

文章编号: 2095-2163(2023)11-0148-07

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

# 基于系统动力学的新冠肺炎疫情仿真分析

王启云, 郑中团

(上海工程技术大学 数理与统计学院, 上海 201620)

**摘要:** 为了探究 COVID-19 疫情的传播机理, 模拟疫情的传播过程, 提出了基于系统动力学模型的新冠肺炎传播机制研究与仿真分析。首先, 针对上海市 2022 年 2 月 24 日至 6 月 24 日期间疫情从爆发到清零的完整过程, 提出了 SEIGQ 模型, 该模型加入了不易感人群, 并考虑了潜伏者的感染性。其次, 利用系统动力学模拟仿真 COVID-19 疫情演化的传播过程并进行参数敏感性分析。最后, 根据仿真结果提出针对性的对策和建议。研究发现, 基于系统动力学的 SEIGQ 模型可以很好地模拟真实疫情的传染速度和规模, 同时平均交通系数、核酸常态化系数、病毒变异和疫苗接种率对新冠肺炎新增阳性病例人数产生显著影响。

**关键词:** COVID-19; SEIR 模型; SEIGQ 模型; 系统动力学; 仿真模拟

## Simulation analysis of the novel coronavirus outbreak based on system dynamics

WANG Qiyun, ZHENG Zhongtuan

(School of Mathematics, Physics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to explore the transmission mechanism of COVID-19 and simulate the transmission process of COVID-19, the research and simulation analysis of the transmission mechanism of COVID-19 are proposed based on the system dynamics model. First of all, on February 24, 2022, Shanghai solstice on June 24 during epidemic outbreak to reset the complete process, SEIGQ model is put forward, the vulnerable groups are introduced to the modle, and the lurker infectious is considered. Secondly, system dynamics are used to simulate the transmission process of COVID-19 epidemic evolution and parameter sensitivity analysis. Finally, according to the simulation results, the corresponding countermeasures and suggestions are put forward. It is found that the SEIGQ model based on system dynamics can well simulate the real transmission speed and scale of the epidemic, and the average traffic coefficient, nucleic acid normalization coefficient, virus variation and vaccination rate have a significant impact on the number of new positive COVID-19 cases.

**Key words:** COVID-19; SEIR model; SEIGQ model; dynamics of system; simulation

## 0 引言

研究可知, 学者专家对于传染病疫情的演化路径以及模型预测于十八世纪就开始了, 主要以传染病动力学模型为基础对疫情的发展进行研究和分析为主<sup>[1-4]</sup>。COVID-19 疫情爆发以来, 全球许多学者都对这次的疫情进行了研究和预测。Yang 等学者<sup>[5]</sup>利用改进的 SEIR 模型得到新冠肺炎的流行曲线, 并使用人工智能方法来研究疫情。范如国等学者<sup>[6]</sup>基于复杂网络理论, 对 3 种情况下的疫情拐点进行了预测。严阅等学者<sup>[7]</sup>引入时滞过程, 提出了

基于时滞动力学系统的传染病模型, 并有效地预测了疫情未来的发展。刘红亮等学者<sup>[8]</sup>利用甘肃省出现病例以来最初 8 天的确诊数据, 基于系统动力学构建了新冠肺炎患者变动分析模型。路雪鹏等学者<sup>[9]</sup>基于系统动力学提出了一种扩展的 SEIR 模型, 对新冠病毒的传播过程进行研究。这些模型考虑了传染病的传播机理, 能够很好地解释传染病的传播过程, 但大部分并没有考虑到新冠肺炎的多种人群状态, 会忽略无症状感染者、潜伏人群的传染性等, 尽管一些学者对 COVID-19 疫情的传播进行了仿真与建模, 但是以上海市作为仿真对象的研究却

**基金项目:** 全国统计科学研究项目(2020LY080)。

**作者简介:** 王启云(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器学习、疫情预测分析。

**通讯作者:** 郑中团(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 机器学习与数据挖掘、随机过程与复杂网络、应用统计与综合评价、风险模型与破产概率、区域可持续发展的统计测度。Email: zhongtuanzheng@163.com

