

# 社会网络分析及其在舆情和疫情防控中的应用<sup>①</sup>

周 涛<sup>1,2</sup>, 汪秉宏<sup>2,3</sup>, 韩筱璞<sup>2</sup>, 尚明生<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学互联网科学中心, 四川 成都 610054 2. 中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026 3. 上海理工大学上海系统科学研究院, 上海 200093)

**摘要:** 研究社会网络的结构与演化特性对于评估与控制传染病爆发这类突发事件, 以及监测预防伴随突发事件而生的谣言和恐慌情绪的蔓延, 都有重要意义. 对这一领域的研究前沿进展进行了较为全面的综述, 并对该领域中若干值得研究者注意的新的研究方向, 特别是涉及突发事件管理的方面, 进行了论述. 这些方向包括: 人类空间移动模式和行为时间特性的影响; 具有地理效应和区别接触频率的含权社会接触网络和其上传染病传播的规律; 考虑人群面对突发事件时的心理压力的更符合实际舆情传播的动力学模型等.

**关键词:** 社会网络; 突发事件管理; 传染病流行; 舆情传播; 预警与控制

**中图分类号:** C93/N93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5781(2010)06-0742-13

## Social network analysis and its application in the prevention and control of propagation for public opinion and the epidemic

ZHOU Tao<sup>1,2</sup>, WANG Bing-hong<sup>2,3</sup>, HAN Xiao-pu<sup>2</sup>, SHANG Ming-sheng<sup>1</sup>

(1. Web Sciences Center, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054 China; 2. Department of Modern Physics, University of Electronic Science and Technology Hefei 230026, China; 3. Shanghai Institute of Systems Science, Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** Studying the structure and evolution of social network is significant for the evaluation and control of emergency such as infectious disease outbreak, as well as for the monitoring and prevention of the spread of rumors and panic accompanying with these events. In this paper, the progresses in this field are introduced comprehensively and a number of worthy research directions, particularly in relation to aspects of emergency management, are discussed. These directions include the effect of movement patterns and behavior of human in space and time characteristics, the laws of social contact network and its affect on epidemics in the weighted networks with geographical effect and difference access frequency, and the more practical transmission dynamics model for public opinion considering the psychological pressure under emergencies.

**Key words** social networks; emergency management; epidemics; public opinion dissemination; early warning and control

① 收稿日期: 2010-04-30; 修订日期: 2010-09-19.

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2006CB705500); 国家自然科学基金资助项目 (90924011, 60973069, 10532060, 10635040, 10905052); 四川省科技厅资助项目 (2010HH0002).

## 0 引言

公共安全是国家和社会稳定的基石, 其中, 非常规突发事件对人民生命和财产有特别重大的破坏力。因此, 政府应当对可能的突发事件进行监控, 在出现危险端倪时进行预警和干预, 在事件发生后实施高效的控制, 把不良影响和损失降到最低。非常规突发事件往往牵涉到相当大规模的人群, 人与人之间的接触和相互作用方式对于事件的演化和控制有至关重要的影响。如果用节点表示个人, 用边连接具有接触或者其他相互作用关系的个人, 那么这样的人群就可以用社会网络抽象刻画<sup>[1]</sup>。一些具有极大破坏力的突发事件所凭借的载体正是这样的社会网络, 例如 2003 年的非典型肺炎和艾滋病在撒哈拉沙漠以南地区的可怕爆发。事实上, 最近的数值模拟显示, 控制性接触网络连接方式对于抑制艾滋病和其他性病的流行有举足轻重的作用<sup>[2]</sup>。另一种最近几年才引起充分重视的突发事件是谣言和恐慌情绪。它们一方面可能伴随某些突发事件并严重干扰相应的应急管理工作, 例如在 2003 年非典型肺炎传播最严重的时候, 互联网上滋生了“政府要封锁北京”的谣言。又如汶川大地震后因互联网上流传紫坪坝水库遭到污染的谣言, 成都一度发生了疯狂的抢水事件, 同时网上许多虚假的余震预报, 几度让四川灾区处于人心惶惶交通混乱的状态。另一方面, 这些谣言本身就可能带来巨大的社会经济损失, 例如 2007 年的“海南毒香蕉”, 2008 年“海南西瓜注射了红药水”等。还有一些谣言, 可能成为一些突发事件直接的导火索。例如贵州瓮安大规模群体对抗政府的事件。与疾病传播类似, 谣言传播也是基于互联网、手机、短信、面对面交谈等形式形成的社会通信网络。

本文将注意力集中到社会网络的结构和演化特性分析中, 并系统研究社会网络结构对于网络上疾病和谣言传播的影响。考虑到传染病的流行和舆情的传播在动力学机制上有共通之处, 且都从属于基于社会网络的接触过程, 本文将从 3 个方面介绍相关的国际国内研究进展, 首先讲述社会网络结构和演化的研究进展, 其次讨论传染病的流行规律, 最后讨论舆情的传播规律、预警与

控制。

## 1 社会网络的结构、演化和模型

社会网络大体可分作两类, 一种是具有物理接触的社会网络, 将其称为社会接触网络, 另一种是基于信息交换和传递形成的社会网络, 称其为社会通讯网络。

1) 社会接触网络 社会接触网络由于主要是通过调查问卷和口头采集信息, 数据量都比较小, 大部分研究主要集中在相对封闭的系统, 例如学校、社区、公司董事会等等<sup>[3]</sup>。与传染病流行有关的比较深入的研究都集中在性关系网络方面, 特别是网络结构自身的特点及其对各种性传播疾病的影响。

尽管目前尚缺乏充足的各类大规模社会接触网络的实证研究, 学术界对于社会接触网络的结构还是有一些共识<sup>[3]</sup>, 它们包括: 网络度分布总体来说较泊松分布广阔, 存在度特别大的少量个体<sup>[4]</sup>; 网络表现出小世界效应, 亦即一般而言, 任意两个个体可以通过少量中间个体得以连接<sup>[5]</sup>; 网络具有很强的群落结构, 群落之内连接紧密, 群落之间连接松弛<sup>[6]</sup>; 连接具有明显的地理偏好, 也就是说, 人们倾向于同自己在地理上靠近的人形成联系<sup>[7]</sup>。

由于大规模数据难以获得, 而且真实数据可控性质较差, 因此通过合理网络模型产生数据并在此基础上进行理论和数值研究, 是当前网络传染病动力学的重要方法。Rozenfeld 等<sup>[8]</sup>提出的具有局域优先连接效应的嵌入在欧氏空间中的无标度小世界网络可以再现真实社会接触网络的若干特征, 被认为是研究基于社会接触网络的传染病流行的良好模板。国内如许新建等<sup>[9]</sup>就曾以此为基讨论过传染病的爆发是如何受地理连接倾向性的影响。还有很多模型可以作为模拟社会接触网络的很好候选, 例如局域世界模型<sup>[10]</sup>, 具有群落结构的无标度网络模型<sup>[11]</sup>, 具有层次结构的局域连接网络<sup>[12]</sup>, 以及具有群落结构和空间效应的无标度网络模型<sup>[13]</sup>, 等等。遗憾的是, 从总体上来说, 关于真实社会接触网络的演化特性讨论较少, 相应的模型也罕有报道。以上的例子尽管能够再现部分社会接触网络的性质, 但是都不完备, 还需

要进一步的整合.

