

基于广义SEIR模型的新冠肺炎传播机制及干预效果仿真

王建伟¹, 崔秩玮², 潘潇雄², 董是¹

1. 长安大学运输工程学院, 西安 710064

2. 长安大学经济与管理学院, 西安 710064

摘要 新型冠状病毒肺炎(新冠肺炎)已在全球多个国家和地区蔓延,且不同国家和地区新冠肺炎的传播扩散过程和传染预测模式不尽相同。以美国和中国新冠肺炎公开数据为样本,首先应用广义SEIR模型,对疾病传播参数进行估计。其次,确定基本传染数 R_0 中各参数对疾病的影响,进而基于Anylogic仿真,利用系统动力学模型进行参数敏感性分析,定量表征关键参数对疾病传播的影响。最后,根据分析结果提出针对性的防控干预措施,以中美为例模拟不同防控级别的干预效果。研究发现,广义SEIR模型对中国与美国新冠肺炎传播机制的拟合性较好,保护率、感染率和平均检疫时间对防控疫情影响显著,并可以通过针对性的措施来提高保护率、降低感染率、缩短平均检疫时间。

关键词 新冠肺炎;广义SEIR模型;系统动力学模型;敏感性分析;Anylogic仿真

2020年1月以来,新型冠状病毒肺炎(以下简称新冠肺炎)迅速蔓延,2020年1月30日,世界卫生组织将此次疫情列为“国际公共卫生紧急事件”。2020年3月12日,世界卫生组织宣布,席卷全球的冠状病毒引发的病毒性肺炎是一种大流行病。在抗击新冠肺炎过程中,国内外学者对新冠肺炎传播预测与防控方面进行了大量研究,而研究的主要方法是SIR(Susceptible Infected Recovered Model)模型、SEIR(Susceptible Exposed Infected Recovered

Model)模型与其他动力学模型,SIR模型只考虑到了易感者、感染者和移出者,而SEIR模型加入了暴露者,其他动力学模型主要有随机动力学模型、新发传染病动力学模型等。

针对SIR模型,盛华雄等^[1]利用经典SIR模型与Logistic模型,对武汉控制阶段与自由传播阶段的新冠肺炎传播进行了建模,并得出及时防疫的重要性;梅文娟等^[2]通过对SIR模型进行改进,即采用极限IR预测模型对中国新冠肺炎的确诊人数、死

收稿日期:2020-06-18;修回日期:2020-09-13

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(SQ2018YFE010143)

作者简介:王建伟,教授,研究方向为交通运输规划与管理,电子信箱:wjianwei@chd.edu.cn

引用格式:王建伟,崔秩玮,潘潇雄,等. 基于广义SEIR模型的新冠肺炎传播机制及干预效果仿真[J]. 科技导报, 2020, 38(22): 130-138; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.22.015

亡人数和治愈人数进行实时预测;张艳霞等^[3]利用经典SIR模型与龙格库塔法模拟预测了中国新冠肺炎的传播趋势;汪剑眉等^[4]基于SIR扩展的非均匀感染力模型,构建了中国、湖北与武汉多层次子模型,并通过敏感性分析说明降低接触是有效防控措施。

针对SEIR模型,范如国等^[5]通过SEIR模型对病毒5、7和10 d潜伏期的拐点进行了预测,并提出对应的防控建议;游光荣等^[6]利用修正后的SEIR模型,对新冠肺炎在中国的传播趋势进行了建模,并评估了武汉采取防疫政策的重要性;张宇等^[7]基于SEIR模型,建立交通工具内部疫情传播模型,并模拟了疫情沿交通工具线路传播的过程;Yang等^[8]利用改进的SEIR模型得出新冠肺炎的流行曲线,并使用人工智能方法来预测疫情;Guerrero-Nancuante等^[9]通过广义SEIR模型分析了新冠肺炎在中国、湖北、武汉、北京和上海的传播,并采用敏感性分析得出防控的主要措施。

针对其他动力学模型,邵年等^[10]利用随机动力学的时滞卷积模型和离散卷积模型,对武汉与上海新冠肺炎的发展趋势进行了拟合;刘红亮等^[11]通过构建基于系统动力学的新冠肺炎患者变动分析模型,对甘肃省的确诊患者数量进行了合理预判;崔景安等^[12]通过优化新发传染病传播动力学模型,并应用于预估广州和武汉新冠肺炎传播的峰值;张原等^[13]根据新冠肺炎的传播机制与防控特点,提出新型随机动力学模型,并对海外疫情发展的相关时间与特征进行预测。

