

1-14-2022

Modeling and Simulation of Emergency Medical Resources Allocation in Shanghai during COVID-19

Changjia Fan

1. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;;2. Key Laboratory of Health Technology Assessment, National of Health Commission, Shanghai 200032, China;

Yanqiu Du

1. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;;2. Key Laboratory of Health Technology Assessment, National of Health Commission, Shanghai 200032, China;

Liang Di

1. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;;2. Key Laboratory of Health Technology Assessment, National of Health Commission, Shanghai 200032, China;

Hu Kai

1. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;;2. Key Laboratory of Health Technology Assessment, National of Health Commission, Shanghai 200032, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Emergency Medical Resources Allocation in Shanghai during COVID-19

Abstract

Abstract: Modeling and simulating on the allocation of emergency medical resources in Shanghai with COVID-19 is carried out. *Based on the SEIR model of infectious diseases, combined with the process of outpatients visiting and inpatients treatment, a SEIOWHR(susceptible-exposed-infected-outpatients-waiting to hospitalized-hospitalized-removed) system dynamics model is established.* If the Wuhan epidemic occurred in Shanghai, based on the model, the amount of emergency medical resources needed, the gap time of medical resources and the disease progression of patients who are waiting to hospitalized under the different supply of medical resources is simulated, and the key factors in the allocation of medical resources at a major epidemic are found. It is recommended that the early planning and dynamic adjustment of emergency medical resources should be strengthened based on the epidemic trend and disease progression of patients, and the accurate diagnosis rate is needed to be improved to respond the infectious diseases effectively.

Keywords

system dynamics, COVID-19, emergency medical resources, modeling and simulation

Authors

Changjia Fan, Yanqiu Du, Liang Di, Hu Kai, and Jiayan Huang

Recommended Citation

Fan Changjia, Du Yanqiu, Liang Di, Hu Kai, Huang Jiayan. Modeling and Simulation of Emergency Medical Resources Allocation in Shanghai during COVID-19[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(1): 93-103.

COVID-19 期间上海市应急医疗资源配置建模与仿真

樊长佳^{1,2}, 杜炎秋^{1,2}, 梁笛^{1,2}, 胡凯^{1,2}, 黄葭燕^{1,2*}

(1. 复旦大学 公共卫生学院, 上海 200032; 2. 国家卫生健康委员会 卫生技术评估重点实验室(复旦大学), 上海 200032)

摘要: 针对 COVID-19 期间上海市应急医疗资源配置进行建模与仿真化模拟。基于传染病 SEIR (susceptible-exposed-infected-removed) 模型, 结合患者门诊就诊和住院治疗过程, 构建了医疗资源需要量测算的 SEIOWHR (susceptible-exposed-infected-outpatients-waiting to hospitalized-hospitalized-removed) 系统动力学模型。仿真模拟武汉疫情若发生在上海, 需要的应急医疗资源量和不同医疗资源供给水平下的缺口发生时间及待住院患者疾病转归结局, 探索传染病疫情下医疗资源配置的关键因素。建议应结合疫情发展趋势和患者疾病转归结局, 加强医疗资源的早期规划和动态调整, 并努力提高确诊率, 有效应对传染病疫情。

关键词: 系统动力学; COVID-19; 应急医疗资源; 建模与仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 01-0093-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0320

Modeling and Simulation of Emergency Medical Resources Allocation in Shanghai during COVID-19

Fan Changjia^{1,2}, Du Yanqiu^{1,2}, Liang Di^{1,2}, Hu Kai^{1,2}, Huang Jiayan^{1,2*}

(1. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;

2. Key Laboratory of Health Technology Assessment, National of Health Commission, Shanghai 200032, China)

Abstract: Modeling and simulating on the allocation of emergency medical resources in Shanghai with COVID-19 is carried out. Based on the SEIR model of infectious diseases, combined with the process of outpatients visiting and inpatients treatment, a SEIOWHR (susceptible-exposed-infected-outpatients-waiting to hospitalized-hospitalized-removed) system dynamics model is established. If the Wuhan epidemic occurred in Shanghai, based on the model, the amount of emergency medical resources needed, the gap time of medical resources and the disease progression of patients who are waiting to hospitalized under the different supply of medical resources is simulated, and the key factors in the allocation of medical resources at a major epidemic are found. It is recommended that the early planning and dynamic adjustment of emergency medical resources should be strengthened based on the epidemic trend and disease progression of patients, and the accurate diagnosis rate is needed to be improved to respond the infectious diseases effectively.

Keywords: system dynamics; COVID-19; emergency medical resources; modeling and simulation

引言

2020 年初, 新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情爆发。截止 2021 年 4 月 17 日, 全球累计确诊人数

13 950 万, 累计死亡人数 299 万^[1]。传染病疫情发生, 大多数学者聚焦于其流行趋势的研究^[2-4]。如: 基于 SEIR (susceptible-exposed-infected-removed)

收稿日期: 2021-04-16 修回日期: 2021-06-11

基金项目: 上海市科技计划(20692110200)

第一作者: 樊长佳(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为卫生技术评估与医院管理。E-mail: fanchangjia@163.com

通信作者: 黄葭燕(1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向为医院管理、全球卫生。E-mail: jyhuang@shmu.edu.cn

“易感者-潜伏者-感染者-移出者”传染机制，建立疫情趋势发展的各种预测模型^[5-9]。同时，基于预测模型中的疫情发展趋势，着重评估卫生系统各类应急医疗资源的储备能力。主要针对 ICU 床位^[10-11]、有创呼吸机^[12-13]和医护人员^[14]等。但是，当前研究对于各类应急医疗资源的计算主要基于感染者人数，而感染者门诊就诊、住院治疗的疾病转归过程也会对医疗资源需要产生实时影响。另外，因未建立医疗资源需要与疫情发展的动态数量关系，也不利于医疗资源供给的及时调整和优化配置。