收稿日期: 2022-11-09

仍有不足。

针对这些问题,考虑到上海疫情中无症状感染者所占比例较大的实际情况,本文提出了 SEIGQ 模型并基于系统动力学进行模拟仿真,首先,在经典的 SEIR 动力学模型的基础上加入了不易感人群,将感染者划分为有症状感染者和无症状感染者,将隔离人群划分为治愈人群和死亡人群,并考虑潜伏人群的传染性;其次,基于系统动力学对 SEIGQ 模型进行模拟仿真,探讨 2022 年上半年的上海市新冠肺炎疫情的传播机制以及导致疫情扩散的相关因素;最

后,根据仿真分析结果给予疫情防控一定的建议。

## 1 数据来源与概括

疫情数据来源于上海发布官方公布的各地区新增确诊人数、新增无症状感染者人数、新增治愈出院的确诊人数以及新增解除医学观察的无症状感染者人数。选取从 2022 年 2 月 24 日至 6 月 24 日的上海市的日实际新增阳性病例数、日实际出院阳性病例人数,并计算日实际增长率,上海疫情的总体时间演化特征如图 1 所示。

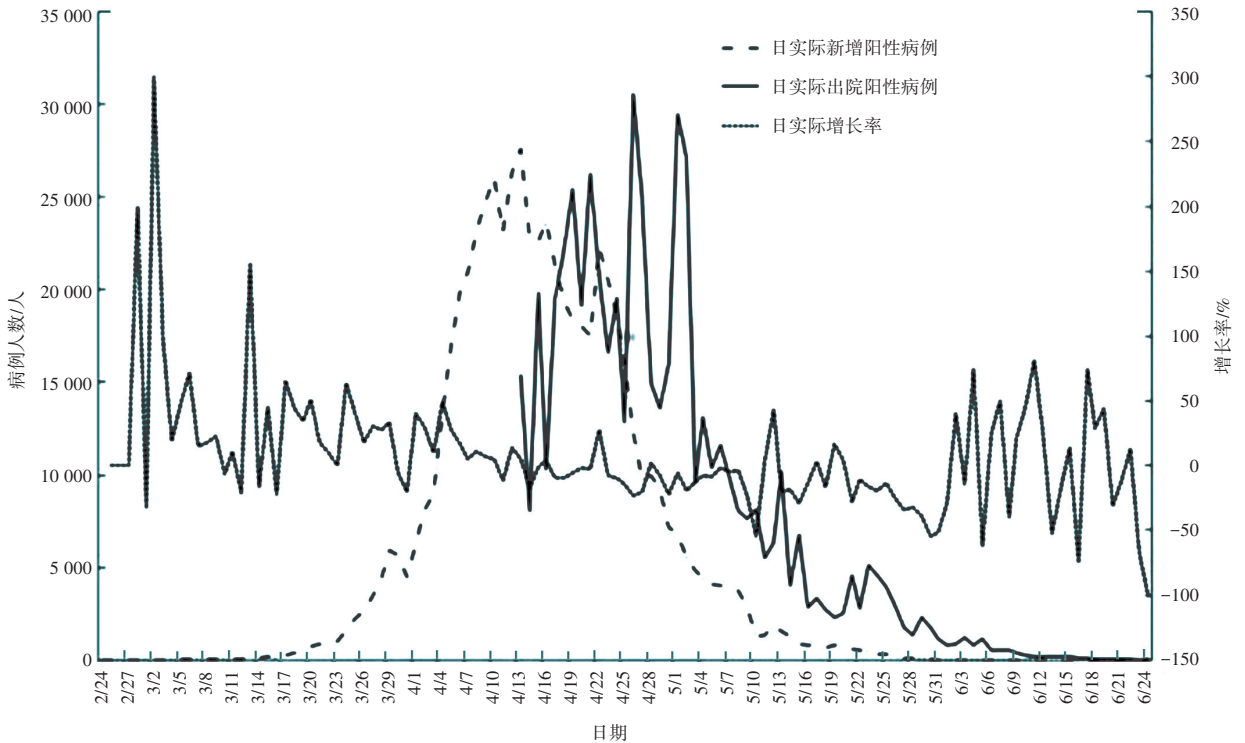


图 1 疫情总体时间演化特征

Fig. 1 Characteristics of overall time evolution of the epidemic

从图 1 可以看出,疫情具有阶段性,在疫情初发期,日实际新增阳性病例数呈现持续增长,日实际增长率呈现波动式增长;在突增爆发期,日实际新增阳性病例数突增,呈现出爆发式增长,并于 4 月 13 日达到峰值。在衰退下降期,日实际新增阳性病例数迅速下降,日实际出院阳性病例人数呈现大幅度波动式的增加,日实际增长率趋于停滞,并于 5 月 17 日实现全市 16 个区阳性清零。在内部稳定期,日实际新增阳性病例数稳定下降,并且在 5 月 29 日下降至两位数,日实际出院阳性病例数整体上呈现下降的趋势,日实际增长率波动下降,整体上呈现负增长。