综上所述,大部分文献中的SIR模型、SEIR模型和其他动力学模型,并没有考虑到新冠肺炎的多种人群状态,会忽略不易感人群、隔离人群等,且一般只分析中国国内新冠疫情情况,而构建有效防控政策仅从建模的角度来分析,并没有研究不同程度的防控对疫情的影响。因此,本研究以美国、中国疫情传播数据研究样本为例,基于广义SEIR模型,从传播的角度分析美国和中国新冠肺炎的确诊人数、死亡人数和治愈人数;并在此基础上,基于系统动力学,利用Anylogic仿真对基本传染数的重要参数进行敏感性分析,并提出针对性的防控政策。

1 数据来源

数据来源于GitHub社区的datasets-covid19,数据选取时间段为2020年1月22日至4月30日。其中美国和中国的人口来源于GitHub社区的datasets-covid19(data-reference),美国与中国的确诊人数、治愈人数与死亡人数来源于GitHub社区的datasets-covid19(data-countries-aggregated)。

分析新冠肺炎的现状特征是建立传播影响机制的基础,为了有效建立新冠肺炎传播影响机制,根据数据来源所提供的数据,对2020年1月22日至4月30日美国与中国的累计确诊人数进行了可视化展示。根据图1美国和中国累计确诊人数可以看出,中国的累计确诊人数是一个先快速上升后基本平缓的过程,而美国的累计确诊人数是先平缓上升后陡升的过程;而随着时间的推移,中国累计确诊人数超过8万,而美国累计确诊人数超过100万,美国累计确诊人数远远大于中国累计确诊人数。

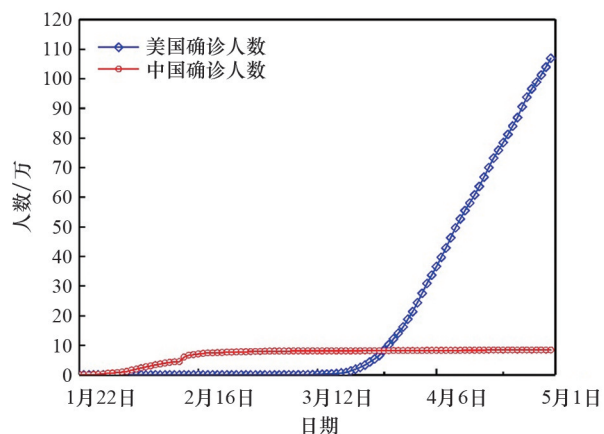


图1 2020年1月22日至4月30日美国、中国的累计确诊人数

2 研究方法

2.1 基于广义SEIR模型的传播参数估计

目前常见的传染病模型中,SEIR模型是其中较为完整的模型,SEIR模型通过建立微分方程组,按照一般的传播机理建立集中模型。为提高模型对现实情况的还原度,本研究以SEIR模型为基础,

提出广义SEIR模型。为了描述新冠肺炎的流行病特征及其传播机理,引入7个不同人群状态,即 $\{S(t), P(t), E(t), I(t), Q(t), R(t), D(t)\}$,在时间 t 分别表示易感染人群、不易感染人群、暴露人群(在潜伏期中已感染但尚未传染)、感染人群(具有传染性,尚未隔离)、隔离人群(已感染和隔离)、康复人群和死亡人群。新的隔离状态由数据驱动,死亡与恢复

状态一起取代了经典SEIR模型中的原始 R 状态(图2),并由一组普通的微分方程式来表征。常数 $N = S + P + E + I + Q + R + D$,表示某个区域的总人口。系数 $\{\alpha, \beta, \gamma^{-1}, \delta^{-1}, \lambda(t), \kappa(t)\}$ 分别表示保护率、感染率、平均潜伏时间、平均检疫时间、治愈率和死亡率。

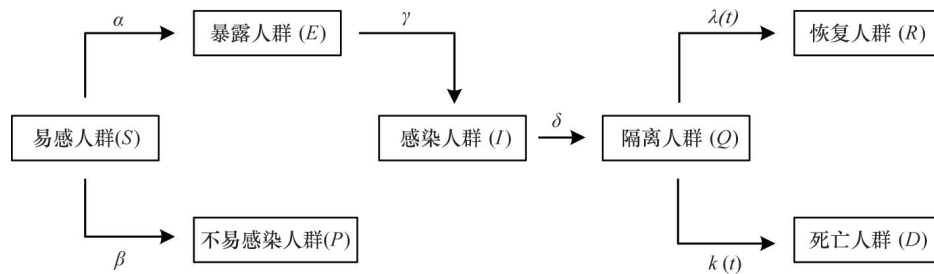


图2 广义SEIR模型架构

广义SEIR模型^[9]为:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\alpha S(t) - \beta \frac{S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dE(t)}{dt} &= -\gamma E(t) + \beta \frac{S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \gamma E(t) - \delta I(t) \\ \frac{dQ(t)}{dt} &= \delta I(t) - \lambda(t)Q(t) - \kappa(t)Q(t) \quad (1) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \lambda(t)Q(t) \\ \frac{dD(t)}{dt} &= \kappa(t)Q(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} &= \alpha S(t) \end{aligned}$$

