

基于移动社交网络的谣言传播动力学研究*

王辉¹⁾²⁾ 韩江洪^{1)†} 邓林¹⁾²⁾ 程克勤¹⁾²⁾

1) (合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

2) (合肥工业大学信息与网络中心, 合肥 230009)

(2012年12月1日收到; 2013年1月30日收到修改稿)

本文在 CSR 传播模型的基础上提出基于移动社交网络的 CSR 的谣言传播模型. 改进了 CSR 模型的传播规则和传播动力学方程, 使得更符合移动 SNS 上用户的使用习惯. 在 CSR 模型中的接受概率数学模型基础上, 考虑个人接受阈值对接受概率的影响, 更符合人类接受谣言的心理学特点. 本文对该传播模型进行了理论分析. 并在仿真实验中, 利用多 agent 仿真平台对新模型和 CSR 模型以及 SIR 模型在匀质网络和异质网络中的传播效果进行了对比研究, 从实验的结果来看, 新的谣言传播模型在匀质网络中传播范围更广, 传播速度更快. 新模型具有初值敏感性的特点.

关键词: 复杂网络, 移动社交网络, 谣言传播

PACS: 05.45.-a, 89.75.-k

DOI: 10.7498/aps.62.110505

1 引言

社会网络 (Social Network) 的研究发源于哈佛大学的心理学教授斯坦利于 1967 年提出的六度分隔理论 (six degrees of separation), “每个人最多只需要通过 6 个人就能认识任何一个陌生人”^[1]. 社交网络服务 (Social Network Services, SNS) 是一种互联网应用, 旨在为一群存在社会关系或拥有共同兴趣的、以各种形式在线聚合的用户提供信息共享与交互服务. 当前, 出现了许多著名的提供 SNS 的社交网站, 如 Facebook、Myspace 等^[2]. 其实包括我国近两年非常流行的 Weibo, 也可以认为是广义上的社交网络. SNS 架构社会网络在最近几年发展迅速, 国外著名社交网站 Facebook 的用户数已经达到 10 亿^[1], 而我国微博客的用户数也达到 3 亿之多. 在线社交网络正深入的影响和改变着人们的生活方式, 最新的研究证明著名的六度空间理论在 Facebook 中被改写, 在这个虚拟世界中人们的平均路径仅为 4.74^[5]. 随着移动互联网的发展, SNS 开始逐渐面向移动终端用户. 移动 SNS 无缝地将移动

计算和社会计算结合起来, 极大地增强了用户的真实性、地域性和交互的实时性^[3]. 移动终端与用户的绑定保证了社交网络的真实性; 位置信息的引入, 带来了多样化、个性化的社交网络服务; 移动终端“永久在线”, 可以提供用户间的实时交互. 另外, 移动终端可以利用用户的历史位置信息以及与其他用户相遇的历史记录 (蓝牙等短距离无线通信的服务发现) 来感知社会上下文, 并实现基于社会上下文的应用^[4].

信息传播是社交网络的发展的基础, 移动社交网络中传播的信息可以有很多种, 比如时尚、新闻以及谣言和舆论等都属于信息的范畴. 在这些类别的信息中, 谣言传播应该得到更密切的关注. 原因主要有以下几点: 1) 谣言传播尤其是政治舆论的传播引起的社会效应较大, 尤其在一些特殊的历史时期, 谣言的传播对社会的政治稳定会有很大的影响. 2) 移动社交网络中谣言传播成本较低, 且很多社交网络比如微博客中的很多用户都是匿名, 用户不需要对传播不实的谣言负责. 这使得移动社交网络上谣言往往传播的更快, 范围也更广.

复杂网络理论近 10 年来发展迅速, 以小世界

* 国家自然科学基金 (批准号: 60873194) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wanghui@hfut.edu.cn

模型^[6]和无标度模型^[7]为代表的复杂网络模型能够描述很多现实网络的特点. 复杂网络上的传播动力学问题是这个领域一个重要的研究方向^[8,9], 经典的传播研究的有流行病研究^[10-12], 计算机病毒的扩散^[13], 舆论在人群中的传播^[14-16]等. 流行病传播是复杂网络上传播动力学研究的源头, 在流行病传播的研究中, 人们主要把注意力放在研究不同网络模型下病毒传播的阈值问题^[17]. 其中一个重要的研究成果是得到了在无标度网络中的类似计算机病毒传播的阈值为零的有趣结论^[18].

本文目的是基于移动社交网络的特点, 在 CSR (Credulous-Spreader-Rationals) 模型^[24]的基础上改进提出一个新的谣言传播模型, 并用实验比较与 CSR 模型的不同. 主要的工作有两点: 1) 结合移动社交网络的特点, 修改了 CSR 模型的传播公式使之更适合描述移动社交网络上用户行为特点. 2) 在接受谣言的概率模型中, 考虑社会加强和人对谣言的有记忆效应和接受阈值的特点, 使之更符合人类的心理学特征.

2 相关工作

2.1 流行病传播经典模型

2.1.1 SIS 模型

在 SIS 模型里, 人群被划分为两类: 易感人群和染病人群, 分别用 S (susceptible) 和 I (infected) 表示^[10]. 染病人群是传染病的源头, 通过一定的概率 λ 把传染病传染给易感人群. 染病人群以一定的概率 ν 被治愈; 易感人群被感染后会同样进行传播. SIS 模型的感染机理可以用下面公式表示:

$$\begin{aligned} S(i) + I(j) &\xrightarrow{\lambda} I(i) + I(j), \\ I(i) &\xrightarrow{\nu} S(j). \end{aligned} \quad (1)$$

如果我们用 $s(t), i(t)$ 分别标记群体中个体在时刻 t 处于 S 态和 I 态的密度, 当易感人群和染病人群充分混合的时候, 其动力学可以用下列微分方程组描述:

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} &= -\lambda i(t)s(t) + \nu i(t), \\ \frac{di(t)}{dt} &= \lambda i(t)s(t) - \nu i(t). \end{aligned} \quad (2)$$

此方程中存在一个阈值 λ_c , 当 $\lambda < \lambda_c$ 时其定态解为 $i(T) = 0$, 而当 $\lambda > \lambda_c$ 时其定态解为 $i(T) > 0$, 这里的 T 为达到稳定态的时间.

2.1.2 SIR 模型

与 SIS 模型不同的是, SIR 模型多了一个免疫人群 R (refractory 或者 recovered)^[11,12]. 免疫人群是感染人群被治愈后有了免疫能力, 或者是已经死亡, 不再对传播过程产生影响的节点. SIR 模型非常适合于描述注入麻疹、水痘等疾病, 这些疾病经过治愈后即可终身免疫, 还有一些疾病比如艾滋病, 最终是必须死亡, 也适用于 SIR 模型. SIR 模型的感染机理可以用下面的公式表示:

$$\begin{aligned} S(i) + I(j) &\xrightarrow{\lambda} I(i) + I(j), \\ I(i) &\xrightarrow{\nu} R(j). \end{aligned} \quad (3)$$

类似的, 在 SIR 模型中如果用 $s(t), i(t), r(t)$ 分别标记群体处于 S 态、I 态和 R 态的密度. 当易感人群染病人群充分混合时, SIR 模型的动力学可以用以下微分方程组描述:

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} &= -\lambda i(t)s(t), \\ \frac{di(t)}{dt} &= \lambda i(t)s(t) - \nu i(t), \\ \frac{dr(t)}{dt} &= \nu i(t). \end{aligned} \quad (4)$$

随着时间的进行, 感染人数将逐步增加. 充分长的时间后, 感染人数将因易感人数的不足而开始减少直至感染人数变为零, 传染过程结束. 因此, 最后的感染密度 $r(T)$ 与感染率 λ 间存在着——对应的关系, 且 $r(T)$ 可被用来测量传播的有效性, 这里 T 为传播过程结束的时间. SIR 模型也存在一个阈值 λ_c , 当 $\lambda < \lambda_c$ 时传染病无法扩散, 当 $\lambda > \lambda_c$ 时传染病有大规模爆发的可能. SIS 模型与 SIR 模型的区别主要是 SIS 模型的终态为稳态, 而 SIR 模型的终态为无感染态, 低于临界值时总的感染人数密度为 0.

