

引用格式:李倩,唐彪,WU Jianhong,等. 缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情及复工影响的模型研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2020,48(3):1-6. [LI Q, TANG B, WU J H, et al. Mathematical model reveals the influence of execution and adherence of mitigation strategies on the later period of COVID-19 and resumption of work[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 1-6.] DOI: 10.15983/j.cnki.jsnu.2020.01.018

缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情及复工影响的模型研究

李倩¹, 唐彪², WU Jianhong², 肖燕妮¹, 唐三一^{3*}

(1 西安交通大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710049;

2 加拿大约克大学 数学与统计系工业与应用数学实验室, 加拿大 安大略 M3J1P3;

3 陕西师范大学 数学与信息科学学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 新型冠状病毒肺炎(corona virus disease 2019, COVID-19)疫情形势随着围堵与缓疫策略的强化实施出现积极向好的趋势,但是复工复产、其他国家日趋严重的疫情形势对我国内防扩散、外防输入,确保疫情防控阻击战取得全面胜利的策略带来了严峻挑战。因此,缓疫策略执行力与依从性必将成为影响后期 COVID-19 疫情发展的关键因素。本文通过构建能够刻画防疫部门执行力与社区或个体依从性的数学模型并融合多源数据,分析执行力和依从性对有效再生数和累积确诊病例的影响,提高人们对缓疫策略决策力和依从性重要作用的认识,服务地区复工复产和疫情防控决策。

关键词: 新型冠状病毒;数学模型;缓疫策略;执行力;依从性;有效再生数

中图分类号: O29 文献标志码: A

文章编号: 1672-4291(2020)03-0001-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mathematical model reveals the influence of execution and adherence of mitigation strategies on the later period of COVID-19 and resumption of work

LI Qian¹, TANG Biao², WU Jianhong², XIAO Yanni¹, TANG Sanyi^{3*}

(1 School of Mathematics and Statistics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2 Laboratory for Industrial and Applied Mathematics, Department of Mathematics and Statistics, York University, Toronto M3J1P3, Ontario, Canada;

3 School of Mathematics and Information Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The epidemic of novel coronavirus (COVID-19) has exhibited the decline trend with the enhanced containment and mitigation strategies. However, the resumption of work and reproduction, and the increasingly serious epidemic situation in other countries have brought severe challenges to face domestic non-proliferation and external input, in order to ensure the success of the prevention and control of the epidemic. Therefore, the execution and compliance of mitigation strategies will become the key factors that affecting the development of COVID-19 epidemic during late epidemic stage. By proposing a mathematical model that can describe the

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(11631012, 61772017)

* 通信作者: 唐三一, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物数学方向的研究。E-mail: sytang@snnu.edu.cn

execution of decision makers and compliance of individuals, and integrating multi-source data, the impact of execution and compliance on the effective reproduction number and cumulative confirmed cases is analyzed. This improves people's understanding of the important role of execution and compliance of epidemic mitigation strategies, and serves the decision-making of resumption of work and prevention and control strategies.

Keywords: COVID-19; mathematical model; mitigation strategy; execution; adherence; effective reproduction number

2020年1月,在武汉暴发的新型冠状病毒肺炎(corona virus disease 2019, COVID-19)疫情短时间内因人口流动蔓延全国,人民的生命健康受到极大威胁,社会正常生活遭受重大影响。自2020年1月23日10时武汉“封城”以来,全国各地相继提高了突发公共卫生事件应急响应级别。一个多月以来,举国上下众志成城,亿万军民戮力同心,特别是不断增强的缓疫策略(包括加强密切跟踪隔离措施、提高筛查率与检出率、强化社区与个人自我隔离等)使得疫情防控阻击战取得阶段性成效^[1],全国疫情呈现出大幅下降趋势。数学模型在预测 COVID-19 早期疫情传播风险,评估缓疫策略的有效性、时效性等方面发挥了重要的作用,主要体现在确定传播风险(基本再生数或有效再生数)、达峰时间、峰值等与疫情相关的技术指标,评估“封城”、密切跟踪隔离、检测和检出、复工等重大防控策略的有效性、时效性和二次暴发的风险^[2-7]。

