

## 群落网络中信息传播规律的研究\*

# Study of Information Spreading in Community Networks

刘海丽, 赵明\*\*

LIU Hai-li, ZHAO Ming

(广西师范大学物理科学与技术学院, 广西桂林 541004)

(College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:**【目的】介于具有群落结构的复杂网络上信息传播的现实意义, 本文对其传播规律进行了研究。【方法】通过随机交叉换边的方法调节群落网络的模块化强度, 计算在不同的外部边数量下传播源所在群落、任意群落和网络整体的传播特性。【结果】对网络整体而言传播范围先变大后变小, 最大值对应于集聚系数和外部边数量之间竞争的平衡点; 增加传播源的数量会使得最优传播范围对应的外部边数量增加; 就单次传播来说非传播源所在的群落的传播范围可能大于、小于、或大或小于传播源所在的群落。【结论】在群落网络中, 信息的传播情况非常复杂, 若要深入研究信息在群落网络上的传播行为, 应具体问题具体分析。

**关键词:** 复杂网络 群落 信息传播

**中图分类号:** O415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)04-0362-06

**Abstract:**【Objective】Because of the unique characters of information spreading in community networks, the spreading properties in such networks are studied in detail.【Methods】Using random exchange link method, the modularity of community networks is regulated, and the spreading range in seed community, non-seed community and the whole network is calculated.【Results】The spreading range of the whole networks is optimal at some inter-community links number: Increasing the number will decrease the clustering coefficient, which results in smaller spreading range; and decreasing the number will worsen the information spreading between different communities, which will also decrease the spreading range. Increasing the spreading seeds number will enlarge spreading range and also make the optimal spreading range correspond with more inter-community links. For one-time spreading, the spreading range in non-seed communities may be larger, smaller, or larger or smaller than in seed community.【Conclusion】In community networks, the information spreading properties are very complex, and it's necessary to study the concrete information spreading issue with concrete method.

**Key words:** complex network, community, information spreading

收稿日期: 2015-06-24

修回日期: 2015-07-30

作者简介: 刘海丽(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事复杂网络上的信息传播研究。

\* 国家自然科学基金项目(11165003)和广西高校优秀人才计划项目资助。

\*\* 通讯作者: 赵明(1977-), 女, 教授, 主要从事复杂性科学方面的研究, E-mail: zhaom17@mailbox.gxnu.edu.cn.

## 0 引言

【研究意义】自然界中存在着各种各样的群居现象, 小到微生物的群居, 大到蚂蚁、蜜蜂的群居、甚至人群的聚集居住等, 是一种广泛存在的自然现象。这些以群聚或聚集方式存在的集团被称为群落。群落

结构则是指在一个复杂的系统中,具有相同或相近性质功能的个体紧密联系形成集团,而具有不同性质或功能的集团之间联系比较弱或比较稀少。群落网络可以用来描述具有群落结构的复杂系统的连接情况:用点代表个体,个体之间的相互作用通过边来表示,这样就可以比较方便地研究群落结构对该复杂系统的作用。另一方面,信息对社会发展的作用越来越大,信息传播影响国计民生。随着科学技术的发展,信息传播的方式也不断地发生改变,由最初的口口相传<sup>[1]</sup>,到书信、报刊、电报、电话传递,再到广播、电视等媒体传播。近 20 年由于计算机和互联网技术的发展,信息可以通过网络瞬间传遍全球。因此,研究网络上的信息传播规律具有重要的现实意义。【前人研究进展】随着技术的发展,群落网络研究与信息传播研究各自有了飞速发展:作为复杂网络<sup>[2~4]</sup>的一种普遍存在形式,群落网络近年来得到了广泛的研究,科学家探讨了群落结构的刻画与寻找,分析了群落结构对动力学现象如同步的影响等问题<sup>[5]</sup>;另外,研究人员也投入大量精力到信息传播的研究上来:通过在线行为传播实验分析网络结构对信息传播范围的影响,并基于该实验建立信息传播模型;通过不同的方法试图寻找网络中影响力大的节点;分析当系统中有两条相关信息进行传播时彼此的竞争关系;等等<sup>[6~24]</sup>。【本研究切入点】在上述的研究中主要基于规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络等,但在在线社交网络中,具有共同特点的用户更容易成为朋友,这就使得用户之间的连接方式具有群落结构的特点,因此研究群落网络上的信息传播就具有了重要的实际价值,可是到目前为止关于这方面的研究才刚刚展开,并不充分<sup>[25]</sup>。【拟解决的关键问题】因此本文探讨具有群落结构的信息传播特点,比较传播源所在群落的传播规模与其它群落的传播规模,考察在不同的群落结构强度下网络整体的传播规模,以及单个和多个传播源对群落网络信息传播的影响。

