

Article

# Assessment of COVID-19 Epidemic Control Efficiency Based on SIRS Model

Kai Xu <sup>1,\*</sup>, Xiaofeng Xie <sup>2</sup>, Xing Hang <sup>1</sup>, Fengying Zhang <sup>2</sup>, Qian Qian <sup>3</sup>, Zongfang Zhou<sup>4</sup>, Dongyang Li <sup>1</sup> and Yu Jiang <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Business School, Chengdu University, Chengdu (610106), Sichuan, China

<sup>2</sup> West China School of Nursing /West China hospital, Sichuan University, Chengdu (610041), Sichuan, China

<sup>3</sup> School of Business, Sichuan Normal University, Chengdu (610101), Sichuan, China

<sup>4</sup> School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu (610054) Sichuan, China

\* Correspondence: xukai@cdu.edu.cn

Received: June 24, 2021; Accepted: October 27, 2021; Published: October 30, 2021

**Abstract:** Based on the SIRS epidemic model embedded in complex network theory and the COVID-19 spreading characteristics, the influence of prevention & control and treatment on the contagion of COVID-19 and the stability of social network is analyzed separately in this paper. The results show that the contagion of COVID-19 leads to the risk stability of social network. The number of infected persons is decreased by prevention & control and treatment which drives social network to risk-free stability. The treatment is more effective than prevention & control against COVID-19. Compared with prevention & control, treatment can make social network more risk-free and stable faster.

**Keywords:** Control Efficiency; COVID-19 Epidemic; SIRS Model; Social Network Stability

## 基于 SIRS 模型的新冠肺炎疫情管控效率评估

徐凯 <sup>1,\*</sup>, 谢小凤 <sup>2</sup>, 杭行 <sup>1</sup>, 张凤英 <sup>2</sup>, 钱茜 <sup>3</sup>, 周宗放 <sup>4</sup>, 李东阳 <sup>1</sup>, 江宇 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> 成都大学 商学院, 四川 成都 610106

<sup>2</sup> 四川大学 华西护理学院/华西医院, 四川 成都 610041

<sup>3</sup> 四川师范大学 商学院, 四川 成都 610101

<sup>4</sup> 电子科技大学 经济与管理学院, 四川 成都 610054

\* 通讯作者: xukai@cdu.edu.cn

**摘要:** 文章基于嵌入复杂网络理论的 SIRS 传染病模型, 结合新冠肺炎疫情蔓延所呈现的特征, 分别分析了防控和救治措施对新冠肺炎病毒传染和社会网络稳定性的影响。研究表明: 新冠肺炎病毒的传染导致社会网络最终趋于有风险稳定, 通过防控救治可以降低感染人群数量, 驱使社会网络达到无风险稳定; 相较于防控, 救治对新冠肺炎病毒传染的遏制具有更高的效率; 且相较于防控, 救治能更快的使社会网络趋于无风险稳定。

**关键词:** 管控效率; 新冠肺炎疫情; SIRS 模型; 社会网络稳定性

### 1. 引言

据世界卫生组织 (WHO) 数据显示, 截至 2021 年 6 月 17 日, 全球 168 个国家和地区报告确诊新型冠状病毒肺炎 (以下简称新冠肺炎) 病例达 17669.3988 万, 累计死亡超过 383 万人[1]。近半年来, 中国大陆新冠肺炎患者多为境外输入或与其密切接触者, 充分表明中国新冠肺炎疫情已进入相对稳定状态, 故全国范围内已在 2020 年夏秋之际全面复学复工复产; 但随着我国大部分地区寒冬的来临, 特别是近期的河北、辽宁和黑龙江等地, 新冠肺炎病毒卷土重来, 疫情防控形势依然严峻。早在 2020 年初, 为了阻断病毒随人口迁徙而迅猛扩散, 从中央到地方, 中国各级政府迅速采取空前的限行和隔离防控措施 (以下简称防控)。各地相继启动重大突发公共卫生事件 I 级响应, 投入巨大人力和物力, 对来自或途经湖北人员跟进排查, 对疑似或确诊患者进行隔离观察或者治疗, 疫情最严重的湖北省实施了严格的出行限制, 全国城镇陆续关闭了公共交通, 实施了严格的封闭管理, 全社会自觉在家隔离, 戴口罩出门, 人员聚集场所关闭, 企业延期复工, 学校延期开学, 春节假期延长。上述措施有助于阻断病毒传播, 降低了疾病传染率, 同时经过专门定点医院药物和器械治疗 (以下简称救治), 疫情得到有效缓解, 并于 2020 年 3 月份始逐步趋于稳定。

