

## · 新型冠状病毒肺炎疫情防控 ·

新型冠状病毒肺炎大流行的实验室检测和  
预防控制资源需求评估

王晴<sup>1</sup> 张婷<sup>2</sup> 杨媛<sup>1</sup> 陈方媛<sup>2</sup> 戴佩希<sup>1</sup> 贾萌萌<sup>2</sup> 冷志伟<sup>2</sup> 马礼兵<sup>2</sup> 杨津<sup>2</sup>  
元蔚然<sup>2</sup> 张惺惺<sup>2</sup> 慕莹<sup>2</sup> 陈思雅<sup>2</sup> 徐韵韶<sup>2</sup> 曹琰琳<sup>3</sup> 杨维中<sup>2</sup> 杨涛<sup>4</sup> 冯录召<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国疾病预防控制中心传染病管理处,北京 102206; <sup>2</sup>中国医学科学院北京协和医学院  
院群医学及公共卫生学院,北京 100730; <sup>3</sup>山西医科大学公共卫生学院,太原 030012;

<sup>4</sup>中国医学科学院北京协和医学院,北京 100730

通信作者:杨涛, Email:50232222@qq.com; 冯录召, Email:fengluzhao@cams.cn

**【摘要】目的** 快速评估不同情景下新型冠状病毒肺炎(COVID-19)实验室检测和预防控制(防  
控)资源需求数,为传染病流行做好产能规划、储备分配和资金筹集方面的准备。**方法** 基于引入无  
症状感染者和确诊住院患者的易感者-潜隐者-传染者-移除者传播动力学模型,构建 COVID-19 不同流  
行情景并预测住院/隔离人数,结合当前我国防控策略,评估各情景下开展实验室检测和预防控制时  
所需资源数。**结果** COVID-19 发生社区传播及局部地区暴发且实施全员核酸检测时,我国现有实验  
室检测及预防控制所需医用个人防护用品及设备资源产能尚可满足需求,但人力资源储备与所需相  
差 3.3~89.1 倍不等。无症状感染者比例的增加也加剧了人力需求及防控难度。当≥50% 人群获得疫  
苗保护时,适当调整防控措施,可降低资源需求。**结论** 当前我国仍亟需进行实验室检测和预防控制  
的人力储备,以应对难以预见的 COVID-19 疫情。需考究全员核酸检测对人力资源的挑战及实施的必  
要性。实施非药物干预措施,鼓励公众接种 COVID-19 疫苗,在一定程度上可缓解疾病流行带来的卫  
生资源需求冲击。

**【关键词】** 新型冠状病毒肺炎; 卫生资源需求; COVID-19 疫苗接种; 传播动力学模型

**基金项目:**中国医学科学院医学与健康科技创新工程(2020-I2M-1-001);比尔及梅琳达·盖茨基  
金会捐赠项目(OPP1216666)

**Evaluation of demand of resources for laboratory testing and prevention and control of  
COVID-19 in the context of global pandemic**

Wang Qing<sup>1</sup>, Zhang Ting<sup>2</sup>, Yang Yuan<sup>1</sup>, Chen Fangyuan<sup>2</sup>, Dai Peixi<sup>1</sup>, Jia Mengmeng<sup>2</sup>, Leng Zhiwei<sup>2</sup>,  
Ma Libing<sup>2</sup>, Yang Jin<sup>2</sup>, Qi Weiran<sup>2</sup>, Zhang Xingxing<sup>2</sup>, Mu Ying<sup>2</sup>, Chen Siya<sup>2</sup>, Xu Yunshao<sup>2</sup>, Cao Yanlin<sup>3</sup>,  
Yang Weizhong<sup>2</sup>, Yang Tao<sup>4</sup>, Feng Luzhao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Division of Infectious Diseases, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206,  
China; <sup>2</sup>School of Population Medicine and Public Health, Chinese Academy of Medical Sciences and  
Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; <sup>3</sup>School of Public Health, Shanxi Medical  
University, Taiyuan 030012, China; <sup>4</sup>Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical  
College, Beijing 100730, China

Corresponding authors: Yang Tao, Email: 50232222@qq.com; Feng Luzhao, Email: fengluzhao@cams.cn

**【Abstract】 Objective** To rapidly evaluate the level of healthcare resource demand for  
laboratory testing and prevention and control of corona virus disease 2019 (COVID-19) in different  
epidemic situation, and prepare for the capacity planning, stockpile distribution, and funding raising

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210303-00169

收稿日期 2021-03-03 本文编辑 万玉立

引用本文:王晴,张婷,杨媛,等.新型冠状病毒肺炎大流行的实验室检测和预防控制资源需求评估[J].中  
华流行病学杂志,2021,42(6):983-991. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210303-00169.



for infectious disease epidemic response. **Methods** An susceptible, exposed, infectious, removed infectious disease dynamics model with confirmed asymptomatic infection cases and symptomatic hospitalized patients was introduced to simulate different COVID-19 epidemic situation and predict the numbers of hospitalized or isolated patients, and based on the current COVID-19 prevention and control measures in China, the demands of resources for laboratory testing and prevention and control of COVID-19 were evaluated. **Results** When community or local transmission or outbreaks occur and total population nucleic acid testing is implemented, the need for human resources is 3.3-89.1 times higher than the reserved, and the current resources of medical personal protective equipment and instruments can meet the need. The surge in asymptomatic infections can also increase the human resource demand for laboratory testing and pose challenge to the prevention and control of the disease. When vaccine protection coverage reach  $\geq 50\%$ , appropriate adjustment of the prevention and control measures can reduce the need for laboratory and human resources. **Conclusions** There is a great need in our country to reserve the human resources for laboratory testing and disease prevention and control for the response of the possible epidemic of COVID-19. Challenges to human resources resulted from total population nucleic acid testing and its necessity need to be considered. Conducting non-pharmaceutical interventions and encouraging more people to be vaccinated can mitigate the shock on healthcare resource demand in COVID-19 prevention and control.

