

# 基于 TRP-SEAMRD 模型对美国新冠肺炎疫情回顾与预测

朱科航<sup>1</sup>, 陈泽颖<sup>1</sup>, 程冯培<sup>2</sup>, 陶万银<sup>3</sup>, 朱书<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学物理学院, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学工程科学学院, 安徽合肥 230027;  
3. 中国科学技术大学生命科学与医学部, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 传统 SEIR(susceptible-exposed-infectious-recovered/removed)模型是一种简化的动力学预测模型,没有考虑到防疫政策等变化对疫情发展的影响.我们针对新型冠状病毒肺炎(新冠肺炎)在潜伏期也具有传染性等特征,同时结合美国的抗疫政策,提出了 TRP-SEAMRD(test-restricted-phased SEAMRD)模型.该模型较好地拟合了2020年2月~8月美国新冠肺炎感染、康复和死亡人数.通过分析模型提供的数据和曲线,可以抽象出美国新冠肺炎大流行的一些特征.基于 TRP-SEAMRD 模型,我们评估了美国在疫情发展早期不当的检测政策及之后的“居家隔离令”等防疫措施对疫情发展的影响,分析了未来美国在不同社会控制程度下的新冠肺炎大流行可能的发展趋势.这些模拟可为制定科学的防疫措施提供参考.

**关键词:** COVID-19; 美国; 预测

**中图分类号:** R181.3      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.08.012

**引用格式:** 朱科航,陈泽颖,程冯培,等. 基于 TRP-SEAMRD 模型对美国新冠肺炎疫情回顾与预测[J]. 中国科学技术大学学报,2020,50(8):1124-1133.

ZHU Kehang, CHEN Zeying, CHENG Fengyu, et al. Forecast and analysis of the epidemics trend of COVID-19 in the United States by TRP-SEAMRD model[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020,50(8):1124-1133.

## Forecast and analysis of the epidemics trend of COVID-19 in the United States by TRP-SEAMRD model

ZHU Kehang<sup>1</sup>, CHEN Zeying<sup>1</sup>, CHENG Fengyu<sup>2</sup>, TAO Wanyin<sup>3</sup>, ZHU Shu<sup>3</sup>

(1. School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

3. Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** The traditional SEIR(susceptible-exposed-infectious-recovered/removed) model is a simplified dynamical predictive model which does not consider the impact of changes in the anti-epidemic policy. We take the US anti-epidemic policy and the incubation period characteristic of COVID-19 into account to propose the TRP-SEAMRD(test-restricted-phased SEAMRD) model for the pandemic in US. The model fits well with the figures of COVID-19 infections, recovery and death in the United States during February ~ August 2020. According to the data generated from the model, some of the characteristics of COVID-19 can be abstracted. Based on the TRP-SEAMRD model, we can analyze the impact of the improper anti-epidemic policy at the early stage of the epidemic. The effect of the subsequent “stay at home” epidemic controlling measures is also considered and analyzed. Finally, future development of the pandemic in the US under different degrees of social control is simulated, offering a reference for formulating scientific anti-epidemic measures.

**Key words:** COVID-19; the United States; forecast

## 0 引言

在传统的 SEIR(susceptible-exposed-infectious-recovered/removed)模型中,研究对象被分为易感者、潜伏者、感染者、移出者四种类型<sup>[1-7]</sup>.然而,研究

表明<sup>[8]</sup>,处在潜伏期的患者仍可具有传染性,与传统 SEIR 模型不符.由于新型冠状病毒(以下简称新冠病毒)的致命性<sup>[9-10]</sup>,需要对感染者进行医学隔离,隔离基本可断绝这些患者的传染链.这是传统 SEIR 模型中没有考虑到的.另外,美国在疫情期间采取

收稿日期:2020-06-26; 修回日期:2020-08-22

作者简介:朱科航,男,1998年生,本科生.研究方向:凝聚态物理. E-mail: kehangzhu@gmail.com. 陈泽颖,男,1998年生,本科生.研究方向:原子与分子物理. E-mail: crozychan98@mail.ustc.edu.cn. 程冯培,男,2001年生,本科生.研究方向:近代力学. E-mail: fengyucheng0322@gamil.com

通讯作者:陶万银,博士/特任副研究员. E-mail: taoustc@ustc.edu.cn. 朱书,博士/教授. E-mail: zhushu@ustc.edu.cn

了各种特殊政策,影响了病毒传播的风险.因此,结合已有的针对美国疫情的模型和预测<sup>[11-18]</sup>,我们对传统 SEIR 模型进行修改,提出了 TRP-SEAMRD (test-restricted-phased SEAMRD) 模型,即由检测能力限制的阶段性的 SEAMRD 模型,SEAMRD 分别为其代表的人群的首字母缩写,详见表 1 和图 1.

表 1 TRP-SEAMRD Model 中符号代表的类型

符号	类型
S	易感者 (Susceptible)
E	潜伏者 (Eclipsed)
A	发病患者 (Ailing)
M	死亡 (Mortal)
R	康复 (Recovered)
D	确诊患者 (Diagnosed)
DR	确诊患者中被统计的治愈人数 (Diagnosed Recovered)
DM	确诊患者中死亡人数 (Diagnosed Mortal)

[注] 统计人数:指从 Johns Hopkins University 官网 (<https://coronavirus.jhu.edu/>) 上取得的数据;实际人数:指由 TRP-SEAMRD 模型所推测出的相应数据.

## 1 方法

### 1.1 模型中微分方程的建立

在模型中,我们考虑了隐形传播者(潜伏者)的传染能力<sup>[19-22]</sup>.他们被认为是“健康的”而没有被采取任何强制措施,这种情况下他们的实际传播能力将远远大于被采取了隔离措施的发病患者(感染者)<sup>[23]</sup>.其次我们考虑了早期由于试剂数量和检测政策原因使得确诊率偏低而患者中病况严重的患者更有可能获得检测的问题.另外,由于后期确诊人数激增,大量患者在家隔离,自愈后可能并没有被统计.微分方程的建立如式(1)~(11)所示,参数的意义如表 2 所示.

(I) 易感者人数随时间的变化

为描述患者的发病过程,采用时间参数  $k, k'$  代表处于病程的第  $k, k'$  天.考虑到潜伏者仍有传

染能力,且潜伏者体内病毒浓度随着感染天数  $k$  增加,传染能力  $\beta_e(k)$  也逐渐变强,而日有效接触人数  $r_e$  随着防疫隔离措施而动态变化.发病患者传染能力强 ( $\beta_a$ ),但日有效接触人数  $r_a$  由于严格的隔离措施而变得很小<sup>[9]</sup>.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = -r_e(t) \sum_k \beta_e(k) E(k) \times \frac{S}{N} - r_a \beta_a \sum_{k'} I(k') \times \frac{S}{N} \quad (1)$$

(II) 从易感者转化为潜伏者

$$\frac{\Delta E(1)}{\Delta t} = r_e(t) \sum_k \beta_e(k) E(k) \times \frac{S}{N} + r_a \beta_a \sum_{k'} I(k') \times \frac{S}{N} - E(1) \quad (2)$$