目前, 国内外学者已对新冠肺炎防控、患者救治以及对经济的影响进行了卓有成效的研究。Jia 等[2]基于人口移动数据, 构建人口流动-风险源模型, 为疫情早期的应急管理和相关决策提供依据。Wu 等[3]运用青海鼠疫模型, 研究青海新冠肺炎传染及患者治疗情况, 发现青海采取的预防和控制措施很有效。Shen 等[4]介绍了中国加强人员管理、个人防护、环境清洁消毒和健康教育等提高公共交通安全的预防和控制新冠肺炎的经验。Rutayisire 等[5]针对非洲医疗资源缺乏的困难, 提出合作预防和控制是消除新冠肺炎的希望路径。Liu 等[6]的研究为新冠肺炎大流行期间, 其他国家的外科医生和卫生保健提供了决策参考。Tartari 等[7]研究表明有效隔离是防控的关键, 并强调国际统一个人防护的重要性。Wang 等[8]认为新冠肺炎病毒在特定环境中传染性更强, 并分别为疗养院、孤儿院和监狱的健康管理、个人防护和预防措施提供了实际指导。白宁等[9]基于非自制动力学方程, 对湖北省疫情进行预测, 并评估了相应控制策略的有效性, 揭示了对密切接触者的追踪隔离是最有效的疫情控制措施。潘理虎等[10]运用多智能体构建病毒防控模型, 分析病毒传播趋势, 为城市疫情防控提高决策支持。Yang 等[11]、Wang 等[12]、陈彬等[13]、朱翌民等[14]、孙皓宸等[15]和尹楠[16]基于 SIR 模型, 分别从不同侧面对疫情走势进行研究, 并对校园、工作场区和市中区等重点区域的疫情传播风险进行了预测与防控措施评估。喻孜等[17]和 Li 等[18]对中国政府行政干预和防控疫情的效果进行了初步评估。朱启荣等[19]实证研究了新冠疫情对我国宏观经济和产业的影响。Nishi 等[20]从社交网络的视角, 研究控制病毒传播和维持经济发展之间的平衡问题, 为政策制定者提供参考, 同时强调了戴口罩和消毒等行为习惯可有效降低传染规模。上述有关新冠肺炎疫情的研究, 为我们提供了思路, 激发了笔者对疫情防控救治效率的思考。而现有新冠肺炎疫情的研究中, 鲜见针对限制出行、隔离防控和专门救治效果的综合性评估文献。因此, 有必要重点针对政府限行隔离防控和专门救治新冠肺炎的效率进行科学评估, 研究疫情发展趋势, 分析防控和救治措施对疫情稳定状态的影响。

## 2. 研究设计

### 2.1. 基本假设

随着通讯技术的深入发展, 社会越来越呈现网络化的趋势, 某个区域如学校、医院、公司或村落等成员聚集, 形成众多区域社会网络, 区域社会网络彼此相链接, 形成网络社会。现有研究表明, 网络社会中, 新冠肺炎病毒传播的主要途径是呼吸道飞沫和密切接触, 相对密闭或污染环境中也存在气溶胶或接触传播的可能[21]。为讨论方便, 本文把病毒传播途径归类为飞沫和接触传播, 给出如下几点假设:

假设 1: 网络社会中, 以人与人之间飞沫或接触关系为边, 以每个人为节点构成社会网络。在社会网络中, 节点总数量保持不变, 记为  $N$ , 人群可以被划分为三类: 易感者  $S$ , 感染者  $I$ , 康复者  $R$ 。

(1) 易感者  $S$ : 社会上各年龄段人群对新冠肺炎病毒没有免疫力, 普遍容易感染, 故均为易感者, 即普通社会网络环境中, 新冠肺炎病毒经飞沫和密切接触等传染的人群。

(2) 感染者  $I$ : 有新冠肺炎疫情爆发区域旅居史者或与爆发区域旅居者有密切接触者或与潜在新冠肺炎感染者有密切接触者, 且出现发热、乏力、干咳, 逐渐显现呼吸困难等症状者, 称为感染者, 包括官方披露的确诊者和疑似者。

(3) 康复者  $R$ : 感染者接受专业门诊医院治疗一段时间之后, 免疫力得到增强, 体温、呼吸道和肺部炎症等符合出院标准, 称为康复者, 康复者源于易感者和感染者。

