

DOI:10.12138/j.issn.1671-9638.20246044

· 论 著 ·

传染病流行事件下医疗资源需求模型构建与仿真试验

王 栋¹, 田勇泉², 张 伟³, 周鸿书⁴, 谢 博⁴, 李臻琰⁴, 范四海⁵, 黄素娟⁶

(1. 中南大学湘雅医院院长办公室, 湖南 长沙 410008; 2. 中南大学公共卫生学院社会医学与卫生事业管理系, 湖南 长沙 410078; 3. 中南大学公共卫生学院业务办, 湖南 长沙 410078; 4. 中南大学湘雅医院神经外科, 湖南 长沙 410008; 5. 湖南瑞兹健康产业发展有限公司, 湖南 长沙 410008; 6. 中南大学湘雅医院保健办公室, 湖南 长沙 410008)

[摘 要] **目的** 构建重大传染病流行事件下包含普通病床、重症监护病房(ICU)病床、呼吸机、医护人员四类医疗资源的需求模型,同时对不同医疗资源紧缺时传染病救治情况进行模拟分析。**方法** 以传染病动力学模型(SEIR)为基础,考虑感染者传染性、人群易感性和康复者免疫性,同时结合新型冠状病毒感染(COVID-19)无症状感染者和不同临床分型特点扩展构建“COVID-19 传染-住院模型”,收集设定疾病传播、临床病程和医疗资源紧缺情景各项参数,依托 Anylogic 平台初步形成传染病流行事件下城市医疗资源配置供给分析模型,分析不同场景传染病事件下医疗资源供给需求情况。**结果** 无干预情景下,COVID-19 床位资源需求峰值时间为第 107 天,峰值为 160.92 张/千人;呼吸机资源需求峰值时间为第 122 天,峰值为 5.61 台/千人;ICU 床位需求峰值时间为第 117 天,峰值为 12.78 张/千人;医护人员资源需求峰值时间为第 109 天,峰值为 151.12 人/千人。仿真试验结果提示不同医疗资源对医疗救治结局的影响存在一定的差异。**结论** 本研究构建了传染病流行事件下城市医疗资源配置供给的分析工具,多个仿真试验结果提示,床位资源和医护人员资源对于医疗救治结局有着更为重要的作用。

[关 键 词] 新型冠状病毒感染; 医疗资源; 传染病动力学模型; Anylogic 平台

[中图分类号] R183

Construction and simulation of medical resources demand model during epidemic events of infectious diseases

WANG Dong¹, TIAN Yong-quan², ZHANG Wei³, ZHOU Hong-shu⁴, XIE Bo⁴, LI Zhen-yan⁴, FAN Si-hai⁵, HUANG Su-juan⁶ (1. Director's Office, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410008, China; 2. Department of Social Medicine and Health Management, School of Public Health, Central South University, Changsha 410078, China; 3. Business Office, School of Public Health, Central South University, Changsha 410078, China; 4. Department of Neurosurgery, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410008, China; 5. Hunan Reaz Health Industry Development Co., Ltd., Changsha 410008, China; 6. Healthcare Office, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410008, China)

[Abstract] **Objective** To construct the demand model of four types of medical resources including beds in hospital, beds in intensive care unit (ICU), ventilators and medical human resources during the major infectious disease epidemic events, simulate and analyze the treatment of infectious diseases when different medical resources are in short supply. **Methods** Based on the susceptible-exposed-infectious-recovered (SEIR) model, considering the infectivity of infected persons, the susceptibility of the population and the immunity of convalescents, the characteristics of asymptomatic COVID-19 patients and different clinical types, the “COVID-19 infection-hospitalization model”

[收稿日期] 2024-01-18

[作者简介] 王栋(1987-),男(汉族),湖南省娄底市人,助理研究员,主要从事医院管理和医疗资源研究。

[通信作者] 黄素娟 E-mail: 11972473@qq.com

was constructed. By collecting and setting the parameters of disease transmission, clinical course and medical resource shortage scenarios, an analysis model of allocation and supply of urban medical resources during infectious disease epidemic events was initially formed based on Anylogic platform, the supply and demand of medical resources during infectious disease events in different scenarios were analyzed. **Results** In the non-intervention scenario, the peak time of bed demand was on the 107th day, and the peak value was 160.92 beds per thousand people; the peak time of ventilator demand was on the 122nd day, and the peak value was 5.61 units per thousand people; the peak time of ICU bed demand was on the 117th day, and the peak value was 12.78 beds per thousand people; the peak time of the demand for medical human resources was on the 109th day, and the peak value was 151.12 persons per thousand persons. The simulation results suggested that there were some differences in the impact of different medical resources on the outcome of medical treatment. **Conclusion** This study constructs an analytical tool for the allocation and supply of urban medical resources under the epidemic events of infectious diseases, and the results of multiple simulation experiments suggest that bed resources and medical human resources play more important roles in the outcome of medical treatment.

[Key words] COVID-19; medical resource; susceptible-exposed-infectious-recovered model; Anylogic platform

新型冠状病毒感染(COVID-19,简称新冠)疫情暴发以来,国内外学者对疫情的发展演化、防控举措、资源需求等问题开展了广泛的模拟与仿真研究,期望为卫生政策提供科学可靠的依据^[1-5]。新发传染病的大流行产生巨大而持续的医疗需求,导致医疗卫生系统的基础设施不堪重负,许多国家医疗资源供需之间的不平衡加剧了分配稀缺医疗资源上的道德价值问题^[6]。其中,意大利等病死率较高的国家其非必要死亡主要受医疗资源严重不足的影响^[7],因此对重大传染病大流行期间医疗需求的快速评估以及医疗资源的配置供给进行研究有其必要性。

