

基于修正的SEIRD传染病动力学模型的 应急物资需求预测

黄金娣, 冉明皓

江南大学商学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年2月29日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年4月28日

摘要

为准确预测应急物资需求, 减轻突发公共卫生事件所带来的负面影响, 本文对突发公共卫生事件下需求的不确定性做出了科学化的处理。考虑到应急物资需求预测的复杂性, 首先通过分析疫情发展趋势对传统传染病模型进行适当修正, 使其更加贴合疫情的传播和扩散情况, 接着采用修正的SEIRD传染病动力学模型对感染区域内各类人群的数量进行预测, 最后根据预测结果构建应急物资动态需求预测模型, 以精准预测突发公共卫生事件下应急物资需求变化规律。

关键词

应急物资, 传染病模型, 需求预测

The Demand Prediction of Emergency Materials Based on the Modified SEIRD Infectious Disease Dynamics Model

Jindi Huang, Minghao Ran

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Feb. 29th, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Apr. 28th, 2024

Abstract

In order to accurately predict the demand for emergency materials and mitigate the negative impact of public health emergencies, this paper deals with the uncertainty of demand under public health emergencies. Considering the complexity of forecasting the demand for emergency mate-

rials, firstly, the traditional epidemic model is modified by analyzing the trend of the epidemic situation to make it more suitable for the epidemic situation. Then, we use the modified SEIRD epidemic dynamics model to forecast the population number in the infected area. Finally, according to the forecast results, we construct the dynamic demand forecasting model of emergency materials, to accurately predict the change rule of the demand for emergency materials under public health emergencies.

Keywords

Emergency Materials, Infectious Disease Model, Demand Prediction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪以来, 突发公共卫生事件频发, 因其成因多样性、传播广泛性、分布差异性以及危害复杂性等特征, 给应急管理体系与能力建设都带来严峻的挑战。在突发公共卫生事件大规模爆发初期, 感染人群数量迅速增加, 应急物资的需求量也随之激增, 各地区在抗疫过程中均暴露出口罩、防护服、医疗器械等应急医疗物资和饮用水、蔬菜、水果等应急生活物资供应不及时等的现实问题。应急物资是指为应对严重自然灾害、突发公共卫生事件、公共安全事件及军事冲突等突发公共事件应急处置过程中所必需的物质, 保障受灾群众生产生活, 快速恢复正常社会生活秩序。准确的应急物资需求预测是实现快速应急救援的基础与保障, 有利于减轻突发公共卫生事件所带来的负面影响。

不少学者对此应急物资需求预测做了深入研究。如何对突发公共事件下所需应急物资做出科学准确的预测, 是应急响应的第一个关键环节[1], 主要分为定性和定量两类方法。定性预测以德尔菲法、主观概率法, 综合专家的专业知识以及主观经验来估测结果; 常见的定量预测方法主要有案例推理法[2] [3]、神经网络模型[4] [5] [6]、灰色系统[7] [8]等, 根据历史数据对研究对象来进行量化并预测。此外, 还有学者考虑了应急物资需求信息不完备性的多源数据融合方法进行需求预测。在突发事件按发生之后, 现场的信息流通较为混乱, 会导致应急物资需求的相关信息缺失或杂乱而不能使用。如何判断现场多种来源信息的可靠性及准确度, 过滤冗长信息并融合历史需求信息在实现需求预测中极其重要。Majumder 等学者用模糊聚类 and 预测工具, 实现了模糊集对不精确和不确定性的处理能力, 开发了多传感器数据融合技术[9]。Che 等学者提出了概率论和信息熵来解决多源信息系统中不确定数据的信息融合和数值表征[10]。虽然这两位学者的数据融合手段并没有应用在预测上, 但为数据融合技术进行了提升, 而 Padilla 等学者探讨了信息融合和数据挖掘的能力, 通过多变量预测模型中来获得预测精度的显著提高[11]。

聚焦于突发公共卫生事件, 对于应急物资需求预测的模型主要是传染病动力学模型[12] [13]和时间序列[14] [15]模型。Liu 等学者将基于流行病扩散模型的医疗资源动态需求预测机制与基于多阶段规划模型的医疗资源优化配置与运输机制进行耦合, 提出了离散的时空网络模型[16]。葛洪磊等学者从时段、关键事件、传播动力学、空间分布、感染规模、信息特征、医疗资源等 7 个维度构建了重大传染病疫情演化的 5 种情境, 构建了一个多周期贝叶斯序贯决策模型[17]。

大规模传染疫情爆发后, 如何快速启动救援工作并保证各类应急物资的充足供应成为亟待解决的现实问题。在这种情境下, 针对突发公共卫生事件, 尤其是大规模的突发性传染病疫情问题, 讨论如何准

确预测疫区应急物资需求,最大限度地降低疫情带来的损失、提高救援效率,具有研究的必要性和价值。在应急物资需求预测的问题上,学者们多从预测的技术方法上进行创新性突破,以达成提高应急物资需求预测精度的目的,但少有学者基于突发事件的实际特征对经典模型进行修正以提高其适用性。鉴于此,本文以突发公共卫生事件为研究背景,结合新型冠状病毒肺炎疫情的传播扩散特征,对经典的 SEIR (Susceptible Exposed Infectious Removed) 传染病动力学模型进行修正,意图于实现应急物资需求的精准预测。

