Research
Public Health—Article

基于情景构建的中国 COVID-19 相关基本临床医疗资源需求评估

张婷^{a,#}, 王晴^{b,#}, 冷志伟^{a,#}, 杨媛^b, 杨津^a, 陈方媛^a, 贾萌萌^a, 张惺惺^a, 亓蔚然^a, 徐韵韶^a, 陈思雅^a, 戴佩希^b, 马礼兵^{a,c}, 冯录召^{a,*}, 杨维中^{a,*}^a School of Population Medicine and Public Health, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China^b Division of Infectious Diseases, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China^c Department of Respiratory and Critical Care Medicine, The Affiliated Hospital of Guilin Medical University, Guilin 541001, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2021

Revised 15 February 2021

Accepted 25 March 2021

Available online 21 May 2021

关键词

COVID-19

SEIHR 动力学模型

临床医疗资源需求

疫苗接种

摘要

新冠病毒肺炎 (COVID-19) 大流行是全球性的公共危机。COVID-19 疫情暴发后, 感染病例和重症患者骤增, 导致亟需救治的患者数量增加、医疗资源供不应求, 许多国家的医疗系统不堪重负, 甚至崩溃。本研究基于不同情景下的 COVID-19 疫情暴发和防控, 旨在评估中国 COVID-19 疫情相关的基本临床医疗资源需求。本研究使用易感者-潜隐者-传染者-住院/隔离者-移除者 (包括康复和死亡) (SEIHR) 传播动力学仓储模型来估计感染者和住院/隔离患者的数量, 以及所需的基本医疗资源。研究发现, 在实施严格的非药物干预 (NPI) 措施或大规模人群接种疫苗的情景下, 中国能够迅速控制社区传播和局部地区暴发的聚集性疫情。然而, 在实施较低强度的 NPI 措施和通过疫苗接种获得免疫的人口比例较低的情景下, 需要使用平疫转换模式来储备医疗资源和提高服务能力, 以确保疫情发生时医疗卫生系统的正常运行。不同时期 COVID-19 疫苗的接种和 NPI 措施的实施会减缓疫情的传播, 进而影响临床救治需求。在构建的情景中, 无症状感染者比例的增加不会减少对医疗资源的需求, 但会增大疫情防控的难度。本研究为全球抗击 COVID-19 疫情期间防控策略的调整提供了依据, 为未来应对 COVID-19 疫情大流行的公共卫生应急准备提供借鉴, 也为基本医疗资源储备和配置提供指导。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

2020年3月11日, 世界卫生组织 (WHO) 宣布新冠病毒肺炎 (COVID-19) 已构成全球大流行[1]。截至2021年1月16日, 全球累积确诊病例92 262 621例, 死亡病例1 995 037例[2]。中国大陆地区实施了严格的疫情防控措施, 全面遏制国内了第一波社区传播[3–5]。受病毒变异、病例检测和诊断能力提高等多重因素影响[5],

无症状感染者在报告病例中的比例较初始流行病学曲线中显示的比例有所增加。每当大规模疫情暴发时, 都会给医疗系统造成巨大压力。目前, 美国和英国 COVID-19 确诊病例的增加对其医疗系统是一个巨大的挑战[6]。此外, 现有的基本医疗资源数量充足与否也很重要。中国武汉和意大利的每千人病床数量分别为7.28和3.49 [7], 均高于全球平均水平 (2.7), 也高于中等收入国家 (2.4) 和低收入国家 (1.2) [8]。在病例数呈指数级增长期间,

* Corresponding authors.

E-mail addresses: fengluzhao@cams.cn (L. Feng), yangweizhong@cams.cn (W. Yang).

These authors contributed equally to this work.

武汉累计发病率为0.59%，意大利为0.05%；由于医疗系统超负荷运作，病死率显著上升[9,10]。

疫情暴发时，医疗系统总是最先受到冲击[11,12]。一旦医疗系统负荷过重，越来越多的人将无法接受治疗或隔离，这不仅加剧了疾病的传播，还会导致过高的死亡率[13,14]。据估计，截至2020年9月6日，全球可能已有超过300万医护人员被感染[15]。由于缺乏个人防护装备（PEE），许多国家的一线医护人员被感染的风险很高。此外，由于疫情肆虐，医护人员在很大程度上都身心俱疲，这可能使他们无法持续应对COVID-19疫情所带来的挑战。根据世界卫生组织报道的数据，在每6名住院治疗的COVID-19患者中，就会有1名转为重症并出现呼吸困难的症状，这通常需要使用无创呼吸机辅助通气[16]。如果患者的病情恶化，可能需要有创呼吸机来提供进一步辅助通气。随着COVID-19重症病例数量迅速增加，许多国家的患者因全球呼吸机短缺而无法得到充分治疗[6]。与2019年同期相比，2020年前3个月中国武汉的总死亡率上升至33%~42%。总的来说，有61%的超额死亡与COVID-19有关。无法及时接受救治可能是非肺炎相关死亡人数增加的主要原因，特别是糖尿病、高血压和缺血性心脏病等慢性疾病患者需要长期的医疗管理与监测，以及一些急救病患未能及时得到临床治疗，这导致院外死亡人数显著增加[17]。

在COVID-19疫情期间，应对急剧增长的临床资源需求十分具有挑战性[18,19]。中国等许多国家的人均病床数量低于发达国家[8]，但这些国家一直在努力采取适当的针对性措施来抗击疫情。COVID-19疫情期间对医疗资源的额外需求包括个人防护装备（如口罩和防护服）需求的增加、医护人员工作量的增加，以及医疗设备[如医院和重症监护病房（ICU）的病床及呼吸器]需求的扩大。其他呼吸道病原体的共循环可能包括与COVID-19相似的症状，因此临床资源的需求也会增加[20,21]。

就应对和防治下一波疫情而言，评估基本临床资源需求是最紧迫的需求之一。自疫情初期以来，在全球范围内，许多国家因医疗资源短缺而面临资源分配问题[6]。此外，关于COVID-19的临床资源需求评估并不充分。在一些研究中，研究人员已经开发出工具来评估COVID-19疫情期间的临床资源需求，以预测入院治疗的需求和所需的床位[22,23]。在已发表的研究中，临床资源（如床位和呼吸机）需求的评估主要是基于对感染人数的估测[24,25]。然而，这些研究缺乏对临床资源需求的详细评估，就疫情常规防控的状况而言，这与不同

防控效果的参数相关。本研究基于不同的情景假设，评估了非药物干预（NPI）措施[3,4,26]和COVID-19疫苗[27]的有效性，并基于修正的传播动力学模型，以中国为例评估了临床资源需求。本研究旨在为COVID-19疫情期间医疗资源的应急准备提供理论参考，弥补疫情期间基于不同情景更有效调整防控措施的不足，并促进医疗资源供需平衡。

2. 研究方法

2.1. 概念定义

临床资源由三部分组成：①人力资源，包括医院内的医生、护士和护工；②病床和设备，包括医院或隔离床位、ICU床位和医疗设备（如呼吸机）；③个人防护装备，包括防护服、隔离衣、口罩、手套、隔离帽、面罩或护目镜、鞋套。

