

文章编号: 1674-8085 (2022) 02-0073-09

# 基于演化博弈和网络拓扑结构的改进 SIR 模型

## ——以疫情舆情分析为例

\*曾 寰, 李金忠, 戴贞明, 吴玉春, 付 青

(井冈山大学电子与信息工程学院, 江西, 吉安 343009)

**摘 要:** 传统 SIR 模型的初始参数是随机设定的, 同时状态转换之间没有考虑实际网络拓扑结构, 导致传播收敛效果与实际不一致。为了解决该问题, 本文提出一种基于演化博弈和网络拓扑结构改进的 SIR 模型。改进的模型首先通过演化博弈方法确定影响因子, 接着根据影响因子确定好 SIR 模型的初始感染率参数, 然后根据网络拓扑结构调整状态之间的转换概率。在真实社交网上进行疫情及舆情仿真传播实验, 研究结果表明: 疫情与舆情传播主要受网络拓扑结构影响, 在不考虑网络拓扑的情况下, 增加政府和媒体管控力度以及个人名誉损失可以延缓传播时间。

**关键词:** 演化博弈; 网络拓扑结构; 社会网; 疫情; 舆情; SIR 模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2022.02.012

## IMPROVED SIR MODEL BASED ON EVOLUTIONARY GAME AND NETWORK TOPOLOGY —— TAKING EPIDEMIC AND RUMOR ANALYSIS AS AN EXAMPLE

\*ZENG Huan, LI Jin-zhong, DAI Zhen-ming, WU Yu-chun, FU Qing

(School of Electronics and Information Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China)

**Abstract:** The initial parameters of the traditional SIR model are set randomly, and the actual network topology is not taken into account between the state transitions, which results in the inconsistency between the propagation convergence effects and the reality. To solve this problem, this paper proposes an improved SIR model based on the evolutionary game and network topology. The improved model firstly determines the impact factors by the evolutionary game method, then determines the initial infection rate parameters of the SIR model according to the impact factors, and then adjusts the transition probability among the states according to the network topology structure. The simulation experiments of epidemic and rumor spreading on real social networks show that the spreading of epidemic and rumor is mainly affected by the network topology. In the case of ignoring the network topology, increasing the government and media controls and personal reputation loss can delay the transmission time.

**Key words:** evolutionary game; network topology; social network; epidemic; rumor; SIR model

收稿日期: 2021-12-21; 修改日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(62141203, 61762052); 江西省自然科学基金项目(20212BAB202021); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ180574); 江西省高校人文社科项目(JC19235); 吉安市指导性科技计划项目(吉市科计字 2021[8]号基础 11); 井冈山大学科研基金项目(JZ2004)

作者简介: \*曾 寰(1990-), 男, 江西吉安人, 实验师, 硕士, 主要从事数据挖掘研究(E-mail:584251395@qq.com).

## 0 引言

随着交通工具及信息化科技的日益进步,人类社会步入一个网络互联的时代。与此同时,各种扩散现象在不同网络中涌现,例如在通讯网络上的谣言传播<sup>[1]</sup>,计算机病毒传播,以及在爆发疫情时,在人类社会接触网上的流行病传播<sup>[2]</sup>。这些“疾病”传播给人们带来直接或间接的伤害。例如网络谣言的传播具有突发性且流传速度极快,并且往往含有偷换概念、以偏概全、歪曲事实以及煽动情绪等内容,扰乱社会正常秩序<sup>[1]</sup>;计算机病毒则或是对电脑硬件、软件程序造成伤害,或是对计算机网络造成堵塞,影响人们正常通讯;而疾病传播如新近的新冠肺炎则对人们的生产、生活甚至生命造成了不良影响。

目前,针对疫情及舆情的传播控制的研究方法主要分为:基于复杂网络的传播动力学方法和基于演化博弈的分析方法。基于复杂网络传播动力学的方法,如 Hu 等<sup>[3]</sup>将人群对谣言的不同态度将传播者划分成:喜欢谣言传播者、不喜欢谣言传播者和持中立态度的谣言传播者,并建立传播模型,得出持中立态度的谣言传播者对谣言传播具有积极影响。基于演化博弈的分析方法,如将人群按社会属性<sup>[4]</sup>、个人属性<sup>[1]</sup>划分建立多方博弈模型,最后计算并分析演化稳定策略。以上基于疫情和舆情的分析方法都只是从传播动力学角度或演化博弈角度单方面来考虑对疫情或舆情传播的影响。疫情和舆情的传播是多种因素共同作用的结果,本文受文献[1-4]的多方演化博弈分析方法的启发,首先构建政府-媒体-谣言传播者三方博弈模型,得到谣言传播的因子:网络知识储备、个人声誉、个人影响力以及政府和媒体的管控力度,接着根据影响因子生成 SIR 模型(Susceptible Infected Recovered Model)的感染率参数,同时传播过程中 SIR 模型状态转换概率根据网络拓扑性质进行调整,最后在真实社交网络上进行实证分析。