本文以传染病动力学(susceptible-exposed-infectious-recovered, SEIR)模型为基础,通过构建重大传染病流行事件下包含普通病床、重症监护病房(ICU)病床、呼吸机、医护人力四类医疗资源需求模型,同时对不同医疗资源紧缺时传染病救治情况进行模拟分析。

1 资料与方法

1.1 基于 SEIR 模型的医疗资源需求建模 经典的 SEIR 模型(见图 1)将人群分为易感者(susceptible, S)、暴露者(exposed, E)、感染者(infectious, I)以及康复者(recovered, R)。模型考虑了感染人群的传染性,以及人群所有个体被感染的概率,当感染者康复痊愈后因产生抗体而短期内不再被感染。

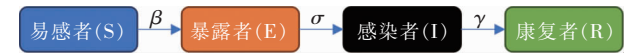


图 1 经典 SEIR 传染病模型示意图
Figure 1 Schematic diagram of the classic SEIR model

本研究在构建医疗资源需求模型中根据国家卫生健康委《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)》^[8],纳入新冠两个方面的特点因素,一是传染源,包括 COVID-19 患者(symptomatic case)和无症状感染者(asymptomatic case);二是按照不同临床分型的诊疗标准,将不同病例的资源需求简化为普通隔离病床、ICU 隔离病床、机械通气设备、医护人员等相关医疗资源需求。

医疗资源需求模型主要基于 SEIR 模型构建并进行相关改良,见图 2。由于无症状感染者具有传染性,且与确诊病例的潜伏期、基本再生数(R_0)等变量参数不同,因此本模型参考了 Arslan 等^[4](2021 年)和魏永越等^[9](2020 年)学者建模思路将无症状感染者单独考虑,并假设无症状感染者的病情不会恶化和死亡。在感染者(I)和康复者(R)之间增加住院治疗者(H),描述感染者隔离和治疗过程。首先综合参考了 Verity 等^[10](2020 年)和《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)》^[8]对 COVID-19 严重程度的类型,分为轻型病例(mild case, H_m)、普通型病例(normal case, H_n)、重型病例(severe case, H_s)和危重型病例(critical case, H_c)四类。假设无症状感染者病程与轻型病例相同,在系统动力学模型中治疗过程归入轻型病例仓室;所有病例入院时首先分为轻型和普通型,进入普通隔离病房治疗,轻型病例和普通型病例分别经过治疗时间 T_m 、 T_n 后康复出院;部分(p_s)普通型病例经过时间 T_s 发展为重型病例入住 ICU,经过治疗时间 T_c 后康复出院;部分(p_c)重症病例经过时间 T_c 发展为危重型病例需要机械通气治疗,经过治疗时间 T_{cr} 后康复出院;部分(p_{cl})危重型病例经过时间 T_{cl} 后死亡。微分方程组见公式 1。

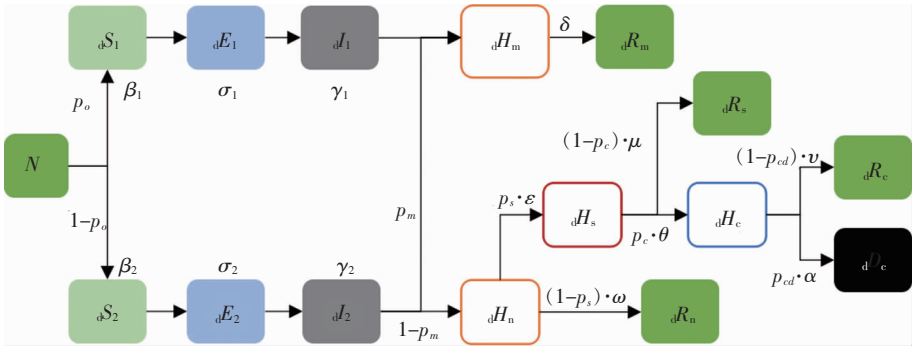


图 2 基于 SEIR 的医疗资源需求模型示意图

Figure 2 Schematic diagram of medical resources demand model based on SEIR

$$\begin{aligned} \frac{dS_1(t)}{dt} &= -\frac{S_1(t)}{Np_0} \cdot I_1(t) \cdot \beta_1 \\ \frac{dS_2(t)}{dt} &= -\frac{S_2(t)}{N(1-p_0)} \cdot I_2(t) \cdot \beta_2 \\ \frac{dE_1(t)}{dt} &= \frac{S_1(t)}{Np_1} \cdot I_1(t) \cdot \beta_1 - E_1(t) \cdot \sigma_1 \\ \frac{dE_2(t)}{dt} &= \frac{S_2(t)}{Np_2} \cdot I_2(t) \cdot \beta_2 - E_2(t) \cdot \sigma_2 \\ \frac{dI_1(t)}{dt} &= E_1(t) \cdot \sigma_1 - I_1(t) \cdot \gamma_1 \\ \frac{dI_2(t)}{dt} &= E_2(t) \cdot \sigma_2 - I_2(t) \cdot \gamma_2 \\ \frac{dH_m(t)}{dt} &= I_1(t) \cdot \gamma_1 + p_m \cdot I_2(t) \cdot \gamma_2 - H_m(t) \cdot \delta \\ \frac{dR_m(t)}{dt} &= H_m(t) \cdot \delta \\ \frac{dH_n(t)}{dt} &= (1-p_m) \cdot I_2(t) \cdot \gamma_2 - p_s \cdot H_n(t) \cdot \varepsilon - (1-p_s) \cdot H_n(t) \cdot \omega \\ \frac{dR_n(t)}{dt} &= (1-p_s) \cdot H_n(t) \cdot \omega \\ \frac{dH_s(t)}{dt} &= p_s \cdot H_n(t) \cdot \varepsilon - p_c \cdot H_s(t) \cdot \theta - (1-p_c) \cdot H_s(t) \cdot \mu \\ \frac{dR_s(t)}{dt} &= (1-p_c) \cdot H_s(t) \cdot \mu \\ \frac{dH_c(t)}{dt} &= p_c \cdot H_s(t) \cdot \theta - (1-p_{cd}) \cdot H_c(t) \cdot v - p_{cd} \cdot H_c(t) \cdot \alpha \\ \frac{dR_c(t)}{dt} &= (1-p_{cd}) \cdot H_c(t) \cdot v \\ \frac{dD_c(t)}{dt} &= p_{cd} \cdot H_c(t) \cdot \alpha \end{aligned}$$