2020 年 1 月 20 日，上海市首例 COVID-19 患者确诊。随后，本地新发病例在 53 天内减少到 0^[15]。上海市所有的 COVID-19 确诊患者在上海市公共卫生临床中心集中治疗，死亡率为 1.067%，远低于武汉市的 6.623%^[16]。疫情发展趋势、死亡率与医疗资源供给水平密切相关，上海市的医疗资源配置方案对于其他同等规模的城市具有一定参考价值。

因此，本研究选取上海市作为样本，对 COVID-19 期间的应急医疗资源配置能力进行系统动力学建模与仿真。模拟重大疫情规模下(武汉市)，上海市应对策略下需要的应急医疗资源数量。并进一步探索传染病疫情下医疗资源配置需考虑的关键因素，以期提升上海市医疗资源的应急响应速度和传染病疫情的应急处置能力。系统动力学(system dynamics, SD)是系统科学理论与计算机仿真紧密结合，研究系统反馈结构与行为的一门科学^[17]。感染者数量和疾病类型会影响应急医疗资源需要，而医疗资源供给水平决定了感染者的住院诊治过程，符合 SD 应用的范畴^[18-20]。

1 系统动力学建模

1.1 建模思想与方法

基于 SEIR 传染病的发病机制，结合 COVID-19 感染者的门诊就诊、住院治疗的疾病转归过程，构建模型。模型主要包括 2 部分：①对上海市疫情初期的发病趋势及患者诊治过程进行拟合；②感染者

门诊就诊、确诊入院后，在住院治疗过程中，对各类应急医疗资源的数量进行测算。

本研究对传统的 SEIR 模型概念进行了修正，定义如下：①易感者(susceptible, S)，指尚未被感染，但容易与感染者或潜伏者接触而受到感染；②潜伏者(exposed, E)，易感者与感染者或潜伏者接触后被感染，成为潜伏者。潜伏者尚未出现临床症状，但具有传染性；③感染者(Infected, I)，潜伏者出现临床症状，成为感染者；④移出者(removed, R)，感染者门诊就诊、住院治疗后，最后死亡或康复，移出总人群。简单来说，易感者被感染后，成为潜伏者。潜伏者经历潜伏期后，成为感染者。感染者门诊就诊、住院治疗后，成为移出者。

1.2 模型的基本假设

模型做如下假设：①感染者门诊就诊、确诊住院后，感染源切断，病毒不会继续传播；②住院患者治疗康复后，不会复发，也不会被再次感染；③应住院而未住院的患者采取隔离措施，不再具有传染性。但这部分人群如果没有及时得到治疗，会出现不同程度“轻型、普通型”患者病情加重，发展成为“重症、危重症”患者，以及“重症、危重症”患者死亡；④暂不考虑可能因门诊就诊率或确诊率不高，无法及时住院治疗的感染者病情恶化情况。

1.3 模型的构建过程

1.3.1 系统边界的确定

2020 年 1 月 20 日，上海市确诊本土第一例病例。本土疫情基本结束后，以境外输入病例为主。本土病例和境外输入病例的控制方式有所差异，两者的发病趋势存在不同。同时，在疫情中，由于每个阶段的控制力度不同，SEIR 模型可以较好地拟合疫情的初期阶段。因此，为更好地利用 SEIR 传染病模型拟合疫情的发病趋势，主要考虑上海市初期本土疫情阶段(2020-01-20—2020-03-04)。应急医疗资源主要指 COVID-19 患者住院期间需要的医生、护士、ICU 床位、高流量氧流设备和有创呼吸机。

1.3.2 构建因果关系图

建立 SEIOWHR(susceptible-exposed-infected-outpatients-waiting to hospitalized-hospitalized-removed) 系统动力学模型。因果回路图如图 1 所示。

主要变量的基本关系是：系统初始总人数 (N_0) =系统内人数 (N_t) +移出人数 $(\sum_{i=1}^{t-1} R_i)$ ；系统内人数 (N_t) =易感染人数 (S_t) +潜伏期人数 (E_t) +感染人数 (I_t) +门诊人数 (O_t) +待住院人数 (W_{m_t}) +实际住院人数 (H_{n_t}) 。

上述指标代表的意义依次为： S 为易感染人数； E 为潜伏期人数； I 为感染人数； O 为门诊人数； W 为待住院人数； H 为实际住院人数； R 为移出人数； t 为天数； $m=1, 2$ 分别为“轻型和普通型”和“重症和危重症”； $n=1, 2, 3, 4$ 分别为“轻型”、“普通型”、“重症”和“危重症”。

门诊就诊率为感染者去医疗机构门诊就诊的比例(门诊就诊人数/感染人数)；确诊率为去医疗机构门诊就诊的感染者中，被确诊(检出)的比例(确诊人数/门诊就诊人数)。

1.3.3 绘制存量流量图

主要包括 6 个子系统：①感染者就诊子系统(图 2)，主要拟合疫情发展趋势。当医疗资源供大于求，每日新增的确诊患者全部住院；供小于求，部分患者无法及时住院，待住院人数出现累积；②住院患

者治疗子系统(图 3)，根据 COVID-19 诊疗方案，确诊的患者类型有 4 类，分别为“轻型”、“普通型”、“重症”和“危重症”。该子系统拟合了住院患者的疾病转归情况；③医生配置子系统(图 4)，轻型和普通型患者由普通科室医生负责诊治，重症和危重症患者由重点科室(呼吸科、重症医学科和感染科等)医生负责诊治。结合不同患者需要消耗的医疗工作量和不同科室医生可以承担的工作量，根据患者的类型和数量对需要的医生数量进行计算；④护士配置子系统，轻型和普通型患者由普通科室护士负责护理，重症和危重症患者由重点科室护士负责护理；⑤ICU 床位配置子系统，重症和危重症患者使用 ICU 床位；⑥高流量氧流设备和有创呼吸机配置子系统，重症患者使用高流量氧流设备，危重症患者使用有创呼吸机。④，⑤，⑥各类医疗资源的计算与③的方法相同，均是根据患者的类型和数量进行测算。