需要指出的是, 以往关于社会接触网络模型研究都没有考虑接触发生的频率. 一般而言, 每条边的访问频率都设为一致, 这可能会造成在传染病爆发的模拟中高估异地爆发的可能性. 对于人员流动模式的最新研究表明, 人们在长程旅行<sup>[14]</sup>和日常生活<sup>[15]</sup>中的空间移动距离, 都可以用具有指数截断的幂函数很好刻画, 这些结论暗示长程连边不仅数量上少, 而且发生在这些连边上真实的接触频率也低. 将这些量化的结果合理表现在含权社会接触网络上, 对于精确刻画传染病流行有重要的推动意义.

2) 社会通讯网络 随着通讯技术的发展, 各种各样的通讯工具伴生出各种各样的社会通讯网络, 包括: (a) 电话和手机网络. 文献 [16] 研究了包含固定电话和手机的通讯网络, 发现该网络是一个无标度网络, 其幂指数约为 2.1. Onnela 等<sup>[17]</sup> 研究了包含 460 万节点的大规模手机通讯网络, 发现决定该网络连通能力的关键是较弱的连接. (b) 电子邮件网络. Ebel 等<sup>[18]</sup> 发现电子邮件网络是典型的小世界和无标度网络; Eckmann 等<sup>[19]</sup> 则提出了用熵来刻画网络中包含的长期通讯模式和临时通讯模式. (c) 即时通信网络. Smith<sup>[20]</sup> 研究了即时通信系统构成的社会网络, 其中节点是注册用户, 每位用户与自己的联系人相连接, 连接是有方向的. (d) P2P 通信网络. Wang 等<sup>[21]</sup> 研究了基于 P2P 通信的社会网络, 其中如果用户 B 曾回答过用户 A 的提问, 则从 A 到 B 建立一条有向边, 该边的权重定义为回答的次数, 整个网络是有向含权的. (e) BBS 与论坛网络. Goh 等<sup>[22]</sup> 研究了韩国高等科技研究院的 BBS 网络, 其中用户作为节点, 帖子回复关系作为连边, 回复数量定义为边的权重; Zhang 等<sup>[23]</sup> 研究了 Java 论坛, 类似地, 对问题的回复关系构成了连边, 回复的频次则作为权重加以考虑. 需要强调的是, BBS 和各类论坛常常是恐慌情绪或者谣言得以快速传播的主要途径, 但是这方面的研究却相对缺乏, 需要引起特别的关注. (f) 在线交友网络. Golder 等<sup>[24]</sup> 研究了在线交友网络 Facebook, 通过对 420 万用户的好友列表信息进行分析, 发现用户的好友平均数为 180, 中值为 144, 这与 Dunbar<sup>[25]</sup> 提出的著名的“150 法则”——1 个人最

多能维持 150 个好友关系不谋而合. Ahn 等<sup>[26]</sup> 对 Cyworld 的研究再次印证了这个法则; Yuta 等<sup>[27]</sup> 研究了日本最大的在线社交网络 Mixi, 发现他的社团规模在 20 到 400 之间存在断层, 并基于该现象提出了理论模型; Mislove 等<sup>[28]</sup> 从结构化特性的角度, Spertus 等<sup>[29]</sup> 从社区推荐的角度分别研究了 Google 旗下的 orkut 网络; Csányi 等<sup>[30]</sup> 研究了匈牙利最大在线交友网 WW 的结构和演化特性. (g) 在线社区网络. 在线社区是集个人主页、博客、论坛、交友等功能于一身的大型网站, 每个用户拥有自己的主页, 主页之间的友情链接可以看作有向边从而构建网络. Zakharov<sup>[31]</sup> 从复杂网络角度研究了 LiveJournal 网络, 发现该网络从结构上直接继承了现实社会网络的特征; Backstrom 等<sup>[32]</sup> 研究了 LiveJournal 的社区特性, 发现随着某用户的加入特定主题社区的好友数目增加, 该用户被吸引加入此社区概率增加, 但是增量明显出现递减趋势; 特别有趣的是, Liben-Nowell 等<sup>[33]</sup> 发现, 即便是 LiveJournal 这类虚拟在线网络也明显存在地理效应, 基于此, 提出了考虑地理路由的社会通讯网络模型, 能很好再现所观察到的现象. 个人博客之间通过友情链接相连, 可以看作一种简化形式的在线社区网络, 它们具有和在线社区网络类似的性质, 但是平均度要小很多<sup>[34-35]</sup>. (h) 功能性社会网络. 功能性社会网络是用户通过具有提供特定功能的网站形成的连接关系, 这些网站主要用于发布、共享、检索和收藏图片、音乐、视频、书签、文摘等, 例如 Flickr, del.icio.us, Digg, YouTube, CitULike 等等. Lemmon<sup>[36]</sup> 研究了 Digg 的朋友关系网络, 他通过比较 Digg 中最具活性的 1020 位用户的好友数目和其成为多少人的好友, 来细致刻画不同类型的用户. Santos-Neto 等<sup>[37]</sup> 研究了科技文献书签系统 CitULike 和 BibSonomy 的社会关系网, 其中用户之间连接与否是由他们所选择的书签的相似性定义的. 有一些学者研究了 del.icio.us 的标签 (tag) 网络<sup>[38]</sup>, 但是对其关联的社会网络反而少见分析.

由于大部分电话通信和网络活动都可以通过日志文件记录发生时间, 因此对于社会通讯网络演化行为的研究比较充分, 这里举 4 个最具代表性的研究工作. Holme 等<sup>[39]</sup> 研究了瑞典一个大型的婚恋交友网络 Pussokram 的演化行为, 发现该

网络表现出度度负相关, 并且负相关程度随着时间越来越大. 由于绝大多数现实生活中的社会网络都是度度正相关的<sup>[40]</sup>, 因此 Home 等的发现引起了广泛的关注, 也被认为是在线社会网络在结构上区别于现实社会网络的典型代表. 最近, Hu 等<sup>[41]</sup>进一步验证了这个现象. 遗憾的是, 迄今为止, 尚没有得到广泛认可的解释和相应的模型. Kossinets 等<sup>[42]</sup>研究了哥伦比亚大学 43 553 个学生和教师之间的社会关系网络的演化行为, 该网络主要由电子邮件通讯构成, 也包括个人信息和课程信息的相关性. 他们分析了该网络各种结构特征在演化中的稳定性, 并猜测网络局部指标的平均值 (例如簇系数) 要比全局指标在演化中表现得更稳定. 该猜想的正确性, 或者正确范围, 至今没有深入讨论. Palla 等<sup>[43]</sup>研究了手机通讯网络和科学家合作网络的演化行为, 发现了一个有趣现象, 就是比较小的群落, 在成员非常稳定的情况下才能持久, 与之相反, 比较大的群落却只有通过频繁更换部分成员才能保持长期存在而不至于溃散. 目前尚没有模型能够再现该观测, 尽管 Whitfield<sup>[44]</sup>声称这一现象对维持成功团队至关重要, 他的说法还没有得到坚实研究的佐证. Kumar 等<sup>[45]</sup>在研究在线社区 Yahoo! 360 的朋友关系网络演化行为时发现该网络平均路径长度的增长可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 平均路径几乎不变; 第 2 阶段, 网络直径增大到峰值; 第 3 阶段, 直径开始收缩. Leskovec 等<sup>[46]</sup>在电子邮件网络中也观察到了同样的现象. 关于该现象背后的机制目前尚缺乏深入探讨.

