

基于 SIR 模型的新型冠状病毒肺炎疫情 预测及防控措施研究

王寅¹, 罗帅², 胡俊³

(1. 兰州大学 马克思主义学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 3. 安徽农业大学 马克思主义学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 2019年12月,我国爆发了新型冠状病毒肺炎这一重大疫情。此次疫情防控是对我国现代化治理水平和治理能力的重要检验,政府及社会各界展开了积极的防疫抗疫工作并取得了重大成果,但在疫情治理过程中也暴露出确诊标准过于严谨,社会部分人员防疫意识不足等问题。文章主要利用 SIR 模型分析了疫情发展历程,并针对防控疫情过程中暴露出的问题提出了一些对策和防控措施。

关键词: 新型冠状病毒肺炎; SIR 模型; 疫情防治措施

[中图分类号] R181.8 [文献标识码] A [文章编号] 1674-2389(2020)04-0058-06

COVID-19 Epidemic Prediction and Prevention Measures Based on SIR Model

WANG Yin¹, LUO Shuai², HU Jun³

(1. School of Marxism, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. 3. School of Marxism, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: In December 2019, COVID-19 appeared in China. The epidemic prevention and control is an important test of China's modern governance level and governance capacity. The government and all sectors of society have actively carried out epidemic prevention and anti-epidemic work, and achieved significant results. However, in the process of epidemic control, there are also problems such as too strict diagnostic criteria and insufficient awareness of epidemic prevention among some social personnel. In this paper, SIR model is mainly used to analyze the development of the epidemic situation, and some countermeasures and prevention measures are proposed for the problems exposed in the process of prevention and control of the epidemic.

Key words: COVID-19; SIR model; epidemic prevention and control measures

1 引言

新型冠状病毒肺炎的爆发迅速而突然。不同于2003年的非典,新冠肺炎出现在2019年底,正值春节前夕,而且武汉号称九省通衢,大量务工人员从武汉返回家乡,因此新型冠状病毒肺炎在极短的时间内便席卷全国。这次抗击新冠肺炎是对我国管理机制和民族凝聚力的重大考验。习近平总

书记在中共中央政治局常务委员会召开的《研究加强新型冠状病毒感染的肺炎疫情防控工作》会议中强调“做好疫情防控工作,直接关系到人民生命安全和身体健康,直接关系到经济社会大局稳定,也事关我国对外开放”^[1]。这次的新型冠状病毒肺炎病毒主要通过呼吸道飞沫、接触和气溶胶传播。在明确新型冠状病毒肺炎存在人传人的情况后,全国各族人民众志成城,团结一致,在党的领导下全力全

收稿日期:2020-03-28

基金项目:最高人民法院司法研究重大课题“乡村振兴战略实施司法保障机制研究”(ZGFYZDK201803-04)阶段性成果。

作者简介:王寅(1986-),甘肃山丹人,博士生,助教,研究方向:马克思主义理论,国外马克思主义哲学研究。

心投入到抗击疫情当中。医护人员首当其冲,坚守岗位,治病救人。研究人员夜以继日攻克病毒难关。卫健部门和各级公职人员加班加点制定实施防疫抗疫措施。工程人员全力建设雷神山,火神山医院……在这场波及范围广,耗费时间长的战“疫”中,我国展现了强大的执行力与凝聚力,进一步证明了中国特色社会主义治理能力的优越性。但同时也反映出我国野生动物保护法存在的一些漏洞,部分群体防控意识不足等问题。因此,本文梳理了疫情爆发过程中的一些典型事件及问题,并针对这些问题提出一些思考建议。同时尝试用 SIR 模型预测疫情发展情况,以期促进我国疫情的防控效能的提高。

传染病对人类的危害由来已久,公元前 430 年—公元前 427 年,雅典暴发的瘟疫导致希腊文明走向下坡路^[2]。公元前 3 世纪—公元 2 世纪,大量罗马人死于天花。还有欧洲中世纪的黑死病,20