假设 2: 感染者通过飞沫传播或密切接触易感者, 使易感者以概率  $\lambda$  变为感染者。称  $\lambda$  为新冠肺炎病毒的传染概率, 表征了新冠肺炎病毒在社会网络中的传播扩散速度。

随着新冠肺炎病毒防控技术的提高, 以及防控的进一步落实, 易感者中部分人员抵抗病毒的免疫能力得到提升。并且, 由于医疗条件的限制, 少部分感染者未能如期入院治疗, 居家隔离用药而逐渐康复。一般来讲, 相较于感染者, 易感者更易转变为康复者。为不失一般性, 假设如下:

假设 3: 易感者以概率  $\alpha$  转化为康复者, 感染者以概率  $\beta$  转化为康复者, 其中  $\beta \leq \alpha$ 。

对于社会网络中的感染者, 为降低其病毒传播的危害及对社会网络的冲击, 定点医院收治治疗。大多新冠肺炎病毒患者经过医院治疗能够康复。不失一般性, 假设如下:

假设 4: 如果通过专业门诊医院救治, 比例为  $\gamma$  的感染者转化为康复者, 称  $\gamma$  为新冠肺炎病毒传播的救治率,  $\gamma$  代表救治对新冠肺炎病毒传播的管控效率。

对于社会网络中的易感者, 可以通过切断或远离与感染者或潜在感染者的接触等防控, 避免飞沫传播或密切接触, 从而提高自身的免疫能力, 直接转化为康复者。不失一般性, 假设如下:

假设 5: 如果通过限制出行和隔离防控, 比例为  $\eta$  的易感者转变为康复者, 称  $\eta$  为新冠肺炎病毒传播的防控率,  $\eta$  表征了防控对新冠肺炎病毒传播的管控效率。

由于企业复工、学生复学、防控疲劳和境外输入等外部环境的变化, 以及康复者自身保护意识的淡化, 康复者对新冠肺炎病毒的免疫能力可能会降低, 重新转变为易感者, 故假设如下:

假设 6: 康复者以概率  $\psi$ , 重新转变为易感者。

## 2.2 建立模型

由  $N$  个人构成的社会网络中, 网络的节点为每个人, 网络的边为各节点间的飞沫或接触关系。节点  $i$  的度  $k_i$  定义为与该节点相连的其他节点数目, 网络中所有节点  $i$  的度  $k_i$  的平均值称为网络平均度,

记为  $\langle k \rangle$ ,  $P(k_i)$  表示随机选定一个节点的度为  $k_i$  的概率, 可得  $\langle k \rangle = \sum_{i=1}^n k_i P(k_i)$ 。由假设 2 至假设

5, 在社会网络中, 易感者可能直接转化为康复者, 也可能首先转化为感染者, 感染者居家用药或住院治疗, 转化为康复者, 且康复者具有暂时免疫能力, 内外环境的变化, 使得康复者可能逆变为易感者。根据上述转换过程, 构建嵌入防控和救治两项管控措施的 SIRS 传染演化模型 (1)。

$$\begin{cases} \frac{dS_k(t)}{dt} = -\lambda k \Theta(t) S_k(t) - \alpha S_k(t) - \eta S_k(t) + \psi R_k(t) \\ \frac{dI_k(t)}{dt} = \lambda k \Theta(t) S_k(t) - \beta I_k(t) - \gamma I_k(t) \\ \frac{dR_k(t)}{dt} = \beta I_k(t) + \gamma I_k(t) + \alpha S_k(t) + \eta S_k(t) - \psi R_k(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $S_k(t), I_k(t)$  和  $R_k(t)$  分别表示度为  $k$  的三类人群在  $t$  时刻网络中所占比例, 分别称之为易感者密度、感染者密度和康复者密度, 故  $S_k(t) + I_k(t) + R_k(t) = 1$ 。  $\Theta(t)$  表示  $t$  时刻随机取一条边与感染者飞沫或接触的概率。即

$$\Theta(t) = \frac{\sum_k kp(k)I_k(t)}{\sum_s sp(s)} = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k kp(k)I_k(t) \quad (2)$$

### 2.3 社会网络稳定性划分

模型 (1) 刻画了易感者、感染者和康复者之间的转化关系。经过一段时间的传染演化之后, 若新冠肺炎病毒在社会网络中的传染处于不确定或无序状态, 则认为社会网络处于不稳定状态; 若新冠肺炎病毒在社会网络中的传染趋于稳定, 即社会网络中易感者、感染者和康复者三类人群各自密度趋于定值, 则认为社会网络处于稳定状态, 这正是文章所关注的状态。因此, 本文主要讨论模型 (1) 的稳定解。社会网络的稳定性可以划分为有风险稳定和无风险稳定。