## 1 相关工作

基于传播动力学的方法,首先需要研究社会网的结构,社会网主要分为两类,一类是具有物理接触行为的社会接触网络,另一类为利用通信工具产生虚拟交互行为的社会通信网络<sup>[5]</sup>。目前学术界对社会网络的结构了解主要包括:具有无标度性,网络度分布总体较泊松分布广阔呈幂律分布(规则网的度分布是  $\delta$  函数,而随机网是正态分布);网络表现出小世界效应,即具有比规则网络小得多的平均节点间距离和比随机网络大得多的平均集群系数(邻节点之间也相邻,形成紧密集团的比例),网络表现出很强的群落结构:群落内部节点连接紧密,群落之间连接松弛,且节点之间连接有明显的地理偏好,人们更倾向同自己在地理位置靠近的人形成联系<sup>[6]</sup>。Li Yinwei 等<sup>[7]</sup>基于网络拓扑结构特征来研究流行病传播的预防和控制,通过构建具有无标度网络特性的无向同余网络(undirected congruence network),并在其上使用传播算法,较其他通过保度重连算法生成的网络,在减缓流行病爆发方面具有更强能力。原因在于受攻击的无向同余网络的连通分量的平均大小远大于其他受攻击网络的连通分量平均大小,说明受攻击的无向同余网络的恢复代价远小于其他受攻击网络。GrossBnaya 等<sup>[8]</sup>通过在模仿国家城市结构的模块化网络(spatial modular model)上进行流行病传播 SIR 仿真,结果显示存在两个峰值,一个处于模块内(类比一个城市),一个处于全局(类比一个国家)。接着需要分析传播模型,疾病传播与谣言传播虽然在传播内容与交互形式上存在差异,但传播过程相似,即都是通过与其他个体的社会关系作用使得传染得以扩散。

目前的疾病传播模型主要包括 SI、SIS、SIR、SEIR、SEIRD 等<sup>[9]</sup>,SI 模型用于模拟的疾病特征为:健康人一旦感染则终生都具有传染性,典型的疾病为 HIV 或为生化危机等;SIS 模型用于模拟如感冒等轻度传染病,人们在感染和易感之间反复横跳;

SIR 模型用于模拟易感者感染后成为具有感染其他人的感染者, 但当他恢复健康后就不再被感染; SEIR 用于模拟更为复杂的病毒, 易感人群感染病毒后, 会先经历一段时间的潜伏期, 之后出现症状; SEIRD 为考虑死亡率的 SEIR 模型。根据截至 2020 年 12 月 25 日丁香园数据<sup>[10]</sup>, 新冠肺炎的累计确诊人数为 96220 人, 累计死亡人数为 4776 人, 累计治愈人数为 89859 人, 使用 SEIRD 模型模拟结果如图 1 所示。

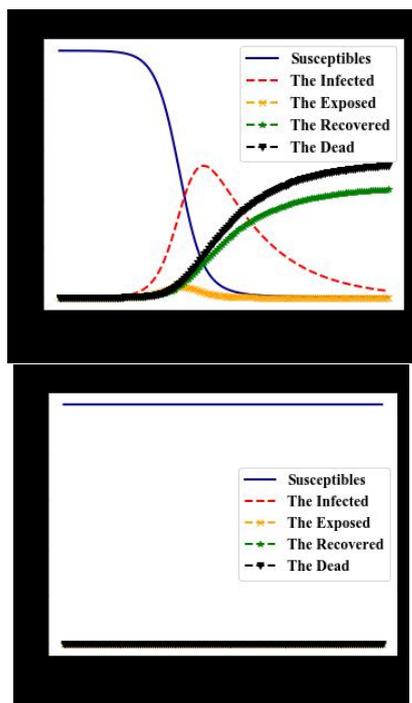


图1 考虑死亡率的SEIR模型疾病感染状态比例随时间变化  
Fig.1 The proportion of disease infections changes with time considering the death rate of SEIR model

在 SEIRD 模型中, 处于潜伏期 (Exposed) 和感染态 (Infected) 的个体都是病毒携带者, 都具有传播特性; 处于恢复态 (Recovered) 和死亡态 (Dead) 的个体具有免疫能力, 不再具备病毒传播特性, 因此本文将以此 SIR 模型作为网络疫情及舆情传播模型。

基于演化博弈论的方法, 通过建立多方博弈模型, 计算分析演化稳定策略, 得出影响谣言传播防控的影响因素。胡欢等<sup>[4]</sup>结合疫情与舆情传播的现实环境, 构建政府-媒体-造谣者三方演化模型, 在疫情爆发时, 政府主要集中精力用于防御疫情, 此时媒体应当承担疫情的舆论监管工作, 潜在造谣者发现造谣成本远大于收益, 趋于不造谣。如果希望

保持政府防御疫情, 媒体监管谣言, 造谣者不造谣的稳定状态, 会造成政府的管控收益小于管控成本, 造谣者造谣收益小于造谣成本, 媒体的监管成本小于监管收益。丁学君等<sup>[1]</sup>以在线社会网络上谣言传播者和谣言接收者作为博弈参与者, 考虑谣言传播参与者的网络知识储备、声誉以及影响力作为收益函数的参数, 认为网络知识储备占比较大时会使谣言传播得到抑制, 若谣言参与者更注重自身影响力时, 有利于谣言的传播。