模型参数中常量取值来源：流行病学相关参数和住院患者疾病转归相关参数来自文献；各类患者需要的医疗、护理工作量，不同科室医生、护士可以承担的工作量，ICU 床位、高流量氧流设备、有创呼吸机的配比系数等参数来自专家访谈；门诊就诊率、确诊率等变量取假设值。由于篇幅所限，表 1 只列出模型涉及到的部分系统动力学方程。

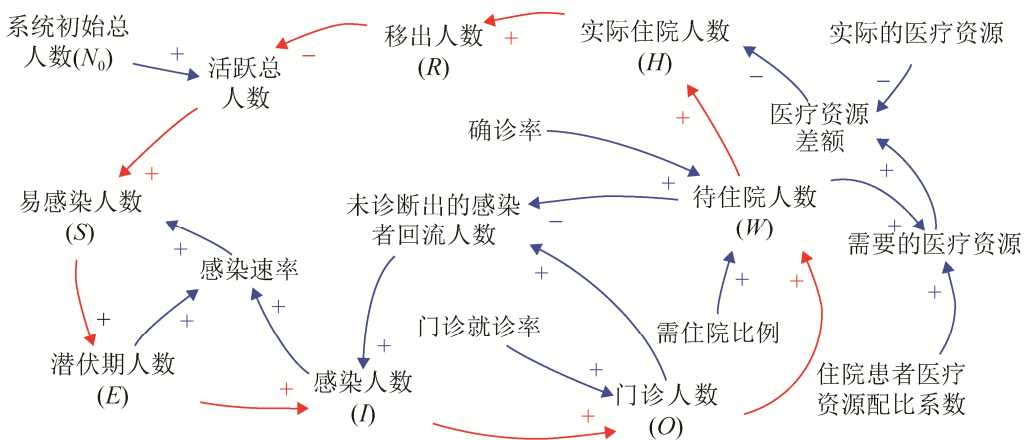


图 1 因果回路图
Fig. 1 Causal loop diagram of SEIOWHR model

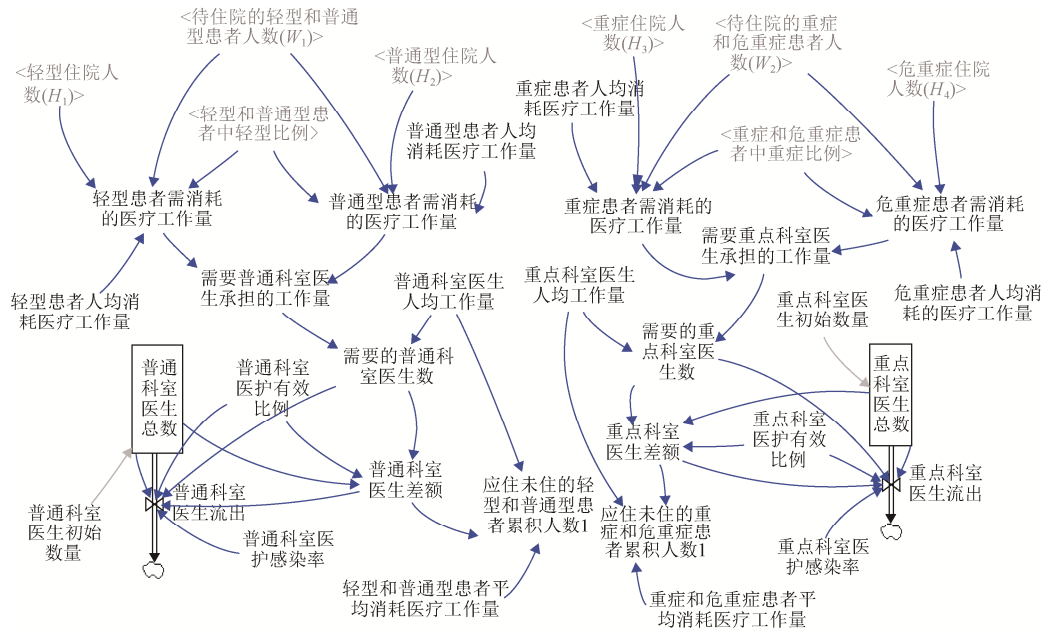


图 4 医生配置子系统

Fig. 4 Subsystem of doctors allocation

表 1 SEIOWHR 模型中的部分系统动力学方程

Table 1 Part of system dynamics equations in SEIOWHR model

变量名称	系统动力学方程
感染者就诊人数/(人/d)	感染人数(I)×门诊就诊率
门诊人数(O)(人)	INTEG(感染者就诊人数-未诊断出的感染者回流人数-确诊的轻型和普通型患者人数-确诊的重型和危重症患者人数, 0)
未诊断出的感染者回流人数/(人/d)	门诊人数(O)×(1-确诊率)
待住院的轻型和普通型患者人数(W ₁)(人)	INTEG(确诊的轻型和普通型患者人数-轻型和普通型病情加重人数-每日新增的轻型和普通型住院人数, 0)
每日新增的轻型和普通型住院人数/(人/d)	IF THEN ELSE(应住未住的轻型和普通型患者累积总人数×未住院患者回流调节系数>0, 待住院的轻型和普通型患者人数(W ₁)×(1-轻型和普通型待住院病情加重比例/病情加重时间)-应住未住的轻型和普通型患者累积总人数, 待住院的轻型和普通型患者人数(W ₁)×(1-轻型和普通型待住院病情加重比例/病情加重时间))
轻型和普通型病情加重人数/(人/d)	(待住院的轻型和普通型患者人数(W ₁)×轻型和普通型待住院病情加重比例)/病情加重时间
轻型增加人数/(人/d)	每日新增的轻型和普通型住院人数×轻型和普通型患者中轻型比例
轻型住院人数(H ₁)(人)	INTEG(普通型转化为轻型人数+轻型增加人数-轻型康复人数-轻型转化为普通型人数, 0)
轻型康复人数/(人/d)	(轻型住院人数(H ₁)×轻型康复比例)/轻型康复时间
轻型患者需消耗的医疗工作量/(医生·h/d)	(待住院的轻型和普通型患者人数(W ₁)×轻型和普通型患者中轻型比例+轻型住院人数(H ₁)×轻型患者人均消耗医疗工作量
需要普通科室医生承担的工作量/(医生·h/d)	普通型患者需消耗的医疗工作量+轻型患者需消耗的医疗工作量
需要的普通科室医生数/(人/d)	需要普通科室医生承担的工作量/普通科室医生人均工作量
应住未住的轻型和普通型患者累积人数 I/(人/d)	IF THEN ELSE (普通科室医生差额=0, 0, (普通科室医生差额-普通科室医生人均工作量)/轻型和普通型患者平均消耗医疗工作量)
应住未住的轻型和普通型患者累积总人数/(人/d)	max(应住未住的轻型和普通型患者累积人数 1, 应住未住的轻型和普通型患者累积人数 2)

1.4 模型有效性检验

1.4.1 结构评估

通过专家咨询,对模型中变量之间的因果关系进行确认和核实。SEIOWHR 模型中,各变量因果关系及患者诊治流程与实际情况相符。

同时,住院患者治疗过程中,实际的医生、护士等应急医疗资源的数量根据收治的患者数量和类型,按照一定比例关系进行设置。对各类应急医疗资源数量的测算思路符合实际情形,可以认为该模型具备一定的结构效度。

1.4.2 参数评估

