

## ·新冠肺炎疫情防控专题·

**编者按:**新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情自2019年年底发生以来,迅速蔓延,成为新中国成立以来防控难度最大的重大突发公共卫生事件,给人民生命健康与社会经济发展造成重大威胁。传染病动力学模型研究可以为疫情发展趋势预测、防控决策制定、干预措施实施与效果评估等提供重要方法手段和理论支撑。本期我刊特邀军事科学院系统工程研究院卫勤保障技术研究所段德光副研究员担任栏目主编,组织相关人员围绕基于WPF方法的SEIR传染病动力学模型仿真研究、传染病动力学模型及其在新型冠状病毒肺炎疫情仿真预测中的应用综述等主题进行系统探讨与针对性研究,敬请关注。

本期特邀栏目主编:段德光

**栏目主编简介:**段德光(1976—),男,硕士,副研究员,硕士研究生导师,军事科学院系统工程研究院卫勤保障技术研究所卫勤保障体系论证与评估研究室主任,中国医学救援学会装备分会常务理事,中国医学装备协会应急救治装备分会常委,中国生物医学工程学会特种医学工程与卫勤装备研究分会委员。长期致力于卫勤保障体系论证与评估研究、机动医疗卫生装备与应急医学救援装备技术研究。近年来先后承担国家或全军重大重点项目10余项,承担多项全军卫勤保障体系与中长期发展规划论证任务,主持全军后勤重大型号装备研制项目5项,有6型装备通过后勤军工产品设计定型,主编或参编并获颁布实施的国家军用标准5项,在国家核心期刊及以上刊物发表学术论文20余篇,出版军内外专著和部队训练教材10余部。获天津市科技进步一等奖1项、军队科技进步二等奖1项,获批国家发明专利6项、实用新型专利37项。



## 一种基于WPF方法的SEIR传染病动力学模型仿真研究

陈恩,段德光\*,李昊,陶学强,高树田

(军事科学院系统工程研究院卫勤保障技术研究所,天津300161)

**[摘要]** 目的:通过对传染病动力学模型的仿真研究,提升应对传染病疫情处理能力。方法:以SEIR(susceptible-exposed-infected-removed)模型为基础,结合WPF(Windows Presentation Foundation)编程,建立一种具有潜伏期的传染病传播过程的数字化、图形化的仿真模型。以新型冠状病毒肺炎在湖北省的传播过程为例,计算确诊人数、治愈人数、死亡人数的仿真结果与真实数据的误差。结果:仿真模型预测短期数据误差率在3%以内,并能根据现有参数信息仿真未来长期走势;预测结果表明疫情征兆期、暴发期、高峰期确诊人数主要受到潜伏期人群数量影响,衰退期的周期主要受治愈人群康复率影响。结论:基于WPF的SEIR仿真模型可以为突发公共卫生事件防护工作中疫情分析、疫情研判、应急预案提供辅助决策支持。

**[关键词]** 新型冠状病毒肺炎;病毒传染病动力学;WPF;SEIR;模型仿真;预测

**[中国图书资料分类号]** R318;TP319;R181.2\*5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8868(2020)03-0001-07

**DOI:** 10.19745/j.1003-8868.2020051

### Study on SEIR infectious disease dynamics model simulation based on WPF

CHEN En, DUAN De-guang\*, LI Hao, TAO Xue-qiang, GAO Shu-tian

(Institute of Medical Support Technology, Academy of System Engineering of Academy of Military Science of Chinese PLA, Tianjin 300161, China)

**Abstract Objective** To enhance the response ability for infectious disease epidemics by infectious disease dynamics simulation. **Methods** A digital graphical model simulating the spread of the infectious diseases with an incubation period was developed with susceptible-exposed-infected-removed (SEIR) model and Windows Presentation Foundation (WPF) programming. With the spread of COVID-19 in Hubei Province as an example, the errors were calculated between the numbers of confirmed cases, healed cases and death cases by simulation and actual statistics. **Results** The simulation model developed had the error lower than 3% when used to predict the cases in short term, and could simulate the future long-term trend based on the obtained data; it's pointed out the numbers of confirmed cases at symptom period, outbreak period and peak period were affected by those of latent cases, and the length of the decline period was related to the cure rate of the healed cases. **Conclusion** The simulation model developed facilitates epidemic analysis, situation determination and emergency plan preparation during the responses to public medical emergencies. [Chinese Medical Equipment Journal, 2020, 41(3): 1-6, 12]

**Key words** COVID-19; infectious disease dynamics; WPF; SEIR; model simulation; forecast

## 0 引言

近年来,突发传染病的疫情防控受到国内外高度重视,烈性传染病在防控过程中如果采取措施不当很容易造成大规模的暴发<sup>[1-3]</sup>。随着全球化的发展,原来仅限于某一地区的疾病可能迅速传播和蔓延,引起社会恐慌、经济衰退等问题。突发性传染病的防治研究已成为全球公共卫生工作的重点和热点<sup>[4]</sup>。

