



重庆理工大学学报(自然科学)

Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)

ISSN 1674-8425,CN 50-1205/T

## 《重庆理工大学学报(自然科学)》网络首发论文

题目: 河南省新型冠状病毒(COVID-19)疫情分析  
作者: 李慧聪, 李金仙, 荆文君, 史璐沙, 段茉然  
收稿日期: 2020-03-11  
网络首发日期: 2020-03-25  
引用格式: 李慧聪, 李金仙, 荆文君, 史璐沙, 段茉然. 河南省新型冠状病毒(COVID-19)疫情分析. 重庆理工大学学报(自然科学).  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1205.T.20200324.1515.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 河南省新型冠状病毒(COVID-19)疫情分析

李慧聪<sup>1,2</sup>, 李金仙<sup>1,3</sup>, 荆文君<sup>1,2</sup>, 史璐沙<sup>1,2</sup>, 段茉然<sup>1,2</sup>

(1.山西大学 复杂系统研究所, 太原 030006;

2. 疾病防控的数学技术与大数据分析山西省重点实验室, 太原 030006;

3.山西大学 数学科学学院, 太原 030006)

**摘要:** 新型冠状病毒(COVID-19)的传播给人们的身心健康带来了极大危害, 针对本次疫情, 主要收集了河南省 COVID-19 早期疫情的 100 多例病例情况, 进行了疫情特征分析。根据疫情特征及不同时刻单位接触人数的变化, 建立了非自治 SIAR 模型。利用 Matlab 进行数据拟合, 分析了疾病流行时间、最终规模、疫情高峰时间等流行病学特征, 实现了对河南省疫情趋势评估。随后, 对政府管控力度等因素进行了参数敏感性分析, 结果表明, 政府限制出行等措施(减少接触数)可以有效控制疫情规模。

**关键词:** COVID-19; 数据拟合; 疫情预测; 流行时间; 最终规模; 敏感性分析

**中图分类号:** O175      **文献标识码:** A

## Epidemic analysis of novel coronavirus (COVID - 19) in henan province

LI Huicong<sup>1,2</sup>, LI Jinxian<sup>1,3</sup>, JING Wenjun<sup>1,2</sup>, SHI Lusha<sup>1,2</sup>, DUAN Moran<sup>1,2</sup>

(1. Complex Systems Research Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

2 Shanxi Key Laboratory of Mathematical Techniques and Big Data Analysis on Disease Control and Prevention, Taiyuan 030006, China;

3 School of mathematical sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Spreading of 2019 novel coronavirus (COVID-19) has greatly harmed people's physical and mental health since December 2019. In response to this epidemic, we collected more than 100 cases occurred at the early stage of COVID-19 outbreak in Henan Province and further analyzed their epidemic features. Then we set up a non-autonomous SIAR model considering both those characteristics and changes of the contacts number per unit time. Subsequently, we used Matlab software to perform data fitting, analyzed epidemiological characteristics such as disease epidemic time, final size, and epidemic peak time, and eventually realized the assessment of epidemic trends in Henan Province. Finally, we conducted parameter sensitivity analysis on influential factors such as government regulation and control policy, and the results showed that measures aiming at reducing human

**收稿日期:** 2020-03-11.

**基金项目:** 社团结构对复杂网络上传染病传播动力学的影响 (11571210)

**作者简介:** 李慧聪, 男, 硕士研究生, 主要从事生物数学研究, E-mail: 2362759835@qq.com; 通讯作者 李金仙, 女, 博士, 教授, 主要从事复杂网络下传染病的建模与分析研究, E-mail: lijinxian@sxu.edu.cn.

contacts such as government restrictions on travel can effectively decrease the COVID-19 epidemic size.