针对疫情与舆情的传播演化模型, 目前未找到关于传播模型与演化博弈论相结合相关研究文献。因此, 本文提出一种基于演化博弈和网络拓扑结构改进的 SIR 模型, 使用演化博弈的方法确定传播影响因子, 再由影响因子确定好 SIR 模型的感染率, 并根据网络拓扑结构调整状态间转换概率。最后在真实社交网进行传播演化实验分析。

## 2 基于演化博弈及网络拓扑结构改进的 SIR 模型

### 2.1 传统 SIR 模型

传统 SIR 模型<sup>[11]</sup>包含三个状态: 易感态 (Susceptible)、感染态 (Infected)、恢复态 (Recovered)。处于易感态的群体以一个固定感染率从易感态逐渐变为感染态, 处于感染态的群体以一定的概率从感染态逐渐变为恢复态。尹楠等<sup>[12]</sup>分别从新冠肺炎平均感染者数量、交叉感染、接触性感染通过 SIR 模型仿真模拟得出相关预防管控措施。王志心等<sup>[13]</sup>使用 SIR 模型结合机器学习算法对国内重要省市的疫情情况进行评估, 并预测了最终的确诊人数。

### 2.2 演化博弈

疫情和舆情的传播是多方面因素作用的结果, 本文提出使用演化博弈的方法得到疫情和舆情传播的影响因子, 将围绕舆情来做具体演化博弈分析。为此, 需要构建政府、媒体及谣言传播者三方博弈模型, 需要做出一些符合疫情及舆情情况下的

三方基本假设。假定博弈模型中包括了三方利益主体即政府、媒体和谣言传播者。其中政府指具有对媒体和传播参与者可以直接管控的政府执法部门,媒体指可以对自身发布内容进行管控,以及对谣言传播者进行警告、账号封停等措施的机构。谣言传播者指的是通过微博、朋友圈等方式散播谣言进而获得个体网络知识、个人声誉以及个人影响力收益的人群。具体将博弈三方的行为分为:

政府行为: 1) 管控  $x$ , 政府通过采用补贴及惩罚的方式对媒体运营商及谣言传播者进行相应奖励及惩罚; 2) 不管控:  $1-x$ , 谣言传播者的是否传播谣言, 政府都不对媒体运营商和谣言传播者进行规范。其中  $0 \leq x \leq 1$ , 表示政府管控力度。

媒体行为: 1) 监管  $y$ , 媒体机构对自身发布内容进行严格审查, 并对相关谣言传播者进行警告、账号封停等管控措施; 2) 不监管  $1-y$ , 媒体对发布内容不做严格监管, 并放任谣言传播者行为。其中  $0 \leq y \leq 1$ , 表示媒体管控力度。

谣言传播者行为: 1) 传播谣言  $z$ , 谣言传播者通过对谣言进行传播和评价, 以获取个人知识储备(Knowledge)、个人声誉(Reputation)、个人影响力因素(Popularity)收益; 2) 不传播谣言  $1-z$ , 自觉依法维护网络环境等。其中  $0 \leq z \leq 1$ , 表示谣言传播者传播谣言的概率。

三方在疫情舆情传播过程中会产生相应的成本, 主要为:

政府成本: 当进行管控时, 会产生人力、物力等成本  $C_1$ , 同时, 在媒体能自觉做出监管措施时, 给予一定的奖励  $J$ 。当政府不实施管控时, 会造成社会对疫情及舆情的不正确看待从而导致社会恐慌等效应损失  $P$ 。

媒体成本: 当媒体对自身内容监管时, 需要付出监管的人力和物力成本  $C_2$ , 若对造谣传播者采取账号封停等措施时, 需承担损失为  $S_1$ ; 当对网络传播者不进行监管时, 媒体会受到政府罚款  $F_1$ 。

谣言传播者成本: 当传播谣言时, 需要承担相应法律责任损失为  $S_3$ , 受到政府罚款  $F_2$ , 受到媒体

运营商的账号封停的损失为  $S_2$ , 同时谣言传播者的个人声誉  $R_2$  受到影响; 当不传播谣言时, 不产生成本。

三方采取不同措施会带来相应的收益为:

政府方: 若对疫情和舆情采取管控, 会增强政府的公信力  $G$ , 同时得到相对应媒体机构和谣言传播者的罚款  $F_1$  和  $F_2$ 。

媒体方: 媒体方若实施自我监管会得到政府的奖励  $J$ , 同时, 所有用户得到安定的网络环境收益为  $H$ , 若不进行自我监管, 会得到额外的流量收益  $R_1$ 。

谣言传播者: 若选择传播谣言, 谣言传播可以获得个人知识储备  $K_1$ , 以及个人影响力  $P_1$  收益; 不传播谣言则可以获得个人知识储备  $K_1$  和个人声誉  $R_2$  的提高。

三方收益矩阵以及公式(1-12)的推导过程参考了文献[1,4], 其中政府和媒体策略为直接引用文献[4]。谣言传播者策略则根据文献[1], 将谣言传播者的收益具体为传播参与者的知识储备、个人声誉, 个人影响力, 三方收益矩阵如表 1 所示。

表 1 政府、媒体、谣言传播者三方的收益矩阵  
Tabel 1 The government, the media, and the rumor-mongers' income matrix