2. 修正的 SEIRD 传染病动力学模型构建

2.1. 基本问题描述

为更形象地描绘出突发公共事件的发展趋势,本文以 2020 年初大规模爆发的新型冠状病毒肺炎疫情为例,选取了全国 2020 年 1 月 20 日至 4 月 20 日的相关统计数据进行分析,如图 1 所示,数据来源于国家卫健委官方网站和湖北卫健委官方网站。从图 1 的疫情大致走势中能看出,一二月份是新冠肺炎疫情的主要传播期,确诊病例以及疑似病例数量庞大,为实现最大限度的应急救援,对该阶段进行应急物资需求预测更为有意义;而到三四月份,感染人数不再大幅新增,这意味着此时疫情已经得到了强有力地管控,不再大规模传播,直至结束。

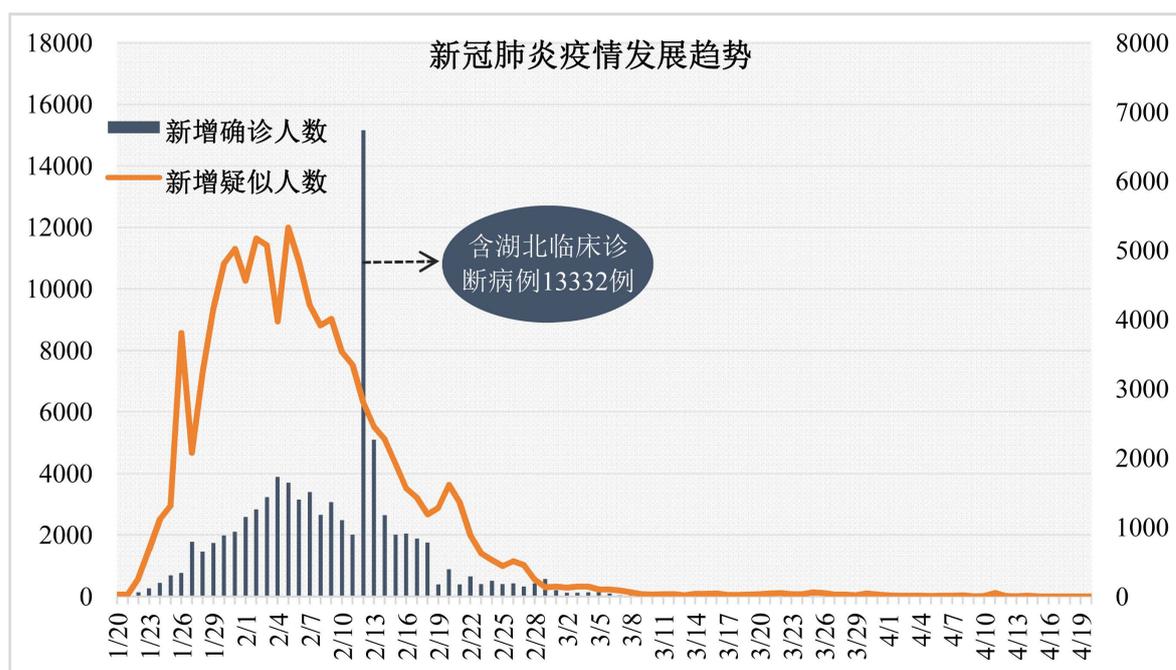


Figure 1. The development trend of Covid-19

图 1. 新冠肺炎疫情发展趋势

突发公共卫生事件背景下,疫区内应急物资的及时供给是实现快速应急救援的基础,而做好应急物资保障工作的基础则是对应急物资的需求量进行准确预测。然而在大规模的传染病疫情爆发前期,疫情的传染源、传染概率、传播路径等等均难以在短时间内形成定论,疫区内居民尚未形成较强的防范意识,因而往往造成大面积的人员感染,并持续扩散,是开展应急救援工作最为艰难的时期。这个时期的应急物资具有动态紧迫性特点,直接对应急物资需求量进行预测因此受限。基于此,本文选择间接预测,在疫情的主要传播期内,结合新冠病毒感染特征修正传统的传染病动力学模型,描述疫情的传播和扩散情

况, 并通过修正后的 SEIRD 传染病动力学模型对疫区各类人群的人数进行大体把控, 并在此基础上构建应急物资动态需求模型, 进而科学地预测出突发公共事件下疫区对应急物资的需求。

本文选择了经典的 SEIR 模型作为基础模型, 该模型从 1998 年起就被很多学者广泛运用于传染病疫情预测中[18] [19], 已经具备了较为成熟的框架体系及理论模型。SEIR 模型主要将人群划分为四类: 易感人群 S (susceptible)、潜伏人群 E (exposed)、感染人群 I (infected)、恢复人群 R (removed) 四类人群。一般来说, 易感人群对新型冠状病毒肺炎病毒不具备免疫能力, 容易被感染。易感染者若接触到感染者, 则进入潜伏期, 成为潜伏者; 潜伏者是指接触或者携带了感染源但暂未发病的群体, 一旦出现明显的发病症状, 则确诊为感染者; 感染者接受治疗后被成功治愈, 成为恢复者, 并得到了抗体, 不会再度发展为感染者, 也就不会对其他人群造成病毒的传播。从图 2 中可以看出 S、E、I、R 这四类人群的转换过程。感染人群以 α_1 的概率将易感人群转化为潜伏人群, 经过一段时间的潜伏期之后潜伏人群以 β 的概率转化为感染人群, 这类人群在感染期内始终保持传染性, 经过治疗后以 γ 的概率康复, 并对该病毒具有免疫能力, 短期内不会再被感染。SEIR 模型适用于带有潜伏期的传染病预测, 而本文是以 2020 年初大规模爆发的新型冠状病毒肺炎疫情为例, 根据中国疾病预防控制中心发布的《2019 新型冠状病毒疫情进展及风险评估》可知, 新型冠状病毒的潜伏期为 3~7 天, 最长不超过 14 天, 因此选用该模型作为突发公共卫生事件下应急物资需求预测的基本模型较为合适。