**定义 1. 有风险稳定:** 社会网络中的有风险稳定是指, 经过一段时间的传染演化后, 新冠肺炎病毒的传染趋于稳定, 此时, 社会网络中仍然存在感染者, 但感染者在社会网络中的密度最终趋于某一常量  $I^*$ , 称易感者、感染者和康复者各自在社会网络中的密度向量  $(S^*, I^*, R^*)$  为有风险稳定点  $E^*$ 。

根据定义 1, 当社会网络处于有风险稳定时, 感染者始终存在于网络中, 但其数量不再变化, 此时, 新冠肺炎病毒仍具传染性, 但社会网络处于相对有序和确定的状态。当外部环境发生变化时, 有风险稳定状态可能被打破, 社会网络重新回到无序和不确定状态。

**定义 2. 无风险稳定:** 社会网络中的无风险稳定是指, 在经过一段时间的传染演化后, 新冠肺炎病毒不再具有传染性, 此时, 社会网络中不再存在感染者, 即  $I^* = 0$ , 称易感者、感染者和康复者各自在社会网络中的密度向量  $(S^{0*}, 0, R^{0*})$  为无风险稳定点  $E^0$ 。

根据定义 2, 当社会网络处于无风险稳定时, 网络中不存在感染者, 新冠肺炎病毒不再具有传染性。外部条件未发生变化时, 社会网络处于可持续发展的健康状态。

### 2.4 新冠肺炎病毒的传染阈值分析

直接求解模型 (1) 比较困难, 而在稳定状态条件下求解则比较容易。令  $S^*, I^*$  和  $R^*$  分别为社会网络处于有风险稳定时, 整个网络中易感者、感染者和康复者密度。

**定义 3:** 当新冠肺炎病毒传染概率  $\lambda$  小于某一概率值  $\lambda_c$  时, 新冠肺炎病毒在社会网络中不再具有传染性, 称  $\lambda_c$  为新冠肺炎病毒在社会网络中的传染阈值。

命题 1: 社会网络中, 考虑防控救治的新冠病毒存在一个传染阈值  $\lambda_c = \frac{\langle k \rangle (\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\langle k^2 \rangle \psi}$ ,

即当  $\lambda > \lambda_c$  时, 新冠病毒在社会网络中存在传染性, 社会网络最终趋于有风险稳定; 而当  $\lambda < \lambda_c$  时,

新冠病毒在社会网络中不再具有传染性，社会网络最终趋于无风险稳定。

证明：由模型（1）可得：

$$\begin{cases} S_k^* = \frac{(\gamma + \beta)I_k^*}{k\lambda\Theta^*} \\ R_k^* = \frac{(\alpha + \eta + k\lambda\Theta^*)(\beta + \gamma)I_k^*}{k\lambda\Theta^*\psi} \end{cases} \quad (3)$$

结合（2）与归一化条件  $S_k(t) + I_k(t) + R_k(t) = 1$ ，可得：

$$I_k^* = \frac{k\beta\Theta^*\psi}{(\alpha + \eta + \psi + k\beta\Theta^*)(\gamma + \beta) + k\beta\Theta^*\psi} \quad (4)$$

将（4）代入（2），可得：

$$\Theta^* = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k kp(k) \frac{k\beta\Theta^*\psi}{(\alpha + \eta + \psi + k\beta\Theta^*)(\gamma + \beta) + k\beta\Theta^*\psi} = F(\Theta^*) \quad (5)$$

可见（5）是关于  $\Theta^*$  的自相容方程， $\Theta^* = 0$  显然是（5）的一个平凡解。

由于  $\frac{dF(\Theta^*)}{d\Theta^*} > 0$ ，故  $F(\Theta^*)$  关于  $\Theta^*$  严格单调递增，因此当

$\frac{dF(\Theta^*)}{d\Theta^*} \Big|_{\Theta^*=0} = \frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle} \frac{\lambda\psi}{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)} > 1$  时，方程（5）存在  $0 < \Theta^* < 1$  的非平凡解，从而得出

新冠肺炎病毒传染阈值  $\lambda_c = \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\psi}$ 。将（5）的非平凡解  $\Theta^*$  代入（4），可得  $I_k^*$ ，

代入（3）可得  $S_k^*$  和  $R_k^*$ 。又因  $S^* = \sum_k p(k)S_k^*$ ， $I^* = \sum_k p(k)I_k^*$ ， $R^* = \sum_k p(k)R_k^*$ 。故存在社会