相比社会接触网络, 社会通讯网络的研究要丰富得多, 但是仍然存在不足之处. 首先, 尽管有很多学者提出了普遍适用的社会网络演化模型<sup>[47-50]</sup>, 但是这些模型都很难再现特定类型社会通讯网络的细致结构特性. 举例来说, 上面提到的最近 4 个引起广泛关注的演化性质: 愈来愈强的度度负相关<sup>[39]</sup>, 局部指标比全局指标更稳定<sup>[42]</sup>, 群落规模决定了群落存活的不同策略<sup>[43]</sup>和直径收缩现象<sup>[45]</sup>, 目前都没有任何得到公认模型能够再现. 这也是为什么本文特别强调上面这些工作的原因. 事实上, 本文认为不同类型的社会网络产生的机制是不同的, 很难期望它们能从某种普适的规律中重现. 针对不同类型的网络建立对应

的模型可能更有意义, Tam 等<sup>[51]</sup>最近提出的电话通讯网络模型就是很好的尝试. 其次, 最近有学者指出, 完整的社会关系, 应该是多个社会网络的整合体<sup>[3]</sup>, 例如 Home 等<sup>[39]</sup>的研究考虑了消息、留言本、邀请和好友 4 种关系, 而 Kossinets 等<sup>[42]</sup>构建的含权网络则包含了电子邮件, 个人信息和课程信息 3 部分. 这一点尤其重要, 因为谣言和恐慌情绪的传播往往通过多个媒介同时作用, 包括论坛、网络社区、博客系统、电话、短信甚至口口相传. 遗憾的是, 以前整合的研究相对较少, 特别是理论上存在大量空白.

## 2 基于社会接触网络的传染病传播规律、预警和控制

目前研究最为彻底, 应用最为广泛的经典传染病模型是 SIR 模型和 SIS 模型<sup>[52-53]</sup>. SIR 模型适合于染病者在治愈后可以获得终生免疫力, 或者染病者几乎不可避免走向死亡的情形. 在 SIR 模型中, 人群被划分为 3 类: 第 1 类是易感人群 (S), 他们不会感染他人, 但有可能被传染; 第 2 类是染病人群 (I), 他们已经患病, 具有传染性; 第 3 类是移除人群 (R), 他们是被治愈并获得了免疫能力, 或者已经死亡的人群——不具有传染性, 也不会再次被感染, 即不再对相应动力学行为产生任何影响, 可以看做已经从系统中移除. 对于象感冒、淋病这类治愈后患者也没有办法获得免疫能力的疾病, 使用 SIR 模型是不适宜的, 这时候往往采用 SIS 模型, 该模型与 SIR 模型类似, 只是患者被治愈后自动恢复为易感状态. 除了上述 SIR 和 SIS 模型外, 针对不同传染病的特点, 还有其他相应的传播模型. 比如, 对于突然爆发的尚缺乏有效控制的流行病, 如黑死病, 非典型肺炎等, 在疾病爆发早期常使用 SI 模型进行分析; 对于免疫期有限的疾病, 往往利用 SIRS 模型进行分析; 对于潜伏期不可忽略的疾病, 可以引入潜伏人群的概念.

传统的基于微分方程的传染病模型假设人群是充分混合的, 染病个体原则上有机会感染任何易感的个体<sup>[54]</sup>. 这种感染总是通过某种“接触”完成的, 因此如果两个个体可能接触就在相应的节点之间连一条边, 那么传统的模型可以看做是

对疾病在完全连通的社会接触网络上传播行为的描述. 但是, 正如前面所述及的, 社会接触网络具有不同于完全连通网络的结构特点. 特别地, 由统计物理学家发展出来的一些分析技术, 例如逾渗理论<sup>[55]</sup>、生成函数方法<sup>[56]</sup>、平均场近似<sup>[57]</sup>等等, 使得分析具有复杂结构特性的真实网络上的传播行为成为可能. 事实上已经证明, 社会接触网络一些公认的结构特征对传播规律有重大影响<sup>[58]</sup>, 下面列举一些具有代表性的研究成果.

### 1) 小世界效应对传播动力学行为的影响

Moore等<sup>[59]</sup>发现, 少量的长程边也可以明显增加网络中疾病易于传染的性质. 如果把疾病传播开去的传染率下限 (称为传播阈值) 和传播时间特性 (感染者数量和传播持续时间之间的关系) 视作网络传播动力学中最重要的参量, 则相比规则网络, 小世界网络的传播阈值小, 传播速度快. 另外, 很早人们就观察到在大规模的种群中, 疾病的流行常常具有某种周期的特性<sup>[60-61]</sup>, Kurpeman等<sup>[62]</sup>最早讨论了小世界网络中疾病传播的周期振荡, 他们发现, 当长程边数目慢慢增大时, 感染个体数量的时间序列将逐步从在一个不动点上下波动变成明显的周期振荡. Xing等<sup>[63]</sup>通过在小世界网络的 SIR 模型中引入潜伏期, 在不同参数设置下, 分别得到短时和长时的振荡行为. 类似地, Verdasca等<sup>[64]</sup>从儿童传染病麻疹和百日咳的致病机理出发, 系统讨论了带有潜伏期的 SIR 模型 (SEIR 模型) 在小世界网络上的传播行为, 也发现了明显的周期振荡.

### 2) 无标度性质对于传播动力学行为的影响

关于规则和随机网络上流行病传播动力学研究中最重要结论是存在有限传播阈值, 当传染率高于此值时, 疾病能够在网络中长期存在下去, 反之, 疾病以指数的速率迅速消亡<sup>[65]</sup>. 由于疾病波及范围 (稳态时患病个体数占人群总数的比例) 与传染率正相关, 因此根据经典的传播理论, 疾病若是持久存在, 则必然波及大量个体. 但实证研究表明, 麻疹和性传播疾病等一般仅波及少数个体, 但能长期存在. Pastor-Satorras等<sup>[57, 66]</sup>最早对无标度网络上 SIS 模型阈值的存在性提出了质疑, 他们利用平均场近似讨论了无标度网络模型上的 SIS 传播动力学, 发现当网络规模趋于无穷大时, 传播阈值将下降到零, 也就是说任意传染率

的流行病都有可能在网络中长期存在. 由于真实的社会接触网络往往具有近似的无标度结构, 该结论对于解释现实具有重大意义. May等<sup>[67]</sup>发现无标度网络上的 SR 模型也具有类似的性质. 需要指出的是, 上面的研究是针对非常理想的情况, 是否存在阈值, 准确判断阈值在什么位置往往还要牵涉更多复杂的因素. 例如 Volchenkov等<sup>[68]</sup>的研究表明, 阈值的存在性以及染病人数比例受幂指数、传染率、选择伙伴的策略和治疗方案 4 个因素共同决定. 再比如 Moreno等<sup>[69]</sup>考察了 SIS 和 SIR 模型在不同无标度网络上的传播行为, 也发现是否存在阈值的结论需要谨慎做出, 特别是要考虑不同传播模型和初始化条件. 另外, 如果网络规模有限, 则必存在有限的传播阈值<sup>[67]</sup>. 上面述及的 SIS 模型和 SR 模型主要关注的都是稳态或者终态的行为, 为了考察疾病爆发时期的动力学特性, Barthélemy等<sup>[70-71]</sup>系统研究了无标度网络上的 SI 模型, 该模型假设时间足够短疾病尚处于自由传播的状态, 因此只考虑易感节点染病, 完全忽略染病节点的隔离、康复、获得免疫或死亡等情况. 他们发现患者数量是指数增长的, 且传播的动力学结构具有层次性, 一般先感染社会接触较多的个体, 然后是一般个体, 最后到社会接触较少的个体.