公式(1)

准, 医患比设置为普通病床 1:2.5、ICU 病床 1:1; 护患比设置为普通病床 1:3、ICU 病床 2:1。按照上述模型计算各类医疗资源需求(第 t 天)指标: 床位需求数 $B(t)$ 、ICU 床位需求数 $B_I(t)$ 、机械通气设备需求数 $M_I(t)$ 、医生需求数 $D(t)$ 、护士需求数 $N(t)$ 。公式为:

$$\begin{aligned} B(t) &= H_m(t) + H_n(t) \\ B_I(t) &= H_s(t) + H_c(t) \\ M_I(t) &= H_c(t) \\ D(t) &= \frac{B(t)}{2.5} + B_I(t) \\ N(t) &= \frac{B(t)}{3} + 2 \times B_I(t) \end{aligned}$$

1.2 Anylogic 系统动力学流图绘制与模型实现
基于 Anylogic 软件的系统动力学建模方法对医疗资源需求模型进行建模和仿真试验(见图 3), 采用 库存(stock)、流(flow)、参数(parameter)、连接(link)等控件设置 COVID-19 疫情传播和临床病程的模型架构与参数, 采用 时间表(schedule)控制有效再生数(R_t)参数变化模拟防控情景, 采用 事件(event)控件触发医疗资源紧缺情况下的参数变化, 采用 数据集(data set)收集模型运行产生的主要数据, 作进一步分析。

1.3 模型初始参数设置

1.3.1 疾病传播参数设置 新冠无症状感染者通常是无发热、咳嗽等相关典型临床症状和体征, 但新冠核酸检测阳性的感染者, 其隐匿性导致无症状感染者也是疫情传播的重要因素, 但目前医学界对于其传染期长短、传染性强弱等尚未形成结论共识^[12]。本模型综合了多个学者的研究成果对无症状感染者和有症状感染者的疾病传播参数进行设置。其中, 无症状感染者的比例设置为 0.16, 主要依据 He 等^[13](2021 年)国内学者和 Byambasuren 等^[14](2020 年)

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{R_{01}}{T_{i1}} \quad \beta_2 = \frac{R_{02}}{T_{i2}} \quad \sigma_1 = \frac{1}{T_{e1}} \quad \sigma_2 = \frac{1}{T_{e2}} \quad \gamma_1 = \frac{1}{T_{i1}} \quad \gamma_2 = \frac{1}{T_{i2}} \\ \delta &= \frac{1}{T_{mr}} \quad \omega = \frac{1}{T_{mr}} \quad \varepsilon = \frac{1}{T_s} \quad \mu = \frac{1}{T_{sr}} \quad \theta = \frac{1}{T_c} \\ v &= \frac{1}{T_{cr}} \quad \alpha = \frac{1}{T_{cd}} \end{aligned}$$

根据《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)》^[8]的政策, 无症状感染者也须隔离治疗, 因此无症状感染者也计入床位资源需求; 参考张婷等^[11](2020 年)学者对新冠肺炎救治的人力资源配置标

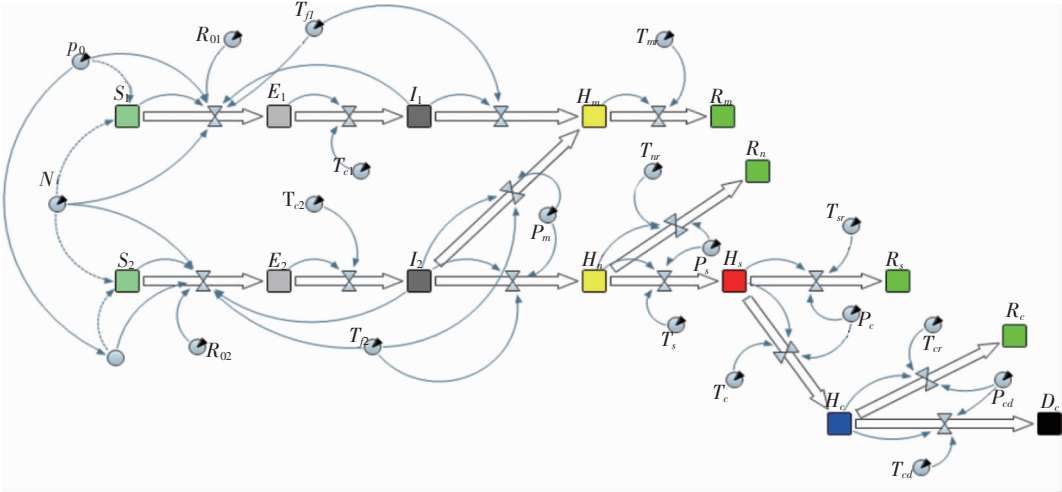


图 3 基于 Anylogic 的系统动力学流图

Figure 3 System dynamics flow diagram based on Anylogic

国外学者通过 Meta 分析计算的无症状感染者合并比率分别为 15.6% (95%CI: 10.1%~3.0%)、16% (95%CI: 12%~20%)；主要参考 He 等^[13] (2021 年)、Arslan 等^[4] (2021 年)以及 Arenas 等^[15] (2020

