

# 基于多隔离策略的新冠肺炎疫情建模及分析

付强, 姚羽  
(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对已经爆发的新冠肺炎疫情, 考虑多隔离措施建立了非线性传染病模型来研究新冠肺炎疫情的趋势. 利用新冠肺炎疫情的全国数据与仿真实验结果的对比拟合, 说明了隔离措施对于新冠肺炎防控的重要性. 结果表明: 如果隔离措施晚执行一周, 那么整个疫情的感染人数就将增加近 7 倍. 此外, 针对湖北省新增临床确诊病例的措施, 进行了仿真实验分析, 结果表明: 该措施有效地解决了之前可能存在漏诊病例的问题, 并可以大幅加快疫情的消亡速度. 后续官方公布的实际数据也验证了本文的仿真结果.

**关 键 词:** 新冠肺炎; 传染病模型; 基本再生数; 多隔离策略; 模拟仿真

中图分类号: R 01; O 29      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)09-1239-05

## Modeling and Analysis of COVID-19 Based on Multi-isolation Strategy

FU Qiang, YAO Yu  
(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YAO Yu, E-mail: yaoyu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at the outbreak of COVID-19 (corona virus disease 2019), considering multi-isolation measures, a non-linear infectious disease model was established to study the trend of COVID-19. Comparing the data in China of the COVID-19 with the results of simulation experiments, the isolation measures are important for the prevention and control of COVID-19. The results showed that if the isolation measures were implemented one week later, the number of infected persons in the entire epidemic would increase almost 7 times. In addition, the measure for newly confirmed clinical cases in Hubei Province is analyzed by simulation experiments. The results showed that the measure effectively solved the problem of previously missed cases and can greatly speed up the extinction of the epidemic. Then, the subsequent official data of COVID-19 also agreed with the simulation results.

**Key words:** COVID-19; epidemic model; basic reproduction number; multi-isolation strategy; simulation

新冠肺炎是一种在人群大规模传播的流行性疾病. 截至 2020 年 2 月 29 日 24 时, 全球累计确诊 86 088 例, 其中中国累计确诊 79 824 例, 可见疫情扩散速度之快、范围之广. 为有效抑制疫情发展, 全国各级政府采取了延长假期、人员隔离等措施. 为了说明隔离措施对遏制新冠肺炎疫情的重要性, 本文建立了一个非线性传染病模型来模拟新冠肺炎的传播趋势, 仿真结果能清楚地表明隔离策略对疫情防控的重要性.

由于对新型冠状病毒肺炎等传染病的研究不能采取实验形式, 因此, 对各类传染病的流行规律、预测预报就更多地需要理论分析、定量分析和模拟仿真, 而上述分析都离不开针对各类传染病而建立的数学模型. 早在 1906 年, Hamer<sup>[1]</sup>运用离散模型研究了麻疹的流行规律. 1911 年, Ross<sup>[2]</sup>为了研究疟疾的传播, 建立了微分方程模型. 1927 年, Kermack 等<sup>[3]</sup>为了分析伦敦黑死病和孟买瘟疫的传播规律, 建立了双线性发生率的

**SIR 仓室模型.** 国内学者在传染病动力学模型研究方面也做了大量的工作,对于发现传染病流行规律,并对传染病的预防和控制有重要意义. 陈兰荪等提出了疟疾病与艾滋病的数学模型<sup>[4]</sup>. 曹慧等研究了一类具有饱和治疗的离散 SEIS 传染病模型的动力学性态<sup>[5]</sup>. 张昕根据肺结核的传播机理、染病者对抗结核药物敏感度的差异,以及外源性再感染能够激活机体内休眠的结核杆菌的现象等,建立了耐药性肺结核的传播动力学模型<sup>[6]</sup>.

