

基于人类动力学的在线社交网络信息传播研究

李瑾颀^① 吴联仁^{*②} 齐佳音^{②③} 闫强^①

^①(北京邮电大学经济管理学院 北京 100876)

^②(上海对外经贸大学工商管理学院 上海 201620)

^③(北京邮电大学可信分布式计算与服务教育部重点实验室 北京 100876)

摘要: Web2.0 时代, 社交网络因其交互性和即时性, 已成为人类社会社会中社会关系维系和信息传播的重要载体。因此, 理解社交网络用户行为特征及其对在线信息传播的影响至关重要。该文从人类行为动力学视角出发, 系统梳理了近年来社交网络用户行为的实证研究。其次, 综述了社交网络信息传播中用户行为时间特征的实证研究。最后, 对用户行为时间特征与在线社交网络信息传播的相互作用进行了总结和展望。

关键词: 在线社交网络; 人类动力学; 信息传播; 时间异质性

中图分类号: TP393; O414.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0785-09

DOI: 10.11999/JEIT160940

Research on Information Dissemination in Online Social Network Based on Human Dynamics

LI Jinjie^① WU Lianren^② QI Jiayin^{②③} YAN Qiang^①

^①(School of Economics and Management, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(School of Management, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China)

^③(Key Laboratory of Trustworthy Distributed Computing and Service, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In the Web2.0 era, the online social network has become an important carrier of social relationship maintenance and information dissemination in the human society because of its interactivity and instant. Therefore, it is very important to understand the behavior characteristics of social network users and its impact on online information dissemination. From the perspective of human behavior dynamics, the empirical research on the behavior of social network users in recent years is systematically reviewed. Secondly, the influence of social network user's behavior on online information dissemination is summarized. Finally, the online social network information dissemination based on user behavior dynamics is summarized and prospected.

Key words: Online social network; Human dynamics; Information spreading; Temporal heterogeneity

1 引言

在线社交网络是互联网上基于用户关系的内容生产与交换平台, 也是人们彼此之间用来分享意见、见解、经验和观点的工具。社交网络在互联网的沃土上蓬勃发展, 爆发出令人眩目的能量, 其传播的信息已成为人们浏览互联网的重要内容。近年来, 在线社交网络研究受到了国内学者的广泛关注, 如

方滨兴等人^[1]对在线社交网络分析核心科学问题的研究现状进行了系统的梳理, 提出了在线社交网络分析的 3 个主要研究对象: 社交网络本身的结构特性、社交网络中的群体及其行为和社交网络中的信息及其传播。杨善林等人^[2]对在线社交网络用户行为进行了综述, 总结出目前在线社交网络用户行为研究主要集中于用户采纳与忠诚行为、用户个体使用行为和用户群体互动行为。

社交网络因其交互性和即时性, 已成为人类社会社会中社会关系维系和信息传播的重要载体。谣言和危机信息一旦在社交网络中发布, 通过社交网络的转发和分享机制, 谣言和危机信息将以“核裂变”的方式传播扩散。又因社交网络中用户个体和群体间交互形成的各种复杂关联关系, 将进一步放大信

收稿日期: 2016-09-19; 改回日期: 2017-02-13; 网络出版: 2017-03-07

*通信作者: 吴联仁 lianrenwu@suipe.edu.cn

基金项目: 国家 973 计划项目(2013CB329604), 国家自然科学基金(71601005, 71231002)

Foundation Items: The National 973 Program of China (2013CB329604), The National Natural Science Foundation of China (71601005, 71231002)

息传播的影响。因此,理解社交网络用户行为特征,特别是社交网络用户行为的时空统计特征,以及其对信息传播的影响至关重要。在线社交网络用户行为的研究对揭示在线社交网络结构的演化规律、信息传播规律以及有效监控网络突发舆情等具有重要的理论意义和实践价值。然而,在线社交网络用户行为时空复杂性的分析及其对信息传播的影响研究因缺乏大规模的实证数据而未有进展。

随着互联网技术和大数据技术的不断发展和提高,学者们可通过社交网络平台开放的 API 接口或各种网络数据爬虫算法,获取大规模的记录社交网络用户行为的数据,这些数据为研究社交网络用户行为规律及其对信息传播的影响提供了前所未有的机会。在这一背景下,大量基于大规模数据的社交网络用户行为分析^[3,4]、社交网络信息传播实证研究成果相继在国内外高水平期刊发表^[5,6],极大地推动了该领域研究的发展。

本文将对相关重要研究成果进行系统的综述。首先,对人类行为动力学概念、理论和发展进行简单的介绍,并将基于人类动力学的在线社交网络用户行为研究进行了系统的综述。其次,介绍了经典传播模型、人类行为动力学模型和社会交互模型在社交网络信息传播中的应用。最后,在上述研究基础上对在线社交网络信息传播领域未来仍需要进一步关注和探索的问题进行了总结。