无症状感染者是指未出现相关临床症状，但是严重急性呼吸综合征冠状病毒2型（SARS-CoV-2）检测呈阳性的患者。住院患者是指入院治疗的确诊病例或集中隔离的无症状感染者。

2.2. 研究过程概述

本研究建立了一个扩展模型，以评估一个拥有1000万人口的中国城市对医疗资源的需求，并且将COVID-19的流行病学特征纳入传播参数。将关于非药物干预措施效果的研究结果和通过疫苗接种获得免疫的人群比例纳入模型参数，以便在各种情景下进行模拟。以某大城市的规模为例，基于人口规模、传播指数、防控策略和措施等定性情景假设，确定初始定量值。在不同情景下，从感染比例、住院患者比例、住院或隔离资源等方面定量评估临床资源需求（图1）。然后将估算结果与中国每1000万人的实际储量进行比较[28,29]，以确定临床资源是否满足供需平衡。

在意大利，COVID-19相关病例的报告晚于中国武汉，但早于欧洲其他国家，并且早期针对COVID-19仅实施了少数非药物干预措施；因此，通过拟合意大利疫情数据，可以获得更准确的疾病自然传播参数，如暴露后感染率（ β ）。由于感染、发病和报告之间存在时滞，我们仅拟合了从意大利报告首例住院病例开始到宣布延长封锁期为止（即2020年2月24日至3月20日）的曲线。在此期间，病例数没有超过意大利医疗系统的负荷，同时中国向世界通报了疫情信息。因此，我们使用从OurWorldInData.org获得的数据，将意大利每日报告的病例

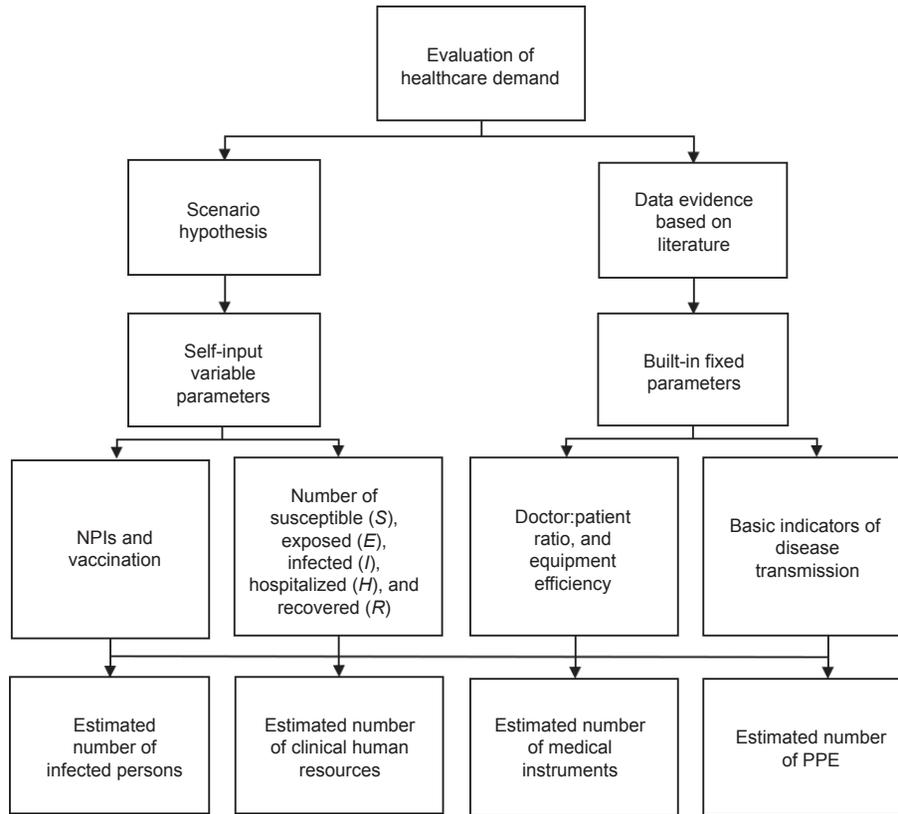


图1. 数据流程图。NPI: 非药物干预; PEE: 个人防护装备 (包括防护服和外科口罩)。

数与使用该模型评估的确诊病例数进行了比较, 以验证其准确性。

2.3. 构建传输动力学模型

2.3.1. 模型的假设

模型是根据以下假设构建的:

- (1) COVID-19是全球性大流行病[1]。
- (2) 目前尚无治疗COVID-19的特异性抗病毒药物[3]。
- (3) 来自其他地区的医疗支援存在不确定性, 临床资源需求完全依赖当地储备的临床资源[12]。
- (4) 免疫人群按年龄平均分布在总人口中[6]。
- (5) 初期感染人数基于平均分布[24]。
- (6) 无症状感染者具有传染性[30]。
- (7) 感染期过后, 患者进入恢复期, 在恢复期患者可能仍有临床病症但不具有传染性[5]。
- (8) 因隔离和感染控制措施, 视住院患者不具有传染性[5]。
- (9) 患者康复后不会出现继发感染。
- (10) 易感者-潜隐者-传染者-住院/隔离者-移除者(包括康复和死亡)(SEIHR)各人群的总和始终等于总人口(N)。

人口(N)。

(11) 接种疫苗后的免疫力是疫苗效力和覆盖率共同作用的结果。

(12) 本研究未考虑COVID-19疫苗的免疫持久性。

2.3.2. 评估模型

本研究将易感-潜隐-传染-康复(SEIR)传播动力学模型扩展到包括住院和隔离, 在SEIR模型的基础上开发了SEIHR模型(图1)。易感者(S)是指总人口, 不包括免疫人群。潜隐者(E)是指处于潜伏期的人。有症状感染者(I_a)是指已经被感染并具有传染性的人。无症状感染者(I_b)是指已被感染但无症状且具有一定传染性的人。有症状住院者(H_a)是指有轻度至重度症状的住院患者。无症状住院者(H_b)是指在整个感染期间没有症状的隔离患者。康复和死亡者(R)指的是已经康复或已经死亡的人(图2)。本研究采用住院和隔离患者不同的临床资源需求参数来区分无症状感染和有症状感染。住院的有症状患者需要更多的临床资源, 而被隔离的无症状患者需要隔离床位, 但对医护资源和医疗设备的需求较少。许多国家不检测无症状感染者, 也没有集中住院治疗或隔离无症状感染者; 因此,