2.2 系统动力学模型仿真的参数敏感性分析

系统动力学中反馈和循环是一个基本的概念。例如新冠肺炎病毒导致的感染率和感染人数,就是一个反馈循环,感染率越低,那么感染人数就会越少,治愈率也就会越高。因为病毒的传播机制及其依赖关系在现实世界中是非线性关系的,一般很难用数学方法对其进行有效的建模,所以需要寻求强大的建模软件;而AnyLogic不仅支持反馈、循环的设计和仿真,例如存量、数组变量和流程图的应用等^[10],还支持面向对象和层次化的建模,对于复杂

的模型可以进行分层的设计与定义,同时可以融合其他的建模方法^[15]。

本研究对新冠肺炎传播中的参数进行敏感性分析,而敏感性分析和仿真的主要参数来源于基本传染数。基本传染数的概念源自流行病学,指在没有特殊外力干预、种群都不具备免疫力时,某个病原体把疾病感染给他人的平均数。基本传染数通常用 R_0 表示, R_0 的数值越大,代表传染病的控制越难^[16]。在没有防疫的情况下:若 $R_0 < 1$,传染病将会逐渐消失;若 $R_0 > 1$,传染病会以指数分布的方式爆炸增长,上升为流行病;若 $R_0 = 1$,传染病会变成种群中的地域性流行病。为讨论参数对疫情传播的影响,需要分析 R_0 与 $\alpha, \beta, \gamma^{-1}, \delta^{-1}, \lambda(t), \kappa(t)$ 等参数的关系, R_0 的数值可以由下式计算得到:

$$R_0 = \beta \times \delta^{-1} \times (1 - \alpha)^T \quad (2)$$

式中, T 为疫情传播的天数。

由式(2)可知, α 、 β 以及 δ^{-1} 影响 R_0 值的大小。同时平均潜伏时间 γ^{-1} 在某种疫情传播过程中一般为稳定的值,且治愈率 $\lambda(t)$ 和死亡率 $\kappa(t)$ 对疫情传播过程影响较小,因此本文仅对 α 、 β 及 δ^{-1} 的值进行讨论,从而得出该参数对疫情传播的影响。

根据流行病传染机理和广义SEIR模型,建立基于系统动力学的传染病模型,其仿真模型的工作

机理如图3所示。

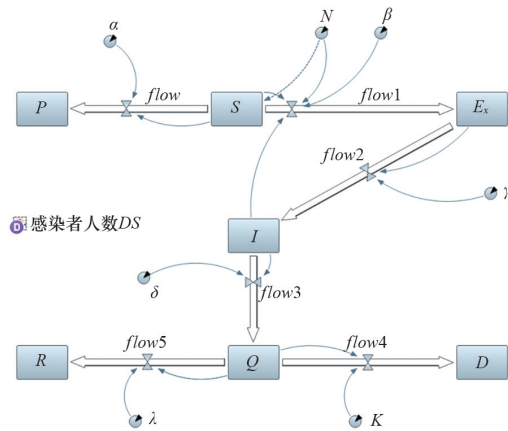


图3 基于系统动力学的新冠肺炎工作机制

工作机制主要根据广义SEIR模型的微分方程建立,其中 E_x 为暴露人群 E ,其他均为广义SEIR模型的参数,感染者人数为 E_x+I+Q ,而流入状态为正,流出状态为负,例如 S 流出到 P 和 E_x ,对应微分方程中的负号,而存量和流量的逻辑关系基于改进的SEIR模型定义如下:

$$\text{流量} flow = \alpha S(t) \tag{3}$$

$$\text{流量} flow1 = \beta (S(t)I(t))/N \tag{4}$$

$$\text{流量} flow2 = \gamma E(t) \tag{5}$$

$$\text{流量} flow3 = \delta I(t) \tag{6}$$

$$\text{流量} flow4 = \lambda(t)Q(t) \tag{7}$$

$$\text{流量} flow5 = \kappa(t)Q(t) \tag{8}$$

$$\text{存量} P = flow \tag{9}$$

$$\text{存量} S = -flow1 - flow \tag{10}$$

$$\text{存量} E_x = flow1 - flow2 \tag{11}$$

$$\text{存量} I = flow2 - flow3 \tag{12}$$

$$\text{存量} Q = flow3 - flow4 - flow5 \tag{13}$$

$$\text{存量} R = flow4 \tag{14}$$

$$\text{存量} D = flow5 \tag{15}$$

3 模型建立与求解

3.1 模型的假设与符号说明

对模型假设:(1)假设全球疫情统计数据真实可靠;(2)在新冠肺炎传播过程中,美国、中国境内

的总人口数不变;(3)新冠肺炎的治愈率和死亡率都是时间依赖性的,治愈率随时间逐渐增加;(4)假定人口为常数,即未模拟出生和自然死亡。

3.2 新冠肺炎传播参数估计结果

依据2020年1月22日至4月30日中国与美国新冠肺炎数据,根据广义SEIR模型,通过函数fit_SEIRQDP对模型中的参数进行估计,从而得到最佳参数值。选用Matlab软件中非线性拟合函数lsqcurvefit对模型的参数进行拟合,估计模型中的参数。求解最优参数如表1所示,其中 λ 和 κ 存在多个数值,原因是随着疫情的扩散,对病毒的研究进一步加深,导致治愈率和死亡率发生动态变化。

表1 美国和中国最优参数

参数	参数估计值	
	美国	中国
α	0.0094	0.0566
β	0.8045	1.3042
γ	0.3008	0.6492
δ	0.000162061	0.5123
λ	0.0077/3.2283/15.5640	0.0960/0.1304/31.3826
κ	0.0119/0.0130	0.0041/0.0216
N	329466283	1404676330

将得到的美国、中国参数估计值代入模型中,计算得到的疫情数据与实际数据的对比分别如图4、图5所示,其中死亡者与治愈者为累计数据,而本文拟合的隔离者是累计确诊人数-死亡人数-治愈人数。由图可知,美国隔离者、治愈者、死亡者拟合数据曲线与实际数据曲线高度重合;而中国因早期防控政策相对到位,故隔离者拟合曲线与实际数据略有差别,但基本重合,治愈者和死亡者拟合曲线与实际数据高度重合。

由图4与图5也可知,美国自2020年1月22日至3月18日隔离者、死亡者、治愈者都相对较少,但2020年3月19日后,隔离者迅速上升,死亡者、治愈者也呈上升态势;中国自2020年1月22日至2月17日日隔离者一直上升,在经过2020年2月18日拐点后,隔离者呈下降态势,而治愈者在2020年1月相对较少,但在2020年2月后迅速上升,死亡者

自2020年1月22日至4月30日虽略有上升,但数量相对较少。

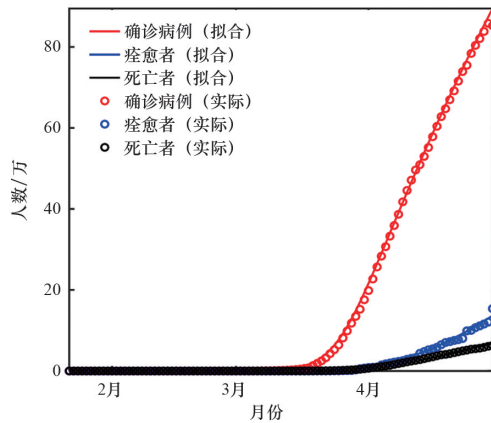


图4 2020年美国拟合数据与实际数据对比

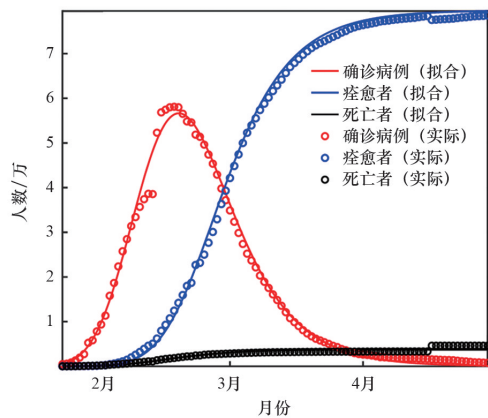


图5 2020年中国拟合数据与实际数据对比

3.3 关键参数敏感性分析结果

根据广义SEIR模型,改变其中的单一参数,得到相应参数的改变对新冠肺炎疫情传播的影响结果。本研究利用Anylogic仿真,通过单一改变保护率、感染率和平均检疫时间,利用系统动力学模型的敏感性分析验证中国的疫情变化趋势,基准参数采用数据拟合中的估计参数。

保护率 α 指的是从易感人群转变为不易感人群的概率,保护率的变化对中国感染者人数的影响如图6所示,保护率越大,疫情的感染者人数越少,在无任何措施限制的条件下,所有易感者均有几率接触到感染者,可以通过防疫措施来增加保护率,如在政府的号召和管控之下,有一部分人选择待在