2 在线社交网络用户行为动力学研究

2.1 人类行为动力学研究

人类行为动力学作为一门新兴的交叉学科,其目的是揭示人类日常的行为模式,力图通过挖掘出人类行为在时间和空间上的统计规律,并建立相应的动力学模型。人类行为的量化分析,特别是在时空统计规律的挖掘和建模,是当前复杂性科学、统计物理和社会计算研究的热点。对人类行为的深入理解,在解释舆情监控、交通规划、信息推荐等复杂的社会经济现象上具有重要价值^[7]。人类行为动力学研究的开创性工作始于 2005 年在《Nature》上刊登的一篇文章,作者美国东北大学的巴拉巴西教授(Barabási A L)通过对某大学 3188 位用户收发的共 129135 封电子邮件(以 3 个月为周期)的数据集,清晰地揭示了人类行为在时间上对泊松过程的偏离^[8]。研究表明,电子邮件发送和等待的时间间隔分布均满足幂指数为 1 的幂律分布,明显不符合泊松分布。该研究还提出了一个简单的基于任务优先级的排队模型。2006 年, Brockmann 等人^[9]在《Nature》上发表的另一篇文章,揭示了人类行为

在空间上也具有幂律分布的特性。受这两篇开创性文章的影响,大量研究成果相继在《Nature》,《Science》和《PNAS》等国际顶级学术期刊发表,掀起了有关人类行为动力学研究的热潮^[10-12]。

经过 10 余年的发展,人类行为动力学的研究为理解由人驱动的复杂系统的各类现象提供了新视角和新解释。人类行为动力学包括人类行为在时间和空间上的统计特征。当前,更多的研究关注人类行为的时间特性,指的是人多次从事某特定事件在时间上表现出来的统计规律,一般通过事件时间间隔(inter-event time)和等待时间间隔或响应时间间隔(waiting time)两个量来刻画。事件时间间隔刻画一个体的行为,指同一个体连续两次同一行为之间的时间差。等待时间间隔刻画个体间的相互作用,指个体收到一条信息到转发或评论该信息所经历的时间差。

通过对网络浏览、手机短信通讯、网络通信、在线服务和在线社交网络活动等大量工作、娱乐中的人类活动实证研究表明,无论在个体层面,还是在群体层面,人类行为都具有阵发性、记忆性和异质性,表现为长时间的静默与短时间的高频率爆发。且对应的行为时间间隔分布和等待时间间隔分布具有明显的重尾特性(即时间异质性、非均匀性),能够很好地用幂律的行为时间间隔分布 $P(\tau) \sim \tau^{-\alpha}$ (τ 表示连续两次行为的时间间隔)和等待时间间隔分布 $P(\tau_w) \sim \tau_w^{-\alpha}$ (τ_w 表示等待时间间隔)来描述。

2.2 在线社交网络用户行为动力学研究

Web2.0 时代,微博、论坛、在线社交网络、博客、维基等社交网络应用的出现和发展,深刻改变了人类使用互联网的方式,从原来简单的网页浏览和信息搜索转向网上的社会关系的构建与维护、基于社会关系的信息创造、交流和共享。社交网络成为现代社会人类生活不可缺少的一部分。然而,由于大规模用户行为数据获取的困难,社交网络用户行为动力学研究一直未有进展。随着大数据时代的到来,以及各社交网络平台开放接口、各种网络爬虫软件和算法的出现和成熟,为获取大规模的在线社交网络用户行为数据成为可能,也为开展社交网络用户行为动力学研究提供了前所未有的机会。

近年来,社交网络用户行为动力学的研究随着人类动力行为研究的发展和大数据时代的到来。国内外学者在该领域取得了一系列有价值的研究成果。如 Yan 等人^[13,14]收集了“新浪微博”的“日本地震中文求助联络”微群 14816 位用户,发出的 22851 条微博,数据收集时间从 2011 年 3 月 11 日-28 日。通过统计分析揭示,群微博发出时间间隔

分布与用户主页微博发出时间间隔分布分别服从幂指数为 1.1 和 1.3 的幂律分布。闫强等人^[15]收集了新浪微博 41668 名用户发出的 345095 条信息,并且这些信息被转发了 2 亿多次和被评论了 5800 多万次(时间从 2009 年 8 月 20 日至 2011 年 6 月 4 日,共 652 天内)。对每条信息,收集了信息 ID、信息获得的转发数和评论数、信息发出和评论的时间。收集了用户的 ID、粉丝数、关注数和微博数。根据用户发出、评论微博的时间数据,研究用户连续两次行为的时间间隔。

图 1 给出的是微博用户群体层面和个体层面行为时间间隔分布。图 1(a)描述的是群体层面,连续两个用户发出微博的时间间隔服从幂律分布,幂指数为 2.5,并且具有明显的胖尾特征。图 1(b)描述的是个体层面,单个用户的连续两次发出微博行为的时间间隔服从幂律分布,幂指数为 1.7。

Chen 等人^[16]通过 5 位志愿者在 QQ 上大约 1 年时间内发布信息的记录数据,研究 QQ 用户信息行为的时间间隔,发现在个体层面时间间隔服从指数在 2.0~2.5 之间的幂律分布。Wang 等人^[17]收集了南京大学小百合 BBS 从 2009 年 9 月 1 日至 20 日之间 379 名用户发布的 1627697 个帖子,分析用户在个体层面和群体层面连续两次发表帖子的时间间隔服从指数为 2.0 的幂律分布。国外学者 Radicchi^[18]通过对 7565401 位用户登录维基百科 17531208 次记录的数据集(时间从 2004 年 12 月 23 日-2008 年 10 月 8 日)研究了在群体层面,用户登录维基百科的时间间隔分布服从指数为 1.2 的幂律分布。Leskovec^[19]采集了 2006 年 6 月 MSN 即时通讯的数据,包括 2.4 亿用户间发生的约 300 亿次交谈,研究结果表明在群体层面用户间的交谈时间间隔服从指数约为 1.5 的幂律分布。Goetz 等人^[20]收集了 45000 位博主发表的 220 万篇博文数据集(时间从 2005 年 8 月-2005 年 9 月),研究结果显示在群体层面上博文发表的时间间隔服从指数为 2.5 的幂律分布。