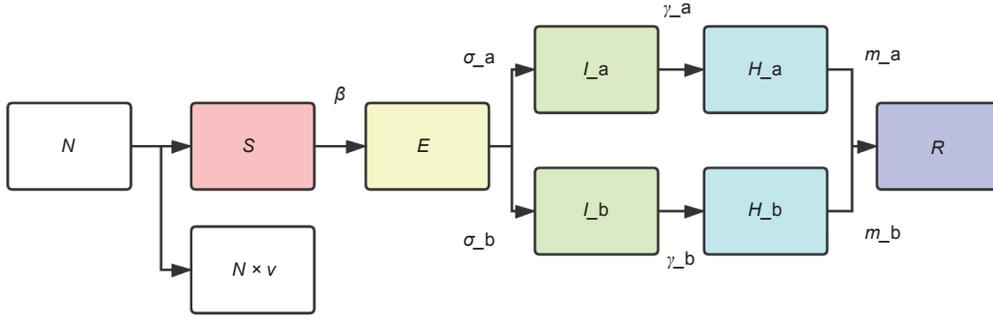


图2. 扩展的SEIHR动力学模型。 v : 接种人口比例（接种人口 \times 疫苗有效性）； β : 接触后的感染率； σ_a : 潜伏期感染者发展为有症状感染者的比率； σ_b : 潜伏期感染者发展为无症状感染者的比率； γ_a : 有症状感染者发展为住院者的比率； γ_b : 无症状感染者发展为住院者的比率； m_a : 有症状的住院者康复或死亡的比率； m_b : 无症状住院者康复或死亡的比率。

本次建模研究将背景设定在中国。

$$\frac{dS}{dt} = \mu \cdot (N - S) - \beta \cdot (1 - v) \cdot \frac{S \cdot I}{N} \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta \cdot (1 - v) \cdot \frac{S \cdot I}{N} - (\sigma_a + \sigma_b + \mu) \cdot E \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = (\sigma_a + \sigma_b) \cdot E - (\mu + \gamma_a) \cdot I_a - (\mu + \gamma_b) \cdot I_b \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} = & (\mu + \gamma_a) \cdot I_a + (\mu + \gamma_b) \cdot I_b - m_a \\ & \times H_a - m_b \times H_b \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dt} = m_a \times H_a + m_b \times H_b - \mu \cdot R \quad (5)$$

$$N = S + E + I + H + R + v \cdot N \quad (6)$$

图2中各参数之间的关系如上述模型。定义 μ 为该计算中未考虑的自然死亡率； t 为某一时刻； H 和 I 为住院/隔离和感染者。其他参数定义见图2。

2.3.3. 情景建立

本研究基于千万人口城市的免疫人群差异、非药物干预措施的有效性、无症状感染者比例、接触者预警能力等构建6个情景。COVID-19疫情期间的流行病学特征和临床资源使用参数来自之前已发表的研究[31–34]、未发表的研究、专家意见和实际调查，如表1[30,34–36]所示。

2.3.4. 临床资源参数

根据以上模型，本研究预测了不同情景下住院或隔离（ H ）患者的分布情况及其峰值。根据前期研究结果[36]，住院/隔离的平均时间为12~15 d，危重症患者的比例为4.7%。我们假设医护人员每天四班轮换，每班工

作6 h，值班医生与住院患者的比例是1:10，而在ICU，这个比例是1:1。我们计算了医生与患者的比例（普通医院床位：1:2.5；ICU床位：1:1）、每位患者的护士人数（住院患者：1:3；ICU：1:1）、每位患者的医护人员人数（住院患者：1:10；ICU：1:2），以及对ICU床位、病床、隔离床、呼吸机等临床资源的需求。同样地，该模型还计算了对医护资源的高峰需求。防护材料的计算是根据医务人员需求的峰值和个人防护标准确定的[26,36]。

2.4. 模型验证

SEIHR传播动力学模型使用了在意大利第一波疫情期间（从2020年2月14日到2020年7月31日）获得的住院数据进行测试。本测试收集每日住院病例数以区分使用模型计算的结果和实际结果（图3）。在图3中，来自意大利的数据指的是目前住院的患者数据，而SEIHR模型中的“ H ”指的是使用该模型预测的目前住院或隔离的患者。阴影代表的是数据之间的差异。结果表明，疫情初期两组数据拟合度较高。但相比模型预测的数据，实际疫情曲线峰值较低，到达峰值时间较晚，这可能与前期干预较少，后期防控措施增多有关。因此，我们得出结论，该模型在后期的拟合效果优于前期。

3. 结果

在不同情景下，从SEIHR模型中提取有症状和无症状感染者（图4），并根据感染人数计算所需医疗资源。

3.1. 情景 1

当患者人数达到2000人时，通过加入封城等严格的非药物干预措施，大约三个月内就能有效控制疫情。我

表1 COVID-19疫情6种情景下的临床资源需求评估参数

| Parameter | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 | Scenario 5 | Scenario 6 |
|------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| N | 10 000 000 | 10 000 000 | 10 000 000 | 10 000 000 | 10 000 000 | 10 000 000 |
| S | 10 000 000 | 10 000 000 | 10 000 000 | 5 000 000 | 9 000 000 | 5 000 000 |
| E | 50 000 | 1 360 | 1 360 | 1 360 | 50 000 | 130 |
| I | 5 600 | 1 320 | 1 320 | 1 320 | 5 600 | 74 |
| H | 2 000 | 900 | 900 | 900 | 2 000 | 60 |
| R | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| β | 0.49 ^d | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 |
| | 0.47 ^d | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 |
| σ_a | 1/3.2 ^d | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 |
| σ_b | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 | 1/3.2 |
| γ_a | 6 [35] | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| γ_b | 6.4 ^d | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.4 |
| m_a | 15 [34,36] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| m_b | 14 [30] | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| f^a | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.8 | 0.3 |
| v^b | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.1 | 0.5 |
| g^c | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.5 |

^a f : the proportion of asymptomatic infections.

^b v : the proportion of immunized population (vaccinated population \times vaccine effectiveness).

^c g : the effectiveness of NPIs.

^d These parameters were derived from a group of experts.

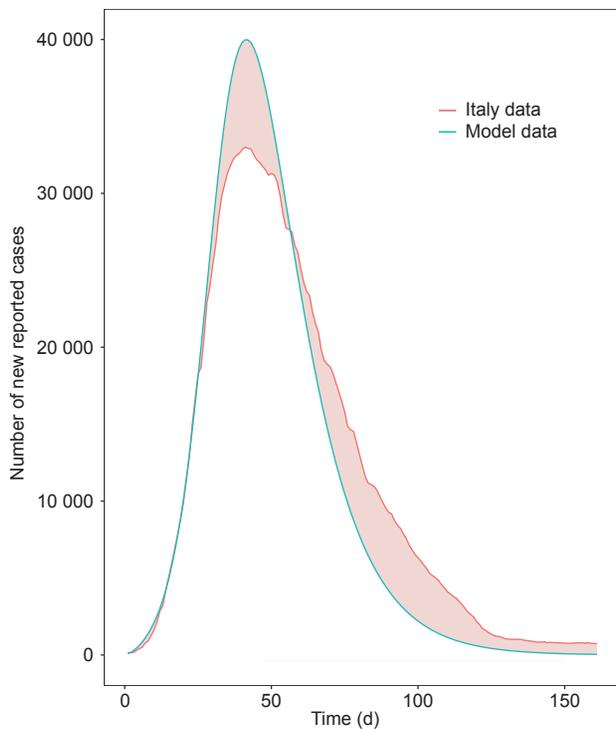


图3. 通过对评估数据与意大利实际数据的对比, 本研究验证了模型的可靠性。粉色阴影表示模型评估数据与意大利实际报告病例数之间的差距, 差距越小, 模型参数越可靠, 研究结果越准确, 评估数据的误差在接受范围内。