防疫部门的执行力以及社区与个体的依从性是围堵与缓疫策略发挥有效作用的重要保障。比如湖北的汉津监狱、浙江的十里丰监狱、山东的任城监狱出现了集聚性疫情,据报道主要原因是个别干警接触湖北疫区人员后未如实报告,隔离不彻底,即个人自我隔离依从性不够导致聚集性的暴发^[8]。随着新发疑似病例、确诊患者等疫情数据不断下降,很多省份根据各自的实际情况开始调低应急响应级别。然而,日本、韩国、意大利和伊朗等国家的疫情日趋严重并呈暴发趋势。只有在严格加强工厂、社区防控,抓好外防输入、内防扩散的同时,充分认识缓疫决策执行力、社区与个体依从性对 COVID-19 后期疫情及复工的影响,才能精准施策,确保复工复产的有序开展。

为了深刻揭示缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情和复工的影响,我们构建了一个能够刻画疾病预防控制部门缓疫策略执行力、社区与个体自我隔离依从性的数学模型,通过融合数据和模型参数估计,分析缓疫策略不同执行力、依从性对有效再生数和疫情的影响,定性、定量地确定缓疫策

略执行力、依从性在全面打好 COVID-19 疫情阻击战中的重要作用,为防控策略的适时调整和各地区有序复工复产提供重要的决策依据。

1 主要方法

1.1 数据

我们从湖北省卫生健康委员会收集了自2020年1月23日至2020年2月26日湖北省 COVID-19 的疫情数据,包括湖北省每天新增病例数、累计报告病例数、累计治愈病例数、累计死亡病例数等^[1]。

1.2 动力学模型

基于 COVID-19 的传播机理和经典 SEIR 仓室模型,我们建立了适合我国防控策略的动力学模型,其中将总人群分为易感者类(S)、潜伏者类(E)、感染者类(I)、住院者类(H)、治愈者类(R)、隔离的易感者类(S_q)和隔离的潜伏者类(E_q)。由于有症状的感染者(设有症状感染者的比率为 ρ)能驱动追踪隔离措施,我们假设隔离率为 $q(t)$ (表示策略的执行力),其中被隔离的个体依据是否感染分别进入 E_q 或 S_q 仓室,在追踪中被遗漏的接触者(比率为 $1-q(t)$)依据是否感染进入 E 仓室或留在 S 仓室中。特别地,考虑到公众对隔离措施的依从性,我们假设隔离的潜伏者以比率 θ 的速率回到 E 仓室中。具体模型如下:

$$\begin{cases} S' = -\frac{\rho(\beta c(t) + c(t)q(t)(1-\beta))SI}{N} - \frac{(1-\rho)\beta c(t)SI}{N} + \lambda S_q, \\ E' = \frac{\rho\beta c(t)(1-q(t))SI}{N} + \frac{(1-\rho)\beta c(t)SI}{N} - \sigma E + \theta E_q, \\ I' = \sigma E - (\delta_I(t) + \alpha + \gamma_I)I, \\ E_q' = \frac{\rho\beta c(t)q(t)SI}{N} - bE_q - \theta E_q, \\ S_q' = \frac{\rho(1-\beta)c(t)q(t)SI}{N} - \lambda S_q, \\ H' = \delta_I(t)I + bE_q - (\alpha + \gamma_H(t))H, \\ R' = \gamma_I I + \gamma_H(t)H. \end{cases} \quad (1)$$