通过大量在线社交网络数据集的实证研究发现,个体层面和在群体层面,在线社交网络用户在时间上同样具有相似的统计规律,即行为时间间隔和等待时间间隔在大多数情况下具有异质性和阵发性,也可以用幂律的行为时间间隔分布 $P(\tau) \sim \tau^{-\alpha}$ (τ 表示连续两次行为的时间间隔)和等待时间间隔分布 $P(\tau_w) \sim \tau_w^{-\alpha}$ (τ_w 表示等待时间间隔)来描述。

2.3 人类行为动力学机制与建模研究

通过上述大量的实证研究表明,人类行为在时间统计特性上的幂律分布是一个普遍性质。什么机制导致了这种非泊松的时间特性?这个问题在近 10 年来得到了全面和深入的研究,先后提出了多种模型,努力探索和解决人类行为在时间统计上服从幂律分布特性的产生根源。这些模型大致可分为:(1)基于任务队列的模型;(2)基于记忆驱动的模型;(3)基于兴趣驱动的模型;(4)基于节律或其他因素的模型。

人类动力学机制和建模研究的一个主流理论是任务队列理论,这是建立在学习经验上的理论。该理论适用在这样的场景下建模:人们在生活中总是要处理各种各样的任务,如发送和回复在线信息、发送和回复电子邮件和查询在线信息等。通常情况下,人们会按照一定的顺序来处理这些任务。基于这样的想法,Oliveira 等人^[21]提出了一种基于任务队列理论的模型。任务队列模型中,每个个体被分配了一个可容纳 L 个任务的列表,每个时间步,个体选择其中的一个任务执行。该任务完成后,将其从任务列表中删除,并进入一个新的任务。每个任务设定一个优先级参数 x_i ($i = 1, 2, \dots, L$),其由分布函数 $\eta(x)$ 随机生成。

随后,其他学者在这一模型的基础上做了推广和扩展。如 Masuda 等人^[22]在建模过程中引入了任务本身的时间特性。Cajueiro 等人^[23]对需要处理的任务进行了优化处理。并且 Oliveira 等人^[24]和 Min 等人^[25]进一步地将任务队列理论扩展到社会网络研

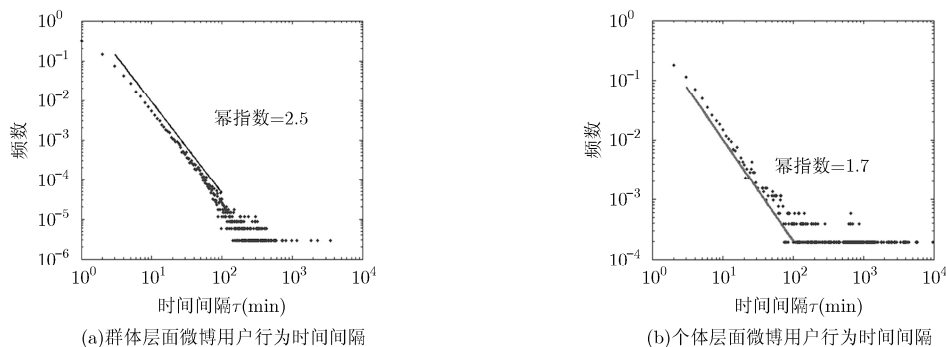


图 1 在双对数坐标下,群体层面和个体层面微博用户行为时间间隔分布

究中。

任务队列理论虽然能够解释大部分人类行为统计特性的产生机制。但是,其基本假设导致模型存在多种缺陷,使之不能成为人类行为解释的普适性模型。这是因为大部分人类的娱乐行为具有自主性,并不是一种任务。如记忆特性是人类的基本神经活动之一,记忆可以影响一个人的后续行为。Vazquez^[26]提出了一个基于记忆驱动模型,简单而重要地表达了行为发生的前后的相关性。该模型中假设:个体根据过去活动频率的高低,来减小和增大当前活动的频率。记 $\lambda(t)dt$ 为个体在时间 $t \sim t+dt$ 内做某事的概率,则: $\lambda(t) = a \frac{1}{t} \int \lambda(t')dt'$ 。其中, $a > 0$ 是这个模型中的唯一参数,当 $a \neq 1$,该过程处于不稳定状态,做事情的概率将要减小($a < 1$)或增加($a > 1$)。

在此基础上,Han等人^[27]和Shang等人^[28]提出了基于兴趣驱动模型,刻画兴趣而非任务对人类行为时间统计特性产生幂律分布的影响。再如,上述模型中,深刻影响人类行为的工作时间和生理周期等因素并未考虑。因此,Hidalgor^[29]提出了基于节律驱动模型。这些模型的提出,丰富了人类行为时间统计幂律分布特性产生根源的解释,对不同场景下建模和仿真具有重要的参考价值。

3 基于人类动力学的社交网络信息传播研究

近年来,随着以微博,微信,Facebook, Twitter为代表的在线社交网络和社交媒体的飞速发展,使得信息在前所未有的广阔范围内,以惊人的速度传递和分享。在线社交网络上的信息传播研究,给学术界带来了一系列挑战和难题。如在线社交网络信息传播模式^[30]、测量^[31]和预测^[32]等问题。目前,理解、分析及控制在线社交网络上的信息传播动力学过程,已成为社会学^[33]、计算机科学^[34]和物理学^[35]等多个学科的热点研究方向。