2.2 复杂网络上谣言传播的经典模型

网络上一种重要的信息传播形式是谣言传播, 大部分的谣言传播可以近似的用 SIR 模型来描述. 由于其自身的特点, 它的三种状态代表的意义与流行病情形略微有些不同. 这里的 S, I, R 所对应的分别是不知道消息的人群, 知道消息的并有能力继续传播消息的人群, 及知道消息但已经失去传播能力或兴趣的人群. 我们假设网络上有 N 个节点, 每个代表一个可传播消息的个人, 他们传播消息的过程

可以由以下关系简单的表示出来:

$$\begin{aligned} I(i) + S(j) &\rightarrow I(i) + I(j), \\ I(i) + I(j) &\rightarrow R(i) + I(j), \\ I(i) + R(j) &\rightarrow R(i) + R(j), \end{aligned} \quad (5)$$

我们假设在初始时刻, 一个有限网络中所有的节点都处于准备接受谣言的状态, 在某一时刻突然有一个节点得到了一个新的消息, 它将成为 I 态. 那么按照上面所定义的规则, 这个消息将在网络中传播, 直到最终网络中没有 I 态的节点为止. 我们称这个状态为终态. 这个问题首先由 Sudbury 进行了研究^[14], 后来则由 Zanette^[15] 与 Liu 等^[16,17] 进行了讨论.

Sudbury 提出一个随机网的 SIR 模型: 在一个村庄中随机选取两个人并让他们进行一次电话通话来传递消息, Sudbury 发现舆论最多只能传递到 80% 的人群. Zanette 借助于平均场理论研究了舆论在小世界网上的传播, 发现获知舆论的人少于 80%. Liu 等则研究了舆论在一般网络上的传播情形, 发现随机网最易传播舆论.

2.3 CSR 模型

CSR 模型是基于在线社交网络上谣言传播特点提出的传播模型^[24], 因为与本文工作有相关性, 所以做重点介绍.

在线社交网络上的谣言传播, 有以下一些特点: 1) 在现实社会中传播的谣言会在传播中被扭曲, 传播过程一般会有简化 (leveling), 强化 (sharpening) 和同化 (assimilation) 的效果, 也就是说一个消息会在传播的末端变的面目全非^[19]. 在线社交网络下的传播一般不会有这样的情况, 因为信息在转发过程中不会因为个人的记忆力等主观原因而被改变, 传播者的观点会在附加的评论中体现. 2) 现有的谣言传播模型, 一般会假设传播者在遇到传播者或者免疫者时就会失去传播的兴趣而停止传播的行为^[20,21], 这个假设有一定的道理, 因为在现实社会中, 传播主要靠口口相传, 传播者需要找到未知者总是有代价的. 但是在在线社交网络上, 因为传播成本较低, 所以不易从传播者转化为免疫者. 传播者只有在传播后失去兴趣变为免疫者或者遇到免疫者被说服后才会停止传播. 3) 传统的谣言传播模型, 基本上没有考虑到社会加强效应^[13,14], 但是这个效应无论在现实社会中和在线社交网络下都是存在的, 最近有不少研究都着眼于这一点^[8,22], 本

团队提出的社会加强效应与他们的不同之处在于这里的社会加强包括了正向和负向的. 正向的社会加强表现在很多人是在不断的收到多个传播者传播的信息后才接受了这个信息并开始传播, 负向的社会加强应该是在接收到某个信息过程中也会接收到很多对这个谣言的怀疑观点, 这个过程降低了传播接受概率, 从而使人怀疑或者彻底不相信这个谣言.

结合以上的特点, 本团队提出 CSR 谣言传播模型^[24], 模型中把在线社交网络中的节点分为以下三类: 1) 轻信者 (Credulous), 这个轻信者类似于流行病传播模型中的易染者, 是指在传播初态没有听过谣言而且是非常轻信谣言的人. 2) 传播者 (Spreader), 轻信者在接受了谣言后即成为谣言的新传播者. 3) 理性人 (Rationals), 在这里理性人类似于流行病传播模型中的免疫者. 但不同的是, 在这个模型中理性人由三部分人群构成, 一小部分理性人在传播的开始之前就会存在 (社会心理学的研究表明有部分人群是不相信任何谣言的理性人^[19]), 另外一部分是传播者失去传播兴趣后成为了理性人, 最后一种是在传播过程中遇到了理性人从而转变为理性人的. 本传播模型中的传播规则如下: 1) 轻信者在收到传播者传播的谣言后, 以接受概率 p 接受这个谣言, 并变为新的传播者, 传播概率 p 是与双向社会加强有关的概率函数. 2) 传播者在在遇到理性人后以概率 v 接受理性人说服变为理性人.

在线社交网络具有非常明显的小世界特性. 小世界网络的构造模型主要来自 WS 小世界模型, 这个模型是通过断边重连节点为 N 且每个节点的度为 m 的规则网络生成的, 因为小世界网络的度分布是满足指数分布的, 所以可以认为小世界模型是所有节点度都近似相等的均匀网络. 统计物理中常用的平均场方法核心思想是把相互作用的总体效果等价于一个“平均场”, 不去计算局部的、处处不同的相互作用情况. 谣言传播的过程中显然充满了基本单元周围局部信息的影响, 在抛开这些具体细节, 仅仅考虑全局的、平均的传播可能性的情况下, 我们就可以得出本模型的传播动力学方程

$$\begin{aligned} \frac{dc(t)}{dt} &= -p\langle k \rangle c(t)s(t), \\ \frac{ds(t)}{dt} &= p\langle k \rangle c(t)s(t) - \langle k \rangle vs(t)r(t), \\ \frac{dr(t)}{dt} &= \langle k \rangle vs(t)r(t) \end{aligned} \quad (6)$$

以上公式中, $c(t), s(t), r(t)$ 分别表示轻信者, 传播者和理性人在人群中的密度, $\langle k \rangle$ 表示网络中平均度的大小, 且容易知道:

$$c(t) + s(t) + r(t) = 1. \quad (7)$$

显然在这个模型中, 未知者对谣言的接受概率 p 是一个对传播结果有很大影响的参数, 在本文中, 将该接受概率定义为如下的函数:

$$P(m) = |(M - \alpha)e^{-|w| \times (m-1)} - M|. \quad (8)$$

(8) 式中, M 为 w 的函数, 当 $w < 0$ 时表示为社会加强的负向影响, 此时 $M = 0$, (8) 式可以表示为

$$P(m) = \alpha e^{-|w| \times (m-1)}. \quad (9)$$

当 $w \geq 0$ 时表示为社会加强的正向影响, 此时 $M = 1$, (8) 式可以表示为

$$P(m) = 1 - (1 - \alpha)e^{-|w| \times (m-1)}. \quad (10)$$

在这个公式中 $|w|$ 表示社会加强或者减弱的程度, $\alpha = p(1)$ 表示接受谣言的初始概率. 根据文献 [22], 认为 $m(t)$ 为 t 时刻累积的接受到谣言的次数.