传染病动力学是用数学方法描述传染病的传播过程,实现对感染人群数量及趋势的预测,从而指导相关部门采取相应的措施来控制传染病的传播。传染病动力学模型可以分为2类:决定论模型和网络动力学模型。目前决定论模型以微分方程为主,代表性模型有SIR(susceptible-infected-recovered)、SIS(susceptible-infected-susceptible)、SEIR(susceptible-exposed-infected-removed)等<sup>[5-7]</sup>。SEIR模型在SIR模型的基础上增加了潜伏期环节E,是一种更适用于有潜伏期传染病的数学模型。针对传染病SEIR模型的仿真,曾有很多专家进行深入研究<sup>[2]</sup>,但大部分研究重点是趋势性仿真,将实现短期数据预测作为研究重点的还比较少。

为此,本文以SEIR模型为基础,结合WPF(Windows Presentation Foundation)编程,以新型冠状病毒肺炎(以下简称“新冠肺炎”)在湖北省传播过程为例,开展传染病动力学模型的数字化、图形化的仿真研究。SEIR仿真模型可以根据已有疫情数据进行迭代修正参数,实现仿真预测短期数据和长期走势,提升应对传染病疫情的处理能力。

## 1 基于SEIR的传染病动力学模型建立

### 1.1 模型假设

根据新冠肺炎在湖北省实际传播情况,结合Kink的传染病“四阶段说”,将传染病疫情大致分为征兆期、暴发期、高峰期、衰退期4个阶段<sup>[8]</sup>。SEIR仿真模型针对湖北省新冠肺炎疫情4个不同阶段进行独立分析,在各个阶段建立有效的控制参数,根据疫情发展进程,采取切实可行的防控措施。为了建立科学可信的传播扩散模型,作出如下假设:

- (1)忽略传染病发病期的城市人口自然出生率和自然死亡率,且传染病的持续周期不会很长;
- (2)自我隔离可以有效减少传染病传播概率;
- (3)不考虑人口大量流动,假设在人口封闭的环境下传播。

### 1.2 符号定义

本文中使用的符号定义如下: $a_1$ 为1名潜伏期人员与1名易感人员接触感染的概率; $a_2$ 为1名确诊人员与1名易感人员接触感染的概率; $b$ 为潜伏期人员单位时间内恢复为易感人群的概率; $c$ 为潜伏期人群单位时间内确诊的概率; $d$ 为确诊人群单位时间内康复的概率; $f$ 为确诊人群单位时间内死亡的概率; $f_1$ 为1名潜伏期人员单位时间内接触人数; $f_2$ 为1名确诊人员单位时间内接触人数; $N$ 为总人数,包括易感人群、潜伏期人群、确诊人群、康复人群和死亡人群。

### 1.3 模型建立

社会人群可以分为以下5类:

- (1)S类:称为易感人群,该类成员没有染上传染病,但缺乏免疫能力,可以被染上传染病;
- (2)E类:称为潜伏期人群,该类成员已经染上传染病,而且可以传染给S类成员;
- (3)I类:称为确诊人群,该类成员已经染上传染病,而且可以传染给S类成员;
- (4)R类:称为康复人群,失去传染能力;
- (5)D类:称为死亡人群。

$S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 、 $D(t)$ 分别表示 $t$ 时刻上述5类人群数量。

变量 $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 、 $D(t)$ 视为连续变量,并可进一步连续可微。假设人群中 $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 、 $D(t)$ 成员均匀分布,传播方式为接触和飞沫传播。单位时间内1名确诊者与他人的接触感染的概率为 $a_2$ ,接触人数为 $f_2$ ,则1名确诊者在单位时间内与S类成员接触传播人数为 $f_2 \times a_2 \times S(t) / N$ ,同理,1名潜伏期人员在单位时间内与S类成员接触传播人数为 $f_1 \times a_1 \times S(t) / N$ 。人群转换关系如图1所示。

通过以上分析可以得出SEIR的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{f_1 \times a_1 \times S \times I}{N} - \frac{f_2 \times a_2 \times S \times E}{N} + b \times E \\ \frac{dE}{dt} = f_1 \times a_1 \times S \times \frac{I}{N} + f_2 \times a_2 \times S \times \frac{E}{N} - b \times E \\ \frac{dI}{dt} = c \times E - d \times I - f \times I \\ \frac{dR}{dt} = d \times I \\ \frac{dD}{dt} = f \times I \end{cases}$$

该模型中参数 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $f_1$ 、 $f_2$ 和 $d$ 在疫情发展的各个阶段受实际因素影响会有比较明显的变化,现分析如下:

基金项目:军内科研重点项目(JK20182A020170)

作者简介:陈恩(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事卫生装备系统论证与模拟仿真方面的研究工作。