3.1 基于经典传播模型的社交网络信息传播研究

从国内外研究历史和现状来看,传播动力学建模过程中,研究最为广泛和最为经典的传播模型包括:SI(Susceptible-Infected)模型、SIS(Susceptible-Infected-Susceptible)模型和SIR(Susceptible-Infected-Recovered)模型,其中S表示易感染个体,I表示感染个体,R表示免疫个体。1920年,Reed和Frost提出了SIR模型,假设患者是以概率 β 感染易感者,且以概率 γ 康复,那么这3类个体的演化动力学为

$$\frac{ds}{dt} = -\beta is, \quad \frac{di}{dt} = \beta is - \gamma i, \quad \frac{dr}{dt} = \gamma i \quad (1)$$

其中,分别用 s 、 i 和 r 代表易感者、患者和康复者所占的比例。SIS模型指的是大多数情况下,康复者又会回到可以被感染的状态,对于这种情形,可以用式(2)描述传播动力学过程:

$$\frac{ds}{dt} = -\beta is + \gamma i, \quad \frac{di}{dt} = \beta is - \gamma i \quad (2)$$

当前,已有众多学者将传播动力学建模方法和经典的传播模型应用到在线社交网络信息传播建模上,并取得丰硕的研究成果。Zhao等人将SIR^[36]模型和SIHR^[37]模型应用到在线社交网络舆情话题传播建模中,并在无标度网络上进行了模型仿真。Lu等人^[38]应用SI模型研究了在线社交网络中谣言的传播与抑制,提出具有小世界网络特性的在线社交网络更能促进信息的传播。Zheng等人^[39]应用SIS模型研究社会关系强度对在线社交网络信息传播的影响。Zhou等人^[40]应用SI模型研究了社交网络的信息传播,在考虑节点度和传播机制影响的基础上构造了社交网络信息传播模型。结合复杂网络和传染病动力学理论,进一步建立了动力学演化方程组并采用该方程组刻画了不同类型节点随着时间的演化关系,反映了传播动力学过程受到网络拓扑结构和传播机制的影响。朱张祥等人^[41]在经典SIR传染病模型的基础上,根据在线社交网络中谣言传播的特点,将网络谣言的受众用户扩展为无知者、知晓者、信任者、传播者、暂时免疫者和永久免疫者6类,提出了一个改进的在线社交网络谣言传播模型,并结合复杂网络的相关理论建立了一个考虑聚类系数可变的无标度网络环境进行仿真研究。

同时,部分学者将经典传播模型和近年来兴起的网络模型相结合,把个体视为网络中的节点,个体之间的接触关系用网络中节点间的边来描述。并且通过计算机生成具有某些拓扑结构特征的网络,研究网络的结构特征对在线社交网络信息传播的影响,如小世界网络和无标度网络。

然而,发生在复杂网络上的动力学过程与个体的行为紧密相关,如社交网络上信息的传播是以人为载体的,仅考虑网络结构、话题属性而剥离了人的行为特征去研究社交网络信息传播过程会与实际有较大的偏差。经典的传播模型,如SI, SIS, SIR和SEIR等没有考虑社交网络用户行为的时间统计特性,存在一些和用户真实行为时间特征不一致的假设。在经典传播模型中,一般假设用户活动的行为时间服从泊松分布。假设用户活动的时间间隔相同,即所有用户都均匀地在每个时间步活动。然而,

从上述大量社交网络用户行为的实证研究发现，社交网络用户行为具有爆发性，其行为时间服从幂律分布。因此，考虑社交网络用户行为时间特性将有助于加深理解社交网络上信息传播的机理。

3.2 基于人类动力学的社交网络信息传播研究

近年来，大量研究者开始关注人类行为特征，特别是在时间上的异质特性(即时间间隔服从幂律分布的特性)对社交网络上信息传播的影响。2006年，Vazquez^[42]通过对带有“标记”的电子邮件传播过程的研究来揭示非均匀的人类活动模式对信息传播的影响。假设传播过程从 $t=0$ 时刻只有一个感染节点开始。以 $n(t)$ 表示在 t 时刻平均新感染节点数， $g(\Delta)$ 表示等待时间间隔分布， $P(\tau)$ 为连续发邮件的时间间隔分布。研究结果表明平均新感染节点数 $n(t)$ 以指数形式消亡，与假设用户发送邮件时间间隔服从泊松分布的情况明显不同。并且 $n(t) = F(t)\exp(-t/\langle\tau\rangle)$ 可通过带有指数截断的幂律分布近似表示。Vazquez等人的研究发现人类行为的时间异质性在很大程度上减缓了信息在社交网络上的传播。2007年，Vazquez等人^[43]进一步地对两个电子邮件用户数据集进行统计分析。第1个数据集是取自某个大学3188个用户发出的129135封电子邮件。第2个数据集是取自一个商业免费邮箱，包括1729165个用户和39046030封电子邮件。对两个数据集的统计结果表明网络电子邮件的传播过程可用幂律形式表示，并且幂指数近似为1。这在实证数据上支持了先前的理论研究。