## 2 SEIGQ 模型的构建

为了研究新冠肺炎的传播机制,探讨影响 COVID-19 疫情传播的因素,需要考虑到新冠肺炎病毒的传播特点,基于经典的 SEIR 模型构建一个改进的新冠肺炎传染病动力学模型。

### 2.1 模型假设

(1)假设上海市的总人口是一个常数,即不考虑仿真期内人口的迁入、迁出以及自然死亡的影响。

(2)假设模型中的治愈人群已具备抗体,排除重复感染的可能性。

(3)假设被检测出的阳性患者都可以被安全隔

离,不会再感染别人。

(4)假设所有潜伏者的潜伏期长短一致。

## 2.2 经典的 SEIR 模型

在经典的 SEIR 模型中,针对某种传染病的传播,把研究人群进行以下 4 种划分:

(1)  $S$  为易感者(susceptible)。表示当前尚未被感染,但是容易被感染者感染的人群。

(2)  $E$  为潜伏者(exposed)。表示已经感染了病毒,但还未表现出感染症状的人群。

(3)  $I$  为感染者(infected)。表示已经感染了病毒,并且表现出感染症状的人,即确诊患者。

(4)  $R$  为移出者(removed)。表示不会再被感染的人群,包括治愈人群和死亡人群,该模型建立的动力学微分方程表达式为:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta SI - \omega E \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \omega E - \gamma I \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (4)$$

其中, $\beta$ 表示易感者  $S$  转化为潜伏者  $E$  的概率; $\omega$ 表示潜伏者  $E$  转化为感染者  $I$  的概率; $\gamma$ 表示感染者  $I$  转化为移出者  $R$  的概率。SEIR 模型的人群状态转移关系如图 2 所示。

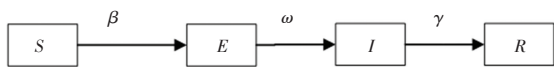


图 2 SEIR 模型人群状态转移关系

Fig. 2 SEIR model of population transfer relationship

## 2.3 SEIGQ 模型

针对上海市本轮新冠肺炎疫情的传播特点,在经典的 SEIR 动力学模型上提出以下几点改进:

(1)考虑潜伏者也具有传染性。本次新冠肺炎疫情中,潜伏期状态的人群虽然没有表现出感染症状,但是也具有传染性,潜伏者可能会与易感者接触,从而将易感者转化为潜伏者或者感染者,因而在 SEIR 模型中加入潜伏者感染率,由于对确诊病例及其密切接触者的及时管控,使得感染者和潜伏者只能在局部小范围内进行感染<sup>[10]</sup>,故而认为感染者感染率和潜伏者感染率相同。

(2)加入不易感人群  $G$ 。不易感人群主要指易感人群中采取保护措施(如接种疫苗或者佩戴口罩),这部分人群在与感染者或者潜伏者接触时,感染病毒概

率更低,不易感人群的初始值为总人口 \* 疫苗接种率。

(3)将移出者分为治愈者  $R$  和死亡者  $D$ 。本文将核酸检测出的所有阳性感染者称为隔离人群,将隔离人群中通过治疗痊愈后的人群称为治愈人群,不幸去世的人群称为死亡人群,把传统模型中的移出者分为治愈人群  $R$  和死亡人群  $D$ 。

(4)将感染者分为有症状感染者  $N$  和无症状感染者  $M$ 。无症状感染者是指新冠病毒病原检测为阳性,但无相关的临床表现且 CT 影像学无新冠肺炎影像学特征者,这部分人群主要依靠核酸检测进行排查。与之前的疫情相比,本轮上海疫情中无症状感染者占感染者的比例较大,故而将感染者划分为无症状感染者  $M$  和有症状有感染者  $N$ 。