变量和参数定义见表 1。

表 1 参数定义和估计值
Tab. 1 The definitions and values of parameters

参数	定义	参数值	来源
c_0	初始接触率	14.781	文献[4]
c_b	当前控制策略下的最小接触率	5.5	参数估计
r_1	接触率的指数递减速率	0.2	参数估计
ρ	感染者有症状的概率	0.9	参数估计
β	每次接触传播的概率	0.224 6	参数估计
q_0	初始隔离率	1×10^{-4}	参数估计
q_m	当前控制策略下的最大隔离率	0.5	参数估计
r_2	隔离率的指数增长速率	0.1	参数估计
λ	隔离的未受感染接触者释放回社区的速率	1/14	文献[4]
σ	潜伏者到感染者的转移率	1/7	文献[4]
θ	被隔离的潜伏者回到社区的比率	0.005	参数估计
b	被隔离的潜伏者的检出率	0.09	参数估计
δ_{I_0}	有症状的感染者被隔离的初始速率	0.132 6	文献[4]
δ_{I_f}	最快诊断速率	1.67	参数估计
r_3	诊断时间的指数递减速率	0.2	参数估计
γ_I	感染者的恢复率	0.33	文献[4]
γ_{H_0}	隔离感染者的初始恢复率	0.116	文献[4]
γ_{H_m}	当前控制策略下隔离感染者的最大隔离率	0.32	参数估计
r_4	隔离感染者恢复率的指数增长速率	1.5	参数估计
α	因病死亡率	0.013 2	参数估计
初值	定义	参数值	来源
$S(0)$	易感者的初值	9×10^6	参数估计
$E(0)$	潜伏者的初值	4×10^3	参数估计
$I(0)$	感染者的初值	800	参数估计
$S_q(0)$	隔离的易感者的初值	2 132	数据
$E_q(0)$	隔离的潜伏者的初值	500	参数估计
$H(0)$	隔离的感染者的初值	494	数据
$R(0)$	恢复者的初值	34	数据

自 2020 年 1 月 23 日起湖北省各地区相继实施“封城”策略,防控措施不断加强,确诊率和恢复率也持续提高。为了描述上述现象,我们假设接触率、隔离率、诊断率和治愈率分别为时间 t 的函数^[4-6]。具体地,关于时间 t 的递减函数接触率 $c(t)$ 、递增函数隔离率 $q(t)$ 分别为

$$c(t) = (c_0 - c_b)e^{-r_1 t} + c_b,$$

$$q(t) = (q_0 - q_m)e^{-r_2 t} + q_m,$$

确诊率 $\delta_I(t)$ 是关于时间 t 的递增函数,因此确诊周期 $1/\delta_I(t)$ 是时间 t 的递减函数、递增函数治愈

率 $\gamma_H(t)$ 分别为

$$\frac{1}{\delta_I(t)} = \left(\frac{1}{\delta_{I_0}} - \frac{1}{\delta_{I_f}} \right) e^{-r_3 t} + \frac{1}{\delta_{I_f}},$$

$$\gamma_H(t) = (\gamma_{H_0} - \gamma_{H_m}) e^{-r_4 t} + \gamma_{H_m},$$

参数定义和取值见表 1。基于模型(1),我们定义有效再生数为

$$R(t) = \frac{\beta c(t)(1 - \rho q(t))}{\delta_I(t) + \alpha + \gamma_I} + \frac{\theta \rho \beta c(t) q(t)}{(b + \theta)(\delta_I(t) + \alpha + \gamma_I)}.$$

图 1 为 COVID-19 疫情传播示意图以及主要的

围堵与缓疫策略,其中,使用跟踪隔离率刻画执行力,使用隔离的潜伏者回到自由潜伏者的返回率刻画个体的依从性。

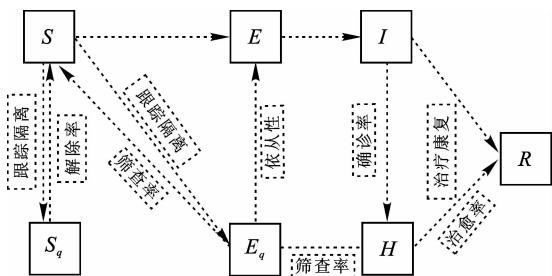


图 1 COVID-19 疫情传播示意图以及主要的围堵与缓疫策略

Fig. 1 The transmission diagram of COVID-19 with public health interventions

2 缓疫策略执行力与依从性对疫情的影响

首先,基于湖北省 1 月 23 日—2 月 26 日的累计报告病例数和累计死亡病例数,利用最小二乘法估计系统未知参数,拟合结果见图 2a、b,具体参数估计值见表 1。基于估计的参数值,我们计算出 1 月 23 日—2 月 26 日间的有效再生数,如图 2c 所