通信作者:段德光, E-mail: duandeguangle@sina.com

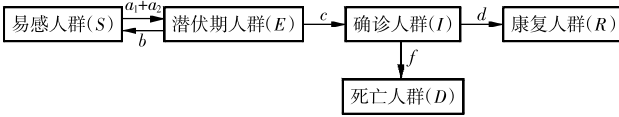


图1 SEIR模型框图

(1)参数  $a_1, a_2$  表示单位时间内1名传染者与他人的接触感染概率。该参数与全社会的警觉程度和政府、公众采取的各种措施有关,例如:佩戴口罩、减少停留在公共场所的时间、喷洒消毒药剂、提高隔离强度等都能有效地降低接触感染概率<sup>[9-10]</sup>。

(2)参数  $f_1, f_2$  为传播人员单位时间内接触人数。传播者前期可能不知道自身的传播性,没有警觉和采取措施,单位时间内接触人数较多;在疫情发展中后期,对传播者采取隔离治疗等措施后,单位时间内接触人数降低。

(3)参数  $d$  为确诊人群单位时间内康复的概率,疫情传播初期没有特效药与针对性的治疗方法,康复率比较低;随着疫情阶段的发展,相关药物研制推出,康复概率大幅上升<sup>[11]</sup>。

## 2 基于WPF方法的仿真实现

### 2.1 疫情数据存储与可视化

#### 2.1.1 数据存储

本模型使用MySQL 8.0.14 数据库完成存储工作。MySQL 数据库存储了全国各省市疫情数据,存储表字段见表1。

读取数据库相关数据的代码如下:

```

public void ConnectMySQL() // 数据库连接, 读取信息函数
{

```

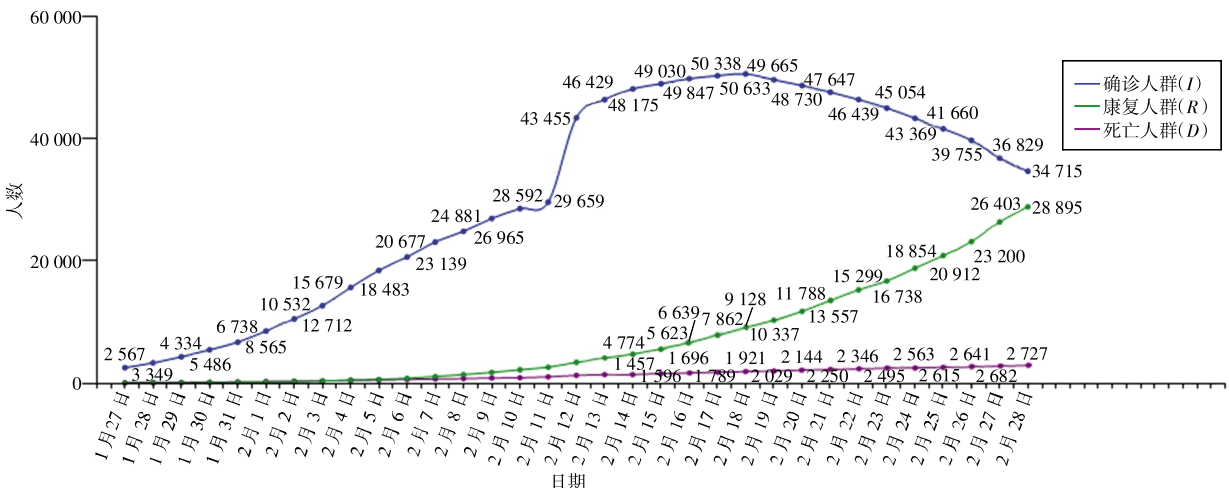


图2 湖北省新冠肺炎感染人数

从图2中可以得出,2月18日现存确诊人数为50 633人,达到峰值,在此之后现存确诊人数开始下降,由于潜伏期人群的存在,可以估算2月16日  $f_1$ 、

$f_2$  达到最低值0,由此确定2月16日以后为衰退期。根据疫情暴发规律的4个时期,可以把1月27日之前定为征兆期,1月28日到2月6日定为暴发期,2

```

using ( msc = new MySqlConnection(constring))
{
    //写入 sql 语句
    stringsql = "select * from person";
    //创建命令对象
    MySqlCommand cmd = new MySqlCommand(sql, msc);
    msc.Open();
    MySqlDataReader reader = cmd.ExecuteReader();
}
}
}
}
}

```

表1 新型冠状病毒感染数据表字段

字段名	类型	关键字	含义
ID	INT	是	编号
DateDay	Date	否	时间
CumulativeNum	INT	否	累计确诊人数
SuspectedNum	INT	否	疑似病例
deathNum	INT	否	死亡人数
CureNum	INT	否	治愈人数
CurrentNum	INT	否	现有确诊人数