策略	政府			
	管控 ( $x$ )		不管控 ( $1-x$ )	
	传播谣言 ( $z$ )	不传播谣言 ( $1-z$ )	传播谣言 ( $z$ )	不传播谣言 ( $1-z$ )
监管 ( $y$ )	$zf : G - C_1 + F_1 - J$	$zf : G - C_1 - J$	$zf : -P$	$zf : 0$
	$mt : J - C_1 - S_1 + H$	$mt : J - C_1 + H$	$mt : H - C_1 - S_1$	$mt : H - C_1$
媒体 ( $1-y$ )	$cbz : K_1 + P_1 - S_2 - S_1 - F_1 - R_1$	$cbz : K_1 + R_2$	$cbz : K_1 + P_1 - S_2 - S_1 - R_1$	$cbz : K_1 + R_2$
	$zf : G + F_1 + F_2 - C_1$	$zf : G - C_1$	$zf : -P$	$zf : 0$
不监管	$mt : R_1 - F_1$	$mt : 0$	$mt : R_1$	$mt : 0$
	$cbz : K_1 + P_1 - F_1 - S_1 - R_1$	$cbz : K_1 + R_2$	$cbz : K_1 + P_1 - R_2$	$cbz : K_1 + R_2$

通过上面收益矩阵可得到, 三方期望收益分别为:

政府管控与不管控状态下的期望收益分别为  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ , 平均期望收益为  $\bar{E}_1$ :

$$E_{11} = yz(G - C_1 + F_2 - J) + y(1-z)(G - C_1 - J) + (1-y)z(G + F_1 + F_2 - C_1) + (1-y)(1-z)(G - C_1) \quad (1)$$

$$E_{12} = yz(-P) + (1-y)z(-P) \quad (2)$$

$$\overline{E}_1 = xE_{11} + (1-x)E_{21} \quad (3)$$

媒体监管与不监管状态下的期望收益分别为  $E_{21}$ ,  $E_{22}$ , 平均期望收益为  $\overline{E}_2$ :

$$E_{21} = xz(J - C_2 - S_1 + H) + x(1-z)(J - C_2 + H) + (1-x)z(H - C_2 - S_1) + (1-x)(1-z)(H - C_2) \quad (4)$$

$$E_{22} = xz(R_1 - F_1) + (1-x)zR_1 \quad (5)$$

$$\overline{E}_2 = yE_{21} + (1-y)E_{22} \quad (6)$$

谣言传播者选择传播谣言与不传播谣言状态下的期望收益分别为  $E_{31}$ ,  $E_{32}$ , 平均期望收益为  $\overline{E}_3$ :

$$E_{31} = xy(K_1 + P_1 - S_2 - S_3 - F_2 - R_2) + x(1-y)(K_1 + P_1 - F_2 - S_3 - R_2) + (1-x)y(K_1 + P_1 - S_2 - R_2) + (1-x)(1-y)(K_1 + P_1 - R_2) \quad (7)$$

$$E_{32} = xy(K_1 + R_2) + x(1-y)(K_1 + R_2) + (1-x)y(K_1 + R_2) + (1-x)(1-y)(K_1 + R_2) = K_1 + R_2 \quad (8)$$

$$\overline{E}_3 = zE_{31} + (1-z)E_{32} \quad (9)$$

根据(1-9)式, 可得到政府、媒体、谣言传播者三方的复制动态方程  $P(x)$ ,  $P(y)$ ,  $P(z)$ :

$$P(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{11} - \overline{E}_1) = x(1-x)[z(F_1 + F_2) - yJ + G - C_1 + yzF_1 + zP] \quad (10)$$

$$P(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - \overline{E}_2) = y(1-y)[-zS_1 + xJ + H - C_2 + xzF_1 + zR_1] \quad (11)$$

$$P(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_{31} - \overline{E}_3) = z(1-z)[-yS_2 + K_1 + P_1 - R_2 - x(F_2 + S_1)] \quad (12)$$

当(10-12)式等于零时, 表明三方策略调整的速度等于零和演化博弈系统达到一个相对稳定的平衡状态<sup>[4]</sup>, 求得可能存在的复制动态稳定点为:  $(0,0,0)$ 、 $(1,0,0)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,0,1)$ 、 $(0,1,1)$ 、 $(1,1,0)$ 、 $(1,0,1)$ 、 $(1,1,1)$ 。通过分析系统的雅可比矩阵的局部稳定性, 可以得到系统均衡点的稳定

性。结合实际疫情与舆情传播的现实环境, 即在疫情爆发时, 政府主要集中精力用于防御疫情, 此时媒体应当承担疫情的舆论监管工作, 潜在谣言传播者发现传播谣言成本远大于收益, 趋于不传播谣言, 即政府-媒体-造谣者稳定在  $(0, 1, 0)$  状态下。同时如果希望三方保持  $(0, 1, 0)$  的稳定状态, 会造成政府的管控收益小于管控成本, 传播谣言者造谣收益小于造谣成本, 媒体的监管成本小于监管收益。同时在  $x, y = 0$  时, 谣言传播者是否传播谣言的几率取决于  $K_1 + P_1 - R_2$ , 当  $K_1 + P_1 \geq R_2$ , 即谣言传播者知识储备与影响力之和大于声誉影响时, 更倾向于转发谣言。