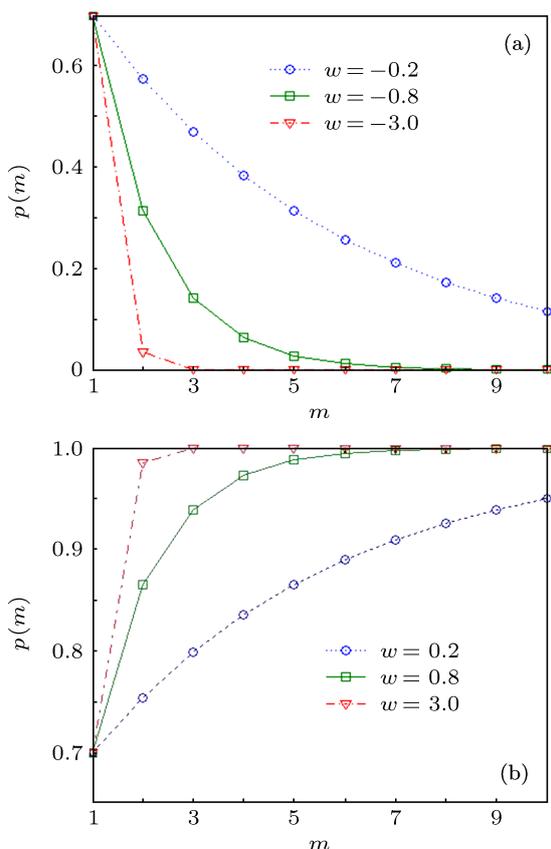


图1 CSR模型的接受概率 (a) 负向社会加强; (b) 正向社会加强

图 1(a), (b) 两图表都是在一次接受概率 $\alpha = p(1) = 0.7$ 的条件下的变化曲线. 图 1(a) 表示在负

向的社会加强效应下, 接受概率在不同的 w 作用下, 随着 m 的增大的曲线. 图 1(b) 表示在正向的社会加强效应下, 接受概率在不同的 w 作用下, 随着 m 的增大的曲线.

3 基于阈值概率的 CSR 传播模型

3.1 移动 SNS 上谣言传播特点

移动社交网络上的谣言传播主要有及时性和准确性两个特点.

1) 及时性, 移动社交网络因为受到近年来移动网络覆盖和智能手机普及的影响, 大幅度的提高了在线率, 在可以预想的未来, 手机用户几乎可以随时的保持 SNS 的在线状态. 也就是说社交网络上的信息传播几乎可以认为可以实时的送达被传播者. 同样传播者会非常快的收到被传播者的反馈信息.

2) 准确性, 因为移动 SNS 上信息多且更新快, 传播者往往不会加工接受到的信息后再传播, 所以信息受损更小更准确.

基于以上描述的特点, 本文认为需要对 CSR 模型进行一定的改进来适应移动 SNS 上谣言传播的特点:

1) 移动社交网络对谣言的反应快, 信息多, 传播者会更快的失去对谣言的传播兴趣转而关注别的信息. 另外移动 SNS 上传播者会非常快的收到被传播者的反馈信息, 也更容易因为对方已经知道该信息而失去传播兴趣. 因而在本文的模型中, 假设传播者会因为周围的节点没有了轻信者而失去传播动力, 从而成为理性人节点, 也就是说传播者在传播过程中遇到理性人或者传播者的时候会以一定概率失去传播兴趣而成为理性人.

2) 因为移动 SNS 上的谣言传播往往呈爆炸性的传播, 轻信者往往很难做出理性的判断来选择接受和拒绝谣言, 接受到谣言的次数和传播者的权重往往成了轻信者做判断的重要依据. 因此在本模型中, 社会加强效应应该考虑个人的接收阈值.

3.2 基于移动 SNS 的谣言传播动力学模型

综上所述, 本文提出针对移动 SNS 上谣言传播的新模型, 该模型传播动力学公式如下:

$$\frac{dc(t)}{dt} = -p\langle k \rangle c(t)s(t),$$

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} &= p\langle k \rangle c(t)s(t) - (v\langle k \rangle s(t)s(t) \\ &\quad + u\langle k \rangle s(t)r(t)), \\ \frac{dr(t)}{dt} &= v\langle k \rangle s(t)s(t) + u\langle k \rangle s(t)r(t). \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式与 (6) 式相比第三项右式改为 $v\langle k \rangle s(t)(s(t) + r(t))$, 表示传播者在传播过程中遇到理性人或者传播者的时候会以一定概率失去传播兴趣而成为理性人

已知在传播的初态有 $c(0) = (N - n)/N$, $s(0) = 1/N \approx 0$, $r(0) = n/N$ 其中 N 表示总节点数, n 表示初始状态下理性人的数量. 为简化模型, 假设传播者遇到传播者失去兴趣的概率和传播者被理性人说服的概率相同.

根据 (11) 式, 可以得到

$$\begin{aligned} \frac{dr(t)}{dc(t)} &= \frac{v\langle k \rangle s(t)(s(t) + r(t))}{-p\langle k \rangle c(t)s(t)} \\ &= \frac{v(1 - c(t))}{-pc(t)}, \end{aligned}$$

可得

$$dr(t) = \frac{v}{p} dc(t) - \frac{v}{pc(t)} dc(t). \quad (12)$$

引入参数 $\varepsilon = (v + p)/v$. 根据初值条件, 可解这个微分方程得到关于传播稳态时理性人的密度 R_T 的超越方程

$$R_T = 1 - e^{-\varepsilon R_T}. \quad (13)$$

方程 (13) 作为一个超越方程, 很显然 0 是其一个平凡解. 当 $\varepsilon = (v + p)/v > 1$ 时, 可以得到方程 (13) 的另一个非平凡解. 所以可以认为在不考虑社会加强的情况下, 本谣言传播模型在匀质网络中没有传播阈值. 这也与文献 [20] 中的经典模型结论类似.

以上结论证明如下:

定理 当 $\varepsilon > 1$, 超越方程 $x = 1 - e^{-\varepsilon x}$ 有两个解, 0 和非平凡解 R , 且 $0 < R < 1$.

证明 首先, $x = 0$ 带入方程, 可以得到 0 是超越方程的一个平凡解. 其次, 假设 $y = x - 1 + e^{-\varepsilon x}$, 对 x 求导, 可以得到

$$y' = 1 - \varepsilon e^{-\varepsilon x},$$

且因为 $\varepsilon e^{-\varepsilon x} > 0$, 得到

$$y'' = \varepsilon^2 e^{-\varepsilon x} > 0.$$

可以得到函数 y 是个凸函数 (convex function).

令 $y' = 1 - \varepsilon e^{-\varepsilon x} = 0$, 可得 x 在 $(0, 1)$ 区间中有一个解 δ , 因为 $y'(0) = 1 - \varepsilon < 0$, 可得 $y(\delta) < 0$, 且因为 $y(1) = e^{-\varepsilon} > 0$, 可得方程在区间 $(\delta, 1)$ 中有另外一个非平凡解 R , 证毕.