#### 2.1.2 数据可视化

根据2020年1月27日至2月28日国家卫生健康委员会公布的湖北省新冠肺炎感染人数,由WPF中 chart 图表控件分别展示现有感染人数、治愈人数、死亡人数、日死亡率和日治愈率趋势曲线图(如图2~4所示)。

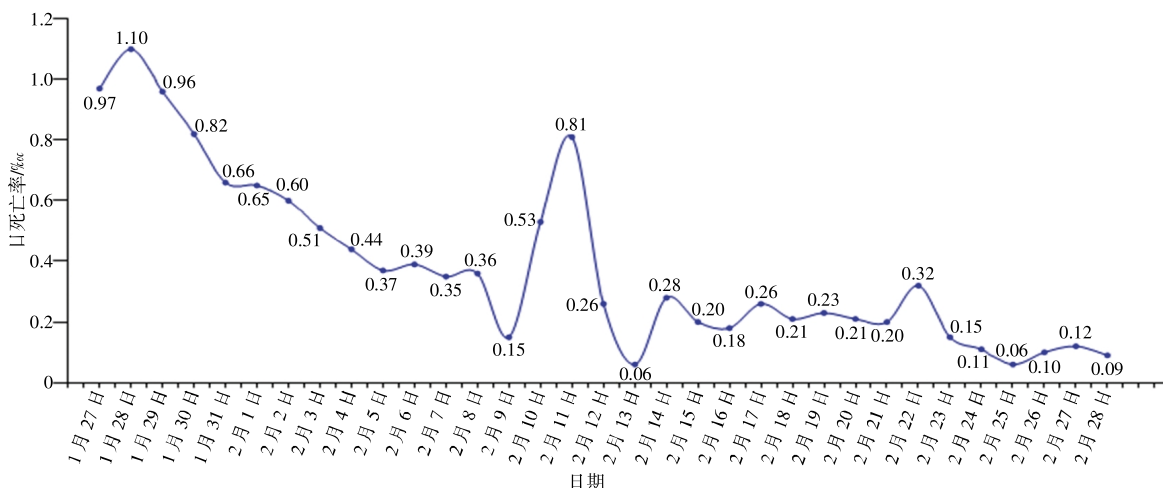


图3 湖北省新冠肺炎日死亡率

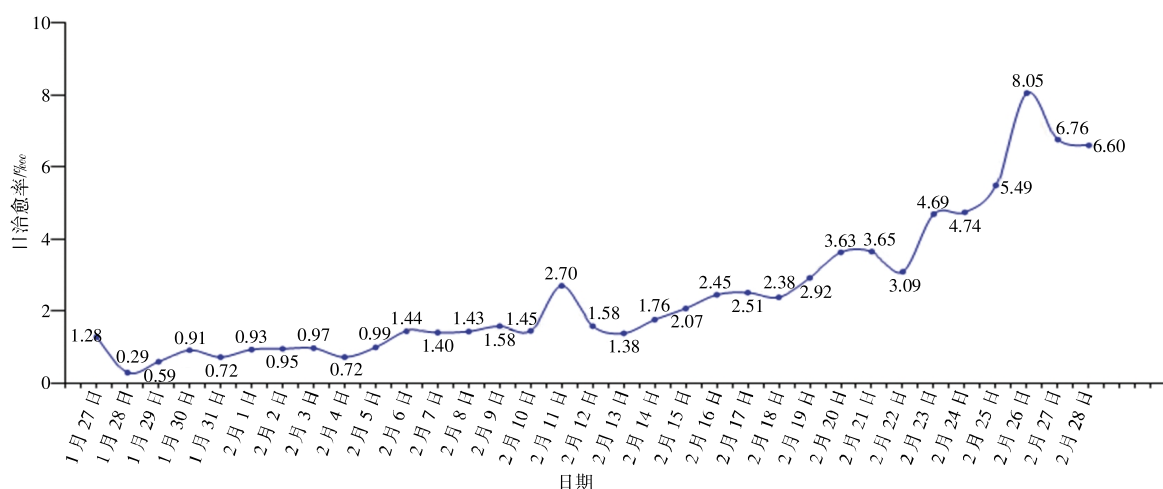


图4 湖北省新冠肺炎日治愈率

月7日到2月15日定为高峰期。

根据划分的4个阶段,可以分阶段拟合计算日死亡率( $f_n$ )和日治愈率( $d_n$ ),计算公式: $f_n=(D_n-D_{n-1})/I_n$ , $d_n=(R_n-R_{n-1})/I_n$ 。由图3、4可以看出,随着疫情发展日死亡率不断降低,日治愈率不断上升。