**Key words:** COVID-19; Data fitting; The outbreak forecast; Epidemic time; The final size; sensitivity analysis

## 1 研究背景

冠状病毒是自然界广泛存在的一类病毒，目前为止发现，冠状病毒仅感染脊椎动物，可引起人和动物呼吸道、消化道和神经系统疾病。之前已知感染人的冠状病毒有 6 种，其中 4 种在人群中较为常见，致病性较低，一般仅引起类似普通感冒的轻微呼吸道症状；另外 2 种是我们熟知的 SARS 冠状病毒和 MERS 冠状病毒<sup>[1]</sup>。在 2019 年 12 月，湖北武汉出现了一系列原因不明的肺炎病例，临床表现与病毒性肺炎非常相似<sup>[2]</sup>。通过对病毒进行测序分析发现其为一种新型冠状病毒，被命名为 2019 年新型冠状病毒（COVID-19）<sup>[3]</sup>。病毒自从武汉发现并迅速传播至全国各地。据报道，泰国、日本、韩国以及美国等地区也已发现新冠病例。截至 2020 年 2 月 4 日，全国累计确诊病例已达到 2 万多例（包括医护人员在内）<sup>[4]</sup>。

自从疫情爆发以来，全国各地区/省份纷纷启动重大突发公共卫生事件一级响应，出台了一系列政策规定来应对这次的新冠病毒的爆发，例如武汉“封城”、出入境检测等等策略。由于国家的正确应对，疾病并没有大规模爆发。湖北省因医疗资源缺乏，未能对暴露病例和疑似病例及时检疫，致其成为新型冠状病毒疫情重灾区，且大量文献对该地区疫情进行了评估分析<sup>[5-9]</sup>；相比之下，湖北以外的其他地区拥有充足的医疗资源，据调查显示大多数均为湖北输入性病例，因而传染性较小，但仍然是不可小觑的<sup>[10-13]</sup>。因此，本文我们主要针对医疗资源丰富的湖北以外地区（例如河南省）进行疫情分析。

本文收集了河南省 COVID-19 前期疫情所报道的 100 多例病例情况，通过数据统计分析<sup>[14-15]</sup>，建立了 SIAR 模型，利用 Matlab 对河南省的累计病例数进行数据拟合，实现对河南省的疾病趋势预测，最后我们利用模型预测疾病流行时间、最终规模、疫情拐点等。这些结果一方面表明了疫情爆发的严重性，另一方面有利于评估控制措施的有效性，并对新冠肺炎防控具有指导意义。需要注意的是，由于国家的有效管控策略，疾病没有在全国大范围的爆发开来，因而本模型对除湖北省以外的其他省市也适用。

## 2 数据来源及分析

### 2.1 数据来源

本文中，由于随着疫情的发展及确诊病例数的增加，后期的确诊病例的详细数据难以获取，因此我们主要收集了疫情发生前期（1 月 21 号至 1 月 31 号）河南省 100 多例部分确诊病例的详细个人数据（年龄、性别、武汉接触史、武汉接触时间、症状及症状出现时间、就

诊时间和确诊时间等），数据均来自于河南省卫健委、河南疫情新闻（一点资讯）、政府公告等官方新闻<sup>[14]</sup>。累计确诊病例数来自国家卫生健康委员会官方网站<sup>[4]</sup>，河南省常住人口数据来自于 2019 国家统计年鉴<sup>[15]</sup>。

2.2 数据分析

通过对 88 例表现出症状的病例进行统计分析发现，其中发热为主要症状，占比约 92%；其他症状（例如咳嗽、乏力、胸闷等）虽然偶有表现，但所占比例不高（见图 1）。这说明发热可以作为判断自身是否感染疾病的一个重要参考依据。

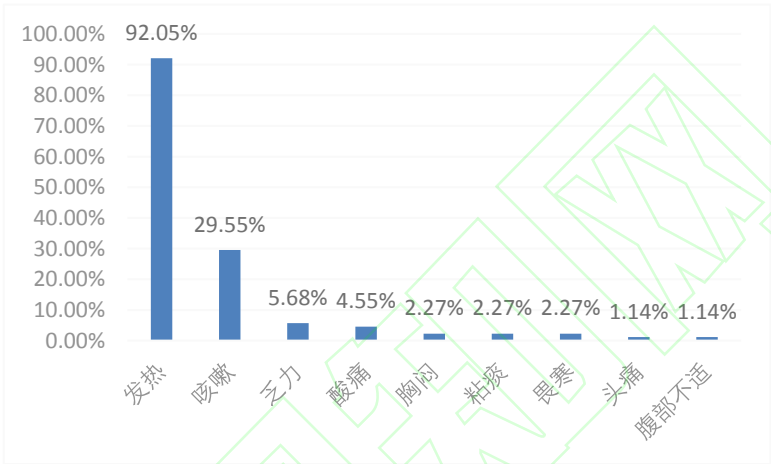


图 1 不同症状所占比例分布直方图

随后我们对 145 例确诊病例进行年龄段分析（图 2），发现新冠患者大多数为中老年人，其中 42-52 年龄段所占比例最高（25.52%）。因此我们需要加强对中老年人的关注力度。