在新冠肺炎疫情爆发后,各国科研人员争分夺秒致力于技术攻关,为临床救治及疫情防控提供支撑. 香港大学研究团队基于易感-暴露-传染-恢复集合种群模型,对中国主要城市和国际主要城市的疫情进行模拟<sup>[7]</sup>. 周涛等基于 SEIR 仓室模型,对新型冠状病毒感染肺炎的基本再生数进行估计<sup>[8]</sup>. 香港大学深圳医院针对利用 2020 年 1 月 21 日以前病例报告,套入传染病的传染模型,估计出 2019-nCoV 的基本再生数( $R_0$ )为 3.6~4.0 (95% 信赖区间)<sup>[9]</sup>. 在一种 SEIR 模型中,研究者重点考虑了人口流动的影响,利用无信息先验的马尔可夫链蒙特卡罗方法给出  $R_0$  的极大似然估计,然后计算中国各大城市病例数的概率分布,他们算出来  $R_0$  是 2.68,认为 1 月 25 日的时候武汉已经感染了 75 815 人<sup>[10]</sup>.

本文通过对新冠肺炎的传播演化规律进行探索,建立了非线性传染病模型,进而对区域性疫情的发展趋势进行模拟演化、预测与分析,能够为政府和医疗防疫等部门制定合理的复工复产政策提供科学依据,保障社会稳定和经济发展. 这不仅对此次新冠肺炎疫情后期的防控有着积极意义,对于未来可能发生的病毒性肺炎疫情也可以起到预警预测的作用.

## 1 模型的建立和分析

实践证明,分级隔离是在医疗条件紧缺的情况下面临大规模疫情的有效应对方法,目前全国各级政府为有效抑制疫情发展都采取了延长假期、人员隔离等措施. 在传染病传播的过程中,基本再生数  $R_0$  也是至关重要的一个因素. 本文也将围绕基本再生数,对传染病的传播趋势进行预警预测. 为了说明隔离措施对遏制新冠肺炎疫情的重要性,本文基于非线性传染病模型,考虑分级隔离措施对疫情的发展情况进行建模.

本模型主要对现有的重症和轻症分别隔离策略进行了分析,并说明采取隔离措施的重要性. 其

中  $S$  代表易感人群,  $I$  代表具有感染性的人群,  $Q$  代表采取隔离措施的人群,  $R$  代表已经因为治愈并不对病毒传播产生影响的人群. 具有感染性的人( $I$ 类)与易感人群( $S$ 类)接触后易感者将有一定概率( $\beta_1$ )被感染,具有感染性的人( $I$ 类)又有一定的概率被治愈( $\gamma$ )或者死亡( $\mu$ ). 如果采取了隔离措施,易感人群( $S$ 类)和具有感染性的人( $I$ 类)分别按一定概率( $\varphi_1, \varphi_2$ )进行有效的隔离. 其中易感人群( $S$ 类)多数采取在家自行隔离的办法,本文设定这部分在家进行隔离的人群为  $Q_1$ 类,然而在实际的情况中,这类人群也有较小的概率  $\beta_2$  被亲朋好友感染,且感染率  $\beta_2$  是小于  $\beta_1$  的. 一部分具有感染性的患者会被医院收治隔离,这部分重症隔离患者为  $Q_2$ 类且有一定概率  $\omega$  治愈或者概率  $\mu$  死亡. 由于医院的严密隔离,作者认为  $Q_2$ 类不再具备传播病毒的可能性. 那么 SIQR 传播模型的状态转换图如图 1 所示.

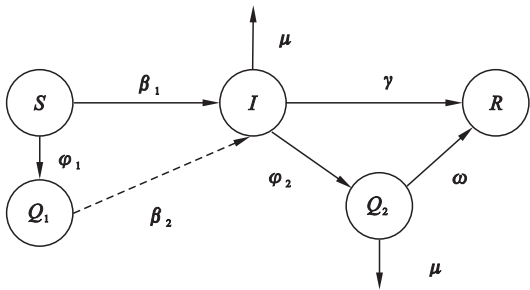


图 1 SIQR 模型状态转换图  
Fig. 1 State transition diagram of the SIQR model

由此可以得到 SIQR 模型的微分方程组为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\frac{\beta_1 I(t) S(t)}{N} - \varphi_1 S(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \frac{\beta_1 I(t) S(t)}{N} + \frac{\beta_2 I(t) Q_1(t)}{N} - (\gamma + \mu + \varphi_2) I(t), \\ \frac{dQ_1(t)}{dt} &= \varphi_1 S(t) - \frac{\beta_2 I(t) Q_1(t)}{N}, \\ \frac{dQ_2(t)}{dt} &= \varphi_2 I(t) - \omega Q_2(t) - \mu Q_2(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \gamma I(t) + \omega Q_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