### 2.3 改进的 SIR 模型

传统 SIR 模型的主要缺点是感染率和恢复率是随机设定的, 且群体状态变换未考虑真实的网络拓扑结构。本文提出使用演化博弈方法获取影响因子, 通过影响因子生成 SIR 感染率初始值, 接着根据社会网拓扑结构来生成状态转换概率。

#### 2.3.1 演化博弈方法获取影响传播因子

在传统 SIR 模型中, 参数  $\beta$  (感染率) 和  $\gamma$  (恢复率) 是随机初始化的, 但是考虑现实疫情与舆情传播环境, 在疫情和舆情传播初始阶段, 感染率和恢复率是随机的, 可以根据历史发生概率通过统计得到, 但在传播过程中政府、媒体、传播者多方主体是一个动态博弈过程会使得以上参数进行变化。基于上述思想, 以文献[1,4]中的影响因素构建演化博弈收益函数, 得到复制动态方程, 并计算和分析演化稳定策略, 最后对感染率进行估计。

在疫情或谣言传播初期, 可以通过统计得到感染率和恢复率, 感染率=感染人数/受检人数; 恢复率=感染人数/确诊人数;

在传播过程中, 根据丁学君等<sup>[1]</sup>思想, 谣言传播状况受谣言传播参与者的知识储备、个人声誉, 个人影响力影响, 而根据胡欢等<sup>[4]</sup>思想, 谣言传播同时受到政府、媒体是否参与谣言管控的影响。

#### 2.3.2 传播模型感染率估值

通过演化博弈分析, 构建向量[网络人群知识

储备量,个人声誉值,个人影响力,政府管控力度,媒体监管力度],并对其进行归一化,通过公式(13)计算 $\beta$ (感染率),此计算公式参考机器学习softmax函数得来。

$$\beta = \frac{e^K + e^P}{e^K + e^R + e^P + e^G + e^M} \quad (13)$$

式中 $R$ 为个人声誉值, $K$ 为网络人群知识储备量, $P$ 为个人影响力, $G$ 为政府管控力度, $M$ 为媒体监管力度。各取值范围0-1之间。

恢复率受医疗水平和技术影响,随着医疗工作者对病毒深入认识,医疗和技术水平得到改善,因此恢复率应该是一个逐渐上升的过程。

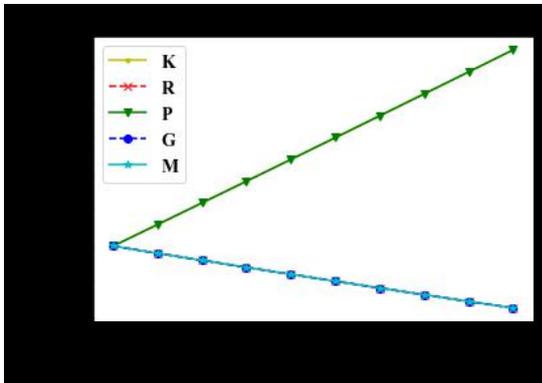


图2  $\beta$  随各参数的变化情况

Fig.2  $\beta$  changes with parameter

通过让 $\beta$ 分别对 $K, R, P, G, M$ 求导,设置步长( $t$ )为0.1。在 $K, R, P, G, M$ 同时增大的同时,得到图2所示变化,从中可以看出 $\beta$ 与 $K, P$ 呈正相关,与 $R, G, M$ 呈负相关。

当 $K=0, P=0, R=1, G=1, M=1$ 时, $\beta$ 取得最小值为0.197,此时传播者受到政府和媒体的双重管控,同时注重个人声誉,趋于不传播谣言。保持 $G=1, M=1$ ,使得 $K=1, P=1, R=0$ 时 $\beta$ 取值为:0.458,此时传播者个人收益大于自己的名誉损失,受到政府和媒体的监管,因此传播概率为0.458。

### 2.3.3 改进SIR模型的状态转换规则

本文使用传播模型为SIR模型,若个体处于易感态(S)时,能根据是否接触感染态的感染者转为感染态,而处于感染态(I)时的人群都具备病毒传播性,当处于恢复态(R)的人群都不具备病毒传播性。

SIR模型能够很好模拟新冠肺炎和谣言传播,用于谣言中,处于恢复态,表示个体将该条谣言从电子媒体上删除,从而不再具备传播性质。具体状态转换关系如表2所示。

表2 状态转换及相应颜色表示

Table 2 State transitions and corresponding color representations			
颜色	上一轮状态	本轮状态	转换概率
h	易感态	易感态	
b,d,e	易感态	感染态	
a,c	感染态	感染态	
g	感染态	恢复态	
f	恢复态	恢复态	1

在图3中,网络中节点h上一轮状态为易感态,本轮仍为易感态; b, d, e节点上一轮处于易感态,本轮为感染态;节点a, c节点上一轮为感染态,本轮处于感染态; g节点上一轮处于感染态,本轮处于恢复态; f节点上一轮处于恢复态,本轮处于恢复态。