(III) 不同感染天数潜伏者人数随时间的变化

考虑潜伏者自愈期分布  $\gamma_e$ , 已知无症状感染者在自愈期内仍有传染能力,但不算在确诊患者之内,处于感染天数  $k$  的潜伏者由前一天处于感染天数  $(k-1)$  的潜伏者转化而来,而处于感染天数  $k-1$  的潜伏者有  $\alpha(k-1)$  的概率发病,  $\gamma_e(k-1)$  的概率自愈.

$$\frac{\Delta E(k)}{\Delta t} = E(k-1) [1 - \alpha(k-1) - \gamma_e(k-1)] - E(k) \quad (3)$$

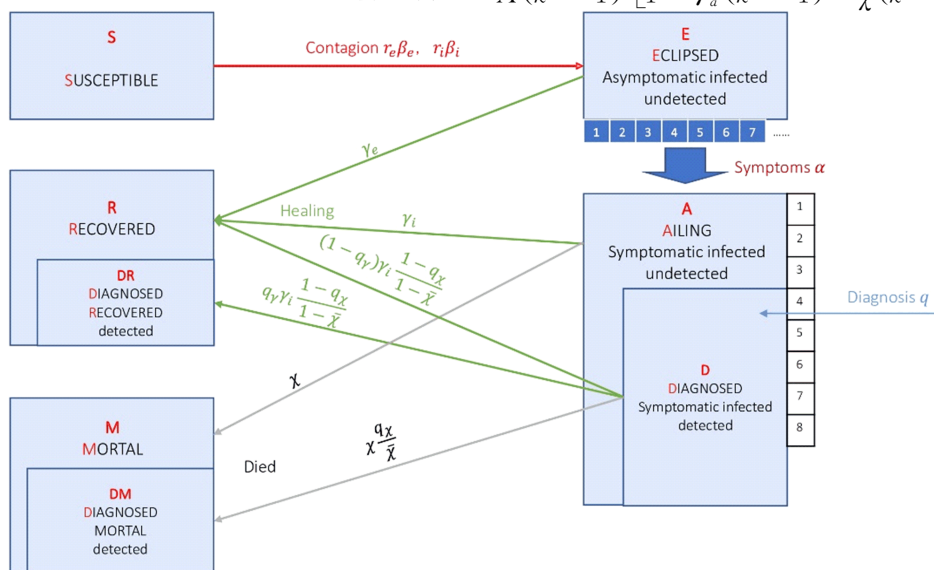
(IV) 从潜伏者变为感染者

$$\frac{\Delta A(1)}{\Delta t} = \sum_k \alpha(k) \times E(k) - A(1) \quad (4)$$

(V) 不同发病天数  $k'$  感染者人数随时间的变化

处于发病天数  $k'$  的感染者由前一天处于发病天数  $k'-1$  的感染者转化而来.而处于发病天数  $k'-1$  的感染者有  $\chi(k'-1)$  的概率死亡,  $\gamma_a(k'-1)$  的概率被治愈.

$$\frac{\Delta A(k' \neq 1)}{\Delta t} = A(k'-1) [1 - \gamma_a(k'-1) - \chi(k'-1)] - A(k') \quad (5)$$



TRP-SEAMRD 模型中各个人群之间的转化关系

图 1 TRP-SEAMRD 模型示意图

Fig. 1 The schematics of TRP-SEAMRD model

(VI) 康复人数随时间的变化  
包含了患者治愈和无症状感染者自愈两部分.

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = \sum_{k'} \gamma_a(k') A(k') + \sum_k \gamma_e(k) E(k) \quad (6)$$

(VII) 死亡人数随时间的变化

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \sum_{k'} \chi(k') A(k') \quad (7)$$

(VIII) 确诊人数随时间的变化

研究表明<sup>[24]</sup>, 新型冠状病毒肺炎(新冠肺炎)患者平均在发病后第 4.95 天被确诊. 因此, 处于第 5 天发病的感染者有概率  $q$  被确诊.

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = q(t) \times A(4) \quad (8)$$

(IX) 确诊患者中被统计的治愈人数随时间的变化

在被确诊的患者中, 其治愈的概率被放大  $\frac{1-q_x}{1-q}$  倍, 又因居家隔离, 最终被二次检测确认康复的概率为  $1-q_y$ .

$$\frac{\Delta D_R}{\Delta t} = q_y(t) \sum_{k'} q(t-k') \gamma_a(k') A(k') \frac{1-q_x(t-k')}{1-\bar{\chi}} \quad (9)$$

(X) 确诊患者中死亡人数随时间的变化

在被确诊的患者中, 其死亡的概率被放大  $\frac{q_x}{\bar{\chi}}$  倍.

$$\frac{\Delta D_M}{\Delta t} = \sum_{k'} q(t-k') \chi(k') A(k') \frac{q_x(t-k')}{\bar{\chi}} \quad (10)$$

(XI) 归一化条件

潜伏者 E 在经历足够长时间后被治愈或发病的概率总和为 1; 发病患者 A 在经历足够长时间后被治愈或死亡的概率总和为 1.

$$\alpha + \gamma_e = \gamma_a + \bar{\chi} = 1 \quad (11)$$

表 2 TRP-SEAMRD 模型中参数的意义

Tab. 2 The parameters in TRP-SEAMRD model

参数	意义
$r_e$	E 潜伏者日有效接触人数
$\beta_e(k)$	E 潜伏者传染率分布
$r_a$	A 感染者日有效接触人数 $\sim 0$
$\beta_a$	A 感染者传染率 $\sim 1$
$\alpha(k)$	E 潜伏者潜伏期分布
$\gamma_e(k)$	E 潜伏者自愈期分布
$\gamma_a(k')$	A 感染者治愈期分布
$\chi(k')$	A 感染者死亡时间分布
$q(t)$	确诊比例随时间变化
$q_y(t)$	康复的确诊患者中被统计的比例
$q_x(t)$	确诊患者的重症倾向

### 1.2 美国应对新冠肺炎疫情措施回顾分析

根据美国疫情的实际情况和美国的抗疫措施, 我们将美国的抗疫过程分为 6 个阶段: 第一阶段从

1 月 8 日美国疾病控制与预防中心(CDC)发布新冠肺炎警报开始, 到 2 月底结束<sup>[25]</sup>, 该阶段美国并没有采取强有力的防疫措施, 处于病毒不受控地在社区自由传播阶段, 有大量易感者 S 成为潜伏者 E 和感染者 A. 然而由于检测试剂严重短缺, 确诊人数 D 远远少于实际的感染人数. 第二阶段从 3 月初开始<sup>[26-33]</sup>, 此时联邦各大机构开始研发检测试剂, CDC 也开始配合, 该阶段美国的检测试剂短缺问题得到缓解, 确诊人数 D 激增. 第三阶段是美国抗疫措施的拐点<sup>[34-35]</sup>, 由于确诊人数 D 激增, 为了控制新冠肺炎的传播, 3 月中旬起各州出台各自的防疫政策, 倡导群众居家隔离、减少社交接触; 此外美国中央政府开始调动资源生产呼吸机等必要医疗设施, 一定程度上降低了病毒传播风险. 第四阶段是美国的重启经济阶段<sup>[36-40]</sup>, 由于经济下行的持续增压, 各州陆续推出重振经济的计划并实施. 第五阶段是由于“乔治·弗洛伊德”事件<sup>[41]</sup>而设置, 5 月 25 日, 乔治·弗洛伊德因为四位美国警察的暴力执法而窒息死亡<sup>[42]</sup>, 随后引起了大量美国群众的不满. 5 月底 6 月初, 美国各地的群众游行示威达到了高潮<sup>[43-45]</sup>, 加大了病毒的传播速度和广度. 第六阶段自 7 月上旬开始, 在经历了新冠肺炎疫情扩散的最高峰后, CDC 更新指导方案并推出新的相关措施以控制新冠病毒<sup>[46-48]</sup>.