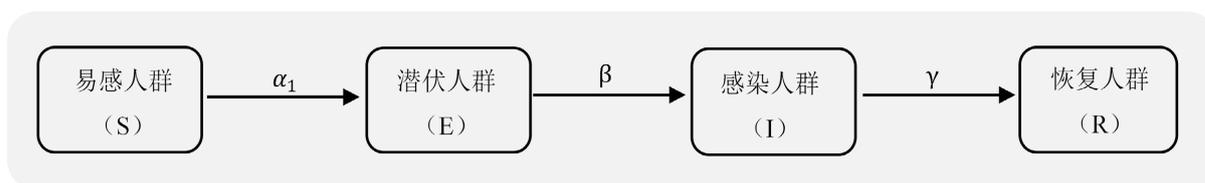


Figure 2. The schematic diagram of SEIR model

图 2. SEIR 模型示意图

2.2. 新冠肺炎疫情传播特征

传染病动力学模型能够很好地描述传染病疫情的传播路径, 在多种传染病发展趋势预测中均表现出了良好的拟合预测能力。然而, 任何一种预测方法都不能完美地进行所有预测分析, 需得综合考虑预测对象的特点、模型的适用条件以及局限性等等, 并基于此在现有的预测模型上进行一定的修正与完善, 才能更加贴合实际, 以满足当前的研究需要。因此, 本文针对大规模爆发的 Covid-19 疫情, 首先分析其传播特征以及相关风险, 然后据此在经典的 SEIR 模型上做出一定的修正, 使其更加贴合疫情的传播和扩散情况。

经国家卫健委专家鉴定, 新型冠状病毒肺炎病毒在传播过程中存在以下两个特征:

1) 根据中国疾病预防控制中心发布的《2019 新型冠状病毒疫情进展及风险评估》可知, 新型冠状病毒的潜伏期为 3~7 天, 最长不超过 14 天, 潜伏期较长, 且该病毒在潜伏期和感染期均具有一定的传染性;

2) 相较于一般的传染病, 在这场大规模爆发的新型冠状病毒肺炎疫情中的死亡人数更多, 负面影响更大。

基于以上, 本文结合新型冠状病毒肺炎疫情的发病特点及传播机制对经典的 SEIR 传染病动力学模型做出如下改进[20]:

1) 考虑到在疫情传播过程中潜伏者也具有一定的传染性, 引入潜伏人群传染率 α_2 对模型进行修正;

2) 考虑到新型冠状病毒存在一定的致死率, 故在经典的 SEIR 模型中增加死亡人群 D (dead) 仓室, 改进为 SEIRD 模型。

修正后的 SEIRD 传染病动力学模型即如图 3 所示, 从图中可以清晰地看出突发公共卫生事件爆发后 S、E、I、R、D 这 5 类人群的转换过程。

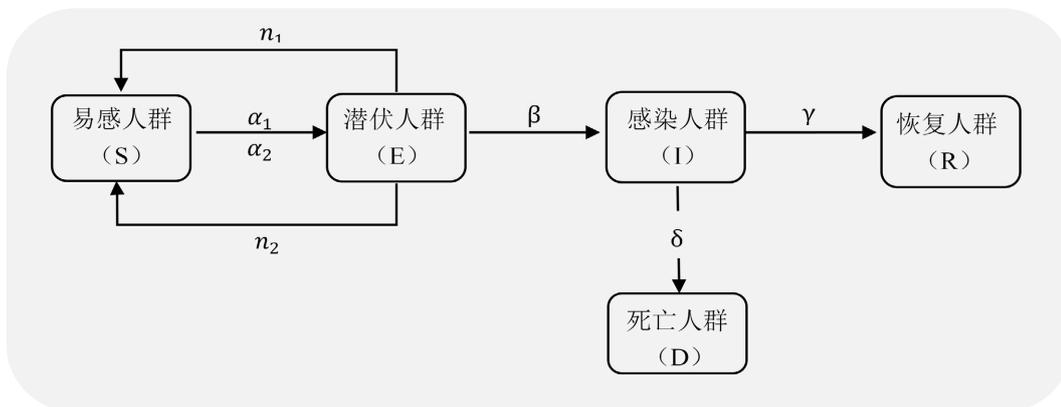


Figure 3. The schematic diagram of the modified SEIRD epidemic dynamics model
图 3. 修正后的 SEIRD 传染病动力学模型示意图

2.3. 研究假设及参数设置

由于突发公共卫生事件以及疫情防控的复杂性, 本文参考相关的文献资料, 并结合新型冠状病毒肺炎在疫情传播过程中的实际情况, 对修正后的传染病 SEIRD 传染病动力学模型中做出了如下假设:

- 1) 新型冠状病毒肺炎疫情爆发之后, 政府采取了强有力的防控措施控制人口流动, 尤其是湖北省各个城市之间的人口流动限制更为严格, 因此本文不考虑各疫区之间的人口流动对应急物资需求预测结果的影响[21]。为简化计算, 假定研究区域处于封闭状态, 即无新进入的易感者, 也无易感者流出;
- 2) 新型冠状病毒肺炎病毒的感染率高且传播范围广, 因此本文假定疫区人群对新型冠状病毒普遍易感, 对普通人群和易感人群不做进一步的区分;
- 3) 潜伏人群只能由易感人群转化而来, 感染人群只能由潜伏人群转化而来, 恢复人群只能由感染人群转化而来, 死亡人群只能由感染人群转化而来;
- 4) 人口自然出生率和自然死亡率这两个因素在短时间内不会对研究区域内的人口结构产生影响, 因此假定本文修正后的 SEIRD 传染病动力学模型不受这两个因素的干扰[21]。