示。图 2c 表明在政府实施的严格围堵与缓疫措施下,有效再生数迅速下降并于 2 月 3 日左右降到临界值 1 以下。考虑缓疫策略依从性降低(即增大参数 θ 的值),我们发现有效再生数在同一时刻会变大,同时,下降至 1 以下的时间将滞后。由此可见,缓疫策略依从性对 COVID-19 后期疫情的控制具有一定的影响。

进一步,为了识别影响有效再生数的关键参数,我们假设所有参数服从均匀分布,并采用拉丁方采样方法对参数空间进行抽样,通过计算偏秩相关系数实现有效再生数关于重要参数的敏感性分析,图 2d 给出了几个特定时间点的偏秩相关系数。由图 2d 可以看出,传染概率 β 始终具有很高的正偏秩相关系数,说明其与有效再生数呈强正相关关系。值得注意的是,偏秩相关系数稳定后从大到小排在前几位的是:传染概率 β 、最小接触数 c_b 、最快确诊速率 δ_{if} 、依从性参数 θ 和反映执行力的隔离率 q_m 。这说明即使在疫情发展后期,戴口罩、勤洗手(降低传染率)、减少出门、不聚会(降低接触率等)、加强跟踪隔离的执行力 and 提高个体的依从性(自觉的隔离)等措施仍是十分必要的。

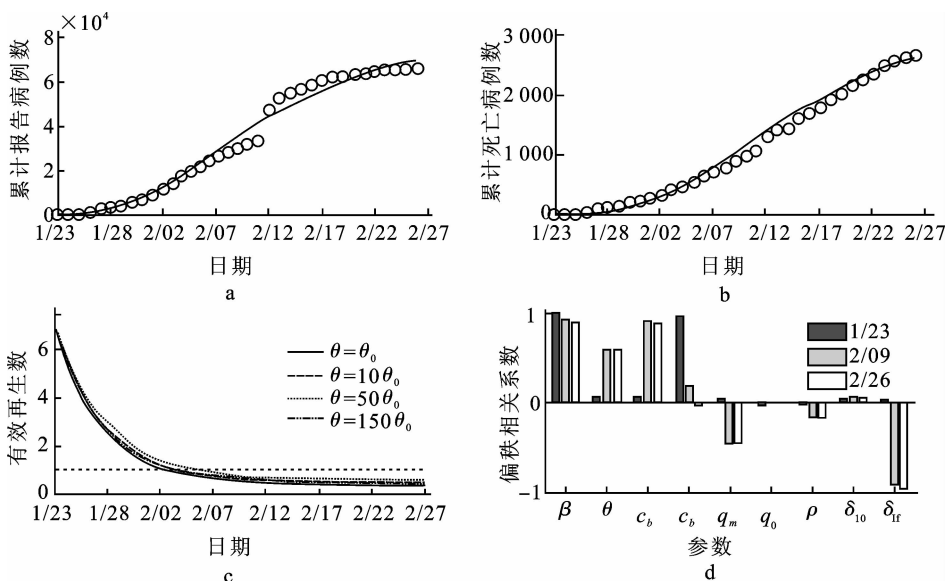


图 2 模型拟合、有效再生数和敏感性分析

Fig. 2 Model fitting, effective reproduction number and sensitivity analysis

注:a、b为累计报告病例数和死亡病例数的模型拟合结果,其中圆圈表示数据,曲线表示最优拟合结果;c为缓疫策略依从性对有效再生数的影响,这里 θ_0 表示依从性的基线估计值;d为有效再生数关于参数的敏感性分析,分别给出 1 月 23 日、2 月 9 日和 2 月 26 日特定时间点的有效再生数的 PRCC 值。

敏感性分析发现,缓疫策略的执行力、依从性对有效再生数有重要影响。为了进一步深入研究缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情发展的