### 3) 群落结构对于传播动力学行为的影响

Li 等<sup>[72]</sup>研究了 SIS 模型在具有群落结构的小世界社会接触网络上的传播行为, 发现群落结构的存在使得传播阈值降低了 (传染病的爆发变得更加容易), 但是爆发后同样传染率下感染的人群数目却变少了 (爆发的危害降低了). 由于他们考虑的网络度分布不是无标度的, 因此和真实社会接触网络有所不同. 为了克服这个缺陷, 他们进一步建立了具有无标度结构和可调簇系数的群落结构网络, 并发现在这样的网络中, 群落结构的存在会降低传染病流行的危险性<sup>[73]</sup>. Huang等<sup>[74]</sup>研究了具有群落结构的无标度网络上的 SI 模型, 也发现群落结构的存在会降低传染病爆发的危害. Yan等<sup>[52]</sup>研究无标度网络上的 SIRS 模型, 发现了明显的感染人数周期振荡现象, 而当群落结构逐渐变得明显时, 振幅会出现波动, 因为这时候各个群落之间的动力学同步会变弱, 最终当群落强度超过某个临界值后, 全局同步震荡会消

失。Zhao等<sup>[53]</sup>也观察到了类似的现象。

需要注意的是, 尽管上面的研究突出了社会网络的某些重要性质对流行病传播的影响, 但是所涉及的网络并不是真正的社会接触网络, 至少对于很多社会接触网络所具有的细致结构挖掘不够。因此, 收集总结真实社会接触网络的数据, 研究在此之上的传染病动力学仍然非常重要。例如, Gonçalves等<sup>[75-77]</sup>一直致力于研究性接触网络上性病的流行问题, Eubank等<sup>[78]</sup>研究了真实城市社会网络上的疾病传播, Liu等<sup>[79]</sup>讨论了具有家庭结构的社会网络上的传染病流行, Zheng等<sup>[80]</sup>和 Grabowski等<sup>[81]</sup>研究了社会网络层次结构对传播动力学的影响。这些更细致深入的研究, 特别是对真实社会接触网络上流行病传播的仿真试验, 对于最终理解社会接触网络上的传染病流行有重要的推动作用。另外, 在某些真实的流行病传播过程中, 个体的接触能力是很有限的。尽管某个体可能有数以千计的社会联系, 但是不能想象他会在短时间内和所有这些人进行接触, 因此以往的研究中把人的接触能力(单位时间内接触的其他个体数目)直接假设为正比于这个人的社会联系数目, 是存在不合理之处的。例如, Joo等<sup>[82]</sup>与 Olinky等<sup>[83]</sup>分别独立指出这种假设的不合理, 并证明如果个体接触能力相差无几, 则传染病流行的危险性会降低。Zhou等<sup>[84]</sup>和 Yang等<sup>[85-86]</sup>系统研究了当个人传染能力无差别的情况下传染病流行的规律, 他们发现, 相比于以前的假设, 该情况下传染病在爆发期和持续期的危害都有所降低, 并且能够再现传播的层次结构, 而且, 在这种条件下, 感染社会联系广度一般的个体具有更重要的作用, 因此控制和免疫那些联系最广的人所带来的作用恐怕会被削弱。再次, 如前面在介绍社会接触网络时已经提到的, 迄今, 接触发生的频率和地理上的优先性对于传染病传播规律的影响, 并没有在社会接触网络中得以体现。Xu等<sup>[9, 87]</sup>对于具有地理效应的无标度网络上的传播行为的研究, 以及 Zhou等<sup>[88]</sup>对于具有几何移动能力的社区网络上的疾病流行动力学研究, 是这方面很好的尝试。当然, 这些努力还远远不够, 将来需要把关于人群动态移动模式的实证数据<sup>[14-15]</sup>合适地表达在含权的社会接触网络中(此时权重即为接触频率), 通过含权网络上的流行病动力学<sup>[89]</sup>更

精确地刻画真实的传播行为。最后, 每个人易感病毒的程度和病毒活性随时间变化可能都有所不同, 这些都可能影响真实的传播行为, 需要严肃考虑。

尽管社会接触网络上流行病传播规律的研究尚有不如意之处, 但是已经积累了大量的现象、方法和结论, 为更深入地工作奠定了良好的基础。特别是, 利用网络进行传染病流行规律分析, 已经被证明具有很好地解释真实世界的能力。举例来说, Small等<sup>[90]</sup>将社会网络传播动力学用于 SARS 建模和预测, Zhou等<sup>[91]</sup>将其用于再现出血性登革热在泰国爆发时的周期波动现象<sup>[92]</sup>, 都得到与实际传播情况相符的结果。这些研究让大家看到了将社会网络传播动力学理论真正用于实践的曙光。

在这些研究的基础上, 如何有效地控制传染病的传播, 避免出现大范围的流行, 或者使其在爆发之初就可被控制在局部范围内, 是有着重要意义的问题。预警和控制是最重要的两种手段, 其中预警是指在传染病将爆发或爆发初期发布警告, 从而提醒易感群众采取各种手段, 避免与传染源接触, 这对于早期防控有很大帮助。预警需要注意的是, 要对传染病流行现状进行合理评估, 既不能忽略可能的危险, 又不能过度紧张, 从而造成不必要的恐慌。通常使用的控制手段主要有接种疫苗和隔离。在这些方法中, 对所有人进行接种疫苗常常是不现实的, 而将所有人隔离更是不可能的。因此, 如何以最小的代价, 即最小限度地对某些人群进行免疫或隔离, 就能有效地控制传染病的传播, 成为研究疾病传播的重要问题。

在这一问题上, 传统的免疫方法是随机免疫, 即任选一部份个体进行免疫, 但是研究发现对于具有无标度特性的真实社会网络, 这种方法效果很不理想。最近国际上先后提出了多种针对无标度网络的免疫或隔离策略, 主要有: 目标免疫方法<sup>[93]</sup>, 这种方法视网络度较大的个体为高危群体, 优先进行免疫, 该方法对于无标度网络非常有效, 但是其缺陷是需要知道社会结构的详细信息; 另一种方法是熟识者免疫策略, 即每一次选择都分两步: 先随机选择一个个体, 再随机选择该个体的一个相邻个体进行免疫, 由于在无标度网络中度大的节点比度小的节点被选中的概率大很多,

因此该策略效果比随机免疫好很多<sup>[94]</sup>,而且这种策略可以克服需要知道全局信息的缺陷,有着重要的实际意义;此外还有环状免疫、接触跟踪方法<sup>[95]</sup>,即一旦发现染病个体,就隔离或者免疫染病个体的所有的接触者,这种方法不但有着很好的控制效果,而且在实际中具有很好的可操作性。值得一提的是,最近有学者提出了分布式网络免疫技术<sup>[96]</sup>和结合目标免疫与熟识者免疫的局部目标免疫方案<sup>[97]</sup>,这两种方案的特点都是既具有非常高的效率,又具有极强的可操作性,对于实际传染病的控制研究,具有重要的参考作用。

在现实生活中,当人们获得传染病爆发的信息时,出于对传染病的恐惧,常常会自发地采取规避行为,例如减少日常接触、外出躲避、采取更严格的清洁措施等。同时医疗卫生机构一般也会在传染病流行时通过治疗、防疫、隔离、宣传预警等手段,来控制传染病的传播。由于这些因素,在流行病传播过程中,实际的社会结构往往会出现一些变化,这些变化使得实际的流行病传播过程与静态网络传播模型的预期相比存在一些差异。这种变化并不是总是有利于疾病的控制的,有时候反而会导致更快地传播,比如在 1910 年东北鼠疫传播过程中,闻讯出逃的人群导致疾病的迅速扩散。在这种自身结构受到流行病传播影响的网络中的传播过程和预警对传播的影响,是非常值得注意的问题。最近几年里这一问题也吸引了国内外部分研究者的目光,例如, Gross 等<sup>[98]</sup>研究了自适应网络上的传播过程和网络结构的协调演化。总的说来,这一方面的研究相对还较少,有待更深入地展开。