改进后的 SEIGQ 模型将人群分为 9 类,易感染者( $S$ )、潜伏者( $E$ )、不易感染者( $G$ )、感染者( $I$ )、无症状感染者( $M$ )、有症状感染者( $N$ )、隔离人群( $Q$ )、治愈人群( $R$ )和死亡人群( $D$ ),人群转移关系如图 3 所示,SEIGQ 模型可以用微分方程表示为:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -a[I(t) + E(t)] \frac{S(t)}{N} \quad (5)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = [aS(t) + gG(t)] \frac{[I(t) + E(t)]}{N} - bE(t) \quad (6)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} = -g[I(t) + G(t)] \frac{G(t)}{N} \quad (7)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = bE(t) - I(t) \quad (8)$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = hI(t) - eM(t) \quad (9)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = (1 - h)I(t) - eN(t) \quad (10)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = e[M(t) + N(t)] - rQ(t) - dQ(t) \quad (11)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = rQ(t) \quad (12)$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = dQ(t) \quad (13)$$

$$N = S + E + I + G + M + N + Q + R + D \quad (14)$$

其中, $a$ 为感染率,即感染者和潜伏者对易感染者的感染概率; $g$ 为保护率,即感染者和潜伏者对不易感染者的感染概率; $b$ 为潜伏时间; $h$ 为无症状率; $e$ 为检疫时间; $r$ 为治愈率; $d$ 为死亡率; $N$ 为总人口。通过查找资料文献以及对上海疫情的统计研究,对上述微分方程的相关参数进行赋值,主要参数

及其取值见表 1。

### 3 基于系统动力学的仿真分析

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,是以定性与定量相结合的方法研究系统结构,模拟复杂系统的功能与行为<sup>[11]</sup>。在新冠肺炎疫情传播的动力学模型中,存在易感染者、不易感染者、无症状感染者和隔离人群等人群状态,应用系统动力学模型可以更加清楚地表示不同人群的转化关系,分析参数变化产生的影响,定量地分析与理解 COVID-19 疫情的传播机理,研究疫情的传播规律。

#### 3.1 系统流图分析

根据本文提出的 SEIQ 模型将人群分为 9 类,其中将总人口  $N$  分为易感染者  $S$  和不易感染者  $G$ ,将感染者分为无症状感染者  $M$  和有症状感染者  $N$ ,将移出者分为治愈人群  $R$  和死亡人群  $D$ ,基于这一改进的 SEIR 模型,使用系统动力学模拟仿真 COVID-19 疫情的传播过程以及发展趋势。为了探讨新冠肺炎疫情的传播机制以及影响因素,利用参数敏感性分析定量分析平均交通系数、核酸常态化系数、疫苗接种率和病毒变异对疫情传播趋势的影响,使用 Anylogic 软件构建 COVID-19 疫情演化的系统动力学仿真模型,绘制系统动力学流图如图 5 所示,系统动力学流量定义公式表和存量定义公式表分别见表 2 和表 3。