选取“日新增确诊人数”与“日在院治疗人数”。通过计算这 2 个指标的拟合优度 R^2 ,验证模型对疫情发展趋势与患者诊治情况的拟合程度,判断模型参数设定的有效性。 R^2 的值越接近 1,说明拟合程度越好;反之说明拟合程度越差。结果发现:“日新增确诊人数”的实际值和模型模拟值的拟合程度,即拟合优度, $R^2=0.887$;“日在院治疗人数”的实际值和模型模拟值的拟合程度, $R^2=0.984$ 。前者拟合符合程度 88.7%,后者拟合符合程度 98.4%。可以认为模型的参数设定有效。

2 仿真化模拟结果

首先,选取 2020-01-20-2020-03-04 期间武汉市疫情,模拟若该疫情发生在上海,计算上海市应急医疗资源的需要量。通过调整模型中传染病发病模块相关参数,拟合疫情。选取“累计确诊人数”,通过比较该指标的真实值和模拟值,验证模型对武汉市疫情的拟合程度。结果表明 $R^2=0.967$,可以认为,当前模型可以在一定程度上模拟同时期武汉市的疫情规模。篇幅所限具体参数调整及拟合图略去。结果发现日新增确诊人数在 2 月 3 日达到峰值。此时,除传染病发病模块参数调整,其他参数不变。即模型依据上海市医疗资源的配比系数和 COVID-19 患者在上海市住院治疗的疾病转归过程,计算当前疫情规模下需要的应急医疗资源数量。

其次,在上述应急医疗资源需要量计算的基础上,模拟假定上海市医疗资源供小于求时,不同医疗资源供给水平下的缺口发生时间及待住院患者疾病转归结局。

最后,为进一步明确可能影响应急医疗资源需要的关键性指标,在初始模型的基础上,选择门诊就诊率和确诊率 2 个指标(自变量),分别进行其对各类医疗资源需要量(因变量)影响的敏感性分析。

2.1 情景化模拟一

武汉市疫情发生在上海,上海市各类应急医疗资源需要量的测算结果表明:当医疗资源供给充裕,需要的普通科室医生,2 月 15 日达到峰值 24 398 人;需要的重点科室医生,2 月 11 日达到峰值 9 550 人;需要的普通科室护士,2 月 15 日达到峰值 48 796 人;需要的重点科室护士,2 月 11 日达到峰值 15 281 人;需要的 ICU 床位,2 月 11 日达到峰值 2 547 张;需要的高流量氧流设备,2 月 12 日达到峰值 1 757 套;需要的有创呼吸机,2 月 11 日,达到峰值 792 台。

进一步可以发现:需要的医生、护士的峰值约为 33 948 人和 64 077 人。2019 年上海统计年鉴数据显示:全市所有医院中,执业(助理)医生 47 132 人,注册护士 71 928 人^[21]。如果不考虑职称等因素,且全部在岗,峰值数量大约占全市所有医院中医生人数的 72.0%和护士人数的 89.1%。同时,与日新增最大确诊人数的到来日期 2 月 3 日相比,各类医疗资源需要的峰值到来时间均晚于该时间。其中,普通科室医生、护士需要的峰值日期最晚,时间差为 13 天;重点科室医生、护士,ICU 床位等峰值日期的时间差为 9 天。

2.2 情景化模拟二

当医疗资源供给数量小于“情景化模拟一”中需要量的峰值时,患者会出现应住未住。此时,以各类医疗资源需要量峰值的 50%为基线,模拟在此基础上,各类医疗资源每增加需要量峰值 10%的数量,医疗资源缺口发生的时间及待住院患

者的疾病转归结局。设置该情景的模拟时间段为 2020-01-20—2020-04-20。

缺口发生的时间方面, 模拟结果显示, 当资源供给量只有需要量峰值的 50% 时, “重症和危重症” 患者和 “轻型和普通型” 患者所需资源出现缺口的时间分别为 2 月 1 日和 2 月 3 日。当资源供给量增加到需要量峰值的 60% 时, 这 2 个缺口出现的时间为 2 月 2 日和 2 月 4 日。当资源供给量增加到需要量峰值的 90% 时, 这 2 个缺口出现的时间为 2 月 6 日和 2 月 10 日。即随着资源供给量的增加, 缺口出现的时间会延后。同时, 缺口的持续时间会减少, 如图 5 所示。