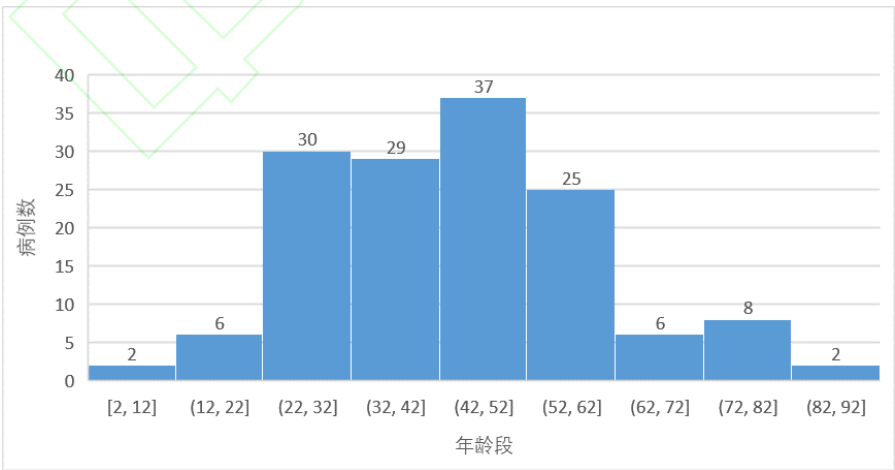


图 2 不同年龄段病例数分布直方图

对 147 例患者进行性别比例分析发现，其中男性占比 55%，女性占比 45%。这说明新冠病毒（COVID-19）不是与性别相关的传播性疾病。

另外我们对 150 例河南省新冠患者行踪调查发现,其中本人(或家人)具有武汉居住史的有 138(92%),没有武汉旅居住史有 12(8%)。这说明武汉为疫情前期的主要发生地,其他省份绝大多数为输入性病例,政府对武汉实施“封城”策略在很大程度上抑制了疫情的蔓延。另外有多例本地人有武汉就医史,说明前期医院交叉较为严重。

### 3 数学模型及基本假设

#### 3.1 基本假设

- (1) 基于河南省的疫情,本文中我们仅对短期内的疫情进行分析,故模型中假设人口总数  $N$  不变,不考虑人口的流入、流出、出生、死亡。
- (2) 假设人口是均匀混合的,因此我们考虑标准发生率。
- (3) 假设河南省的医疗资源充足,未被确诊的染病者以给定的速率进入确诊仓室。
- (4) 假设确诊者被完全隔离,不再具有传染性。
- (5) 假定确诊者恢复之后,短期内获得免疫,不会转变成易感者。

#### 3.2 数学模型

基于上述假设,我们将人群分为四个仓室,易感者  $S$ ,染病但未入院者  $I$ ,在医院就诊且被隔离患者  $A$  及恢复者  $R$ 。仓室图如下:



图 3 仓室图

然后建立了以下 SIAR 模型:

$$\begin{cases} \dot{S} = -\beta C(t) I \frac{S}{N}, \\ \dot{I} = \beta C(t) I \frac{S}{N} - \gamma I, \\ \dot{A} = \gamma I - \delta A, \\ \dot{R} = \delta A \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\beta C(t) I \frac{S}{N}$  代表单位时间内由易感者进入染病但未就诊人数,  $\gamma I$  代表单位时间内的确诊人数,  $\delta A$  代表单位时间内的恢复者人数。需要说明的是考虑到新冠肺炎在潜伏期和染病但未住院期都具有传播性,如果不区分传染能力的强弱,他们在传播过程中的作用是一样的,所以为了简化模型,我们将他们放到了同一个仓室。