### 1.3 动态参数设置

如图 2 所示, 由这 6 阶段的划分, 模型中参数分不同时期进行设置, 具体如下:

传播因子: 传播因子  $r_e$  主要随政策而改变. 第 1~43 天(疫情初期)美国政府并未采取强有效的社交隔离政策, 新冠肺炎的社区传播情况严重, 传播因子  $r_e$  很高; 第 44~50 天, 中央政府和地方州政府陆续出台政策, 社区传播大幅减少, 传播因子  $r_e$  也大幅下降; 第 51~95 天, 随着政策的逐步推出和完善, 传播因子  $r_e$  在逐步降低并最终达到平衡; 第 96~121 天, 美国多州放宽了对日常业务和社交生活的限制, 准备解除或放宽“居家令”, 传播因子  $r_e$  略有回升然后稳定; 第 122~149 天, “乔治·弗洛伊德”事件导致民众游行、暴乱不断, 传播因子  $r_e$  大大提升; 随后在第 150~160 天(7 月初), 随着中央政府的施压和新政策的提出, 传播因子  $r_e$  开始慢慢降低; 第 160 天后, 传播因子  $r_e$  趋于稳定.

潜伏者传染率分布  $\beta_e(k)$ : 潜伏期患者的传染能力  $\beta_e(k)$  随病毒浓度累积而增加, 故是关于感染天数  $k$  的递增函数.

潜伏者潜伏期分布  $\alpha(k)$ : 设置为正态分布.

潜伏者自愈期分布  $\gamma_e(k)$ : 设置为正态分布. 参考潜伏期 5.1d<sup>[19]</sup>, 5.2d<sup>[20]</sup>, 6.4d<sup>[21]</sup>.

感染者治愈期分布  $\gamma_a(k')$ : 设置为正态分布.

感染者死亡时间分布  $\chi(k')$ : 设置为正态分布.

确诊比例  $q(t)$ : 第 1~19 天, 检测率为 0, 此时尚未开始检测; 第 20、23、29 天分别是三次集中发放试剂盒的日期, 故确诊率  $q$  大大提升; 其余时间由于检测门槛过高, 检测率很低; 直到第 30 天(3 月初), 联邦各大机构陆续自己研发试剂, 确诊率  $q$  才



图 2 美国抗疫政策阶段图和主要措施

Fig. 2 The episode of anti-epidemic policies of America and the main features of each episode

得到大幅提升<sup>[26-29]</sup>；至第 62 天(4 月初)，《国防生产法案》发挥作用<sup>[34-35]</sup>，检测能力再次提升，确诊率也随之再次提升，随后检测率逐渐达到上限并趋于稳定。

康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$ ：考虑到美国实际情况，第 1~60 天，确诊患者大多在医院隔离，确诊患者只有被确诊康复后才可出院，康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$  为 100%<sup>[49-50]</sup>。第 61~70 天，随着检测能力的大幅上升，确诊患者中出现很多轻症患者，而根据美国实际情况，轻症患者大多自行居家隔离<sup>[49]</sup>，根据 CDC 的建议，轻症患者无须医疗就可以在家中康复，不需要进行核酸检测<sup>[51]</sup>。因此我们认为，该部分患者在康复后大部分没有再次检测进行确认，故康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$  开始迅速下降。随后第 71~97 天(4 月中旬~5 月上旬)，随着检测能力缓慢上升达到上限，康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$  有所回升。第 98 天(5 月上旬)，呼吸机等医疗设施短缺问题得到缓解，康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$  恢复正常。随着 3 月美国政府的呼吸机订购计划，以及 4 月特朗普援引《国防生产法案》<sup>[34-35]</sup>，帮助制造呼吸机的公司获得所需材料，美国的医疗资源得到一些缓解，第 103 天(5 月 14 日)，美国政府决定在本国建造生产关键物资及设备<sup>[52]</sup>，由此康复的确诊患者被统计比例  $q_7(t)$  在第 122 天明显上升，随后稳定。

重症确诊倾向  $q_x(t)$ ：第 1~43 天，由于初期的检测条件严格且针对重病患者<sup>[25]</sup>，此阶段重症确诊倾向  $q_x(t)$  很高；第 44~50 天，由于 3 月上中旬美国研发了新的检测试剂<sup>[30-31]</sup>，且美国新冠肺炎重灾区纽约获得批准自行进行病毒检测，该阶段检测条件放松且不再高度针对重病患者，重症确诊倾向  $q_x(t)$  大幅降低；第 51 天开始，检测能力再次得

到提升，重症确诊倾向  $q_x(t)$  接近正常水平；第 64 天，由于 4 月初特朗普援引《国防生产法案》生产呼吸机等设施<sup>[34-35]</sup>，再加上检测能力的提升，重症确诊倾向  $q_x(t)$  恢复正常；第 100~128 天，我们认为随着第四阶段经济重启，有一种传播速度更快但不会使人病情加重的新冠病毒从欧洲蔓延到了美国并大范围扩散<sup>[53-55]</sup>，因此重症确诊倾向  $q_x(t)$  在此期间逐渐降低；随后自第 129 天起，重症确诊倾向  $q_x(t)$  维持在一个较低水平。