年)学者研究设置的有症状感染者 R_0 为 3.2, 无症状感染者 R_0 为 1.6。见表 1。

1.3.2 临床病程参数的设置 本模型临床病程参数设置依据学者对中国住院病例的研究结果。见表 2。

表 1 传染病流行事件下医疗资源需求模型疾病传播的初始参数

Table 1 Initial parameters of disease transmission of medical resources demand model during epidemic events of infectious diseases

参数	含义	数值	参考文献(发表年份)
p_0	无症状感染者比例	0.16	He 等 ^[13] (2021)、Byambasuren 等 ^[14] (2020)
R_{01}	无症状感染者的 R_0	1.6	Arslan 等 ^[4] (2021)、Arenas 等 ^[15] (2020)
R_{02}	有症状感染者 R_0	3.2	He 等 ^[13] (2021)
T_{f1}	无症状感染者传染期时间(d)	6.5	Arslan 等 ^[4] (2021)
T_{f2}	有症状感染者传染期时间(d)	6.5	Arslan 等 ^[4] (2021)
T_{c1}	无症状感染者潜伏期时间(d)	4.6	Arslan 等 ^[4] (2021)
T_{c2}	有症状感染者潜伏期时间(d)	5.1	Lauer 等 ^[16] (2020)

表 2 传染病流行事件下医疗资源需求模型临床病程的初始参数

Table 2 Initial parameters of clinical course of medical resources demand model during epidemic events of infectious diseases

参数	含义	数值	参考文献(发表年份)
T_s	普通型病例发展为重型病例的时间(d)	4.1	Arenas 等 ^[15] (2020)
T_{cd}	危重型病例死亡时间(d)	7.0	Yang 等 ^[17] (2020)
T_{sr}	重型病例治疗时间(d)	14.0	Lewnard 等 ^[18] (2020)
T_{mr}	轻型病例治疗时间(d)	8.0	Panovska-Griffiths 等 ^[19] (2020)
T_{nr}	普通型病例治疗时间(d)	10.0	Wang 等 ^[20] (2020)
T_c	重型病例发展为危重型病例的时间(d)	3.0	Argenziano 等 ^[21] (2020)
T_{cr}	危重型病例治疗时间(d)	18.0	Sheinson 等 ^[22] (2021)
p_m	有症状感染者中轻型病例的比例	0.50	魏永越等 ^[9] (2020)
p_s	普通型病例发展为重型病例的比例	0.30	魏永越等 ^[9] (2020)
p_c	重型病例发展为危重型病例的比例	0.25	Wu 等 ^[23] (2020)
p_{cd}	危重型病例死亡比例	0.49	Wu 等 ^[23] (2020)

1.3.3 传染病流行场景的设置 本模型设定的传染病流行场景为无干预情景,即不采取任何疫情防控措施,通过被动建立人群免疫终止流行,由传染病例输入开始 R_0 不变直至结束。

1.3.4 医疗资源紧缺对传染病流行影响的设置 假设医疗资源紧缺时不同类型病例比例发生变化,相关参数参照疫情高发地区的情况进行调整。其中,第 t 天普通床位需求 $B(t) >$ 床位供给能力 b 时,有症状感染者中轻型病例占比 p_m 降低为 p_{ma} 且普通型病例发展为重症病例的比例 p_s 提升为 p_{sa} ; ICU 床位需求数 $B_I(t) >$ ICU 床位供给能力 b_i 时,普通型病例发展为重型病例的比例 p_c 提升为 p_{ca} ; 机械通气设备需求数 $M_I(t) >$ 机械通气设备供给能

力 m_i 时,危重型病例死亡比例 p_{cd} 提升为 p_{cda} ; 人力资源需求数 $D(t) + N(t) >$ 人力资源供给能力 s ,普通型病例发展为重型病例的比例 p_s 提升为 p_{sa} ,且重型病例发展为危重型病例的比例 p_c 提升为 p_{ca} 。见表 3。同时采用敏感性分析(sensitivity analysis)对不同 类型、不同程度的医疗资源紧缺情况进行比较,医疗资源情景分为 2 类 10 个等级,分别为满足救治需求(医疗资源数值为需求峰值)和不满足救治需求(医疗资源数值为需求峰值的 10%~90%)。人口规模设置为 300 万人,初始病例为无症状感染者(S_1)2 例和暴露者(E_1)2 例,有症状感染者(S_2)2 例和暴露者(E_2)4 例。无干预措施, R_0 为初始值。

表 3 医疗资源紧缺情况下的参数值
Table 3 Parameter values in the case of shortage of medical resources

参数	含义	数值	参考文献(发表年份)
p_{ma}	有症状感染者中轻型病例的比例	0.23	张婷 ^[11] 等(2020)
p_{sa}	普通型病例发展为重型病例的比例	0.36	Petrilli ^[24] 等(2020)
p_{ca}	重型病例发展为危重型病例的比例	0.63	Rainisch ^[25] 等(2020)
p_{cda}	危重型病例死亡比例	0.60	Petrilli ^[24] 等(2020)、Verity 等 ^[10] (2020)

2 结果

2.1 无干预情景下医疗资源需求情况 300 万人口在无干预情景下,COVID-19 床位资源需求在第 107 天达到峰值,为 482 754 张(床位数为 160.92 张/千人);ICU 床位资源需求在第 117 天达到峰值,为 38 339 张(ICU 床位数为 12.78 张/千人);呼吸机资源需求在第 122 天达到峰值,为 16 839 台(呼吸机为 5.61 台/千人);医护人力资源需求在第 109 天达到峰值,为 453 373 人(人力资源数为 151.12 人/千人);床位资源和人力资源需求因无症状感染者分别 在第 230 天、第 232 天出现第二 个小峰值,分别为 27 138 张(床位数为 9.05 张/千人)、19 977 人(人力资源数为 6.66 人/千人)。见图 4。