3.3 考虑个人接受阈值的概率模型

CSR 模型中的接受概率数学模型是在 (8) 式中描述的, 在该式中 $|w|$ 表示社会加强或者减弱的程度, $\alpha = p(1)$ 表示接受谣言的初始概率. $m(t)$ 为 t 时刻累积的接受到谣言的次数.

本文中在接受概率模型的基础上, 进一步考虑个人接受阈值的情况. 假设种群中有 N 个个体, 每个个体分别处于轻信者、传播者和理性人三种状态之一中. 在传播的每个时刻 t , 个体 i 随机与个体 j 接触. 如果个体 i 是轻信者, 而个体 j 是传播者, 则个体 i 以概率 p 得到一个正的剂量 $d_i(m)$; 如果个体 i 是轻信者, 而个体 j 是理性人, 则个体 i 以概率 p 得到一个负的剂量 $d_i(m)$. 这里每个 $d_i(m)$ 都服从某个分布函数 $f(m)$, 本文假设每次的剂量都是相同的, 也就是说 $d_i(m)$ 服从均匀分布, 且每个个体都保留过去时刻中所接受的总剂量. 本文参考文献 [25] 中的方法定义总剂量的表示如下:

$$D_i(m) = \sum_{m=0}^{m'} d_i(m). \quad (14)$$

当 $D_i(t) > d_i^*$ 时, 处于易染状态的个体 i 则被感染, 在此处 d_i^* 表示每个个体接受谣言的阈值. 由此, 当社会加强效应为负向的时候 (9) 式可以表示如下:

$$\begin{aligned} P(m) &= \alpha e^{(-|w| \times (m-1))}, \quad D_i(m) \leq d_i^*, \\ P(m) &= 0, \quad D_i(m) > d_i^*. \end{aligned} \quad (15)$$

图 2 是 (15) 式的示意图, 在负向社会加强的情况下接受概率的变化情况. 显然, 当 $d_i^* = +\infty$ 时, 本模型退化为 CSR 概率模型.

当社会加强效应为正向时, (10) 式可以有以下表示:

$$P(m) = 1 - (1 - \alpha) e^{(-|w| \times (m-1))}, \quad D_i(m) \leq d_i^*, \quad (16)$$

$$P(m) = 1, \quad D_i(m) > d_i^*. \quad (17)$$

图 3 是 (16) 和 (17) 式的示意图, 在正向社会加强的情况下, 接受概率的变化情况. 显然, 当

$d_i^* = +\infty$ 时, 本模型退化为 CSR 概率模型.

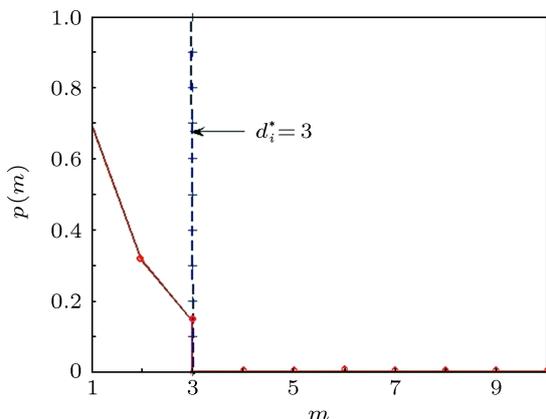


图2 负向社会加强情况下考虑接受阈值的概率模型

言, 如果一次没有接受则个体 i 以概率 p 得到一个正的剂量 $d_i(m)$ 直达到接受阈值 d_i^* . 该 Agent 在传播中接触理性人时, 会根据阈值模型得到一个负的剂量 $d_i(m)$.

2) Spreader, 用以描述传播者的行为特征, 该 Agent 在每个时间步不断的向相邻的轻信者传播谣言, 直到所有的邻节点都为非轻信者才结束传播过程, 并在最后被理性人以一定概率说服, 结束谣言传播过程.

3) Rationals, 用以描述理性人的行为特征, 该 Agent 在谣言传播行为开始后, 不断接触轻信者以降低其接受概率, 并不断接触传播者以说服其结束传播行为.

4 仿真实验

4.1 多主体平台建模

基多 Agent 建模强调依据 CAS 理论的基本思想, 把系统组合为多 Agent 系统 (MAS), 通过多 Agent 的联合或群集动态模拟复杂系统的真实情景, 从而为模拟系统的复杂性特征提供了手段.

本文提出的模型在多 Agent 仿真平台中定义建模如下:

1) Credulous, 用以描述轻信者的行为特征, 该 Agent 在接触传播者时, 以一定的初始概率接受谣

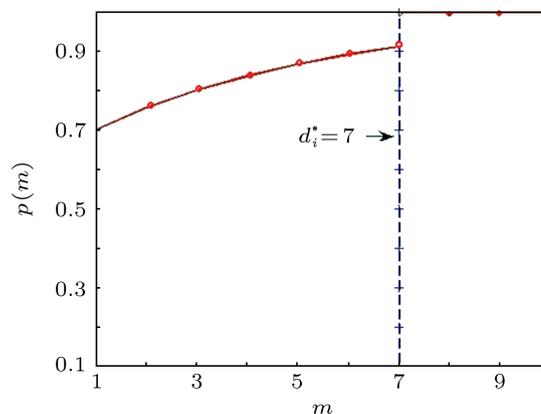


图3 正向社会加强情况下考虑接受阈值的概率模型

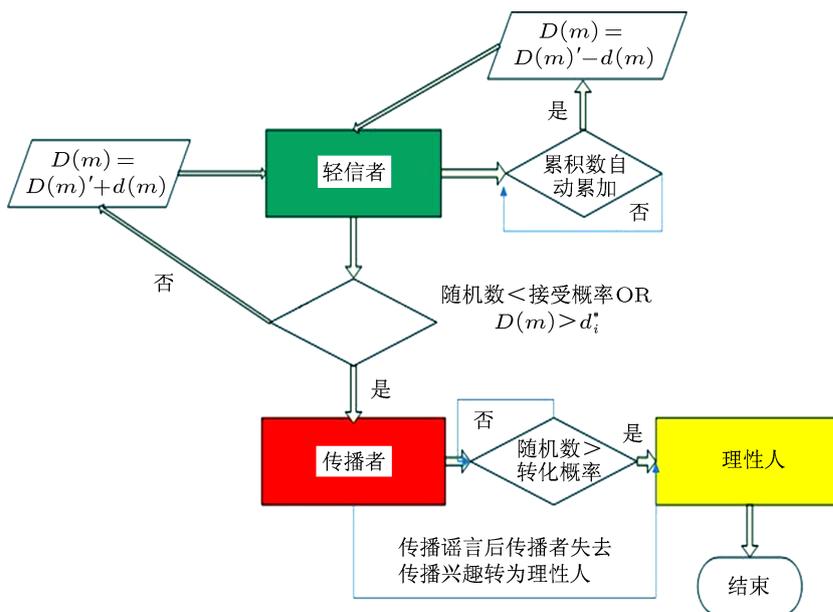


图4 基于移动 SNS 的谣言传播机理

4.2 匀质网络对比实验

在多 Agent 仿真实验中, 我们每组实验之前首先生成一个节点数为 1000, 节点平均度为 6 的匀质网络, 在这个网络上分别进行 3 次传播实验. 第一次是传统的基于 SIR 模型的谣言传播实验. 第 2 次是 CSR 传播模型实验. 第 3 次是基于移动 SNS 的 CSR 模型实验, 为了方便说明, 后面试验中统称为 M-CSR 模型. 我们在仿真的程序中设计了一个开关量, 用以控制选择 3 种模型. 另外为了尽量减少网络的随机结构对实验结果的影响, 在每一次实验结束后, 对传播结果进行清空和回滚操作后, 再进行第二次实验.