基于以上对模型进行的相关改进及假设, 对修正后的 SEIRD 传染病动力学模型的参数设置如表 1 所示。本文拟定疫区主要包括易感人群 S、潜伏人群 E、感染人群 I、恢复人群 R、死亡人群 D 五类人群。感染者 I 与潜伏者 E 平均接触的易感人群 S 的人数为 n_1 、 n_2 , 分别以传染率 α_1 、 α_2 将易感者 S 转变为潜伏者 E, 潜伏者 E 又以确诊率 β 转化为感染者 I, 最终一部分感染者 I 以病死率 δ 死亡, 另一部分感染者 I 以治愈率 γ 康复并且在短期内不再被感染。

Table 1. The parameter description of the modified SEIRD epidemic dynamics model
表 1. 修正后的 SEIRD 传染病动力学模型的参数设置

符号	含义说明
$S(t)$	疫区内 t 时刻易感人群的数量
$E(t)$	疫区内 t 时刻潜伏人群的数量
$I(t)$	疫区内 t 时刻感染人群的数量

续表

$R(t)$	疫区内 t 时刻恢复人群的数量
$D(t)$	疫区内 t 时刻死亡人群的数量
α_1	感染者 I 对易感者 S 的感染率
n_1	感染者 I 平均接触到的易感者 S 人数
α_2	潜伏者 E 对易感者 S 的感染率
n_2	潜伏者 E 平均接触到的易感者 S 人数
β	潜伏者 E 的确诊率
γ	感染者 I 的恢复率
δ	感染者 I 的病死亡率

2.4. 模型构建

根据上述研究假设及参数设置, 新型冠状病毒肺炎疫情在 t 时刻的传播扩散情况可以描述为以下差分方程组:

$$\begin{cases} S(t) = S(t-1) - n_1\alpha_1 I(t-1)S(t-1)/N - n_2\alpha_2 E(t-1)S(t-1)/N \\ E(t) = E(t-1) + n_1\alpha_1 I(t-1)S(t-1)/N + n_2\alpha_2 E(t-1)S(t-1)/N - \beta E(t-1) \\ I(t) = I(t-1) + \beta E(t-1) - \gamma I(t-1) - \delta I(t-1) \\ R(t) = R(t-1) + \gamma I(t-1) \\ D(t) = D(t-1) + \delta I(t-1) \\ N = S(t) + E(t) + I(t) + R(t) + D(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, N 为疫区总人口, 本文已假定人口流动、出生率及死亡率对修正后的 SEIRD 传染病动力学模型不产生影响, 因此疫区总人口为五种人群的数量之和, 即表 t 时刻易感人群 S 、潜伏人群 E 、感染人群 I 、恢复人群 R 和死亡人群 D 的总人数。公式(1)表示, 在 t 时刻, 任一群体的人数等于该群体在 $t-1$ 时刻的人数以及在 $t-1$ 时刻进入该群体的人数之和, 再减去在 $t-1$ 时刻离开该群体的人数。例如, 在公式(1)中, 在 t 时刻, 区域内易感染者的人数 $S(t)$ 等于 $t-1$ 时刻区域内已有的易感染者的人数 $S(t-1)$, 加上 $t-1$ 时刻新增易感染者的人数 0 , 再减去 $t-1$ 时刻有易感者转化为潜伏者的人数。至此, 可以得出在整个研究时段 T 中, 疫区内各类人群的数量为:

$$S(T) = \sum_{t \in T} S(t) \quad (2)$$

$$E(T) = \sum_{t \in T} E(t) \quad (3)$$

$$I(T) = \sum_{t \in T} I(t) \quad (4)$$

$$R(T) = \sum_{t \in T} R(t) \quad (5)$$

$$D(T) = \sum_{t \in T} D(t) \quad (6)$$

2.5. 模型评价指标

为科学合理地衡量所构建模型的预测精度, 往往需要引入相应的评价指标进行精度分析。常用的模型预测效果评价指标主要有四种: 平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、绝对百分误差(APE)、平

均绝对百分误差(MAPE)。本文选用平均绝对百分误差(MAPE)和均方根误差(RMSE)对预测模型的有效性进行检验。

平均绝对百分误差(MAPE)表示单个误差与真实值之间的百分比值的平均值,它是评估预测精度的最常用指标之一,计算公式为:

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left| \frac{x(i) - x'(i)}{x(i)} \right| \times 100\% \quad (7)$$

平均绝对百分误差(MAPE)检验要求平均绝对百分误差值越小越好,使用平均绝对百分误差(MAPE)衡量模型预测效果通常遵循如表 2 所示的分级标准。预测模型只有通过有效性检验,预测结果才具有合理性与有效性。

Table 2. Model prediction accuracy MAPE grade

表 2. 模型预测精度 MAPE 等级

MAPE (%)	预测精度	MAPE (%)	预测精度
<10	好	20~50	一般
10~20	较好	>50	较差

均方根误差(RMSE)表示预测值与真实值之间误差平方平均值的平方根,用于衡量预测值与真实值之间的偏差,要求均方根误差值越小越好,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (x(i) - x'(i))^2}{T}} \quad (8)$$