假设模型主要参数如下: 一个病毒携带者成功感染另一人的概率为  $b$ , 每天接触的人数为  $k$ , 感染率  $\beta_1 = kb$ . 那么在疫情初期, 依据基本的 SIR 模型对参数  $b$  进行拟合. 假设疫情刚开始有 1 人感染, 那么

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{\beta_1 I(t) S(t)}{N} - \gamma I(t) \approx (\beta_1 - \gamma) I(t),$$

可以得到上式的解

$$I(t) = e^{(kb-\gamma)t}.$$

(2)

根据 1 月 19 日至 1 月 23 日官方公布的确诊病例数量 (见表 1), 可以拟合得到  $b = 0.041\ 33$ , 假设一般情况下一个病毒携带者每天密切接触 10 人 ( $k = 10$ ), 那么感染率  $\beta_1 = kb = 0.413\ 3$ .

表 1 1 月 19 日—1 月 28 日新冠肺炎现存确诊病例数据  
Table 1 Existing confirmed data of COVID-19 from January 19 to January 28 in China

时间	确诊人数 $I(t)$
1 月 19 日	198
1 月 20 日	291
1 月 21 日	431
1 月 22 日	554
1 月 23 日	771
1 月 24 日	1 208
1 月 25 日	1 870
1 月 26 日	2 613
1 月 27 日	4 349
1 月 28 日	5 739

假设在家进行有效隔离的概率  $\varphi_1$  为 0.4, 发病且被医院收治进行有效隔离的概率  $\varphi_2$  为 0.2. 根据官方每日报告的死亡人数和治愈人数, 得到死亡率  $\mu$  约为 0.02, 治愈率  $\omega$  约为 0.02. 恢复率  $\gamma$  约为 0.1, 取决于感染的平均时间  $D$ , 这里根据近期 Chan 等对新冠肺炎人传人特点的研究<sup>[9]</sup>, 本文取  $D = 8$ . 至此, 可以求得新冠病毒的基本再生数  $R_0$ , 根据传染病的传播动力学中 Lipsitch 等的研究<sup>[11]</sup>, 可以求得基本再生数:

$$R_0 = kbD = 3.306\ 4.$$

(3)

本文得出的这个基本再生数的值与最新的中国科学院自动化所研究员 Cao 的研究成果接近<sup>[12]</sup>. 基本再生数 (basic reproduction number) 是指在没有干预的情况下, 在一个全部是易感人群的环境中, 平均一个患者可以传染的人数<sup>[13]</sup>. 简单说就是自由传播的情况下一个病人平均能感染多少人,  $R_0$  的数值越大, 表示病毒的传播能力越强. 如果  $R_0$  大于 1, 就表示病毒可以传播开来. 一旦通过有效防控使  $R_0$  小于 1, 就表示疫情会逐渐结束. 这里算出的新冠病毒的  $R_0$  是考虑了传播比较严重的情况, 也就是  $k$  和  $D$  都选取了可能范围内较大的值. 而 Riely 等<sup>[14]</sup> 给出的 SARS 的基本再生数是 2.7 (95% 置信区间为 2.2 ~ 3.7). 非洲埃博拉病毒的基本再生数为 1.4 ~ 4.7<sup>[15]</sup>. 可以看出本次疫情的传播能力是略高于“非典”和“埃博拉病毒”的.

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于 SIQR 模型模拟全国新冠肺炎疫情趋势

依据采取隔离措施的不同时间, 对 100 d (自 1 月 1 日开始, 根据官方报道 1 月 1 日的确诊人数为 27) 内的疫情发展情况进行了仿真模拟. 在模型中, 假设现实情况中采取隔离措施的起始日期为 1 月 27 日, 即武汉于 23 日宣布“封城”后, 各地纷纷宣布进入“一级响应”状态. 为了方便读者, 模型实验参数如表 2 所示.

