

引用格式:郭妍,武岳巍,林彦君,殷复莲,吴建宏.基于情感因素和信任机制的谣言与辟谣动力学模型构建[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(06):01-11.

文章编号:1673-4793(2023)06-0001-11

基于情感因素和信任机制的谣言与辟谣动力学模型构建

郭妍^{1,2},武岳巍^{1,2},林彦君²,殷复莲^{1,2},吴建宏^{3*}

- (1. 中国传媒大学信息与通信工程学院,北京 100024;
2. 中国传媒大学媒体融合与传播国家重点实验室,北京 100024;
3. 加拿大约克大学工业与应用数学实验室,多伦多 M3J1P3)

摘要: 社交网络中,研究谣言和辟谣在传播过程中的规律,有助于把握谣言信息传播趋势从而调节舆论走向。本文提出了一种基于情感因素和信任机制的S/E-F(D)-I(Susceptible/Educated-Forwarding(Defuting)-Immune)谣言/辟谣两阶段的传播动力学模型。模型基于传统的SFI(Susceptible-Forwarding-Immune)模型,分别研究谣言信息和相应辟谣信息的传播过程。在第一阶段谣言信息传播过程中考虑情感因素,进一步考察不同极性情感的动态演化过程;在第二阶段辟谣信息传播过程中考虑信任机制,进一步考察网民信任危机对辟谣信息传播的影响。两阶段模型均加入了受教育人群(E)探究辟谣信息相关教育程度及个人认知水平对信息传播的影响。基于已构建的S/E-F(D)-I动力学模型对新浪微博真实案例事件进行了数值拟合,刻画了真实舆情传播过程并验证了已有模型的有效性和合理性,通过参数敏感性分析挖掘影响谣言传播的重要因素,为制定谣言应对决策策略提供了支持。

关键词: 信息传播动力学;谣言与辟谣;二阶段模型;公众情感

中图分类号: O29 **文献标识码:** A

Modeling rumor and counter-rumor information propagation dynamics based on emotional factors and trust mechanism

GUO Yan^{1,2}, WU Yuewei^{1,2}, LIN Yanjun², YIN Fulian^{1,2}, WU Jianhong^{3*}

- (1. School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China;
2. State Key Laboratory of Media Convergence and Communication, Communication University of China, Beijing 100024, China;
3. Laboratory for Industrial and Applied Mathematics, York University, Toronto M3J1P3, Canada)

Abstract: In social networks, studying the patterns of rumors and counter-rumor in propagations process can help to predict and understand the trend of rumor spreading and design optional inferences to guide the public option. Here, we proposed a novel emotion-based S/E-F(D)-I (Susceptible/Educated-Forwarding(Defuting)-Immune) two-stage rumor/counter-rumor propagation dynamics model. Our approach was based on the traditional SFI (Susceptible-Forwarding-Immune) model, which was used to investigate the propagation process of rumor information and the corresponding counter-rumor information separately. However, our two stage model allowed us to examine the dynamic process of different polarities emotions by considering

基金项目: 北京自然科学基金(No. 4232015)

作者简介(*为通讯作者): 郭妍(2001-),女,硕士研究生,主要从事信息传播动力学研究。Email: guoyangy@cuc.edu.cn; 吴建宏(1964-),男,博士,教授,主要从事应用数学,流行病学,动态分支与情景分析。Email: wujhhida@hotmail.com

emotional factors in the rumor propagation at the first stage, and then incorporate trust mechanism to quantify the impact of confidence crisis on the dissemination of counter-rumor information at the second stage. Our model also incorporated the educated population (E) at both the 1st and 2nd stage to explore the influence of education and personal knowledge level on information dissemination in the relevant populations. We applied this constructed S/E-F(D)-I dynamics model to numerically fit and simulate some real case events on Sina Weibo to recover the real public opinion propagation process, and to validate the model. We perform sensitivity analysis to determine significant factors affecting rumor propagation in order to support the formulation of decision-making strategies for rumor management.

Keywords: information propagation dynamics; rumor and counter-rumor; two-stage model; public sentiment

1 引言

在自媒体时代,越来越多的用户愿意在社交媒体上分享或传播自己的观点。随着大量信息的发布,网民通常很难区分信息中传递消息的真假,事实上用户可能在不知不觉中就成了谣言的传播者。在传播谣言的过程中,每条信息不仅承载着个人的想法和见解,还承载着情感。带有情感倾向的谣言一旦快速大量传播,就会扰乱社会的道德秩序,需要采取适当的措施及时管理。因此,研究谣言传播机制具有极其重要的意义,能够为有效辟谣、减轻谣言负面影响、构建和谐网络环境提供决策支持。

构建动力学模型来理解信息传播机制一直是一个热门话题。1964年,Daley和Kendall^[1]通过对比谣言与流行病,发现网络信息扩散过程与疾病传播具有相似之处,因此以生物数学领域中的传染病动力学为基础,提出了基于SIR(Susceptible-Infected-Recovered)^[2]病毒传播模型的DK谣言传播模型。随后越来越多的流行病模型如SI(Susceptible-Infected)模型^[3,4]、SEIR(Susceptible-Exposed-Infected-Recovered)模型^[5]、SIS(Susceptible-Infected-Susceptible)模型^[6]和SIRS(Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible)模型^[7]等被信息传播动力学所采用。随着谣言管制在治理舆情工作中越来越重要,在谣言传播建模中一些研究纳入了人类心理学的视角^[8-10]。Tian等^[11]考虑了ILRDS(Ignorants-Latents-Rumorspreaders-Debunkers-Stiflers)模型,分析了揭穿行为和总人口变化的影响。Dong等^[12]考虑了谣言传播者和现实世界谣言制造者的身份,建立了双重身份谣言模型,提出现实世界的身份具有不同的属性和转变过程。鉴于心理因素和社交网络的异质性,Xu等^[13]提出了一种SHPRS

(Susceptible-Hesitating-Propagating-Resisted-Susceptible)模型。Qin等^[14]提出了一个谣言与反谣言的三元(媒体、政府和网民)互动演化模型,建立了划分谣言与反谣言的规则。Luo等^[15]在异构网络中建立了一个具有一般入射率的I2SR(Ignorants-Spreaders-1-Spreaders-2-Removers)谣言传播模型,考虑了谣言传播过程中的时间延迟。同时,一些研究还加入了影响谣言传播的其他因素^[16-24],如传播结构、信息与个体行为之间的互动机制、传播情感、用户的功能、谣言传播者的顽固性、人们的性格以及两种谣言之间的相互促进等。