对于上述模型 (1), 各参数变量及其生物学意义如下:

表 1 模型相关参数说明

变量及参数	生物学意义
$S$	易感者
$I$	未到医院的染病和潜伏者总和
$A$	在医院就诊患者，且被隔离
$R$	恢复者
$C(t)$	一个染病者在单位时间接触人数
$N$	总人口数
$\beta$	传染率
$\gamma$	确诊并住院率
$\delta$	恢复率

接下来我们给出模型中的  $C(t)$  的表达式。设  $\alpha(t)$  表示  $t$  时刻人们的反应函数为

$$C'(t) = -\alpha(t)I(t)C(t) \quad (2)$$

则可得

$$C(t) = C(t_0) \exp\left(-\int_{t_0}^t \alpha(s)I(s)ds\right) \quad (3)$$

假设短期内人们的反应比较稳定，令  $\alpha(t) \equiv \alpha$ ，则

$$C(t) = C(t_0) \exp\left(-\alpha \int_{t_0}^t I(s)ds\right) \quad (4)$$

又对于

$$(A + R)' = \gamma I \quad (5)$$

对等号两边积分

$$(A + R)\Big|_{t_0}^t = \gamma \int_{t_0}^t I(s)ds \quad (6)$$

设  $t_0 = 0$ ，然后

$$A(t) + R(t) - (A(0) + R(0)) = \gamma \int_0^t I(s)ds \quad (7)$$

记

$$\begin{aligned} C(t) &= C(t_0) \exp\left(-\alpha \frac{A(t) + R(t) - (A(0) + R(0))}{\gamma}\right) \\ &= C(t_0) \exp\left(-\alpha \frac{A(0) + R(0)}{\gamma}\right) \exp\left(-\alpha \frac{A(t) + R(t)}{\gamma}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

因

$$C(t) \approx \tilde{C}(t_0) \exp(-\tilde{\alpha}A(t) + R(t)) \quad (9)$$

为方便起见，仍记  $\tilde{C}(t_0) = C(t_0), \tilde{\alpha} = \alpha$ ，

故

$$C(t) \approx C(t_0) \exp(-\alpha(A(t) + R(t))) \tag{10}$$

4 数据拟合及模型预测

针对上述的动力学模型，结合武汉“封城”政策的实施，我们选取河南省1月23日至2月4日的累计确诊病例利用最小二乘法进行数据拟合及模型预测。

4.1 参数及初值的选取

根据国家卫健委、河南省卫健委的疫情通告<sup>[14]</sup>，河南省1月23日至2月4日的累计病例数分别为(9,32,83,128,168,206,278,352,422,493,566,675,764)。其他参数及初值的选取见下表。

表 2 模型相关参数取值及来源		
参数	数值	数据来源
N	96050000	中国统计年鉴 <sup>[15]</sup>
I(0)	*	参数拟合
R(0)	0	数据统计
S(0)	$N - I(0) - R(0)$	表达式计算
$\beta$	*	参数拟合
$\gamma$	1/9.64	数据统计 <sup>[14]</sup>
$\delta$	*	参数拟合
$\alpha$	*	参数拟合
$C(t_0)$	23	数据统计

其中 $t_0$ 取1月23日。

4.2 模型拟合结果

我们利用最小二乘法对河南省1月23日至2月4日的累计确诊病例数13个实际值进行了数据拟合，得到了河南省新冠肺炎累积确诊病例数的变化趋势图，以及染病者 $I + A$ 、染病但未确诊者 $I$ 和确诊者 $A$ 的时间序列图（见图3）。其中参数拟合结果见表3。