家里而不外出或者限定在某一较小区域(例如某一村庄或社区),由于减少了与外界的交流,在理想情况下(周围无感染者),这一部分人感染的几率很小,甚至可以假设他们是不会被感染的,而只有外出人群才会被感染,保护率越大,说明人们外出的概率越小。由此可知,“呼吁人们待在家里不要外出”的建议对疫情的减缓具有积极作用。

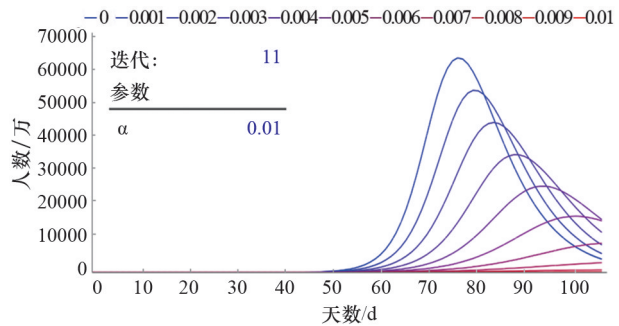


图6 保护率 α 的敏感性分析

感染率 β 指的是易感人群被感染为患病者的概率,感染率的变化对中国感染者人数的影响如图7所示,感染率越大,感染者人数越多。新冠肺炎病毒主要的传播途径是呼吸道飞沫传播和接触传播,由此可知,可通过加强佩戴口罩来减少感染率,增加社交距离,疾控人员和医生应注重对感染者的日常行径数据进行大规模密切追踪。具体来说,查找患者的手机、GPS、运动轨迹,甚至抽取各监控设备来追踪他们的行迹,一个患者途径的地方,接触过的人群,都必须采取相应措施,并对所有密切接触者进行居家或者集中隔离,进行核酸检测,这些都可以有效降低感染率。

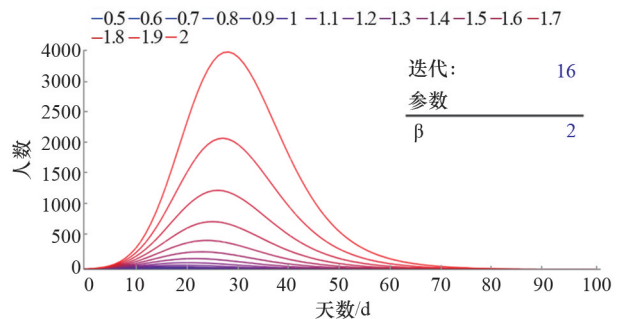


图7 感染率 β 的敏感性分析

平均检疫时间 δ^{-1} 指的是确诊者从患病到收治到医院被隔离或者居家自我隔离的时间,平均检疫时间的变化对中国感染者人数的影响如图8所示,平均检疫时间越短,感染者接触他人的概率减低,疫情的感染者人数越少。而降低平均检疫时间的主要措施是增大检测力度,又由于无症状感染者的存在,其携带病毒却没有症状,但传染性很强,因此增加了检疫的难度,加长了平均检疫时间,但把这些病毒携带者追踪出来非常重要,各国情况虽然不一样,但有必要做大规模抽样调查。为了加快检测速度,对于高风险地区虽不能全民进行病毒检测,但可以在医疗资源足够的情况下加大抽样比例,其他中低风险区域可适当降低抽样比例。及时发现、

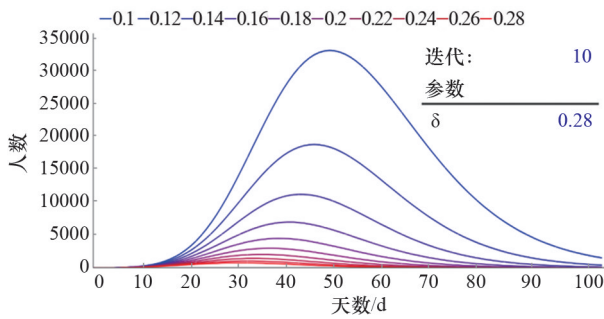


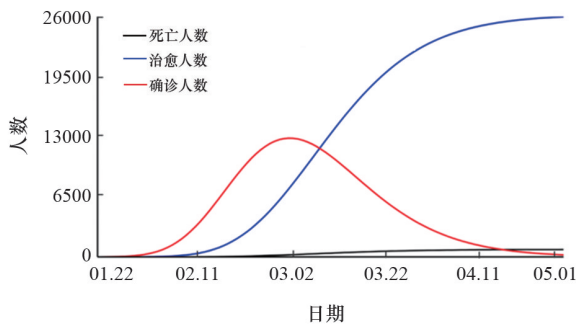
图8 平均检疫率 δ 的敏感性分析

控制无症状感染者,避免无症状感染者的聚集所造成的社会层面的扩散,同时建立方舱医院或其他增加救治床位的措施,将感染者尽快隔离,进行救治,从而进一步限制了疫情的传播。