图 3 SEIQ 模型中的人群状态转移关系

Fig. 3 Population transfer relationship in SEIQ model

表 1 主要参数及取值

Tab. 1 Main parameters and their values

参数	取值
$b$	0.25
$h$	0.91
$r$	0.996
$d$	0.004
$N$	24 870 895

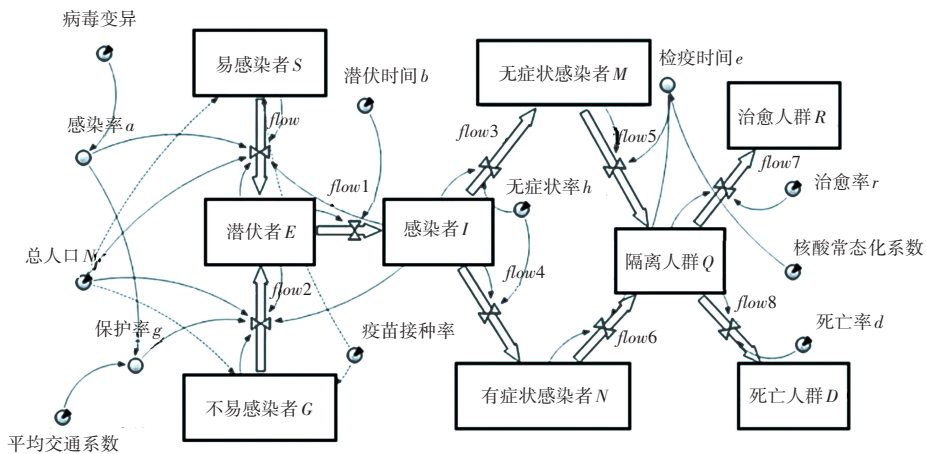


图 4 COVID-19 疫情演化系统动力学流图

Fig. 4 Flow diagram of COVID-19 epidemic evolution system dynamics

表2 流量定义公式表

Tab. 2 Traffic definition formula table

流量名	公式
$flow$	感染率 $a * (\text{感染者 } I + \text{潜伏者 } E) * \text{易感染者 } S / \text{总人口 } N$
$flow1$	保护率 $g * (\text{感染者 } I + \text{潜伏者 } E) * \text{不易感染者 } G / \text{总人口 } N$
$flow2$	潜伏时间 $b * \text{潜伏者 } E$
$flow3$	无症状率 $h * \text{感染者 } I$
$flow4$	$(1 - \text{无症状率 } h) * \text{感染者 } I$
$flow5$	检疫时间 $e * \text{无症状感染者 } M$
$flow6$	检疫时间 $e * \text{有症状感染者 } N$
$flow7$	治愈率 $r * \text{隔离人群 } Q$
$flow8$	死亡率 $d * \text{隔离人群 } Q$

表3 存量定义公式表

Tab. 3 Stock definition formula table

存量名	公式
易感染者 $S$	$-flow$
不易感染者 $G$	$-flow1$
潜伏者 $E$	$flow + flow1 - flow2$
感染者 $I$	$flow2 - flow3 - flow4$
无症状感染者 $M$	$flow3 - flow5$
有症状感染者 $N$	$flow4 - flow6$
隔离人群 $Q$	$flow5 + flow6 - flow7 - flow8$
治愈人群 $R$	$flow7$
死亡人群 $D$	$flow8$

### 3.2 校准实验

由于平均交通系数和核酸常态化系数缺少有效的参数值,因此本文通过校准实验来确定这2个参数的取值。通过与2022年2月24日至6月24日上海市实际阳性感染者人数、有症状感染者人数和无症状感染者人数的实际数据进行对比,使得模拟数据与实际数据之间的差异最小。设置平均交通系数和核酸常态化系数为连续型,最小值为0,最大值为1,当系数值为0时表示不进行交通管制或者不进行核酸常态化检测,当系数值为1时表示进行最严格的交通管制和最大限度进行核酸检测。经过多次校准,得到平均交通系数为0.6,核酸常态化系数为0.7,此时模拟数据与实际数据之间的差异最小,实际阳性感染者人数差异为792人。这2个参数的校准数值与上海市疫情的实际情况一致,即上海市总体上采取了较强的交通管制和频率较高的核酸检

测,仿真模拟结果如图5所示。从图5可以看出,通过校准实验,仿真数据与实际数据一致,验证了模型的合理性。

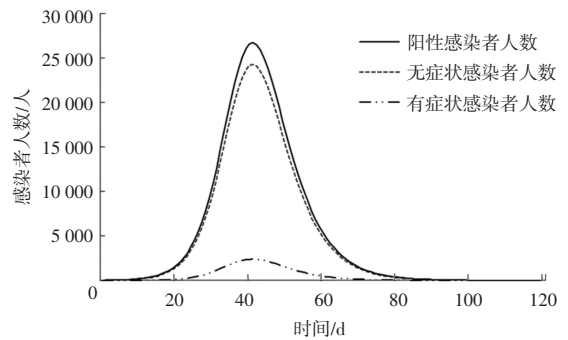


图5 系统动力学校准实验仿真结果

Fig. 5 Simulation results of system dynamics calibration experiment

### 3.3 参数敏感性分析

根据系统流图分析可知,COVID-19疫情中的感染概率取决于疫情防控中的4个重要参数:平均交通系数、核酸常态化系数、病毒变异和疫苗接种率,利用系统动力学中的敏感性分析对不同参数数值进行仿真模拟,以探讨其对疫情发展的影响。

