

12-30-2023

## Research on Network Public Opinion Propagation Model of Major Epidemics Under Cross-infection of Double Emotions

Yaming Zhang

*School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Center for Internet Plus and Industry Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China, yaming99@ysu.edu.cn*

Yanyuan Su

*School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Center for Internet Plus and Industry Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China, suyanyuan1991@126.com*

Guiru Zhao

*School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Center for Internet Plus and Industry Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

Xiaoyu Guo

*School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Center for Internet Plus and Industry Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

## Research on Network Public Opinion Propagation Model of Major Epidemics Under Cross-infection of Double Emotions

### Abstract

**Abstract:** Major epidemics provoke a variety of netizens' emotions. To some degree, the interaction of netizens' intense emotions determine the development direction of public opinion. Considering the complexity and dual emotional contagion, the impact of emotional factors in network public opinion is quantified to three dimensions indicators, emotional enhancement, differences and conversion rates. SIPINR public opinion propagation model is constructed. The equilibrium points and the transmission threshold are estimated and the stability is proved. The law of network public opinion propagation during major epidemics is revealed through numerical simulation. The results show that the dual emotional contagion would lead to a more sustaining network public opinion propagation during major epidemics, the proportions of initial emotion spreaders affect the development trend of network public opinion propagation, the emotional enhancement, differences and conversion rates have important effects on the network public opinion propagation.

### Keywords

double emotions, cross infection, major epidemic, SIPINR model, public opinion propagation

### Recommended Citation

Zhang Yaming, Su Yanyuan, Zhao Guiru, et al. Research on Network Public Opinion Propagation Model of Major Epidemics Under Cross-infection of Double Emotions[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2582-2593.

## 双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播研究

张亚明<sup>1,2,3</sup>, 苏妍媛<sup>1,2,3\*</sup>, 赵桂茹<sup>1,2,3</sup>, 郭晓宇<sup>1,2,3</sup>(1. 燕山大学 经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 互联网+与产业发展研究中心, 河北 秦皇岛 066004;  
3. 燕山大学 区域经济发展研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 重大疫情会引起各种网民情绪的爆发, 网民极端情绪交互作用在一定程度上决定着舆情走向。考虑重大疫情下网民情绪异质性与交叉感染性, 将舆情信息中情绪因素对网络舆情传播的影响量化为强化度、分歧度和交叉感染率 3 个维度指标, 构建双重情绪交叉感染下的  $SI_{PI}R$  舆情传播模型; 数值求解平衡点和传播阈值, 证明了传播平衡点的稳定性; 通过数值仿真揭示重大疫情网络舆情传播规律。研究表明: 双重情绪交叉感染的存在将促使重大疫情网络舆情传播更加持久; 初始情绪传播者比例不同会影响重大疫情网络舆情传播趋势; 情绪强化度、分歧度和双重情绪交叉感染率均对网络舆情传播态势具有重要影响。

**关键词:** 双重情绪; 交叉感染; 重大疫情;  $SI_{PI}R$  模型; 舆情传播

中图分类号: TP391.9;G206.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2582-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0815

**引用格式:** 张亚明, 苏妍媛, 赵桂茹, 等. 双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2582-2593.

**Reference format:** Zhang Yaming, Su Yanyuan, Zhao Guiru, et al. Research on Network Public Opinion Propagation Model of Major Epidemics Under Cross-infection of Double Emotions[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2582-2593.

## Research on Network Public Opinion Propagation Model of Major Epidemics Under Cross-infection of Double Emotions

Zhang Yaming<sup>1,2,3</sup>, Su Yanyuan<sup>1,2,3\*</sup>, Zhao Guiru<sup>1,2,3</sup>, Guo Xiaoyu<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Center for Internet Plus and Industry Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Research Center of Regional Economic Development, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Major epidemics provoke a variety of netizens' emotions. To some degree, the interaction of netizens' intense emotions determine the development direction of public opinion. Considering the complexity and dual emotional contagion, the impact of emotional factors in network public opinion is quantified to three dimensions indicators, emotional enhancement, differences and conversion rates.  $SI_{PI}R$  public opinion propagation model is constructed. The equilibrium points and the transmission threshold are estimated and the stability is proved. The law of network public opinion propagation during major epidemics is revealed through numerical simulation. The results show that the dual emotional contagion would lead to a more sustaining network public opinion propagation during major epidemics, the proportions of initial emotion spreaders affect the development trend of network public opinion

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2023-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(72101227); 河北省自然科学基金(G2020203003, G2020203008); 河北省教育厅高等学校科技计划(ZD2020199)

第一作者: 张亚明(1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为复杂网络信息传播。E-mail: yaming99@ysu.edu.cn

通讯作者: 苏妍媛(1991-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为复杂网络信息传播。E-mail: suyanyuan1991@126.com

propagation, the emotional enhancement, differences and conversion rates have important effects on the network public opinion propagation.

**Keywords:** double emotions; cross infection; major epidemic;  $SI_pI_nR$  model; public opinion propagation

## 0 引言

互联网信息中心发布的第49次报告显示,截至2021年12月,我国网民规模达到了10.32亿,同比增长4 296万,互联网普及率达73%<sup>[1]</sup>。越来越多的普通网民已经选择网络平台作为社会事件曝光、情绪宣泄、知识信息分享获取的主渠道<sup>[2]</sup>。特别是新冠肺炎疫情一旦发生就对社会产生了巨大冲击,网民纷纷通过网络平台表达自己的想法和态度,使重大疫情成为舆情事件的焦点。尤其是重大疫情关乎人类生命健康,网民极易情绪先行,使得富有强烈情绪特征的网络舆情传播速度更快、频率更高,更易加大网络舆情调控风险。此外,网络空间群体复杂,不同网民面对重大疫情会表现出正面、负面冲突情绪,且情绪在交流中交叉感染,使网络平台进一步成为网民激烈情绪冲突的“发酵场”,加大了舆情走势研判和管控难度,甚至影响了疫情防控。因此,剖析重大疫情下双重情绪交叉感染机制及对网络舆情传播的影响,对有效应对重大疫情舆论危机具有重要的理论意义与实践价值。

## 1 文献综述

构建不同约束条件下符合舆情实际传播情况的传播模型是当前网络舆情传播研究的重点。Kermack提出经典的SIR传染病模型,将个体分为易感者、传播者和免疫者三类<sup>[3]</sup>。此后,学者在此基础上展开了系列研究<sup>[4]</sup>。Daley等提出了研究信息传播问题的DK模型<sup>[5]</sup>。Gruhl等还在DK模型的研究基础上率先提出被舆情传播研究广泛应用的仓室模型<sup>[6]</sup>。Momani等针对SIR流行病传播系统,引入基于Laguerre的操作矩阵,利用Laguerre对易感人群、感染人群和康复人群进行了数值模拟和结果分析<sup>[7]</sup>。Dasgupta等从统计的角度研究传染病阈值,在Chung-Lu建模框架下开发了2种统计