2.2 医疗资源紧缺对医疗救治结局的影响 床位资源方面,在 ICU 床位、设备和人力资源充足的情况下,床位资源供给 \geq 资源需求峰值(资源充足)时,轻型、普通型、重型、危重型的康复病例占比分别为 83.16%、11.77%、1.98%、0.89%,死亡病例占比为 2.20%;床位资源紧缺时各类病例的占比变化见图 5。

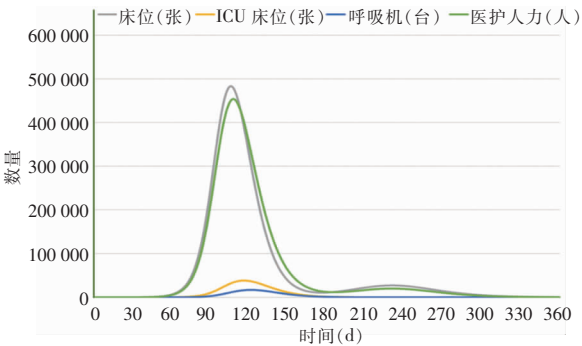


图 4 不同情景下医疗资源需求变化趋势(模型试验时间 365 d)
Figure 4 Changing trend of medical resources demand in different scenarios (model experiment time: 365 days)

床位资源供给等于资源需求峰值的 10% 时,轻型康复病例占比为 57.01%,相比床位资源充足的情况下降 26.15 个百分点;普通型康复病例占比为 18.44%,上升 6.67 个百分点;重型、危重型康复病例以及死亡病例占比分别为 9.60%、4.30%、10.64%,分别上升 7.62、3.41、8.44 个百分点。

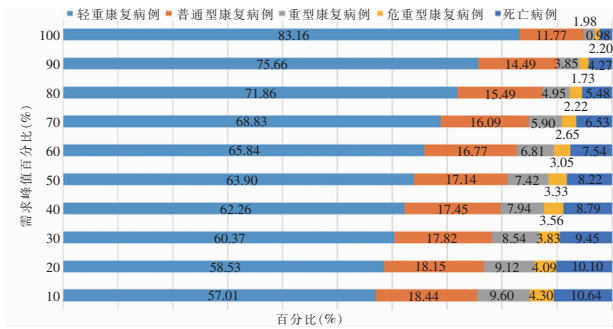


图 5 床位资源不同紧缺情况下的医疗救治结局
Figure 5 Outcome of medical treatment in different shortage status of bed resources

ICU 床位资源方面,在床位、设备和人力资源充足的情况下,ICU 床位资源紧缺时轻型和普通型康复病例占比不变,重型、危重型康复病例以及死亡病例的占比变化见图 6。ICU 床位资源供给等于资源需求峰值的 10%时,重型康复病例占比为 0.61%,相比 ICU 床位资源充足的情况下降 1.37 个百分点;危重型康复病例和死亡病例占比分别为 1.28%、3.17%,分别上升 0.39、0.97 个百分点。

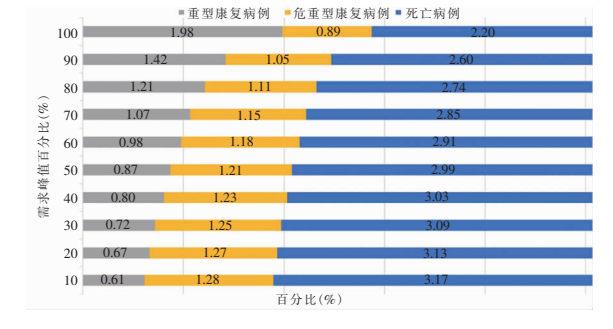


图 6 ICU 床位资源不同紧缺情况下的医疗救治结局
Figure 6 Outcome of medical treatment in different shortage status of ICU bed resources

设备资源方面,在床位、ICU 床位和人力资源充足的情况下,设备资源紧缺时轻型、普通型和重型的康复病例占比不变,危重型康复病例和死亡病例的占比变化见图 7。设备资源供给等于资源需求峰值的 10%时,死亡病例占比为 2.44%,相比设备资源充足情况上升 0.24 个百分点。

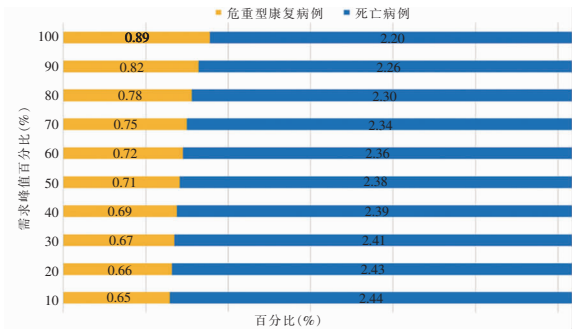


图 7 呼吸机资源不同紧缺情况下的医疗救治结局
Figure 7 Outcome of medical treatment in different shortage status of ventilator resources

医护人力资源方面,在床位、ICU 床位和设备资源充足的情况下,人力资源紧缺时轻型康复病例占比不变,普通型、重型、危重型康复病例以及死亡病例的占比变化见图 8。人力资源供给等于资源需求峰值的 10%时,普通型和重型康复病例占比分别为 7.23%、1.11%,相比人力资源充足情况分别下降 4.54、0.87 个百分点;危重型康复病例和死亡病例占比分别为 2.45%、6.05%,分别上升 1.56、3.85 个百分点。