对于疫情评估和预警的数学物理模型,国内外基本上没有相关的研究报道。国内的疫情监测预警方面的研究,主要集中在对我国与发达国家在疫情监管系统体系结构与运作模式上的对比,包括从传染病学角度阐述我国监测系统所存在的不健全之处。Han 等<sup>[99]</sup>通过具有地理偏好的小世界网络,从理论上研究了对疫情报警和隔离的效率问题,发现过度反应既造成效率低下,又会影响到对传染病的控制,特别是在社会资源有限的情况下,过度反应频繁报警和过大面积的隔离,反而会使传染病流行更甚。事实上,如何对传染病的流行现状进行合理评估,是一个重大的理论问

题——在评估传染病流行严重程度时,患病人数,流行范围和病患增长速度之间的权重如何分配,尚未见任何研究报道。

### 3 基于社会通讯网络的舆情传播规律、预警和控制

舆情是指在一定的社会空间内,围绕中介性社会事件的发生、发展和变化,民众对社会管理者产生和持有的社会政治态度。这里所提到的舆情主要针对可能对社会经济产生重大危害的谣言和无谓恐慌情绪。本文在研究舆情传播的理论模型和一般规律时,考虑一般意义上的社会通讯网络;但在研究舆情监测和预警时,只考虑基于互联网的舆情,因为对于电话和短信息通讯,国内各课题组尚缺乏获取相关数据的法律资质。对网络舆情的发现,目前使用的主要是人工方法,也就是有专职人员在网络上查看、搜寻网民关注的热点,但是这种方法明显费时费力且效率低下。Web 信息挖掘的出现和逐步成熟,为解决这些问题提供了良好的技术手段。

#### 1) 舆情传播的理论模型和一般规律

网络上的舆情传播模型视其传播物的不同,可以大体分为两类。一类是具有争论性的意见在网络上的传播模型,例如国家是否应该放宽二胎政策,是否应该许可在校大学生结婚等等。这时候个体往往处在 3 种状态中的 1 种:赞同、反对或未定。这类模型的代表是 Sznajl 模型<sup>[100]</sup>。它是最近两年激烈争论的话题。另一类模型则是针对谣言的传播,一般而言,谣言都被看作类似病毒的事物,因此也常用传染病流行的模型模拟谣言的传播。下面主要介绍谣言传播的理论模型和一般规律。Sudbury<sup>[102]</sup>最早借鉴流行病 SIR 模型研究谣言的传播,其中 S(易感个体),I(染病个体),R(免疫个体)分别对应为谣言传播过程中未听说过谣言的个体,听说并且传播某谣言的个体,听说但无兴趣传播该谣言的个体。Sudbury 在随机网络上研究了该模型,发现谣言所能蛊惑的人数比例有上限。Zanette<sup>[103~104]</sup>和 Moreno 等<sup>[105]</sup>利用平均场近似分别研究了小世界网络和无标度网络上的谣言传播模型,发现在同等情况下谣言所能蛊惑的人数比例要比随机网络小。Zhou 等<sup>[106]</sup>则进一



步证明了在常见的一般网络中(包括无标度网络,有群落结构的网络和小世界网络等等),随机网络是最易传播谣言的。最近, Kesten 等<sup>[107]</sup>利用严格的概率理论,将人群视为布朗运动的多粒子系统,系统研究了谣言在移动人群中的传播过程。国内学者利用数学物理模型研究谣言传播的尚不多见。潘灶烽等<sup>[108]</sup>在经典谣言传播模型的基础上,研究了具有幂律度分布和可变聚类系数的无标度网络上的谣言传播行为,得出了聚类系数越高的网络,越能抑制谣言的传播,而聚类系数越低的网络,谣言传播将更加猖獗的有益结论;刘常昱等<sup>[109]</sup>利用类似的模型,研究了战争危机下的舆论传播,以及重要论坛、BBS 和播客等传播媒介的作用和影响。本文认为,目前广泛使用的类似 SIR 模型的谣言传播模型上,不能刻画真实群众的心理,特别是,目前通用的假设,例如对易感人群每一次谣言可能蛊惑成功的概率都是一致的,以及免疫个体听到再多谣言都无动于衷,实际上都和现实相去甚远。真实的情况应该是谣言对个体会产生一种累积的效应,是与历史有关的。这些真实的群众心理,应该在模型中有所体现。

## 2) 基于互联网的舆情信息挖掘与舆情态势分析

挖掘网页、论坛及博客上的信息(以下叙述中以网页作为例子),最基础的一点就是要将中文文本切成若干词语,用这些词语表征文本信息。中文自动切词技术国外基本没有研究(例如英文依靠空格就可以切词),国内则有 20 多年的研究历史。现在尽管在分词准确性上还有提高的空间,但可以认为国内已经拥有比较成熟的技术。网页的内容主要由网页所包含的名词所决定(按照出现的频数给予不同权重,最近也有物理学家利用统计物理的方法甄别哪些词是一个文本的关键词,有重要的启发意义<sup>[110]</sup>),文本所代表的情绪和态度研究相对较少,目前仅仅能够以一般的准确度区分文本对于某对象所持态度褒贬或中性,其他更微妙的情绪,例如忧伤、惆怅等更难区分<sup>[111]</sup>。尽管当前算法对单个文本判断精度有限,但是通过海量网页处理,有望得到较准确的结果。

将网页表达成若干加权的特征词语之后,就可以利用发展成熟的 Web 信息挖掘技术分析不同 Web 之间的关联程度,寻找具有强关联的 Web 团簇,追踪某些热点舆论的历史发展。Srivastava 等<sup>[112]</sup>对 Web 使用信息挖掘领域的研究作了综述;Cooley 等<sup>[113]</sup>着重介绍了 Web 使用信息挖掘中的数据预处理。目前国内的 Web 舆情监控系统大多侧重于从海量 Web 信息中发现热点话题为出发点来实现对 Web 舆情的识别,但是由于热点发现的速度一般比较慢,容易失去 Web 舆情识别的时效性。Zeng 等<sup>[114]</sup>提出了基于舆情信息特征库的 Web 舆情识别方法,该方法根据 Web 舆情的特征,分别从内容和行为两个方面出发实现对 Web 舆情的识别。针对大规模数据,文献[115]提出使用云计算平台来进行舆情识别。

舆情态势分析的直观方法是确定舆情后,根据相关对象在不同网页中出现的时间和频次数(是否呈愈演愈烈之势,还是渐趋缓和),以及对应情绪态度(是否评价越发极端,还是趋于理性客观)进行分析。金兼斌<sup>[116]</sup>探讨了网络舆论演变的一般过程,把网络舆论的演变分为议题出现、议题存活和舆论走向 3 个部分。张立等<sup>[117]</sup>讨论了媒介在舆情传播中扮演的作用。Sunstein<sup>[118]</sup>指出了舆情传播中的群体极化律——团体成员一开始即有某些偏向,在商议后,人们朝偏向的方向继续移动,最后形成极端的观点。文献[119]根据混沌理论提出了 Web 舆情趋势预测方法,取得了较好的效果。高辉等<sup>②</sup>在该方法的基础上,进一步研究实现了基于最优模型的 Web 舆情趋势预测方法。该方法可以比较精确地发现拐点并对事件的发展做出长期的预测,可以弥补现有预测技术无法预测出拐点的缺陷,更好地实现网络监管的功效。总的来说,这方面的研究在我国方兴未艾,由于其理论和实际的双重意义,具有远大的研究前景。

## 4 结束语

可以看出,国内外对于社会网络结构演化,以及基于社会网络的舆情和疫情传播控制有相当的

② 高 辉,王沙沙,傅 彦. Web 舆情的长期趋势预测模型[J]. 电子科技大学学报(自然科学版), 2010.