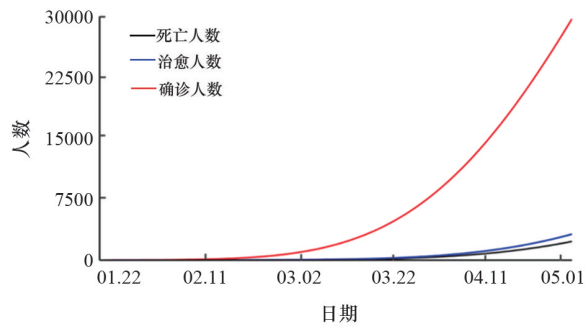
3.4 不同防控级别下疫情传播模拟

为进一步综合模拟关键参数敏感性分析结果和关键参数引发的管控措施对新冠肺炎的影响,以美国和中国的确证人数、死亡人数、治愈人数为例,其中确证人数为当日确证病例,死亡人数与治愈人数为累计数据。利用Anylogic仿真,通过综合改变保护率、感染率与平均检疫时间3个参数,模拟中美既有管控效果,中国强、弱管控,美国强、弱管控3个角度,进而总结出不同防控级别下疫情传播预测与实测结果。

1) 中美既有管控效果对比。利用Anylogic仿真和广义SEIR模型的最优化参数,对中国与美国在4月30日前新冠肺炎确证病例、治愈人数与死亡人数进行对比,如图9所示。根据两国新冠肺炎发展情况看出,中国经过高效防控措施后,确证病例由升到减,治愈人数不断增长;而美国由于没有执行严格的防疫政策,确证病例指数化攀升;也可以看出两国治愈人数和死亡人数与图4、图5拟合曲线一致,也进一步说明了模型的拟合性较好。



(a) 中国



(b) 美国

图9 2020年1月22日至4月30日新冠肺炎既有管控效果

2) 中国强、弱管控效果对比。为了进一步说明管控政策对于中国的影响,以强管控与弱管控为例,强管控即提高保护率、降低感染率和减少平均检疫时间,弱管控即降低保护率、提高感染率和增

加平均检疫时间,通过综合改变中国的保护率、感染率与平均检疫时间,说明强管控的重要性,图10为2020年1月22日至4月30日中国新冠疫情强、弱管控传播模拟。对于中国新冠肺炎强管控而言,

新冠肺炎确诊病例增长较少;对于中国新冠肺炎弱管控而言,因中国人口较多,故新冠肺炎确诊病例

指数化增长更为严重,说明为了控制新冠肺炎的传播,需要进一步实行强管控政策。

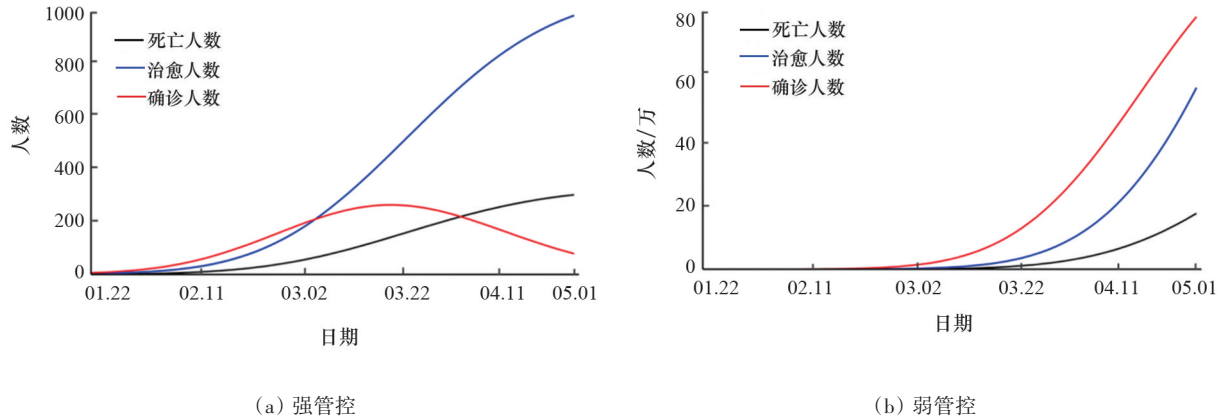


图10 2020年1月22日至4月30日中国疫情传播模拟

3) 美国强、弱管控效果对比。美国是全球新冠肺炎重要疫区,而为了控制其传播与发展,需实行强管控政策,图11为2020年1月22日至4月30日美国新冠肺炎疫情强、弱管控传播模拟。美国强、弱管控政策对比发现,美国对新冠肺炎的强管控会使美国的确诊病例出现拐点,由增到减,且确