实验 1 的传播规则如下:

- 1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 2 个节点作为免疫者 (类似 CSR 模型中的理性人).
- 2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有易染者 (类似 CSR 模型中的轻信者) 邻居传播谣言, 易染者以一定的概率接受谣言变为传播者.
- 3) 如果传播者在传播过程中遇到免疫者, 则会以一定的接受概率转变为免疫者从而结束传播过程.
- 4) 重复 2), 3) 直到所有节点都为免疫者节点.

实验 2 的传播规则如下:

- 1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 2 个节点作为理性人.
- 2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有轻信者邻居传播谣言, 轻信者以一定的概率接受谣言变为传播者.

3) 如果本时间步没有变为传播者, 则根据公式, 接受概率以正向社会加强的形式增加.

4) 如果传播者在传播过程中遇到理性人, 则会以一定的接受概率转变为理性人从而结束传播过程.

5) 当传播过程开始后, 理性人在会在每一个时间步向邻节的轻信者辟谣, 根据公式, 该轻信者的接受概率以负向社会加强的形式减少.

6) 当传播者周围没有轻信者时, 传播者会转变为理性人.

7) 重复 2)—(6), 直到所有节点中没有传播者, 则整个传播过程结束.

实验 3 的传播规则如下:

- 1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 2 个节点作为理性人.

2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有轻信者邻居传播谣言, 轻信者以一定的概率接受谣言变为传播者.

3) 如果本时间步没有变为传播者, 则根据 (16) 式, 则个体 i 得到一个正的剂量 $d_i(m)$. 当 $D_i(m) > d_i^*$ 时, 该轻信者转变为传播者. 为了简化模型易于仿真, 在本次实验中假设 $D_i(3) > d_i^*$.

4) 如果传播者在传播过程中遇到理性人或者传播者, 则会以一定的接受概率转变为理性人从而结束传播过程.

5) 当传播过程开始后, 理性人在会在每一个时间步向邻节的轻信者辟谣, 根据 (15) 式, 则个体 i 得到一个负的剂量 $d_i(m)$.

6) 当传播者周围没有轻信者时, 传播者会转变为理性人.

7) 重复 2)—(6), 直到所有节点中没有传播者, 则整个传播过程结束.

以下为 3 次实验部分核心算法对比.

实验 1 部分算法:

```
[ask link-neighbors with [Credulous?]  
[ifelse float<rumor-spread-chance  
[become-spreader]
```

实验 2 部分算法:

```
[ask link-neighbors with [Credulous?]  
[ifelse float< rumor-spread-chance  
[become-spreader  
set rumor-added 1]
```

实验 3 部分算法:

```
[ask link-neighbors with [Credulous?]  
[ ifelse float < rumor-spread-chance or rumor-  
added > threshold  
[ become-spreader  
set rumor-added 1]
```

图 5(a), (b), (c) 分别为 3 次对比实验的局部, 在图中绿色节点表示轻信者, 红色表示传播者, 黄色表示理性人, 从 3 个图的对比中可以看出网络的结构是一样的. 在实验 2 和 3 中的数字表示该节点接受到谣言的次数. 我们将在上述的对比实验分别进行了 10 次, 并分别记录了传播结束时, 受到影响的人的数量, 以及传播峰值时传播者的比例和所用的时间步. 数据对比结果如图 6.

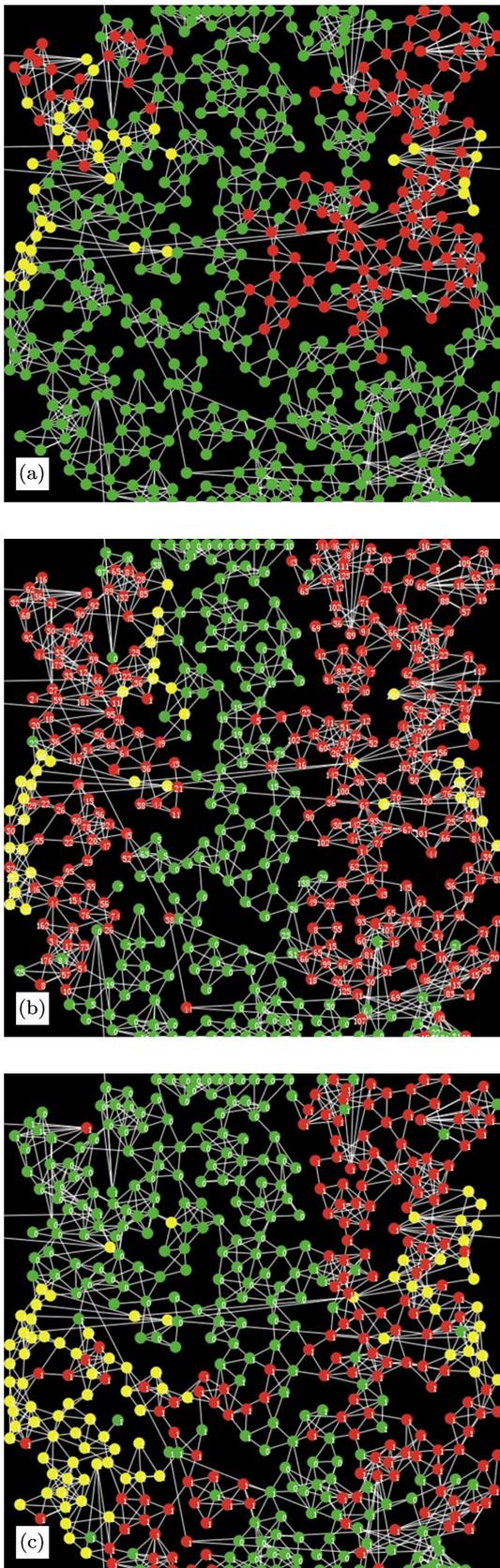


图5 匀质网络中的传播过程的对比仿真实验 (a) 实验 1 (SIR 模型); (b) 实验 2 (CSR 模型); (c) 实验 3 (M-CSR 模型)

谣言影响的人的数量和传播者峰值的百分比和所用时间数据的处理结果,在上图中可以看到 M-CSR 模型的传播范围比 CSR 模型要大, SIR 模型的传播效果相对较差. 在下图中也可以明显看出在峰值时 M-CSR 模型所用的时间比 CSR 模型要少. 从这个对比实验可以认为,在匀质网络中, M-CSR 模型谣言传播的速度更快范围也更广.