**【Key words】** COVID-19; Healthcare resource demand; COVID-19 vaccination; Transmission dynamics models

**Fund programs:** Chinese Academy of Medical Sciences Innovation Fund for Medical Sciences (2020-I2M-1-001); Bill and Melinda Gates Foundation Donation Project (OPP1216666)

截至 2021 年 3 月 26 日,全球新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 大流行已有 1.2 亿确诊病例、273.9 万死亡病例<sup>[1]</sup>。冬春季是呼吸道传染病高发时期,多个国家出现新型冠状病毒 (SARS-CoV-2) 新变种,且无症状感染者比例增加,国际疫情加速传播风险进一步加大<sup>[2]</sup>。COVID-19 疫情对美、英等国家的医疗卫生系统造成巨大冲击<sup>[3]</sup>,难以应对随之而来的口罩、防护服、实验室检测人员、检测设备和试剂等卫生资源需求激增问题<sup>[4]</sup>和因卫生资源短缺而面临着分配难题<sup>[5]</sup>。当前国内疫情形势平稳,冬春季发生的几起局部聚集性疫情已得到控制,COVID-19 疫苗工作稳步开展,截至 3 月 26 日 24:00,全国累计报告重点人群接种 COVID-19 疫苗已达 9 697.0 万剂次<sup>[6]</sup>,但通过自然感染和疫苗接种获得免疫力的人群比例整体仍较低,一旦输入疫情,反弹风险仍较高。疫情暴发地区的大规模核酸检测、隔离和医学观察期限延长等措施<sup>[7]</sup>,导致实验室检测、预防控制等卫生资源需求量急剧增加。无症状感染者传播具有隐匿性,其比例增加也给预防控制工作带来巨大挑战。评估 COVID-19 医疗卫生资源需求是应对医疗需求激增首要问题,也是利用窗口期做好卫生资源需求准备,保障疫情防控有序进行的关键<sup>[4]</sup>。本研究构建基于情景模拟的传播动力学模型,评估 COVID-19 不同流行情景下所需要的实验室检测和预防控制资源,为产能规划

(确定医疗设备及个人防护物资生产能力的大小)、储备分配(应急物资和人力资源的配置)和资金筹集(医疗卫生部门多来源多方式筹集突发公共卫生事件时所需资源的购置资金)等做好准备。

## 资料与方法

1. 相关定义:实验室检测资源包括标本采样和检测等实验室人员,采样管、试剂检测盒、A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、冰箱、96 孔 PCR 扩增仪等设备,防护服、隔离衣、口罩、手套、隔离帽等个人防护物资需求数。预防控制资源包括流行病学调查(流调)人员、社区防控人员、社会志愿者及其防护用品消耗。其中,流调人员指现场处理疫情、个案调查和网络上报人员,社区防控人员指协助统筹流调人员工作和负责集中隔离点安全保障、后勤的街道办事处、公安、消防等相关人员,社会志愿者指追踪密切接触者(密接)和次密接、负责集中隔离点的信息录入,秩序维护等人员<sup>[8]</sup>。COVID-19 确诊患者包括确诊的无症状感染者和有症状患者<sup>[9]</sup>。

2. 基于情景的模型构建假设:COVID-19 尚无治疗特效药物;其他地区医疗支援存在不确定性,卫生资源需依靠本地准备;无症状感染者具有传染性,基本再生指数与有症状者无差异;传染期后,病

例进入恢复期,在此期间他们可能有症状,但不再传播 SARS-CoV-2;对于住院患者,由于得到隔离和感染控制措施,不再具有传染性;患者一旦感染并痊愈,将不再二次感染;疾病暴发最初多起源于人口密集且流动性大的城市,本研究假设建立在 500 万人口规模且人口整体分布均匀的城市上;现患病例数达到 2 000 人时,该地区实施 3 次全员核酸检测,每次 5 d 内完成,前后两次核酸检测时间相差 7 d<sup>[10]</sup>。

3. 模型构建:基于传染病的不同状态和传播机制,在传统“易感者-潜隐者-传染者-移除者(SEIR)”模型仓储基础上<sup>[11]</sup>,增加确诊患者(hospitalized, *H*)仓储,并将无症状感染者引入 *I* 和 *H* 仓储中,构建“易感者-潜隐者-传染者-确诊者-移除者”(S-susceptible, E-exposed, I-infectious, H-hospitalized, R-removed, SEIHR)模型。动力学传播过程见图 1,微积方程组公式:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \beta \times g \times (1 - v) \frac{SI}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \beta \times g \times (1 - v) \frac{SI}{N} - (1 - f) \times \alpha_1 \times E - f \times \alpha_2 \times E \\ \frac{dI}{dt} &= (1 - f) \times \alpha_1 \times E - r_1 \times I_1 + f \times \alpha_2 \times E - r_2 \times I_2 \\ \frac{dH}{dt} &= r_1 \times I_1 - m_1 \times H_1 + r_2 \times I_2 - m_2 \times H_2 \\ \frac{dR}{dt} &= m_1 \times H_1 + m_2 \times H_2 \\ N &= S + E + I + H + R \\ N &= 5\,000\,000 \end{aligned}$$

流程图及公式中, *N* 为地区总人口, *S* (易感者)、*E* (潜隐者)、*I* (感染者)、*H* (确诊住院/隔离)、*R* (移除者) 分别表示某时刻未染病但有可能被该类疾病传染的人数、已被感染但处于潜隐期尚无传染性的人数、已具有传染性的人数、有症状感染者确诊住院和无症状感染者集中隔离的人数、已从染病者移出的(康复/病死)的人数<sup>[11-12]</sup>。  $\beta$  表示单位时间(d)内,一个易感者暴露后被感染,但不具有传染性的速率,  $\alpha$  表示暴露后被感染后具有传染性的速率, *r* 表示感染后具有传染性到被确诊住院/隔离的速率, *m*

表示住院到康复/死亡的速率。此外, *f* 表示无症状感染者的比例; *g* 表示防控措施效果,通过与  $\beta$  的乘积共同影响评估结果; *v* 表示免疫接种人群,作用于 *S* 值影响评估结果。结合已发表文献、疫情防控文件、主流媒体报道、专家意见等信息,参数设置见表 1。