表 3 参数拟合结果	
参数	数值
I(0)	46
$\beta$	0.0434
$\delta$	0.36096
$\alpha$	0.0073

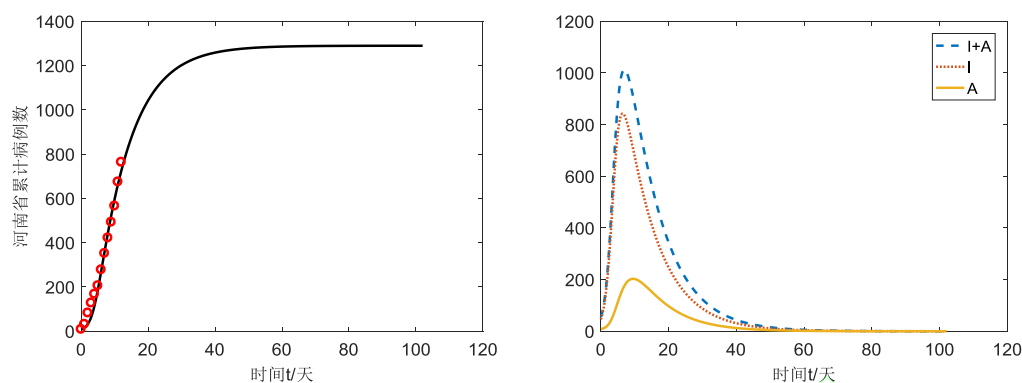


图4 河南省1月23日以来疾病流行拟合图

其中图4的左子图中红色圆圈为实际病例数，且从图中可以得出河南省疾病的流行时间为73天，也就是4月5日，最终规模为1290。右子图得到疾病高峰时间为第10天，即2月2日。

### 4.3 参数敏感性分析

#### 4.3.1 $C(t_0)$ 敏感性分析

本小节中，我们主要对政府管控强度进行敏感性分析，以评价政府管控策略的有效性。在上一节中，由数据统计结果可知 $C(t_0)$ 为23。那么，在此我们通过变化 $C(t_0)$ 的值进行具体分析。