精确且计算效率高的近似技术,解决了计算难和采样复杂度高的问题<sup>[8]</sup>。

随着信息的爆发和复杂网络的变化,为了更贴近实际网络传播的事实,学者们不断对模型进行改进。Mohan等提出具有交叉扩散的时空传染病模型<sup>[9]</sup>。Nekovec等在舆情传播模型中加入遗忘机制<sup>[10]</sup>。Gu等提出随着时间延长,舆情会由于遗忘和记忆机制慢慢消失<sup>[11]</sup>。此外,还有学者考虑了现实社会中的信任机制、怀疑机制、传播率和移出率对舆情传播的影响<sup>[12-14]</sup>。张立凡等将讨论机制的概念引入到舆情传播模型中,把传播者分成2种不同观点的网民,研究媒体作用下的网络舆情演变的内在规律<sup>[15]</sup>。狄岚等将传播者分成支持者、中立者和反对者3种类型,研究媒体作用下的舆情演变规律<sup>[16]</sup>。

网民的传播行为还会受到自身情绪因素影响。金晓玲等提出情绪性动机是舆情传播的重要动机,网络舆情在情绪因素的影响下会在一定程度上加速传播,进而强化信息发布者、信息传递者之间的沟通交流<sup>[17]</sup>。Clore等提出情绪信息等假说并指出情绪因素会影响信息接收者的行为决策<sup>[18]</sup>。田世海等在经典传染病模型的理论基础上加入了正面情绪的净化作用,完善了网络舆情传播情绪演变模型的相关研究<sup>[19]</sup>。张亚明等在情绪感染理论和经典传染病动力学模型的基础上,构建了负面情绪累积效应下网民情绪传播模型<sup>[20]</sup>。

综合上述理论研究成果可知,学者已借鉴传染病动力学模型构建思想,围绕网络舆情传播问题进行了系列研究。这些研究成果为研究重大疫情网络舆情传播问题提供了参考,但并不完全适用。一方面,重大疫情关乎人类生命健康,暴发后公众情绪较为复杂甚至对立<sup>[21]</sup>,使得现有单一情绪影响下的传播模型难以精准刻画重大疫情网

络舆情传播过程。另一方面，与其他事件不同，重大疫情与网络舆情存在交互影响，重大疫情恶化、好转使得公众产生负面、正面不同情绪，进而影响网络舆情传播<sup>[22-23]</sup>，同时，网络舆情传播中公众观点发生碰撞反转使得对立情绪交叉演变，进而影响公众防疫行为<sup>[24]</sup>，并促使重大疫情演变<sup>[25]</sup>。由于重大疫情下公众情绪主要分为正面积极与负面消极双重情绪，疫情传播与舆情传播交互影响可通过双重情绪交叉感染得以映射刻画，本文对经典 SIR 模型进行改进，构建考虑双重情绪交叉感染的重大疫情网络舆情传播模型，进而揭示重大疫情下网络舆情传播规律。

## 2 模型构建

### 2.1 经典 SIR 扩散模型

经典 SIR 模型通常将扩散过程中公众所处状态分为 3 类：未知者  $S$ 、传播者  $I$ 、免疫者  $R$ 。其中， $S$  指未接收到相关信息的人； $I$  指已经得知信息并传播给别人的人； $R$  指得知相关信息但不传播的人。令  $a$  表示未知者接触传播者后被感染成传播者的概率， $c$  表示传播者失去兴趣或遗忘后成为免疫者的概率，概率  $(1-a)$  指未知者对该类信息没有兴趣直接成为免疫者的概率。

$t$  时刻未知者、传播者、免疫者三者所占比例分别为  $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ ，经典 SIR 模型公众状态转移过程如图 1 所示。

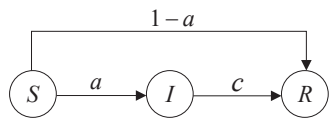


图 1 SIR 模型状态转移图

Fig. 1 State transition diagram of SIR model

### 2.2 双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播模型

#### (1) 网民状态

受重大疫情刺激影响，不同网民会产生不同情绪反应。根据文献[21]研究结果可知，重大疫情

下网民情绪主要分为正面积极情绪、负面消极情绪 2 类。由于重大疫情关乎人类生命健康，给人们日常工作生活带来严重影响，不同情绪状态的网民往往借助网络平台表达观点意见并相互转发传播，使网络舆情大规模扩散。为此，考虑公众情绪及其在网络舆情传播过程中所处的状态，将公众分为 4 类：未知者  $S$ 、正面情绪传播者  $I_p$ 、负面情绪传播者  $I_n$ 、免疫者  $R$ 。其中， $S$  指目前尚不知道舆情信息的人； $I_p$  指理性积极的具有正面情绪的传播者，所持观点情绪与政府保持一致； $I_n$  指非理性消极的具有负面情绪的传播者，所持观点是部分网民自发形成的一些极端负面的有破坏力的消极想法； $R$  指知道舆情信息但又不轻易相信或不传播舆情信息的人。

#### (2) 状态转移过程

重大疫情下具有负面、正面不同情绪的网民借助网络平台传播网络舆情，同时，在传播过程中交叉转变。网络舆情传播过程中各状态转移规则如下：

1) 未知者  $S$  可能对该类网络舆情没有兴趣，以概率  $a_1$  变为免疫者，也有可能接收到正面情绪传播者传播的网络舆情后，以概率  $a_2$  转变为正面情绪传播者，还有可能接收到负面情绪传播者传播的网络舆情后，以概率  $a_3$  转变为负面情绪传播者。

2) 正面情绪传播者  $I_p$  与负面情绪传播者  $I_n$  交流讨论后，可能劝说成功，使负面情绪传播者  $I_n$  受到感染以概率  $b_1$  转变为正面情绪传播者。同时，随着时间推移，正面情绪传播者  $I_p$  也会以概率  $c_1$  逐渐遗忘网络舆情，成为免疫者。

3) 负面情绪传播者  $I_n$  与正面情绪传播者  $I_p$  交流讨论后，可能成功说服正面情绪传播者  $I_p$ ，使之受到感染以概率  $b_2$  转变为负面情绪传播者。同时，随着时间推移，负面情绪传播者  $I_n$  也有可能以概率  $c_2$  慢慢遗忘网络舆情，成为免疫者。

需要说明的是， $b_1$ 、 $b_2$  反映了正面情绪与负面情绪之间的交叉感染率。同时， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $c_1$ 、

$c_2$ 等参数也均是在经典SIR模型参数 $a$ 、 $c$ 的基础上融入情绪因素影响后的参数。根据文献[17]研究结果, 情绪因素使得网络舆情在一定程度上加速传播, 为此, 引入情绪强化度参数 $\lambda$ , 表示情绪影响下未知者转变成传播者的增强程度。同时, 根据文献[26], 公众传播行为还会受到社会群体网络外部效用影响。由于重大疫情下社会群体中正面情绪、负面情绪并存, 故引入情绪分歧度参数 $\mu$ ,  $\mu$ 也表示社会群体正面情绪网络外部效用, 因而, 可用 $(1-\mu)$ 表示社会群体负面情绪网络外部效用。则有

$$\begin{aligned} a_1 &= (1-a)(1-\lambda) \\ a_2 &= (a+\lambda)\mu \\ a_3 &= (a+\lambda)(1-\mu) \\ c_1 &= c\mu \\ c_2 &= c(1-\mu) \end{aligned} \quad (1)$$

此外, 由于重大疫情暴发后, 人们往往居家隔离, 诸多事宜在线开展, 故网络空间存在新网民输入, 并令新网民输入率为 $A$ 。

根据上述传播规则, 可得双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播过程状态转移图, 如图2所示。