世纪的艾滋病病毒,埃博拉病毒等都对人类的生命健康造成重大危害。为了更直观地研究天花接种的防治情况,1760 年丹尼尔·伯努利首次使用数学模型进行研究^[3]。1906 年哈纳用离散时间模型研究了麻疹反复出现的情况,1911 罗斯用微分方程研究疟疾^[4]。直到 1906 年 Kermack 和 Mckendrick 在研究黑死病时建立了著名的 SIR 模型。本文也在后续的内容中利用 SIR 模型对新型冠状病毒肺炎的发展做出了初步预测。

2 疫情发展

为了更直观地了解疫情的发展,制作了全国疫情发展情况表。列出了 1 月 10 日至 2 月 15 日共 37 日的全国累计确诊人数,治愈人数,死亡人数和重大事件(如表 1)。数据来源于国家卫生健康委官方统计数据。

表 1 全国疫情发展情况表

时间	确诊人数	治愈人数	死亡人数	主要事件
1 月 10 日	41	2	1	
1 月 11 日	41	6	1	
1 月 12 日	41	7	1	
1 月 13 日	41	7	1	
1 月 14 日	41	7	1	
1 月 15 日	41	12	2	
1 月 16 日	45	15	2	
1 月 17 日	62	19	2	
1 月 18 日	121	24	3	百步亭社区万家宴,4 万多家庭参与
1 月 19 日	199	25	3	
1 月 20 日	291	25	6	钟南山表示确定人传人
1 月 21 日	440	25	9	确诊患者救治国家负担
1 月 22 日	574	28	17	外人不要到武汉
1 月 23 日	830	34	25	武汉封城
1 月 24 日	1297	38	41	武汉多家医院物质紧缺向社会求助
1 月 25 日	1985	49	56	火神山,雷神山医院先后开工
1 月 26 日	2761	51	80	
1 月 27 日	4535	60	106	
1 月 28 日	5997	103	132	确证人数超过非典 5327 例
1 月 29 日	7736	126	170	
1 月 30 日	9720	171	213	黄冈卫健委主任唐志红免职
1 月 31 日	11821	243	259	世卫宣布新冠疫情为全球突发公共卫生事件
2 月 1 日	14411	328	304	治愈超过死亡
2 月 2 日	17238	475	361	火神山医院建成
2 月 3 日	20438	632	425	
2 月 4 日	24363	892	490	
2 月 5 日	28060	1153	564	
2 月 6 日	31211	1542	637	吹哨人李文亮去世
2 月 7 日	34589	2052	723	
2 月 8 日	37251	2651	812	
2 月 9 日	40235	3283	909	累计 11921 名医护人员支援湖北
2 月 10 日	42708	3998	1017	
2 月 11 日	44730	4742	1114	
2 月 12 日	59882	5915	1368	
2 月 13 日	63932	6728	1381	
2 月 14 日	66576	8101	1524	
2 月 15 日	68584	9425	1666	

由表 1 我们可以发现,中国在疫情防治方面动作可谓迅速且有效。从 1 月 20 日确定新型冠状病毒可以人传人后,国家实施了解决患者医疗费用问题,封城,火神山开工等多个措施。但从上述表格中,我们依旧发现两个难以理解的地方,首先是 1 月 10 日至 1 月 17 日这个阶段,新增患者几乎为 0,即使传染病由于前期基数小,传染速度较慢,但显然这种 0 传染现象不符合常规。第二点是 2 月 12 号确诊人数的暴增。为了解释这两个问题,本文梳理了疫情爆发前中期的重大事件。