针对利用信息传播动力学模型进行分阶段谣言和辟谣信息传播分析尚不成熟的问题,本文提出了一个基于三元极性情感累积转发量的谣言传播模型以及一个基于信任机制的辟谣传播模型来解决上述问题,考察公众对谣言的不同情感传播趋势和对辟谣信息的传播规律。

2 动力学模型构建

本文构建二阶段信息传播动力学模型,分别研究谣言和辟谣信息的传播过程。模型将动力学系统中的群体状态划分为以下四大类:

易感人群(Susceptible,简写为S):处于该状态的群体还没有接触到谣言/辟谣信息,但是有接触谣言/辟谣信息的能力。

受教育人群(Educated,简写为E):处于该状态的人群还没有接触到谣言/辟谣信息,但该状态的人群事先接触过谣言/辟谣事件相关的教育,有接触谣言/辟谣信息的能力但会对信息保持警惕。

转发人群(Forwarding,简写为F):在谣言信息传播过程中,处于该状态的群体已经转发了谣言信息,他们都有使处于易感人群和受教育人群接触到谣言

信息的能力。以情感极性为划分依据,可获得三类即携带正向情感的转发状态(F_{Pos})、携带中性情感的转发状态(F_{Neu})、携带负向情感的转发状态(F_{Neg});在辟谣信息传播过程中,以是否信任辟谣信息为划分依据,将转发辟谣信息的网民可以划分为两类,即怀疑辟谣信息状态(F_q)和相信辟谣信息状态(D)。

免疫人群(Immune,简称为 I):处于该状态的群体不会再受到转发群体的影响,不再对谣言/辟谣信息感兴趣。

因此, $S(t)$ 、 $F_{Pos}(t)$ 、 $F_{Neu}(t)$ 、 $F_{Neg}(t)$ 、 $F_q(t)$ 、 $D(t)$ 、 $I(t)$ 分别表示各群体在 t 时刻的数量。本文假设,在谣言传播阶段 $S(t) + F_{Pos}(t) + F_{Neu}(t) + F_{Neg}(t) + I(t) = N$,在辟谣阶段 $S(t) + F_q(t) + D(t) + I(t) = N$,即在 t 时刻处于不同状态的群体总和(N)保持不变。

2.1 极性情感驱动的谣言信息传播动力学模型

本节构建了极性情感驱动的谣言信息传播动力

学模型以模拟极性情感传播的动态过程,将涉及情感传播的物理因素映射为模型参数,利用常微分方程组描述各群体间的动态转移过程,模型如图1所示,同时模型可由公式(2.1)-(2.6)表征,式中参数定义如表1所示。

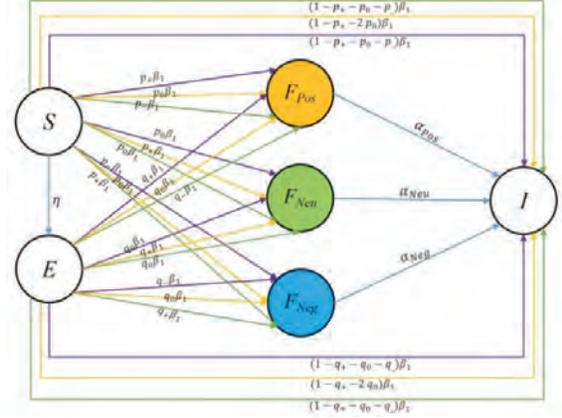


图1极性情感驱动的谣言信息传播动力学模型

$$\frac{d}{dt} S(t) = -\beta_1 S(t) F_{Pos}(t) - \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) - \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) - \eta S(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt} E(t) = -\beta_1 E(t) F_{Pos}(t) - \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) - \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) + \eta S(t) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} F_{Pos}(t) = & p_+ \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_- \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) \\ & + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_- \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) - \alpha_{Pos} F_{Pos}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} F_{Neu}(t) = & p_0 \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) \\ & + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) - \alpha_{Neu} F_{Neu}(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} F_{Neg}(t) = & p_- \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_- \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) \\ & + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) - \alpha_{Neg} F_{Neg}(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I(t) = & (1 - p_+ - p_0 - p_-) \beta_1 S(t) [F_{Pos}(t) + F_{Neg}(t)] + (1 - p_+ - 2p_0) \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) \\ & + (1 - q_+ - q_0 - q_-) \beta_1 E(t) [F_{Pos}(t) + F_{Neg}(t)] + (1 - q_+ - 2q_0) \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) \\ & + \alpha_{Pos} F_{Pos}(t) + \alpha_{Neu} F_{Neu}(t) + \alpha_{Neg} F_{Neg}(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_{Pos}(t) = & p_+ \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_- \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) \\ & + q_- \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_{Neu}(t) = & p_0 \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) \\ & + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_{Neg}(t) = & p_- \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_- \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) \\ & + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

模型所描述的动力学系统中,一个具有特定情感

的活跃谣言信息转发者在单位时间内平均将会接触

$\beta_1 N$ 个用户,而被接触的用户为易感人群的概率为 $S(t)/N$,被接触的用户为受教育人群的概率为 $E(t)/N$,所以一个活跃谣言信息转发者在单位时间内平均将会接触 $\beta_1 S(t)$ 个易感者, $\beta_1 E(t)$ 个受教育者。当易感者/受教育者分别被携带正向、中性、负向情感的转发者影响后,会产生如下三类转移过程:

(1) **易感者/受教育者受携带正向情感的转发者影响后的动态转移过程:**当 $\beta_1 S(t)F_{Pos}$ 个易感者或 $\beta_1 E(t)F_{Pos}$ 个受教育者被携带正向情感的转发者影响时, $p_+ \beta_1 S(t)F_{Pos}$ 个易感者或 $q_+ \beta_1 E(t)F_{Pos}$ 个受教育者将会携带与影响者相同的正向情感转发信息, $p_0 \beta_1 S(t)F_{Pos}$ 个易感者或 $q_0 \beta_1 E(t)F_{Pos}$ 个受教育者将会携带与影响者轻微相反的中性情感转发信息, $p_- \beta_1 S(t)F_{Pos}$ 个易感者或 $q_- \beta_1 E(t)F_{Pos}$ 个受教育者将会携带与影响者完全相反的负向情感转发信息,且有 $(1 - p_+ - p_0 - p_-) \beta_1 S(t)F_{Pos}$ 个易感者或 $(1 - q_+ - q_0 - q_-) \beta_1 E(t)F_{Pos}$ 个受教育者由于对信息不感兴趣而成为不活跃的免疫者;