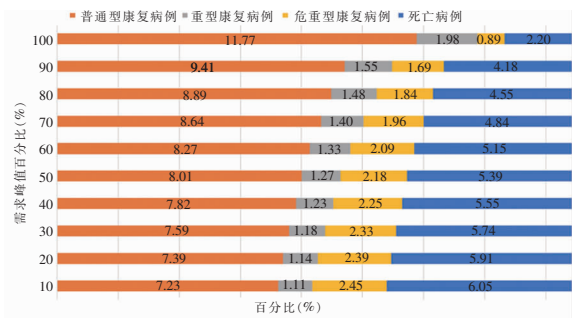


图 8 医护人力资源不同紧缺情况下的医疗救治结局
Figure 8 Outcome of medical treatment in different shortage status of medical human resources

医疗资源越紧缺,死亡病例数量越多且增长越快;此外不同医疗资源紧缺情况对于死亡病例数量影响存在差异,床位资源对于死亡病例数量的影响较为明显,呼吸机资源紧缺影响程度相对较小,ICU 床位数和医护人力在资源充足情况下死亡病例人数和增长率下降较为明显。见图 9。

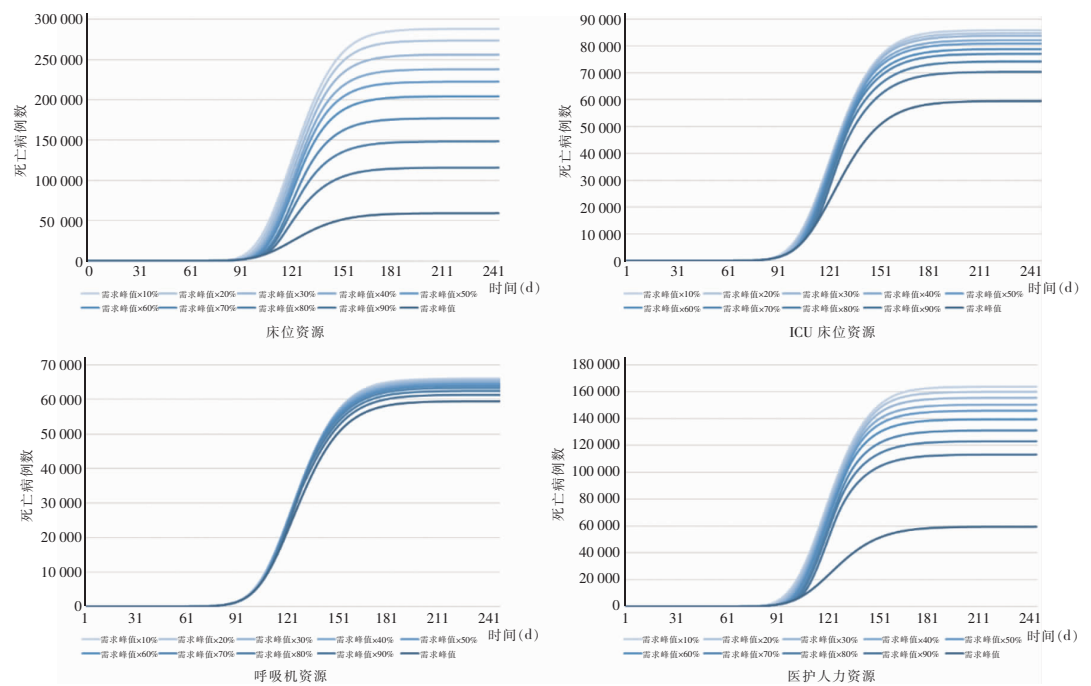


图 9 不同医疗资源紧缺程度对死亡病例数量的影响

Figure 9 Impact of different levels of medical resource shortage on the number of deaths

3 讨论

3.1 模型构建方法及仿真实验 准确估计和预测传染病对社会和医疗救治系统的负担是有效配置卫生资源的重要基础,由于流行病事件具有广泛的社会影响,大多数干预措施都无法进行试验,而且也存在伦理限制问题,因此基于科学假设对传染病事件暴发进行建模仿真并支持卫生决策成为了重要的研究方向^[26]。本文构建的传染病流行事件下医疗资源需求建模参考了国内外主要的研究成果,在此基础上进行了扩展,并紧扣医疗资源供给这一命题进行仿真试验。

第一,在建模思路方面。本模型以经典的 SEIR 模型为基础,综合考虑了感染者的传染性、人群的易感性和康复者的免疫性,同时结合 COVID-19 无症状感染者和不同临床分型特点扩展构建了“COVID-19 传染-住院模型(SEI-HRD 模型)”,分为两个主要模块,一是疾病传播模块,分为无症状感染者和有症状感染两个群体分别设置易感者(S)、暴露者(E)、未住院的感染者(I);二是住院救治模块,将住院病例分为轻型(H_m)、普通型(H_n)、重型(H_s)和危重型(H_c)四类,并按照救治结局则分为康复者(R)和死亡者(D)。在构建 SEI-HRD 模型后,根据临床实际将普通床位、ICU 床位、呼吸机和医护人

员四种医疗资源与住院病例进行关联,从而对医疗资源需求进行估计。在本模型中住院感染者的病情发展过程直接影响医疗资源的需求估计,因此根据我国医疗救治“应收尽收”和临床病例发展特点进行了三个方面的设定,一是全部的无症状感染者均住院治疗且纳入轻型病例管理;二是轻型患者病情不会发展成其他类型病例或死亡;三是病例死亡依次经历普通型、重型、危重型的病情进展过程。

第二,在模型参数设置方面。本模型进行了基础参数和情景参数的设置。首先,基础参数包括两个方面,一是疾病传播的参数,主要依据为武汉地区 COVID-19 疫情的研究成果,结合国内外学者 COVID-19 疫情建模的参数设置经验,而无症状感染者主要依据国内外学者的 Meta 分析结果;二是临床病程参数,主要参考了中国、美国、英国等具有代表性地区的临床病程研究结果。三是医疗资源紧缺情景,设定医疗资源紧缺时病例病情发展发生变化,参数参照高流行状态下的临床病例特征进行调整,为研究医疗资源的紧缺程度对医疗资源需求和医疗结局的影响,本模型按照医疗资源需求峰值的比率(10%~100%)对医疗资源供给量进行设置。