2019 年 12 月 26 日上午,湖北省中西医结合医院呼吸内科的张继先主任值班时发现两人出现发热,咳嗽的症状,但拍完肺部 CT 片后与普通的流感肺炎又具有明显区别。张继先医生曾是 2003 年非典疫情中的汉江区专家组成员,他意识到问题的严重性,于是在 12 月 27 日向医院紧急汇报这一情况。随后医院又收到三名来自华南海鲜市场的新冠肺炎病例,同时副院长立刻向省、市卫健委的疾控中心。12 月 30 日,武汉市卫健委一份《关于做好不明原因肺炎救治工作的紧急通知》的红头文件在网络大量传播,也是这一天李文亮医生在微信群中发出提醒。12 月 31 日,国家卫健委的专家组成员就抵达武汉,判定这是一种新型病毒性肺炎,但由于病例中大部分人员都是直接或间接接触过华南海鲜市场,所以调查结果并未发现明显人传人现象。1 月 5 日上午,上海市公共卫生临床中心在病毒样本中检测出类 SARS 病毒,并获得该病毒的全基因组序列。1 月 9 日,专家组发现此病毒在电镜下呈现冠状病毒形态,并命名为新型冠状病毒,这一天,出现第一例新冠肺炎死亡案例,也是这一天,李文亮医生查肺部 CT 提示为“病毒性肺炎”,其后照顾他的家属也出现发热症状。1 月 12 日,曾与不明肺炎接触过的多名医护人员陆续出现发热症状,这是明显的人传人现象。1 月 10 日 24 时,武汉卫健委发出通告,出现新冠肺炎 41 例,出院 2 例,重症 7 例,死亡 1 例。但截至 1 月 17 日,武汉市卫健委的通告中并未发现一例新增新冠肺炎患者。通过武汉市卫健委披露的信息来看,出现这一问题的主要原因是前期新型冠状病毒肺炎的确诊标准过于谨慎,要符合三个条件才能确诊。要有华南海鲜市场接触史、有发热症状、要进行全基因组测序。1 月 18 日,国家卫健委的高级别专家组来到武汉中南医院考察,发现诊断标准太高了,这样很容易漏掉真实病例,放掉新冠肺炎病人导致社会危害加大。于是诊断标准放开,确诊病人迅速

提高。其后 1 月 18 日和 19 日两天确认新增病例 136 例。1 月 20 日,钟南山院士在接受采访时,明确表示新型冠状病毒引发的肺炎肯定具有人传人现象。关于第二点 2 月 12 号确诊人数的暴增原因,主要原因是前期武汉暴增的患病人数导致医疗物资和床位极度紧张。许多武汉地区的居民并不能及时得到确诊和治疗,在大量居家隔离的市民中有许多隐藏的患者。随着确诊试剂的开发与生产,火神山医院的建成,医疗物资和医护人员的加大投入,2 月 11 日和 12 日两天,武汉市开始对隐藏的患者全面诊断治疗,才会出现确诊人数暴增的现象。1 月 12 日这一天武汉地区新增患者 14840 人,国内其他地区新增 313 人,国内其他地区在这一天和其后几天并未出现患者大量增加的情况,这表明此种现象是武汉独有,排除病毒变异或者其他自然因素导致患者激增,同时也反应出国内其他地区并未隐藏大量的未确诊患者。

3 基于 SIR 模型的实证分析

3.1 模型介绍

SIR 模型是 Kermack 和 Mckendrick 在 1906 年提出的,用来研究传染病的传播模型。此模型适用于研究及预测流感、麻疹等传染病传播情况。在 SIR 模型把总人口被分为三大类: S 代表易感者 (Susceptible); I 代表感染者 (Infective); R 代表移出者 (Removed)^[5]。这三者互相独立且只能单向变化。未感染疾病但易感的人群 (S) 受到感染成为感染者,此过程称为感染。感染者一段时间之后恢复或者死亡的过程称之为移出。移出者表示治愈并不被再次感染的人群。知道三者初始值,并知道感染和移出的速度,就能得到人群在一段时间的感染者、移出者的人数变化,从而了解疫情的发展情况。

3.2 数据来源

本文的数据主要来源于中国卫生健康委员会和武汉卫生健康委员会的官网。截至 2 月 3 日 24 时,国家卫生健康委收到 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团累计报告确诊病例 20438 例(黑龙江省核减 2 例),现有重症病例 2788 例,累计死亡病例 425 例,累计治愈出院病例 632 例,现有疑似病例 23214 例。通过数据分析我们可以发现,疑是病例与确诊病例将近达到一比一,此比例值和感染人数变化将用在后续的感染系数 β 的调整上。2 月 3 日治愈率达到 3%,死亡率达到 2%,可以用此判定后续内容中移出速度的可信度。

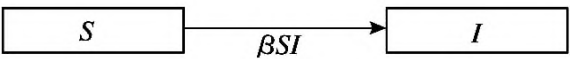
3.3 模型假设

SIR 模型是在以下 3 个基本假设的基础上建立的:

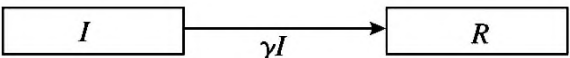
(1)人口始终保持一个常数 N ,即不考虑出生、死亡、人口流动等影响因素。

$$N(t) = S(t) + I(t) + R(t)$$

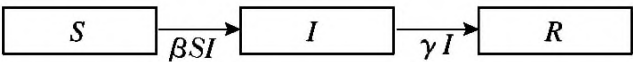
(2)单位时间内,一个病人能传染的易感者人数与此时易感者总数 S 成正比,如果比例系数为 β ,则由此可得出在 t 时刻单位时间内总感染者人数为 βSI 。



(3)单位时间内移出者人数与病人数量成正比,假设比例系数为 γ ,则可得到移出者数量为 γI 。在此研究中,如果移出者多为康复者,在忽略死亡人数的情况下, γ 又可以称为恢复率系数。但由于武汉的死亡人数太多,不可忽略,所以在计算移出者的时候需要将死亡人数与康复人数相加。



综上所述,可以将传染病的传播过程大概表示为如下情况,要想遏制疫情的蔓延,主要是降低 β 系数,提高 γ 系数。例如实施隔离,提高医疗水平等。



3.4 模型方程及预测

基于上述假设,可以建立一个常微分方程组,此微分方程组主要用来表示易感者(S),感染者(I),移出者(R)随着时间推移的边际变化。 β 表示感染系数, γ 表示移出系数,利用此微分方程组,借助 AnyLogic 软件即可以画出三类人群随着时间变化的趋势图。

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta IS \\ \frac{dI}{dt} = \beta IS - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{cases}$$

SIR 模型是传染病在自然状态下的发展情况,模型中假定国家不采取任何措施,也没有人进行隔离、防护。在不考虑特效药。模型不考虑自然出生人口和人口的自然流动,不考虑超级传播者和病毒变异。由于武汉的隔离,导致人口流动受到抑制,从而有效降低了感染系数 β ,原模型的预测精度将出现偏差,由图 1 可见全国的疫情发展情况和湖北省高度重合,为了更加精准地预测疫情的发展情况,本文以湖北武汉的数据分析代表全国的疫情发展情况。