们将这种情况下非药物干预措施的有效性设定为80%, 并将无症状感染者设定为30%。有症状感染者、有症状住院者、无症状感染者和无症状住院者的峰值分别为21 374人、29 889人、9569人和12 361人[图4 (a)]。从数量上看, 医生需求为20 307人[图5 (a)], 护士需求为23 548人[图5 (b)], 护工需求为13 085人[图5 (c)]。医院用床需求为9367张[图6 (a)], 隔离病床需求为31 388张[图6 (b)], ICU病床需求为1494张[图6 (c)]。呼吸机需求大于2750台[图6 (d)], 制氧机需求为5679台[图6 (e)]。

3.2. 情景 2

在情景1的基础上, 当更早实施封城等严格的非药物干预措施时, 我们假设最大病例数不会超过2000人。我们还假设其中30%为无症状感染者。有症状感染者、有症状住院者、无症状感染者和无症状住院者的峰值分别为1027人、1560人、526人和740人[图4 (a)]。医生需求为1118人[图5 (a)], 护士需求为1286人[图5 (b)], 护工需求为700人[图5 (c)]。医院用床需求为501张[图6 (a)], 隔离病床需求为1758张[图6 (b)], ICU病床需求为80张[图6 (c)]。呼吸机需求为147台[图6 (d)],

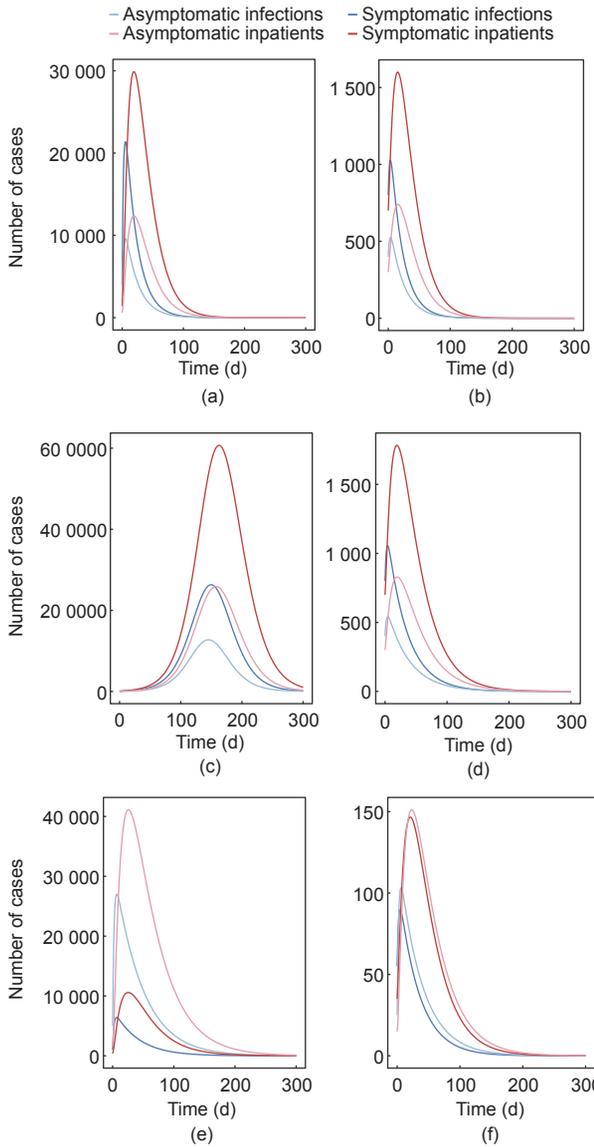


图4. 6种情景下的感染人数和住院人数。(a)~(f) 对应于情景1~6下与疫情持续时间相符的无症状感染人数、有症状感染人数和住院人数。

制氧机需求为304台[图6 (e)]。与情景1相比, 情景2的临床资源需求较低。

3.3. 情景 3

与情景1相比, 我们假设较少的非药物干预措施会导致更严重的后果。在该情景中, 我们将非药物干预措施的有效性设置为50%。有症状感染者、有症状住院患者、无症状感染者、无症状住院患者峰值分别为263 232人、607 006人、127 515人、258 857人[图4 (c)]。与情景1相比, 感染率或住院率增加了12~20倍。医生需求为414 724人[图5 (a)], 护士需求为48 099人[图5 (b)], 护工需求为265 747人[图5 (c)]。医院用

床需求为190 236张[图6 (a)], 隔离病床需求为643 627张[图6 (b)], ICU病床需求为30 350张[图6 (c)]。呼吸机需求为55 844台[图6 (d)], 制氧机需求为115 331台[图6 (e)]。如果没有实施严格的非药物干预措施, 最大病例数可能接近100万例。