表 2 SIQR 模型中参数的取值  
Table 2 Parameter value in SIQR model

参数	取值
$\beta_1$	0.413 3
$\beta_2$	0.25
$\varphi_1$	0.4
$\varphi_2$	0.2
$\gamma$	0.1
$\mu$	0.02
$\omega$	0.02

图 2 为 SIQR 模型的仿真结果与全国现存确诊病例数的对比, 横坐标的起点为 1 月 1 日. 图中圆点曲线为官方公布的实际数据, 起点为 1 月 20 日, 方块曲线为仿真结果. 可以看出二者有较高的拟合程度.

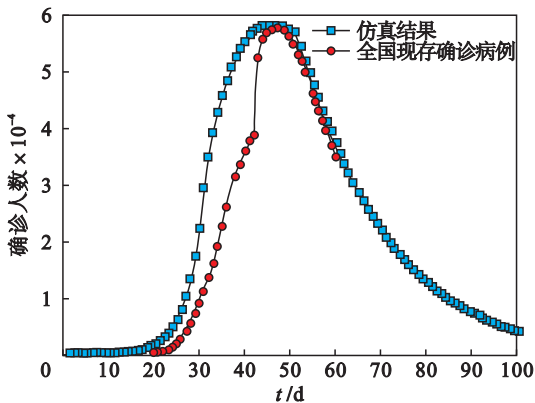


图 2 全国范围内 SIQR 模型的仿真结果  
Fig. 2 The simulation results of SIQR model in China

根据国家卫生健康委员会公布的数据, 截止 2 月 29 日 24 时, 全国现有确诊病例 35 329 例, 仿真结果显示在 2 月 29 日的现有确诊数量为 35 549 例. 在疫情前期, 仿真结果明显比实际确诊病例数多, 可能是存在疫情前期各地检测仪器不充足、医务人员数量紧缺等情况, 这就会造成一定数量的漏诊情况. 模型预测的疫情“拐点”出现在



2 月中下旬. 如果防控措施得当,那么整个疫情的过程将会持续三个月以上. 需要说明的是,这里疫情的“拐点”只是上升趋势的“拐点”,只是现存确诊病例的数量到达峰值. “拐点”过后,疫情可能持续的时间还要将近两个月,累计的被感染总人数还会增加,因此不能掉以轻心.

此外,本文还设计了两种情况,假设隔离开始日期分别为 1 月 27 日和 2 月 3 日. 为了直观地突出采取隔离措施的重要性,模型对两种不同的情况进行了比较,结果如图 3 所示.

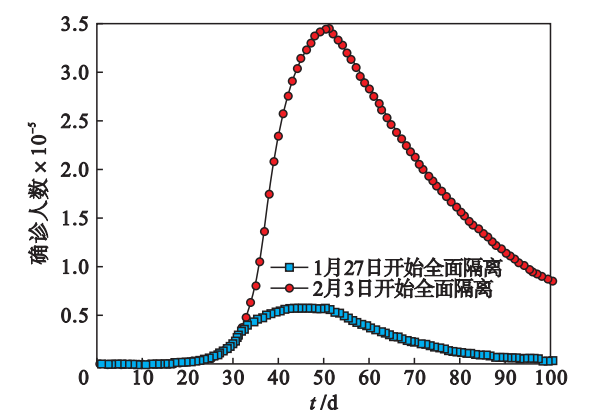


图 3 不同隔离日期的结果对比  
Fig. 3 The comparison of different isolation date

在图 3 中,圆点曲线表示从 2 月 3 日开始采取隔离措施的疫情发展趋势. 从图中可以看出,如果在 2 月 3 日才开始采取隔离措施,那么感染人数的顶点将会接近恐怖的 35 万人,而且疫情持续时间也将大大延长. 也就是说如果采取隔离措施的日期晚一周,那么整个疫情的感染人数几乎增加了 7 倍! 因此,坚决执行有效隔离措施将是抑制疫情蔓延的最有效也是最可行的办法. 如果不采取隔离措施,那么疫情的后果将是灾难性的.