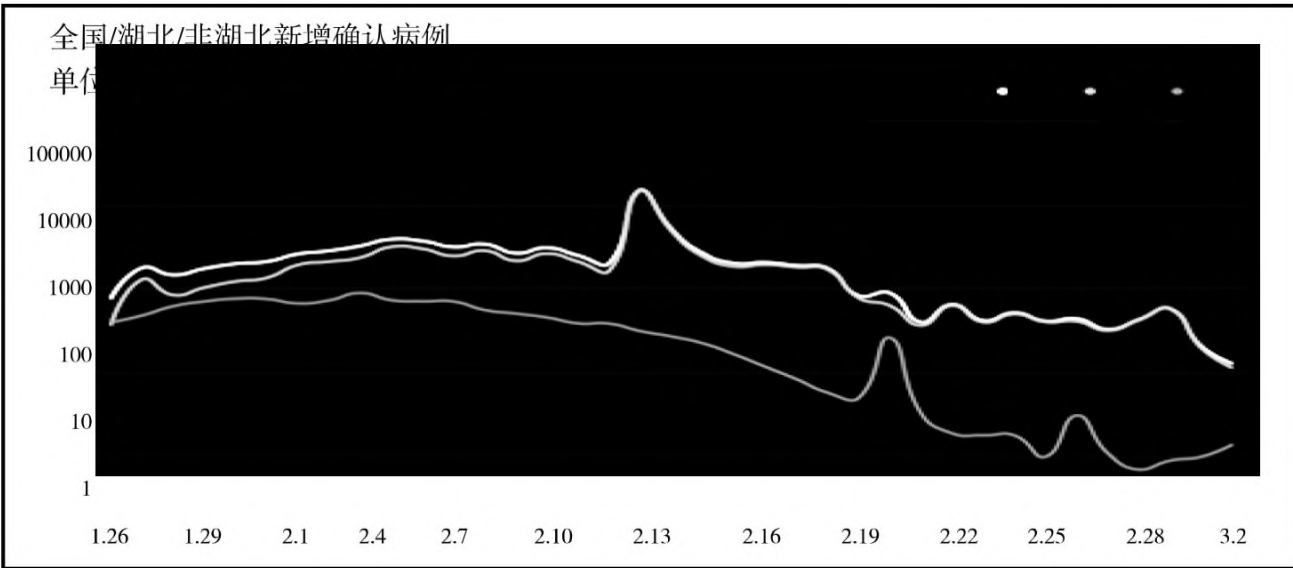


图 1 全国/湖北/非湖北新增确诊病例

SIR 模型的预测精度主要取决于感染速度和移出速度的确定。感染速度计算可以通过易感者接触感染者的情况间接估计,易感者每日接触人次 * 患病率(患病率 = 感染人口/总人口) * 接触感染率 * 易感者人数 = 感染速度。移出速度计算可

以通过病程估计,在医院的治疗报告中显示,一般情况下,感染者 4 到 5 天病情变化会有显著区别,有的开始好转,其后再过 12 天左右慢慢痊愈,有些患者急剧恶化,走向死亡。本文假设平均病程为 10 天,一个感染者 10 天后痊愈或者死亡,痊愈后

获得抗体不会被感染。那么感染者的移出速率为十分之一。 $0.1 \times$ 感染者就是移出的速度。感染速

度与移出速度设定后可以通过系统动力学实现疫情发展情况的模型估计,如图 2 所示。

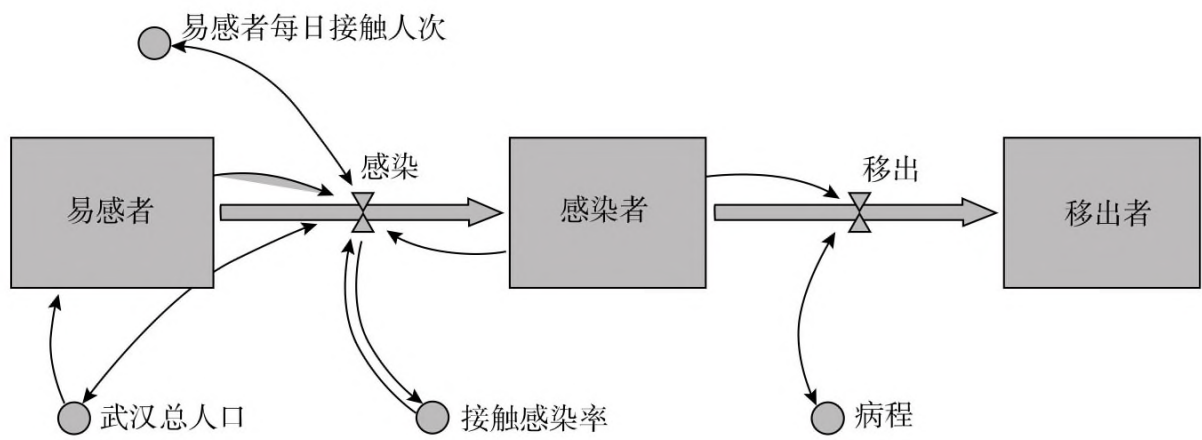


图 2 SIR 模型设定

需要注意的是感染者人数并不一定等于确诊病例数,可能会出现瞒报和无症状感染者现象,本文无法解决这个问题,在感染者人数的设定上约等于确诊病例数。如果有武汉市人口为 900 万($N = 900$ 万), $\beta = 15/9$ 亿, $\gamma = 0.1$,则可以绘制出经典 SIR 模型各类人群随时间变化图(图 3)。由图 3 我们可以发现,即使在疫情爆发初期,疾病的发病率不高,但是会在 20 天左右后,患病人数会呈现几何式的增长。在保持现有医疗条件及隔离措

施不变的情况下,疫情会在 50 天后到达峰值,感染者达到 10 万人。如果按 1 月 8 号疫情爆发初期计算,即在 2 月 27 日疫情出现拐点,120 天后(即 5 月初)疫情基本消失。通过模型预测,我们可以计算出疫情的最终规模,相较于疫情结束后统计患病人数和死亡人数,前期疫情的预测更加重要,这有利于国家进行政策的制定,例如提前准备好满足 10 万人的医疗物质,确定隔离封路的时限等。