3.4. 情景 4

在情景3的基础上, 我们假设免疫人群的比例已经

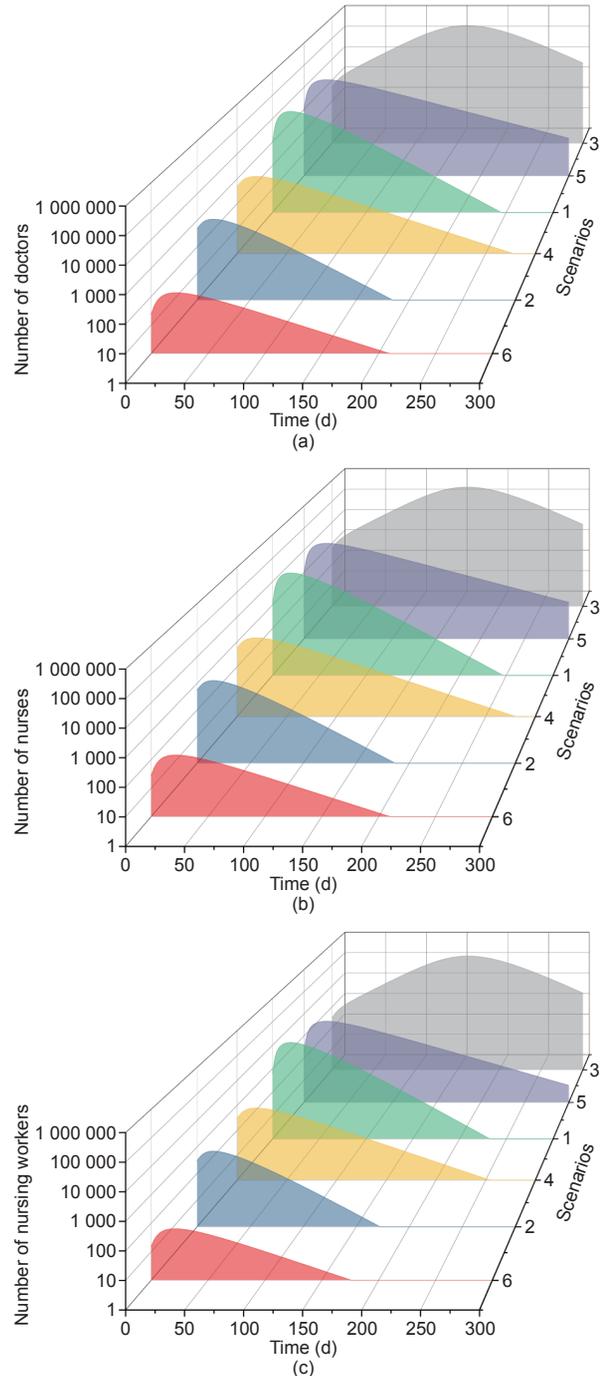


图5. 6种情景下的医护人员需求, 用不同颜色的平面(a~c)表示。

达到50%。有症状感染者、有症状住院者、无症状感染者和无症状住院者的峰值分别为1057人、1784人、542人和830人[图4 (d)]。医生需求为1249人[图5 (a)], 护士需求为1436人[图5 (b)], 护工需求为781人[图5 (c)]。医院用床需求为559张[图6 (a)], 隔离病床需求为1965张[图6 (b)], ICU病床需求为89张[图6 (c)]。呼吸机需求为164台[图6 (d)], 制氧机需求为339台[图6 (e)]。当免疫人口达到50%时, 可适当减少非药物干预措施, 以减轻实施非药物干预措施导致的严重社会经济影响, 并促进社会经济复苏。

3.5. 情景 5

与情景1相比, 我们假设80%的核酸检测呈阳性的患者是无症状感染者, 并且病例总数不会发生显著变化。但是, 当无症状感染者的比例达到80%时, 医疗用品的成本很可能会变得极高。有症状感染者、有症状住院者、无症状感染者和无症状住院者的峰值分别为6401人、10583人、27015人和41123人[图4 (e)]。医生需求为21889人[图5(a)], 护士需求为20587人[图5(b)], 护工需求为4633人[图5 (c)]。医院用床需求为3317张

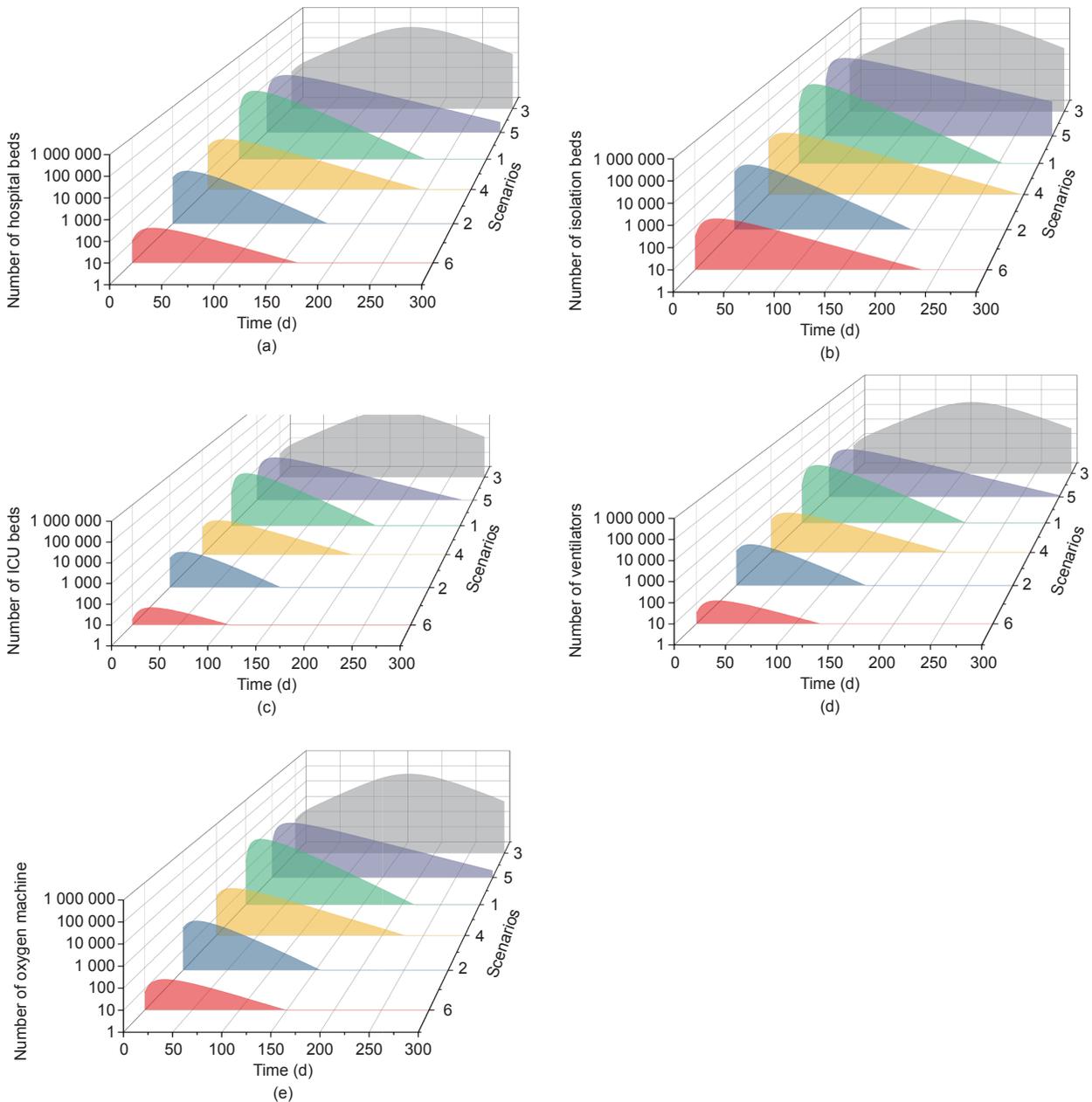


图6. 6种情景下的医疗设备需求(病床、隔离病床、ICU病床、呼吸机、制氧机), 用不同颜色的平面(a~e)表示。

[图6 (a)], 隔离病床需求为47 860张[图6 (b)], ICU病床需求为529张[图6 (c)]. 呼吸机需求为974台[图6 (d)], 制氧机需求为2011台[图6 (e)].