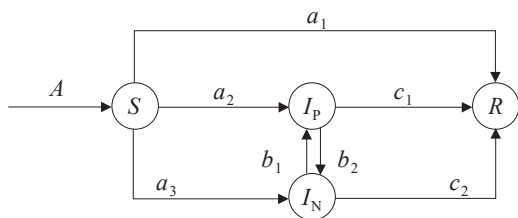


图2 双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播过程状态转移图

Fig. 2 State transition diagram of network public opinion propagation of major epidemics under double emotional cross-infection

### (3) $SI_P I_N R$ 模型构建

根据上述重大疫情网络舆情传播过程分析, 令 $t$ 时刻各状态网民密度分别为 $S(t)$ 、 $I_P(t)$ 、 $I_N(t)$ 、 $R(t)$ , 且 $S(t)$ 、 $I_P(t)$ 、 $I_N(t)$ 、 $R(t)$ 为关于 $t$ 的连续可微函数。为此, 建立双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播 $SI_P I_N R$ 动力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= A - a_2 S(t) I_P(t) - a_3 S(t) I_N(t) - a_1 S(t) \\ \frac{dI_P(t)}{dt} &= a_2 S(t) I_P(t) + b_1 I_P(t) I_N(t) - b_2 I_P(t) I_N(t) - c_1 I_P(t) \\ \frac{dI_N(t)}{dt} &= a_3 S(t) I_N(t) + b_2 I_P(t) I_N(t) - b_1 I_P(t) I_N(t) - c_2 I_N(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= a_1 S(t) + c_1 I_P(t) + c_2 I_N(t) \end{aligned} \quad (2)$$

由于前3个方程不含变量 $R(t)$ , 因此, 仅需考虑由前3个方程构成的方程组, 则可得

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= A - a_2 S(t) I_P(t) - a_3 S(t) I_N(t) - a_1 S(t) \\ \frac{dI_P(t)}{dt} &= a_2 S(t) I_P(t) + b_1 I_P(t) I_N(t) - b_2 I_P(t) I_N(t) - c_1 I_P(t) \\ \frac{dI_N(t)}{dt} &= a_3 S(t) I_N(t) + b_2 I_P(t) I_N(t) - b_1 I_P(t) I_N(t) - c_2 I_N(t) \end{aligned} \quad (3)$$

## 3 平衡点和传播阈值的求解

### 3.1 平衡点求解

为了进一步分析重大疫情网络舆情传播系统趋于稳定状态的情况, 根据双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播模型, 讨论平衡点的存在性和稳定性。令式(3)中方程左边均为0, 通过Mathematical 11.3求解, 可以得出4组解:

$$P_0: (I_P=0, I_N=0, S=A/a_1)$$

$$P_1: (I_P=(Aa_2-a_1c_1)/a_2c_1, I_N=0, S=c_1/a_2)$$

$$P_2: (I_P=0, I_N=(Aa_3-a_1c_2)/a_3c_2, S=c_2/a_3)$$

$$P_3: \begin{cases} I_P = \frac{Aa_3b_1 - Aa_3b_2 - a_1b_1c_2 + a_1b_2c_2 - a_3c_1c_2 + a_2c_2^2}{(b_1-b_2)(a_1b_1 - a_1b_2 + a_3c_1 - a_2c_2)} \\ I_N = \frac{-Aa_2b_1 + Aa_2b_2 + a_1b_1c_1 - a_1b_2c_1 + a_3c_1^2 - a_2c_1c_2}{(b_1-b_2)(a_1b_1 - a_1b_2 + a_3c_1 - a_2c_2)} \\ S = \frac{A(b_1-b_2)}{a_1b_1 - a_1b_2 + a_3c_1 - a_2c_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_0$ 为无病平衡点;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 为地方病平衡点。由观察易得出 $P_1$ 与 $P_2$ 属于对称的2个点,  $P_1$ 中的 $a_2$ 、 $c_1$ 在 $P_2$ 中分别以 $a_3$ 、 $c_2$ 替换。 $P_1$ 、 $P_2$ 中 $I_P$ 、 $I_N$ 分别有一个为0, 在实际舆情传播中表示一种传播者声音消失, 只存在一种传播者的声音。

$P_3$  中  $S$ 、 $I_p$ 、 $I_N$  都不为 0 且对时间  $t$  的微分都为 0，表示未知者、正面情绪传播者和负面情绪传播者在社会中同时存在且随着时间变化，各种状态网民数量达到平衡。从舆情实际传播情况分析，动力学方程组出现的 4 组数学解中，由于  $a_2 > a_3$ ， $c_1 > c_2$ ，均衡状态下， $I_p$  不会比  $I_N$  小，因此， $P_2$  解不会出现。同理， $P_3$  中  $I_p - I_N = (c_1 + c_2) / (b_2 - b_1) + \frac{A(a_2 + a_3)}{a_1(b_1 - b_2) + a_3c_1 - a_2c_2}$ ，由于网民输入率  $A$  通常较小，故  $I_p - I_N \approx (c_1 + c_2) / (b_2 - b_1)$ 。因为  $b_1 > b_2$ ，所以  $P_3$  不是它的稳定点。综上可得，当基本再生数  $R_0 > 1$  时，双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播模型只有一个地方病平衡点  $P_1$ 。

### 3.2 基本再生数求解

根据舆情传播动力学理论，网络舆情传播扩散会产生一个传播临界值，叫做基本再生数，记作  $R_0$ <sup>[27]</sup>。当基本再生数  $R_0 \leq 1$  时网络舆情不会传播扩散开来，而会慢慢消失；当基本再生数  $R_0 > 1$  时，网络舆情会逐渐扩散，在网络平台上传播开来<sup>[28]</sup>。

令  $X = [I_p, I_N, S]^T$ ，根据文献 [16] 可构造出  $F(X)$  和  $V(X)$ ，其中， $F(X)$  表示新增加的网络舆情传播者， $V(X)$  表示其他群体的密度变化，则

$$F(X) = \begin{bmatrix} a_2 S I_p \\ a_3 S I_N \\ 0 \end{bmatrix}, V(X) = \begin{bmatrix} -b_1 I_p I_N + b_2 I_p I_N + c_1 I_p \\ -b_2 I_p I_N + b_1 I_p I_N + c_2 I_N \\ -A + a_2 S I_p + a_3 S I_N + a_1 S \end{bmatrix}$$

在  $P_0$  处分别求导可得

$$DF(P_0) = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, DV(P_0) = \begin{bmatrix} V & J_2 \\ J_1 & J_3 \end{bmatrix}$$

其中

$$F = \begin{bmatrix} a_2 S_0 & 0 \\ 0 & a_3 S_0 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}$$

设  $B = FV^{-1}$ ，且当  $I_p = I_N = 0$  时， $S_0 = A/a_1$ ，则谱半径  $\rho = \max(a_2 A/a_1 c_1, a_3 A/a_1 c_2)$ ，即基本再生数  $R_0 = \max(a_2 A/a_1 c_1, a_3 A/a_1 c_2)$ 。

从  $R_0$  表达式分析可知，基本再生数与网民输

入率、未知者转变为免疫者的概率、未知者转变为不同情绪传播者的概率，以及不同情绪传播者转变为免疫者的概率密切相关。当新网民输入率和未知者转变为正负面情绪传播者比率不断增大时，基本再生数会随之增大，而当未知者和传播者转变为免疫者的比率逐渐增大时，基本再生数会随之减小。由此可知，当期望某类舆情传播规模不断减少时，可着力降低未知者转变为正负面情绪传播者的比例，并增加未知者和正负面情绪传播者转变为免疫者的概率。但值得注意的是，舆情传播过程中既存在正面情绪传播者，也存在负面情绪传播者，当舆情整体传播规模减小时，两类情绪传播者人数均会降低。