2009年，Iribarren^[44]通过一个信息传播实验来研究电子邮件用户对信息传播动力学的影响。这个实验也是通过邮件追踪一条营销信息在电子邮件网络中的传播。通过对电子邮件的发送记录，研究者们可以详细了解每个传播时间步的传播过程。这个实验涉及31183个电子邮件用户。从统计结果发现，在个体层面等待邮件回复时间表现出了较高的异质性。例如，实验的参与者回复邮件的时间平均是在收到邮件后的1.5天，并且标准差也比较大，为5.5天，有些参与者甚至在收到邮件后的69天才回复邮件。Iribarren的研究结果也表明用户行为时间间隔和等待时间服从幂律分布的特性，很大程度上减慢了信息的传播速度。

2011年，Min等人^[45]研究了个体的活动行为对信息传播的影响。研究假设用户传播信息的等待时间服从幂指数为 α 的幂律分布 $P(\tau) \sim \tau^{-\alpha}$ ，不同于先前研究工作假设的泊松分布。通过理论分析和数值模拟，Min等人发现平均新感染个体 $n(t)$ 随时间幂律消亡，并且信息流行度非常缓慢地减弱。

国内学者Yang等人^[46]也研究了异质的人类活动模式对传播动力学过程的影响。在研究中做了两个假设：(1)每个个体有一个各不相同的行为时间间隔，这些时间间隔服从幂律分布(称为在群体层面服从幂律分布的时间间隔)；(2)每个个体都一样，但是个体的行为时间间隔不固定，服从幂律分布(称为在个体层面服从幂律分布的时间间隔)。基于这两个假设，Yang等人进行了数值仿真实验，仿真结果揭示具有异质时间特征的人类行为对信息传播产生重要影响。

2015年，吴联仁等人^[47]建立了基于用户行为时间异质性的微博信息传播模型，通过构建异质的时间间隔序列，将微博信息传播动力学过程在无标度网络上仿真。研究结果发现信息新接受个体数 $n(t)$ 以幂指数形式减少， $n(t) \sim t^{-\beta}$ (如图2所示)。与传统假设的时间间隔服从泊松分布的信息传播模型相比，时间间隔服从幂律分布的传播速度要缓慢很多。同时，传播动力学的幂指数 β 受行为时间间隔分布幂指数 α 影响，且具有关系：

$$\beta \approx \alpha - 1 \quad (3)$$

进一步地通过新浪微博实证数据发现，微博信息的流行度消亡服从幂指数为1.5的幂律分布，即 $\beta = 1.5$ (如图3所示)。从图1(a)中可知群体层面行为时间间隔幂指数 $\alpha = 2.5$ ，满足式(3)。因此，仿真分析结果、实证结果和理论解析结果一致。

图2描述的是在初始只有一个感染节点的情况下，新感染个体数 $n(t)$ 随时间消亡的形式，群体层面行为时间异质性幂指数分别为 $\alpha = 2.8$ (正方形)， $\alpha = 2.5$ (圆形)， $\alpha = 2.2$ (上三角)的幂律分布，和 $\alpha = 1.0$ 的泊松分布(下三角)。

图3为新浪微博信息传播实证数据统计结果，表示每天新接受信息的个体数，个体数以幂律形式减少，且幂指数约为1.5。

3.3 基于社会交互的社交网络信息传播研究

上述模型，以及包括2.3节的人类行为动力学模型都是仅考虑了单个个体用户。然而，现实中大部分的人类行为都会直接或间接地与其他个体产生互动。特别是在社交网络信息传播中，我们一般是等待对方回复后再进行下一步的活动。当前，社会交互对人类个体与群体行为的影响是人类动力学建模研究的一个重要挑战。Oliveira等人^[24]首先在两个个体交互模型上提出了一种拓展的任务队列模型。该模型扩展了Barabasi模型^[8]的研究范围，随后Wu等人^[10]建立了基于双个体通讯的模型，成功地将Oliveira等人的模型推广到研究手机用户之间的短消息通信的行为特征。Kim^[48]提出了进一步简

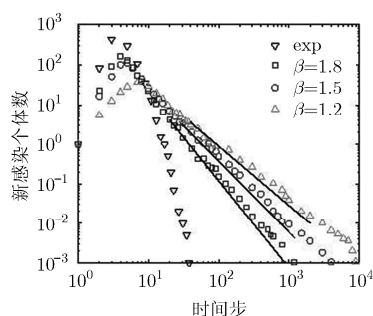


图2 仿真结果

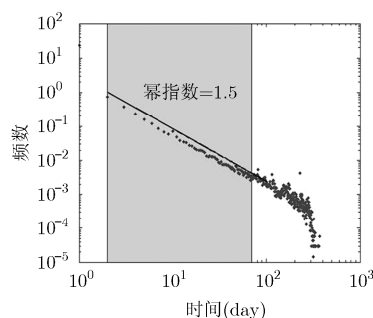


图3 实证数据结果

化的社会交互模型，并获得了幂律分布的时间统计特性。Oliveira 等人^[24]提出的社会交互模型是基于固定的社会网络结构的。事实上，社会接触过程是暂态的、不断演化的，这种动态和演化的社会结构也会影响到人类交互行为特性。因此，STEHL 等人^[49]和 Jo 等人^[50]分别提出了一个基于动态变化的社会群组的交互行为模型和考虑多种社会交互模式的模型。

目前，在基于社会交互的社交网络信息传播建模中，Yan 等人^[51, 52]仅研究了新浪微博中两个个体交互对信息传播的影响。对群组交互和多种社会交互的模式还缺乏研究，这方面还慢于整体人类行为动力学的建模研究。这也是未来社交网络研究者从微观和群体层面研究信息传播建模的方向。