## 2.2 仿真模型算法实现

由SEIR微分方程可以推导出如下关系:

$$S_n = S_{n-1} - f_1 \times a_1 \times S_{n-1} \times \frac{E_n}{N} - f_2 \times a_2 \times S_{n-1} \times \frac{I_n}{N} + b \times E_{n-1}$$

$$E_n = E_{n-1} + f_1 \times a_1 \times S_{n-1} \times \frac{E_n}{N} + f_2 \times a_2 \times \frac{S_{n-1} \times I_n}{N} - c \times E_{n-1}$$

$$I_n = I_{n-1} + c \times E_{n-1} - d \times I_{n-1} - f \times I_{n-1}$$

$$R_n = R_{n-1} + d \times I_{n-1}$$

$$D_n = D_{n-1} + f \times I_{n-1}$$

SEIR微分方程是由WPF编程实现的,程序中 $S$ 、 $E$ 、 $I$ 、 $R$ 、 $D$ 的数值与前一天的数值是递推关系,可以通过多次调用private void Button\_Click(object sender, RoutedEventArgs e)函数来实现计算,每次计算

结果都通过图表chartAttMed1显示出来。WPF编程实现如下:

```
private void Button_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    tmp = S - SN;
    SN = (int)(S - (f2 * a2 * S * I) / N - (f1 * a1 * S * E) / N + b * E);
    EN = (int)Math.Round(E + tmp - (c * E));
    IN = (int)Math.Round(I + c * E - d * I - f * I);
    RN = (int)Math.Round(R + d * I);
    DN = (int)Math.Round(D + f * I);
    chartAttMed1.Series[0].Points.AddY(RN);
    chartAttMed1.Series[1].Points.AddY(IN);
    chartAttMed1.Series[2].Points.AddY(DN);
    savenum++;
    S = SN;
    E = EN;
}
```



$$\begin{aligned} I &= IN; \\ R &= RN; \\ D &= DN; \end{aligned}$$

}

### 2.3 仿真参数分析

(1) 征兆期。第一阶段是征兆期,主要发生在传染病初期,感染者临床症状表现不明显,在这个阶段病毒已经传播开了,但是并不能引起公众和政府的注意。由于携带病毒的传染源没有得到控制,所以这个时候感染率比较高,传播周期较长,但整个社会的发病率还比较低。潜伏期人群有 2~14 d 的潜伏期,取平均值在 8 d 后才会显现出来, $c=1/8$ 。征兆期死亡人数和治愈人数较少,因此忽略死亡人数和治愈人数,模型简化为

$$E_n = E_{n-1} + f_1 \times a_1 \times S_{n-1} \times \frac{E_n}{N} + f_2 \times a_2 \times \frac{S_{n-1} \times I_n}{N} - c \times E_{n-1}$$

$$I_n = I_{n-1} + c \times E_{n-1}$$

1月27日湖北省新增新冠肺炎病例1291例,由此得出: $E(0) = \frac{1291}{c} \approx 11000$ 。

根据钟南山院士对疫情预测数据,取  $a_1=0.05249$ ,  $a_2=0.05249$  (95%置信区间 0.05068~0.05429)<sup>[12]</sup>。

(2) 暴发期。随着感染者不断增加,公众恐慌情绪增加,政府虽然采取多种防控措施,但对病毒传播的特点不清楚,没有收到预期效果,疫情进入暴发期。在这个时期,传播源的平均传播期依然较长,整个社会的潜伏期人员和确诊人员不断增加。暴发期内的潜伏期人员传播率( $f_1 \times a_1$ )和确诊人员传播率( $f_2 \times a_2$ )还维持一个高水平,确诊人员得到一些医疗救治,死亡率  $f_n$  平稳线性降低,治愈率  $d_n$  平稳线性上升; $b$  为潜伏期人群自我恢复的概率,为固定值。

第  $n$  天参数值为

$$f_n = (D_n - D_{n-1}) / I_n$$

$$d_n = (R_n - R_{n-1}) / I_n$$

$$f_2 \times a_2 \times I_n + f_1 \times a_1 \times E_n = E_{n+1} - E_n$$

$$E_n = (I_n - I_{n-1}) \times c$$

根据实际疫情数据可以大致估算出各参数值为: $f_n=(1.1393-0.0784 \times n)/100$ ,  $d_n=(0.7473+0.0159 \times n)/100$ ,  $c=1/8$ ,  $b=0.057$ ,  $N=50000000$ ,  $a_1=0.05249$ ,  $a_2=0.05249$ ,  $f_1=4$ ,  $f_2=2$ 。

(3) 高峰期。当高强度的措施实施后,病毒扩散速度已经减慢,发病人数保持稳定,处在一个高平台防疫阶段。在这个时期,由于采取了有效隔离措施,降低了接触感染的概率,但由于病患基数较大,社会发病率依然很高。高峰期由于没有有效的治疗措施,

所以死亡率  $f$  维持在一个高水平,但轻度患者能及时恢复,治愈率  $d$  因此有所提升。

同理取  $f_n=(0.6293-0.0187 \times n)/100$ ,  $d_n=(0.8157+0.0557 \times n)/100$ ,  $b=0.03$ ,  $N=50000000$ ,  $a_1=0.05249$ ,  $a_2=0.05249$ 。