表 1 不同情景下的 SEIHR 传播动力学模型参数

参数值	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
$N^a(\times 10^3)$	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
$S^{a,b}(\times 10^3)$	5 000	5 000	2 500	4 500	2 500
$E^a(\times 10^3)$	50	7.50	7.50	0.25	0.25
$I^a(\times 10^3)$	3.50	0.50	0.50	0.06	0.06
$H^a(\times 10^3)$	0.80	0.15	0.15	0.02	0.02
<i>R</i>	1	1	1	1	1
$\beta_1$	0.53 <sup>[13-14]</sup>	0.53	0.53	0.53	0.53
$\beta_2$	0.39 <sup>c</sup>	0.39	0.39	0.39	0.39
$\alpha$	1/5.2 <sup>[4,11,13]</sup>	1/5.2	1/5.2	1/5.2	1/5.2
$r_1$	1/6 <sup>[11]</sup>	1/6	1/6	1/6	1/6
$r_2$	1/8 <sup>c</sup>	1/8	1/8	1/8	1/8
$m_1$	1/15 <sup>[4,15-16]</sup>	1/15	1/15	1/15	1/15
$m_2$	1/13 <sup>c</sup>	1/13	1/13	1/13	1/13
<i>f</i>	0.4 <sup>[17]</sup>	0.4	0.4	0.8 <sup>[18]</sup>	0.8
<i>v</i>	0.0	0.0 <sup>d</sup>	0.5 <sup>d</sup>	0.1 <sup>d</sup>	0.5
<i>g</i>	0.8 <sup>[15]</sup>	0.8	0.6 <sup>d</sup>	0.7 <sup>d</sup>	0.7

注: <sup>a</sup> 情景构建初始输入参数; <sup>b</sup> 城市人口数-接种 COVID-19 疫苗后获得免疫的人数; <sup>c</sup> 专家咨询及文献参考综合评估结果; <sup>d</sup> 预设参数

4. 模型的预测误差计算:本研究中模型仓室的数值涉及 COVID-19 检测量、检测效率、报告的住院患者的及时性,这些需要对疾病特征有基本认识。意大利疫情暴发时间较早且 COVID-19 检测量大,住院病例的报告数据相比其他国家完整,初期无明显措施干预影响<sup>[1,12]</sup>,因此作为早期自然传播 SARS-CoV-2 的地区用于模型检验。计算 SEIHR 模型在无任何干预条件下病毒自然传播的感染人数预测值与意大利 2020 年 2 月 24 日至 3 月 15 日(自出现首例报告住院 COVID-19 病例后 20 d 内)每日实际报告的住院患者数<sup>[12]</sup>的平均绝对误差百分比,

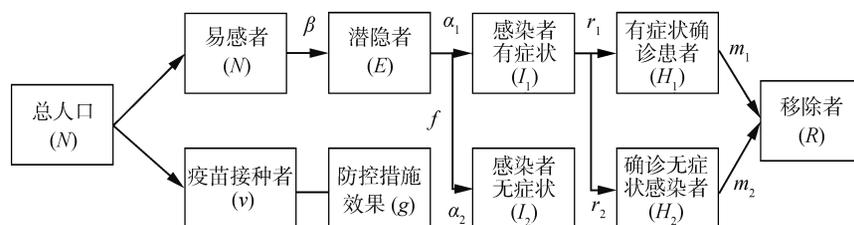


图 1 “易感者-潜隐者-传染者-确诊者-移除者”(SEIHR)传播动力学模型流程图

以此来评价模型预测效果(图 2A),进行下一步情景构建。

5. 情景构建:

情景 1:社区传播情景。初始输入病例多,无症状感染者占 40%,无 COVID-19 疫苗接种,防控措施实施严格且效果好,开展全员核酸检测,全员核酸检测按照 1:10 混检,其他人员(确诊 COVID-19 患者、其他住院患者及陪护人员、密接、次密接)均 1:1 检测<sup>[19]</sup>。

情景 2:疾病暴发场景。该情景在情景 1 的基础上,初始输入病例减少,实现了病例的早发现、早报告、早隔离、早治疗,开展全员核酸检测,标准同情景 1。

情景 3:疫苗接种下的疾病暴发场景。在情景 2 的基础上,有 50% 的人群得到 COVID-19 疫苗接种后的免疫保护,适当降低防控措施强度,取消封城等严重影响公众生活和经济发展的措施,但严格执行增加人际距离和个人防护等措施。

情景 4:疾病散发场景。早期输入病例少,但无症状感染者比例达到 80%,有 10% 的人群得到 COVID-19 疫苗接种后的免疫保护,由于无症状感染比例高及其隐匿性传播特点,此情景仍实施较严格强度措施加以防控。

情景 5:疫苗接种下的疾病散发场景。在情景 4 的基础上,促进 COVID-19 疫苗接种,有 50% 的人群得到疫苗免疫保护。

6. 我国 500 万人口规模城市现有实验室检测及防控资源相关储备和产能参考值: CDC 卫生技术人员平均 406 人<sup>[20]</sup>。综合医院检验人员平均 789 人<sup>[20]</sup>, CDC 检验人员平均 93 人<sup>[20]</sup>, 一次性医用防护服日产能 150 万件<sup>[21]</sup>, 医用 N95 口罩日产能 340 万只<sup>[21]</sup>, 核酸检测试剂日产能 306 万人份<sup>[22]</sup>。

7. 统计学分析:采用 R studio V3.6.3 软件和 deSolve 软件包进行建模,获得不同情景下 150 d 住院/隔离人数变化。使用 Excel 2010 软件,计算模型预测现住院/隔离人数与意大利实际住院人数的平均绝对误差百分比、计算患者与实验室检测和流调防控各类资源需求-时间变化、计算所需资源数与我国现有储备的差距,差距用百分比表示。使用 Origin 2019 软件绘制实验室检测和流调防控各类资源需求-时间变化。