### 3.3 平衡点稳定性分析

#### (1) 零传播平衡点稳定性

当  $R_0 \leq 1$  时，传播不能进行，这种状态下  $I_p$ 、 $I_N$  的值均为 0，网络中没有传播者，系统仅有无病平衡点  $P_0: (I_p = 0, I_N = 0, S = A/a_1)$ ，依据李雅普诺夫第二法<sup>[29]</sup>证明  $P_0$  的稳定性，构建李雅普诺夫函数：

$$V(I_p(t), I_N(t)) = I_p(t) + I_N(t) \\ \frac{dV(t)}{dt} = \frac{dI_p(t)}{dt} + \frac{dI_N(t)}{dt} = \\ a_2 S(t) I_p(t) + b_1 I_p(t) I_N(t) - b_2 I_p(t) I_N(t) - \\ c_1 I_p(t) + a_3 S(t) I_N(t) + b_2 I_p(t) I_N(t) - \\ b_1 I_p(t) I_N(t) - c_2 I_N(t) = c_1 \left( \frac{S_0(t) a_2}{c_1} - 1 \right) I_p(t) + \\ c_2 \left( \frac{S_0(t) a_3}{c_2} - 1 \right) I_N(t)$$

当  $R_0 = \max(a_2 A/a_1 c_1, a_3 A/a_1 c_2) < 1$  时， $S_0 a_2/c_1 - 1 < 0$ ， $S_0 a_3/c_2 - 1 < 0$ ，则  $dV(t)/dt(t) < 0$ ，则由拉萨尔不变集原理<sup>[30]</sup>可知， $P_0$  具有全局稳定性。

#### (2) 地方病平衡点稳定性分析

当  $R_0 > 1$  时，双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播  $SI_p I_N R$  模型只有一个地方病平衡点  $P_1$ ，接下来分析地方病平衡点  $P_1$  的稳定性。

令

$$\begin{aligned} X(t) &= A - a_2 S(t) I_P(t) - a_3 S(t) I_N(t) - a_1 S(t) \\ Y(t) &= a_2 S(t) I_P(t) + b_1 I_P(t) I_N(t) - b_2 I_P(t) I_N(t) - \\ &\quad c_1 I_P(t) \\ Z(t) &= a_3 S(t) I_N(t) + b_2 I_P(t) I_N(t) - b_1 I_P(t) I_N(t) - \\ &\quad c_2 I_N(t) \end{aligned}$$

则有

$$\begin{bmatrix} -a_2 I_P(t) & -a_2 S(t) & -a_3 S(t) \\ -a_3 I_N(t) - a_1 & a_2 S(t) + b_1 I_N(t) & b_1 I_P(t) - b_2 I_P(t) \\ a_2 I_P(t) & -b_2 I_N(t) - c_1 & a_3 S(t) + b_2 I_P(t) \\ a_3 I_N(t) & -b_1 I_N(t) + b_2 I_N(t) & -b_1 I_P(t) - c_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

带入  $P_1: (I_P = (Aa_2 - a_1 c_1) / a_2 c_1, I_N = 0, S = c_1 / a_2)$ ,

求得  $P_1$  的 Jacobian 矩阵:

$$\begin{bmatrix} \frac{-Aa_2 + a_1 c_1 - a_1}{c_1} & -c_1 & -\frac{a_3 c_1}{a_2} \\ \frac{Aa_2 - a_1 c_1}{c_1} & 0 & \frac{(b_1 - b_2)(Aa_2 - a_1 c_1)}{a_2 c_1} \\ 0 & 0 & \frac{a_3 c_1}{a_2} - c_2 + \frac{(b_1 - b_2)(Aa_2 - a_1 c_1)}{a_2 c_1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

求得特征方程为

$$\lambda^3 + M_1 \lambda^2 + M_2 \lambda + M_3 = 0$$

解得

$$M_1 = \frac{a_1(a_2 + b_1 - b_2)}{a_2} + \frac{A(a_2 + b_1 - b_2)}{c_1} + c_1 - \frac{a_3 c_1}{a_2} + c_2$$

$$M_2 = [Aa_2 + c_1(c_1 - a_1)] \times \frac{Aa_2(b_1 - b_2) + c_1[a_1(b_2 - b_1) - a_3 c_1 + a_2 c_2]}{a_2 c_1^2} +$$

$$\frac{Aa_2 - a_1 c_1}{a_2 c_1} \times \frac{Aa_2(b_1 - b_2) + c_1[a_1(b_2 - b_1) - a_3 c_1 + a_2 c_2]}{a_2 c_1}$$

由于  $a_1 < a_3 < a_2$ ,  $c_1 > c_2$ ,  $b_2 < b_1$ ,  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2 > 0$ ,  $I_P > 0$ ,  $R_0 > 1$ , 则有  $M_1 > 0$ ,  $M_2 > 0$ ,  $M_3 > 0$ ,  $M_1 M_2 - M_3 > 0$ 。由劳斯赫尔维茨判别条件可知, 该模型在  $P_1$  处具有局部稳定性。

## 4 仿真分析

为了进一步剖析双重情绪及其交叉感染对重大疫情网络舆情传播的影响, 基于 MATLAB 2016a 进行数值仿真以模拟网络舆情传播过程, 通过对比分析不同状态网民密度的变化, 探索双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播规律。

### 4.1 双重情绪交叉感染影响分析

为了研究双重情绪交叉感染是否对重大疫情网络舆情传播有影响, 通过设计对照实验进行分析。考虑到重大疫情暴发初期大部分公众为未知者, 只有少部分公众为正面情绪传播者与负面情绪传播者, 故令初始时刻各状态网民密度分别为  $S(0) = 0.998$ ,  $I_P(0) = 0.001$ ,  $I_N(0) = 0.001$ 。由于重大疫情下, 公众出于安全考虑往往足不出户, 网络成为公众获取信息的主渠道, 网络空间会出现一些新用户, 但随着互联网普及, 尚未使用网络的公众数量已不多, 故令  $A = 0.001$ 。由于重大疫情关乎人类生命健康, 对公众日常工作生活造成了严重影响, 相关网络舆情往往会引起公众高度关注并持续传播, 故令  $a = 0.8$ ,  $c = 0.1$ 。同时, 考虑到此时公众情绪较为激烈, 更易促使未知者向传播者转变, 故令  $\lambda = 0.3$ 。此外, 由于重大疫情下公众所处情境、个人经历等存在差异, 情绪往往较为复杂, 正面情绪、负面情绪交互融合, 且由于更多公众对此感到恐慌、焦虑, 致使社会群体负面情绪略高, 故令  $\mu = 0.45$ 。当没有发生双重情绪交叉感染时, 负面情绪传播者转变为正面情绪传播者的概率  $b_1 = 0$ , 正面情绪传播者转变为负面情绪传播者的概率  $b_2 = 0$ , 即此时不存在正面情绪传播者和负面情绪传播者的交叉影响; 当发生双重情绪交叉感染时, 负面情绪传播者被感染而转变为正面情绪传播者的概率  $b_1 = 0.002$ , 正面情绪传播者被感染而转变为负面情绪传播者的概率  $b_2 = 0.001$ , 即此时群体内正负情绪开始互相影响, 且负面情绪传播者更容易受感染而转变为正面情