影响,我们首先假设从某时间点开始依从性减弱,即参数 θ 的值增大,数值模拟了累计报道病例数和感染者数量 $I(t)$ 的变化情况,如图 3 所示。

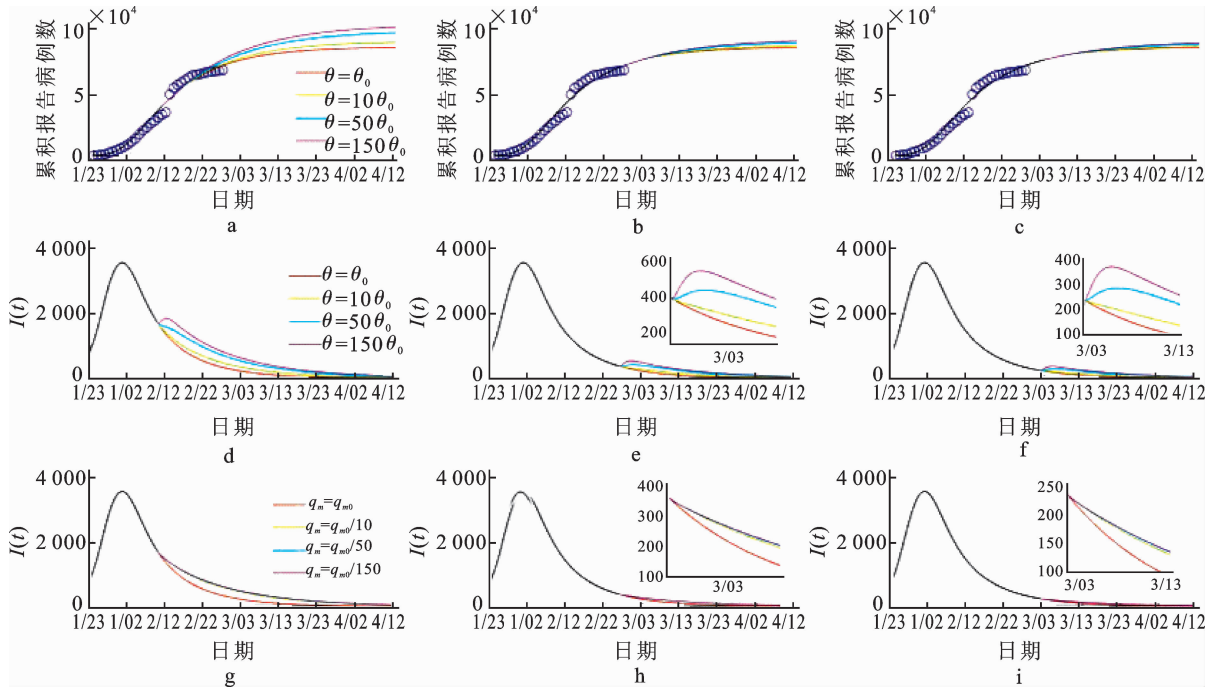


图 3 累计报道病例数和感染者数量 $I(t)$ 的变化情况

Fig. 3 The variations of cumulative reported cases and the number of infected individuals

注:网络版为彩图。

注:a、d、g: θ 值(q_m)从 2 月 10 日开始增加(减小);b、e、h: θ 值(q_m)从 2 月 26 日开始增加(减小);c、f、i: θ 值(q_m)从 3 月 2 日开始增加(减小)。这里, θ_0 表示估计的 θ 值, q_{m0} 表示估计的 q_m 值。

由图 3 可以看出,无论什么时候开始降低依从性,最终的累计感染病例数都会随着 θ 的增加而一定程度的增大,而且依从性放松的时间越早,累计感染病例数会增加的越多(图 3a—c)。此外,比较图 3 d—f 可知, θ 的增加导致感染者 $I(t)$ 的人数增多。当选取 $\theta=50\times\theta_0$ 时,如果从 2 月 10 日开始依从性降低,则不存在二次暴发;若从 2 月 26 日和 3 月 2 日开始依从性减弱,疫情存在微小的二次暴发。当参数 θ 增加到一定程度(如 $\theta=150\times\theta_0$) 时,疫情虽存在一定程度的二次暴发,但疫情反弹小、不影响其整体下降的趋势。图 3g—i 显示降低隔离率没有引起二次暴发,几乎不影响疫情的下降趋势。