结 果

1. 一般情况:以 500 万人口的城市规模区域范

围为例,根据人口规模、流行强度和防控措施效果等定性情景设置定量初始值。模型误差检验、不同的情景假设及评估结果见表 2 和图 2~4。

表 2 5 种情景下不同资源的最大日需求及累计消耗量

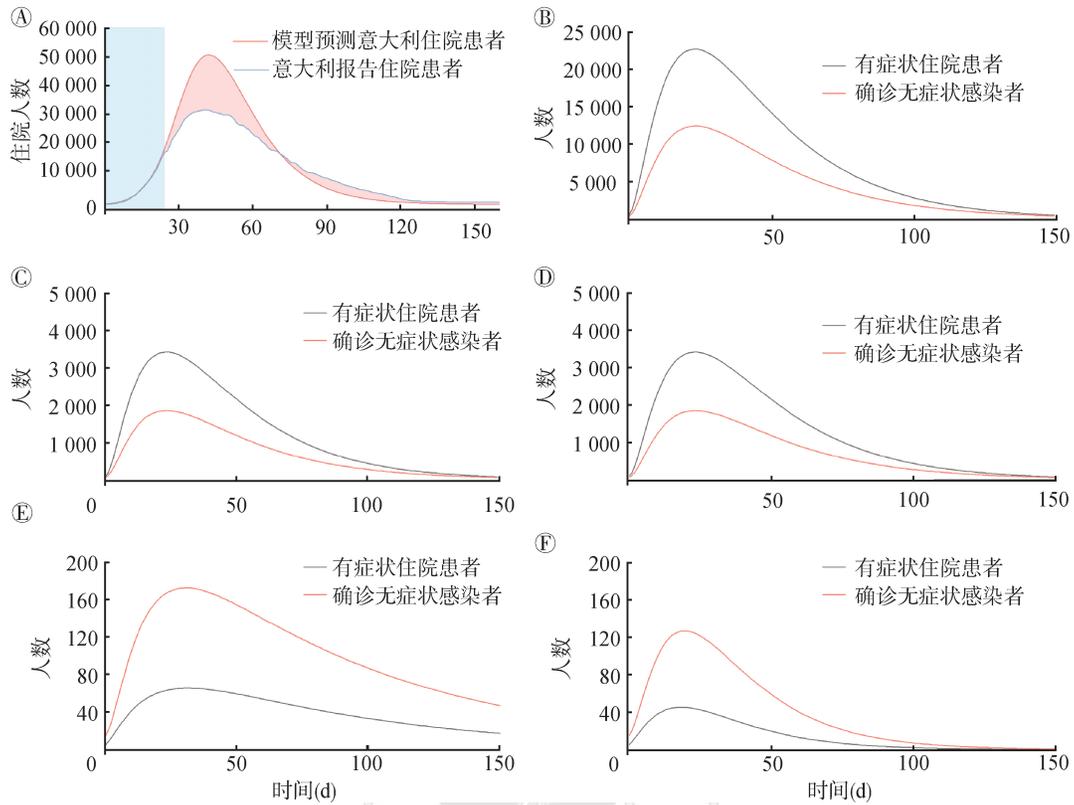
指 标	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
人力资源最大日需求量 <sup>a</sup>					
标本采样人员	7 692	7 692	237	55	53
检测人员	603	307	74	17	17
流调人员	2 559	1 230	79	10	9
消杀人员	2 216	1 085	198	8	7
社区人员	8 419	5 490	565	22	20
志愿者	10 201	1 557	1 527	60	54
设备资源最大日需求量					
采样管/检测试剂盒	502 899	255 428	61 707	14 256	13 892
A2 型生物安全柜	75	38	9	2	2
离心机/灭菌器 <sup>b</sup>	50	26	6	1	1
样本运输箱	147	64	25	5	4
冰箱 <sup>c</sup>	100	52	12	2	2
PCR 扩增仪/移液器 <sup>d</sup>	251	128	31	7	7
个人防护用品累计消耗量					
一次性防护用品 <sup>e</sup>	1 149 310	489 259	154 830	46 270	38 651
可循环利用物资 <sup>f</sup>	130 721	95 545	18 486	12 406	11 980

注:<sup>a</sup>最大日需求量是指疫情期内每日资源需求数不同,保留其最大需求量当日数值作为最大日需求量;<sup>b</sup>96 孔板离心机/高压灭菌器;<sup>c</sup>指普通冰箱和低温冰箱;<sup>d</sup>荧光 PCR 扩增仪(96 孔)/八通道移液器;<sup>e</sup>包括医用防护服、N95 口罩、无粉乳胶手套、一次性头套、防护靴套;<sup>f</sup>包括护目镜、防护靴、橡胶手套

2. 模型预测误差:SEIHR 模型在没有非药物干预措施(nonpharmaceutical interventions, NPIs)影响、疾病自然传播条件下,自出现首个确诊 COVID-19 病例后 20 d 内,所预测的住院患者人数与意大利实际报告住院人数的平均绝对误差百分比为 3.9%,模型预测结果良好,误差在模型研究中可接受的误差范围内,可进行下一步情景构建分析。自第 20 天后模型预测和意大利实际报告住院患者人数未实现重叠,出现预测与实际(对应阴影部分之外的曲线)的差距,是由于意大利实施 NPIs 影响疾病自然传播,导致曲线发生变化,间接证明了模型参数的设定具有科学性,符合 NPIs 压低 SARS-CoV-2 感染人数峰值的理论。

3. 情景构建结果评估:

情景 1:每日住院患者数最高为 35 181 人,疫情开始后第 115 天后每日新增病例达到 100 人以下,得到较好控制(图 2B)。该情景进行全员核酸检测,按照检测策略的时间及频率要求,以及不同职能分配,导致对标本采样、实验室检测、消杀、社



注:横坐标表示自出现首例报告病例后的天数;A. 模型预测误差检验结果,蓝色阴影表示用于模型检验的时间段,即意大利报告首例确诊病例后连续 20 d 的住院患者人数变化;B-F. 分别对应情景 1 至情景 5 确诊患者人数随时间的变化