4 总结与展望

基于互联网的在线社交网络正在成为人类社会关系维系及信息传播的重要渠道和载体。在线社交网络用户行为规律及信息传播机理的研究，对突发事件监测响应、互联网舆情分析引导、在线群体社会交往等国家安全与社会发展的重大问题具有十分重要意义。同时，在线社交网络数据也正成为最成熟的大数据，通过研究和分析这些数据，学者们已经在社交网络用户行为理解和信息传播机理方面取得了大量的理论成果。然而，随着在线社交网络研究的深入，未来仍有部分问题需要进一步地研究和探索：

第一，当前基于人类行为动力学理论的社交网络信息传播研究主要是从社交网络用户行为的时间方面进行。然而，在线社交网络用户的空间行为研究及其对信息传播的影响目前还未被学者们关注。一直以来，人类的空间移动和社交互动都被分隔开来研究。有时，我们用同一个数据集来分别研究人类的空移动和社交互动，但我们对它们之间的关系一无所知。近两年，已有学者认识到它们之间的重要性，并开始了这方面研究^[53]。因此，在未来数

据可获得的情况下，应考虑社交网络用户空间行为动力学及其对在线信息传播的影响。

第二，随时社交网络信息的爆发式增长，信息从过去的稀缺和高价值，转变为泛滥和低价值。现在稀缺和宝贵的是用户的注意力。在基于人类动力学研究社交网络信息传播的研究中，应更多考虑人类行为和人类特有的因素，如用户的有限注意力和记忆性等因素。如 Gleeson 等人^[54]在研究 Twitter 传播的决定性因素时，认为用户的记忆时间 (memory time) 对 Twitter 信息的传播具有影响。Zhao 等人^[55]也将人类的遗忘和记忆机制引入到社交网络信息传播研究中。在未来对社交网络信息传播模型进一步优化的过程中，人类特有的行为和因素必须考虑到。

第三，在线社交网络的含时性对信息传播的影响研究。基于人类行为动力学的在线社交网络信息传播的研究，其目的是在理解用户行为规律的基础上，充分利用用户行为的特点，控制或促进信息在社交网络中的传播。Holme 等人^[56]和 Lee 等人^[57]研究了利用人类行为在时间层面上的特征，试图控制在线社交网络上的信息传播，对这一方向的研究才刚刚起步，未来基于用户行为动力学的社交网络信息控制策略应得到进一步的研究。

第四，在线社交网络的多层性对信息传播的影响研究。社交网络作为一个复杂的系统，其节点具有多种功能，并且节点相互连接和作用。节点的这些功能具有本质的区别，不能叠加，从而构成了多层网络。多层社交网络之间的相互耦合关联对信息传播动力学的影响仍是一个开放问题，近年来也得到了学者的关注^[58-60]。未来多层社交网络上的信息传播问题应得到更多学者的关注。

参考文献

- [1] 方滨兴, 贾焰, 韩毅. 社交网络分析核心科学问题, 研究现状及未来展望[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(2): 187-199. doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.02.007.