绪传播者，仿真结果如图3所示。

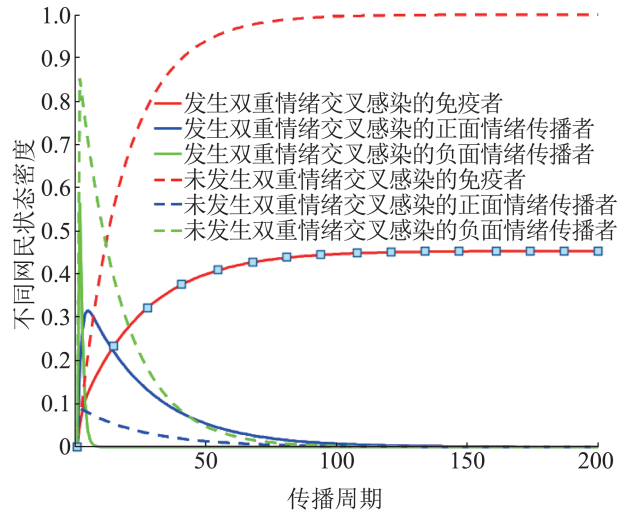


图3 双重情绪交叉感染作用对不同状态网民密度影响  
Fig. 3 Effect of dual emotional cross-infection on density of netzines in different states

对比图3各曲线变化趋势可以发现，重大疫情网络舆情传播过程中，是否发生双重情绪交叉感染，对免疫者密度曲线到达平衡状态的时间与规模具有重要影响。特别是当发生双重情绪交叉感染时，免疫者数量明显减少，正面情绪传播者显著增多，负面情绪传播者显著减少。这一结果表明，正面情绪传播者和负面情绪传播者之间发生交叉感染对重大疫情下具有负面情绪的舆情治理有积极作用，且双重情绪交叉感染会使重大疫情网络舆情传播相对持久。

#### 4.2 不同情绪因素对舆情传播的影响分析

为了探索情绪强化度、情绪分歧度、双重情绪交叉感染率对重大疫情网络舆情传播过程的影响，采用控制变量法通过数值仿真实验进行研究。同4.1节一样，设不同状态网民密度初始值分别为 $S(0)=0.998$ ， $I_p(0)=0.001$ ， $I_N(0)=0.001$ ，实验中仍设置 $A=0.001$ ，无情绪因素影响下的状态转移概率 $a=0.8$ ， $c=0.1$ ，其余情绪因素参数值设置如表1所示，进而进行数值仿真实验，结果如图4~7所示。

表1 对照实验参数

Table 1 Control experiment parameter

组别	强化度 $\lambda$	分歧度 $\mu$	交叉感染率
对照组	0.3	0.45	$b_1=0.000\ 02$ $b_2=0.000\ 01$
实验1	0.5	0.45	$b_1=0.000\ 02$ $b_2=0.000\ 01$
实验2	0.3	0.60	$b_1=0.000\ 02$ $b_2=0.000\ 01$
实验3	0.3	0.45	$b_1=0.000\ 20$ $b_2=0.000\ 10$

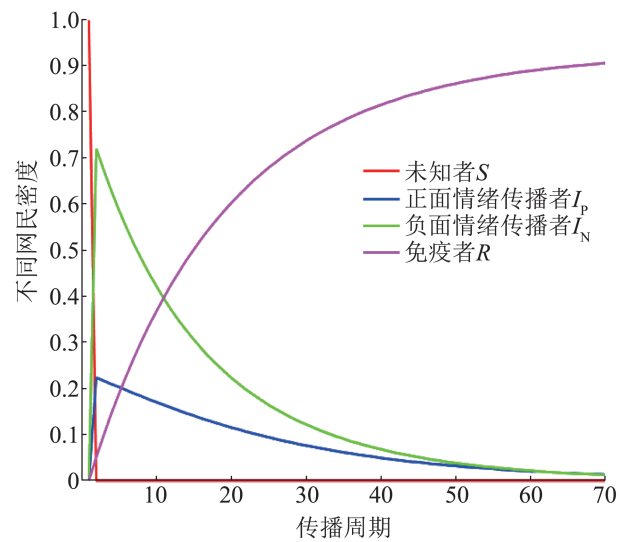


图4 对照组结果  
Fig. 4 Control group results

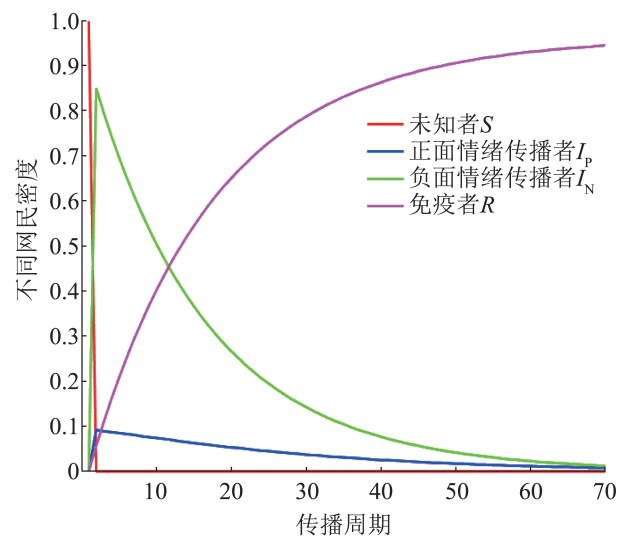


图5 情绪强化度对舆情传播影响  
Fig. 5 Effect of emotional intensification on spreading of public opinion

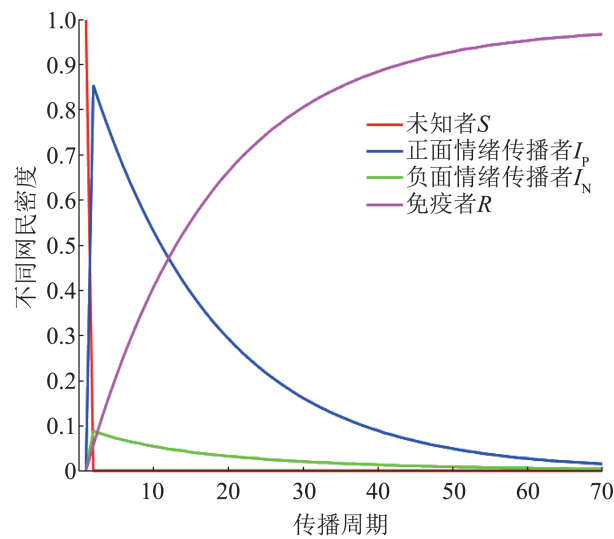


图6 分歧度对舆情传播的影响

Fig. 6 Influence of emotional divergence degree on spreading of public opinion

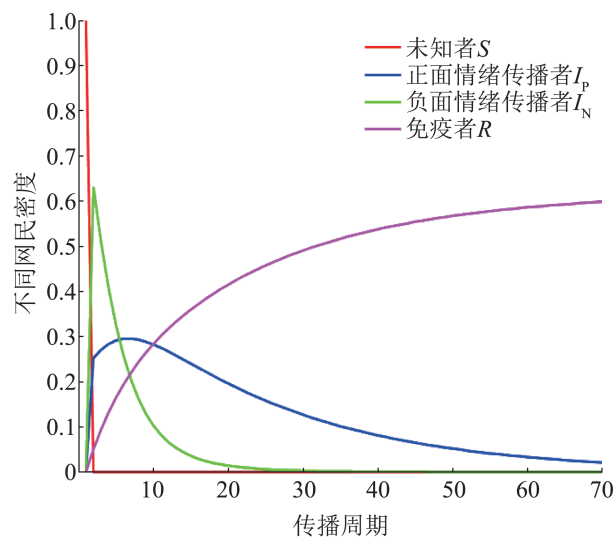


图7 情绪交叉感染率对舆情传播的影响

Fig. 7 Influence of emotional cross-infection rates on spreading of public opinion