3.6. 情景 6

我们假设, 如果在疫情暴发期间采取干预措施, 且疫苗接种率高, 病例总数将不会超过200例。有症状感染者、有症状住院者、无症状感染者和无症状住院者的高峰人数分别为90人、147人、103人和151人[图4 (f)]. 医生需求为136人[图5 (a)], 护士需求为146人

[图5 (b)], 护工需求为64人[图5 (c)]. 医院用床需求为46张[图6 (a)], 隔离病床需求为244张[图6 (b)], ICU病床需求为7张[图6 (c)]. 呼吸机需求为13台[图6 (d)], 制氧机需求量为28台[图6 (e)]. 临床资源需求低于情景4, 该情景更容易控制疫情, 且临床资源的成本较低。

除了评估所需的医护人员数量和医疗设备资源外, 我们还评估了6种情景下个人防护设备的总需求。个人防护设备的总需求与不同情景下的医护人员有关(图7、表2)。

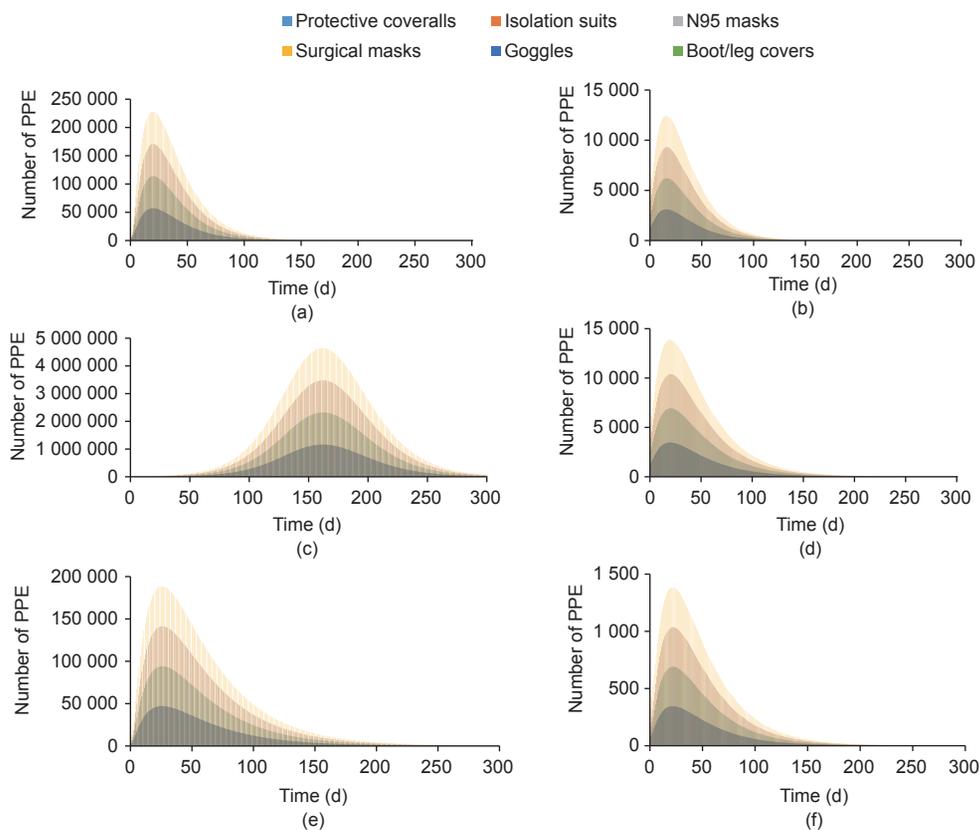


图7. 流行病学资源需求的6种情景。(a)~(f)表示情景1~6。

4. 讨论

本研究得出6种情景下的重要结果: 第一, 在疫情初期, 医疗系统显然容易超负荷。在情景2、4和6中, 研究结果显示临床资源需求没有压力。在情景1和情景5中, 研究表明, 在提高监测和预警能力、实施与武汉类似的非药物干预措施并且存在一定的免疫人群时, 医疗服务体系不会崩溃。然而, 在情景5中, 临床资源将会供不应求, 医疗服务系统可能会陷入瘫痪。第

二, 更灵敏的早期预警系统可以为应急管理提供额外的准备时间。只有在住院或隔离人数达到2000人的情况下, 才可以实施严格的非药物干预措施。但是, 如果在只有900人住院或隔离的情况下就采取这些措施, 就床位的使用而言, 临床资源占用可能会减少10倍以上。当疫情防控水平下降或病例管理能力不足时, 对医护人员的需求将增加。这种情况下, 许多感染者无法住院治疗或接受隔离, 基本临床资源的需求可能会超过情景1和情景5。第三, 严格的非药物干预措施对于保持低水平

表2 6种情景下个人防护装备需求

| PPE | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 | Scenario 5 | Scenario 6 |
|----------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| Protective coveralls | 2 716 050 | 148 617 | 112 277 210 | 220 139 | 3499 596 | 22 309 |
| Isolation gown | 2 716 050 | 148 617 | 112 277 210 | 220 139 | 3 499 596 | 22 309 |
| N95 masks | 2 716 050 | 148 617 | 112 277 210 | 220 139 | 3 499 596 | 22 309 |
| Surgical masks | 10 864 200 | 594 470 | 449 108 841 | 880 555 | 13 998 384 | 89 234 |
| Goggles | 2 716 050 | 148 617 | 112 277 210 | 220 139 | 3 499 596 | 22 309 |
| Boot/leg covers | 5 432 100 | 297 235 | 224 554 421 | 440 277 | 6 999 192 | 44 617 |
| Shoe covers | 2 716 050 | 148 617 | 112 277 210 | 220 139 | 3 499 596 | 22 309 |
| Disposable gloves | 8 148 150 | 445 852 | 336 831 631 | 660 416 | 10 498 788 | 66 926 |
| Isolation hats | 5 432 100 | 297 235 | 224 554 421 | 440 277 | 6 999 192 | 44 617 |

的临床资源需求而言至关重要。当非药物干预措施的有效性从0.8降低到0.5时，对医生的需求就会增加100倍以上。第四，疫苗接种可以减少实施严格的非药物干预措施的必要性，同时保持低水平的临床资源需求，这有助于在COVID-19疫情期间恢复标准医疗服务工作。在免疫人群覆盖率为50%和实施不太严格的非药物干预措施（50%的有效性）的情况下，疫情也会传播。第五，无症状感染者数量的增加与检测的困难性对于控制无症状感染者的人数与保证临床资源充足而言是个挑战，这会降低非药物干预措施的有效性。由于无症状患者仍具有传染性且需要隔离，因此无症状患者比例的增加并不意味着对临床资源的需求会显著减少。然而，由于无症状感染者不易被察觉，在此情况下非药物干预措施只需要保持低水平的有效性。

我们的研究结果突出了一些值得关注的问题。有两个主要因素可能会导致COVID-19疫情引起的医疗系统崩溃。首先，病例数量在短时间内急剧增加，造成医院人员高度集中，导致院内感染发生率高。其次，其他科室的医疗设备和设施不能满足专业需求，医院可能无法有效救治重症病例。2019年，中国每千万人拥有的医院注册医生人数为14 487人。与人口约1000万的中国部分城市比较，武汉的注册医生和护士总人数为43 100人和57 700人[29]，深圳的注册医生和护士总人数为38 519人和44 273人[37]，石家庄的注册医生和护士总人数为19 736人和238 942人[38]。即使不考虑城市差异，武汉的数量也可以满足情景3的需求。中国传染病医院每千万人平均注册医生和护士人数分别为111人和186人，然而，据报道石家庄每千万人平均注册医生和护士人数分别为225人和328人[28]。无论是大部分的中国传染病医院，还是石家庄，都无法满足前5种情景下的需求。总结来说，不同的情景需要不同的准备工作。