在待住院患者病情加重方面, 当资源供给量在

需要量峰值的 50% 时, 待住院患者病情加重人数为 9 502 人。在此基础上, 每增加 10% 的资源供给量, 该数值都会得到明显下降。从 50% 增加到 60% 时, 待住院患者病情加重人数为 6 255 人, 减少了 34.2% 的病情加重人数。同样, 资源供给量从 60% 增加到 70% 时, 可减少 26.3% 的病情加重人数, 如图 6 所示。另外, 在待住院患者死亡方面, 若资源供给量在需要量峰值的 50% 时, 会造成 7537 人死亡。资源供给量从 50% 增加到 60% 时, 可减少 42.9% 的患者死亡人数。从 60% 增加到 70% 时, 可减少 28.4% 的患者死亡人数。

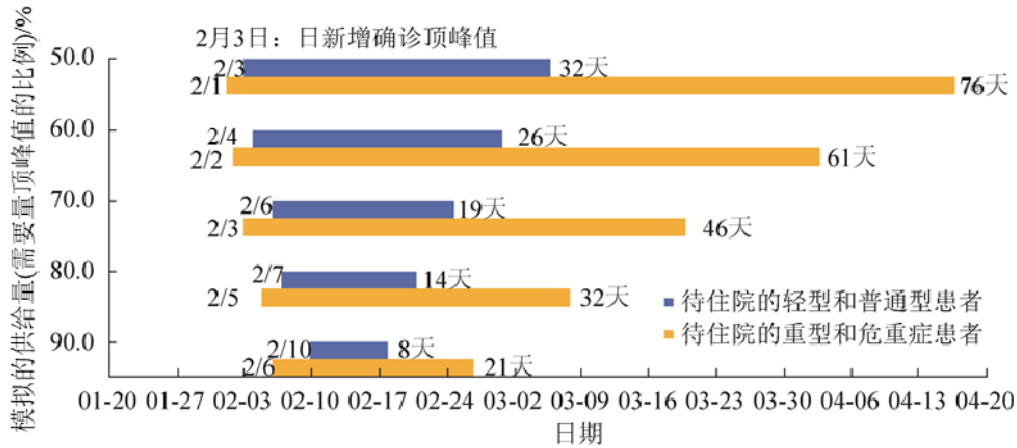


图 5 不同医疗资源供给水平下缺口发生的时间

Fig. 5 Time of gap occurred in different supply of medical resources

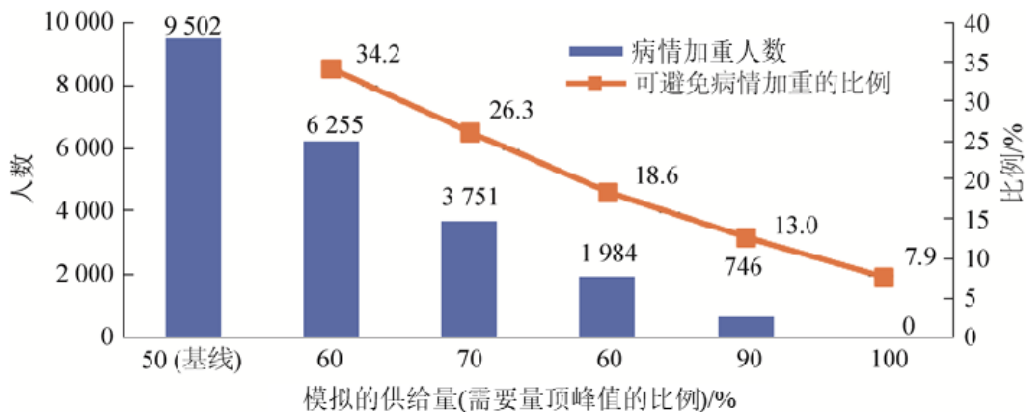


图 6 不同医疗资源供给水平下可避免待住院轻型和普通型患者病情加重的比例

Fig.6 Aggravating proportion to be avoided of mild and moderate patients waiting to be hospitalized in different supply of medical resources

可以发现,随着医疗资源供给水平的同数量增加,对于可避免待住院患者病情加重或死亡的正向影响,存在边际效果递减现象。比如,从90%增加到100%的资源供给量时,可避免患者病情加重的比例为7.9%,远低于从50%到60%的相同数量资源增加所产生的效果。

2.3 应急医疗资源需要的敏感性分析

将确诊率(自变量)和门诊就诊率(自变量)均设定为[10%, 100%]的范围内平均随机分布,模拟200次,分别进行其对各类医疗资源需要量(因变量)的敏感性分析。敏感性分析结果以带状图形式展示,50%(黄色)、75%(绿色)、95%(蓝色)、100%(灰色)分别代表50%、75%、95%、100%的样本(模拟结

果)落到区域面积。带宽越大,说明该自变量对因变量越敏感;反之,越不敏感。

如图7~8所示。图中蓝色单条线段最高点对应的取值及时间是确诊率/门诊就诊率为当前值时(100%),相对应的应急医疗资源需要的峰值及峰值到来日期。

结果表明:随着确诊率的变动,7种医疗资源形成的带宽区域面积,均大于门诊就诊率同范围变动所形成的带状图中的对应区域。

这说明各类应急医疗资源的需要量对确诊率的敏感性要高于门诊就诊率。即与门诊就诊率相比,当确诊率发生变化时,可以更加有效地改变应急医疗资源需要峰值的大小及峰值到来日期。