第三,在模型仿真试验方面。采用 AnyLogic 仿真软件平台进行试验,该平台是由 The AnyLogic Company 设计和开发,支持系统动力学、智能体、离散事件等常用建模方法,并提供多方法组合的建模

环境以及蒙特卡洛、敏感性分析、仿真优化等丰富的试验框架,目前已广泛应用于医疗领域^[27-29]。本模型的仿真试验依托 Anylogic 平台环境和控件进行综合开发,通过编写执行代码以触发动态参数变化从而实现情景间的交互。

3.2 传染病流行事件下医疗资源配置供给的情景分析和工具开发 本研究根据 SEI-HRD 模型和仿真情景设置,依托 Anylogic 平台初步形成了传染病流行事件下城市医疗资源配置供给的分析工具 V1.0,可用于分析不同场景传染病事件下医疗资源供给需求情况。

3.3 优化医疗资源配置供给的政策启示与建议 一是医疗资源的供给储备方面。仿真试验结果提示不同医疗资源对医疗救治结局的影响存在一定的差异,因此建议应对重大传染病流行事件时根据医疗资源类型实行短期目标与长期规划相结合的分类储备供给方式。短期上优先释放现有床位与人力资源的潜力,一方面通过“平急结合”快速转化的多院区、功能区或者病区的建设,提高疫情期间床位资源的供给能力,另一方面建立常态系统的卫生应急专业技能的培训体系与考核制度,提高人力资源的储备水平;长期上应按照公立医院高质量发展的政策路径^[30],进一步推进优质医疗资源的扩容和加强重症医学专科建设,提高三级医院重症医学床位比例,同时加强“卡脖子”技术的揭榜攻关,加快实现人民健康急需医学装备的国产化替代。

二是应对资源紧缺的医院管理方面。本仿真试验提示医疗资源紧缺极端情景造成严重的健康损失,未来面对此类情景有必要在医疗机构层面,基于循证原则制定分配有限医疗资源(如 ICU 床位和呼吸机资源)的临床诊疗共识和管理办法,并根据区域医疗资源紧缺情况实行标准的动态调整,从而寻求生命健康和医疗服务系统运行的平衡。

本研究存在一定不足之处,一是模型的理论假设的可靠性、分析工具的适用性,由于缺乏实际数据尚未进行拟合验证,未来需要通过收集实证资料和专家咨询意见不断优化,从而不断迭代升级分析工具;二是分析工具的情景设置模块和数据输出通过 Anylogic 平台控件搭建,尚未在平台中实现交互式的设置和数据分析可视化呈现,下一步需要对工具进行界面功能的开发以提高可用性。

本研究在 SEIR 模型基础上根据 COVID-19 的特点扩展构建了 SEI-HRD 模型,并通过设置传染病流行、医疗资源紧缺等场景,在 Anylogic 平台上初步构建了传染病流行事件下城市医疗资源配置供

给的分析工具,分析了多个传染病流行下的医疗资源需求、医疗资源紧缺程度的影响以及医疗资源供给策略的影响,仿真试验结果提示,床位资源和医护人员对于医疗救治结局有着更为重要的作用。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

- [1] 曹盛力,冯沛华,时朋朋.修正 SEIR 传染病动力学模型应用于湖北省 2019 冠状病毒病(COVID-19)疫情预测和评估[J]. 浙江大学学报(医学版),2020,49(2):178-184.
Cao SL, Feng PH, Shi PP. Study on the epidemic development of COVID-19 in Hubei province by a modified SEIR model[J]. Journal of Zhejiang University (Medical Sciences), 2020, 49(2): 178-184.
- [2] 潘理虎,秦世鹏,李晓文,等.COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型[J]. 系统仿真学报,2020,32(11):2244-2257.
Pan LH, Qin SP, Li XW, et al. Multi-agent simulation model for COVID-19 virus prevention and control[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2244-2257.
- [3] Almeida JFDF, Conceição SV, Pinto LR, et al. Estimating Brazilian states' demands for intensive care unit and clinical hospital beds during the COVID-19 pandemic: development of a predictive model[J]. Sao Paulo Med J, 2021, 139(2): 178-185.
- [4] Arslan S, Ozdemir MY, Ucar A. Nowcasting and forecasting the spread of COVID-19 and healthcare demand in Turkey, a modeling study[J]. Front Public Health, 2021, 8: 575145.
- [5] Sheinson DM, Wong WB, Solon CE, et al. Estimated impact of public and private sector COVID-19 diagnostics and treatments on US healthcare resource utilization[J]. Adv Ther, 2021, 38(2): 1212-1226.
- [6] Emanuel EJ, Persad G, Upshur R, et al. Fair allocation of scarce medical resources in the time of COVID-19[J]. N Engl J Med, 2020, 382(21): 2049-2055.
- [7] Remuzzi A, Remuzzi G. COVID-19 and Italy: what next?[J]. Lancet, 2020, 395(10231): 1225-1228.
- [8] 国家卫生健康委办公厅,国家中医药管理局办公室.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]. (2020-08-18)[2023-10-19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/19/content_5535757.htm.
National Health Commission, National Administration of Traditional Chinese Medicine. Notice on Issuing the Guidelines for the Diagnosis and Treatment of COVID-19 (Provisional eighth edition)[EB/OL]. (2020-08-18)[2023-10-19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/19/content_5535757.htm.
- [9] 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.

