

基于SIR模型分析不同强度防控手段在 当前武汉市新型冠状病毒 (2019-nCoV) 感染的肺炎疫情中的作用



武文韬^{1,2}, 李达宁², 李莉¹, 冯敖梓¹, 徐安定^{3*}, 吕军^{1,2*}

1. 暨南大学附属第一医院临床研究部 (广州 510630)
2. 西安交通大学公共卫生学院 (西安 710061)
3. 暨南大学附属第一医院神经内科 (广州 510630)

【摘要】 新型冠状病毒疫情爆发后, 武汉市确诊和疑似病例的人数迅速上升。在目前未发现有良好治疗措施的情况下, 如何迅速采取有效的防控措施仍是当务之急。本研究基于官方数据和传染病动力学 SIR 模型对采取不同强度防控措施的结局进行预测并为制定新一轮防控策略提供建议。

【关键词】 新型冠状病毒; COVID-19; 肺炎; SIR 模型; 预测模型; 预防策略

Analysis of the role of different intensity prevention and control measures in the current epidemic of novel coronavirus (2019-nCoV) infected pneumonia in Wuhan based on SIR model

Wen-Tao WU^{1,2}, Da-Ning LI², Li LI¹, Ao-Zi FENG¹, An-Ding XU^{3*}, Jun LYU^{1,2*}

1. Department of Clinical Research, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510630, China;

2. School of Public Health, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;

3. Department of Neurology, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510630, China.

*Corresponding author: Jun LYU, E-mail: lyujun2019@163.com; An-Ding XU, E-mail: tlil@jnu.edu.cn.

【Abstract】 The number of confirmed and suspected cases in Wuhan has risen rapidly since the outbreak of the new coronavirus. In the absence of good treatment measures, prompt and effective prevention and control measures are still the top priority. Based on official data and SIR model of infectious disease dynamics, this study predicted the outcome of prevention and control measures with different intensity and provided Suggestions for formulating a new prevention and control strategy.

【Keywords】 2019-nCoV; COVID-19; Pneumonia; SIR model; Prediction model; Prevention strategies

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.2020.01.12

基金项目: 国家社会科学基金一般项目 (16BGL183)

*通信作者: 吕军, 副研究员, 博士生导师, E-mail: lyujun2019@163.com; 徐安定, 主任医师, 博士生导师, E-mail: tlil@jnu.edu.cn.

<http://www.jnewmed.com>

2019年12月, 湖北省武汉市发现了一种可以导致严重呼吸系统症状的新型冠状病毒 (Novel coronavirus, 2019-nCoV), 这种病毒被命名为2019-nCoV。截至我们撰写本文时, 武汉市乃至全国各地的确诊和疑似病

例仍然在快速上升。作为一种未知的且目前仍然未有很好治疗措施的急性传染病,针对疫情的公示以及对疫区和感染人群的隔离等防控手段在这一阶段显得尤为重要。事实上,防控手段的确很大程度上依赖于疾病传播的速度和强度,在确定疾病流行和发展趋势后,不同强度的防控手段也会导致不同的结局。因此,针对此次疫情,确定切实高效可行的防控手段是十分必要的。

SIR模型是Kermack等^[1]在1927年提出的一个经典的传染病模型,历史上,这个模型已经得到了许多大规模传染病数据的有力支持,其中也包括2003年在中国发生的非典型肺炎^[2-3]。考虑到目前发现的2019-nCoV的特点,我们认为SIR模型在一定的假设下是具有预测能力的。

本文利用武汉市卫健委^[4]和湖北省卫健委^[5]提供的疫情相关数据构建了武汉新型冠状病毒感染的肺炎的SIR模型,并分析不同强度的防控措施带来的效果。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文数据来源于武汉市卫健委以及湖北省卫健委截至2020年1月31日的官方统计数据^[4-5]。值得注意的是,湖北省人民政府于2020年1月22日发布了《湖北省人民政府关于加强新型冠状病毒感染的肺炎防控工作的通告》,同时启动了突发公共卫生事件二级应急响应,参考SARS病毒的潜伏期和先前研究的意见,我们认为2020年1月22日及以前确诊的病例几乎都是在没有有效干预和防控手段的情况下被自由传播的2019-nCoV所感染的,1月23日~1月31日确诊的病例我们认为政府的防控手段已经介入。

1.2 SIR模型的建立

我们采用SIR模型描述2019-nCoV的传播过程。这个模型主要涉及三种人群,分别是:易感人群(Susceptible),感染人群(Infective)和移除人群(Removed)。其中,易感人群指尚未患病且缺乏免疫能力的人群,感染人群指已经患有传染病的人群,移除人群指不再参与感染和被感染过程的人群,包括病愈(具有免疫能力)和死亡人群。