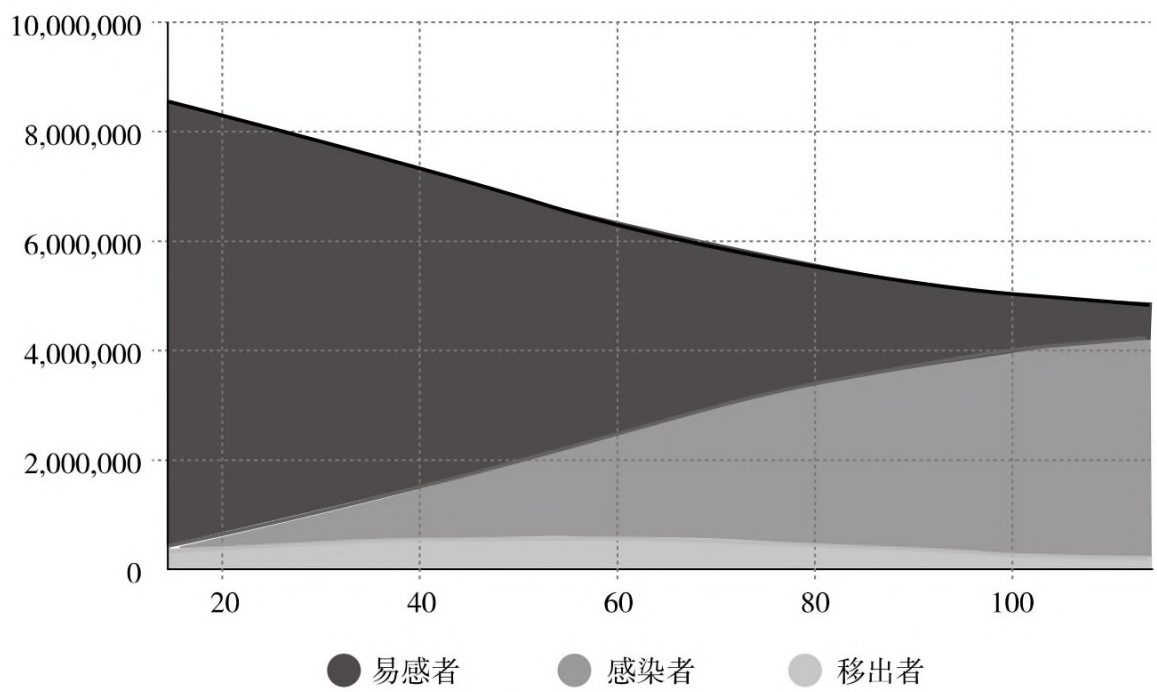


图 3 经典 SIR 传染病模型

4 讨论

4.1 降低感染率,提高移出率

从 SIR 模型来看,要想有效控制疫情的蔓延,我们可以从降低感染率,提高移出率两个方面着手。对于个人而言,春节期间拒绝喝酒、拜年、聚会可以有效降低易感者每日接触人次,从而降低整体感染速度。患病人员和隔离观察人员要做好自我

隔离,积极配合治疗,主动隔离防护能够有效抑制基本再生数的增加(基本再生数是指一个感染源把疾病传染给其他人的平均数)。患者的衣物,用品要做好处理,防治交叉感染,家庭其他成员要注意卫生,家居用品及时消毒。人群的密切接触是导致疫情爆发蔓延的重要因素,疫情期间要有效提高规避系数,尽量待在家中,安心休息,保护自己的健康安全。国家要坚决杜绝口罩等医疗物品

的物价提高,严厉打击出售劣质口罩的商家,降低防护成本,防止感染率的提升。各级党委、政府及有关部门,要把人民群众生命安全和身体健康放在第一位,组织各种力量防疫抗疫,采取切实有效措施,坚决遏制疫情蔓延势头。