### 2.2 湖北省新增临床确诊病例对疫情防控的影响分析

在 2 月 12 日一天湖北省的新增病例突然猛增到 14 840 例,这是由于自 2 月 13 日起,在湖北省病例诊断分类中增加了“临床诊断”,并将临床诊断病例数新纳入确诊病例数,进行公布,因为并不是所有患者都能检测出核酸阳性. 通过病原学(核酸检测和基因测序)确诊的百分比仅为 20% ~ 30%, 70% ~ 80% 要靠临床医生来做临床诊断. 因此在采取临床诊断措施后,本文将参数  $\beta_2$  和  $\omega$  分别调整为 0.16 和 0.33,也就是说隔离后的感染率降低和治愈率提高. 对这一措施进行分析,通过仿真手段来预估这一措施对此次新冠肺炎疫情防控的作用. 仿真结果如图 4 所示.

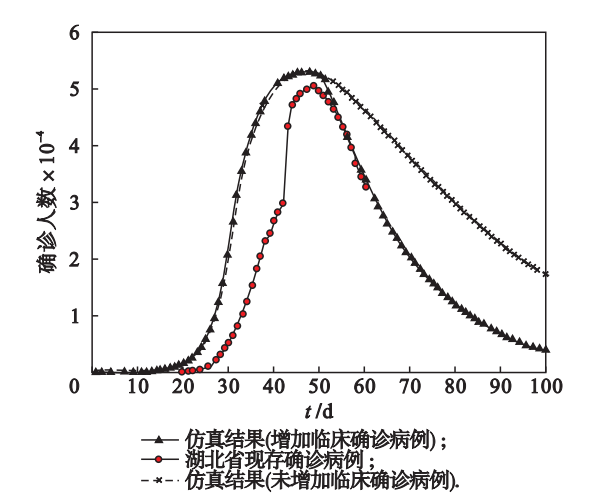


图 4 湖北省范围内 SIQR 模型仿真结果  
Fig. 4 The simulation results of SIQR model in Hubei Province

根据湖北省卫生健康委员会的报告,在图 4 中用圆点曲线表示湖北省每日的现存确诊病例数(1 月 20 日—2 月 29 日),与图 2 相同,横坐标的起点为 1 月 1 日. 通过对比仿真结果和实际数据,可以看出仿真结果的感染人数比湖北省公布的现存确诊病例数要多. 在 2 月 12 日湖北省未增加临床确诊病例之前,仿真结果与官方公布数据差距较大. 这可能是由于疫情前期对病人的确诊手段有限,确诊所需的试剂盒并不充足,导致了一些感染者被漏报. 可以看到在湖北省增加了临床确诊病例之后,确诊病例数大幅增加,仿真结果逐渐接近官方数据. 这就表示之前可能存在漏诊的一些病例被纳入确诊范围,并会被有效地隔离治疗,这种措施大大降低了这些漏诊病例继续传播病毒的风险. 从目前官方公布的现存病例数数据来看,疫情的实际发展趋势也与本文的仿真结果基本一致.

本文又假设了不增加临床确诊病例的情况,这样势必会有漏诊的情况出现. 那么在家隔离的情况  $Q_1$  类人群传播病毒的风险就会增大,对应的模型(1)中的参数  $\beta_2$  和  $\omega$  也就变大,图 4 虚线就是这种情况. 可以看出,对比增加临床确诊病例的情况,不增加临床确诊病例会降低疫情的消亡速度. 因此作者认为湖北省增加临床确诊病例的措施对于遏制疫情的发展是非常有利的.

## 3 结 论

1) SIQR 模型的仿真结果可以充分说明隔离措施就是目前防控新冠肺炎疫情最可行最有效的手段. 采取隔离措施将使疫情在短时期内得到有效控制.