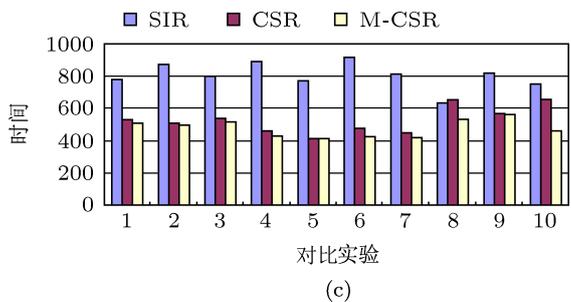
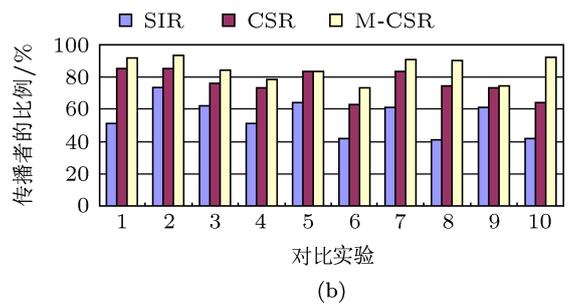
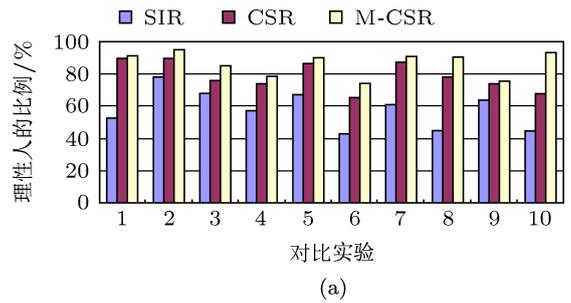


图6 匀质网络对比实验结果 (a) 传播结束时受影响人的数量; (b) 传播峰值时传播者的比例; (c) 传播峰值时所用的时间

4.3 异质网络对比实验

在异质网络的构造,我们使用了 BA 无标度网络的生长模型,首先构造 1000 个节点服从幂律 $\rho = 1.5$ 的无标度网络. 图 7 是生成无标度网络过程中节点度的分布.

图 8 描述了 BA 无标度网络的生长过程. 从图 8(a) 到 (e) 可以明显的看出 BA 无标度网络中优先附连和“富者愈富”的效果.

图 6 中是 10 次对比实验中的传播结束时受到

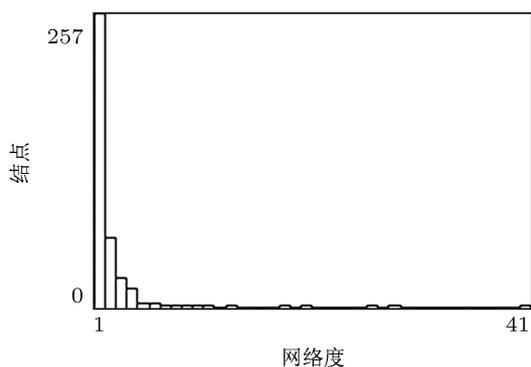


图7 BA 无标度网络度分布

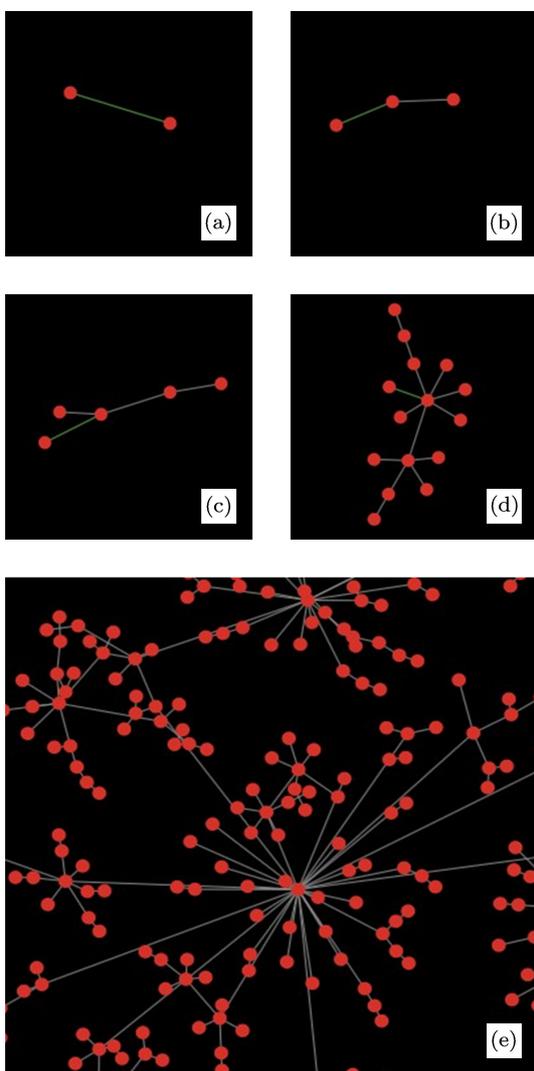


图8 BA 无标度网络生成过程, (a) 到 (e)

与第一个对比实验一样, 在无标度网络上也同样进行 3 次对比实验. 实验 1 的传播规则如下:

1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 2 个节点作为免疫者 (类似 CSR 模型中的理性人).

2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有易染者 (类似 CSR 模型中的轻信者) 邻居传播谣言, 易染者以一定的概率接受谣言变为传播者.

3) 如果传播者在传播过程中遇到免疫者, 则会以一定的接受概率转变为免疫者从而结束传播过程.

4) 重复 2), 3), 直到所有节点都为免疫者节点.

实验 2 的传播规则如下:

1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 1 个节点作为理性人.

2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有轻信者邻居传播谣言, 轻信者以一定的概率接受谣言变为传播者.

3) 如果本时间步没有变为传播者, 则根据公式, 接受概率以正向社会加强的形式增加.

4) 如果传播者在传播过程中遇到理性人, 则会以一定的接受概率转变为理性人从而结束传播过程.

5) 当传播过程开始后, 理性人在会在每一个时间步向邻节的轻信者辟谣, 根据公式, 该轻信者的接受概率以负向社会加强的形式减少.

6) 当传播者周围没有轻信者时, 传播者会转变为理性人.

7) 重复 2)—6), 直到所有节点中没有传播者, 则整个传播过程结束.

实验 3 的传播规则如下:

1) 随机选择 1 个节点作为传播者, 随机选择 1 个节点作为理性人.

2) 在每一个时间步, 传播者向他的所有轻信者邻居传播谣言, 轻信者以一定的概率接受谣言变为传播者.

3) 如果本时间步没有变为传播者, 则根据 (16) 和 (17) 式, 则个体 i 得到一个正的剂量 $d_i(m)$. 当 $D_i(m) > d_i^*$ 时, 该轻信者转变为传播者. 为了简化模型易于仿真, 在本次实验中假设 $D_i(3) > d_i^*$.

4) 如果传播者在传播过程中遇到理性人或者传播者, 则会以一定的接受概率转变为理性人从而结束传播过程.

5) 当传播过程开始后, 理性人在会在每一个时间步向邻节的轻信者辟谣, 根据 (15) 式, 则个体 i 得到一个负的剂量 $d_i(m)$.

6) 当传播者周围没有轻信者时, 传播者会转变为理性人.

7) 重复 2)—6), 直到所有节点中没有传播者, 则整个传播过程结束.