图 2 不同情景下的确诊患者人数-时间变化

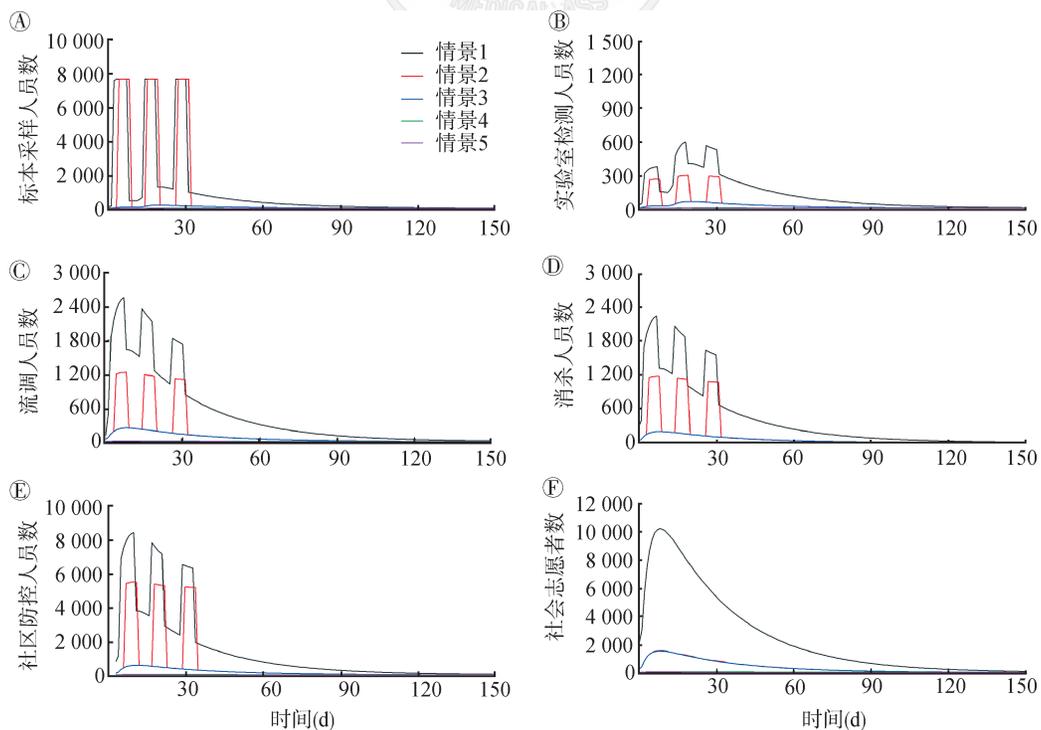


图 3 不同情景下实验室检测和预防控制人力资源需求

区防控人员的需求急剧增加,出现锯齿状变化(图 3),社会志愿者活动于流行病学辅助调查、标本采

样密接隔离点辅助检测与监测等工作,无论是否开展全员核酸检测,均一直处于高需求状态,因此未

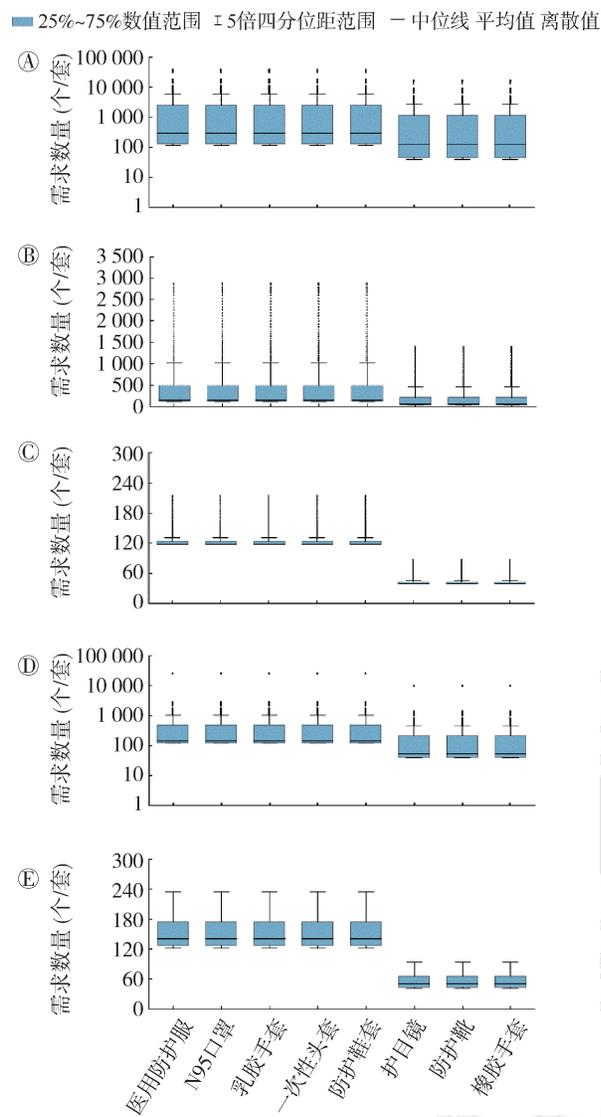


图4 不同情景下个人防护用品的日需求量

出现其他工作人员短暂性急剧增加的需求变化(图3F)。标本采样人员和实验室检测人员最大日需求合计已超过医院检验人员 10.5 倍<sup>[20]</sup>, 超过 CDC 检验人员 89.1 倍<sup>[20]</sup>。流调人员、消杀人员最大日需求合计人数远远超过我国 CDC 卫生技术人员人数<sup>[20]</sup>。社区防控人员和社会志愿者最大日需求分别为 8 419 人和 10 201 人。该情景下日最大所需采样管和检测试剂盒均为 502 899 个, 在日产能范围内。A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、样本运输箱、普通冰箱、低温冰箱、PCR 仪、移液器的配套使用与实验室人员轮班分组和使用效率等相关, 最大日需求均在 75~251 个(台)不等。该情景对医疗个人防护用品的需求数远远高于非全员核酸检测时的用量, 出现高离散和高基数的需求数值(图4)。医用防护服、N95 口罩、乳胶手套、头套、防护靴套属于一次性消耗品, 其累计消耗量均为

1 149 310 套, 一次性医用防护服、N95 口罩在我国日产能范围内<sup>[20]</sup>。护目镜、防护靴、橡胶手套为可循环使用物资, 累计消耗量均为 130 721 套(表2)。

情景2: 每日住院患者数最高为 5 286 人, 疫情开始后第 62 天后每日新增病例达到 100 人以下, 在基本参数不变的情况下, 比情景 1 峰值人数降低 93.4%, 得到更好控制(图 2C)。该情景疫情防控进行全员核酸检测, 标本采样人员日最大需求和情景 1 相等, 其与实验室检测人员最大日需求合计已超过我国医院检验人员 10.1 倍, 超过 CDC 检验人员 86.0 倍。流调人员、消杀人员最大日需求合计人数已超过 CDC 卫生技术人员 5.7 倍。社区防控人员和社会志愿者最大日需求分别为 5 490 人和 1 557 人。该情景下日最大所需采样管和检测试剂盒均为 255 428 个, A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、样本运输箱、普通冰箱、低温冰箱、PCR 仪、移液器最大日需求在 26~128 个(台)不等。一次性医用个人防护用品累计消耗量均为 489 259 套。护目镜、防护靴、橡胶手套累计消耗量均为 95 545 套。