- analysis-key research problems, related work, and future prospects[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(2): 187-199. doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.02.007.
- [2] 杨善林, 王佳佳, 代宝, 等. 在线社交网络用户行为研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(2): 200-215. doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.02.008.
- YANG Shanlin, WANG Jiajia, DAI Bao, *et al.* State of the art in social network user behaviors and its future[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(2): 200-215. doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.02.008.
- [3] DEZSO Z, ALMAAS E, LUKACS A, *et al.* Dynamics of information access on the web[J]. *Physical Review E*, 2006, 73(6): 066132. doi: 10.1103/PhysRevE.73.066132.
- [4] GONCALVES B and RAMASCO J J. Human dynamics revealed through Web analytics[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(2): 026123. doi: 10.1103/PhysRevE.78.026123.
- [5] ZHAO Z D, XIA H, SHANG M S, *et al.* Empirical analysis on the human dynamics of a large-scale short message communication system[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(6): 068901. doi: 10.1088/0256-307X/28/6/068901.
- [6] HU H B and HAN D Y. Empirical analysis of individual popularity and activity on an online music service system[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2008, 387(23): 5916-5921. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2008.06.018>.
- [7] 周涛, 韩筱璞, 闫小勇, 等. 人类行为时空特性的统计力学[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(4): 481-540. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.001.
- ZHOU Tao, HAN Xiaopu, YAN Xiaoyong, *et al.* Statistical mechanics on temporal and spatial activities of human[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(4): 481-540. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.001.
- [8] BARABASI A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics[J]. *Nature*, 2005(435): 207-211. doi: 10.1038/nature03459.
- [9] BROCKMANN D, HUFNAGEL L, and GEISEL T. The scaling laws of human travel[J]. *Nature*, 2006(439): 462-465. doi: 10.1038/nature04292.
- [10] WU Y, ZHOU C, XIAO J, *et al.* Evidence for a bimodal distribution in human communication[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(44): 18803-18808. doi: 10.1073/pnas.1013140107.
- [11] WANG P, GONZALEZ M C, HIDALFO C A, *et al.* Understanding the spreading patterns of mobile phone viruses[J]. *Science*, 2009(324): 1071-1076. doi: 10.1126/science.1167053.
- [12] DEVILLE P, SONG C, EAGLE N, *et al.* Scaling identity connects human mobility and social interactions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(26): 7047-7052. doi: 10.1073/pnas.1525443113.
- [13] YAN Q, WU L R, and ZHENG L. Social network based microblog user behavior analysis[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2013, 392(7): 1712-1723. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2012.12.008>.
- [14] YAN Q, YI L L, and WU L R. Human dynamic model co-driven by interest and social identity in the MicroBlog community[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2012, 391(4): 1540-1545. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2011.08.038>.
- [15] 闫强, 吴联仁, 郑兰. 微博社区中用户行为特征及其机理研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 328-333. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.002.
- YAN Q, WU L R, and ZHENG L. Research on user behavior characters and mechanism in micro-blog communities[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(3): 328-333. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.002.
- [16] CHEN G, HAN X, and WANG B. Multi-level scaling properties of instant-message communications[J]. *Physica Procedia*, 2010, 3(5): 1897-1905. doi: 10.1016/j.phpro.2010.07.034.
- [17] WANG P, ZHOU T, HAN X P, *et al.* Modeling correlated human dynamics[OL]. <http://arXiv preprint arXiv:1007.4440>, 2010.
- [18] RADICCHI F. Human activity in the web[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(2): 026118. doi: 10.1103/PhysRevE.80.026118.
- [19] LESKOVEC J and HORVITZ E. Planetary-scale views on a large instant-messaging network[C]. Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web, ACM, USA, 2008: 915-924. doi: 10.1145/1367497.1367620.
- [20] GOETZ M, LESKOVEC J, MCGLOHON M, *et al.* Modeling blog dynamics[C]. Third International AAAI Conference on Weblogs and Social Media, California, USA, 2009: 1-8.
- [21] OLIVEIRA J G and BARABASI A L. Human dynamics: Darwin and Einstein correspondence patterns[J]. *Nature*, 2005, 437: 1251-1251. doi: 10.1038/4371251a.
- [22] MASUDA N, KIM J S, and KAHNG B. Priority queues with bursty arrivals of incoming tasks[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(3): 036106. doi: 10.1103/PhysRevE.79.036106.
- [23] CAJUEIRO D O and MALDONADO W L. Role of optimization in the human dynamics of task execution[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(3): 035101. doi: 10.1103/PhysRevE.77.035101.
- [24] OLIVEIRA J G and VAZQUEZ A. Impact of interactions on human dynamics[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2009, 388(2/3): 187-192. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2008.08.022>.

- [25] MIN B, GOH K I, and KIM I M. Waiting time dynamics of priority-queue networks[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(5): 056110. doi: 10.1103/PhysRevE.79.056110.
- [26] VAZQUEZ A. Impact of memory on human dynamics[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 373: 747–752. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2006.04.060.
- [27] HAN X P, ZHOU T, and WANG B H. Modeling human dynamics with adaptive interest[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(7): 073010. doi: 10.1088/1367-2630/10/7/073010.
- [28] SHANG M S, CHEN G X, DAI S X, *et al.* Interest-driven model for human dynamics[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010(27): 048701. doi: 10.1088/0256-307X/27/4/048701.
- [29] HIDALGO R C A. Conditions for the emergence of scaling in the inter-event time of uncorrelated and seasonal systems[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 369(2): 877–883. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2005.12.035.
- [30] 韩佳, 肖如良, 胡耀, 等. 在线社交网络中信息传播模式的特征分析[J]. *计算机应用*, 2013, 33(1): 105–107. doi: 10.3724/SP.J.1087.2013.00105.
HAN J, XIAO R L, HU Y, *et al.* Characteristic analysis of information propagation pattern in online social network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(1): 105–107. doi: 10.3724/SP.J.1087.2013.00105.
- [31] 张赛, 徐格, 李海涛. 微博类社交网络中信息传播的测量与分析[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(2): 124–129. doi: 10.7652/xjtub201302021.
ZHANG S, XU K, and LI H. Measurement and analysis of information propagation in online social networks like micro-blog[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(2): 124–129. doi: 10.7652/xjtub201302021.
- [32] 李洋, 陈毅恒, 刘挺. 微博信息传播预测研究综述[J]. *软件学报*, 2016, 27(2): 247–263. doi: 10.13328/j.cnki.jos.004944.
LI Y, CHEN Y H, and LIU T. Survey on predicting information propagation in microblogs[J]. *Journal of Software*, 2016, 27(2): 247–263. doi: 10.13328/j.cnki.jos.004944.
- [33] CENTOLA D. The spread of behavior in an online social network experiment[J]. *Science*, 2010, 329(5996): 1194–1197. doi: 10.1126/science.1185231.
- [34] GUILLE A, HACID H, FAVRE C, *et al.* Information diffusion in online social networks: A survey[J]. *ACM SIGMOD Record*, 2013, 42(2): 17–28. doi: 10.1145/2503792.2503797.
- [35] KARSAI M, KIVELA M, PAN R K, *et al.* Small but slow world: How network topology and burstiness slow down spreading[J]. *Physical Review E*, 2011, 83(2): 025102. doi: 10.1103/PhysRevE.83.025102.
- [36] ZHAO L, WANG J, CHEN Y, *et al.* SIHR rumor spreading model in social networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2012, 391(7): 2444–2453. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.008.
- [37] ZHAO L, CUI H, QIU X, *et al.* SIR rumor spreading model in the new media age[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2013, 392(4): 995–1003. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2012.09.030.
- [38] LU L, CHEN D B, and ZHOU T. The small world yields the most effective information spreading[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(12): 123005. doi: 10.1088/1367-2630/13/12/123005.
- [39] ZHENG M, LU L, and ZHAO M. Spreading in online social networks: The role of social reinforcement[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(1): 012818. doi: 10.1103/PhysRevE.88.012818.
- [40] ZHOU T, LIU J G, BAI W J, *et al.* Behaviors of susceptible-infected epidemics on scale-free networks with identical infectivity[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(5): 056109. doi: 10.1103/PhysRevE.74.056109.
- [41] 朱张祥, 刘咏梅. 在线社交网络谣言传播的仿真研究——基于聚类系数可变的无标度网络环境[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2016, 13(2): 74–82. doi: 10.13306/j.1672-3813.2016.02.009.
ZHU Z X and LIU Y M. Simulation study of propagation of rumor in online social network based on scale-free network with tunable clustering[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2016, 13(2): 74–82. doi: 10.13306/j.1672-3813.2016.02.009.
- [42] VAZQUEZ A. Polynomial growth in branching processes with diverging reproductive number[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(3): 038702. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.038702.
- [43] VAZQUEZ A, RACZ B, LUKACS A, *et al.* Impact of non-Poissonian activity patterns on spreading processes[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(15): 158702. doi: 10.1103/PhysRevLett.98.158702.
- [44] IRIBARREN J L. Impact of human activity patterns on the dynamics of information diffusion[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(3): 038702. doi: 10.1103/PhysRevLett.103.038702.
- [45] MIN B, GOH K I, and VAZQUEZ A. Spreading dynamics following bursty human activity patterns[J]. *Physical Review E*, 2011, 83(3): 036102. doi: 10.1103/PhysRevE.83.036102.
- [46] Yang Z, Cui A X, and Zhou T. Impact of heterogeneous human activities on epidemic spreading[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390(23): 4543–4548. doi: 10.1016/j.physa.2011.06.068.
- [47] 吴联仁, 李瑾韵, 闫强. 基于时间异质性的微博信息传播模型[J]. *电子科技大学学报*, 2015, 44(5): 657–662. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.003.
WU L R, LI J J, and YAN Q. Micro-blog information