实验1研究了情绪强化度对重大疫情网络舆情传播过程的影响。这里控制其他参数值保持不变,通过变换情绪强化度 $\lambda$ 数值,模拟不同状态网民密度随时间演化情况。将实验1仿真结果图5与对照组仿真结果图4作对比可以发现,当社会群体负面情绪略高时,随着情绪强化度 $\lambda$ 增大,负面情绪传播者峰值增大,正面情绪传播者峰值

减小,未知者密度曲线变化不大,曲线变化相对平滑,差异不显著。由此可知,当社会群体负面情绪略高时,情绪影响因素中强化度与负面情绪传播者峰值成正相关,与正面情绪传播者峰值成负相关。

实验2研究了情绪分歧度对重大疫情网络舆情传播过程的影响。与实验1类似,控制其他参数值不变,通过变换情绪分歧度 $\mu$ 的数值,模拟不同状态网民密度随时间变化情况。将实验2仿真结果图6与对照组仿真结果图4相对比可以发现,正面情绪传播者 $I_p$ 密度上升速度加快,峰值增大。负面情绪传播者 $I_N$ 密度显著减少,峰值降低。从重大疫情网络舆情传播全过程来看,负面情绪传播者数量较少,影响力相对较小。实验2仿真结果表明,情绪分歧度与正面情绪传播者峰值成正相关,与负面情绪传播者峰值成负相关。

实验3研究了不同情绪传播者之间交叉感染程度对重大疫情网络舆情传播过程的影响。当双重情绪交叉感染率增加到原来的10倍时,即 $b_1=0.0002$ , $b_2=0.0001$ 时,不同状态网民密度随时间的变化情况如图7所示。将实验3仿真结果图7与对照组仿真结果图4相对比可以看出,图7中负面情绪传播者曲线峰值降低,正面情绪传播者峰值增加。实验3仿真结果表明,双重情绪交叉感染率对重大疫情网络舆情传播具有重要影响,增大正面情绪传播者感染力,促使负面情绪传播者转变为正面情绪传播者,将促使正面情绪传播者峰值增大,进而增大正面情绪对公众的影响。

根据上述分析可知,将传播者划分为正面情绪传播者和负面情绪传播者,可以更加清晰地看出不同情绪传播者密度变化趋势。此外,综合3个实验的仿真结果可以发现,情绪强化度、情绪分歧度、双重情绪交叉感染率均对重大疫情网络舆情传播有重要影响,从3个维度综合考虑情绪因素影响有助于政府等有关部门对重大疫情下的舆情传播进行精准干预。

### 4.3 情绪传播者初始比例对舆情传播的影响分析

为了进一步探究情绪传播者初始比例变化对重大疫情网络舆情传播趋势的影响, 同样采用控制变量法, 假定其他参数值一致, 通过改变初始时刻各状态网民比例进行分析。这里选择与 4.2 节对照组相同的参数设置, 但初始时刻各状态网民比例设置如下: 未知者  $S(0)=0.997$ , 正面情绪传播者比例  $I_p(0)=0.001$ , 负面情绪传播者比例  $I_N(0)=0.002$ , 结果如图 8 所示。

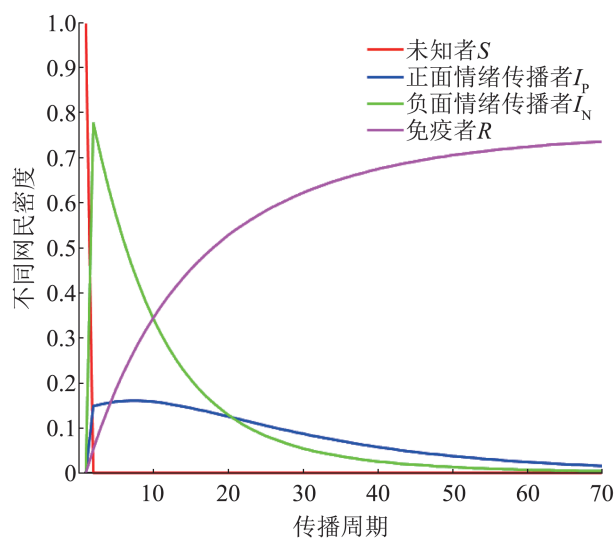


图 8 不同情绪传播者初始比例对舆情传播的影响  
Fig. 8 Influence of initial proportion of different emotional spreaders on spreading of public opinion

与图 4 相比, 图 8 中负面情绪传播者峰值明显升高, 正面情绪传播者峰值降低, 增长速度没有显著变化, 但正面情绪传播者的下降速度变缓, 且免疫者人数降低。由此可见, 增加负面情绪传播者的初始比例会使整个舆情事件中负面情绪传播者数量显著增加, 加剧舆情事件升级, 延长舆情发酵时间。究其原因, 在舆情事件刚发生时, 只有当事人以及周围旁观者是初始传播者, 负面情绪传播者越多, 传播速度越快, 达到峰值的时间就越短, 因而会加速舆情事件的爆发。同时, 由于受到负面群体情绪影响, 大部分人会对舆情

事件保持更长时间的关注。因此, 相关部门如果能在初始时期便进行有效干预, 控制负面情绪初始传播比例, 对网络舆情传播控制具有重要作用。

## 5 案例分析

为了验证双重情绪交叉感染下重大疫情网络舆情传播  $SI_pI_NR$  模型的有效性, 对 2020 年“北京新发地疫情”微博话题进行实证分析, 利用 python 爬虫获取该舆情事件的数据。

### 5.1 案例选取

2020-06-11 在北京已连续 56 天无本地报告新增确诊病例的时间点, 北京西城区首次通报了一名 52 岁的本地确诊病例, 迅速引起全国对国内新冠肺炎疫情复发的高度警惕。随后, 互联网上关于北京疫情、农产品安全、疫情源头追踪等问题引起大家的强烈关注和热议, 各种各样的言论开始一涌而上, 使北京疫情舆情量于 6 月 15 日达到最高峰。“北京新发地疫情”是 2020 年的重要社会热点事件。基于此, 本研究选取该案例数据来检验上述模型有效性。

### 5.2 实证数据来源

微博用户总量多、自由度高、影响力大。新浪微博信息数据在网络舆情传播方面具有一定的代表性, 同时数据具有一定的可获取性。本文通过设计一套 python 网络爬虫代码, 以北京疫情为话题关键词, 爬取 2020-06-11—07-02 时间线上的所有相关微博, 爬取维度主要包括微博 ID、发布时间、文本、链接、转发评论, 以及点赞数量等, 对数据进行去重处理后得到 88 150 条微博数据。

### 5.3 数据处理及对比验证

将获取到的案例数据中的微博文本信息使用 jieba 库进行分词处理, 先筛选过滤掉一些常见停用词, 简单地将文本进行分类, 得到初始数据, 使其适合朴素贝叶斯分类法; 随机抽样选取正面情绪和负面情绪状态的微博文本各 3 000 条, 通过