情景3: 每日住院患者数最高为 5 283 人, 疫情开始第 61 天后每日新增病例达到 100 人以下, 得到较好控制(图 2D)。与情景 2 相比, 该情景疫情持续时间与确诊有症状住院和无症状隔离患者人数相近, 未实施全员核酸检测, 标本采样人员和实验室检测人员最大日需求合计超过 CDC 检验人员 3.3 倍, 但标本采样人员和实验室检测人员最大日需求合计在我国医院检验人员储备数量以下, 比情景 2 减少了 96.1% 的标本采样和检验人力资源需求。流调人员、消杀人员最大日需求合计人数均未超过 CDC 卫生技术人员数。社区防控人员和社会志愿者最大日需求分别为 565 人和 1 527 人。该情景下日最大所需采样管和检测试剂盒均为 61 707 个, A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、样本运输箱、普通冰箱、低温冰箱、PCR 仪、移液器最大日需求在 6~31 个(台)不等。医用防护服、N95 口罩、乳胶手套、头套、防护靴套累计消耗量均为 154 830 套。护目镜、防护靴、橡胶手套累计消耗量均为 18 486 套。该情景下疾病暴发规模与情景 1 基本一致, 但人力、设备、个人防护用品需求分别比情景 2 减少 84.6%、75.3%、70.4%。

情景4: 每日住院患者数最高为 239 人, 日新增病例虽然均低于 25 人, 但疫情持续时间超过 150 d (图 2E)。该情景疫情防控无全员核酸检测, 标本

采样人员和实验室检测人员、流调人员、消杀人员最大日需求合计可满足我国医院和 CDC 检验人员配备水平。社区防控人员和社会志愿者最大日需求分别为 22 人和 60 人。该情景下日最大所需采样管和检测试剂盒均为 14 256 个, A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、样本运输箱、普通冰箱、低温冰箱、PCR 仪、移液器最大日需求均在 10 个(台)以下。医用防护服、N95 口罩、乳胶手套、头套、防护靴套累计消耗量均为 46 270 套。护目镜、防护靴、橡胶手套累计消耗量均为 12 406 套。

情景 5: 每日住院患者数最高为 172 人, 日新增病例均低于 20 人, 第 25 天后新增确诊病例降至个位数(图 2F)。该情景疫情防控无全员核酸检测, 标本采样人员和实验室检测人员、流调人员、消杀人员最大日需求合计可满足我国医院和 CDC 检验人员配备水平。社区防控人员和社会志愿者最大日需求分别为 20 和 54 人。该情景下日最大所需采样管和检测试剂盒均为 13 892 个, A2 型生物安全柜、板式离心机、高压灭菌器、样本运输箱、普通冰箱、低温冰箱、PCR 仪、移液器最大日需求在 10(台)以下。医用防护服、N95 口罩、乳胶手套、头套、防护靴套累计消耗量均为 38 651 套。护目镜、防护靴、橡胶手套累计消耗量均为 11 980 套。该情景下最大日住院/隔离患者数与情景 4 基本一致, 但疫情持续时间缩短 125 d 以上, 人力、设备、个人防护用品需求分别比情景 4 少 7.0%、2.6%、13.7%。

从情景结果的比较来看, 情景 1 和情景 2 结果表明, 在相同无症状感染者比例、防控措施效果且无疫苗免疫人群的前提下, 实现病例的早发现、早报告、早隔离、早治疗, 可使现患数峰值降低 85.0%。两者均实施全员核酸检测, 对标本采样人员、采样点服务保障人员的需求峰值相等, 其他医疗卫生资源均有效减少。在社区传播和暴发时, 对医疗卫生资源, 尤其是人力资源的急剧需求超过地区现有资源储备承载力, 需要其他地区人力及物资援助。情景 2 和情景 3 的结果表明, 在相同无症状感染者比例的前提下, 无 COVID-19 疫苗接种但具有严格高效的防控措施效果时, 与接种疫苗获得 50% 免疫人群但适当调整和降低防控措施效果时的现患人数基本一致。在此条件下, 若实行全员核酸检测, 将增加 70.4~84.6 倍的实验检测和预防控制资源。情景 3~5 的结果表明, 当无症状感染者比例增加且免疫人群比例较低时, 即使是病例散发规模较小, 防控措施效果较好, 疫情持续时间和对

医疗卫生资源的占用时间也会较久, 只有促进疫苗接种, 增加免疫人群比例, 才可在短期内迅速扑灭疫情。

## 讨 论

在 COVID-19 全球大流行背景下, 我国仍需进行人力储备, 以备应对难以预见的疫情。需考完全员核酸检测对人力资源的挑战及实施的必要性。仍不可放松实施 NPIs, 有条件时尽可能接种 COVID-19 疫苗<sup>[23]</sup>, 在一定程度缓解疾病流行带来的卫生资源需求冲击。

情景 1~5 涵盖了与疫情发生以来湖北省武汉市、黑龙江省绥化市、河北省石家庄市、新疆维吾尔自治区喀什市、北京市疫情类似的流行场景。结合我国多地应对 COVID-19 的经验, 分析人力及物资需求增加的原因主要有 3 点: 一是出现社区传播病例数短时间内骤增, 或实施全员核酸检测策略, 造成实验室检测量剧增使得确诊结果延时; 确诊病例、密接者及次密接的预防控制任务繁重, 导致有限人力条件下难以快速完成流调和集中隔离工作, 对社会志愿者及社区防控人员的辅助需求巨大。二是实验室检测和流调人员短时间内无法再生, 实验室、流调人员数量严重不足, 且生理疲劳心理恐慌, 面临感染风险<sup>[24]</sup>, 尤其是实施全员核酸检测策略时, 亟需其他地区专业人员支援; 三是黑龙江省<sup>[25]</sup>、石家庄市<sup>[26]</sup>疫情及近期的文献报道<sup>[2, 18]</sup>显示, 无症状感染者比例大且具有更强的隐蔽性, 增加了识别和防控的难度。一旦出现疫情暴发, 对标本采集和实验室检测人力剧增的需求将无法当前医院和 CDC 的现有储备<sup>[20]</sup>。要排除这些潜在疾病传播风险和威胁, 核酸检测是有效筛选手段之一。

在面对情景 1、2 卫生资源供不应求的挑战时, 我们可以从以下 3 个角度思考应对策略, 使短缺资源得到替代供应: 第一, 坚持以预防为先, 在做好精准防控的同时, 积极推进 COVID-19 疫苗的生产、分配和接种。目前, 我国已有 5 个生产企业的 COVID-19 疫苗批准附条件上市或紧急使用。临床试验和紧急使用阶段及前期重点人群较大规模接种后疑似预防接种异常反应监测数据表明 COVID-19 疫苗安全性良好<sup>[6]</sup>。应做好健康知识宣传普及, 提升接种率, 建立免疫屏障, 缓解甚至阻断疫情传播, 从而降低资源需求。第二, 建立人力资源储备机制, 组织相关专业技术人员组建后备队