诊病例数量较小,而美国对新冠肺炎的弱管控所造成的效果与中国一致,确诊病例都是指数化增长,说明了美国需要制定提高保护率、降低感染率与减少平均检疫时间的政策,抑制新冠肺炎的传播与发展。

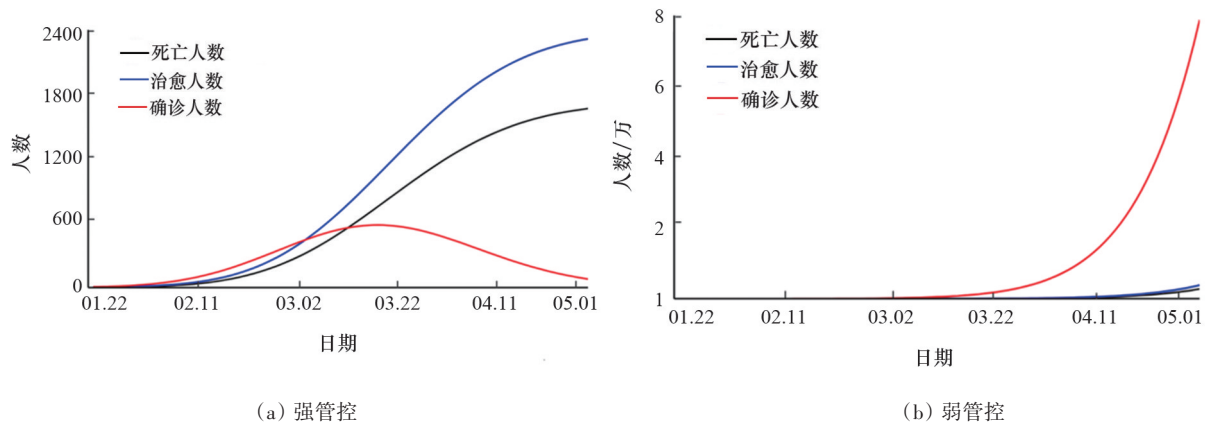


图11 2020年1月22日至4月30日美国疫情传播模拟

4) 不同防控级别下疫情传播预测与实测结果。为了进一步直观地分析不同防控级别下疫情传播的情况,将中国与美国强、弱管控措施与实测的数据结果进行对比(表2),其中确诊病例、死亡人数皆为累计数据。由表2可知,在新冠肺炎强管

控下,美国与中国的确诊病例远远低于实测结果,且增长变动不大;而在新冠肺炎弱管控下,美国与中国的确诊病例远远大于实测结果,且指数化增长、增速较快、无拐点趋向,说明了强管控对于抑制新冠肺炎传播与扩散的重要性。

表2 不同防控级别下疫情传播预测与实测结果

感染分类	日期	模拟预测		实测结果
		强管控	弱管控	
美国确诊病例	4月30日	28535	1276427	1069424
	5月30日	29240	6233111	1770165
	6月30日	29256	19611553	2636414
	7月30日	29256	41031052	4495015
中国确诊病例	4月30日	14538	16629244	83956
	5月30日	15402	44958229	84128
	6月30日	15454	63814940	84785
	7月30日	15455	69298100	87489
美国死亡人数	4月30日	1667	6209	62996
	5月30日	1722	32775	103776
	6月30日	1723	109720	127685
	7月30日	1723	239768	152802
中国死亡人数	4月30日	308	173429	4637
	5月30日	331	542743	4638
	6月30日	332	832701	4641
	7月30日	332	928721	4659

4 结论

考虑到易感人群、不易感人群、暴露人群等7个人群状态,利用广义SEIR模型,以2020年1月22日至4月30日美国和中国的新肺炎数据为例,分析其传播过程;进而利用Anylogic系统动力学模型的敏感性分析,提出针对性的防控政策,主要结论如下。

1) 从模型拟合性来看,美国传播拟合曲线与实际数据高度重合,而中国传播拟合曲线与实际数据基本重合;从新冠肺炎传播来看,美国自2020年3月19日后,隔离者、死亡者、治愈者均处于上升态势,而中国在经过2月18日拐点后,隔离者迅速下降,治愈者也迅速上升,死亡者波动不大。