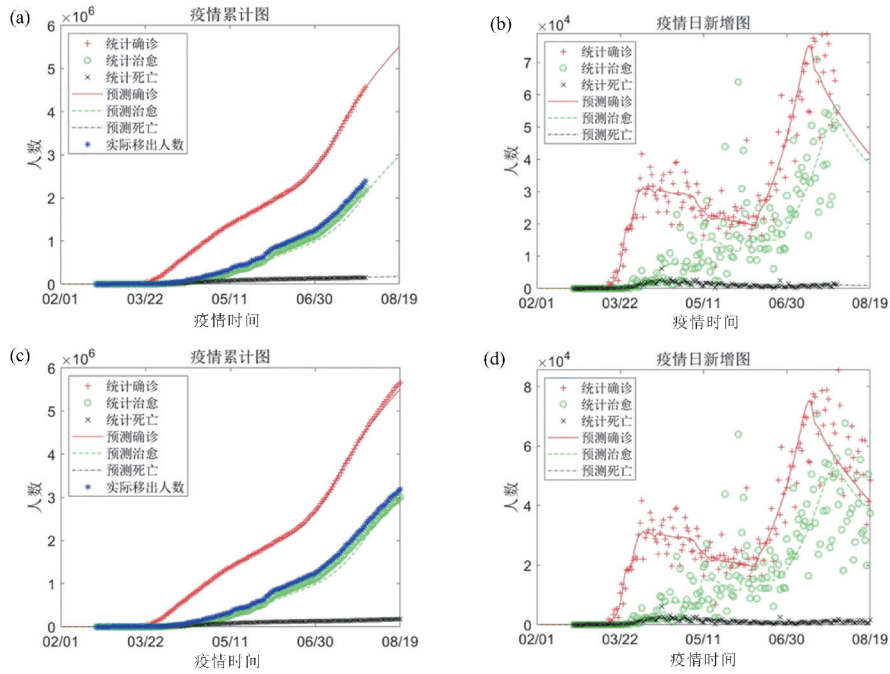
## 2 结果

### 2.1 训练

为了验证模型的有效性，我们将全部数据分成了训练集(从第 21 天至第 180 天)和测试集(第 181 天至 200 天)，模型的内部参数在训练集上得到优化后，给出之后疫情的走向并与测试集相比较，如图 3 所示。在训练集上，模型拟合的最优解给出的  $r_c = 0.1837$ ，拟合和真实数据平均误差为 1.28%。测试集 20 天的平均误差为 2.13%。利用这 20 天的数据再次训练得到进一步优化的  $r_c$  为 0.1878，平均误差缩减到 1.02%。证明 TRP-SEAMRD 模型在 20 天的尺度上具有鲁棒性。接下来，我们将利用 TRP-SEAMRD 模型对过去 6 个月(2020 年 3 月~2020 年 8 月)的疫情发展进行回顾分析，并在最后给出同样时间尺度下的预测。

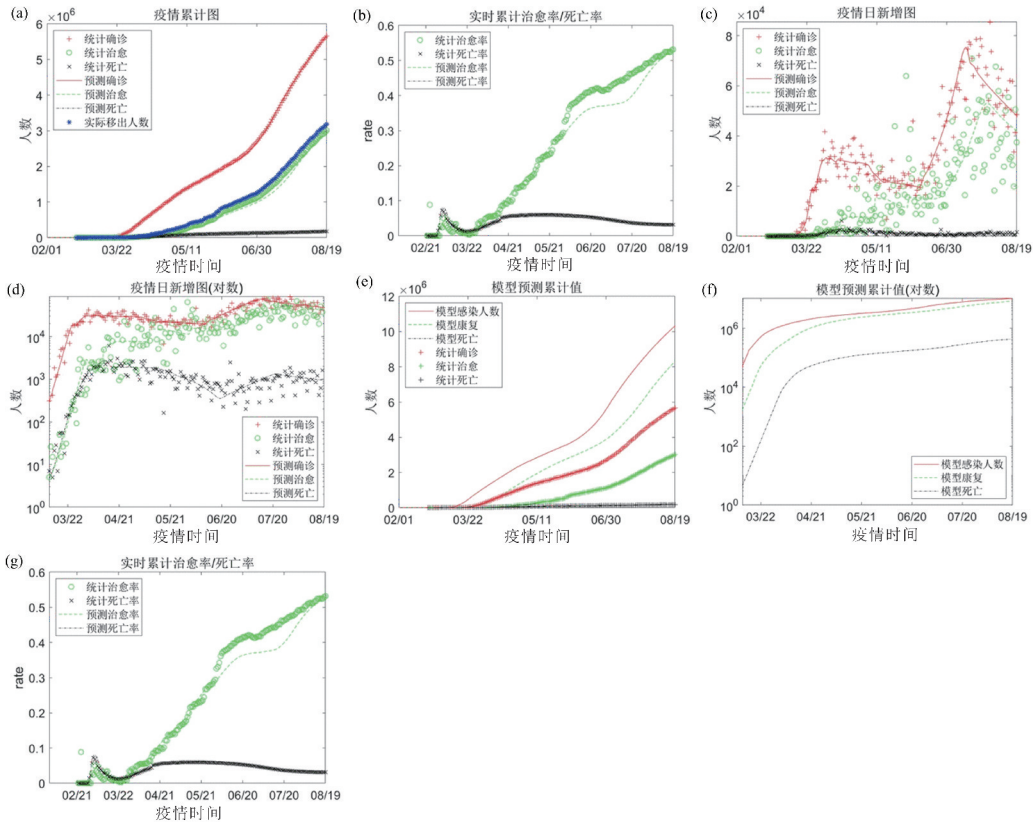
### 2.2 预测

我们利用 TRP-SEAMRD 模型，结合美国过去的防疫措施，对美国疫情的发展做了分析。图 4 中连续的曲线是模型给出的预测，离散的十字代表的是报道数据。图 4(a)、4(c)、4(d)中红色部分是确诊人数，绿色部分是治愈人数，黑色部分是死亡人数。图 4(g)中绿色和黑色分别代表的是治愈率和死亡率。



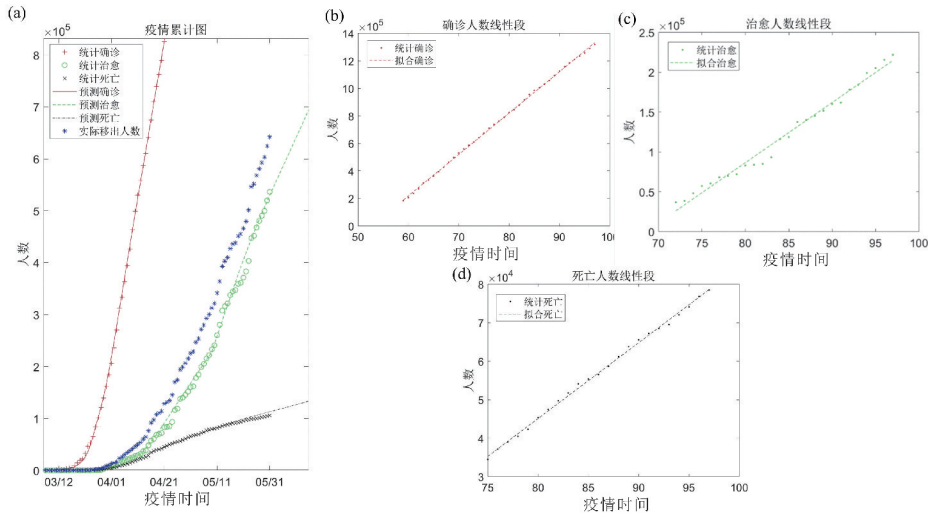
选取从 2 月 2 日起的前 21~180 天作为训练集。(a,b) 训练集累计(日新增)确诊人数、死亡人数和治愈人数随疫情时间的变化;(c,d) 测试集累计(日新增)确诊人数、死亡人数和治愈人数随疫情时间的变化。

图 3 TRP-SEAMRD 模型的训练和测试数据  
Fig. 3 The training and testing of TRP-SEAMRD model



(a,b) 累计确诊人数、死亡人数和治愈人数随疫情时间的变化;(c,d) 日新增确诊人数、死亡人数和治愈人数随疫情时间的变化;(e,f) 估计的总患病人数、总康复人数和总死亡人数随疫情时间的变化;(g) 治愈率和死亡率随疫情时间的变化。