2) 模型结果显示 2 月中下旬现存确诊病例的数量将达到顶峰,模型的仿真结果与官方公布的实际数据拟合程度较高.在“拐点”过后,现存确诊病例数量将逐步下降,整个疫情过程会持续 4 个月左右.

3) 通过仿真结果可以看出,如果隔离措施晚执行一周,那么整个疫情的感染人数就将增加近 7 倍.因此在疫情后期,也应该严格执行隔离措施,不能掉以轻心.

4) 湖北省 2 月 12 日增加了临床确诊病例,这有效地解决了之前可能存在漏诊病例的问题,并大幅加快了疫情的消亡速度.后续官方公布的实际数据也验证了仿真结果.

参考文献：

[ 1 ] Hamer W H. Epidemic disease in England—the evidence of variety and of persis-tency of type [ J ]. *Lancet*, 1906, 1 : 733 – 739.

[ 2 ] Ross R. The prevention of Malaria [ M ]. London : Murray, 1911.

[ 3 ] Kermack W O, McKendrick A G. Contributions to the mathematical theory of epidemics [ J ]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1927, 115 ( 772 ) : 700 – 721.

[ 4 ] 陈兰荪,孟新柱,焦建军.生物动力学 [ M ].北京:科学出版社,2009.  
( Chen Lan-sun, Meng Xin-zhu, Jiao Jian-jun. Biodynamics [ M ]. Beijing : Science Press, 2009. )

[ 5 ] 曹慧,周义仓.具有饱和和治疗的离散 SEIS 结核病模型的动力学性态 [ J ]. 数学的实践与认识, 2014, 44 ( 18 ) : 209 – 216.  
( Cao Hui, Zhou Yi-cang. Dynamics of a discrete SEIS tuberculosis model with saturation therapy [ J ]. *Journal of Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44 ( 18 ) : 209 – 216. )

[ 6 ] 张昕.考虑免疫接种的耐药 TB 模型的渐近性态 [ D ].北京:华北电力大学,2012.  
( Zhang Xi. The asymptotical behaviors of models for tuberculosis with vaccination and drug-resistance [ D ]. Beijing : North China Electric Power University, 2012. )

[ 7 ] Wu J T, Leung K, Leung G M, et al. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study [ J ]. *Lancet*, 2020, 395 ( 10225 ) : 689 – 697.

[ 8 ] 周涛,刘权辉,杨紫陌,等.新型冠状病毒感染肺炎基本再生数的初步预测 [ J ]. 中国循证医学杂志, 2020, 20 ( 3 ) : 1 – 6.  
( Zhou Tao, Liu Quan-hui, Yang Zi-mo, et al. Preliminary prediction of the basic reproduction number of the novel coronavirus 2019-nCoV [ J ]. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 2020, 20 ( 3 ) : 1 – 6. )

[ 9 ] Chan J F, Yuan S, Kok K, et al. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster [ J ]. *Lancet*, 2020, 395 ( 10223 ) : 514 – 523.

[ 10 ] Sun K, Chen J, Viboud C, et al. Early epidemiological analysis of the 2019-nCoV outbreak based on a crowdsourced data [ J ]. *MedRxiv*, 2020.

[ 11 ] Lipsitch M, Cohen T, Cooper B, et al. Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome [ J ]. *Science*, 2003, 300 ( 5627 ) : 1966 – 1970.

[ 12 ] Cao Z, Zhang Q, Lu X, et al. Incorporating human movement data to improve epidemiological estimates for 2019-nCoV [ J ]. *MedRxiv*, 2020.

[ 13 ] Adnerson R M, May R M. Infectious diseases of humans: dynamics and control [ M ]. Oxford : Oxford University Press, 1991.

[ 14 ] Riley S, Fraser C, Donnelly C A, et al. Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions [ J ]. *Science*, 2003, 300 ( 5627 ) : 1961 – 1966.

[ 15 ] van Kerkhove M D, Bento A I, Mills H L, et al. A review of epidemiological parameters from Ebola outbreaks to inform early public health decision-making [ J ]. *Scientific Data*, 2015, 2 ( 1 ) : 150019.