2) 根据基本传染数的公式得知,新冠肺炎的传播主要受保护率、感染率与平均检疫时间的影

响。从保护率来看,保护率越大,疫情感染者人数越少,所以要提高保护率,可以“呼吁人们待在家里不要外出”;从感染率来看,感染率越大,感染者人数越多,所以要降低感染率,可以“呼吁人们外出佩戴口罩”,密切关注感染者的活动轨迹;从平均检疫时间来看,平均检疫时间越短,疫情感染者人数越少,所以要减少平均检疫时间,可以增大检测力度,对疫情较严重地区做大规模无病症感染者的抽样调查。

3) 通过中美既有管控效果对比、中国强弱管控对比、美国强弱管控、不同防控级别下疫情传播4个角度发现,中国对于新冠肺炎的防控效果好于美国,也进一步说明了强管控对于抑制新冠肺炎的重要性,所以美国作为新冠肺炎重要疫区,需要通过制定相关强管控的政策来抑制新冠肺炎的传播与扩散。

参考文献 (References)

- [1] 盛华雄, 吴琳, 肖长亮. 新冠肺炎疫情传播建模分析与预测[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 759-766.
- [2] 梅文娟, 刘震, 朱静怡, 等. 新冠肺炎疫情极限IR实时预测模型[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 362-368.
- [3] 张艳霞, 李进. 基于SIR模型的新肺炎疫情影响预测分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 94-101.
- [4] 汪剑眉, 李钢. 新冠肺炎非均匀感染力传播模型与干预分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 392-398.
- [5] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于SEIR的新肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 369-374.
- [6] 游光荣, 游翰霖, 赵得智, 等. 新冠肺炎疫情传播模型及防控干预措施的因果分析评估[J]. 科技导报, 2020, 38(6): 90-96.
- [7] 张宇, 田万利, 吴忠广, 等. 基于改进SEIR模型的新肺炎疫情沿交通线路传播机制[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 150-158.
- [8] Yang Z, Zeng Z, Wang K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions[J]. Journal Thoracic Disease, 2020, 12(3): 165-174.
- [9] Guerrero-Nancuante C, Manríquez R. An epidemiological forecast of COVID-19 in Chile based on the generalized

- SEIR model and the concept of recovered[J]. *Medwave*, 2020, 20(4): 1-15.
- [10] 邵年, 钟敏, 程晋, 等. 基于 FUDAN-CCDC 模型对新冠肺炎的建模和确诊人数的预测[J]. *数学建模及其应用*, 2020, 9(1): 29-32.
- [11] 刘红亮, 贾洪文, 王雁, 等. 新型冠状病毒肺炎初期传播规模的系统动力学模型估计方法及评价——以甘肃省为例的研究[J]. *电子科技大学学报(社科版)*, 2020, 22(3): 36-45.
- [12] 崔景安, 吕金隆, 郭松柏, 等. 新发传染病动力学模型——应用于 2019 新冠肺炎传播分析[J]. *应用数学学报*, 2020, 43(2): 147-155.
- [13] 张原, 尤翀, 蔡振豪, 等. 新冠肺炎(COVID-19)新型随机传播动力学模型及应用[J]. *应用数学学报*, 2020, 43(2): 440-451.
- [14] 贾仁安. 系统动力学反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 78-96.
- [15] 张争艳, 周志强, 董敏. 基于系统动力学的供应链牛鞭效应仿真研究[J]. *物流技术*, 2014, 33(2): 164-167.
- [16] 周涛, 刘权辉, 杨紫陌, 等. 新型冠状病毒肺炎基本再生数的初步预测[J]. *中国循证医学杂志*, 2020, 20(3): 359-364.

Simulation of COVID-19 propagation and transmission mechanism and intervention effect based on generalized SEIR model

WANG Jianwei¹, CUI Zhiwei², PAN Xiaoxiong², DONG Shi¹

1. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract The coronavirus disease 2019 has spread to a great number of countries and regions around the world, and the spread processes and the infection prediction models of the COVID-19 vary from country to country. Based on the COVID-19 published data from the United States and China, this paper first applies the generalized SEIR model to estimate the disease transmission parameters, then, determines the influence of each parameter in the basic infection number R_0 on the disease. Based on the Anylogic simulation, a system dynamics model is used to analyze the parameter sensitivity, and to quantitatively characterize the influence of key parameters on the disease transmission. Finally, according to the analysis results, some targeted prevention and control intervention measures are put forward, with China and the United States as examples to simulate the intervention effects of different prevention and control levels. It is found that the generalized SEIR model fits well with the transmission mechanism of the COVID-19 in China and the United States. The protection rate, the infection rate and the average quarantine time have a significant impact on the prevention and the control of the epidemic. Targeted measures are adopted to improve the protection rate, reduce the infection rate and shorten the average quarantine time.

Keywords COVID-19; generalized SEIR model; system dynamics model; sensitivity analysis; Anylogic simulation ●



(责任编辑 徐丽娇)