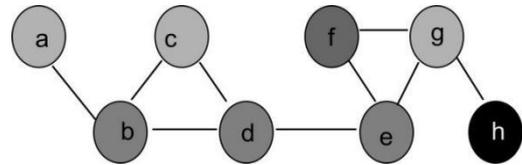


图3 SIR模型网络中各节点状态

Fig.3 The state of each node in the network of the SIR model

传统SIR模型中,各节点感染的概率相同,设置为 $n/N$ 的概率,其中 $n$ 为感染人数, $N$ 为网络中总人数。图3中,传统SIR模型的感染率为 $2/8$ ,本文基于演化博弈思想,生成SIR模型的感染率参数 $\beta$ 。传播过程中根据网络拓扑性质,改变状态转换概率:恢复态的节点下一个状态依旧是恢复态;感染态的节点以 $\gamma$ 的概率成为恢复态, $1-\gamma$ 的概率维持为感染态;易感态的节点通过统计与其邻居节点数量 $k$ ,计算他成为感染态的概率为 $1-(1-\beta)^k$ ,维持为易感态的概率为 $(1-\beta)^k$ 。

### 2.3.4 初始感染者的影响

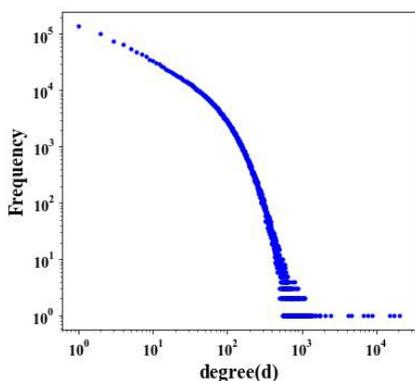
为了考虑网络节点度对传播模型的影响,本文考虑两种初始化传播模型的策略:将网络图中最大度节点(若包含多个则为其中之一)设为传播模型

开始传染节点; 将离网络平均节点度最近的节点设为传播模型开始节点。

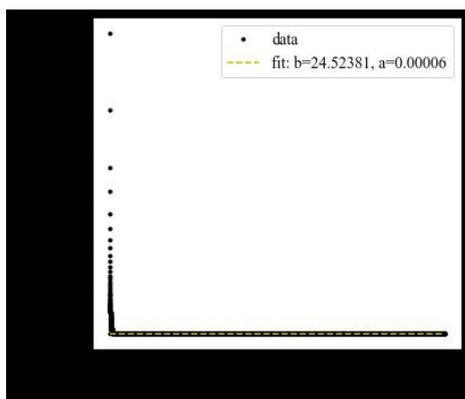
### 3 实验及结果分析

#### 3.1 数据

本文选用复杂网络数据集为斯洛伐克社交网 (<http://snap.stanford.edu/data/index.html>), 该数据集包含的节点数为 1632803, 边数为 30622564, 平均聚类系数为 0.1094, 直径为 11。图 4 为该数据度分布散点图, 图 4 (a) 中 y 轴  $\log(\text{Frequency})$ , x 轴为  $\log(\text{degree})$ , 图 4(b) 是 x 轴为 degree, y 轴为 Frequency 的散点图, 并使用  $y=bx^a$  来拟合。



(a)  $y:\log(\text{Frequency}),x:\log(\text{degree})$



(b)  $y:\text{Frequency}, x:\text{degree}$

图 4 Slovak 社交网 Pokec 数据集度直方图

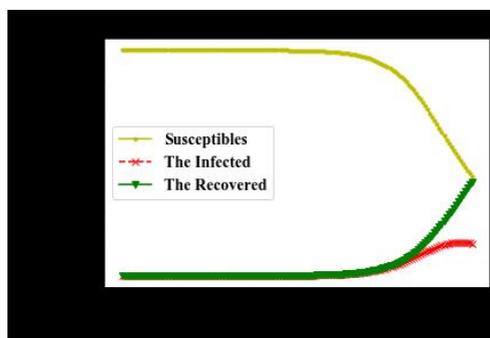
Fig.4 The degree histogram of Slovak social network of Pokec datasets

由图 4 可知, 该网络的度分布符合幂律分布, 通过幂指数回归函数  $y = bx^a$  求得

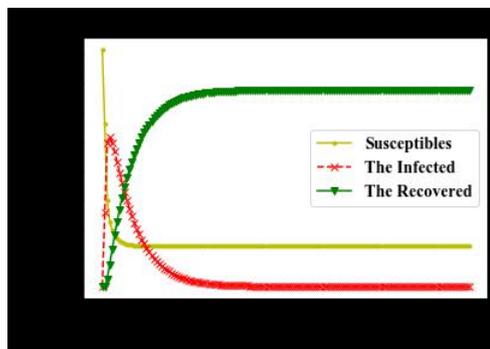
$$a = 6.08327513e-05, b = 2.45238139e+01.$$