3. 应急物资动态需求预测模型构建

3.1. 应急物资分类

自 2003 年爆发的 SARS 危机以来,应急物资储备成为应急救援工作的重中之重。根据央广网相关报道,截止 2023 年 7 月 25 日,应急管理部已经在 31 个省(市、区)拥有 126 个中央级储备库,储备了 955.2 万件、总价值达 37.3 亿元的中央应急抢险救灾物资,可以随时调运地方做好相关的应急救援减灾工作。在新型冠状病毒肺炎疫情防控工作中,国家工信部发布了疫情防控重点保障物资清单,涵盖了各类应急物资的原材料、包装材料、生产设备等等,这些应急物资基本满足了突发公共卫生事件尤其是本次新型冠状病毒肺炎疫情的需求。

本文将应急物资分为两类,一类是非消耗物资,如呼吸机、心电监测仪等等,这类物资在一次供应之后能够被长久使用,不需要频繁供应;另一类是消耗物资,如药品、口罩等等,这类物资的需求在疫情防控过程中是接连不断的,且由于人群的流动性和病毒的传染性,单位时间内疫区各类人群的数量是动态变化的,故而应急物资的需求也是动态变化的,再加之不同人群的需求也可能不同,因而这类物资的需求量往往难以预估且更为紧迫的。综合来看,在疫情发展过程中,针对消耗类应急物资来探讨更具有实际研究价值。因此,本文选择消耗物资来进行需求预测,并在前文相关人数预测的基础上构建应急物资动态需求预测模型。

3.2. 参数设置

考虑到信息滞缓以及运输延迟等原因,为充分保障应急物资的供应充足,防止货物紧缺,需根据服

务水平系数和应急物资缺货率确定应急物资运输的提前期[22], 以备不时之需。由于应急救援工作的首要目标是最大限度地降低损失, 故提前期产生的成本可暂时忽略。根据上述对应急物资的分类及相关分析, 本文对应急物资动态需求模型的参数设置如表 3 所示:

Table 3. The parameter description of the dynamic demand model of emergency materials

表 3. 应急物资动态需求模型的参数设置

符号	含义说明
q	感染人群 I 对应急物资的每日人均需求量
q'	易感人群 S、潜伏人群 E 以及恢复人群 R 对应急物资的每日人均需求量
\bar{L}	提前期, 即两次应急物资配送的时间间隔
δ	应急物资缺货率
$Z_{1-\delta}$	应急物资缺货率在 δ 下的服务水平系数
$D(t)$	t 时刻疫区内应急物资的需求量
$\sigma_D(t)$	t 时刻应急物资的需求标准差

3.3. 模型构建

基于上述应急物资分类及相关参数设置, 本文建立的应急物资动态需求预测模型如下, 该式表明 t 时刻疫区内应急物资的需求量。

$$D(t) = (q \times I(t) + q' \times (S(t) + E(t) + R(t))) \times \bar{L} + Z_{1-\delta} \times \sigma_D(t) \times \sqrt{\bar{L}} \quad (9)$$

其中, $\sigma_D(t)$ 为 t 时刻疫区内应急物资的需求标准差, 计算公式如下:

$$\sigma_D(t) = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^t (D(h) - \bar{D}(t))^2}{t}} \quad (10)$$

$\bar{D}(t)$ 为 t 时刻疫区内应急物资的需求均值, 计算公式如下:

$$\bar{D}(t) = \frac{1}{t} \sum_{h=1}^t D(h) \quad (11)$$

根据以上所构建的应急物资动态需求预测模型, 可更加及时精准地预测出疫情区域内消耗类物资的需求情况, 同时物资分配中心可以根据预测出的需求量及各个物资供应点特点, 制定更加完备的应急物资供应方案, 以增强应急物资供应的及时性和准确性。

4. 算例分析: 新冠肺炎疫情下应急物资需求量预测

4.1. 数据设置

本文以 2020 年初大规模爆发的新型冠状病毒肺炎疫情为案例背景, 以武汉市为研究区域, 运用修正后的 SEIRD 传染病动力学模型对疫区内各类人群的人数变化进行动态预测, 并据此进行应急物资需求预测。由于某些数据未公布或者灾害情况下无法收集, 因此我们采取实际数据和部分仿真数据相结合的方式来进行相关数据设置。

根据《武汉统计年鉴》可知 2019 年年末全市常住人口 1121.20 万人, 故在此设定 $N = 11,212,000$ 。

感染者将易感者转化为潜伏者的传染率可以根据新冠疫情期间的的数据计算得到 $\alpha_1 \approx 0.048$ [23]。潜伏者的确诊率 β 可以设定为疫情潜伏周期的倒数[19], 根据中国疾病预防控制中心发布的《2019 新型冠状病毒疫情进展及风险评估》可知, 新型冠状病毒的潜伏期为 3~7 天, 最长不超过 14 天, 因此可假定病毒的潜伏周期为 7 天, 则潜伏者的确诊率 $\beta = 1/7 \approx 0.143$ 。

基于以上, 可探究在无干预措施的情况下新型冠状病毒肺炎疫情在武汉市的传播扩散情况。其他相关数据设定为: $S = 11211999$, $E = 0$, $I = 1$, $R = 0$, $D = 0$, $n_1 = 10$, $n_2 = 10$, $\alpha_2 = 0.025$, $\gamma = 0.2$, $\delta = 0.005$ 。从图 4 中可以看出, 在不采取任何防控措施的情况下, 1121.2 万的人群基数随意流动, 在第一例病例出现后, 第 75 天潜伏者数量达到峰值为 3,668,033 人, 第 79 天感染者数量达到峰值为 2,259,957 人, 最终死亡人数为 269,705 人。