3 结语

围堵和缓疫策略执行一个月以来,目前包括湖北省在内的全国日新增确诊人数大幅下降,疫情得

到了有效控制。然而,随着疫情的进一步好转,基于社区或地域的缓疫策略的执行力或个体的依从性可能由于复工复产而下降,这会为后期 COVID-19 疫情的发展带来什么样的挑战是疾病防控部门非常关注的重大决策问题。为了回答上述问题,定性、定量分析复工复产导致防控执行力和依从性下降带来可能的疫情反弹,并为决策部门提供重要的决策依据,我们进一步发展了 COVID-19 疫情传播模型,刻画有症状的感染者能驱动追踪隔离措施、考虑缓疫策略的执行力、依从性等问题。

基于多源数据我们估计系统参数,得到了有效再生数已经大幅下降,而且已在 2 月 3 日左右降至 1 以下,这表明目前的新发感染非常少。敏感性分析显示,除感染率和接触率外,缓疫策略的执行力、依从性与有效再生数虽然呈显著的负相关关系,但不影响疫情整体的下降趋势。这一重要结论揭示了

如下两个基本事实:其一,基于目前的疫情趋势,降低隔离率(缓疫策略执行力下降)和弱化依从性基本不能引起湖北疫情的二次暴发,即使有二次暴发的可能性,二次暴发的规模也非常小;其二,尽管执行力与依从性参数与有效再生数呈强负相关关系,但一定程度弱化执行力和依从性不影响疫情整体下降的趋势,说明在疑似病例、跟踪隔离规模显著下降的湖北省,有序复工已经成为可能。

由于复工等正常社会活动的有序开展导致缓疫策略执行力与依从性的下降,给 COVID-19 疫情的发展带来了不确定性。本文以湖北省为例,分析执行力和依从性变化对疫情的影响,所得结论对疫情不严重地区具有重要的参考价值,特别是疫情不严重且跟踪隔离和疑似病例人群规模很小的省市,在外防输入的控制措施下具备了有序复工复产的条件。值得提醒的是,上述结论是在有效再生数稳定到 1 以下(新发感染非常少时)或疫情明显下降前提下得到的。若是在疫情暴发增长期,隔离率与依从性会极大地影响疫情的发展。所以在疫情的不同发展阶段,适时地调整措施的实施强度对于疫情控制、恢复生产有重要的作用。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国湖北省卫生健康委员会. 疫情通报[EB/OL]. [2020-03-02]. http://wjw.hubei.gov.cn/bmdt/ztzl/fkxxgzbdgrfyyq/xxfb/202002/t20200227_2160628.shtml.
- [2] GILBERT M, PULLANO G, PINOTTI F, et al. Preparedness and vulnerability of African countries against importations of COVID-19: a modelling study[J]. *The Lancet*, 2020, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30411-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30411-6).
- [3] LI Q, GUAN X, WU P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel Coronavirus-infected pneumonia [J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, DOI: 10.1056/NEJMoa2001316.
- [4] TANG B, WANG X, LI Q, et al. Estimation of the transmission risk of 2019-nCoV and its implication for public health interventions[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9: 462.
- [5] TANG B, BRAGAZZI N L, LI Q, et al. An updated estimation of the risk of transmission of the novel coronavirus (COVID-19) [J]. *Infectious Disease Models* 2020, 5:248-255.
- [6] TANG B, XIA F, TANG S Y, et al. The evolution of quarantined and suspected cases determines the final trend of the 2019-nCoV epidemics based on multi-source data analyses [EB/OL]. [2020-03-02]. <https://ssrn.com/abstract=3537099>.
- [7] 王霞,唐三一,陈勇,等. 新型冠状病毒肺炎疫情下武汉及周边地区何时复工? 数据驱动的网络模型分析[J]. *中国科学:数学*, 2020, 50(7):1-10.
- [8] 中国疾病预防控制中心[EB/OL]. [2020-03-02]. <http://www.chinacdc.cn/jkzt/>.

〔责任编辑 宋轶文〕