#### 3.2 基于演化博弈和网络拓扑结构改进的 SIR 模型社交网传播

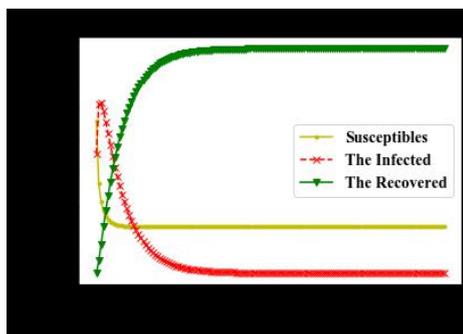
本文选用复杂网络数据集为斯洛伐克社交网, 在真实社交网络上感染和恢复收敛速度都较传统 SIR 模型更快, 使用最大度节点为感染初始节点与使用离平均度最近节点为感染初始节点收敛效果相当, 与传统 SIR 模型相比则收敛时间更短。结果如图 5 所示, 其中传统 SIR 模型的  $\beta$  (感染率) 分别设置 0.197 及 0.458,  $\gamma$  (恢复率) 设置为 0.1; 改进的 SIR 模型  $\beta$  (感染率) 分别设置 0.197 及 0.458 (参考演化博弈思想设置参数),  $\gamma$  (恢复率) 设置为 0.1。



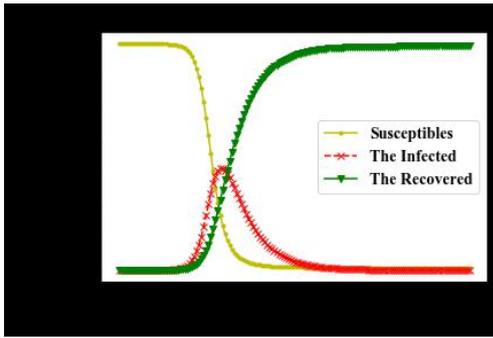
(a) 传统 SIR 模型 ( $\beta = 0.197$ )



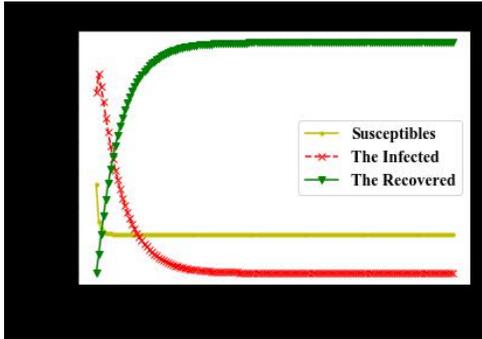
(b) 改进的 SIR 模型 ( $\beta = 0.197$ )



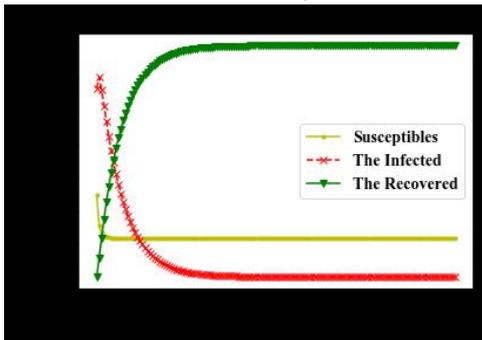
(c) 改进的 SIR 模型 ( $\beta = 0.197$ )



(d)传统 SIR 模型 (  $\beta=0.458$  )



(e)改进的 SIR 模型 (  $\beta=0.458$  )



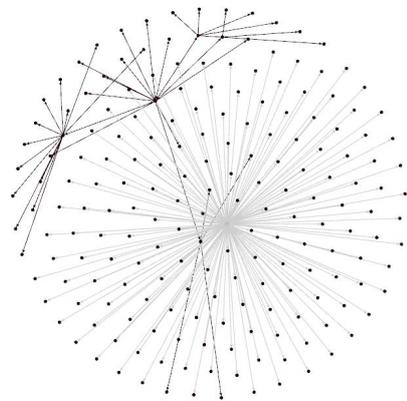
(f)改进的 SIR 模型 (  $\beta=0.458$  ),

图5 传统 SIR 模型及 SIR 模型在真实社交网络模拟结果  
Fig.5 Simulation results of traditional SIR model and SIR model in real social network

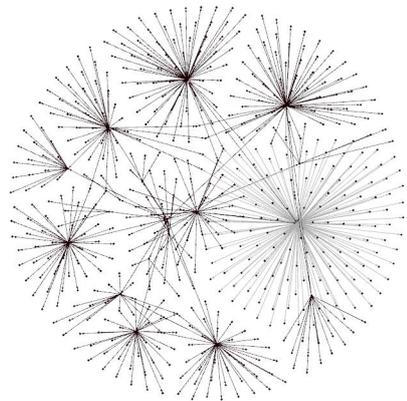
通过实验得到图 5 所示结果，其中各子图表示为各状态下人数在传播模型下随时间的变化趋势，纵坐标单位为人数，横坐标单位为天；各状态人数总体趋势为：处于感染态 (the infected) 的人数由高到低 (红线) 并趋于稳定，处于易感态 (Susceptible) 的人数由高到低 (棕色线) 并趋于稳定，处于恢复态 (Recovered) 的人数由低到高并趋于稳定。在传统 SIR 模型中，调整感染率，其他参数保持不变的情况下，收敛时间随感染率的提高而收敛时间变快 (图 5(a)与(d))，由此可以得出，增加政府、媒体管控力度以及个人的名誉损失，可以减缓疫情及舆情的传播。在考虑网络拓扑结构情况下，调整感染