2月12日湖北省的病例诊断分类中增加了“临床诊断”,以便患者能及早接受规范治疗,对新就诊患者按照新的诊断分类进行诊断,进一步提高了救治成功率。因此2月12日  $c$  值明显提高,大幅减少了潜伏期人群数量,这里假设  $c=0.35$ ; 2月12日以后假设所有的确诊人员都被收治,不再具有传染性,取  $f_2=0$ 。

2月7日到2月11日各参数值为: $f_1=3$ ,  $f_2=1$ ,  $c=1/8$ 。

2月12日各参数值为: $f_1=3$ ,  $f_2=0$ ,  $c=0.35$ 。

2月13日到2月15日各参数值为: $f_1=3$ ,  $f_2=0$ ,  $c=1/8$ 。

(4) 衰退期。在高平台现象持续一段时间以后,控制措施的作用开始显现,患病人数开始下降,进入衰退期。在这个时期,平均感染率最低,确诊人数增长出现拐点。衰退期各参数值为: $f_n=(0.5322-0.0113 \times n)/100$ ,  $d_n=(-7.835+0.4537 \times n)/100$ ,  $c=1/8$ ,  $b=0.057$ ,  $N=50000000$ ,  $a_1=0.05249$ ,  $a_2=0.05249$ ,  $f_1=0$ ,  $f_2=0$ 。

### 3 仿真结果

将4个阶段的参数输入仿真模型得到的仿真结果如图5所示。由图5可以看出,此仿真模型是参照现有疫情数据将疫情划分为不同阶段,分别建模计算参数。4个阶段主要根据潜伏期人群增长率拐点划分,可以看出防护措施对潜伏期人群作用明显,但滞后作用于确诊人群。征兆期内潜伏期人群数量较少,增长率较高;随着防控的加强,潜伏期人群增长率降低,但是由于基数较大,潜伏期人群数量明显增加,进入暴发期;高峰期潜伏期人群增长率接近为0,数量维持在高位;衰退期潜伏期人群呈现负增长,数量急剧下降。由于潜伏期人群潜伏期为2~14d,确诊人群数量变化滞后于潜伏期人群,影响潜伏期人群增长率的主要参数为  $f_1$ ,  $f_2$ ; 疫情进入衰退期后  $f_1=0$ ,  $f_2=0$ , 确诊人数  $I$  主要受康复的概率  $d$  影响,提高康复率有助于缩短疫情周期。

根据仿真模型相关参数,可以推算出2月29日到3月4日现有确诊人数、死亡人数、治愈人数的数量,如图6所示。从总体上看确诊人数依次递减,累计死亡和累计治愈人数依次递增,符合目前疫情真实趋势。仿真数据与真实数据对比情况见表2~4。