Wei YY, Lu ZZ, Du ZC, et al. Fitting and forecasting the trend of COVID-19 by SEIR⁺ + CAQ dynamic model[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(4): 470 – 475.

[10] Verity R, Okell LC, Dorigatti I, et al. Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: a model-based analysis[J]. Lancet Infect Dis, 2020, 20(6): 669 – 677.

[11] 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.

Zhang T, Wu HT, Wang LH, et al. Scenario-based study of medical resource requirement rapid assessment under the COVID-19 pandemic[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(9): 1390 – 1395.

[12] 王嗣予, 李静, 张超, 等. 新型冠状病毒无症状感染者研究进展与挑战[J]. 中华临床感染病杂志, 2020, 13(3): 167 – 171.

Wang SY, Li J, Zhang C, et al. Progress and challenge for asymptomatic infection of 2019-nCoV[J]. Chinese Journal of Clinical Infectious Diseases, 2020, 13(3): 167 – 171.

[13] He JJ, Guo YF, Mao RC, et al. Proportion of asymptomatic coronavirus disease 2019: a systematic review and Meta-analysis[J]. J Med Virol, 2021, 93(2): 820 – 830.

[14] Byambasuren O, Cardona M, Bell K, et al. Estimating the extent of asymptomatic COVID-19 and its potential for community transmission: systematic review and Meta-analysis[J]. J Assoc Med Microbiol Infect Dis Can, 2020, 5(4): 223 – 234.

[15] Arenas A, Cota W, Gómez-Gardeñes J, et al. Modeling the spatiotemporal epidemic spreading of COVID-19 and the impact of mobility and social distancing interventions[J]. Phys Rev X, 2020, 10(4): 041055.

[16] Lauer SA, Grantz KH, Bi QF, et al. The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: estimation and application[J]. Ann Intern Med, 2020, 172(9): 577 – 582.

[17] Yang XB, Yu Y, Xu JQ, et al. Clinical course and outcomes of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia in Wuhan, China: a single-centered, retrospective, observational study[J]. Lancet Respir Med, 2020, 8(5): 475 – 481.

[18] Lewnard JA, Liu VX, Jackson ML, et al. Incidence, clinical outcomes, and transmission dynamics of severe coronavirus disease 2019 in California and Washington: prospective cohort study[J]. BMJ, 2020, 369: m1923.

[19] Panovska-Griffiths J, Kerr CC, Stuart RM, et al. Determining the optimal strategy for reopening schools, the impact of test and trace interventions, and the risk of occurrence of a second COVID-19 epidemic wave in the UK: a modelling study [J]. Lancet Child Adolesc Health, 2020, 4(11): 817 – 827.

[20] Wang DW, Hu B, Hu C, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China[J]. JAMA, 2020, 323(11): 1061 – 1069.

[21] Argenziano MG, Bruce SL, Slater CL, et al. Characterization and clinical course of 1 000 patients with coronavirus disease 2019 in New York; retrospective case series[J]. BMJ, 2020, 369: m1996.

[22] Sheinson DM, Wong WB, Solon CE, et al. Estimated impact of public and private sector COVID-19 diagnostics and treatments on US healthcare resource utilization[J]. Adv Ther, 2021, 38(2): 1212 – 1226.

[23] Wu ZY, McGoogan JM. Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72 314 cases from the Chinese center for disease control and prevention[J]. JAMA, 2020, 323(13): 1239 – 1242.

[24] Petrilli CM, Jones SA, Yang J, et al. Factors associated with hospital admission and critical illness among 5 279 people with coronavirus disease 2019 in New York City: prospective cohort study[J]. BMJ, 2020, 369: m1966.

[25] Rainisch G, Undurraga EA, Chowell G. A dynamic modeling tool for estimating healthcare demand from the COVID19 epidemic and evaluating population-wide interventions[J]. Int J Infect Dis, 2020, 96: 376 – 383.

[26] Chowell G, Sattenspiel L, Bansal S, et al. Mathematical models to characterize early epidemic growth: a review[J]. Phys Life Rev, 2016, 18: 66 – 97.

[27] Safdari R, Shoshtarian Malak J, Mohammadzadeh N, et al. A multi agent based approach for prehospital emergency management[J]. Bull Emerg Trauma, 2017, 5(3): 171 – 178.

[28] 胡依群, 苏强, 李晓雪, 等. 区域性医疗集团资源协同仿真建模和政策建议研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(2): 43 – 49.

Hu YQ, Su Q, Li XX, et al. Collaborative simulation and modeling of a regional healthcare group with policy suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(2): 43 – 49.

[29] 石娟, 常丁懿, 郑鹏, 等. 基于 SD-SEIR 模型的实验室人员不安全行为传播研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2021, 18(3): 67 – 74.

Shi J, Chang DY, Zheng P, et al. Study on propagation of unsafe behavior of laboratory personnel based on SD-SEIR models[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2021, 18(3): 67 – 74.

[30] 洪朝阳. 新时代大型公立医院高质量发展的实践与思考[J]. 卫生经济研究, 2021, 38(7): 3 – 7.

Hong CY. Practice and reflection on the high-quality development of large public hospitals in the new era[J]. Health Economics Research, 2021, 38(7): 3 – 7.

(本文编辑:文细毛)

本文引用格式:王栋,田勇泉,张伟,等. 传染病流行事件下医疗资源需求模型构建与仿真试验[J]. 中国感染控制杂志, 2024, 23(10): 1286 – 1294. DOI:10. 12138/j. issn. 1671 – 9638. 20246044.

Cite this article as: WANG Dong, TIAN Yong-quan, ZHANG Wei, et al. Construction and simulation of medical resources demand model during epidemic events of infectious diseases[J]. Chin J Infect Control, 2024, 23(10): 1286 – 1294. DOI: 10. 12138/j. issn. 1671 – 9638. 20246044.