(2) **易感者/受教育者受携带中性情感的转发者影响后的动态转移过程:**当 $\beta_1 S(t)F_{Neu}$ 个易感者或 $\beta_1 E(t)F_{Neu}$ 个受教育者被携带中性情感的转发者影响时, $p_+ \beta_1 S(t)F_{Neu}$ 个易感者或 $q_+ \beta_1 E(t)F_{Neu}$ 个受教育者将会携带与影响者相同的中性情感转发信息,特别的, $p_0 \beta_1 S(t)F_{Neu}$ 个易感者或 $q_0 \beta_1 E(t)F_{Neu}$ 个受教育者将会携带与影响者轻微相反的正向或负向情感转发信息,然而有 $(1 - p_+ - 2p_0) \beta_1 S(t)F_{Neu}$ 个易感者或 $(1 - q_+ - 2q_0) \beta_1 E(t)F_{Neu}$ 个受教育者由于对信息不感兴趣而成为不活跃的免疫者;

(3) **易感者/受教育者受携带负向情感的转发者影响后的动态转移过程:**当 $\beta_1 S(t)F_{Neg}$ 个易感者或 $\beta_1 E(t)F_{Neg}$ 个受教育者被携带负向情感的转发者影响时, $p_+ \beta_1 S(t)F_{Neg}$ 个易感者或 $q_+ \beta_1 E(t)F_{Neg}$ 个受教育者将会携带与影响者相同的负向情感转发信息, $p_0 \beta_1 S(t)F_{Neg}$ 个易感者或 $q_0 \beta_1 E(t)F_{Neg}$ 个受教育者将

会携带与影响者轻微相反的中性情感转发信息, $p_- \beta_1 S(t)F_{Neg}$ 个易感者或 $q_- \beta_1 E(t)F_{Neg}$ 个受教育者将会携带与影响者完全相反的正向情感转发信息,且有 $(1 - p_+ - p_0 - p_-) \beta_1 S(t)F_{Neg}$ 个易感者或 $(1 - q_+ - q_0 - q_-) \beta_1 E(t)F_{Neg}$ 个受教育者由于对信息不感兴趣而成为不活跃的免疫者。

此外,当转发者度过活跃的曝光期后,他们将不再有能力影响他人,因此,将有 $\alpha_{Pos} F_{Pos}(t)$ 个携带正向情感的转发者、 $\alpha_{Neu} F_{Neu}(t)$ 个携带中性情感的转发者以及 $\alpha_{Neg} F_{Neg}(t)$ 个携带负向情感的转发者成为不活跃的免疫者。

群体情感在 t 时刻的有效量可由函数 $F_{em}(t)$ 表示,其中 $em \in \{Pos, Neu, Neg\}$,而群体情感在 t 时刻的累积量可由函数 $C_{em}(t)$ 表示,那么群体情感累积量在 t 时刻的变化率可由公式(2.7)-(2.9)表示。

2.2 加入辟谣信息传播过程的动力学模型

本节针对于第一阶段谣言的辟谣信息,构建了辟谣信息传播过程的动力学模型,以模拟辟谣信息发布后的动态过程,通过常微分方程组描述各群体间的动态转移过程,模型如图2所示,同时模型可由公式(2.10)-(2.14)表征,式中参数定义如表1所示。

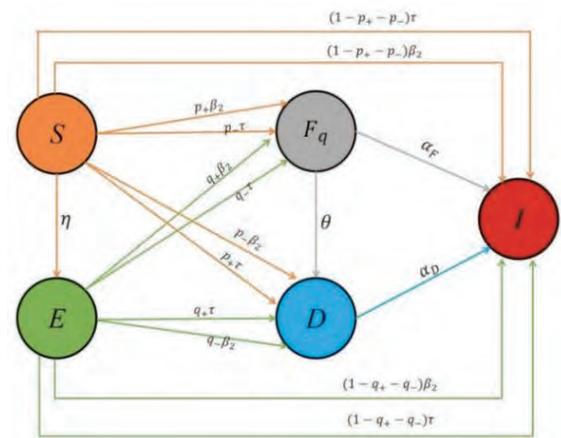


图2 加入辟谣信息传播过程的动力学模型

$$\frac{d}{dt} S(t) = -\beta_2 S(t)F_q(t) - \tau S(t)D(t) - \eta S(t) \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{dt} E(t) = -\beta_2 E(t)F_q(t) - \tau E(t)D(t) + \eta S(t) \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt} F_q(t) = p_+ \beta_2 S(t)F_q(t) + p_+ \tau S(t)D(t) + q_+ \beta_2 E(t)F_q(t) + q_+ \tau E(t)D(t) - \alpha_q F_q(t) - \theta F_q(t) \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} D(t) = p_- \beta_2 S(t)F_q(t) + p_- \tau S(t)D(t) + q_- \beta_2 E(t)F_q(t) + q_- \tau E(t)D(t) - \alpha_D D(t) + \theta F_q(t) \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt}I(t) = (1 - p_+ - p_-) [\beta_2 F_q(t) + \tau D(t)] S(t) + (1 - q_+ - q_-) [\beta_2 F_q(t) + \tau D(t)] E(t) + \alpha_f F_q(t) + \alpha_D F_D(t) \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt}C_F(t) = p_+ \beta_2 S(t) F_q(t) + p_- \tau S(t) D(t) + q_+ \beta_2 E(t) F_q(t) + q_- \tau E(t) D(t) \quad (2.15)$$

$$\frac{d}{dt}C_D(t) = p_+ \beta_2 S(t) F_q(t) + p_- \tau S(t) D(t) + q_+ \beta_2 E(t) F_q(t) + q_- \tau E(t) D(t) + \theta F_q(t) \quad (2.16)$$

模型所描述的动力学系统中,一个质疑辟谣信息转发者在单位时间内平均将会接触 $\beta_2 N$ 个用户,一个辟谣信息转发者在单位时间内平均将会接触 τN 个用户,而被接触的用户为易感人群的概率为 $S(t)/N$,被接触的用户为受教育人群的概率为 $E(t)/N$,所以一个质疑辟谣信息转发者在单位时间内平均将会接触 $\beta_2 S(t)$ 个易感者, $\beta_2 E(t)$ 个受教育者。一个辟谣信息转发者在单位时间内平均将会接触 $\tau S(t)$ 个易感者, $\tau E(t)$ 个受教育者。当易感者/受教育者分别被质疑辟谣信息转发者或辟谣信息转发者影响后,会产生如下两类转移过程:

(1)易感者/受教育者受质疑辟谣信息转发者影响后的动态转移过程:当 $\beta_2 S(t) F_q$ 个易感者或 $\beta_2 E(t) F_q$ 个受教育者被质疑辟谣信息转发者影响时, $p_+ \beta_2 S(t) F_q$ 个易感者或 $q_+ \beta_2 E(t) F_q$ 个受教育者将会携带与影响者相同的以质疑辟谣信息情感转发信息, $p_- \beta_2 S(t) F_q$ 个易感者或 $q_- \beta_2 E(t) F_q$ 个受教育者将会携带与影响者相反的相信辟谣信息情感转发信息,且有 $(1 - p_+ - p_-) \beta_2 S(t) F_q$ 个易感者或 $(1 - q_+ - q_-) \beta_2 E(t) F_q$ 个受教育者由于对信息不感兴趣而成为

不活跃的免疫者;

(2)易感者/受教育者受相信辟谣信息转发者影响后的动态转移过程:当 $\tau S(t) D(t)$ 个易感者或 $\tau E(t) D(t)$ 个受教育者被受相信辟谣信息转发者影响时, $p_+ \tau S(t) D(t)$ 个易感者或 $q_+ \tau E(t) D(t)$ 个受教育者将会携带与影响者相同的相信辟谣信息情感转发信息, $p_- \tau S(t) D(t)$ 个易感者或 $q_- \tau E(t) D(t)$ 个受教育者将会携带与影响者相反的质疑辟谣信息情感转发信息,然而有 $(1 - p_+ - p_-) \tau S(t) D(t)$ 个易感者或 $(1 - q_+ - q_-) \tau E(t) D(t)$ 个受教育者由于对信息不感兴趣而成为不活跃的免疫者。

此外,当转发者度过活跃的曝光期后,他们将不再有能力影响他人,因此,将有 $\alpha_f F_q(t)$ 个携带质疑辟谣信息情感的转发者和 $\alpha_D D(t)$ 个携带相信辟谣信息情感的转发者成为不活跃的免疫者。

不同转发群体在 t 时刻的有效量可由函数 $F_q(t)$ 和 $F_D(t)$ 表示,而不同转发群体在 t 时刻的累积量可由函数 $C_F(t)$ 和 $C_D(t)$ 表示,那么不同转发群体累积量在 t 时刻的变化率可由公式(2.15)-(2.16)表示。

表1 参数定义

参数	定义
β_1	表示 S 状态人群或 E 状态人群能够接触到 F_{Pos} 、 F_{Neu} 和 F_{Neg} 状态人群所转发谣言信息的平均速率。
β_2	表示 S 状态人群或 E 状态人群能够接触到 F_q 状态人群所转发质疑辟谣信息的平均速率。
τ	表示 S 状态人群或 E 状态人群能够接触到 D 状态人群所转发辟谣信息的平均速率。
θ	F_q 状态人群因自身判断而变成 D 状态人群的平均迁移率。
η	S 状态人群因自身认知水平或相关部门的教育而变成 E 状态人群的平均迁移率。
p_+	表示处于 S 状态人群转发谣言/辟谣信息时携带与影响者相同情感/信任程度的平均概率。例如,受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 S 状态人群也以正向情感转发谣言信息,或者受到处于 F_q 状态人群影响后,处于 S 状态人群也以质疑辟谣信息的态度转发辟谣信息。
p_0	表示处于 S 状态人群转发谣言信息时携带与影响者轻微相反情感的平均概率。例如,受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 S 状态人群以中性情感转发谣言信息。
p_-	表示处于 S 状态人群转发谣言/辟谣信息时携带与影响者完全相反情感/信任程度的平均概率。例如受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 S 状态人群以负向情感转发谣言信息,或者受到处于 D 状态人群影响后,处于 S 状态人群以质疑辟谣信息的态度转发辟谣信息。
q_+	表示处于 E 状态人群转发谣言/辟谣信息时携带与影响者相同情感/信任程度的平均概率。例如,受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 E 状态人群也以正向情感转发谣言信息,或者受到处于 F_q 状态人群影响后,处于 E 状态人群也以质疑辟谣信息的态度转发辟谣信息。
q_0	表示处于 E 状态人群转发谣言信息时携带与影响者轻微相反情感的平均概率。例如,受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 E 状态人群以中性情感转发谣言信息。
q_-	表示处于 E 状态人群转发谣言/辟谣信息时携带与影响者完全相反情感/信任程度的平均概率。例如受到处于 F_{Pos} 状态人群影响后,处于 E 状态人群以负向情感转发谣言信息,或者受到处于 D 状态人群影响后,处于 E 状态人群以质疑辟谣信息的态度转发辟谣信息。
α_{Pos}	表示处于 F_{Pos} 状态人群转移至 I 状态人群的平均免疫速率。
α_{Neu}	表示处于 F_{Neu} 状态人群转移至 I 状态人群的平均免疫速率。
α_{Neg}	表示处于 F_{Neg} 状态人群转移至 I 状态人群的平均免疫速率。
α_f	表示处于 F_q 状态人群转移至 I 状态人群的平均免疫速率。
α_D	表示处于 D 状态人群转移至 I 状态人群的平均免疫速率。

3 数值拟合

为了验证模型的有效性,本文将三元极性情感和辟谣信息的时序累积量作为观测值开展数值拟合实验,对模型参数进行估计。除模型定义参数外,还将初始易感群体总数 S_0 、初始受教育人群 E_0 也作为待

$$LS_1 = \sum_{k=0}^T |f_{Pos}(k, \Theta) - C_{Pos,k}|^2 + \sum_{k=0}^T |f_{Neu}(k, \Theta) - C_{Neu,k}|^2 + \sum_{k=0}^T |f_{Neg}(k, \Theta) - C_{Neg,k}|^2 \quad (3.1)$$

$$LS_2 = \sum_{k=0}^T |f_D(k, \Theta) - C_{D,k}|^2 + \sum_{k=0}^T |f_{Fq}(k, \Theta) - C_{Fq,k}|^2 \quad (3.2)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots, T$ 代表采样点, $C_{Pos,k}$ 、 $C_{Neu,k}$ 、 $C_{Neg,k}$ 以及 $C_{D,k}$ 和 $C_{Fq,k}$ 分别代表正向情感累积量、中性情感累积量、负向情感累积量以及辟谣信息累积量和质疑辟谣信息累积量的观测值, $f_{Pos}(k, \Theta)$ 、 $f_{Neu}(k, \Theta)$ 、 $f_{Neg}(k, \Theta)$ 以及 $f_D(k, \Theta)$ 、 $f_{Fq}(k, \Theta)$ 代表相对应的模拟值, 模拟值的结果是基于 $C_{Pos}(t)$ 、 $C_{Neu}(t)$ 、 $C_{Neg}(t)$ 以及 $C_D(t)$ 和 $C_{Fq}(t)$ 的表达式得到的。