(1)平均交通系数的参数分析。平均交通系数即居民的平均出行强度,受到交通管制措施的影响,在交通管制较松弛的地方人们的平均交通系数会更大。将平均交通系数的最小值设置为0.5,最大值设置为0.7,模拟步长设置为0.1,模拟时间设置为100天,则平均交通系数对感染者人数的影响如图6所示。从图6可以看出,当平均交通系数减小,即减弱交通管制时,感染者人数会明显增加;当平均交通系数增加,即加强交通管制时,感染者人数会明显减少,同时随着平均交通系数的增加,感染者人数的最高点向后推迟。

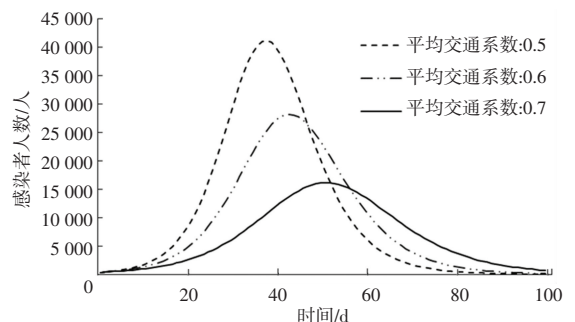


图6 平均交通系数对感染者人数的影响

Fig. 6 Influence of average traffic coefficient on the number of infected persons

(2)核酸常态化系数的参数分析。核酸检测是

第一时间发现阳性感染者的重要手段,也是加强自我保护的重要防线,开展常态化核酸检测是主动筛查无症状感染者的重要路径。将核酸常态化系数设为范围参数,最小值设为 0.6,表示每 100 个上海市民每天能进行核酸检测的人数约为 60 人;最大值设为 0.8,表示每 100 个上海市民每天能进行核酸检测的人数约为 80 人,模拟步长设置为 0.1,模拟时间设置为 100 天,则核酸常态化系数对感染者人数的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着核酸常态化系数的减少,即居民进行核酸检测的频率降低时,感染者人数会明显增加;随着核酸常态化系数的增加,感染者人数会明显减少。

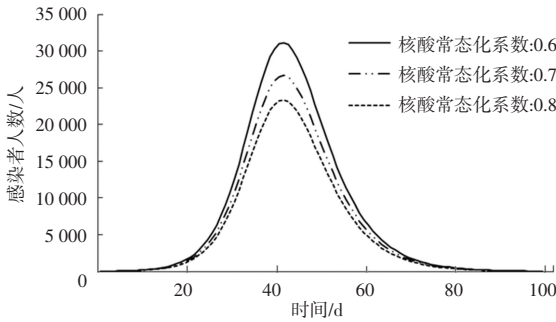


图 7 核酸常态化系数对感染者人数的影响

Fig. 7 Impact of nucleic acid normalization coefficient on the number of infected persons

(3) 疫苗接种率的参数分析。接种新冠病毒疫苗可以预防发病、重症和死亡,阻断疫情传播,让大多数人的健康得到保证,国内新冠疫苗全程接种率为 89.7%,将疫苗接种率设为范围参数,最小值设为 79.7%,最大值设为 99.7%,模拟步长设置为 10%,模拟时间设置为 100 天,则疫苗接种率对感染者人数的影响如图 8 所示。从图 8 可以看出,当疫苗接种率降低,感染人数会有所增加,当进一步提升疫苗接种率时,感染人数会有所减少。

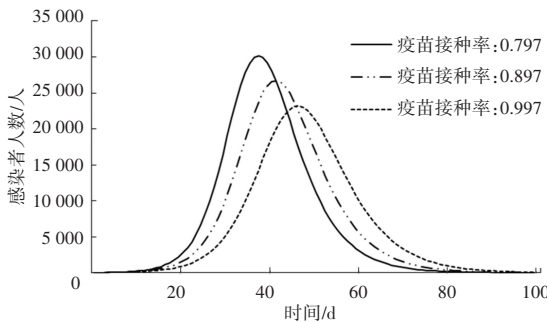


图 8 疫苗接种率对感染者人数的影响

Fig. 8 Impact of vaccination rates on the number of infected persons

(4) 病毒变异的参数分析。研究发现导致本轮

上海本土疫情的新冠病毒,绝大部分为奥密克戎 BA.2 型和 BA.2.2 型,奥密克戎变异株的传播力大概是此前的初代新冠病毒的 1.5 倍。将病毒变异的最小值设为 1,表示初代新冠病毒,最大值设为 2,表示比奥密克戎变异株更强一倍的变异株,模拟步长设置为 0.1,模拟时间设置为 100 天,则病毒变异对感染者人数的影响如图 9 所示。从图 9 可以看出,初代新冠病毒的传染率更低一点,感染人数也会明显减少,当病毒变异增强,即出现了比奥密克戎变异株更强的变异株,则感染率会增加,感染人数也会明显增加,可见,病毒变异对疫情的传播有着显著的影响。