网络的新冠病毒稳定点  $E^* = (S^*, I^*, R^*)$ 。即当  $\lambda > \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\psi}$  时，新冠病毒在社会

网络中存在传染性，社会网络最终趋于有风险稳定点  $E^*$ 。

当社会网络处于无风险稳定时，即  $I^* = 0$ ，可得新冠病毒在社会网络中的无风险稳定点

$E^0 = (S^{1*}, 0, R^{1*})$ ，即当  $\lambda < \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\psi}$  时，新冠病毒在社会网络中消失，社会网络

最终趋于无风险稳定点  $E^0$ 。

文献研究表明社会网络具有较小的平均路径长度和较大的集聚系数，即社会网络具有小世界特性

[22]，故有  $k \sim \langle k \rangle$ ，可得新冠病毒在社会网络中的传染阈值： $\lambda_c^1 = \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\langle k \rangle \psi}$ 。

### 2.5 传染阈值对防控救治的敏感性分析

上述阈值表达式  $\lambda_c$  和  $\lambda_c^1$  表明，阈值均随着  $\eta$  和  $\gamma$  的增加而增大。因此，无论新冠病毒传染概率大小，随着防控救治力度加大和经验积累，社会网络趋于无风险稳定的概率增加。

命题 2：在社会网络结构等其他条件不变的情景下，当采取相同强度的防控和救治，即  $\eta=\gamma$  时，救治比防控更能提高新冠病毒传染阈值，即救治比防控的效率更高。

证明：由命题 1 中  $\lambda_c$  的表达式，可得：

$$\frac{d\lambda_c}{d\eta} = \frac{\langle k \rangle (\gamma + \beta)}{\langle k^2 \rangle \psi} > 0, \quad \frac{d\lambda_c}{d\gamma} = \frac{\langle k \rangle (\alpha + \eta + \psi)}{\langle k^2 \rangle \psi} > 0$$

因此，新冠病毒传染阈值随着防控和救治力度的增大而增大。由命题 2 的  $\eta=\gamma$ 、假设 3 的  $\beta \leq \alpha$  和  $\psi > 0$ ，可以得到：

$$(\alpha + \eta + \psi) > (\gamma + \beta),$$

显而易见，传染阈值对救治率敏感性大于传染阈值对防控率敏感性，即相较于防控，救治更能提高新冠病毒传染阈值，故相较于防控率，救治率对传染阈值的贡献更大。因此，救治比防控的效率更高。

### 3. 数值仿真分析

实际上，由新冠病毒传染阈值的表达式可见，阈值均随着防控率和救治率的增大而增大，因此无论网络是否均匀，阈值与防控救治效果之间的变化规律不受影响。基于此，为简化研究，本文选用均匀网络进行数值仿真。小世界网络被视为均匀网络的代表，具有较大的聚集系数和较小的平均路径长度，被广泛应用于流行病和经济管理领域的研究[23]。

为了更好的刻画防控救治对新冠病毒传染和社会网络稳定性的影响，结合目前疫情形势，本文仅对有风险稳定性进行数据仿真分析。当社会网络处于有风险稳定时，分别就采取防控和救治时，考察风险管控措施对新冠病毒传染和社会网络稳定状态的影响。为此，假设社会网络中人群总数为 100000，初始时刻网络中有 30 个感染者，以下仿真图中横轴代表时间，纵轴代表人数。借鉴文献[4]、[9]、[24]和[25]的参数设置和研究成果，设易感者转变为感染者的传染概率  $\lambda=0.3$ ；康复者转变为易感者的概率  $\psi=0.3$ ；网络平均度  $\langle k \rangle = 3$ 。

#### 3.1 社会网络中三类人群总量变化趋势

在不考虑防控救治的情景下，即当  $\eta=0, \gamma=0$  时，令易感者转化为康复者的概率  $\alpha=0.2$ ，感染者转化为康复者的概率  $\beta=0.2$ ；根据上述参数，可得

$$\lambda_c^1 = \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\langle k \rangle \psi} = 0.11 < 0.3,$$