3.1 数据集描述

本文选取了一个谣言信息和相对应的辟谣信息作为典型案例, 谣言信息为: 乌方媒体称世界上最大运输机 AN225 被俄方炸毁, 辟谣信息为: 俄媒体人士称俄军摧毁 AN225 是假消息。对于待研究的谣言和辟谣信息案例, 可通过新浪微博对外开放的应用程序接口(API, Application Programming Interface) 获得相关数据, 包括数值型数据与文本型数据, 即各转发者准确的转发时间和转发内容。

根据采集的用户转发谣言信息时的文案内容, 利用 mT0_base 大语言模型进行情感分类, 例如文案内容为“不会吧, 太可惜了”分为负向情感, 仅转发谣言信息没有附加文案内容分为中性情感, 文案内容为“这飞机我好喜欢的”分为正向情感。此外, 对于辟谣信息传播过程中的动态演化过程, 将采集到的用户转发辟谣信息的文案内容分为相信辟谣信息和质疑辟谣信息两类, 例如将仅仅转发辟谣信息没有附加文案内容分为相信辟谣信息类, 将文案内容为“谎话连篇”分为质疑辟谣信息类。

图3分别展示了转发谣言信息时用户携带三类具有不同情感的累积转发量数值拟合结果。图4分别展示了转发辟谣信息的相信辟谣信息和质疑辟谣信息的两类人群的累积转发量数值拟合结果。图中,*代表不同情感的累积转发量的观测值(每10分钟采集一次累积转发量), 而实线代表相应的模拟值。累积转

估计的参数, 因此, 参数向量可表示为:

$$\Theta_1 = (\beta, \eta, p_+, p_0, p_-, q_+, q_0, q_-, \alpha_{Pos}, \alpha_{Neu}, \alpha_{Neg}, \theta_1, \theta_2, \theta_3, S_0, E_0)$$

$$\Theta_2 = (\tau, \eta, p_D, q_D, \alpha_D, \theta_1, \theta_2, \theta_3, S_0, E_0)$$

本文采用最小二乘法(LS, Least Square)估计参数向量, 目标函数如公式(3.1)-(3.2)所示:

变量 $C_{Neu_max} > C_{Neg_max} > C_{Pos_max}$ 表明对于此谣言信息, 人们在社交媒体上倾向于共享中性情绪, $C_{Fq_max} > C_{D_max}$ 表明对于此辟谣信息, 用户多数表示质疑。

根据图3、图4可以看出, 面向第一阶段的谣言信息和第二阶段的辟谣信息传播场景, S/E-F(D)-I模型能够很好地模拟谣言信息中三元极性情感的传播趋势和两类转发辟谣信息人群的传播趋势, 验证了模型的有效性。

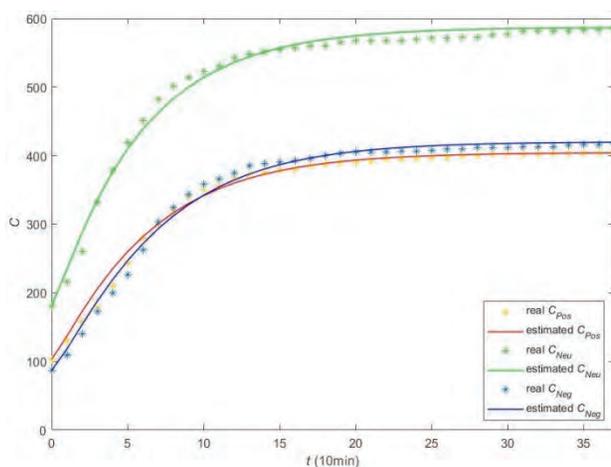


图3 谣言信息的数值拟合结果

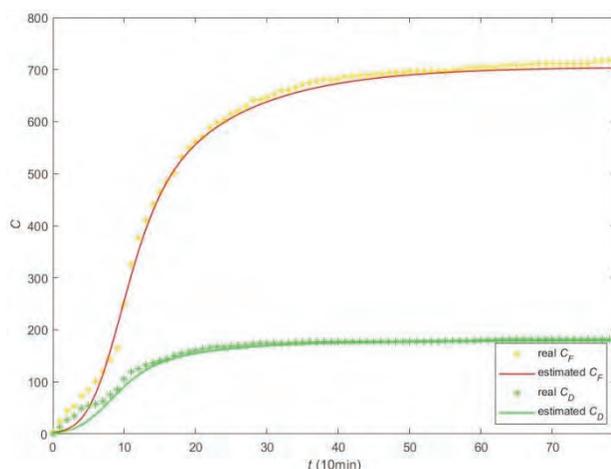


图4 辟谣信息的数值拟合结果

3.2 参数估计

表2-3分别给出了谣言信息和辟谣信息的参数估计结果。根据S/E-F(D)-I模型,可以对参数拟合结果进行分组分阶段分析。

表2 谣言信息参数估计结果

参数	β_1	η	S_0	E_0	p_+
数值	6.5665×10^{-5}	0.0644	1456.3	6022.2	0.9972
参数	p_0	p_-	q_+	q_0	q_-
数值	0.5627	0.5003	0.2553	0.0012	0.0074
参数	α_{Pos}	α_{Neu}	α_{Neg}		
数值	0.3147	0.2667	0.2596		

表3 辟谣信息参数估计结果

参数	β_2	τ	η	θ
数值	2.1448×10^{-6}	0.0029	0.0335	0.0018
参数	p_+	p_-	q_+	q_-
数值	0.0792	0.0469	0.0017	0.6474
参数	α_F	α_D	S_0	E_0
数值	0.13	0.974	6621	230.1542

在谣言传播且还未发布辟谣信息时,平均接触速率 β_1 由谣言信息传播时所依附的网络密度决定。在辟谣信息发布后, β_2 和 τ 由辟谣信息所依附的网络密度决定。此外,易感用户向受教育用户迁移的平均迁移率 η 反映了相关部门的教育影响程度。

平均转发概率 $p_+, p_0, p_-, q_+, q_0, q_-$ 反映了用户的传播兴趣。在谣言信息传播过程中, $p_+ > p_0 > p_-, q_+ > q_0 > q_-$,表明对于普通用户和受过相关教育的用户来说,以相同情感转发谣言信息的平均概率最大,说明用户对同一谣言信息容易表现出同样的情感。由 $p_+ > q_+, p_0 > q_0, p_- > q_-$,表明受过相关教育的人群,对于谣言信息转发的概率更小,此群体不容易受到携带情绪的谣言传播

$$\mathcal{M}_1(x) =$$

$$\begin{bmatrix} p_+ \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_- \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_- \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \\ p_0 \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \\ p_- \beta_1 S(t) F_{Pos}(t) + p_0 \beta_1 S(t) F_{Neu}(t) + p_+ \beta_1 S(t) F_{Neg}(t) + q_- \beta_1 E(t) F_{Pos}(t) + q_0 \beta_1 E(t) F_{Neu}(t) + q_+ \beta_1 E(t) F_{Neg}(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\mathcal{V}_1(x) = \begin{bmatrix} \alpha_{Pos} F_{Pos}(t) \\ \alpha_{Neu} F_{Neu}(t) \\ \alpha_{Neg} F_{Neg}(t) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