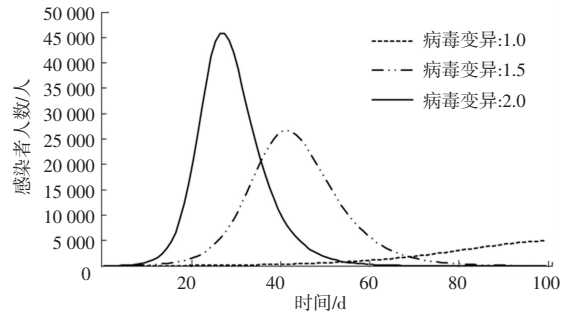


图 9 病毒变异对感染者人数的影响

Fig. 9 Impact of virus mutation on the number of infected persons

## 4 结束语

新冠肺炎的持续蔓延严重影响人们的生活,研究疫情的传播机理,模拟仿真分析 COVID-19 疫情的传播过程对于科学制定防疫策略具有重要作用。本文以公开发布的上海市 COVID-19 疫情数据为研究对象,对 SEIR 模型进行修正,提出了 SEIGQ 模型,该模型考虑了潜伏期状态人群的感染性,加入了潜伏者感染率,将总人口划分为易感人群和不易感人群;将感染者划分为有症状感染者和无症状感染者;将隔离人群划分为治愈人群和死亡人群。其次,基于系统动力学构建疫情演化的仿真模型,模拟 COVID-19 疫情传播的发展过程,利用参数敏感性分析定量分析平均交通系数、核酸常态化系数、疫苗接种率和病毒变异这 4 个参数对疫情的影响。根据仿真分析结果,提出如下建议:

(1) 提高平均交通系数。在出现疫情的地区实行严格的交通管制,降低个人出行频率,做到非必要不出门,在出行过程注意做好防疫措施,少聚集。

(2) 加快核酸常态化系数。个人需要积极响应当地的核酸检测政策,当发现有疑似新冠阳性症状,需要立刻做好隔离措施并进行多次核酸检测。各地

均需做好对疫情的追踪并及时通报信息,减低传播风险,根据各地疫情情况合理分配资源进行常态化核酸检测。

(3)提高疫苗接种率。接种新冠疫苗在降低感染风险和传播速度方面有一定的积极作用。国内新冠疫苗全程接种率为89.7%,还可以进一步提高。未接种疫苗的人需要积极配合进行接种,也可以加强宣传疫苗接种的重要性,多设立一些疫苗接种点以提高疫苗接种率。

## 参考文献

- [1] DIETZ K, JAP H. Daniel Bernoulli's epidemiological model revisited[J]. *Mathematical Biosciences: An International Journal*, 2002,180(special issue si):1-21.
- [2] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1927,115(772):700-721.
- [3] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. Contributions to the mathematical theory of epidemics. II. The problem of endemicity [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1932,138(834):55-83.
- [4] ARON J L, SCHWARTZ I B. Seasonality and period-doubling bifurcations in an epidemic model [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1984, 110(4):665-679.
- [5] YANG Zifeng, ZENG Zhiqi, WANG Ke, 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*, 2020, 12: 165-174.
- [6] 范如国,王奕博,罗明,等. 基于 SEIR 的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. *电子科技大学学报*,2020,49(03):369-374.
- [7] 严阅,陈瑜,刘可仪,等. 基于一类时滞动力学系统对新型冠状病毒肺炎疫情的建模和预测[J]. *中国科学:数学*, 2020, 50: 385-392.
- [8] 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(03):36-45.
- [9] 路雪鹏,尚娇,赵俊辉,等. 基于系统动力学的新冠病毒传播过程预测[J]. *系统仿真学报*,2021,33(07):1713-1721.
- [10] 陈琳,王凯华. 基于 SEIR 模型的山西省新冠肺炎疫情特点分析 [J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*,2021,37(06):40-45.
- [11] 钟永光,贾晓菁,钱颖. *系统动力学*[M]. 2版. 北京:科学出版社,2013.