##### (1) 削弱政府管控力度

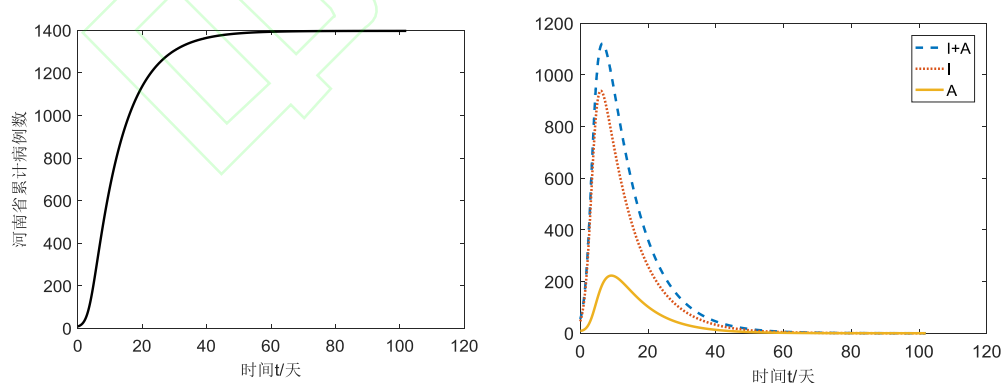


图5  $C(t_0) = 25$  时，河南省疾病流行图

从图5我们可以看到若削弱政府管控力度，将初始平均接触数 $C(t_0)$ 增大至25，则疾病最终规模为1398，比所预测实际规模增加8.37%。



## (2) 增强政府管控力度

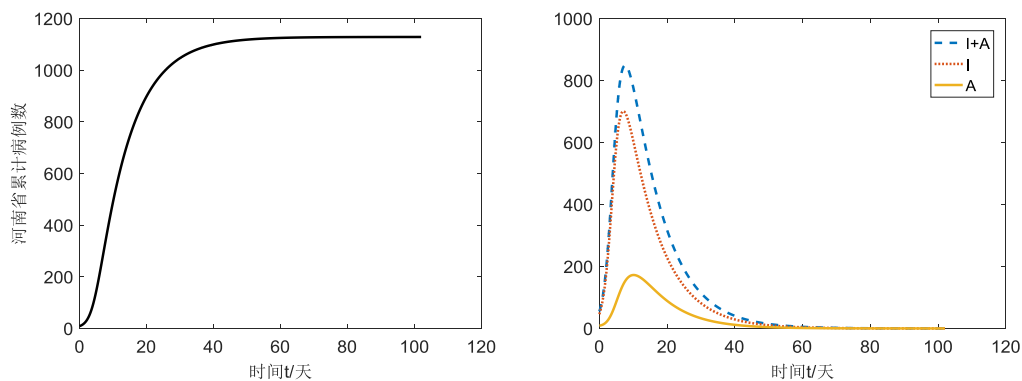


图 6  $C(t_0) = 20$  时，河南省疾病流行图

从图 6 我们可以看到，若加强政府管控力度，将初始平均接触数将  $C(t_0)$  减少至 20，则疾病最终规模为 1129，比所预测实际规模减少 12.48%。在上述两种情况下，疾病高峰时间及流行时间稍有变化，但变化不大。上述结果验证了政府限制出行以减少接触数可以有效控制疫情的蔓延。

### 4.3.2 $\delta$ 敏感性分析

同上，本小节中，我们主要对恢复率  $\delta$  进行敏感性分析。如果我们限制其他参数为其上述模型拟合的参数结果，变化  $\delta$  的值，我们得到疾病流行图如下。

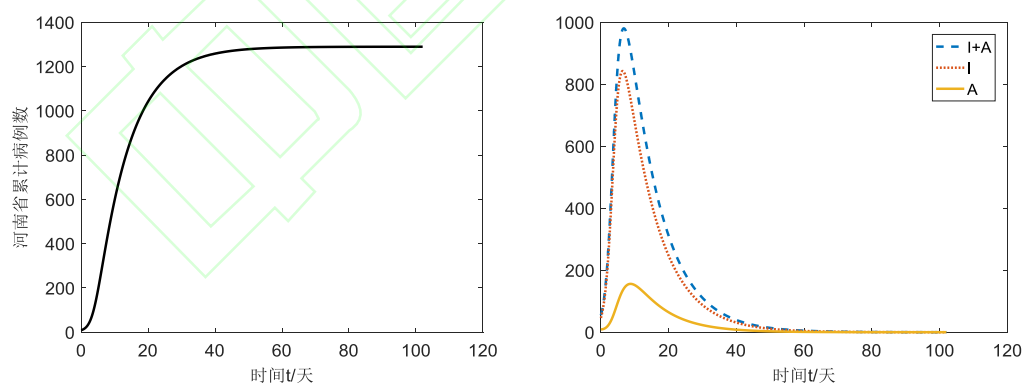


图 7  $\delta = 0.5$  时，河南省疾病流行图

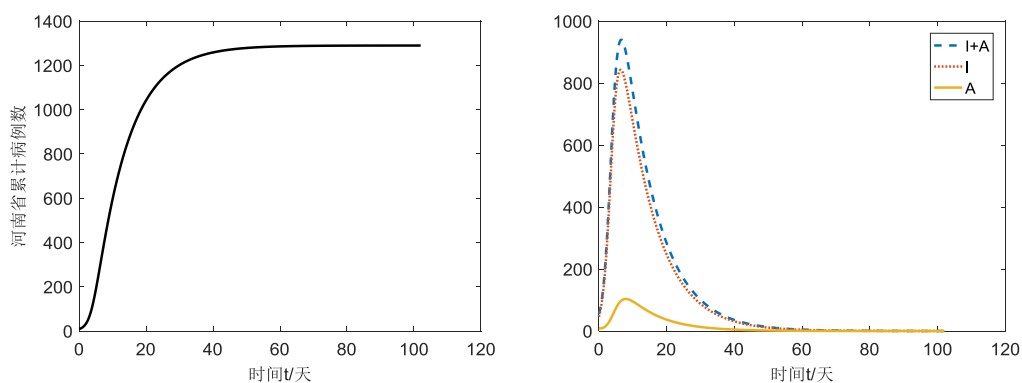


图 8  $\delta = 0.8$  时，河南省疾病流行图

从图 7 及图 8 的模拟结果我们可以看出，当增大恢复率  $\delta$  至 0.8 时，河南省疾病流行最终规模及流行时间基本保持不变，但高峰时间均有提前。说明恢复率  $\delta$  不是影响河南省疾病流行的关键因素。