在S/E-F(D)-I的模型中,始终存在“无信息传播平衡点” $H_0 = (S_0, E_0, 0, 0, 0, 0)$, S_0 为初始时刻易感群体总

者的影响;在辟谣信息传播过程中, $p_+ > p_-$,表明对于普通用户,以相同情感转发谣言信息的平均概率更大, $q_+ > q_-$,表明受过相关教育的用户以相反情感转发谣言信息的平均概率更大。同时 q_- 远远大于 p_+ 和 p_- ,表明受过相关教育的人群,更易转发辟谣信息。

平均免疫速率 $\alpha_{Pos}, \alpha_{Neu}, \alpha_{Neg}, \alpha_F, \alpha_D$ 分别反映了带有三种不同情感的谣言转发者和两类辟谣信息转发者在整个传播过程中维持相应信息传播影响力的持久性。在谣言信息传播过程中, $\alpha_{Pos} > \alpha_{Neu} > \alpha_{Neg}$ 表明带有正向情感的谣言转发者会更快的失去影响他人的能力,带有负向情感的信息往往更容易扩散谣言的传播。在辟谣信息传播过程中, $\alpha_D > \alpha_F$ 表明质疑辟谣信息人群会更容易扩散辟谣信息的传播。

4 参数敏感性分析与结论

4.1 传播指标

为衡量信息能否爆发,本节定义两个指标,情感传播可再生数 \mathcal{R}_0^r ,该指标表示在谣言信息传播初期,当所有人均为易感者/受教育者时,一个携带任意情感的转发者能够影响易感者/受教育者使之成为传播情感的转发者的平均人数;辟谣信息传播可再生数 \mathcal{R}_0^c ,该指标表示在辟谣信息传播初期,当所有人均为易感者/受教育者时,一个辟谣信息转发者或质疑辟谣信息转发者能够影响易感者/受教育者使之成为相同传播情感的转发者的平均人数。两指标在参考了传染病模型中基本再生数的计算方法后,根据S/E-F(D)-I模型进行改写,第一阶段的情感传播可再生数 \mathcal{R}_0^r 推导过程如下所示:

$$\dot{x} = \mathcal{M}(x) - \mathcal{V}(x) \quad (4.1)$$

其中:

$$\dot{x}_1 = [F_{Pos}(t), F_{Neu}(t), F_{Neg}(t)]^T \quad (4.2)$$

数, E_0 为初始时刻知识水平较高群体的总数,因此可得 $\mathcal{M}_1(x)$ 和 $\mathcal{V}_1(x)$ 在该点的雅克比矩阵:

$$M_1 = \begin{bmatrix} p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0 & p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0 & p_- \beta_1 S_0 + q_- \beta_1 E_0 \\ p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0 & p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0 & p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0 \\ p_- \beta_1 S_0 + q_- \beta_1 E_0 & p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0 & p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} \alpha_{Pos} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{Neu} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{Neg} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

则计算可知:

$$|\lambda E - M_1 V_1^{-1}| = \begin{vmatrix} \lambda - \frac{p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0}{\alpha_{Pos}} & -\frac{p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0}{\alpha_{Neu}} & -\frac{p_- \beta_1 S_0 + q_- \beta_1 E_0}{\alpha_{Neg}} \\ -\frac{p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0}{\alpha_{Pos}} & \lambda - \frac{p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0}{\alpha_{Neu}} & -\frac{p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0}{\alpha_{Neg}} \\ -\frac{p_- \beta_1 S_0 + q_- \beta_1 E_0}{\alpha_{Pos}} & -\frac{p_0 \beta_1 S_0 + q_0 \beta_1 E_0}{\alpha_{Neu}} & \lambda - \frac{p_+ \beta_1 S_0 + q_+ \beta_1 E_0}{\alpha_{Neg}} \end{vmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

上述公式(4.7)共有三个特征根,而第一阶段的情感传播可再生数 \mathfrak{R}_0^e 为三个特征根中的最大值,即情感传播可再生数 $\mathfrak{R}_0^e = \max\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ 。

当情感传播可再生数 $\mathfrak{R}_0^e < 1$,谣言转发者的数量随时间迅速减少,谣言信息不会爆发,公众情感无法得以累积,然而当情感传播可再生数 $\mathfrak{R}_0^e > 1$,谣言转

发者的数量在最初呈指数型增长,公众情感能够得以累计。且情感传播可再生数 \mathfrak{R}_0^e 数值的大小决定了谣言信息爆发的初始速度,即情感传播可再生数 \mathfrak{R}_0^e 越大,谣言信息爆发的初始速度越快。

同理,第二阶段的辟谣信息传播可再生数 \mathfrak{R}_0^c 推导过程如下所示:

$$\dot{x}_2 = [F_q(t), D(t)]^T \quad (4.8)$$

$$\mathcal{M}_2(x) = \begin{bmatrix} p_+ \beta_2 S(t) F_q(t) + p_- \tau S(t) D(t) + q_+ \beta_2 E(t) F_q(t) + q_- \tau E(t) D(t) \\ p_- \beta_2 S(t) F_q(t) + p_+ \tau S(t) D(t) + q_- \beta_2 E(t) F_q(t) + q_+ \tau E(t) D(t) + \theta F_q(t) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$V_2(x) = \begin{bmatrix} \alpha_q F_q(t) \\ \alpha_D D(t) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

可得 $\mathcal{M}_2(x)$ 和 $V_2(x)$ 在该点的雅克比矩阵:

$$M_2 = \begin{bmatrix} p_+ \beta_2 S_0 + q_+ \beta_2 E_0 & p_- \tau S_0 + q_- \tau E_0 \\ p_- \beta_2 S_0 + q_- \beta_2 E_0 + \theta & p_+ \tau S_0 + q_+ \tau E_0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} \alpha_q & 0 \\ 0 & \alpha_D \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