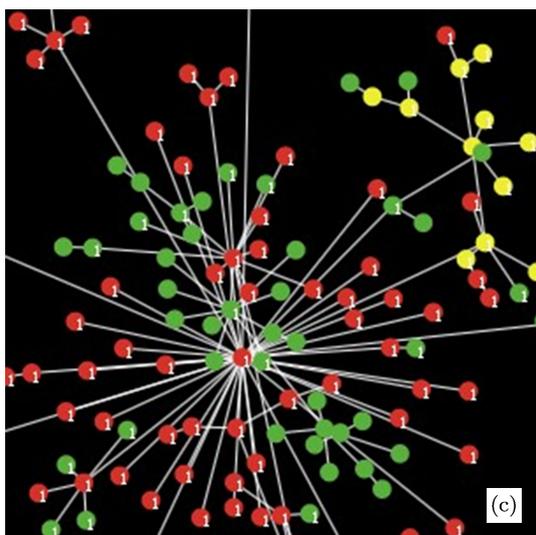
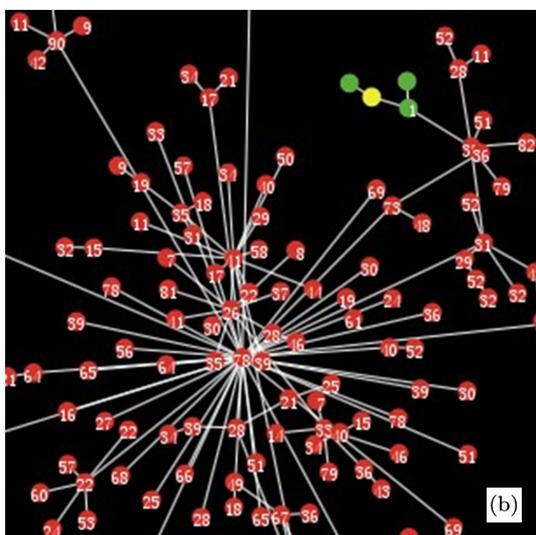
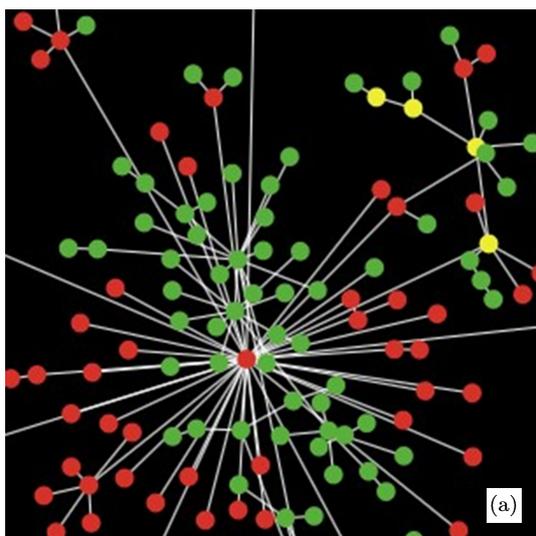


图9 异质网络中的传播过程的仿真对比 (a) 实验1 (SIR 模型); (b) 实验2 (CSR 模型); (c) 实验3 (M-CSR 模型)

图9(a), (b), (c) 分别为3次对比实验的局部, 在

图中绿色节点表示轻信者, 红色表示传播者, 黄色表示理性人. 从图中可以看出3次实验中的网络拓扑是同构的. 我们将在上述的对比实验分别进行了10次, 分别记录了传播结束时, 受影响的人的数量, 以及传播峰值时传播者的比例和所用的时间步. 数据对比结果如图10.

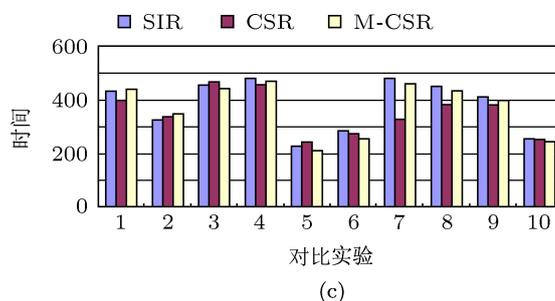
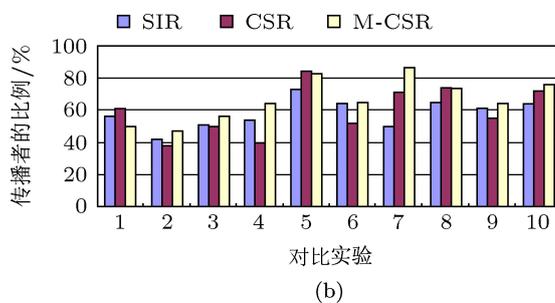
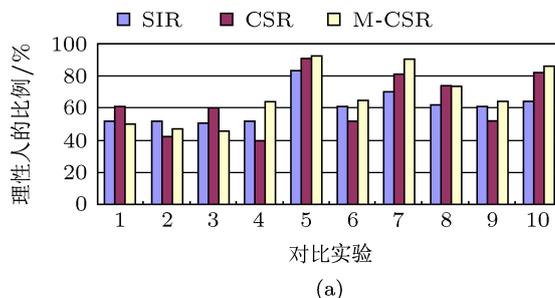


图10 异质网络对比实验结果 (a) 传播结束时受影响人的数量; (b) 传播峰值时传播者的比例; (c) 传播峰值所用的时间

我们从图10的实验结果中可以观察到很多有趣的现象: 1) 在异质网络中不管是 M-CSR 模型还是 CSR 模型以及传统的 SIR 模型传播的效果都非常不稳定. 也就是说, 在同样条件下, 网络的拓扑结构和传播节点与理性人节点的分布都会极大的影响传播结果. 2) 在异质网络中 M-CSR 模型和 CSR 模型以及 SIR 模型的传播效果对比结果没有在匀质网络中那么明显, 也就是说异质网络中传播方式对传播的影响不大.

4.4 初值敏感性对比实验

为了进一步研究新的考虑 M-CSR 的谣言传播

模型中, 理性人对整个传播过程的影响, 我们进行了对初值敏感性对比仿真实验, 在这两个仿真实验中先后生成一个节点数为 1000, 节点平均度为 6 的匀质网络和 1000 个节点服从幂律 $\rho = 1.5$ 的无标

度网络. 第一组实验是 CSR 模型的传播实验, 第二组是 M-CSR 模型的传播实验. 我们分别把传播初始阶段理性人的比例设定为 0.001, 0.01 和 0.1, 分别进行 3 次实验并分别记录 3 中人群变换的曲线.