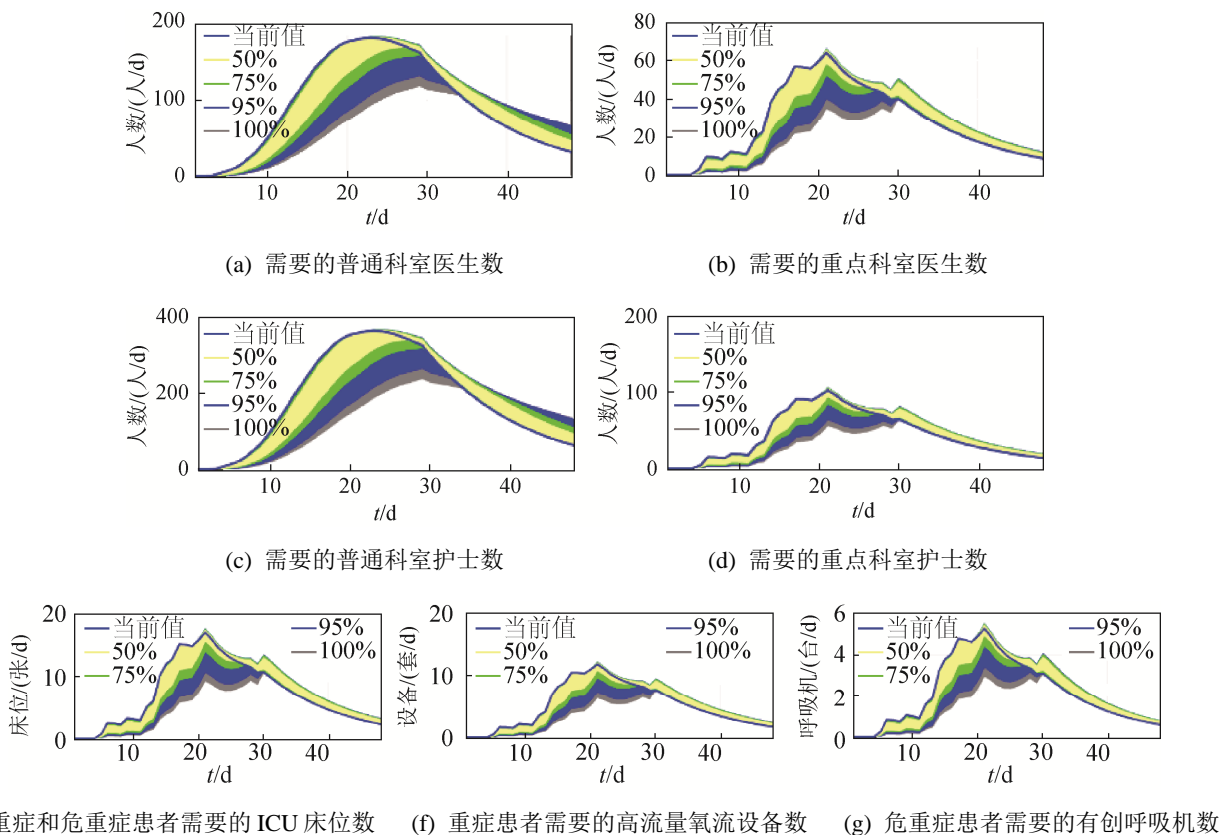


图7 确诊率的敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of accurate diagnosis rate