- spreading model based on temporal heterogeneity[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44(5): 657–662. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.003.
- [48] KIM S. Self-organized pinning and interface growth in a random medium[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(24): 3539. doi: 10.1103/PhysRevLett.69.3539.
- [49] STEHL J, BARRAT A, and BIANCONI G. Dynamical and bursty interactions in social networks[J]. *Physical Review E*, 2010, 81(3): 035101. doi: 10.1103/PhysRevE.81.035101.
- [50] JO H H, PAN R K, and KASKI K. Emergence of bursts and communities in evolving weighted networks[J]. *PloS One*, 2011, 6(8): e22687. doi: 10.1371/journal.pone.0022687.
- [51] YAN Q, WU L, LIU C, *et al.* Information propagation in online social network based on human dynamics[C]. *Abstract and Applied Analysis*, New York, USA, 2013: 1–7. doi: 10.1155/2013/953406.
- [52] YAN Q, WU L, and YI L. Research on the human dynamics in mobile communities based on social identity[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012. doi: 10.1155/2012/672756.
- [53] GRABOWICZ P A, RAMASCO J J, GONCALVES B, *et al.* Entangling mobility and interactions in social media[J]. *PloS One*, 2014, 9(3): e92196. doi: 10.1371/journal.pone.0092196.
- [54] GLEESON J P, WARD J A, O’SULLIVAN K P, *et al.* Competition-induced criticality in a model of meme popularity[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(4): 048701. doi: 10.1103/PhysRevLett.112.048701.
- [55] ZHAO L, QIU X, WANG X, *et al.* Rumor spreading model considering forgetting and remembering mechanisms in inhomogeneous networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2013, 392(4): 987–994. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2012.10.031>.
- [56] HOLME P and SARAMAKI J. Temporal networks[J]. *Physics Reports*, 2012, 519(3): 97–125. doi: 10.1016/j.physrep.2012.03.001.
- [57] LEE S, ROCHA L E C, LILJEROS F, *et al.* Exploiting temporal network structures of human interaction to effectively immunize populations[J]. *PloS One*, 2012, 7(5): e36439. doi: 10.1371/journal.pone.0036439.
- [58] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, *et al.* The structure and dynamics of multilayer networks[J]. *Physics Reports*, 2014, 544(1): 1–122. doi: 10.1016/j.physrep.2014.07.001.
- [59] SALEHI M, SHARMA R, MARZOLLA M, *et al.* Spreading processes in multilayer networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2015, 2(2): 65–83. doi: 10.1109/TNSE.2015.2425961.
- [60] KIVELA M, ARENAS A, BARTHELEMY M, *et al.* Multilayer networks[J]. *Journal of Complex Networks*, 2014, 2(3): 203–271. doi: 10.1093/comnet/cnu016.
- 李瑾頔：女，1987年生，博士生，研究方向为在线社交网络分析。
- 吴联仁：男，1985年生，讲师，硕士生导师，研究方向为人类行为动力学、社交网络信息传播。
- 齐佳音：女，1972年生，教授，博士生导师，研究方向为数据挖掘与商务分析、决策理论与方法。
- 闫强：男，1972年生，教授，博士生导师，研究方向为网络用户行为分析。