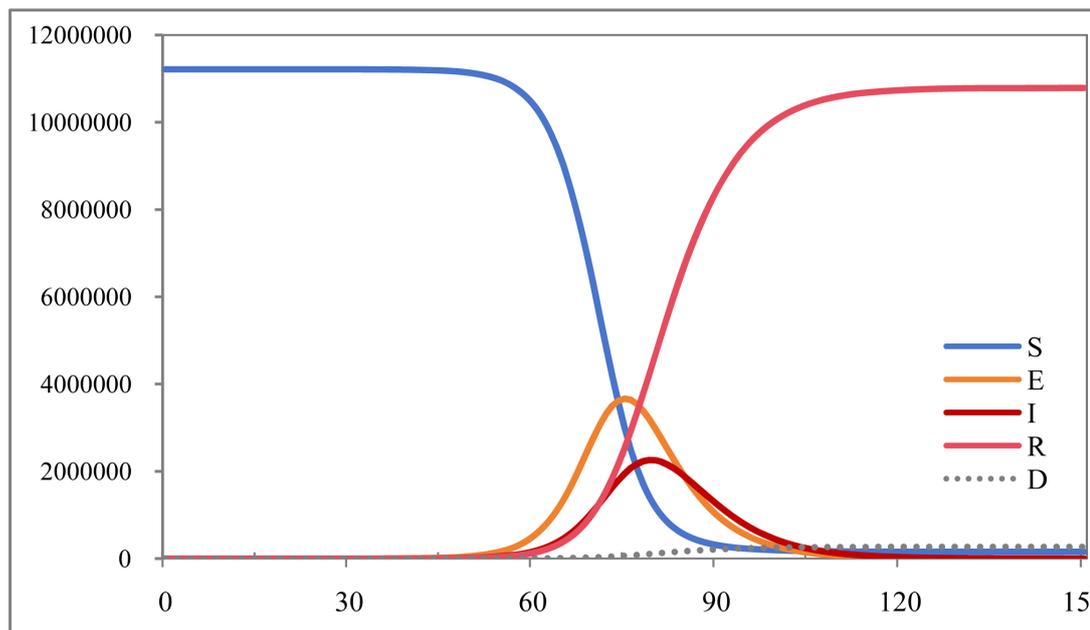


Figure 4. Transmission and diffusion map of Covid-19 outbreak without intervention
图 4. 无干预状态下新型冠状病毒肺炎疫情传播扩散图

结合武汉市疫情传播的实际情况可知, 第一例确诊病例于 2019 年 12 月 8 日被发现, 期间时隔 46 天, 即于 2020 年 1 月 23 日采取“封城”措施。采取强制封控措施限制人口流动之后, 感染者及潜伏者所能接触到的易感者数量降低, 需得设置新的参数值, 以便更加贴合实际的疫情发展趋势。假设感染者平均接触易感者的人数 $n_1 = 2$, 潜伏者平均接触易感者的人数 $n_2 = 3$ 。治愈率 γ 病死率 δ 可以通过收集受灾地区疫情爆发以来各周期的感染人数、恢复人数和死亡人数, 通过曲线拟合处理计算得出。由于 2 月 12 日湖北省报告的 13,332 例临床诊断病例被纳入确诊病例统计中, 以至于感染者人数骤增。为保证数据拟合的精度, 本文选取 2020 年 1 月 23 日至 2 月 11 日的疫情通报相关数据进行拟合得出 $\gamma = 0.0886$, $\delta = 0.0226$, 数据来源于国家卫健委官方网站和湖北卫健委官方网站。在疫情相关封控措施的干预下, 疫区内潜伏人数、感染人群以及死亡人群的数量变化拟合结果即如图 5 所示。

4.2. 结果分析

由于在 2020 年 2 月 13 日之前, 相关官方网站上并没有对武汉市新型冠状病毒肺炎疫情情况的通报, 故本文取 2 月 13 日至 2 月 22 日这十天之间的预测数据与实际数据进行对比, 数据来源于国家卫健委官

方网站。由于未考虑医疗水平的提升对感染者的治愈作用, 也未能考虑新型冠状病毒在变异过程中毒性有所降低, 导致治愈人群及死亡人群的预测结果与实际值有一定的出入, 故本文仅做感染人群数量的实际值与预测值的对比, 对比结果见表 4 所示。