研究基础,技术手段日趋成熟,理论成果日益丰富.但同时也看到了,当前的研究还有很多不足之处,例如社会网络的演化机制对于很多网络演化现象提供不了解释,传染病流行规律中忽略了人员动态移动模式的影响,舆情传播模型太过简化,偏离实际,等等.事实上,尽管这方面的科学研究有了长足的发展,真正可以帮助政府管理决策的成果寥寥无几.产生这些缺陷的原因,是当前对于突发事件应急管理的研究还没有真正形成多学科

交叉融合的态势.物理数学研究者往往设计过于简单的模型,从而无法实际应用;计算机科学家执着于技术手段,往往落后于宏观理论研究的前沿;管理科学研究人员则缺乏对实际数据和理论模型的敏感度.范维澄<sup>[120]</sup>曾明确指出应急管理是需要多学科紧密交叉融合的复杂性科学问题,需要力争在理论上有所突破创新,并开发出具有实际价值的专利产品,为切实解决我国突发事件应急管理有所贡献.

## 参考文献:

- [1] Scott J. Social Network Analysis: A Handbook[M]. London: Sage Publications, 2000.
- [2] Desai Z, Barabási A L. Halting viruses in scale-free networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(5): 055103(1–4).
- [3] Borgatti S P, Mehra A J, Brass D J, et al. Network analysis in the social sciences[J]. Science, 2009, 323(5916): 892–895.
- [4] Barabási A L. Linked: The New Science of Networks[M]. Cambridge: Perseus, 2002.
- [5] Watts D J. Small Worlds[M]. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- [6] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 99(12): 7821–7826.
- [7] Myers D G. Social Psychology[M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2005.
- [8] Rozenfeld A F, Cohen R, Ben-Avraham D, et al. Scale-free networks on lattices[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(21): 218701(1–4).
- [9] Xu X J, Wang W X, Zhou T, et al. Geographical effects on epidemic spreading in scale-free networks[J]. International Journal of Modern Physics C, 2006, 17(12): 1815–1822.
- [10] Li X, Chen G R. A local world evolving network model[J]. Physica A, 2006, 37(12): 1815–1822.
- [11] Li C, Maini P K. An evolving network model with community structure[J]. Journal of Physical A, Mathematical and General, 2005, 38(45): 9741–9749.
- [12] Wang L N, Guo J L, Yang H X, et al. Local preferential attachment model for hierarchical networks[J]. Physica A, 2009, 388(8): 1713–1720.
- [13] Manha S S, Sen P. Modulated scale-free network in Euclidean space[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 066114(1–4).
- [14] Brockmann D, Huénel L, Geisel T. The scaling laws of human travel[J]. Nature, 2006, 439(7075): 462–465.
- [15] González M C, Hidalgo C A, Barabási A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. Nature, 2008, 453(7196): 779–782.
- [16] Xia Y, Tse C K, Tan W M, et al. Scale-free user-network approach to telephone network traffic analysis[J]. Physical Review E, 2005, 72(2): 026116(1–7).
- [17] Onnela J P, Saramäki J, Hyvönen J, et al. Structure and tie strengths in mobile communication networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(18): 7332–7336.
- [18] Ebel H, Mielsch L I, Bomholt S. Scale-free topology of e-mail networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(3): 035103(1–4).
- [19] Eckmann J P, Moses E, Sergi D. Entropy of dialogues creates coherent structures in e-mail traffic[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(40): 14333–14337.
- [20] Smith R. Instant messaging as a scale-free network[OL]. arXiv: cond-mat/0206378.
- [21] Wang F, Moreno Y, Sun Y. The structure of peer-to-peer social networks[J]. Physical Review E, 2006, 73(3): 036123(1–7).
- [22] Goh K I, Eom Y H, Jeong H, et al. Structure and evolution of online social relationships: Heterogeneity in unrestricted discussions[J]. Physical Review E, 2006, 73(6): 066123(1–8).
- [23] Zhang J, Ackerman M S, Adamic L A. Expertise networks in online communities: Structure and algorithms[C]//Proc

- 16th Intl Conf WWW. New York: ACM Press, 2007: 221–230.
- [24] Golder S, Wilkinson D, Huberman B. Rhythms of social interaction: Messaging within a massive online network[C] // Proc. 3rd Commun. Technol. Conf. Singapore: Springer, 2007: 41–66.
- [25] Dunbar R. IM. Coevolution of neocortical size, group size and language in humans: behavioral and brain[J]. *Sciences*, 1993, 16(4): 681–735.
- [26] Ahn Y. Y., Han S., Kwak H., et al. Analysis of topological characteristics of huge online social networking services[C] // Proc. 16th Intl Conf WWW. New York: ACM Press, 2007: 835–844.
- [27] Yuta K., Ono N., Fujiwara Y. A gap in the community-size distribution of a large-scale social networking site[OL]. *arXiv: physics/0701168*.
- [28] Mislove A., Marcon M., Gummadi K. P., et al. Measurement and analysis of online social networks[C] // Proc. 7th ACM Special Interest Group on Data Communication Conf. New York: ACM Press, 2007: 29–42.
- [29] Spertus E., Saham i M., Buyukkokten O. Evaluating similarity measures: A large-scale study in the orkut social network[C] // Proc. 11st ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2005: 678–684.
- [30] Csanyi G., Szendri B. Structure of a large social network[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(3): 036131(1–5).
- [31] Zakharov P. Thermodynamics approach for community discovering within the complex networks: LiveJournal study[OL]. *arXiv: physics/0602063*.
- [32] Backstrom L., Huttenlocher D., Kleinberg J., et al. Group formation in large social networks: Membership, growth, and evolution[C] // Proc. 12nd ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2006: 44–54.
- [33] Liben-Nowell D., Novak J., Kumar R., et al. Geographic routing in social networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(33): 11623–11628.
- [34] Kumar R., Novak J., Raghavan P., et al. On the bursty evolution of blogspace[C] // Proc. 12nd Intl Conf WWW. New York: ACM Press, 2003: 568–576.
- [35] Chi Y., Zhu S., Song X., et al. Structural and temporal analysis of the blogosphere through community factorization[C] // Proc. 13rd ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2007: 163–172.
- [36] Leman K. Social information processing in news aggregation[J]. *IEEE Internet Computing*, 2007, 11(6): 16–28.
- [37] Santos-Neto E., Rippeanu M., Iannitchi A. Tracking user attention in collaborative tagging communities[C] // Proc. Workshop on Contextualized Attention Metadata. New York: ACM Press, 2007.
- [38] Cattuto C., Schmitz C., Bahassari A., et al. Network properties of folksonomies[J]. *AI Commun.*, 2007, 20(4): 245–262.
- [39] Holme P., Edling C. R., Liljeros F. Structure and time evolution of an Internet dating community[J]. *Social Networks*, 2004, 26(2): 155–174.
- [40] Newman M. E. J. Assortative mixing in networks[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(20): 208701(1–4).
- [41] Hu H. B., Wang X. F. Evolution of a large online social network[J]. *Physical Letters A*, 2009, 373(12/13): 1105–1110.
- [42] Kossinets G., Watts D. J. Empirical analysis of an evolving social network[J]. *Science*, 2006, 311(5757): 88–90.
- [43] Palla G., Barabási A. L., Vicsek T. Quantifying social group evolution[J]. *Nature*, 2007, 446(7136): 664–667.
- [44] Whitfield H. J. Collaboration: Group theory[J]. *Nature*, 2008, 455(7214): 720–723.
- [45] Kumar R., Novak J., Tomkins A. Structure and evolution of online social networks[C] // Proc. 12nd ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2006: 611–617.
- [46] Leskovec J., Kleinberg J., Faloutsos C. Graph evolution: Densefication and shrinking diameters[J]. *ACM Trans. Knowl. Discovery Data*, 2007, 1(1): 1–41.
- [47] Skyrms B., Pemantle R. A dynamic model of social network formation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(16): 9340–9346.
- [48] Newman M. E. J., Watts D. J., Strogatz S. H. Random graph models of social networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(Suppl 1): 2566–2572.
- [49] Newman M. E. J., Park J. Why social networks are different from other types of networks[J]. *Physical Review E*, 2003, 68(3): 036122(1–8).
- [50] Mika P. Ontologies are us: A unified model of social networks and semantics[J]. *Journal of Web Semantics*, 2007, 5(1): 1–10.