率，发现传播收敛时间与收敛效果一致 (图 5(b)与 (e)，图 5(c)与(f))，由此可以得出，网络疫情与舆情的传播的主要还是受网络拓扑结构的影响；同时为了比较不同度对传播的影响，本文分别使用节点度最大的节点和离平均度最接近的节点作为传播开始节点，可以看到收敛效果相当 (图 5(b)与(c)，图 5(e)与(f))，可能是因为未改变网络各连通分量的大小，因此收敛时间及各状态人数相当。

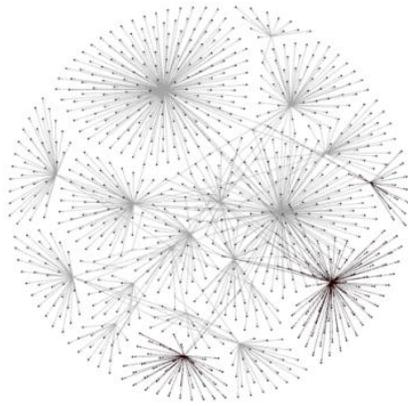
为了更清晰地显示在真实社交网络上最后各感染状态 150 天情况下所具有的人数变化，本文绘制了网络节点拓扑图，其中黑色节点上一轮状态为易感态，本轮仍为易感态；灰色节点上一轮处于易感态，本轮为感染态；黑色节点上一轮为感染态，本轮处于感染态；灰色节点上一轮处于感染态，本轮处于恢复态；浅灰色节点上一轮处于恢复态，本轮处于恢复态。当达到稳定时，所有节点都处于两个状态即恢复态 (为了分清，实际绘制为浅灰色) 和易感态 (黑色)，由于真实网络节点数过多，分别截取其中 200, 600, 1000, 2000 条边用于展示，结果如图 6 所示。



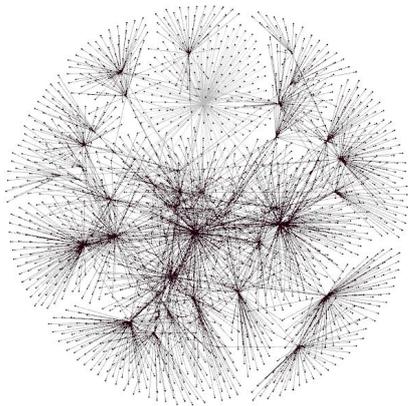
The number of edges:200



The number of edges:600



The number of edges:1000



The number of edges:2000

图6 截取社交网上部分边生成传播模型的效果

Fig.6 Interception of some edges of social network to generate the effect of propagation model

## 4 结论

本文提出一种基于演化博弈和网络拓扑结构改进的 SIR 模型,该模型通过演化博弈方法得到传播影响因子,接着根据影响因子生成 SIR 模型参数感染率。改进的 SIR 模型同时考虑了网络拓扑结构对传播的影响,构建了 SIR 各状态概率转换图。在真实社交网即斯洛伐克社交网上进行疫情及舆情传播仿真模拟,得出加大政府、媒体监管力度同时增大个人影响力的损失会延缓疫情及舆情的传播;

在考虑网络拓扑结构的情况下,分别考虑初始感染者的度不同及感染率不同,结果传播收敛效果相当,由此可以得出,疫情与舆情传播的主要还是受网络拓扑结构的影响。

## 参考文献:

- [1] 丁学君,刘思奇.基于演化博弈的在线社会网络谣言传播行为研究[J].运筹与管理,2020,29(11):11-21.
- [2] Ramos A B M, Schimit P H T. Disease spreading on populations structured by groups [J]. Appl. Math. Comput., 2019,353:265-273.
- [3] Hu Y H, Pan Q H, Hou W B, et al. Rumor spreading model with the different attitudes towards rumors[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications,2018,502:331-344.
- [4] 胡欢,郭晓剑,梁雁茹.基于前景理论的重大疫情网络谣言管控三方演化博弈分析[J/OL].情报科学:1-9[2020-09-22].
- [5] 尚明生,邱晓刚.社会网络及其上的传播动力学集成研究[J].系统工程理论与实践,2015,35(10):2557-2563.
- [6] 周涛,汪秉宏,韩筱璞,等.社会网络分析及其在舆情和疫情防控中的应用[J].系统工程学报,2010,25(6):742-754.
- [7] Li Y W, Jiang G P, Wu M, et al. Undirected congruence model: Topological characteristics and epidemic spreading[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 565(3):125610.
- [8] Gross Bnaya, Havlin Shlomo. Epidemic spreading and control strategies in spatial modular network[J]. Applied Network Science,2020,5(1):95-109.
- [9] Hethcote H W. The mathematics of infectious diseases[J]. SIAM review, 2000, 42(4): 599-653.
- [10] 国家及各省市区卫健委. 全国数据统计[EB/OL]. <http://3g.dxy.cn/newh5/vies/pneumonia>,2020-12-25.
- [11] 王晨曦,鲍泓,徐成. 传染病动力学模型研究综述[C].中国计算机用户协会网络应用分会,2020:4-8.
- [12] 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(5):15-20.
- [13] 王志心,刘治,刘兆军.基于机器学习的新新型冠状病毒(COVID-19)疫情分析及预测[J].生物医学工程研究,2020,39(1):1-5.