人工标注情绪状态作为先行训练集; 将处理后的所有初始数据样本使用 SnowNLP 库训练分类器标注情绪倾向; 将得到的数据进行可视化, 得到北京疫情网络舆情情绪演化趋势图, 如图 9 所示。

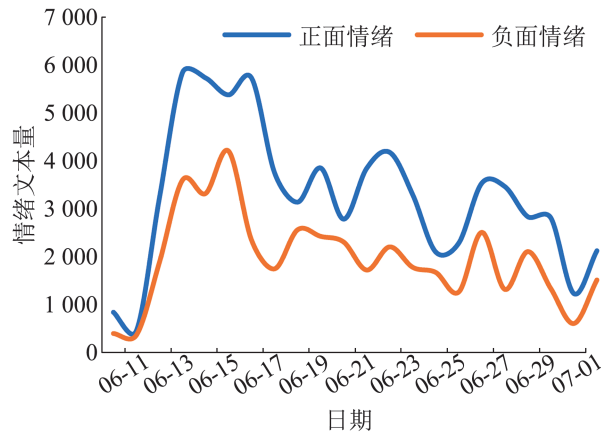


图9 “北京疫情” 舆情情绪演变趋势图  
Fig. 9 Trend chart of evolution of public opinion on "Beijing epidemic"

由于新冠肺炎重大疫情暴发关乎人们生命健康, 且会给人们日常工作生活造成严重影响, 北京新发地疫情出现后公众关注度较高, 纷纷传播网络舆情, 故令  $a=0.8$ ,  $c=0.1$ 。由于初始时刻大部分公众为未知者, 只有少部分公众为正面情绪传播者与负面情绪传播者, 故设  $S(0)=0.998$ ,  $I_p(0)=0.001$ ,  $I_n(0)=0.001$ 。同时, 由于此次疫情发生地为首都北京, 因而公众情绪较为激烈, 更易促使网络舆情传播扩散, 故设  $\lambda=0.3$ , 但由于前期抗疫取得了显著成效, 社会群体正面情绪略高, 故设  $\mu=0.52$ 。此外, 由于此次疫情发生场所为新发地农产品批发市场, 与人们日常生活息息相关, 因而公众情绪存在波动性, 故设  $b_1=0.0001$ ,  $b_2=0.0002$ 。SI<sub>p</sub>I<sub>n</sub>R 模型仿真结果如图 10 蓝色与绿色虚线所示。为了进行比较, 设  $b_1=b_2=0$ , 其他参数取值不变, 还对不考虑双重情绪交叉感染的模型进行了仿真, 2 类传播者密度变化曲线如图 10 蓝色和绿色实线所示。对比图 9 与图 10 仿真结果可以发现, 蓝色和绿色虚线所描述的 2 类传播者密度变化趋势与实际数据更相符, 尤其绿色虚线代表的双重情绪交叉感

染下负面情绪传播者密度变化曲线在达到波峰后下降速度相对缓慢, 这一变化趋势与图 9 对应变化趋势更为一致。由此可见, 模型更具有效性。

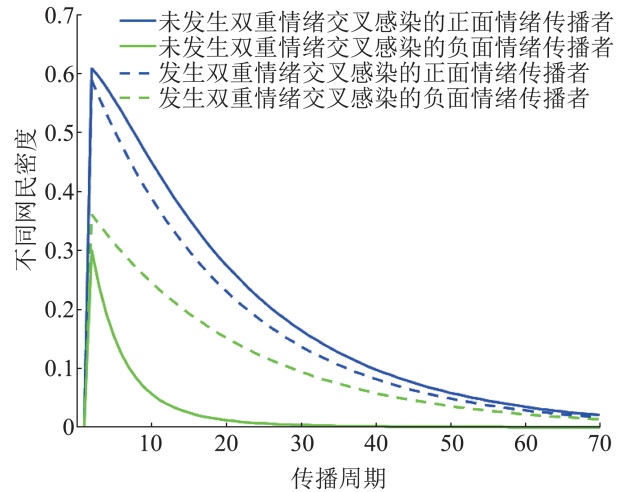


图10 网络舆情传播模型仿真图  
Fig. 10 Simulation diagrams of spreading model of network public opinion

除此之外, 进一步分析图 9~10 结果还可以发现, 重大疫情网络舆情传播过程中, 正面情绪传播者数量明显大于负面情绪传播者。当正面情绪传播者与负面情绪传播者密度达到峰值时, 网络空间正面情绪传播者和负面情绪传播者数量总和最大, 双重情绪交叉感染强度达到最高, 网民对重大疫情的关注度与讨论热度也达到最高。

## 6 结论

本文针对国内外面临的重大疫情挑战, 将经典 SIR 传播模型与情绪感染理论结合, 构建了双重情绪交叉感染下的重大疫情网络舆情传播 SI<sub>p</sub>I<sub>n</sub>R 模型, 有效地刻画了重大疫情网络舆情传播过程, 并针对重大疫情网络舆情传播问题得出以下结论:

- (1) 双重情绪交叉感染促使重大疫情网络舆情传播更加持久, 对重大疫情下具有负面情绪的舆情治理有积极作用;
- (2) 初始情绪传播者比例不同会影响重大疫情网络舆情传播趋势;

(3) 情绪强化度、分歧度、双重情绪交叉感染率均对网络舆情演化趋势具有重要影响。

通过以上结论得到如下启示:

(1) 从政府角度, 应不断完善舆情预警和监管机制, 早发现早干预以减少初始负面情绪传播者比例。同时, 要健全现有的心理干预制度以减少负面情绪传播者对正面情绪传播者的感染率。此外, 还要充分利用好官媒、微信、公众号和微博等社交媒体, 第一时间向社会发布权威信息。

(2) 从媒体角度, 维护社会和谐稳定和公平公正是媒体的第一责任, 媒体要及时转发官媒信息向社会传播正能量, 同时要积极深挖事件真相并及时发布真实信息以驳斥造谣蛊惑者, 积极引导更多未知者转向正面情绪传播者以提高分歧度, 并采取限制负面情绪传播者发布及回复消息等方法以减少负面情绪传播者有效接触量。

(3) 从网民角度, 应增强自身理性思考方式、明辨是非的能力和法律知识, 提升对负面情绪的辨识力、免疫力和抵抗力以减少从未知者和正面情绪传播者转变为负面情绪传播者的几率。