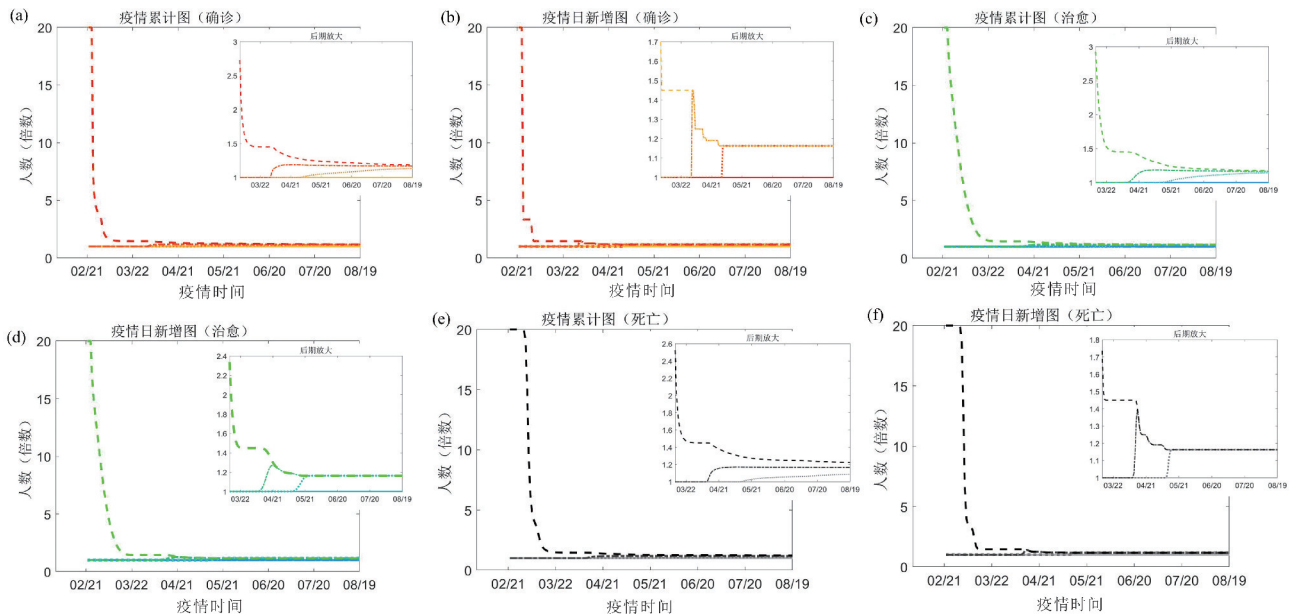
图 4 基于 TRP-SEAMRD 模型对过去六个月美国疫情发展的回顾分析  
Fig. 4 The retrospective analysis of American epidemic of the past 6 months based on TRP-SEAMRD model



(a) 确诊人数和以平均治疗(死亡)周期延后的完结人数(closed case)有较大的出入. 在确诊人数线性增长阶段(第 50~60 天), 治愈人数和死亡人数的和增长速度远远慢于确诊人数增长速度. (b) 4 月线性段的拟合曲线, 线性拟合  $y = 30086x - 2 \times 10^6$ . (c) 线性段治愈人数随时间的拟合函数,  $y = 7546.2x - 517150$ . (d) 线性增长段死亡人数随时间的拟合函数  $y = 1972.4x - 112518$ . 由曲线线性段的斜率可以得到: 确诊患者死亡率 =  $1972/30086 = 6.6\%$ . 确诊患者住院率 =  $7546/(30086 - 1972) + 6.6\% = 33.4\%$ .

图 5 基于 TRP-SEAMRD 模型对确诊患者住院率的推导

Fig. 5 The deduction of affected patient hospitalization rate based on TRP-SEAMRD model



在 TRP-SEAMRD 模型中, 受检测数限制(test-restricted)是整个模型最重要的特点之一. 假设分别从第 2、3、4 阶段开始检测不受限制, 即确诊率  $q$  达到 100%, 纵坐标表示的是各种假设下产生的累计(日新增)确诊人数(死亡人数、治愈人数)与实际报道病例之比. 实线是基准线, 代表实际报道的病例数, 始终设为 1; 虚线是第二阶段开始不受限制的情形; 点划线是第三阶段开始不受限制的情形; 点线是第四阶段开始不受限制的情形. (a) 累计确诊人数(D)及后期放大图. (b) 日新增确诊人数(D)及后期放大图. (c) 累计确诊患者中治愈人数(DR)及后期放大图. (d) 日新增确诊患者中治愈人数(DR)及后期放大图. (e) 累计确诊患者中死亡人数(DM)及后期放大图. (f) 日新增确诊患者中死亡人数(DM)及后期放大图.

图 6 检测数限制导致初期大量患者漏诊

Fig. 6 Limitations in the number of tests led to missed diagnosis by a large number of patients

我们将模型的起始时间设置为 2020 年 2 月 2 日, 是由于初期的检测门槛较高, 导致大量患者被漏检, 且病毒存在潜伏期, 到确诊感染在时间上有滞后性. 在 TRP-SEAMRD 模型中, 治愈率和死亡率曲线在第 30~40 天会出现一个峰值, 其后迅速下降, 并在 60 天左右缓缓上升, 死亡率在第 80 天左右趋于稳定, 而治愈率则一直在上升. 对于这个峰,

可以做如下解释和建模(用微分方程建模对初值很敏感): 在美国疫情初期, 检测标准非常严格, 导致确诊人数严重偏低, 所以整体的治愈率和死亡率被抬升, 其后随着检测标准的放宽, 减少了漏诊率, 以至于曲线迅速下降. 利用 TRP-SEAMRD 模型, 我们对美国的总患病人数做了一个估计, 截至 8 月 19 日, 美国实际的新冠肺炎患者预计已达到 1025 万

(实际报道数字为 566 万),对应的康复者预计达到 833 万(实际报道数字为 301 万),死亡人数约为 22 万(实际报道数字为 18 万)。

### 2.3 对患者住院率的信息推导

如图 5 所示,从疫情曲线中,我们还可以提取出基本再生数和确诊患者住院率等信息.从早期的潜伏者的日有效接触人数  $r_e = 0.67$  可以推出基本再生数  $R_0 = 3.0 \sim 3.6$ .即使考虑患者的平均治愈时间为 24 天和平均死亡时间的延迟,在确诊人数线性增长阶段(第 50~60 天),治愈人数和死亡人数的和增长速度也远远慢于确诊人数增长速度.我们推测其原因是轻症患者在家隔离,并且由于检测能力的限制或者其他因素,患者痊愈后没有及时计入治愈人数中,导致报道的治愈率偏低.根据我们的模型曲线线性段的斜率可以得到:①确诊患者死亡率 =  $1972/30086 = 6.6\%$ ;②确诊患者住院率 =  $7546/(30086 - 1972) + 6.6\% = 33.4\%$ .这也与 CDC 给出的估计大致相同<sup>[49]</sup>.而在 5 月底 6 月初,由于检测能力得到大幅提升,治愈率也相应地大幅提升.

### 2.4 评估不同防疫措施对疫情的影响

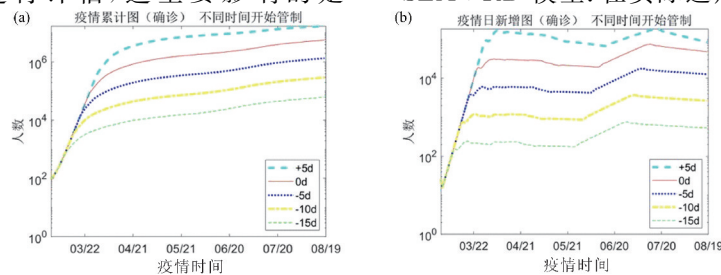
我们可以考察模型对于参数的敏感程度,并以此来推演如果美国的某些客观条件得以改变,那么整条疫情的发展曲线会产生怎么样的变化.