伍,预先招募社会防控志愿者并进行培训,保障疫情暴发时以最短时间有效辅助防控工作的开展,还包括对采样管、检测试剂盒的储备,应对疾病暴发引发的资源需求激增,做到平战结合和平战转换。第三,改进实验、流调的技术和流程。将第三方检测机构纳入检测部门,跟进需要探索建立每日万人份的应急核酸检测及千人份高通量测序实验室(“火眼”实验室)<sup>[27]</sup>,满足大规模核酸检测时的需求;整合实验室检验及个人行程信息,自动生成轨迹记录,提供高风险地区旅居史智能报警,起到智能助手快速辅助判断作用,提高流调效率;发挥科技优势<sup>[28]</sup>,使用机器人完成基本实验室检验、流调信息记录等机械工作,速度快、精度高,降低人力资源需求。最后,虽然情景3~5的设备资源满足我国当前的产能水平,随着我国疫情防控向好,医用防护耗材需求将面临断崖式下降而导致前期产能过剩,可关注国际疫情发展态势及相关产品需求情况,服务国际需求。积极提升自身产品技术水平,采取有效措施抵御需求骤降风险<sup>[22]</sup>。

本研究结合了中国自武汉市社区传播后,暴发的多起疫情中无症状感染者比例增加、COVID-19 疫苗接种持续推进的实际情况,为 COVID-19 大流行下的卫生资源应急准备提供理论支持和参考。传统 SEIR 模型用于预测早期 SARS-CoV-2 的传播,本研究结合 COVID-19 流行特点,引入无症状感染者,弥补了早期模型研究中流行病学参数的不确定性<sup>[13]</sup>,增强了预测的准确性。考虑到病例报告存在的延迟,本研究方法可用于快速、持续地评估所需资源需求量,并为防控物资生产领域的资源投入与配置策略提供指导,避免产能大量过剩引起资源浪费。本研究也存在局限性。首先,资源需求评估还受诸多因素的影响,如地区应急处理能力及政策、医疗支援、伦理问题等相关复杂因素,因此需结合受评估区域的实际情况判断。第二,无症状感染者的传染性、传染期的准确数值尚需进一步研究,可能因 SARS-CoV-2 的传代和变异改变,本研究基于有症状者的基本再生指数,未来需根据更多新证据来调整和优化模型参数。第三,大规模核酸检测的开展尚无明确启动条件,本研究参考了部分地区的实施时间节点,不能广泛代表现实情况。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

**志谢** 感谢北京零研科技有限公司对本研究的技术支持

## 参 考 文 献

- [1] World Health Organization. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard[EB/OL]. [2021-02-08]. <https://covid19.who.int/>.
- [2] Lee S, Kim T, Lee E, et al. Clinical course and molecular viral shedding among asymptomatic and symptomatic patients with SARS-CoV-2 infection in a community treatment center in the Republic of Korea[J]. *JAMA Intern Med*, 2020, 180(11):1-6. DOI:10.1001/jamainternmed.2020.3862.
- [3] Remuzzi A, Remuzzi G. COVID-19 and Italy: what next? [J]. *Lancet*, 2020, 395(10231): 1225-1228. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30627-9.
- [4] 张婷, 吴洪涛, 王凌航, 等. 基于情景模拟的新型冠状病毒肺炎医疗资源需求快速评估研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(9): 1390-1395. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200401-00488. Zhang T, Wu HT, Wang LH, et al. Scenario-based study of medical resource requirement rapid assessment under the COVID-19 pandemic [J]. *Chin J Epidemiol*, 2020, 41(9): 1390-1395. DOI:10.3760/cma.j.cn112338-20200401-00488.
- [5] Fallucchi F, Faravelli M, Quercia S. Fair allocation of scarce medical resources in the time of COVID-19: what do people think? [J]. *J Med Ethics*, 2021, 47(1): 3-6. DOI: 10.1136/medethics-2020-106524.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 全国新冠病毒疫苗接种情况 [EB/OL]. (2021-03-07) [2021-03-26]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqjzqk/202103/0e5bf66b833a45de8db07e706775ae8e.shtml>. National Health Commission of the People's Republic of China. Vaccination of new coronavirus in China[EB/OL]. (2021-03-07) [2021-03-26]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqjzqk/202103/0e5bf66b833a45de8db07e706775ae8e.shtml>.
- [7] 国务院应对新型冠状病毒感染肺炎疫情联防联控机制. 关于进一步做好当前新冠肺炎疫情防控工作工作的通知 [EB/OL]. (2021-01-20) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/bgt/gwywj2/202101/e4cdfd5ecc674bd5ab909f2e7ef4089b.shtml>. State Council Responds to the Joint defense and Control Mechanism for COVID-19. Notification about further efforts to prevent and control the current outbreak of new crown pneumonia[EB/OL]. (2021-01-20) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/bgt/gwywj2/202101/e4cdfd5ecc674bd5ab909f2e7ef4089b.shtml>.
- [8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)的通知 [EB/OL]. (2020-08-19) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=0a7bdf12bd4b46e5bd28ca7f9a7f5e5a>. National Health Commission of the People's Republic of China. Notification of the publication of the protocol for the diagnosis and treatment of COVID-19 (Trial Eighth Edition) [EB/OL]. (2020-08-19) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=0a7bdf12bd4b46e5bd28ca7f9a7f5e5a>.
- [9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发新型冠状病毒肺炎防控方案(第七版)的通知 [EB/OL]. (2020-09-15) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=318683cbfaee4191aee29cd774b19d8d>. National Health Commission of the People's Republic of China. Notification of the publication of COVID-19