4.2 针对传染病的防治要采取严谨务实的态度,堵死防控漏洞

这次面对新型冠状病毒肺炎的爆发,前期由于专家采取了面对科学的一贯严谨认真的态度,在制定传染病确证的标准时过于谨慎,导致前期的数据出现偏差,近10天的患病人数增加极少,上层决策者误以为此次的传染病已经得到控制,继而错过了防疫控疫的黄金时间。传染病的防治不同于科学研究,科学研究务必保持科学严谨、求真务实的态度,任何一个漏洞都可能导致科学结论的错误,甚至背道而驰。而面对疫情的诊断便不能如此严格,遇到可疑患者就要及时隔离,采用早发现、早隔离、早诊断、早治疗的措施。如果不能及时发现问题并作出有效应对,疫情得不到有效措施进行控制将会造成巨大的损失。

4.3 完善野生动物保护法

目前我国的《野生动物保护法》在食用圈养的野生动物等方面条例存在一定的漏洞,许多不法分子捕杀野生动物,特别是非重点保护对象的野生动物。2003年的非典和此次新型冠状病毒肺炎的疫情表明,部分野生动物的体内携带大量病毒,它们并不同于我们喂养的家禽、家畜等,经过严格的健康监测。即使部分野生动物本身健康情况良好,但由于人体机能和动物并不也完全一样,在动物体内没有表现出患病现象,但人类接触到其携带的病毒后,可能会表现出严重症状。针对这一情况,相关的公共安全卫士组织要将野生动物病毒研究放在重要位置,对于那些携带大量不可知病毒的野生动物要实行严格管理措施,关于中间的宿主媒介要重点关注。不仅如此,由于公共卫生安全事件相较于其他事件,发生频率并不高,在疫情爆发前期,许多部门职能分工并不明确,导致许多单位并不能积极采取相应措施应对疫情。对于卫生健康部门遇到这种全国性疫情的大事件也缺少大量经验,所以在疫情安全度过后,可以实行一些疫情爆发的实地演习,锻炼疫情防控关键群体的工作能力。

4.4 利用互联网、人工智能、大数据等前沿科技赋能疫情防控

新型冠状病毒肺炎爆发后。国家采用互联网

及时通报疫情发展情况,学校建立汇报个人安全系统,许多传染病学者利用大数据研究疫情拐点,以便不同时间段采取不同措施抑制疫情。各政府部门需要把各种信息传播分析技术有机地和国家治理体系结合起来,提高治理效能。把新技术与老办法结合起来,不仅采用宣传单、广播的形式,也可以采用网上举报,网上监测的形式防疫控疫。现如今随着疫情的发展,武汉一线的医护人员工作压力和强度很大,我们可以利用互联网减轻医护人员的压力。对于病患情况轻微的情况,可以采用网上免费问诊,采用全国的网上医护能力支援武汉。同时也可以利用人工智能机器人为病重患者和隔离人员提供食物,尽量避免其同健康人员的接触。面对重大疫情突发状况,红十字会医疗物资调动效率低下,中转环节缓慢的问题,可以采用地区物物联合,去中心化。利用民间力量和当地有影响力的人直接和医院对接,提高物资利用效率。

4.5 利用新媒体做好防疫控疫的宣传

在疫情的爆发下,有部分不法分子散播谣言,制造恐慌情绪,国家和权威部门要及时利用新媒体进行辟谣,安稳民众情绪。专家可以通过自媒体,网络平台等方式为民众解答相关问题,传达疫情真相。同时各个社区可以建立社区群进行防疫抗疫的宣传,针对物资运输车进入农贸批发市场实施安全管理,留一个出口进出,既保证了生活必需品的供应又能保障当地居民的安全。

参考文献

- [1] 习近平总书记在中共中央政治局常务委员会召开会议《研究加强新型冠状病毒感染的肺炎疫情防控工作》[N]. 人民日报,2020-02-04(1).
- [2] 魏婉笛. 踏着传染病的脚步,人类历史一路走来[N]. 健康报,2020-02-15(004).
- [3] 郭露露. SIR模型及其在麻疹疫情中的应用[D]. 济南: 山东大学,2018.
- [4] 张佳. SIR模型及其在SARS疫情中的应用[D]. 济南: 山东大学,2019.
- [5] 李承倬,武文韬,潘振宇,等. 基于SIR模型和基本再生数的浙江省新型冠状病毒肺炎防控效果分析[J]. 浙江医学,2020,42(4):311-314.

责任编辑:陈 潘

责任校对:董宝平