#### 2.4.1 考察核酸样本检测数对疫情曲线的影响

在 TRP-SEAMRD 模型中,受检测数限制(test-restricted)是整个模型最重要的特点之一.如果美国的检测数没有得到限制,即确诊率  $q$  等于 100%,可以预计所有可以看到的数据,包括确诊人数、记录治愈人数和记录死亡人数都将显著地增大.同时,分阶段(phased)也是我们这个模型重要的特点.故在考察模型对此参数的敏感程度时,我们分阶段将确诊率  $q$  调至 100%.图 6 中,(a,b)对应确诊人数(D);(c,d)对应确诊患者中治愈人数(DR);(e,f)对应确诊患者中死亡人数(DM).可以清晰地看到,在美国疫情早期,由于检测能力的限制,实际的患病人数是被检测出人数的 5~20 倍.这一大大被低估的患者人数可能误导了美国的决策层,导致其低估了疫情的实际严重程度.在放开检测标准之后,随着检测数目的增加,实际的患病人数与检测出人数趋于一致.

#### 2.4.2 评估社交隔离政策效果

我们可以利用 TRP-SEAMRD 模型对美国之前的社交隔离政策进行评估,这主要影响的是



提早 5、10、15 天和推迟 5 天采取社交隔离政策的疫情发展((a)总计和(b)日新增)曲线对数坐标对比图。

图 7 提早采用社交隔离政策可减少大量确诊患者

Fig. 7 Taking the social distancing measures in advance could help reduce the number of cases

TRP-STEAMRD 模型中的  $r_e$  参数,即潜伏者的日有效接触人数.如图 7 所示,考虑如果采取限制措施不及时,如我们在模型中推迟 5 天采取“居家隔离令”防疫措施,截至 2020 年 8 月 19 日的死亡人数将达到 40 万,总感染人数 1500 万,即美国现行采取的“居家隔离令”减少了将近 500 万的感染人数.假如美国提早 5、10、15 天采取社交隔离政策,截至 2020 年 8 月 19 日的总感染人数可以分别减少到 136 万、30 万、6 万,死亡人数将分别降至 43000、10000、2400.显然在疫情发展的早期,能够采取坚决的防疫措施,即使提早几天颁布“居家隔离令”,就可以挽救大量的生命.

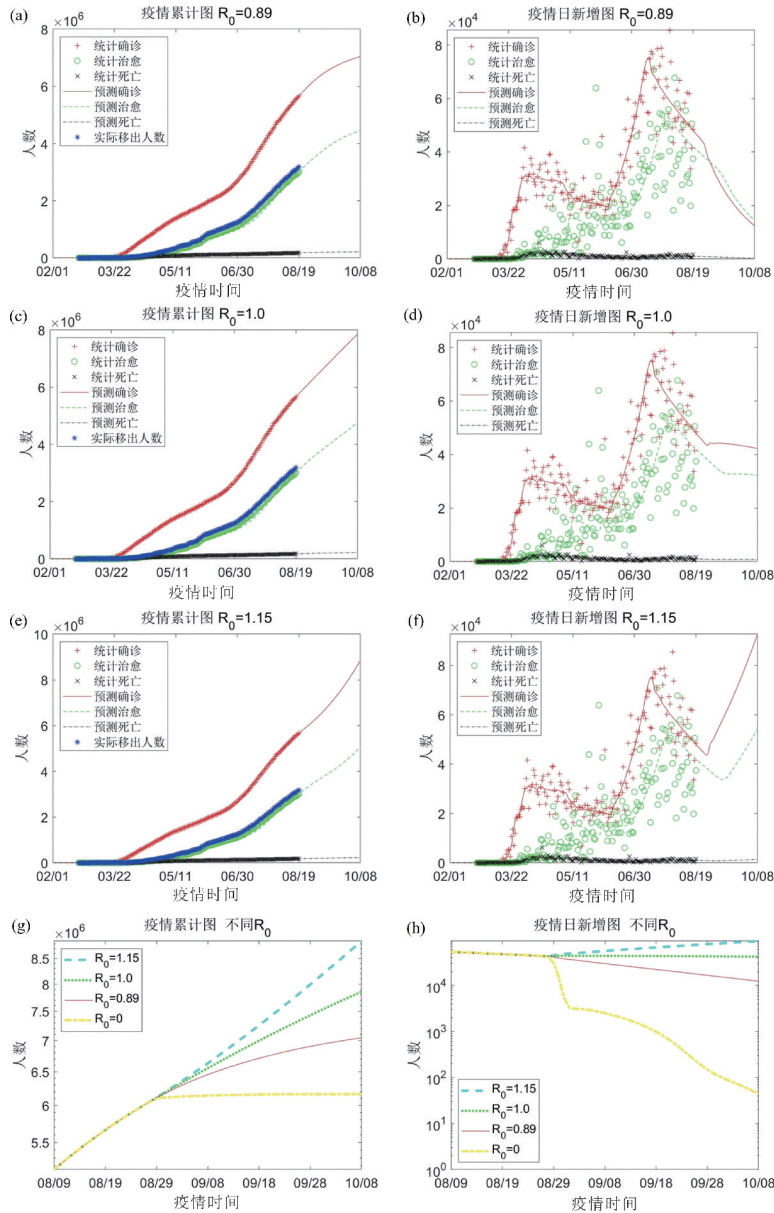
## 3 评估防疫政策对今后疫情发展的影响

利用 TRP-SEAMRD 模型,我们最后来模拟未来美国不同防疫措施力度下的疫情发展.如果不考虑疫苗和特效药的出现,现阶段美国的防疫手段主要是社交隔离政策和“居家令”.这主要影响的是 TRP-SEAMRD 模型中的  $r_e$  参数,即潜伏者的日有效接触人数.潜伏者的日有效接触人数  $r_e$  和基本再生数  $R_0$  正相关.二者的关系可以表达为:  $R_0 = r_e \times 5.214$ ,结合  $R = \frac{r_e \times 5.214 \times S}{N}$ ,可以预测  $R_0$  的

变化对今后疫情发展的影响.8 月中下旬,  $r_e$  在 0.17~0.22 之间浮动,对应  $R_0$  在 0.95~1.15 之间浮动.如图 8 所示,若按  $R_0 = 1.0$  ( $r_e = 0.20$ ) 发展,则今后疫情的发展相对稳定,在近一个月内将以每日新增确诊 4 万~5 万增长.如果按此区间的高位数,  $R_0 = 1.15$  ( $r_e = 0.22$ ) 发展,即防疫力度稍有下降,无论是新增确诊人数还是死亡人数都会大大增加,在近一、两个月内呈现加速增长的趋势.这一方面是因为进入秋季,流感增多;另一方面是因为自 5 月底开始,很长一段时间内美国国内暴乱频发,很多参与暴乱的人群不佩戴口罩聚集在一起,加速了疫情的传播.如果以此区间的低位发展,  $R_0 = 0.89$  ( $r_e = 0.17$ ),则从日新增来看,疫情将逐渐得到控制,将在一个月内回到日新增确诊 1 万的水准.