- prevention and control program (Seventh Edition) [EB/OL]. (2020-09-15) [2021-02-05]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=318683cbfaee4191aee29cd774b19d8d>.
- [10] 河北省卫生健康委员会. 石家庄 1 月 6 日将全面启动全员核酸检测 [EB/OL]. (2021-01-06) [2021-02-05]. <http://www.hebwsjs.gov.cn/html/sxdt/20210106/375230.html>. Health Commission of Hebei province. Nucleic acid test totally in Shijiazhuang will be fully launched on January 6<sup>th</sup>, China [EB/OL]. (2021-01-06) [2021-02-05]. <http://www.hebwsjs.gov.cn/html/sxdt/20210106/375230.html>.
- [11] 魏永越, 官锦兴, 赵杨, 等. SEIR 动力学模型辅助北京市新发地新型冠状病毒肺炎疫情传播起始时间溯源和防控效果评价 [J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(11):1772-1776. DOI:10.3760/cma.j.cn112338-20200706-00927. Wei YY, Guan JX, Zhao Y, et al. Inference of start time of resurgent COVID-19 epidemic in Beijing with SEIR dynamics model and evaluation of control measure effect [J]. Chin J Epidemiol, 2020, 41(11): 1772-1776. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200706-00927.
- [12] Oxford Martin School & University of Oxford. Our world data [EB/OL]. [2021-02-05]. <https://ourworldindata.org/#entries>.
- [13] 洪航, 史宏博, 姜海波, 等. 基于传染病动力学模型的宁波市新型冠状病毒肺炎防控措施效果评估 [J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(10): 1606-1610. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200311-00313. Hong H, Shi HB, Jiang HB, et al. Epidemic dynamic model based evaluation of effectiveness of prevention and control strategies for COVID-19 in Ningbo [J]. Chin J Epidemiol, 2020, 41(10):1606-1610. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200311-00313.
- [14] Chen SM, Chen QS, Yang WZ, et al. Buying time for an effective epidemic response: the impact of a public holiday for outbreak control on COVID-19 epidemic spread [J]. Engineering, 2020, 6(10): 1108-1114. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.018.
- [15] Lai SJ, Ruktanonchai NW, Zhou LC, et al. Effect of non-pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China [J]. Nature, 2020, 585(7825):410-413. DOI: 10.1038/s41586-020-2293-x.
- [16] Wiersinga WJ, Rhodes A, Cheng AC, et al. Pathophysiology, transmission, diagnosis, and treatment of coronavirus disease 2019 (COVID-19): A review [J]. JAMA, 2020, 324(8):782-793. DOI: 10.1001/jama.2020.12839.
- [17] Ren RQ, Zhang YP, Li Q, et al. Asymptomatic SARS-CoV-2 infections among persons entering China from April 16 to October 12, 2020 [J]. JAMA, 2021, 325(5): 489-492. DOI: 10.1001/jama.2020.23942.
- [18] He ZY, Ren LL, Yang JT, et al. Seroprevalence and humoral immune durability of anti-SARS-CoV-2 antibodies in Wuhan, China: a longitudinal, population-level, cross-sectional study [J]. Lancet, 2021, 397(10279): 1075-1084. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)00238-5.
- [19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发全员新型冠状病毒核酸检测组织实施指南的通知 [EB/OL]. (2021-02-08) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/zyygj/s7659/202102/c7744556a26f4db1b9f9714dba2dc670.shtml>. Medical and Health Authority. Notice on issuing guidelines for the implementation of new coronavirus nucleic acid testing organization [EB/OL]. (2021-02-08) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/zyygj/s7659/202102/c7744556a26f4db1b9f9714dba2dc670.shtml>.
- [20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 2020 中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2020. National Health Commission of the People's Republic of China. China health statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2020.
- [21] 国务院联防联控机制. 2020 年 4 月 8 日新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2020-04-08) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqfkdt/202004/0f0d0c57f20e454499a67b43ff00b3d6.shtml>. State Council Responds to the Joint Defense and Control Mechanism for COVID-19. Transcript of press conference on April 8, 2020 [EB/OL]. (2020-04-08) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqfkdt/202004/0f0d0c57f20e454499a67b43ff00b3d6.shtml>.
- [22] 国务院联防联控机制. 2020 年 4 月 5 日新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2020-04-05) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/s3574/202004/abbed532f80e49f683957952ff8133f8.shtml>. State Council Responds to the Joint Defense and Control Mechanism for COVID-19. Transcript of press conference on April 5, 2020 [EB/OL]. (2020-04-05) [2021-03-25]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/s3574/202004/abbed532f80e49f683957952ff8133f8.shtml>.
- [23] 冯录召, 杨涛, 王晴, 等. 科学接种疫苗降低感染性疾病风险护卫老年健康 [J]. 中华医学杂志, 2020, 100(48):3821-3826. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20201020-02882. Feng LZ, Yang T, Wang Q, et al. Prevent infectious diseases through vaccination, and protect health of the elderly [J]. Chin J Med, 2020, 100(48):3821-3826. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20201020-02882.
- [24] Yang J, Chen XH, Deng XW, et al. Disease burden and clinical severity of the first pandemic wave of COVID-19 in Wuhan, China [J]. Nat Commun, 2020, 11(1):5411. DOI: 10.1038/s41467-020-19238-2.
- [25] 黑龙江省卫生健康委员会. 黑龙江绥化市庆安县开展第三轮全员核酸采样 [EB/OL]. (2021-02-05) [2021-02-07]. <http://yiqing.ljjk.org.cn/index/Pcontrol/newsinfo/id/4861>. Health Commission of Heilongjiang province. Third round of whole mount nucleic acid sampling was conducted in Qingan county, Suihua city, Heilongjiang, China [EB/OL]. (2021-02-05) [2021-02-07]. <http://yiqing.ljjk.org.cn/index/Pcontrol/newsinfo/id/4861>.
- [26] 河北省卫生健康委员会. 2021 年 1 月 6 日河北省新型冠状病毒肺炎疫情影响情况 [EB/OL]. (2021-01-07) [2021-02-05]. <http://www.hebwsjs.gov.cn/yqtb/375264.jhtml>. Health Commission of Hebei province. January 6, 2021 COVID-19 outbreak in Hebei province, China [EB/OL]. (2021-01-07) [2021-02-05]. <http://www.hebwsjs.gov.cn/yqtb/375264.jhtml>.
- [27] 谢青, 王晶, 游简龄, 等. 大规模检测平台在新型冠状病毒疫情防控中的作用: 基于新型数值模型的实证研究 [J]. 中华医学杂志, 2020, 100(32): 2532-2536. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20200320-00860. Xie Q, Wang J, You JL, et al. The role of large-scale testing platform in the prevention and control of the COVID-19 pandemic: an empirical study based on a novel numerical model [J]. Chin J Med, 2020, 100(32): 2532-2536. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20200320-00860.
- [28] Armaignac DL, Saxena A, Rubens M, et al. Impact of telemedicine on mortality, length of stay, and cost among patients in progressive care units: experience from a large healthcare system [J]. Crit Care Med, 2018, 46(5):728-735. DOI: 10.1097/CCM.0000000000002994.