我们用S(t)、I(t)和R(t)分别表示易感人群、感染人群和移除人群在t时刻的数量,同时假设此次传染病符合以下法则:

(1)不考虑人口的出生、死亡、流动等种群动力因素。人口始终保持在一个固定水平上,即上述三类人数总和为一个常数N。

(2)一个病人一旦与易感者接触就必然具有一定的传染性。假设t时刻单位时间内,一个病人能传染的易感者数目与此环境中易感者总数成正比,比例系数为 β 。

(3)t时刻,单位时间内从染病者中移出的人数与病人数量成正比,比例系数为 γ 。

据此我们可以建立以下微分方程组:

$$\begin{aligned} dS / dt &= -\beta IS / N \\ dI / dt &= \beta IS / N - \gamma I \\ dR / dt &= \gamma I \end{aligned}$$

其中, $N=S(t)+I(t)+R(t)$, β 是感染者每天平均接触人数k和传染概率b的乘积, γ 是感染人群恢复或死亡的平均速率,取决于疾病的期限C, $\gamma=1/C$ 。

1.3 基本参数值的设立

时间点的确定:2019年12月8日发现第一例患者,记为第0天。疾病传播期限C:根据卫健委专家的意见,我们设定C=14。总人口N:根据武汉市官方报道,武汉市常住人口已经超过1100万^[6],我们在分析中设定N=1150万人。死亡率:我们计算了1月31日全国数据的死亡率为0.022,考虑到已经掌握的疫情早期的特征和春运期间武汉市留市人员老年人多的情况,武汉市早期死亡率数值可能略高于全国。我们在计算时取死亡率为0.03,这也符合专家认为2019-nCoV致死率低于SARS的结论。感染效率b:2019年12月8日为第一例病人发现的日期,根据既往的经验,我们假设感染者平均每天接触人数为k=5,在疫情早期,易感人群数目约等于总人口数($S \approx N$),我们可以用下式描述感染人群的变化率:

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{IS}{N} - \gamma I \approx (\beta - \gamma) I$$

数据拟合后我们可以得出 $b=0.04105$ 。此外我们关注到, 我们对于感染效率的估计基于疾病的早期数据, 考虑到早期数据可能存在一定比例感染态个体未被发现的情况, 上面得出的感染效率可能较为乐观。基于此, 我们同时采用了帝国理工学院发布的关于武汉市内 2019-nCoV 感染的肺炎潜在病例总数报告中的数据^[7], 代入模型后计算出 $b=0.0521$ 。在这个假设下, 我们可以计算 2019-nCoV 的基本可再生数 (basic reproduction number, R_0) 分别为 2.9 和 3.6, 符合目前国内学者对 R_0 的初步预测值 $R_0=2.8-3.6$ ^[8], 因此, 我们认为我们的假设具有一定的合理性。在构建模型时, 我们取 $b=0.05$ 作为基本参数值来反映感染效率, 这也反映了目前对于 2019-nCoV 感染效率较高的推断。接触人数 k : 基于之前的假设, 我们认为在 1 月 22 日之前 k 的平均取值为 $k=5$, 1 月 22 日之后我们认为防控手段介入武汉市疫情。早期的防控措施主要包括切断公共交通, 建议市民居家, 以及对确诊病例和疑似病例进行隔离, 这些防控措施主要减少了人际间的接触率, 而佩戴口罩和防护服等措施则有利于降低感染效率。为了我们的结果可以有效应用于制定防控策略, 在分析不同防控强度带来的影响时, 由于隔离和防护是同时开展的, 我们定义 k 、 b 同时降低 45% 及以下为弱防控强度 (此时 $R_0=1.059>1$), k 、 b 同时降低 50% 及以上为较强的防控强度 (此时 $R_0=0.875<1$)^[9]。本文所有模型均采用 MATLAB R2018 进行拟合。

2 结果

2.1 无防控措施2019-nCoV的流行趋势

图 1 显示了在完全不采取任何防控措施下 2019-nCoV 的流行趋势。在这种情况下, 疫情会在 3 个月迎来顶峰, 感染人数将远超目前的情况。表 1 显示了 1 月 23 日至 1 月 31 日感染者的预测值与实际值的对比, 我们发现, 预测值的感染者人数要显著高于实际感染者的人数。