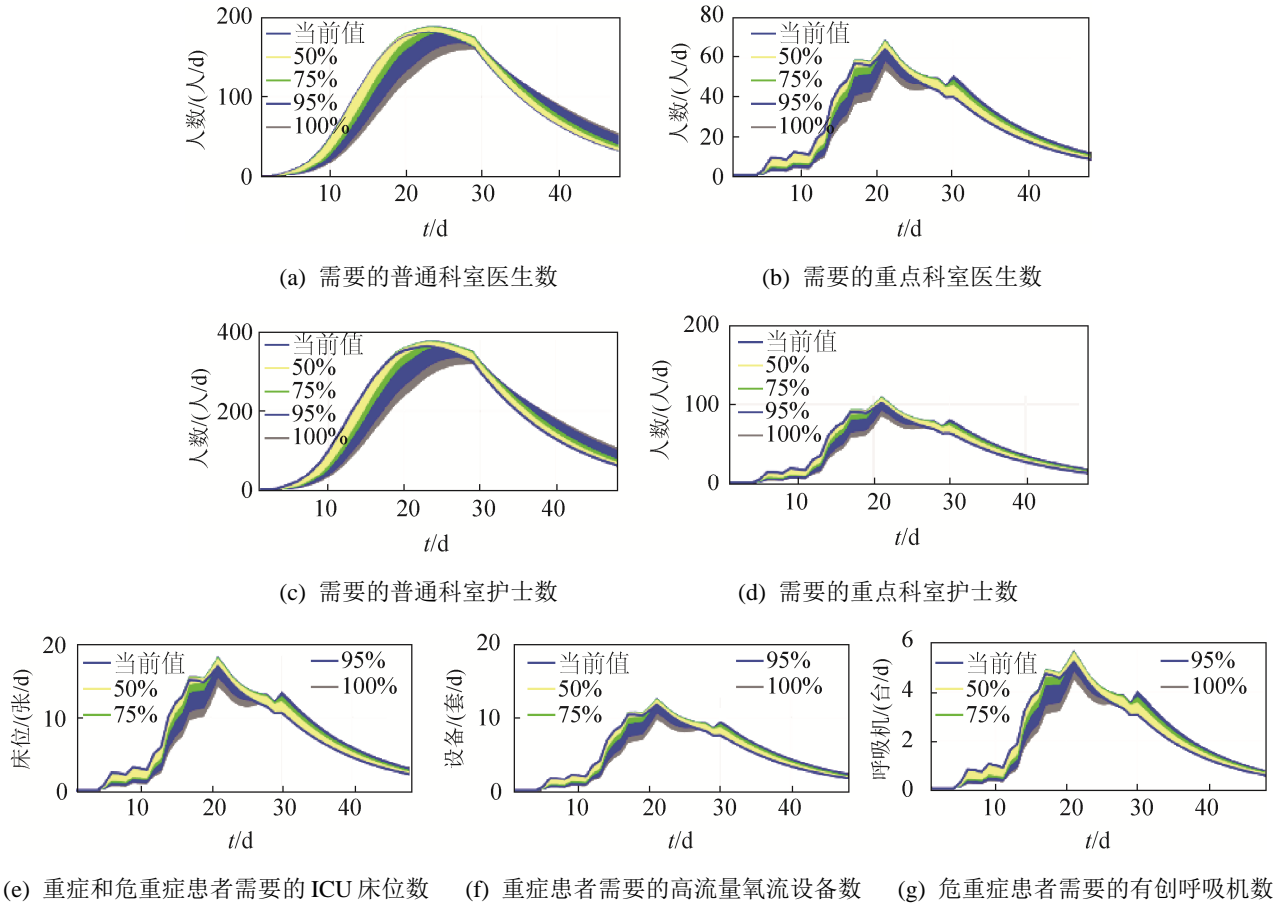


图 8 门诊就诊率的敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of outpatients visiting rate

3 讨论与分析

本文建立了 SEIOWHR 系统动力学模型, 结构、参数评估结果证实模型具有一定效度。该模型的主要特点是在基于 SEIR 传染病发病机制的基础上, 结合患者的门诊就诊和住院治疗过程, 建立了传染病疫情与应急医疗资源之间的动态数量关系。

研究发现, 应急医疗资源需要的峰值与疫情发病峰值存在一定的时间差。这是因为, 医疗资源需要的顶峰值主要取决于当日在院接受治疗的患者的最大人数, 即入院人数和出院人数的最大差值。日确诊病人人数决定了每天的入院人数, 而住院患者的疾病转归过程则决定了每天的出院人数。即医疗资源需要量除与疫情发展趋势有关, 也与患者的诊治过程密切相关。医疗卫生机构应该积极利用医疗资源需要量尚未达到顶峰值之前的时间段, 完

成医疗资源供给能力的升级部署。在传染病疫情早期, 应综合考虑患者的人数、疾病类型以及诊治过程, 及时估算医疗资源的需要量, 尽早进行医疗资源供给水平的规划与调整^[22]。

同时, 本文对医疗资源供小于求、不同供给水平下的医疗资源缺口发生时间及待住院患者疾病转归结局进行了模拟。相关研究发现, 由于医疗资源短缺, 部分患者无法及时入院治疗, 使得病情加重, 死亡率升高^[23-25]。医疗资源供给水平越是接近需要的顶峰值, 当增加相同数量的医疗资源后, 所能避免的待住院患者病情加重或死亡的比例越低。实际上, 对医疗资源的需要量是先上升, 到达顶峰值后, 再下降的总体趋势。即医疗资源的供给量越接近需要的顶峰值, 增加的医疗资源的总体利用率会越低。因此, 对于医疗资源有限的国家或地区, 应综合考量疫情发展趋势, 对医疗资源进行动态调

整,提升其使用效率。另外,应当积极组建临时医疗机构,如方舱医院,集中收治待住院的轻症患者,减少或避免病情恶化。敏感性分析结果表明,与门诊就诊率相比,各类应急医疗资源对确诊率(检出率)的敏感性更高。当确诊率为 100%时,感染者门诊就诊后随即全部确诊,接受隔离治疗,不会引发二次感染,感染者总人数最少。因此,为避免或减少对医疗资源带来沉重负担,应努力提高确诊率,避免感染者人数出现不必要的扩增。

仿真模拟是对现实问题的一种简单化抽象,由于很多变量难以定量,加上数据获取的困难,存在一些不足之处。首先,使用 SEIR 传染病发病机制拟合上海市疫情可能与实际情况存在一定偏差。其次,住院患者疾病转归相关参数主要来自文献,可能与实际治疗过程存在出入。最后,当前的模型假定待住院患者处于有效隔离状态,即不会感染给他人,不会额外增加感染的总人数,尚未考虑该部分患者可能对疫情发展趋势产生的影响。尽管本研究简化了实际情况(如重点考虑上海市本土疫情阶段,未考虑无症状感染者,部分参数使用均值替代等),但得到了具有一定价值的结果。

4 结论

本文将系统动力学方法应用于突发传染病疫情中的应急医疗资源配置研究。在传染病 SEIR 模型的基础上,综合考虑了感染者的门诊就诊和住院治疗过程,一定程度上弥补了部分研究中主要根据感染者人数进行医疗资源需要量测算的不足。同时,选取上海市作为样本,建立了各类应急医疗资源需要量与疫情发展之间的动态数量关系。对于未来上海市或其他同等规模城市在传染病疫情应对中,应急医疗资源的优化配置,具有一定借鉴意义。

研究表明:应该积极利用医疗资源需要峰值与疫情发病峰值之间的时间差,开展医疗资源供给水平的调整与升级。并结合患者人数、疾病类型和及诊治过程,做好各类医疗资源的时间、数量规划图^[26]。同时,应综合考量医疗资源供给的边际效

果递减规律,制定合理的医疗资源供给方案,并努力提高确诊率,有效应对传染病疫情。

参考文献:

- [1] World Health Organization. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard[EB/OL]. [2021-04-17]. <https://covid19.who.int/>.
- [2] Zheng N, Du S, Wang J, et al. Predicting COVID-19 in China Using Hybrid AI Model[J]. *IEEE Transactions On Cybernetics* (S2168-2267), 2020, 50(7): 2891-2904.
- [3] Chen J, Fu M C, Zhang W, et al. Predictive Modeling for Epidemic Outbreaks: A New Approach and COVID-19 Case Study[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research* (S0217-5959), 2020, 37(3): 2050028.
- [4] Xie J R, Sun J C, Liu X, et al. A Predictive Model for COVID-19 Spreading[J]. *Chinese Science Bulletin-Chinese* (S0023-074X), 2020, 65(22): 2348-2355.
- [5] Zhu H J, Li Y, Jin X L, et al. Transmission Dynamics and Control Methodology of COVID-19: A Modeling Study [J]. *Applied Mathematical Modelling* (S0307-904X), 2021, 89(Part2): 1983-1998.
- [6] Yang Z F, Zeng Z Q, Wang K, et al. Modified SEIR and AI Prediction of the Epidemics Trend of COVID-19 in China Under Public Health Interventions[J]. *Journal of Thoracic Disease* (S2072-1439), 2020, 12(3): 165-174.
- [7] Youssef H M, Alghamdi N A, Ezzat M A, et al. A New Dynamical Modeling SEIR with Global Analysis Applied to the Real Data of Spreading COVID-19 in Saudi Arabia[J]. *Mathematical Biosciences And Engineering* (S1547-1063), 2020, 17(6): 7018-7044.
- [8] Krishna M V. Mathematical Modelling on Diffusion and Control of COVID-19[J]. *Infectious Disease Modelling* (S2468-0427), 2020, 5: 588-597.
- [9] Khyar O, Allali K. Global Dynamics of a Multi-strain SEIR Epidemic Model with General Incidence Rates: Application to COVID-19 Pandemic[J]. *Nonlinear Dynamics* (S0924-090X), 2020, 102(1): 489-509.
- [10] Rommele C, Neidel T, Heins J, et al. Bed Capacity Management in Times of the COVID-19 Pandemic A Simulation-based Prognosis of Normal and Intensive Care Beds Using the Descriptive Data of the University Hospital Augsburg[J]. *Anaesthesist* (S0003-2417), 2020, 69(10): 717-725.
- [11] Azari S, Omidi N, Arabloo J, et al. Resource Utilization and Cost of Hospitalized Patients with COVID-19 in Iran: Rationale and Design of a Protocol[J]. *Advanced Journal of Emergency Medicine* (S2588-400X), 2020,

- 4(2): e55.
- [12] Verma V R, Saini A, Gandhi S, et al. Capacity-need Gap in Hospital Resources for Varying Mitigation and Containment Strategies in India in the Face of COVID-19 Pandemic[J]. *Infectious Disease Modelling* (S2468-0427), 2020, 5: 608-621.
- [13] Gamberini L, Tonetti T, Spadaro S, et al. Factors Influencing Liberation from Mechanical Ventilation in Coronavirus Disease 2019: Multicenter Observational Study in Fifteen Italian ICUs[J]. *Journal of Intensive Care* (S2052-0492), 2020, 8(1): 80.
- [14] Malik F T N, Ishraquzzaman M, Kalimuddin M, et al. Clinical Presentation, Management and In-Hospital Outcome of Healthcare Personnel with COVID-19 Disease[J]. *Cureus* (S2168-8184), 2020, 12(8): e10004.
- [15] Zhang N, Shi T Q, Zhong H, et al. COVID-19 Prevention and Control Public Health Strategies in Shanghai, China[J]. *Journal of Public Health Management and Practice* (S1078-4659), 2020, 26(4): 334-344.
- [16] Yin H, Wang S, Zhu Y, et al. The Development of Critical Care Medicine in China: From SARS to COVID-19 Pandemic[J]. *Critical Care Research and Practice*(S2090-1305), 2020, No.3956732.
- [17] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhong Yongguang, Jia Xiaojing, Qian Ying. *System Dynamics*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [18] Su M K, Chen K H, Wang H C. The Spread of 88 Shanghai Type-A Hepatitis - A System Dynamics Model and Analysis[J]. *System Dynamics Review* (S0883-7066), 1992, 8(3): 213-232.
- [19] Darabi N, Hosseinichimeh N. System Dynamics Modeling in Health and Medicine: A Systematic Literature Review[J]. *System Dynamics Review* (S0883-7066), 2020, 36(1): 29-73.
- [20] Weissman G E, Crane-Droesch A, Chivers C, et al. Locally Informed Simulation to Predict Hospital Capacity Needs During the COVID-19 Pandemic[J]. *Annals of Internal Medicine* (S0003-4819), 2020, 173(8): 679-680.
- [21] 中华人民共和国上海市统计局. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
Shanghai Municipal Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *Shanghai Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [22] Struben J. The Coronavirus Disease (COVID-19) Pandemic: Simulation-based Assessment of Outbreak Responses and Postpeak Strategies[J]. *System Dynamics Review* (S0883-7066), 2020, 36(3): 247-293.
- [23] Pan A, Liu L, Wang C L, et al. Association of Public Health Interventions with the Epidemiology of the COVID-19 Outbreak in Wuhan, China[J]. *Jama-Journal of the American Medical Association* (S0098-7484), 2020, 323(19): 1915-1923.
- [24] Wong G N, Weiner Z J, Tkachenko A V, et al. Modeling COVID-19 Dynamics in Illinois under Nonpharmaceutical Interventions[J]. *Physical Review X* (S2160-3308), 2020, 10(4): 041033.
- [25] Kontogiannis T. A Qualitative Model of Patterns of Resilience and Vulnerability in Responding to a Pandemic Outbreak with System Dynamics[J]. *Safety Science*(S0925-7535), 2021, 134: 105077.
- [26] Kim T, Choi M J, Kim S B, et al. Strategic Preparedness and Response Actions in the Healthcare System Against Coronavirus Disease 2019 according to Transmission Scenario in Korea[J]. *Infection and Chemotherapy* (S2093-2340), 2020, 52(3): 389-395.