即  $\lambda_c^1 < \lambda$ 。

根据模型（1）和上述参数的设定，进行数值仿真，如图 1 所示。

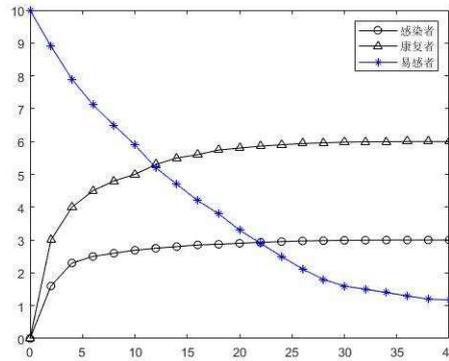


图 1 未采取防控救治的三类人群随时间变化趋势

由图 1 可见，当传染概率大于传染阈值时，社会网络最终趋于有风险稳定，且前期感染者数量增长较快，这与命题 1 的结论一致，并与现实中新冠肺炎传染蔓延现象一致。现实中，新冠肺炎病毒的传染性较强，易感人群被感染的概率较大，因而社会网络中感染者数量增多，在不采取限制出行、隔离等防控和专门救治的情景下，网络中感染者数量增长速度较快。另外，感染者以概率  $\beta=0.6$  转变为康复者，故感染人群不会无限制的增加，最终整个社会网络中感染人群、易感人群和康复人群趋于某三个常数。

同时考虑防控救治的情景下，当  $\eta=0.1, \gamma=0.2$  时，令易感者转化为康复者的概率  $\alpha=0.2$ ，感染者转化为康复者的概率  $\beta=0.2$ ；根据上述参数，可得

$$\lambda_c^1 = \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\langle k \rangle \psi} = 0.27 < 0.3, \text{ 即 } \lambda_c^1 < \lambda.$$

根据模型 (1) 和上述参数的设定，进行数值仿真，如图 2 (a) 所示。

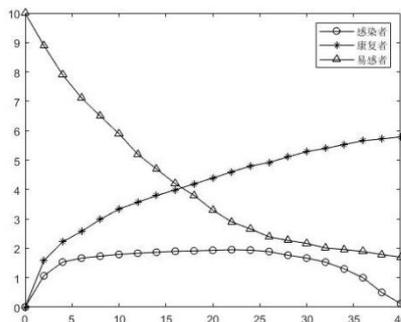


图 2 (a) 采取防控救治的三类人群随时间变化趋势

由图 2 (a) 可以发现，当传染概率大于传染阈值时，社会网络最终趋于有风险稳定，这与命题 1 的结论一致，并与现实中新冠肺炎传染蔓延现象一致。对比图 1 和图 2 (a)，不难发现，由于采取了防控救治措施，前期感染者数量增长较慢，且感染人群数量比未采取措施时少很多，进一步说明防控救治措施有效。图 2 (a) 表明最终整个社会网络中感染人群、易感人群和康复人群趋于某三个常数。

同时考虑防控救治的情景下，当  $\eta=0.4, \gamma=0.5$  时，令易感者转化为康复者的概率  $\alpha=0.2$ ，感染者转化为康复者的概率  $\beta=0.2$ ；根据上述参数，可得

$$\lambda_c^1 = \frac{(\alpha + \eta + \psi)(\gamma + \beta)}{\langle k \rangle \psi} = 0.9 > 0.3,$$

即  $\lambda_c^1 > \lambda$ 。

根据模型 (1) 和上述参数的设定, 进行数值仿真, 如图 2 (b) 所示。

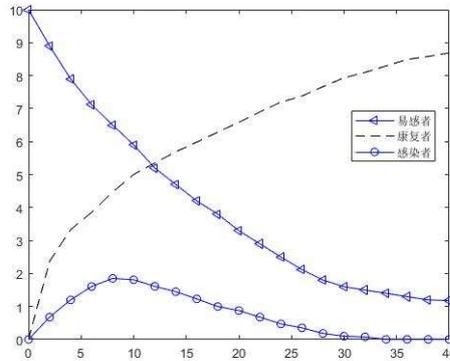


图 2 (b) 采取防控救治的三类人群随时间变化趋势

图 2 (b) 表征了当传染概率小于传染阈值时, 虽初始阶段有不少感染者, 但社会网络最终趋于无风险稳定, 这与命题 1 的结论一致。现实中, 也可以观察到此现象, 新冠病毒在社会网络中传染, 由于防控措施得力, 易感者被传染的可能性大大降低, 同时感染者会得到专门救治, 当救治率和防控率大于传染概率时, 网络中的感染者数量将逐步减少, 最终导致社会网络中不再存在新冠病毒的传染。

