农:从穿山甲中分离出的毒株与新冠病毒株相似度达99%[EB/OL].[2020-02-07].<http://www.chinanews.com/gn/2020/02-07/9082115.shtml>
- WU S M, ZHONG Z. Huanong: the similarity between the strain isolated from pangolin and the new crown strain reached 99% [EB/OL]. [2020-02-07]. <http://www.chinanews.com/gn/2020/02-07/9082115.shtml>

[责任编辑]王景周