情景1需要传染病学专家、防护设备储备以及疫情早期预警的能力。情景2和3中最重要的是找到不会对经济造成过度损害的替代措施。情景4~6需要更多地关注疫苗的应用及其是否有效。

由于临床医护人力资源和医疗设备有限，适应快速增长的检测量是个挑战，这会导致诊断结果的延误。此外，短时间内无法提供足够的医护人员及相关医疗物资用于救治与防控。重症监护、呼吸内科、传染病学等科室对专家的需求量越来越大，而可用的医生越来越少，他们除了在疫情期间面临感染风险外，还会遭受身体与心理上巨大的压力，这样超负荷的工作和不完善的管理会使医疗系统崩溃。此外，医疗系统还可能面临诸如核酸检测和紧急救治等相关挑战。然而，当医疗资源紧缺时，如情景1、3、5所示，可以从以下三个角度采取应对策略，以促进资源的替代供应。第一，预防和准备工作应成为确保疫苗储备、疫苗接种覆盖率和降低发病率的主要优先事项，从而减少医疗资源需求[39]。第二，在建立平疫转换模式方面，可以培训其他部门的医护人员作为传染病和呼吸医学方面的后备人员。例如，酒店和体育馆可以按照方舱医院的标准建造，在疫情暴发时[14,35]有可能在短时间内[6]调整为方舱医院。呼吸机和个人防护装备的储备也需纳入考虑，以确保疫情暴发时资源需求的激增能够得到充分解决[40]。由于材料需求量大，需要增加产能储备，因此需要有充足的实物储备。第三，技术、医疗和临床检查需要改进，如提供更高效率的预警系统。利用大数据建立临床资源均衡配置机制。实施远程医疗，以减少对医护人员的需求、减少住院时间与医疗费用[41]。通过整合相关医疗信息，可以自动生成诊疗记录，提供知情预警，提高诊疗效率。需要充分发挥科技优势，例如，使用机器人快速、准确地完成基础护

理、消毒、远程会诊、记录信息等工作，以减少对医疗人力资源的需求。

该研究为COVID-19疫情期间医疗资源的应急准备提供了理论支持和参考。该研究框架不仅考虑了医疗资源中无症状感染者比例[42]和免疫人群的影响，还考虑了非药物干预措施的有效性。在本研究前已经有研究使用基本SEIR模型来预测COVID-19疫情早期的传播[3,43]。我们将模型扩展为SEIHR模型，该模型在方法上是可靠的。在考虑病例报告有所延迟的情况下，我们的方法可以快速、持续地评估临床资源需求，并在防控疫情和控制资源生产方面为资源投入和分配策略提供指导。

这项研究仍有局限性。首先，影响医疗资源需求评估的因素很多，如文化背景、区域应急能力、医疗保障、伦理问题等更为复杂的因素。因此，在根据本研究结果准备医疗资源时，还需要密切评估区域的实际情况。其次，本研究没有提供有关传染性、传染周期和无症状感染者比例的依据来验证研究结果的准确性，因为这些很容易因病毒的传播和突变而发生变化。再次，众所周知，老年人更容易感染COVID-19，这可能导致人口老龄化城市的疾病负担加重、临床资源需求增加。随着对COVID-19认识和理解的加深，我们可以通过年龄分层模型在模型中考虑人口的年龄结构，这可以在未来的研究中进行。此外，我们没有考虑疫苗接种后的有效期，这可能会对免疫人群的范围产生影响。最后，使用该模型模拟的场景数据不能完全反映现实情况。

5. 结论

经济发展水平、人口规模、防控能力不同的地区应尽快评估突发事件期间的临床资源需求，为可能出现的疫情反弹和暴发提前准备医疗资源。急性呼吸道感染会给医疗系统带来额外的负担；因此，鼓励人们接种流感疫苗、肺炎球菌疫苗和其他疫苗，以缓解和减少COVID-19疫情期间对医疗资源的需求。在应对COVID-19疫情期间医疗资源短缺的情景时，本研究建议利用窗口期扩大医疗资源储备并及时调整现有策略。

Compliance with ethics guidelines

Ting Zhang, Qing Wang, Zhiwei Leng, Yuan Yang, Jin Yang, Fangyuan Chen, Mengmeng Jia, Xingxing Zhang, Weiran Qi, Yunshao Xu, Siya Chen, Peixi Dai, Libing Ma,

Luzhao Feng, and Weizhong Yang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

致谢

感谢北京零研研究技术团队的陈晨、贺长凯、杨志辰、孙志远、孙正阳的技术支持。本研究得到中国医学科学院医学与健康科技创新工程（2020-I2M-1-001、2020-I2M-2-015、2016-I2M-1-014）、中国国家自然科学基金（20&ZD201）的资金支持。

References

- [1] Timeline: WHO's COVID-19 response [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/interactive-timeline>.
- [2] WHO coronavirus (COVID-19) dashboard [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://covid19.who.int/>.
- [3] Lai S, Ruktanonchai NW, Zhou L, Prosper O, Luo W, Floyd JR, et al. Effect of non-pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China. *Nature* 2020;585(7825):410–3.
- [4] Pan A, Liu L, Wang C, Guo H, Hao X, Wang Q, et al. Association of public health interventions with the epidemiology of the COVID-19 outbreak. *JAMA* 2020;323(19):1915–23.
- [5] Li Z, Chen Q, Feng L, Rodewald L, Xia Y, Yu H, et al. Active case finding with case management: the key to tackling the COVID-19 pandemic. *Lancet* 2020;396(10243):63–70.
- [6] Fallucchi F, Faravelli M, Quercia S. Fair allocation of scarce medical resources in the time of COVID-19: what do people think? *J Med Ethics* 2021;47(1):3–6.
- [7] Wuhan Statistical Bureau. Wuhan statistical yearbook 2018 [Internet]. Wuhan: Wuhan Statistical Bureau; 2018 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://tjj.wuhan.gov.cn/tjfw/tjnj/202004/P020200426461240969401.pdf>. Chinese.
- [8] Hospital beds (per 1,000 people) [Internet]. Washington, DC: The World Bank; [cited 2020 Dec 20]. Available from: https://data.worldbank.org/indicator/SH.MED.BEDS.ZS?end=2015&name_desc=false&start=1960&view=chart.
- [9] Italy [Internet]. Washington, DC: The World Bank; 2020 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://data.worldbank.org/country/italy>.
- [10] Coronavirus (COVID-19) action plan [Internet]. London: Department of Health and Social Care; 2020 Mar 3 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/coronavirus-action-plan>.
- [11] Anthony C, Thomas TJ, Berg BM, Burke RV, Upperman JS. Factors associated with preparedness of the US healthcare system to respond to a pediatric surge during an infectious disease pandemic: is our nation prepared? *Am J Disaster Med* 2017;12(4):203–26.
- [12] Legido-Quigley H, Mateos-García JT, Campos VR, Gea-Sánchez M, Muntaner C, McKee M. The resilience of the Spanish health system against the COVID-19 pandemic. *Lancet Public Health* 2020;5(5):e251–2.
- [13] Chen S, Chen Q, Yang W, Xue L, Liu Y, Yang J, et al. Buying time for an effective epidemic response: the impact of a public holiday for outbreak control on COVID-19 epidemic spread. *Engineering* 2020;6(10):1108–14.
- [14] Chen S, Zhang Z, Yang J, Wang J, Zhai X, Bärnighausen T, et al. Fangcang shelter hospitals: a novel concept for responding to public health emergencies. *Lancet* 2020;395(10232):1305–14.
- [15] COVID-19: why is medical system in metropolises so vulnerable? [Internet]. Beijing: China.org.cn; 2020 Apr 21 [cited 2020 Dec 20]. Available from: http://www.china.org.cn/opinion/2020-04/21/content_75957964.htm.
- [16] Remuzzi A, Remuzzi G. COVID-19 and Italy: what next? *Lancet* 2020;395(10231):1225–8.
- [17] Liu J, Zhang L, Yan Y, Zhou Y, Yin P, Qi J, et al. Excess mortality in Wuhan city and other parts of China during the three months of the COVID-19: findings from nationwide mortality registries. *BMJ* 2021;372:n415.
- [18] Willan J, King AJ, Jeffery K, Bienz N. Challenges for NHS hospitals during COVID-19 epidemic. *BMJ* 2020;368:m1117.
- [19] Fineberg HV. Pandemic preparedness and response—lessons from the H1N1 influenza of 2009. *N Engl J Med* 2014;370(14):1335–42.
- [20] Wu Z, McGoogan JM. Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak. *JAMA* 2020;323(13):1239–42.
- [21] Spellberg B, Haddix M, Lee R, Butler-Wu S, Holtom P, Yee H, et al. Community prevalence of SARS-CoV-2 among patients with influenza like illness presenting to a Los Angeles medical center. *JAMA* 2020;323(19):1966–7.
- [22] www.who.int [Internet]. Geneva: WHO; 2020 [cited 2020 Dec 20]. Available