### 3.2 防控对社会网络稳定状态的影响

在上述参数设定的基础上, 仅考察限制出行和隔离防控及防控率  $\eta$  对新冠病毒传染和社会网络稳定状态的影响。当  $\eta=0$  时, 即顺其自然, 不采取任何防控措施时, 显而易见, 社会网络趋于有风险稳定, 且感染者数量会比较大。由图 2 可见, 当  $\eta=0.9$  时, 社会网络中感染者数量趋于 0, 即趋于无风险稳定; 当  $\eta=0.6$  时, 社会网络中最终仍然存在一定数量的感染者, 且网络趋于有风险稳定。当  $\eta \leq 0.6$  时, 随着防控率的增加, 网络中感染者数量减少, 并且存在一个防控率阈值  $\eta_c$ , 当防控率大于此阈值时, 社会网络从有风险稳定转变为无风险稳定。

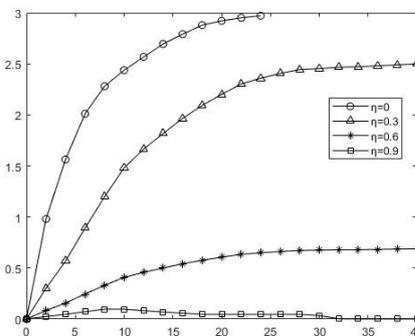


图 3 感染者数量对防控率的敏感性

### 3.3 救治对社会网络稳定状态的影响

在上述参数设定的基础上, 仅考察专门救治及救治率  $\gamma$  对新冠病毒传染和社会网络稳定状态的影响。当  $\gamma=0$  时, 即顺其自然, 不采取任何专门救治措施时, 显而易见, 社会网络趋于有风险稳定, 且

感染者比例会比较大。由图 3 可见，当  $\gamma=0.6$  时，社会网络中感染者数量趋于 0，即趋于无风险稳定；当  $\gamma=0.4$  时，社会网络中最终仍然存在一定数量的感染者，且网络趋于有风险稳定。当  $\gamma \leq 0.4$  时，随着救治率的增加，网络中感染者数量减少，并且存在一个救治率阈值  $\gamma_c$ ，当救治率大于此阈值时，社会网络从有风险稳定转变为无风险稳定。

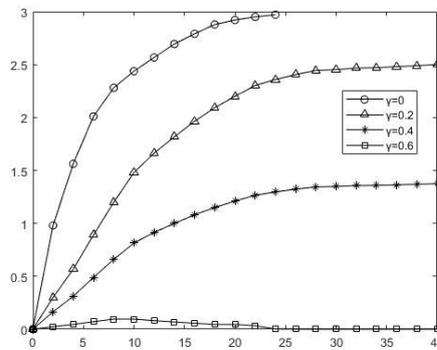


图 4 感染者数量对救治率的敏感性

由图 3 和图 4 可以看出，采取防控救治措施能够使社会网络从有风险稳定转化为无风险稳定。对比防控和救治两类措施发现，当社会网络处于有风险稳定时，同时将防控率  $\eta$  和救治率  $\gamma$  提高到 0.6 时，采取救治措施已使社会网络处于无风险稳定状态，而防控措施情景下社会网络仍然处于有风险稳定，表明相较于防控，救治能更快的使社会网络转变为无风险稳定，即救治比防控效率更高，这与命题 2 一致。

#### 4. 结论

文章结合 2019 年 12 月爆发的新冠肺炎疫情实时发展状况，运用 SIRS 模型，对 2020 年 1 月 25 日以来政府限行、隔离防控和专门救治效果进行评估。首先，推导出社会网络中新冠肺炎病毒传染阈值表达式，发现防控率和救治率均与传染阈值正相关，因此可以采取适当的防控和救治措施抑制新冠肺炎病毒的传染。其次，数学推导表明，传染阈值对救治率的敏感性大于其对防控率的敏感性，即相较于防控率，救治率对新冠肺炎病毒传染阈值的贡献更高，也就是说以相同幅度提高防控率与救治率，救治比防控更有效。最后，数值仿真表明，防控和救治均对社会网络的稳定性有显著影响，均会降低新冠肺炎病毒传播中感染人群数量；当社会网络处于有风险稳定时，通过防控和救治都可以使其趋于无风险稳定，且相较于防控，救治能更快地使社会网络趋于无风险稳定。因此，为快速抑制新冠肺炎疫情蔓延，中国政府及时强力推出的限行、隔离、筹建或指定定点医院等防控和救治措施效果显著，虽然境外输入引发的新冠疫情反复在全国各地时有爆发，但实际数据表明疫情早已得到控制，人们的生产生活早已正常化。与此同时，诸如美国、印度、巴西、英国、意大利、法国、伊朗等国家新冠肺炎疫情肆虐，我国管控新冠肺炎疫情的有效措施，为境外疫情管控提供了重要的决策参考。