## 4 结论

我们改进了传统的 SEIR 模型,结合新冠肺炎的特点和美国的抗疫动态实际,提出了 TRP-SEAMRD 模型.在实际运用该模型的过程中,我们



(a, b)  $r_e=0.17, R_0=0.89$  时累计(日新增) 确诊人数、死亡人数和治愈人数。(c, d)  $r_e=0.20, R_0=1.0$  时累计(日新增) 确诊人数、死亡人数和治愈人数。(e, f)  $r_e=0.22, R_0=1.15$  时累计(日新增) 确诊人数、死亡人数和治愈人数。(g, h) 以上 3 种情形疫情发展曲线的对数坐标比对比图。

图 8 未来美国不同防疫措施力度下的疫情发展

Fig. 8 The development of the epidemic in America under different anti-epidemic measures

还将数据分为训练集和测试集,在训练集上拟合疫情前期 160 天疫情发展的基础上,在测试集上取得了 2.13% 的较小误差,可对之后的疫情发展作出合理的预测.我们运用该模型,对今后美国采取不同程度的社会管控措施下的疫情发展做了评估.除了对未来几种可能的发展做了预测,利用 TRP-SEAMRD 模型还可以对之前政策进行反思,考虑如果采取限制措施不及时造成的恶果,和如果提前采取有效的措施可以减少多少人命的损失.

TRP-SEAMRD 模型的优点在于结合本次新冠肺炎疫情的特点(潜伏者具有感染性),并且考虑了美国的抗疫特色(受检测数限制;轻症患者居家隔离、重症患者隔离住院),在数据设置上参数非单一

值,参数设置分阶段;数据考虑到了表面(官方检测的结果)和实际的不同,从中可以得出住院率等信息.在此基础上可以再细分阶段,使得分段更精确.在模型中,忽略了对传染链的追踪,没有考虑部分人在潜伏期被隔离,未考虑患者康复后可能会二次感染.在未来的改进中,可以对潜伏者人群进行再分,并且将康复后患者再次区分出来,考察疫情后期会不会产生类似流感的周期性爆发以及相应后果. TRP-SEAMRD 模型只针对美国的疫情分析,未将模型的普适性加以验证.若要推广到其他国家(地区),可采集当地的疫情数据后,对其进行建模分析.与已有的美国建模参数加以对比,可以相应调整其他国家的建模参数;通过不同国家的参数对



比,可以得出哪些参数是全球普适的参数,哪些参数具有地方特色.

#### 参考文献(References)

- [1] CARCIONE J M, SANTOS J E, BAGAINI C, et al. A simulation of a COVID-19 epidemic based on a deterministic SEIR model[EB/OL]. (2020-05-10)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.03575>.
- [2] TANG Z, LI X B, LI H Q. Prediction of new coronavirus infection based on a modified SEIR model[EB/OL]. (2020-03-06)[2020-08-20]. <https://doi.org/10.1101/2020.03.03.20030858>.
- [3] 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]. *Lancet*, 2020, 395(10225): 689 - 697.
- [4] PANDEY G, CHAUDHARY P, GUPTA R, et al. SEIR and regression model based COVID-19 outbreak predictions in India[EB/OL]. (2020-04-01)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.00958>.
- [5] SANTOS J E, CARCIONE J M, SAVIOLI G B, et al. A numerical simulation of the COVID-19 epidemic in Argentina using the SEIR model[EB/OL]. (2020-07-15)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.06297>.
- [6] HULT H, FAVERO M. Estimates of the proportion of SARS-CoV-2 infected individuals in Sweden[EB/OL]. (2020-05-25)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.13519>.
- [7] DEEB O E, JALLOUL M. The dynamics of COVID-19 spread in Lebanon[EB/OL]. (2020-05-14)[2020-07-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.07251v1>.
- [8] ZHANG YZ, HOLMES E C. A genomic perspective on the origin and emergence of SARS-CoV-2[J]. *Cell*, 2020, 181(2): 223 - 227.
- [9] ARENTZ M, YIM E, KLAFF L, et al. Characteristics and Outcomes of 21 Critically Ill Patients With COVID-19 in Washington State [J]. *JAMA*, 2020, 323(16): 1612-1614.
- [10] LIVINGSTON E, BUCHER K. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Italy[J]. *JAMA*, 2020, 323(14): 1335.
- [11] ALTIERI N, BARTER R L, DUNCAN J, et al. Curating a COVID-19 data repository and forecasting county-level death counts in the United States[EB/OL]. (2020-05-16)[2020-07-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.07882v1>.
- [12] MAHAJAN A, SOLANKI R, NAMITHA A S. An Epidemic Model SIPHERD and its application for prediction of the spread of COVID-19 infection for India and USA [EB/OL]. (2020-05-11)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2005.00921>.
- [13] WANG L, WANG G N, GAO L, et al. Spatiotemporal dynamics, nowcasting and forecasting of COVID-19 in the United States [EB/OL]. (2020-04-30)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.14103v2>.
- [14] XU C H, YU Y G, YANG Q C, et al. Forecast analysis of the epidemics trend of COVID-19 in the United States by a generalized fractional-order SEIR model[EB/OL]. (2020-04-29)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.12541>.
- [15] SRIVASTAVA A, PRASANNA V K. Learning to forecast and forecasting to learn from the COVID-19 pandemic [EB/OL]. (2020-05-04)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.11372>.
- [16] JOHNDROW J, LUM K, GARGIULOM, et al. Estimating the number of SARS-CoV-2 infections and the impact of social distancing in the United States[EB/OL]. (2020-04-19)[2020-08-20]. <https://arxiv.org/abs/2004.02605>.
- [17] BAYHAM J, FENICHEL E P. Impact of school closures for COVID-19 on the US health-care workforce and net mortality: a modelling study [J]. *The Lancet Public Health*, 2020, 5(5): e271 - e278.
- [18] MOLLALO A, VAHEDI B, RIVERA K M. GIS-based spatial modeling of COVID-19 incidence rate in the continental United States [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 728: 138884.
- [19] LAUER S A, GRANTZ K H, BI Q F, et al. The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: Estimation and application[J]. *Annals of Internal Medicine*, 2020, 172(9): 577 - 582.
- [20] LI Q, GUAN X H, WU P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus - infected pneumonia [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382(13): 1199 - 1207.
- [21] BACKER J A, KLINKENBERG D, WALLINGA J. Incubation period of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) infections among travellers from Wuhan, China, 20 - 28 January 2020[J]. *EuroSurveill*, 2020, 25(5):2000062.
- [22] GUANW J, NI Z Y, HU Y, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382(18):1708-1720.
- [23] FANELLI D, PIAZZA F. Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China, Italy and France [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020, 134: 109761.
- [24] 国家卫生健康委员会宣传司. 2020年2月17日新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2020-02-17)[2020-08-20]. [www.nhc.gov.cn/xcs/yqfkdt/202002/f12a62d10c2a48c6895cedf2faea6e1f.shtml](http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqfkdt/202002/f12a62d10c2a48c6895cedf2faea6e1f.shtml).
- [25] Washington Post Staff. What we know about delays in coronavirus testing[EB/OL]. (2020-04-18)[2020-08-20]. <https://www.washingtonpost.com/investigations/2020/04/18/timeline-coronavirus-testing/>.
- [26] REDFIELD R R. Coronavirus Disease 2019: The U. S. and International Response [EB/OL]. (2020-02-27)[2020-08-20]. <https://www.cdc.gov/washington/testimony/2020/t20200127.htm>.
- [27] SHIEBER J. FDA allows new diagnostic technologies to test for coronavirus before receiving emergency approvals [EB/OL]. (2020-03-01)[2020-08-20]. <https://techcrunch.com/2020/02/29/fda-allows-new-diagnostic-technologies-to-test-for-coronavirus-before-receiving-emergency-approvals/>.
- [28] Quest Diagnostics. Quest Diagnostics to Launch Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Test [EB/OL]. (2020-03-05)[2020-08-20]. <https://newsroom.questdiagnostics.com/2020-03-05-Quest-Diagnostics-to-Launch-Coronavirus-Disease-2019-COVID-19-Test>.
- [29] 亚时财经. CDC、斯坦福大学分别研发全新新冠病毒检测试剂盒[EB/OL]. (2020-03-08)[2020-08-20]. <http://atimescn.com/TechnologyView-12714.html>.
- [30] HONG N, MCKINLEY J, SANDOVAL E, et al. 2 New