计算可知:

$$|\lambda E - M_2 V_2^{-1}| = \begin{vmatrix} \lambda - \frac{p_+ \beta_2 S_0 + q_+ \beta_2 E_0}{\alpha_q} & -\frac{p_- \tau S_0 + q_- \tau E_0}{\alpha_D} \\ -\frac{p_- \beta_2 S_0 + q_- \beta_2 E_0 + \theta}{\alpha_q} & \lambda - \frac{p_+ \tau S_0 + q_+ \tau E_0}{\alpha_D} \end{vmatrix} = 0 \quad (4.13)$$

上述公式(4.13)共有两个特征根,而第二阶段的辟谣信息传播可再生数 \mathfrak{R}_0^c 为两个特征根中的最大值,即辟谣信息传播可再生数 $\mathfrak{R}_0^c = \max\{\lambda_1, \lambda_2\}$ 。

当辟谣信息传播可再生数 $\mathfrak{R}_0^c > 1$,辟谣信息转发者的数量在最初呈指数型增长。且辟谣信息传播可再生数 \mathfrak{R}_0^c 数值的大小决定了辟谣信息爆发的初始速度,即辟谣信息传播可再生数 \mathfrak{R}_0^c 越大,辟谣信息爆发的初始速度越快。

4.2 参数敏感性分析

本文利用偏秩相关系数方法(PRCCs, Partial Rank Correlation Coefficients),对模型参数进行敏感性分析。通过PRCCs法可以在一定程度上定量地衡量参数和指标间的线性相关性,具体包括相关性的极性以及相关性的强弱。

图5以直方图和散点图的形式给出了各阶段参数向量与传播可再生数 \mathfrak{R}_0 的PRCCs参数敏感性分析结果。PRCCs方法使用1000组随机样本在参数边界范围内进行重复实验,最终给出平均结果,将显著性水平作为判定参数与指标之间的相关性结论是否成立的标准。在直方图中,偏秩相关系数PRCCs的数值结果在-1到1之间,系数值越接近1表示参数对指标的正向影响越大,系数值越接近-1表示参数对指标的负向影响越大。在散点图中,横坐标为在多元线性回归分析中指标的残差结果,纵坐标为在多元线性回归分析中参数的残差结果,当散点图中1000个点的总体趋势越偏向右时,表示参数对指标的正向影响越大;当

散点图中1000个点的总体趋势越偏向左时,表示参数对指标的负向影响越大。

由图5可知,在谣言传播阶段,平均接触速率 β_1 、平均相同情感转发速率 q_1 、初始受教育群体总数 E_0 均与基础情感传播可再生数 \mathfrak{R}_0^c 呈强正相关性,说明谣言所依附的网络密度、受教育者与传播者的“共情”效应、动力学系统规模是影响该指标的关键参数;而各情感群体的平均免疫速率 α_{Pos} 、 α_{Neu} 、 α_{Neg} 均与其呈负相关性,说明各

情感群体的曝光期越长,越有利于谣言信息的爆发。在辟谣信息发布后阶段,平均辟谣人群接触速率 τ 、平均相同情感转发速率 p_1 、初始易感群体总数 S_0 均与辟谣信息传播可再生数 \mathfrak{R}_0^r 呈强正相关性,说明辟谣信息所依附的网络密度、易感者与传播者的“共情”效应、动力学系统规模是影响该指标的关键参数;而转发辟谣信息群体的平均免疫速率 α_D 与其呈负相关性,说明转发辟谣信息群体的曝光期越长,越有利于辟谣信息的爆发。