5– 15

- [ 51] Tam W M, Lau F C M, Tse C K. Complex-network modeling of a call network[ J]. IEEE Transactions on Circuits Systems I, 2009, 56(2): 416– 429.
- [ 52] Yan G, Fu Z Q, Ren J et al. Collective synchronization induced by epidemic dynamics on complex networks with communities[ J]. Physical Review E, 2007, 75(1): 016108(1– 5).
- [ 53] Zhao H, Gao Z Y. Modular effects on epidemic dynamics in small-world networks[ J]. Europhysical Letters, 2007, 79(3): 38002(1– 3).
- [ 54] Anderson R M, May R M. Infectious Diseases of Humans[M]. Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [ 55] Grassberger P. On the critical behavior of the general epidemic process and dynamical percolation[ J]. Math. Biosci., 1983, 63(2): 157– 172.
- [ 56] Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Random graphs with arbitrary degree distribution and their applications[ J]. Physical Review E, 2001, 64(2): 026118(1– 17).
- [ 57] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks[ J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14): 3200– 3203.
- [ 58] 周 涛, 傅忠谦, 牛永伟, 等. 复杂网络上传播动力学研究综述[ J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 513– 523.  
Zhou Tao, Fu Zhongqian, Niu Yongwei et al. Survey on the transmission dynamics in complex networks[ J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(5): 513– 523. (in Chinese)
- [ 59] Moore C, Newman M E J. Epidemics and percolation in small-world networks[ J]. Physical Review E, 2000, 61(5): 5678– 5682.
- [ 60] Cliff A, Haggett P. Island epidemics[ J]. Scientific American, 1984, 250(5): 138– 147.
- [ 61] Tohamen A. A simple model of recurrent epidemics[ J]. J. Theor. Biol., 1996, 178(1): 45– 51.
- [ 62] Kupernan M, Abramson G. Small-world effect in an epidemiological model[ J]. Physical Review Letters, 2001, 86(13): 2909– 2912.
- [ 63] Xiong S J. Dynamics and asymptotical behavior of spreading processes in a closed system[ J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 066102(1– 5).
- [ 64] Verdasca T, da Gama M M T, Nunes A, et al. Recurrent epidemics in smallworld networks[ J]. J. Theor. Biol., 2005, 233(4): 553– 561.
- [ 65] Marro J, Dickman R. Nonequilibrium Phase Transitions in Lattice Models[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [ 66] Pastor-Satorras R R, Vespignani A. Epidemic dynamics and endemic states in complex networks[ J]. Physical Review E, 2001, 63(6): 066117(1– 8).
- [ 67] May R M, Lloyd A L. Infection dynamics on scale-free networks[ J]. Physical Review E, 2001, 64(6): 066112(1– 5).
- [ 68] Volchenkov D, Volchenkova L, Blanchard Ph. Epidemic spreading in a variety of scale free networks[ J]. Physical Review E, 2002, 66(4): 046137(1– 4).
- [ 69] Moreno Y, Vazquez A. Disease spreading in structured scale-free networks[ J]. European Physical Journal B, 2003, 31(2): 265– 271.
- [ 70] Barthélemy M, Barrat A, Pastor-Satorras R, et al. Velocity and hierarchical spread of epidemic outbreaks in scale-free networks[ J]. Physical Review Letters, 2004, 92(17): 178701(1– 4).
- [ 71] Barthélemy M, Barrat A A, Pastor-Satorras R, et al. Dynamical patterns of epidemic outbreaks in complex heterogeneous networks[ J]. J. Theor. Biol., 2005, 235(2): 275– 288.
- [ 72] Liu Z, Hu B. Epidemic spreading in community networks[ J]. Europhysical Letters, 2005, 72(2): 315.
- [ 73] Wu X Y, Liu Z. How community structure influences epidemic spread in social network[ J]. Physica A, 2008, 387(2/3): 623– 630.
- [ 74] Huang W, Li C. Epidemic spreading in scale-free networks with community structure[ J]. J. Stat. Mech., 2007( January): P01014.
- [ 75] Gonçalves S, Kupernan M, Gomes M F da C. Promiscuity and the evolution of sexually transmitted diseases[ J]. Physica A, 2003, 327(1– 2): 6– 11.
- [ 76] Gonçalves S, Kupernan M. The social behavior and the evolution of sexually transmitted diseases[ J]. Physica A, 2003, 328(1– 2): 225– 232.
- [ 77] Gonçalves S, Kupernan M, Gomes M F da C. A social model for the evolution of sexually transmitted diseases[ J]. Physica