2.2 不同强度防控措施下2019-nCoV的流行趋势

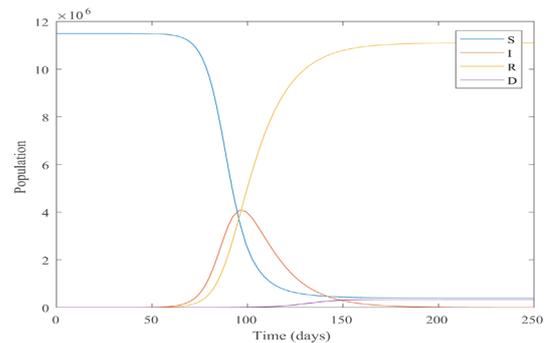


图1. 无防控手段下疫情变化趋势

Figure 1. Epidemic trends without prevention and control measures
注: S-易感人群 (Susceptible); I-感染人群 (Infective); R-移除人群 (Removed); D-死亡人群 (Death)

表1. 无防控措施下2019-nCoV感染者数目预测值与实际值对比
Table 1. Comparison of predicted and actual 2019-nCoV infection numbers without control measures

日期	1月								
	23日	24日	25日	26日	27日	28日	29日	30日	31日
预测值	952	1275	1705	2281	3054	4087	5469	7320	9801
实际值	495	572	618	698	1590	1905	2261	2639	3215

图 2 显示了较弱的防控手段下疫情的变化趋势, 若疫区长期处于弱防控强度下, 疫情将不能得到良好的控制, 感染人数仍然呈现一个缓慢增长的趋势, 最大感染人数将达到 4719 人, 死亡人数约为 739 人。

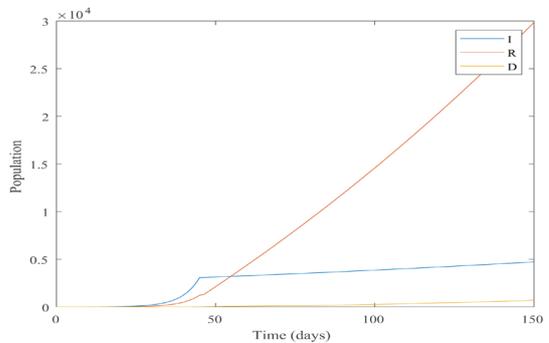


图2. 弱防控手段下疫情变化趋势

Figure 2. The trend of epidemic under weak prevention and control measures
注: I-感染人群 (Infective); R-移除人群 (Removed); D-死亡人群 (Death)

图 3 显示了强防控手段下疫情的变化趋势, 在采取较强的防控手段后, 疫情得到明显控制, 感染人数呈下降趋势, 最大感染人数约为 3088 人, 死亡人数约为 443 人。

3 讨论

本文研究并建立了 2019-nCoV 感染的肺炎传播的 SIR 模型, 并考虑了不同强度的控制手段对于疫情结局的影响并试图帮助制定有效的防控策略。从结果上看, 若不采取

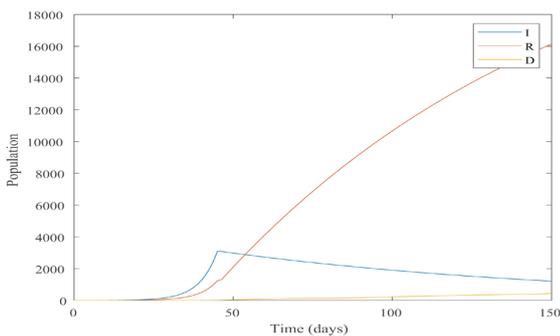


图3. 强防控手段下疫情变化趋势

Figure 3. The trend of epidemic situation under strong prevention and control measures

注: I-感染人群 (Infective); R-移除人群 (Removed); D-死亡人群 (Death)

任何的预防措施, 最终的感染者人数将到达一个较高的数字, 相比于目前的感染人数甚至存在数量级的差异, 尽管在疾病致死率的数值上仍存在争议, 死亡人数仍然会是一个不小的数字。我们通过对1月23日至1月31日的无预防措施模型的预测值和实际的感染者人数进行比较, 我们发现预测值要远远大于真实值。尽管事实上可能存在一些未被发现的感染态个体, 但是我们认为这个较大的差距仍然来源于武汉市目前已经采取的防控手段带来的影响。

通过对不同强度防控措施比较我们发现, 本次疫情控制的关键所在是及时将 R_0 的值控制在1以下, 否则疫情难以得到及时有效的控制。早期的强防控措施可以有效减少感染人数和死亡人数, 在这个基础上, 可以集中调动更多资源加速对疫情的扑灭。另一方面, 实际预防工作的开展是一个逐步进行的过程, 基于这个认识, 真实的感染人数峰值可能略高于我们的预测值, 随着疫情的发展和控制, 死亡率也在不断变化。但结果仍然支持越早采取越强的防控措施越有利于尽早控制疫情, 减少感染者的人数, 也更加有利于在疫情后期集中力量扑灭疫情。对于此, 我们认为, 现阶段可以着重采取的防控措施包括:

(1) 尽量减少外出, 不参与人多的聚会活动。加强对公共交通的管制措施, 尽可能减少易感人群与感染者接触的机会。

(2) 出门佩戴符合规格的口罩, 外出回家后做到勤洗手, 勤消毒, 对佩戴后的口罩按标准进行处理, 不可随意丢弃。针对前

线医务人员应尽力保障物资供应, 避免医院感染的发生。

(3) 对于有高危人员接触史或者疑似症状的人群, 建议自行隔离或接受医学观察。

(4) 目前部分企业, 单位以及学校采取的延迟开工、开学的措施也有效避免了人员的聚集, 可以在短时间内降低 R_0 。

不可否认的是, 我们用于构建模型的数据仅来源于疫情早期的少量数据且建立在数据较为准确的基础上, 若想要更加精确预测疫情的发展趋势, 仍然需要更多数据的支持。同时, 在构建模型时, 我们的模型没有考虑超级传播者的出现、潜伏期带来的时间滞后效应^[10-11]以及防控强度的动态变化, 这些问题仍需要依靠更多的学者的研究加以论证。

在先前的研究中, 许多学者认为2019-nCoV感染的肺炎的初期传播势头显得比SARS还要凶猛^[12], 我们认为这主要与疾病在潜伏期就具有传染性以及春运期间青壮劳力大量返乡武汉市内老年人口比例上升有关。随着对2019-nCoV认识的加深, 我们认为只要按照国家部署和各级政府突发公共卫生事件应急响应, 利用媒体加强对全民的健康教育, 减少外出同时做好个人卫生, 针对有高危人员接触史和疑似病例做好隔离和医学观察, 对重症患者及时进行治疗, 2019-nCoV感染的肺炎将会得到有效控制。

参考文献

- 1 Kermack WO, McKendrick AG. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1927, 115(772): 700-721. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.
- 2 Sulsky D. Using real data in an SIR model[EB/OL]. (2012-06-21) [2020-02-02]. <https://www.math.unm.edu/~sulsky/mathcamp/ApplyData.pdf>.
- 3 王铎, 赵晓飞. SARS 疫情的实证分析和预测 [J]. 北京大学学报 (医学版), 2003, 35(z1): 72-74. [Wang D, Zhao XF. Empirical analysis and forecasting for SARS epidemic situation[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2003, 35(z1): 72-74.]
- 4 武汉市卫生健康委员会. 武汉市卫生健康委员会关于新型冠状病毒感染的肺炎情况通报 [EB/OL]. (2020-01-21) [2020-02-02]. <http://wjw.wuhan.gov.cn/front/web/showDetail/2020012109085>.

- 5 湖北省卫生健康委员会 . 2020 年 1 月 31 日湖北省新型冠状病毒感染的肺炎疫情情况 [EB/OL]. (2020-02-01) [2020-02-02]. http://wjw.hubei.gov.cn/fbjd/dtyw/202002/t20200202_2017658.shtml.
- 6 新华网 . 武汉常住人口突破 1100 万 城市吸引力稳步提升 [EB/OL]. (2019-03-26) [2020-02-01]. http://www.hb.xinhuanet.com/2019-03/26/c_1124281764.htm.
- 7 Imai N, Dorigatti I, Cori A, et al. Estimating the potential total number of novel Coronavirus cases in Wuhan City, China[EO/OL]. (2020-01-17) [2020-02-01]. <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/2019-nCoV-outbreak-report-17-01-2020.pdf>.
- 8 周涛, 刘权辉, 杨紫陌, 等 . 武汉新型冠状病毒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. DOI: 10.7507/1672-2531.202001118. [Zhou T, Liu QH, Yang ZM, et al. Preliminary prediction of the basic reproduction number of the Wuhan novel coronavirus 2019-nCoV[J]. Chinese Journal of Evidence-based Medicine (preprint), 2020, 20(3): 1-6.]
- 9 Anderson RM, Anderson B, May RM. Infectious diseases of humans: dynamics and control[M]. London: Oxford University Press, 1992.
- 10 Chan JF, Yuan S, Kok KH, 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. [published online ahead of print January 24, 2020]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30154-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30154-9).
- 11 Donnelly CA, Ghani AC, Leung GM, et al. Epidemiological determinants of spread of causal agent of severe acute respiratory syndrome in Hong Kong[J]. Lancet, 2003, 361(9371): 1761-1766. DOI: 10.1016/S0140-6736(03)13410-1.
- 12 Read JM, Bridgen JRE, Cummings DAT, et al. Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions[J]. medRxiv (preprint), 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1101/2020.01.23.20018549>.

收稿日期: 2020 年 2 月 2 日 修回日期: 2020 年 2 月 4 日
本文编辑: 翁鸿 杨智华