### 参考文献:

- [1] 中国互联网络信息中心. 第49次中国互联网络发展现状统计报告[EB/OL]. (2022-02-25)[2022-07-10]. <https://www.cnnic.net.cn/n4/2022/0401/c88-1131.html.pdf>. CNNIC. The 49th Statistical Report on China's Internet Development[EB/OL]. (2022-02-25) [2022-07-10]. <https://www.cnnic.net.cn/n4/2022/0401/c88-1131.html.pdf>.
- [2] 朱丽丽, 尹文强, 宋春燕, 等. 我国省级卫生和计划生育委员会官方微博应用现状分析[J]. 中华医院管理杂志, 2018, 34(3): 231-236. Zhu Lili, Yin Wenqiang, Song Chunyan, et al. Application Status of Official Micro-blogs Run by Health and Family Planning Commissions of Provincial Level[J]. Chinese Journal of Hospital Administration, 2018, 34(3): 231-236.
- [3] Kermack W O, McKendrick A G. Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics-III. Further Studies of the Problem of Endemicity[J]. Bulletin of Mathematical Biology, 1991, 53(1): 89-118.
- [4] Goffman W, Newill V A. Generalization of Epidemic Theory: An Application to the Transmission of Ideas[J]. Nature, 1964, 204(4955): 225-228.
- [5] Daley D J, Kendall D G. Epidemics and Rumours[J]. Nature, 1964, 204(4963): 1118.
- [6] Gruhl D, Liben-Nowell D, Guha R, et al. Information Diffusion Through Blogspace[J]. ACM Sigkdd Explorations Newsletter, 2004, 6(2): 43-52.
- [7] Momani S, Kumar R, Srivastava H M, et al. A Chaos Study of Fractional SIR Epidemic Model of Childhood Diseases[J]. Results in Physics, 2021, 27: 104422.
- [8] Dasgupta A, Sengupta S. Scalable Estimation of Epidemic Thresholds via Node Sampling[J]. Sankhya A, 2022, 84(1): 321-344.
- [9] Mohan N, Kumari N. Positive Steady States of a SI Epidemic Model with Cross Diffusion[J]. Applied Mathematics and Computation, 2021, 410: 126423.
- [10] Nekovee M, Moreno Y, Bianconi G, et al. Theory of Rumour Spreading in Complex Social Networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 374(1): 457-470.
- [11] Gu J, Li W, Cai X. The Effect of the Forget-remember Mechanism on Spreading[J]. The European Physical Journal B, 2008, 62(2): 247-255.
- [12] Wang Yaqi, Yang Xiaoyuan, Han Yiliang, et al. Rumor Spreading Model with Trust Mechanism in Complex Social Networks[J]. Communications in Theoretical Physics, 2013, 59(4): 510.
- [13] 王筱莉, 赵来军. 社会网络中具有怀疑机制的谣言传播模型[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(5): 424-428. Wang Xiaoli, Zhao Lajun. Rumor Spreading Model with Skepticism Mechanism in Social Networks[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2012, 34(5): 424-428.
- [14] 赵来军, 吴盼. 考虑传播率和移出率变化的谣言传播规律研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(4): 345-350. Zhao Lajun, Wu Pan. Rumor Spreading Model with Variable Spreading and Removal Rate[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(4): 345-350.
- [15] 张立凡, 赵凯. 媒体干预下带有讨论机制的网络舆情传播模型研究[J]. 现代图书情报技术, 2015(11): 60-67. Zhang Lifan, Zhao Kai. Study on the Internet Public Opinion Dissemination Model with Discussion Under the Effect of Media[J]. New Technology of Library and Information Service, 2015(11): 60-67.
- [16] 狄岚, 顾雨迪. 媒体干预下三分意见群体网络舆情传播模型[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 2958-2965. Di Lan, Gu Yudi. Internet Public Opinion Dissemination Model with Triple Opinion Group Under Media Intervention[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30

- (8): 2958-2965.
- [17] 金晓玲, 冯慧慧, 周中允. 微信朋友圈中健康信息传播行为研究[J]. 管理科学, 2017, 30(1): 73-82.  
Jin Xiaoling, Feng Huihui, Zhou Zhongyun. An Empirical Study on Healthcare Information Diffusion Behavior in WeChat Moments[J]. Journal of Management Science, 2017, 30(1): 73-82.
- [18] Wyer R S Jr, Srull T K. Affective Causes and Consequences of Social Information Processing[M]// Clore G L, Schwarz N, Conway M. Handbook of Social Cognition. 2nd ed. New York: Psychology Press, 1994: 323-417.
- [19] 田世海, 孙美琪, 张家毓. 基于改进SIR模型的网络舆情情绪演变研究[J]. 情报科学, 2019, 37(2): 52-57, 64.  
Tian Shihai, Sun Meiqi, Zhang Jiayu. Research on the Emotion Evolution of Network Public Opinion Based on Improved SIR Model[J]. Information Science, 2019, 37(2): 52-57, 64.
- [20] 张亚明, 何旭, 杜翠翠, 等. 负面情绪累积效应下网民群体情绪传播的IESR模型研究[J]. 情报科学, 2020, 38(10): 29-34.  
Zhang Yaming, He Xu, Du Cuicui, et al. IESR Model of Emotional Transmission of Netizens Under the Effect of Negative Emotions[J]. Information Science, 2020, 38(10): 29-34.
- [21] 王俊秀, 张衍. 风险认知、社会情绪和未来预期: 疫情不同阶段社会心态的变化[J]. 社会科学战线, 2022(10): 220-237.
- [22] 张省, 周燕. 突发公共卫生事件网络舆情传播机制研究[J]. 医学与社会, 2021, 34(6): 113-118, 129.  
Zhang Sheng, Zhou Yan. Research on the Network Public Opinion Transmission Mechanism of Public Health Emergencies[J]. Medicine and Society, 2021, 34(6): 113-118, 129.
- [23] 张教萌, 师荣蓉. 基于利益相关者的突发事件网络舆情演化研究[J]. 情报学报, 2022, 41(5): 525-535.  
Zhang Jiaomeng, Shi Rongrong. The Evolution of the Online Public Opinion of Stakeholders in Emergencies[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2022, 41(5): 525-535.
- [24] 赵新刚, 周颖. 重大突发公共卫生事件中社会群体行为演化的计算实验: 以新冠肺炎疫情为例[J/OL]. 中国管理科学. (2022-04-15) [2022-09-19]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1002>.
- Zhao Xingang, Zhou Ying. Computational Experiment on the Evolution of Social Group Behavior in Major Public Health Emergencies: A Case Study of COVID-19 Epidemic[J/OL]. Chinese Journal of Management Science. (2022-04-15) [2022-09-19]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1002>.
- [25] 鲍玉斌, 刘济霆, 李效宇. 考虑舆情的分时段SIQR模型的新冠疫情分析与预测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(8): 1065-1072, 1088.  
Bao Yubin, Liu Jiting, Li Xiaoyu. Time-divided SIQR Model for COVID-19 Analysis and Prediction in Consideration of Public Opinion[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(8): 1065-1072, 1088.
- [26] 张亚明, 苏妍娜, 刘海鸥. 双重社会强化谣言传播模型及稳定性分析[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(9): 1960-1975.  
Zhang Yaming, Su Yanyuan, Liu Haiou. Rumor Spreading Model and Stability Analysis Considering the Double Social Reinforcements[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2017, 37(9): 1960-1975.
- [27] 崔玉美, 陈姗姗, 傅新楚. 几类传染病模型中基本再生数的计算[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(4): 14-31.  
Cui Yumei, Chen Shanshan, Fu Xinchu. The Thresholds of Some Epidemic Models[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(4): 14-31.
- [28] 苏妍娜, 张亚明, 何旭, 等. 风险感知交叉演变下突发事件网络舆情传播模型研究[J]. 现代情报, 2020, 40(12): 100-113.  
Su Yanyuan, Zhang Yaming, He Xu, et al. Research on Network Public Opinion Propagation Model of Emergency Under Cross-evolution of Risk Perception[J]. Journal of Modern Information, 2020, 40(12): 100-113.
- [29] P van den Driessche, Watmough J. Reproduction Numbers and Sub-threshold Endemic Equilibria for Compartmental Models of Disease Transmission[J]. Mathematical Biosciences, 2002, 180(1/2): 29-48.
- [30] Stuart A M, Humphries A R. Dynamical Systems and Numerical Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 22-24.