- from: <https://www.who.int/publications/m/item/covid-19-essential-supplies-forecasting-tool>.
- [23] Walker PGT, Whittaker C, Watson OJ, Baguelin M, Winskill P, Hamlet A, et al. The impact of COVID-19 and strategies for mitigation and suppression in low- and middle-income countries. *Science* 2020;369(6502):413–22.
- [24] Rainisch G, Undurraga EA, Chowell G. A dynamic modeling tool for estimating healthcare demand from the COVID-19 epidemic and evaluating population-wide interventions. *Int J Infect Dis* 2020;96:376–83.
- [25] Eubank S, Eckstrand I, Lewis B, Venkatramanan S, Marathe M, Barrett CL. Commentary on Ferguson, et al., “Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand”. *Bull Math Biol* 2020;82(4):52.
- [26] [Notice on the issuance of the COVID-19 control programme (seventh edition)] [Internet]. Beijing: National Health Commission of the People's Republic of China; 2020 Sep 15 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3577/202009/318683cbfaee4191aee29cd774b19d8d.shtml>. Chinese.
- [27] Polack FP, Thomas SJ, Kitchin N, Absalon J, Gurtman A, Lockhart S, et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA COVID-19 vaccine. *N Engl J Med* 2020;383(27):2603–15.
- [28] [China statistical yearbook 2020] [Internet]. Beijing: National Bureau of Statistics of the People's Republic of China; c2020 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>. Chinese.
- [29] [2019 Wuhan statistical bulletin on national economic and social development] [Internet]. Wuhan: Wuhan Bureau of Statistics; 2020 Mar 29 [cited 2020 Dec 20]. Available from: http://tjj.wuhan.gov.cn/tjfw/tjgb/202004/t20200429_1191417.shtml. Chinese.
- [30] Lei Q, Li Y, Hou HY, Wang F, Ouyang ZQ, Zhang Y, et al. Antibody dynamics to SARS-CoV-2 in asymptomatic COVID-19 infections. *Allergy* 2021;76(2):551–61.
- [31] McAloon C, Collins Á, Hunt K, Barber A, Byrne AW, Butler F, et al. Incubation period of COVID-19: a rapid systematic review and meta-analysis of observational research. *BMJ Open* 2020;10(8):e039652.
- [32] Wiersinga WJ, Rhodes A, Cheng AC, Peacock SJ, Prescott HC. Pathophysiology, transmission, diagnosis, and treatment of coronavirus disease 2019 (COVID-19): a review. *JAMA* 2020;324(8):782–93.
- [33] Walsh KA, Jordan K, Clyne B, Rohde D, Drummond L, Byrne P, et al. SARS-CoV-2 detection, viral load and infectivity over the course of an infection. *J Infect* 2020;81(3):357–71.
- [34] Li LQ, Huang T, Wang YQ, Wang ZP, Liang Y, Huang TB, et al. COVID-19 patients' clinical characteristics, discharge rate, and fatality rate of meta-analysis. *J Med Virol* 2020;92(6):577–83.
- [35] Yang J, Chen X, Deng X, Chen Z, Gong H, Yan H, et al. Disease burden and clinical severity of the first pandemic wave of COVID-19 in Wuhan, China. *Nat Commun* 2020;11(1):5411.
- [36] Zhang T, Wu HT, Wang LH, Yang WZ. Scenario-based study of medical resource requirement rapid assessment under the COVID-19 pandemic. *Chin J Epidemiol* 2020;41:E059.
- [37] [Shenzhen statistical yearbook 2020] [Internet]. Shenzhen: Shenzhen Statistics Bureau; c2020 [cited 2020 Dec 20]. Available from: http://tjj.sz.gov.cn/zwgk/zfxgkml/tjsj/tjnj/content/post_8386382.html. Chinese.
- [38] [Shijiazhuang statistical yearbook 2018] [Internet]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Bureau of Statistics; 2019 Sep 10 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://tjj.sjz.gov.cn/col/1584345186126/2019/09/10/1577770888846.html>. Chinese.
- [39] Tian H, Liu Y, Li Y, Wu CH, Chen B, Kraemer MUG, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China. *Science* 2020;368(6491):638–42.
- [40] Guan WJ, Ni ZY, Hu Y, Liang WH, Ou CQ, He JX, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *N Engl J Med* 2020;382(18):1708–20.
- [41] Armaignac DL, Saxena A, Rubens M, Valle CA, Williams LS, Veledar E, et al. Impact of telemedicine on mortality, length of stay, and cost among patients in progressive care units. *Crit Care Med* 2018;46(5):728–35.
- [42] Qiu J. Covert coronavirus infections could be seeding new outbreaks [Internet]. Heidelberg: Springer Nature Limited; 2020 [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00822-x>.
- [43] Wei Y, Wei L, Jiang Y, Shen S, Zhao Y, Hao Y, et al. Implementation of clinical diagnostic criteria and universal symptom survey contributed to lower magnitude and faster resolution of the COVID-19 epidemic in Wuhan. *Engineering* 2020;6(10):1141–6.