## 5 结论

新型冠状病毒肺炎在中国迅速传播，为了控制疾病的传播，自 1 月 23 日起，政府相关部门迅速展开一系列政策来应对此次重大卫生事件，例如武汉“封城”、限制交通、延长假期和家庭检疫等。另外，政府还建立了一系列跟踪系统，通过跟踪每一例确诊病例，隔离密切接触者等。此次 COVID-19 在中国的传播给人们的生活带来了极其严重的后果，各行各业的人都在尽自己的努力来应对本次疫情。由于湖北武汉是本次疫情的重灾区，因此有许多的人将目光放在了武汉地区的建模分析及模型预测，而忽略了对其他地区的预测分析。由于武汉“封城”政策的实施，除湖北省以外的其他地区疫情传播动力学大致是一样的。因而本文中我们主要收集了部分河南省的病例信息，对河南省进行了疫情分析，并建立了一个非自治的 SIAR 模型，利用收集到的信息数据进行数据拟合，利用模型具体刻画了疾病流行时间、流行规模、高峰时间等流行病学特征。最后对政府管控力度等因素进行了参数敏感性分析，结果表明，政府限制出行等措施减少接触数可以有效控制疫情规模。在此基础上，我们将对模型进一步改进，以研究复工、开学等社会问题，这将为政府等决策部门提供重要的决策依据。

## 参考文献:

- [1] YIN Yudong, WUNDERINK R G. MERS, SARS and other coronaviruses as causes of pneumonia[J]. Respirology. 2018, 23: 130–37.
- [2] 武汉市卫生健康委员会[EB/OL].[2020-3-11]. <http://wjw.wuhan.gov.cn/>.

- [3] World Health Organization[EB/OL].[2020-3-11]. <https://www.who.int/zh>.
- [4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会[EB/OL].[2020-3-11].<http://www.nhc.gov.cn/>.
- [5] CHEN Tianmu, RUI Jia, WANG Qiupeng, et al. A mathematical model for simulating the transmission of Wuhan novel Coronavirus[J]. *BioRxiv*. 2020,9:24.
- [6] WU Peng, HAO Xinxin, LAU E H Y, et al. Real-time tentative assessment of the epidemiological characteristics of novel coronavirus infections in Wuhan, China, as at 22 January 2020[J]. *Eurosurveillance*. 2020, 25: 2000044.
- [7] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study[J]. *The Lancet*. 2020, 395: 689–97.
- [8] LI Qun, GUAN Xuhua, WU Peng, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. *New England Journal of Medicine*. 2020, DOI: 10.1056/NEJMoa2001316.
- [9] 杨政,原子霞,贾祖瑶.基于迁徙数据估计武汉感染新型冠状病毒的人员数量[J/OL].电子科技大学学报:1-9[2020-03-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.t.20200222.1023.002.html>.
- [10] 白尧,刘昆,陈志军,等.陕西省新型冠状病毒肺炎疫情的早期传播动力学研究[J/OL].中华医院感染学杂志. 2020(06):1-5[2020-03-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3456.R.20200221.1345.004.html>.
- [11] 李倩,唐彪,WU Jianhong,等.缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情及复工影响的模型研究[J/OL].陕西师范大学学报(自然科学版):1-6[2020-03-22].<https://doi.org/10.15983/j.cnki.jsnu.2020.01.018>.
- [12] 李建生,李素云,谢洋,等.河南省 524 例新型冠状病毒肺炎患者临床特征及中医证候分布[J/OL].中医杂志:1-6[2020-03-22].<http://kns.cnki.net/11.2166.R.20200311.1508.002.html>.
- [13] 杨雨琦,孙琦,王悦欣,等.重庆市新型冠状病毒肺炎 (NCP)疫情分析与趋势预测[J/OL].重庆师范大学学报(自然科学版):1-6[2020-03-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20200218.0746.002.html>.
- [14] 河南省卫生健康委员会 [EB/OL].[2020-3-11].<http://wsjkw.henan.gov.cn/>.
- [15] 2019 中国统计年鉴 [EB/OL].[2020-3-11].<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>.