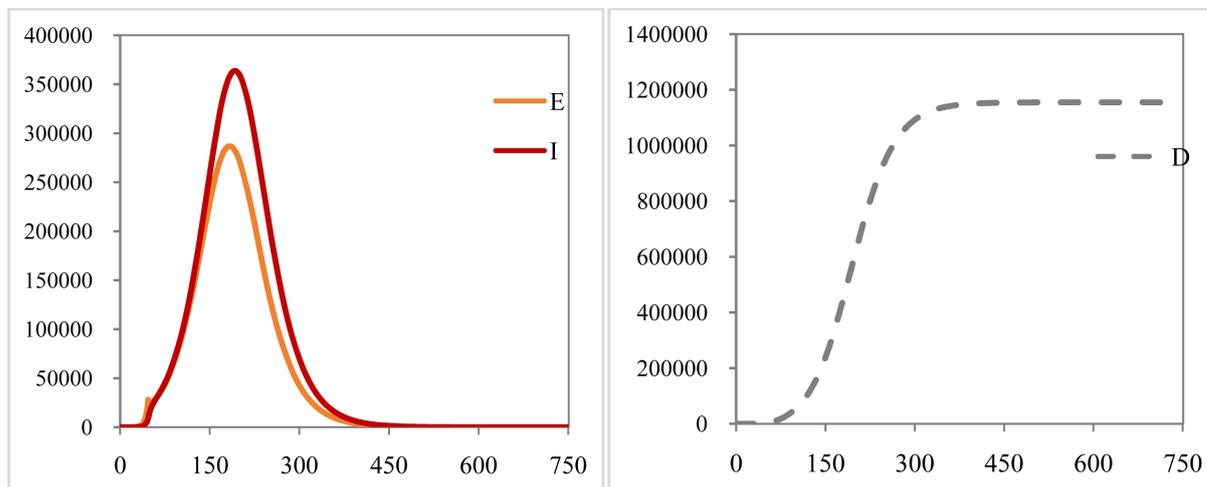


Figure 5. The change of population in the epidemic area under the intervention condition

图 5. 干预状态下疫区内各类人群变化

Table 4. The comparison of actual and predicted number of infected persons

表 4. 感染人群数量的实际值与预测值对比

时间	实际确诊/人	预测确诊/人	残差/人	绝对误差
2月13日	35,991	36,990	-999	2.77%
2月14日	37,914	38,064	-150	0.40%
2月15日	39,462	39,163	299	0.76%
2月16日	41,152	40,288	864	2.10%
2月17日	42,752	41,440	1312	3.07%
2月18日	44,412	42,620	1792	4.03%
2月19日	45,027	43,830	1197	2.66%
2月20日	45,346	45,070	276	0.61%
2月21日	45,660	46,341	-681	1.49%
2月22日	46,201	47,645	-1444	3.12%

由表 4 可知, 绝对误差序列为: (2.77%, 0.40%, 0.76%, 2.10%, 3.07%, 4.03%, 2.66%, 0.61%, 1.49%, 3.12%), 则平均绝对百分误差 MAPE 值为 2.10%, 远远小于 10%。根据平均绝对百分误差检验精度等级可知, 该预测模型的拟合精度较高, 表明该模型有效可行, 平均预测精度为 97.90%。此外, 均方根误差 RMSE 值为 2.41%, 相对较小, 说明预测值与实际值之间的误差不大, 亦表明模型有效可行。感染者人数实际值与预测值对比如图 6 所示, 预测结果与实际基本吻合。

根据公式(9)~(11)所构建的应急物资动态需求预测模型, 对日常消耗应急物资进行动态需求预测。以口罩为例, 一次性医用外科口罩防护效期一般是四小时, 故感染人群对口罩人均需求可设定为 6 只/天。考虑“居家隔离”的疫情防控政策, 非感染人群对口罩的需求量相对较少, 可设定为 2 只/天。假定两次

应急物资的配送时间间隔为 1 天, $Z_{1-\alpha}$ 表示应急物资缺货率在 0.05 以下时的服务水平系数 1.65。将以上数据代入应急物资动态预测模型 $D(t)$ 中, 预测结果见表 5。

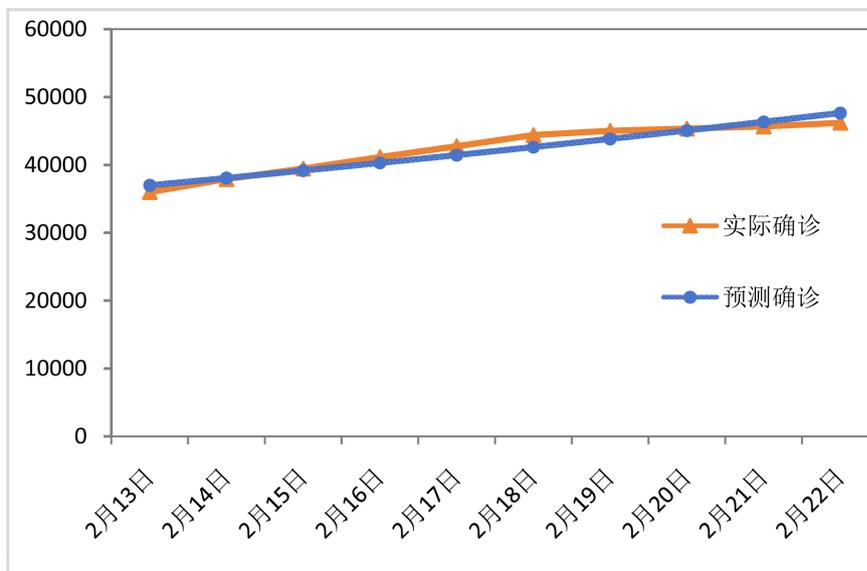


Figure 6. The comparison of actual and predicted number of infected persons
图 6. 感染者人数实际值与预测值对比

Table 5. The forecast results of dynamic demand for emergency materials
表 5. 应急物资动态需求预测结果

时间	口罩需求量/只	时间	口罩需求量/只
2月13日	22,547,996	2月18日	22,577,061
2月14日	22,563,004	2月19日	22,581,243
2月15日	22,566,585	2月20日	22,585,803
2月16日	22,569,808	2月21日	22,590,726
2月17日	22,573,259	2月22日	22,595,989