仿真模型通过存入数据库的疫情数据信息计算

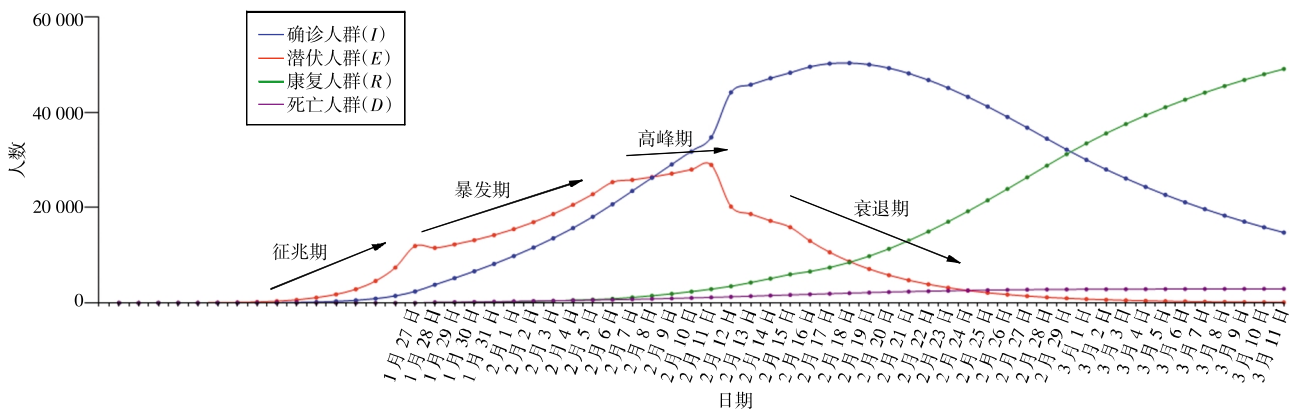


图5 湖北省新冠肺炎感染仿真图

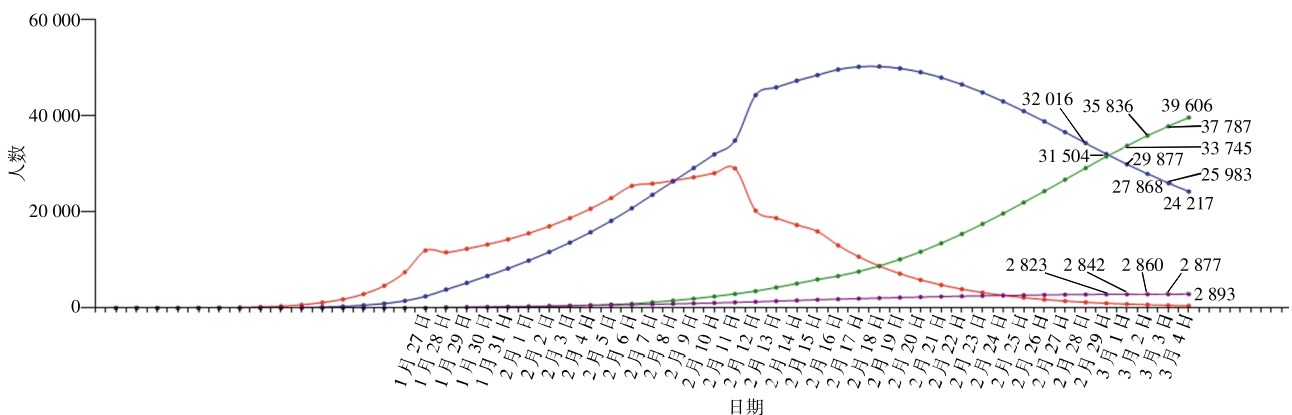


图6 湖北省新冠肺炎感染人数预测

出最新的参数信息,再由WPF编程实现迭代计算,通过WPF中chart控件呈现出预测的短期数据和长期走势图。从表2~4中可以看出,现有确诊人数误差率在3%以内,平均误差为-1.04%;治愈人数误差率在3%以内,平均误差为-0.8%;死亡人数误差率在3%以内,平均误差为0.88%。综上,本仿真模型对未来5d的预测数据与真实数据吻合度较高,整体误差率在3%以内。

表2 现有确诊人数仿真数据与真实数据对比

日期	现有确诊人数	仿真确诊人数	相差数量	误差率/%
2月29日	32 959	32 016	-943	-2.9
3月1日	30 543	29 877	-666	-2.2
3月2日	28 216	27 868	-348	-1.2
3月3日	25 905	25 983	78	0.3
3月4日	24 095	24 277	182	0.8

注:表中所示现有确诊人数来自于国家卫生健康委员会的疫情通报

表3 治愈人数仿真数据与真实数据对比

日期	治愈人数	仿真治愈人数	相差数量	误差率/%
2月29日	31 187	31 273	86	0.3
3月1日	33 757	33 529	-228	-0.7
3月2日	36 167	35 634	-533	1.5
3月3日	38 556	37 598	-958	-2.5
3月4日	40 479	39 429	-1 050	-2.6

注:表中所示治愈人数来自于国家卫生健康委员会的疫情通报

表4 死亡人数仿真数据与真实数据对比

日期	死亡人数	仿真死亡人数	相差数量	误差率/%
2月29日	2 761	2 823	62	2.2
3月1日	2 803	2 842	39	1.4
3月2日	2 834	2 860	26	0.9
3月3日	2 871	2 877	6	0.2
3月4日	2 902	2 893	-9	-0.3

注:表中所示死亡人数来自于国家卫生健康委员会的疫情通报

本文通过对传染病传播过程的分析,结合SEIR模型,通过WPF编程仿真实现了对传染病传播趋势的预测。SEIR模型在SIR基础上引入了潜伏期人群,并考虑到潜伏期人群的潜伏期和传染性,根据潜伏期人群数量增长率划分了4个阶段,然后分阶段编程计算参数信息,最终实现了新冠肺炎传播过程模拟仿真。通过对仿真结果定性、定量的分析,揭示了新冠肺炎传播的规律、变化趋势。初步结果表明:SEIR模型仿真短期预测确诊人数、治愈人数和死亡人数的误差率在3%以内,并能根据现有参数信息仿真出未来长期走势图;疫情暴发征兆期、暴发期、高峰期确诊人数主要受到潜伏期人群数量影响,衰退期周期主要受到治愈人群康复率影响。该仿真模型可以为突发公共卫生事件防护工作中疫情分析、疫情

4 结论

(▶▶下转第12页▶▶)

计算机工程与应用,2004(23):191-194.

[18] 关于新型冠状病毒(2019-nCoV)疫情的《国际卫生条例(2005)》突发事件委员会会议的声明[EB/OL]. [2020-01-28]. [https://www.who.int/news-room/detail/23-01-2020-statement-on-the-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-\(2019-ncov\)](https://www.who.int/news-room/detail/23-01-2020-statement-on-the-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-(2019-ncov)).

[19] LI Q, GUAN X, WU P, *et al.* Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. *N Engl J Med*, 2020. DOI: 10.1056/NEJMoa2001316.