- York State Lawmakers Test Positive for Coronavirus[EB/OL]. (2020-03-14) [2020-08-20]. <https://www.nytimes.com/2020/03/14/nyregion/coronavirus-ny.html>.
- [31] SHAPIRO E. New York City Public Schools to Close to Slow Spread of Coronavirus [EB/OL]. (2020-03-15) [2020-08-20]. <https://www.nytimes.com/2020/03/15/nyregion/nyc-schools-closed.html>.
- [32] LEE A. These states have implemented stay-at-home orders. Here's what that means for you[EB/OL]. (2020-04-07) [2020-08-20]. <https://www.cnn.com/2020/03/23/us/coronavirus-which-states-stay-at-home-order-trnd/index.html>.
- [33] The White House. 15 Days to Slow the Spread[EB/OL]. (2020-03-16) [2020-08-20]. <https://www.whitehouse.gov/articles/15-days-slow-spread/>.
- [34] The White House. Executive Order on Prioritizing and Allocating Health and Medical Resources to Respond to the Spread of Covid-19[EB/OL]. (2020-03-18) [2020-08-20]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-prioritizing-allocating-health-medical-resources-respond-spread-covid-19/>.
- [35] The White House. Statement from the President Regarding the Defense Production Act [EB/OL]. (2020-04-02) [2020-08-20]. <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/statement-president-regarding-defense-production-act-2/>.
- [36] FEUER W. Vice President Mike Pence says 16 states have unveiled plans to lift coronavirus restrictions[EB/OL]. (2020-04-23) [2020-08-20]. <https://www.cnbc.com/2020/04/23/pence-says-16-states-have-released-plans-to-lift-coronavirus-restrictions.html>.
- [37] SHALBY C. L. A. County working to ease stay-at-home order by May [EB/OL]. (2020-04-28) [2020-08-20]. <https://www.latimes.com/california/story/2020-04-28/l-a-county-working-to-ease-stay-at-home-order-by-may>.
- [38] LIN II R G, MONEY L, WIGGLESWORTH A. California faces growing pressure to ease stay-at-home rules, at least in some regions[EB/OL]. (2020-04-27) [2020-08-20]. <https://www.latimes.com/california/story/2020-04-27/coronavirus-reopening-california-stay-at-home-rules>.
- [39] MCKINLEY J. New York to Begin Limited Reopening in Upstate Region [EB/OL]. (2020-05-11) [2020-08-20]. <https://www.nytimes.com/2020/05/11/nyregion/reopen-new-york-coronavirus.html>.
- [40] The New York Times. See Reopening Plans and Mask Mandates for All 50 States[EB/OL]. (2020-04-24) [2020-08-20]. <https://www.nytimes.com/interactive/2020/us/states-reopen-map-coronavirus.html>.
- [41] Wikipedia. George Floyd [EB/OL]. [2020-08-20]. [https://en.m.wikipedia.org/wiki/George\\_Floyd](https://en.m.wikipedia.org/wiki/George_Floyd).
- [42] BBC News. George Floyd death homicide, official postmortem declares [EB/OL]. (2020-06-02) [2020-08-20]. <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-52886593>.
- [43] TAYLOR D B. George Floyd Protests: A Timeline[EB/OL]. (2020-06-02) [2020-08-20]. <https://www.nytimes.com/article/george-floyd-protests-timeline.html>.
- [44] AIZURA A. A Mask and A Target Cart; Minneapolis Riot [EB/OL]. (2020-05-30) [2020-08-20]. <https://thenewinquiry.com/a-mask-and-a-target-cart-minneapolis-riots/>.
- [45] SMITH-SCHOENWALDER C. Weekend Protests Over George Floyd's Death Spread Across the U. S. [EB/OL]. (2020-06-01) [2020-08-20]. <https://www.usnews.com/news/national-news/articles/2020-06-01/dc-fires-protests-over-george-floyds-death-bring-unrest-to-trumps-backyard>.
- [46] National Center for Immunization and Respiratory Diseases (NCIRD), Division of Viral Diseases. Developing Guidance to Protect the Public's Health [EB/OL]. (2020-07-01) [2020-08-20]. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/cases-updates/about-epidemiology/protect-public-health.html>.
- [47] National Center for Immunization and Respiratory Diseases (NCIRD), Division of Viral Diseases. Guidance for Organizing Large Events and Gatherings[EB/OL]. (2020-07-01) [2020-08-20]. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/large-events/considerations-for-events-gatherings.html>.
- [48] Centers for Disease Control and Prevention. CDC calls on Americans to wear masks to prevent COVID-19 spread [EB/OL]. (2020-07-14) [2020-08-20]. <https://www.cdc.gov/media/releases/2020/p0714-americans-to-wear-masks.html>.
- [49] CDC COVID-19 Response Team. Severe outcomes among patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19)—United States, February 12 – March 16, 2020 [J]. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2020, 69:343-346;doi: 10.15585/mmwr.mm6912e2.
- [50] BHATRAJU P K, GHASSEMIEH B J, NICHOLS M, et al. Covid-19 in critically ill patients in the Seattle region — Case series[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382(21): 2012 – 2022.
- [51] National Center for Immunization and Respiratory Diseases (NCIRD), Division of Viral Diseases. COVID-19 Testing Overview [EB/OL]. [2020-08-20]. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/symptoms-testing/testing.html>.
- [52] SMITH-SCHOENWALDER C. Trump Grants More Financing for Pharmaceutical Companies Amid Pandemic [EB/OL]. (2020-05-14) [2020-08-20]. <https://www.usnews.com/news/national-news/articles/2020-05-14/trump-grants-more-financing-for-pharmaceuticals-amid-coronavirus-pandemic>.
- [53] KORBER B, FISCHER W M, GNANAKARAN S, et al. Spike mutation pipeline reveals the emergence of a more transmissible form of SARS-CoV-2 [EB/OL]. (2020-05-05) [2020-08-10]. <https://doi.org/10.1101/2020.04.29.069054>.
- [54] KORBER B, FISCHER W M, GNANAKARAN S, et al. Tracking changes in SARS-CoV-2 Spike: Evidence that D614G increases infectivity of the COVID-19 virus [J]. *Cell*, 2020, 182(4): 812-827. e19.
- [55] FOX M. Study confirms new version of coronavirus spreads faster, but doesn't make people sicker[EB/OL]. (2020-07-03) [2020-08-20]. <https://edition.cnn.com/2020/07/02/health/coronavirus-mutation-spread-study/index.html>.