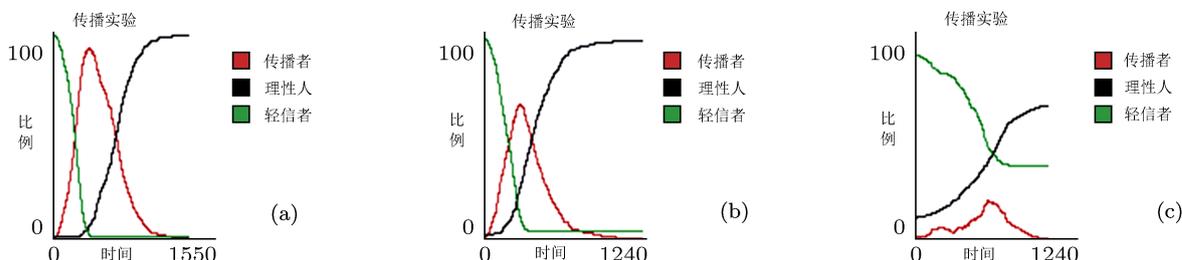


图 11 M-CSR 模型在匀质网络中, 不同 $r(0)$ 下的传播结果

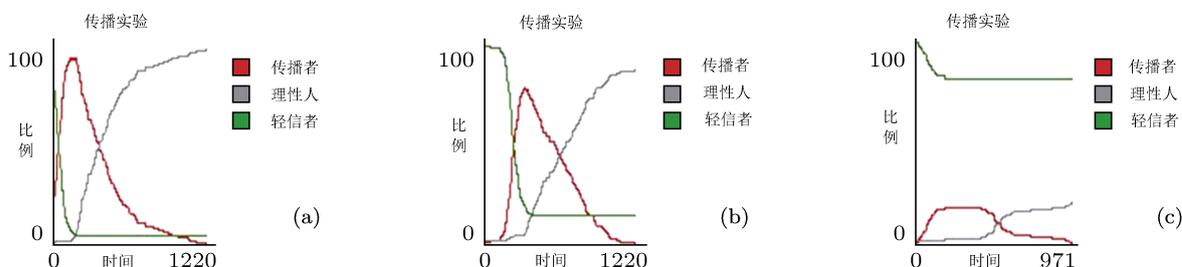


图 12 M-CSR 模型在异质网络中, 不同 $r(0)$ 下的传播结果

在图 11(a) 中我们可以看到, 在理性人的比例为 0.001 时, 传播的峰值时, 传播者的比例大约为 90%, 而在图 11(b) 中理性人的比例为 0.01, 传播者的峰值比例约为 60%, 而在图 11(c) 中理性人的比例为 0.1, 传播者的峰值比例仅有约 30%. 这组实验的结果充分体现了理性人对谣言传播的抑制作用. 图 12 的结果与图 11 的类似, 也可以看到理性人比例的提高对谣言传播的明显抑制. 这也和社会心理学的结论相符^[19], 这个结论有助于政府在社会实践中有效消除网络谣言负面影响的工作, 就像一句谚语说的一样“谣言止于智者”.

5 结论

本文研究了移动 SNS 架构下的社交网络上的谣言传播模型. 在 CSR 模型的基础上结合移动 SNS 网络上的信息传播特点, 提出了新的基于阈值概率的 CSR 模型 (M-CSR). 本模型主要的特点是: 1) 修改了传播规则和传播动力学方程, 使得传播

公式更符合移动用户的使用习惯. 2) 修改了 CSR 模型中的接受概率数学模型, 考虑了个人接受阈值对接受概率的影响. 在仿真实验中, 借助多主体仿真平台, 对比了 SIR 模型、CSR 模型与 M-CSR 模型在匀质网络和异质网络中的传播效果. 结果发现在匀质网络中, M-CSR 模型明显比 CSR 模型以及 SIR 模型传播效果要好. 但是在异质网络中, 三者的传播效果基本上相当, 没有明显的区别. 在最后一个仿真实验中, 我们发现 M-CSR 模型和 CSR 模型一样都有对初始值敏感的特性, 且可以通过调节理性人节点的比例来达到较好的免疫效果.

但是同样需要指出的是, 本文中对谣言传播的讨论并不很充分, 今后还有很多需要继续完成的工作. 主要有: 1) 本文对基于接受阈值的讨论并不充分, 在仿真实验中也是假设节点有统一的接受阈值, 与实际情况仍有差距, 可以在以后的工作中进一步加强; 2) 本文分别对匀质网络和异质网络上的传播进行了研究, 但是很多实际网络是二者特点的结合, 在以后的工作中, 可以进一步的展开讨论.

- [1] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki>
- [2] Zhang Y C, Liu Y, Zhang H F, Cheng H, Xiong F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050501 (in Chinese) [张彦超, 刘云, 张海峰, 程辉, 熊菲 2011 物理学报 **60** 050501]
- [3] Wang Y X, Qiao X Q, Li X F, Meng L M 2010 *Chinese Journal of Computers* **33** 2126 (in Chinese) [王玉祥, 乔秀全, 李晓峰, 孟洛明 2010 计算机学报 **33** 2126]
- [4] Adams B, Phung D, Venkatesh S 2008 *ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications* **5** 1
- [5] Ugander J, Karrer B, Backstrom L, Marlow C 2011 available: <https://www.facebook.com>, November 21, 2011
- [6] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* 393
- [7] Barabasi A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [8] Centola D 2010 *Science* **329** 1194
- [9] Li X, Wang X F, Xu D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 (in Chinese) [李翔, 汪小帆, 许丹 2007 物理学报 **56** 1313]
- [10] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D U 2006 *Physics Reports* **424** 175
- [11] Zhou T, Bai W J, Wang B H 2005 *Physics* **34** (in Chinese) [周涛, 柏文洁, 汪秉宏 2005 物理 **34**]
- [12] Moore C, Newman M E J 2000 *Phys. Rev. E* **61** 5678
- [13] Newman M E J, Forrest S, Balthrop J 2002 *Phys. Rev. E* **66** 035101
- [14] Sudbury A 1985 *Journal of Applied Probability* **22** 443
- [15] Zanette D H 2001 *Phys. Rev. E* **64** 050901
- [16] Zhou J, Liu Z H, Li B W 2007 *Phys. Lett. A* **368** 458
- [17] Liu Z H, Lai Y C, Ye N 2003 *Phys. Rev. E* **67** 031911
- [18] Pastor-Satorras R, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. E* **63** 066117
- [19] Allport G W, Postman L 1947 *The psychology of rumor* Oxford, England: Henry Holt
- [20] Moreno Y, Nekovee M, Pacheco A F 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066130
- [21] Newman M E J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 208701
- [22] Lu L Y, Chen D B, Zhou T 2011 *New Journal of Physics* **13** 123005
- [23] Krapivsky P L, Redner S, Volovik D 2011 *Journal of Statistical Mechanics* **2011** p12003
- [24] Hui W, Lin D, Fei Xie, Hui X, Jiang H H 2012 *2012 IEEE International Conference on Granular Computing Hangzhou, China, 2012*
- [25] Dodds P S, Watts D J 2004 *Physical Review Letters* **92** 218701

Dynamics of rumor spreading in mobile social networks*

Wang Hui¹⁾²⁾ Han Jiang-Hong^{1)†} Deng Lin¹⁾²⁾ Cheng Ke-Qing¹⁾²⁾

¹⁾ (School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

²⁾ (Information and Network Centre, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(Received 1 December 2012; revised manuscript received 30 January 2013)

Abstract

In this paper, we propose an improved CSR model for rumor spreading in mobile social networks. The dynamic equation of rumor spreading is modified to be suitable for user's habit in mobile social networks. In the acceptant probability model, negative and positive social reinforcements are considered. Furthermore, the people's accepting threshold for rumor accepting is taken into account. Analytically, a mean field theory is worked out by considering the influence of network topological structure as homogeneous. Under certain conditions, rumor spreads faster and wider in the new model than CSR rumor spreading model in homogeneous networks. Meanwhile, the multi-agent simulation results indicate that the information spreading process is sensitively dependent on initial conditions.

Keywords: complex networks, mobile social network, rumor spreading

PACS: 05.45.-a, 89.75.-k

DOI: 10.7498/aps.62.110505

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60873194).

† Corresponding author. E-mail: wanghui@hfut.edu.cn