[20] 许小可, 文成, 张光耀, 等. 新冠肺炎爆发前期武汉外流人口的地理去向分布及影响[J/OL]. 电子科技大学学报, 2020[2020-02-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.T.20200213.2002.002.html>.

[21] 胡建雄, 何冠豪, 刘涛, 等. 新型冠状病毒肺炎初期湖北省输出风险评估[J]. 中华预防医学杂志, 2020. DOI: 10.3760/cma.j.cn112150-20200219-00142.

[22] 国家卫生健康委员会疫情通报[EB/OL]. [2020-03-06]. [http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list\\_gzbd.shtml](http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml).

[23] 湖北省卫生健康委员会疫情通报[EB/OL]. [2020-03-06]. <http://wjw.hubei.gov.cn/bmdt/ztl/fkxgzbdgrfyq/xxfb/>.

[24] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于 SEIR 的新型肺炎传播模型及拐点预测分析[J/OL]. 电子科技大学学报, 2020[2020-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.T.20200221.1041.002.htm>. DOI: 10.12178/1001-0548.2020029.

[25] 耿辉, 徐安定, 王晓艳, 等. 基于 SEIR 模型分析相关干预措施在新型冠状病毒肺炎疫情中的作用[J/OL]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2020[2020-03-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/-44.1282.n.20200214.1318.002.html>.

[26] 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. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200216-00106.

[27] 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/OL]. 浙江大学学报(医学版), 2020, 49(1)[2020-02-18]. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9292.2020.02.05.

[28] TANG B, WANG X, LI Q, *et al.* Estimation of the transmission risk of 2019-nCov and its implication for public health interventions[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(2):462.

[29] 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]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(3):165-174.

[30] 喻孜, 张贵清, 刘庆珍, 等. 基于时变参数-SIR 模型的 2019-nCoV 疫情评估和预测[J/OL]. 电子科技大学学报, 2020[2020-03-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.t.20200207.1546.002.html>.

[31] 王志心, 刘治, 刘兆军. 基于机器学习的新型冠状病毒(2019-nCoV)疫情分析及预测[J/OL]. 生物医学工程研究, 2020[2020-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1413.R.20200213.0956.002.html>.

[32] 张琳. 新冠肺炎疫情传播的一般增长模型拟合与预测[J/OL]. 电子科技大学学报, 2020[2020-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.T.20200219.1816.004.html>.

(收稿:2020-03-08 修回:2020-03-12)

(◀◀上接第 6 页◀◀)

研判、应急预案提供辅助决策支持。但该仿真模型并未对  $a_1, a_2, b, f_1, f_2$  进行动态分析, 只是采用阶段性均值处理, 对于疫情传播的征兆期、暴发期以及未来趋势预测的影响有待进一步研究。

### [参考文献]

[1] 王立贵, 孔雨薇, 宋宏彬, 等. 基于疫情数据分析的传染病模拟仿真平台构建[EB/OL]. [2020-03-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=ZGQW20191202003&DbName=DKFX2019>.

[2] 石云凤, 杨洪明, 胡宇, 等. 基于 Simulink 的传染病模型仿真[J]. 科技创新与应用, 2018(6):39-41.

[3] 魏巍, 邹红文. 基于 Matlab 的传染病动力学模型仿真平台[J]. 微计算机信息, 2007, 23(12-1):198-199, 270.

[4] 蔡全才, 姜庆五, 郭强, 等. 疾病传播动力学研究中的流行模拟方法[J]. 第二军医大学学报, 2005(3):310-313.

[5] 赵国忠. 流感病毒传播的数学模型及数值模拟[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2006(2):10-11.

[6] 韩晓娜. SARS 流行病学传播动力模型研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2006.

[7] 李光熙, 陶文铨, 孙晓娟. 非典型肺炎病毒在空气中传播过程的初步数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7):764-766.

[8] 杜鸿飞, 赵千, 苏学渊, 等. SARS 传播的数学模型[EB/OL]. [2020-03-04]. [http://www.wlxt.uestc.edu.cn/wlxt/ncourse/model/web/math/front/studyarea/mht/g2003\\_1.htm](http://www.wlxt.uestc.edu.cn/wlxt/ncourse/model/web/math/front/studyarea/mht/g2003_1.htm).

[9] 唐娜. 基于现代控制理论的 SARS 疫情预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[10] 李伟. 关于 SARS 病毒传播的数学模型[J]. 毕节师范高等专科学校学报(综合版), 2004(2):47-53.

[11] 陈慧林, 董慧茹, 郑一男, 等. 考虑到隐性感染人群的潜伏期和发病期均传染的 SLICAR 模型[J]. 中国卫生统计, 2015, 32(2):264-266.

[12] YANGZ 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[EB/OL]. [2020-03-04]. <http://jtd.amegroups.com/article/view/36385/pdf>.

(收稿:2020-03-05 修回:2020-03-12)