5. 结论与展望

本文通过分析新型冠状病毒肺炎疫情的传播扩散特征, 构建了修正的 SEIRD 传染病动力学模型对疫区内各类人群的数量进行预测。通过改变参数设置探究无干预措施和有干预措施两种状态下的疫情发展趋势, 继而对疫区内各类人群的人数动态变化进行大体把控, 并据此构建应急物资动态需求模型, 探索应急物资需求的动态变化规律, 最终通过算例分析证明了该模型的有效性。但本文仍然存在一些不足, 仅考虑了“居家隔离”这一干预政策对新型冠状病毒肺炎疫情传播扩散的影响, 未考虑疫情发展后期, 注射新冠疫苗等医学手段对疫情的防控作用, 也未考虑新型冠状病毒变异株毒性的降低, 导致本文所构建的修正后的 SEIRD 传染病动力学模型仅适用于疫情爆发初期的预测。后续在建模方面可以考虑不同的干预场景, 使模型更加贴合实际。

参考文献

[1] 张琳, 王金玉, 王鑫, 王伟, 曲立. 重大自然灾害下多灾害点应急物资智能调度优化[J]. 清华大学学报(自然科

- 学版), 2023, 63(5): 765-774.
- [2] Zhang, H., Tao, N.R. and Yang, N. (2022) Emergencies Materials Dispatching of Offshore Oil Spill with Time-Varying Properties. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, **22**, 269-280.
- [3] Shao, J., Liang, C., Liu, Y., et al. (2021) Relief Demand Forecasting Based on Intuitionistic Fuzzy Case-Based Reasoning. *Socio-Economic Planning Sciences*, **74**, Article ID: 100932. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100932>
- [4] 邓林, 陈玉斌, 刘湘慧, 陈赟. 基于 RBF 神经网络的地铁隧道施工坍塌事故应急车辆需求预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 7(7): 162-171.
- [5] 王英辉, 王肖红, 张庆红. 重大公共卫生事件下应急物资动态需求预测分析[J]. 情报杂志, 2022, 41(6): 135-141.
- [6] 张文芬, 杨家其. 基于小波神经网络的海上突发事件应急资源动态需求预测[J]. 运筹与管理, 2015, 24(4): 198-205.
- [7] 邓焯, 朱万红, 王凤山, 刘华丽. 应急物流车辆调度多目标鲁棒优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(1): 248-255.
- [8] 高鑫宇, 倪静. 带模糊需求的多阶段双目标应急选址——路径优化[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 391-397.
- [9] Majumder, S. and Pratihar, D.K. (2018) Multi-Sensors Data Fusion through Fuzzy Clustering and Predictive Tools. *Expert Systems with Applications*, **107**, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.026>
- [10] Che, X., Mi, J. and Chen, D. (2018) Information Fusion and Numerical Characterization of a Multi-Source Information System. *Knowledge-Based Systems*, **145**, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.01.008>
- [11] Padilla, W.R., García, J. and Molina, J.M. (2021) Improving Time Series Forecasting Using Information Fusion in Local Agricultural Markets. *Neurocomputing*, **452**, 355-373. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.11.125>
- [12] 严闯, 陈瑜, 刘可伋, 罗心悦, 许伯熹, 江渝程晋. 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(3): 385-392.
- [13] Yang, Z., Zeng, Z., Wang, K., et al. (2020) Modified SEIR and AI Prediction of the Epidemics Trend of COVID-19 in China under Public Health Interventions. *Journal of Thoracic Disease*, **12**, 165-174. <https://doi.org/10.21037/jtd.2020.02.64>
- [14] 蒋艳, 孙学婷, 赵瑞, 龚建行, 彭志行, 杜牧龙. 基于某空港入境传染病时间序列的预测预警系统[J]. 中国卫生统计, 2020, 37(6): 5-24.
- [15] Hawas, M. (2020) Generated Time-Series Prediction Data of COVID-19's Daily Infections in Brazil by Using Recurrent Neural Networks. *Data in Brief*, **32**, Article ID: 106175. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106175>
- [16] Liu, M., Zhang, L. and Zhang, Z. (2015) Optimal Scheduling of Logistical Support for Medical Resources Order and Shipment in Community Health Service Centers. *Journal of Industrial Engineering and Management*, **8**, 1362-1379. <https://doi.org/10.3926/jiem.1463>
- [17] 葛洪磊, 刘南. 重大传染病疫情演化情境下应急物资配置决策建模分析: 以新冠肺炎疫情为例[J]. 系统工程学报, 2020, 34(3): 214-222.
- [18] Paul, S., Mahata, A., Ghosh, U., et al. (2021) Study of SEIR Epidemic Model and Scenario Analysis of COVID-19 Pandemic. *Ecological Genetics and Genomics*, **19**, Article ID: 100087. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2021.100087>
- [19] 范如国, 王奕博, 罗明, 张应青, 朱超平. 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(3): 369-374.
- [20] Tang, B., Wang, X., Li, Q., et al. (2020) Estimation of the Transmission Risk of the 2019-nCoV and Its Implication for Public Health Interventions. *Journal of Clinical*, **9**, 1-13. <https://doi.org/10.3390/jcm9020462>
- [21] 宋英华, 苏贝贝, 霍非舟, 宁晶婧, 方丹辉. 考虑动态需求的应急物资配送中心快速选址研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 172-177.
- [22] 王英辉, 王肖红, 张庆红. 重大公共卫生事件下应急物资动态需求预测分析[J]. 情报杂志, 2022, 41(6): 135-141.
- [23] 蔡洁, 贾浩源, 王珂. 基于 SEIR 模型对武汉市新型冠状病毒肺炎疫情发展趋势预测[J]. 山东医药, 2020, 60(6): 1-4.