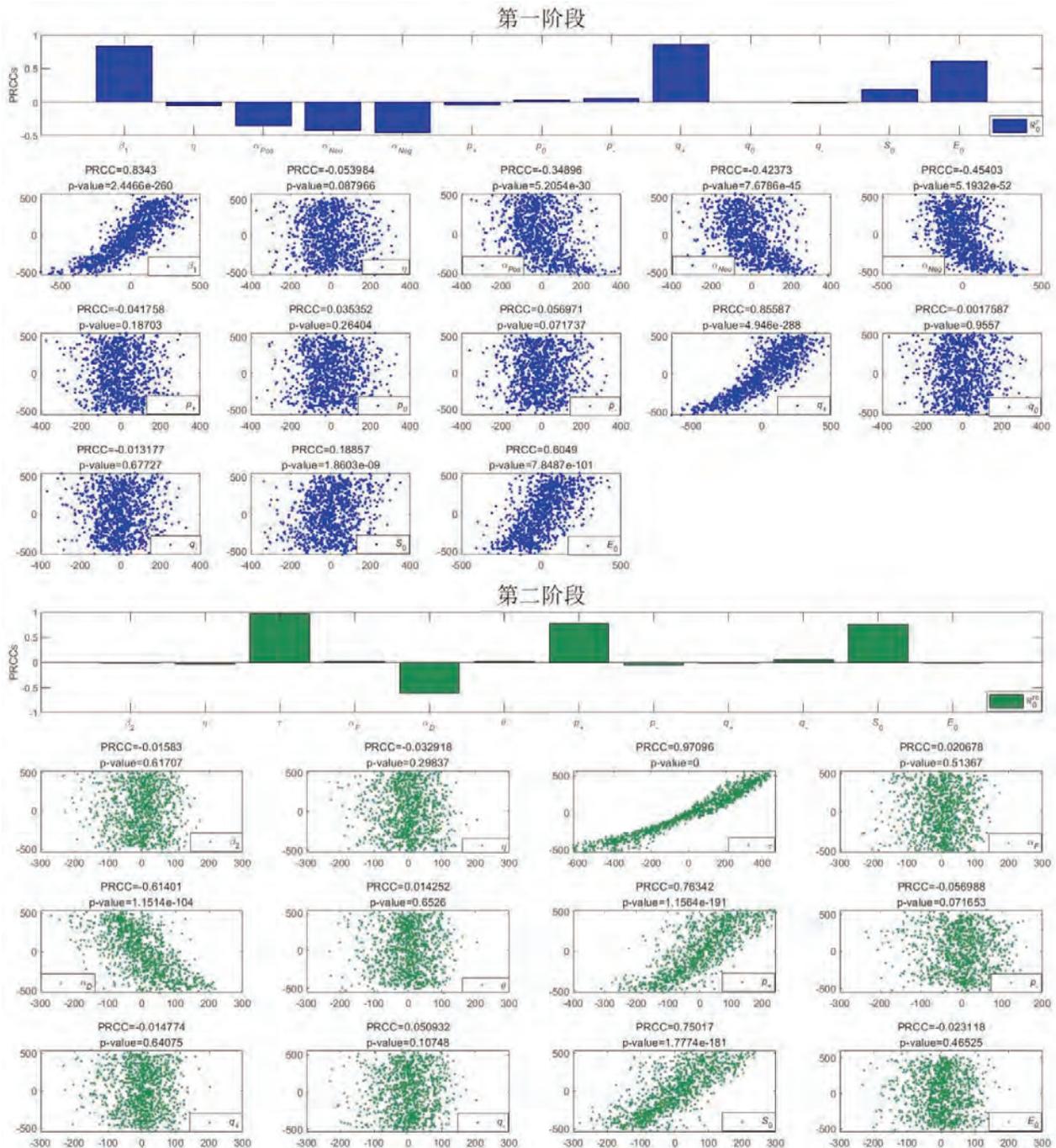


图5 R_0 的PRCCs参数敏感性分析结果

5 结论

因为社交网络上经常出现危害社会稳定和安全的谣言,所以了解如何在社交媒体上向公众有效传达反谣言信息以及关注谣言信息传播过程中伴随带有情感的公众观点表达非常重要。本文提出了基于情感的S/E-F(D)-I谣言/辟谣两阶段的传播动力学模型,该模型基于公众对新浪微博中真实谣言和相应辟谣信息的传播案例,以了解网民在传播谣言信息时所携带的情感、相关部门的教育程度及个人认知水平、辟谣信息的网民信任程度对舆情传播的影响,探究抑制谣言信息传播的因素,加大反谣言传播的力度。构建的信息传播动力学模型在第一阶段考虑了用户传播谣言时,通常会带有三种极性情感,进一步探究不同极性情感的传播趋势;在第二阶段考虑了用户传播辟谣信息时,通常会根据主观或其他因素选择对辟谣信息的信任与否,同时两阶段模型均未接触谣言或辟谣信息的人群分为易感人群和受教育人群。本文根据同一事件对应的谣言信息和辟谣信息相关的真实数据进行数值拟合,以验证模型的有效性,并对参数进行敏感性分析,以更好的辨别模型中设置的参数对信息传播的影响。实验最终得出结论:通常情况下,在谣言信息传播过程,受教育人群更容易携带与影响者相同的情感传播谣言信息,但携带轻微相反或完全相反情感的人群也不容忽视;在辟谣信息传播过程中,易感人群更容易表达与影响者相同信任程度传播辟谣信息。相比较而言,易感人群更易转发谣言信息,受教育人群更易转发辟谣信息。综上所述,加强反谣言知识相关的教育普及,以及引导主流媒体和有影响力的用户发布相关辟谣信息,加大辟谣信息的推广。希望通过有效的科学方法,进一步抑制谣言的传播,营造积极良好的网络环境。

参考文献(References):

- [1] Daley D J, Kendall D G. Epidemics and rumors [J]. *Nature*, 1964, 204(4963): 1118.
- [2] Stone L, Shulgin B, Agur Z. Theoretical examination of the pulse vaccination policy in the SIR epidemic model [J]. *Mathematical and Computer Modelling: An International Journal*, 2000, 31(4-5): 207-215.
- [3] Chen F H. A susceptible-infected epidemic model with voluntary vaccinations [J]. *Journal of Mathematical Biology*, 2006, 53(2): 253-272.
- [4] Lu Z, Gao S, Chen L. Analysis of an SI epidemic model with nonlinear transmission and stage structure [J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2003, 23(4): 440-446.
- [5] Li M Y, Muldowney J S. Global stability for the SEIR model in epidemiology [J]. *Mathematical Biosciences*, 1995, 125(2): 155-164.
- [6] Xia C, Sun S, Rao F, et al. SIS model of epidemic spreading on dynamical networks with community [J]. *Frontiers of Computer Science in China*, 2009, 3(3): 361-365.
- [7] Lahrouz A, Omari L, Kiuouach D, et al. Complete global stability for an SIRS epidemic model with generalized nonlinear incidence and vaccination [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, 218(11): 6519-6525.
- [8] Xiao Y, Chen D, Wei S, et al. Rumor propagation dynamic model based on evolutionary game and anti-rumor [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 95(1): 523-539.
- [9] Sang C Y, Liao S G. Modeling and simulation of information dissemination model considering user's awareness behavior in mobile social networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 537: 122639.
- [10] Hosni A I E, Li K, Ahmad S. Minimizing rumor influence in multiplex online social networks based on human individual and social behaviors [J]. *Information Sciences: An International Journal*, 2020, 512(C): 1458-1480.
- [11] Tian Y, Ding X. Rumor spreading model with considering debunking behavior in emergencies [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 363: 124599.
- [12] Dong X, Liu Y, Wu C, et al. A double-identity rumor spreading model [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 528: 121479.
- [13] Xu H, Li T, Liu X, et al. Spreading dynamics of an online social rumor model with psychological factors on scale-free networks [J]. *Physica A*. 2019, 525: 234-46.
- [14] Qin S, Zhang M, Hu H. Ternary interaction evolutionary game of rumor and anti-rumor propagation under government reward and punishment mechanism [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111: 21409-21439.
- [15] Luo X, Jiang H, Li J, et al. Modeling and controlling delayed rumor propagation with general incidence in heterogeneous networks [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2023, 35(2): 2450020.
- [16] Xiao Y, Yuan W, Yue X, et al. A diffusion model for multimessage multidimensional complex game based on rumor and anti-rumor [J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2023, 10(5): 2672-2685.
- [17] You X, Zhang M, Ma Y. Research on the interaction between information and behavior based on small group effect on multilayer social networks [J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2023, 18(5).
- [18] Yang A, Huang X, Cai X, et al. ILSR rumor spreading model with degree in complex network [J]. *Physica A: Sta-*

- tistical Mechanics and its Applications, 2019, 531: 121807.
- [19] Yao Y, Xiao X, Zhang C, et al. Stability analysis of an SDILR model based on rumor recurrence on social media [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 535: 122236.
- [20] Chen X, Wang N. Rumor spreading model considering rumor credibility, correlation and crowd classification based on personality[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 5887.
- [21] Wang Z, Liang J, Nie H, et al. A 3SI3R model for the propagation of two rumors with mutual promotion[J]. Advances in Difference Equations, 2020(1): 109.
- [22] Yin F, Jiang X, Qian X, et al. Modeling and quantifying the influence of rumor and counter-rumor on information propagation dynamics [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, 162: 112392.
- [23] Yin F, Xia X, Zhang X, et al. Modelling the dynamic emotional information propagation and guiding the public sentiment in the Chinese sina-microblog[J]. Applied Mathematics and Computation, 2021, 396: 125884.
- [24] 殷复莲, 吴建宏. 网络信息传播动力学建模与分析[M]. 北京: 中国传媒大学出版社, 2020.

编辑: 王谦