**Funding:** This research was funded by the National Natural Science Foundation of China, grant number 71871147; This research was funded by the Sichuan Provincial Social Science Planning Funding Project, grant number SC19B004.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

- [1] WHO. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Geneva, Switzerland: WHO; 2020[EB/OL]. Available from: <https://covid19.who.int>.
- [2] Jia J, Lu X, Yuan Y, et al. Population Flow Drives Spatio-temporal Distribution of COVID-19 in China[J]. *Nature*, 2020: 1-11.
- [3] Wu H, Zhang Q, Wu H, et al. Tackling COVID-19: Insights from the Qinghai Province Plague Prevention and Control (PPC) model[J]. *Biosafety and Health*, 2020, 2(4): 187-192.
- [4] Shen J, Duan H, Zhang B, et al. Prevention and control of COVID-19 in public transportation: Experience from China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266(Pt 2): 115291.
- [5] Rutayisire E, Nkundimana G, Mitonga H K, et al. What works and what does not work in response to COVID-19 prevention and control in Africa[J]. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, 97: 267-269.
- [6] Liu F, Wang W, Yu H, et al. Prevention and control strategies of general surgeons under COVID-19 pandemic[J]. *Surgery in Practice and Science*, 2020: 100008.
- [7] Tartari E, Hopman J, Allegranzi B, et al. Perceived challenges of COVID-19 infection prevention and control preparedness: A multinational survey[J]. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 2020, 22(9): 779-781.
- [8] Wang J, Yang W, Pan L, et al. Prevention and control of COVID-19 in nursing homes, orphanages, and prisons[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115161.
- [9] 白宁, 宋晨玮, 徐瑞. 基于动力学模型的 COVID-19 疫情预测与控制策略研究[J]. *应用数学学报*, 2020, 43(03): 483-493.
- [10] 潘理虎, 秦世鹏, 李晓文, 芦飞平, 杨芬玉. COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(11): 2244-2257.
- [11] Yang Z F, Zeng Z Q, Wang K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions[J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, 12(3): 165-174.
- [12] Wang X, Tang S Y, Chen Y, et al. When will be the resumption of work in Wuhan and its surrounding areas during COVID-19 epidemic? a data-driven network modeling analysis[J]. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50: 1-10.
- [13] 陈彬, 杨妹, 艾川, 马亮, 朱正秋, 陈海亮, 朱蒙娜, 许伟. 基于人工社会的疫情传播风险预测和防控措施评估[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(12): 2507-2514.
- [14] 朱翌民, 黄勃, 王忠震, 巨家骥, 朱良奇. 隔离措施对 COVID-19 疫情控制的模型分析[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2020, 66(05): 442-450.
- [15] 孙皓宸, 刘肖凡, 许小可, 吴晔. 基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析[J]. *物理学报*, 2020, 69(24): 74-83.
- [16] 尹楠. 基于 SIR 模型的有限区域内新冠肺炎疫情传播仿真模拟[J]. *统计与决策*, 2020, 36(05): 15-20.
- [17] 喻孜, 张贵清, 刘庆珍, 吕忠全. 基于时变参数-SIR 模型的 COVID-19 疫情评估和预测[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(03): 357-361.
- [18] LI Q, MED M, GUAN X H, et al. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia. 2020, 382(13): 1199-1207.
- [19] 朱启荣, 孙明松, 杨伟东. 新冠肺炎疫情对我国经济影响的评估: 基于 GTAP 模型的实证[J]. *统计与决策*, 2020, 36(21): 91-96.
- [20] Nishi A, Dewey G, Endo A, et al. Network interventions for managing the COVID-19 pandemic and sustaining economy[J]. *The National Academy of Sciences*, 2020, 117(48): 30285-30294.
- [21] 李兰娟, 朱雪灵. 新型冠状病毒肺炎疫情防控相关进展[J]. *浙江医学*, 2021, 43(01): 1-8.
- [22] Milgram S. The small world problem[J]. *Psychology Today*, 1967, 2(1): 60-67.
- [23] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440.
- [24] 耿辉, 徐安定, 王晓艳, 张勇, 尹小妹, 马茂, 吕军. 基于 SEIR 模型分析相关干预措施在新型冠状病毒肺炎疫情中的作用[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2020, 41(02): 175-180.
- [25] 钱茜, 周宗放, 李永奎. 管控策略对关联企业网络稳定状态的影响—基于关联信用风险传染的视角[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(06): 21-29.



Copyright © 2021 by the authors. This is an open access article distributed under the CC BY-NC 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).