- A, 2004, 342(1-2): 256-262
- [78] Eubank S, Guck H, Kumar V S A, et al. Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks[ J]. Nature, 2004, 429(6988): 180-184
- [79] Liu J Z, Wu J S, Yang Z R. The spread of infectious disease on complex networks with household-structure[ J]. Physica A, 2004, 341(2): 273-280
- [80] Zheng D F, Hui P M, Trimper S, et al. Epidemics and dimensionality in hierarchical networks[ J]. Physica A, 2005, 352(2-4): 659-668
- [81] Grabowski A, Kosiński R A. The SIS model of epidemic spreading in a hierarchical social network[ J]. Acta Physica Polonica B, 2005, 36(5): 1579-1593
- [82] Joo J, Lebowitz J L. Behavior of susceptible-infected-susceptible epidemics on heterogeneous networks with saturation[ J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 066105(1-6).
- [83] Olinky R, Stone L. Unexpected epidemic thresholds in heterogeneous networks: The role of disease transmission[ J]. Physical Review E, 2004, 70(3): 030902(1-4).
- [84] 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(1-6).
- [85] Yang R, Wang B H, Ren J, et al. Epidemic spreading on heterogeneous networks with identical infectivity[ J]. Physical Letters A, 2007, 364(3-4): 189-193
- [86] Yang R, Zhou T, Xie Y B, et al. Optimal contact process on complex networks[ J]. Physical Review E, 2008, 78(6): 066109(1-5).
- [87] Xu X J, Zhang X, Mendes J F F. Impacts of preference and geography on epidemic spreading[ J]. Physical Review E, 2007, 76(5): 056109(1-5).
- [88] Zhou J, Liu Z. Epidemic spreading in communities with mobile agents[ J]. Physica A, 2009, 388(4): 1228-1236
- [89] Yan G, Zhou T, Wang J, et al. Epidemic spread in weighted scale-free networks[ J]. Chinese Physical Letters, 2005, 22(2): 510-513
- [90] Small M, Tse C K. Clustering model for transmission of the SARS virus: Application to epidemic control and risk assessment[ J]. Physica A, 2005, 351(2-4): 499-511
- [91] Zhou Y Z, Liu Z, Zhou J. Periodic wave of epidemic spreading in community networks[ J]. Chinese Physical Letters, 2007, 24(2): 581-584
- [92] Cummings D A T, Irazary R A, Huang N E, et al. Travelling waves in the occurrence of dengue haemorrhagic fever in Thailand[ J]. Nature, 2004, 427(6972): 344-347
- [93] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Immunization of complex networks[ J]. Physical Review E, 2002, 65(3): 036104(1-4).
- [94] Cohen R, Havlin S, ben-Avraham D. Efficient immunization strategies for computer networks and populations[ J]. Physical Review Letters, 2003, 91(24): 247901(1-4).
- [95] Tipplesley M J, Savill N J, Shaw D J, et al. Optimal reactive vaccination strategies for a foot-and-mouth outbreak in the UK[ J]. Nature, 2006, 440(7080): 83-86
- [96] Golenberg J, Shavitt Y, Shir E, et al. Distributive immunization of networks against viruses using the 'honey-pot' architecture[ J]. Nature Physics, 2005, 1(3): 184-188
- [97] Gallos L K, Liljeros F, Argyrakis P, et al. Improving immunization strategies[ J]. Physical Review E, 2007, 75(4): 045104(1-5).
- [98] Gross T, D' Lima C J D, Blasius B. Epidemic dynamics on adaptive network[ J]. Physical Review Letters, 2006, 96(20): 208701(1-4)
- [99] Han X P. Disease spreading with epidemic alert on small-world networks[ J]. Physical Letters A, 2007, 365(1-2): 1-5
- [100] Sznajd-Weron K, Sznajd J. Opinion evolution in closed community[ J]. Int J Mod Phys C, 2000, 11(6): 1157-1165
- [101] 肖海林, 邓敏艺, 孔令江, 等. 元胞自动机舆论模型中人员移动对传播的影响[ J]. 系统工程学报, 2005, 20(3): 225-231

Xiao Hailin, Deng Minyi, Kong Lingjiang, et al. Influence of people's moving on the opinion communication in the cellular automaton public opinion model[ J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(3): 325-231 (in Chinese)

[102] Sudbury A J. The proportion of the population never hearing a rumour[ J]. J Appl Prob, 1985, 22(2): 443-446

[103] Zanette D H. Criticality behavior of propagation on small-world networks[ J]. Physical Review E, 2001, 64(5): 050901

- (1– 4).
- [ 104] Zanette D H. Dynamics of rumor propagation on small-world networks[ J]. *Physical Review E*, 2002, 65(4): 041908(1– 9).
- [ 105] Moreno Y, Nekovee M, Pacheco A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks[ J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 066130(1– 7).
- [ 106] Zhou J, Liu Z, Li B. Influence of network structure on rumor propagation[ J]. *Physical Letters A*, 2007, 368(6): 458– 463.
- [ 107] Kesten H, Sidonavičius V. The spreading of a rumor or infection in a moving population[ J]. *Annals of Probability*, 2005, 33(6): 2402– 2462.
- [ 108] 潘灶烽, 汪小帆, 李翔. 可变聚类系数无标度网络上的谣言传播仿真研究[ J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(8): 2346– 2348.  
Pan Zao Feng, Wang Xiaofan, Li Xiang. Variable-free network clustering coefficient of the rumors spread on the simulation[ J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8): 2346– 2348 (in Chinese).
- [ 109] 刘常昱, 胡晓峰, 司光亚, 等. 舆论涌现模型研究[ J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2007, 4(1): 24– 27.  
Liu Changyu, Hu Xiaofeng, Si Guangya, et al. Study on the consensus emergency model[ J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2007, 4(1): 24– 27 (in Chinese).
- [ 110] Carpena P, Benaïmk-Galvin P, Hackenberg M, et al. Level statistics of words: Finding keywords in literary texts and symbolic sequences[ J]. *Physical Review E*, 2009, 79(3): 035102(1– 4).
- [ 111] Yong X, Cao C G., Zhang D L. A formal representation model of emotion knowledge[ C] // *Proc. 2nd Intl. Conf. Knowl. Economy & Develop. Sci. & Technol.* Beijing, China: Tsinghua University Press, 2004: 310– 316.
- [ 112] Srivastava J, Cooley R, Deshpande M, et al. Web usage mining: Discovery and applications of usage patterns from Web data[ C] // *Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining Exploration*. New York: ACM Press, 2000: 1– 12.
- [ 113] Cooley R, Srivastava J. Data preparation for mining world wide Web browsing patterns[ J]. *Knowl. & Inform. Syst.*, 1999, 1(1): 5– 32.
- [ 114] Zeng F Y, Gao H, Fu Y. An adaptive method to identify the Web sensitive information[ C] // *Proceedings of the 2009 International Symposium on Information Science and Engineering*. Shanghai, China: IEEE Computer Society Publisher, 2009.
- [ 115] Gao H, Jiang J, She L, et al. A new agglomerative hierarchical clustering algorithm implementation based on the map reduce framework[ J]. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 2010, 4(3): 95– 100.
- [ 116] 金兼斌. 网络舆论的演变机制[ J]. *传媒*, 2008, (4): 11– 13.  
Jin Jianbin. Mechanism of network evolution of public opinion[ J]. *Media*, 2008, (4): 11– 13 (in Chinese).
- [ 117] 张立, 刘云. 网络舆论传播的无标度特性及其衰减模型的研究[ J]. *北京交通大学学报*, 2008, 32(2): 67– 70.  
Zhang Li, Liu Yun. Study on the scale-free properties and decay model of the public opinion on Internet[ J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2008, 32(2): 67– 70 (in Chinese).
- [ 118] Sunstein C R. *Why Societies Need Dissent*[ M]. Cambridge: Harvard University Press, 2003.
- [ 119] Chen X, Gao H, Fu Yan. Situation analysis and prediction of Web public sentiment[ C] // *International Symposium on Information Science and Engineering*. Shanghai, China: IEEE Computer Society Publisher, 2008.
- [ 120] 范维澄. 国家突发公共事件应急管理中科学问题的思考和建议[ J]. *中国科学基金*, 2007, 21(2): 71– 76.  
Fan Weicheng. Scientific issues and comments on the national public emergency management[ J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation*, 2007, 21(2): 71– 76 (in Chinese).

## 作者简介:

周涛(1983—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向: 信息挖掘与信息推荐、网络科学、复杂性科学, Email: zhu.tu@ustc.edu.cn

汪秉宏(1944—), 男, 江西婺源人, 博士, 教授, 研究方向: 复杂系统的统计物理及非线性动力学方法、复杂网络理论及应用、复杂适应系统人类行为的动力学与统计力学、交通流的相变与自组织临界性;

韩筱璞(1980—), 男, 山东人, 博士生, 研究方向: 人类动力学、复杂网络与复杂系统;

尚明生(1973—), 男, 重庆大足人, 博士, 教授, 研究方向为数据挖掘、复杂网络。