## 1 群落网络模型与传播模型

### 1.1 群落网络模型

为直观了解群落网络,在图 1 中给出了群落网络的示意图,我们称连接同一群落的两个节点的边为内部边,用符号  $L_i$  表示(图 1 中的黑色边),连接不同群落的节点的边为外部边,用符号  $L_e$  表示(图 1 中的蓝色边),采用文献<sup>[25]</sup>中设计的群落网络模型做计算分析,该模型的具体生成规则如下:

(1)生成  $n$  个节点数为  $N_c$ ,平均度为  $k$  的网络作为群落;

(2)从不同群落中随机选择两条内部边,通过随机交叉换边<sup>[18]</sup>的方法将这两条内部边断开交叉重连生成两条外部边,在操作的过程中避免重复连边和自身连接;

(3)重复步骤 2 的操作,直至获得所需要的群落网络。

在此过程中,网络中每个节点的度都保持不变。最初网络是由 4 个互不连通的子网络构成,随着外部边的增加网络得以全部连通,此时网络的群落结构最明显;随着外部边数量的继续增加,网络的群落结构强度慢慢变差;当外部边的数量为  $\frac{n-1}{2}kN_c$  时,群落内外边连接均匀,群落结构消失。

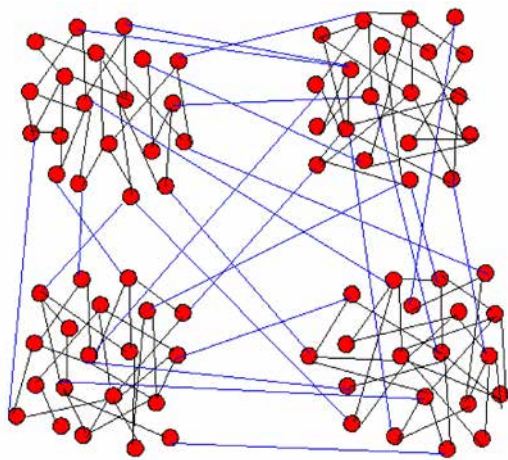


图 1 简单的群落网络示意图

Fig. 1 Sketch map of community network

### 1.2 传播模型

在传播过程中,网络中的个体分为 4 种状态:

(1)未知状态:个体对于网络中正在传播的信息处在完全不知情状态,这些状态的个体有机会接收到信息并且可能将信息传播出去;

(2)已知状态:个体知道目前网络中传播的信息,但还没有确定信息的真实性,个体不会贸然去传播信息;

(3)信任状态:个体对信息持相信态度,并且会将信息传播出去;

(4)厌倦状态:个体对传播过的信息失去兴趣,不再去传播,也不再接收该信息。

为描述传播过程,本文采用文献<sup>[10]</sup>设计的传播模型来进行研究。该模型的设计基于 Centola 博士<sup>[6]</sup>的在线行为传播实验,模型结果在定性与定量上都与实验结果相符。在人群中,对于某一条消息,有人第 1 次听到就相信并传播了,有人要听到多次才会相信,即听的次数多可以增加信息的可信度。因此该模型认为个体第 1 次听到信息就相信的几率和个体

受他人影响的程度在信息传播中具有重要的影响,模型中这两个因素通过参数初始传播概率  $\lambda_1$  和社会加强强度  $b$  体现出来。在模型中定义  $\lambda_m$  为个体第  $m$  次听到信息时信息的传播概率,具体定义如下:

$$\lambda_m = \begin{cases} \lambda_1, & b=1, m=1; \\ 1, & b=1, m \geq 2; \\ 1 - (1 - \lambda_1)(1 - b)^{m-1}, & 0 \leq b < 1, \\ & m \geq 1. \end{cases}$$

在进行计算机模拟时,首先随机选取网络中的一个个体作为信息源发出信息,其他所有个体都处在对信息未知的状态。第 2 个时步开始,如果有节点听到这条信息,接收信息的个体若相信信息则在下一时步将信息传播出去;若不相信,则仅仅是知道了该信息而不采取任何传播行为,下一时步个体处在已知状态。某一时步信息传播者的个体,由于失去兴趣在下一个时步状态变为厌倦状态,对此后网络中传播的信息不再采取任何行动。整个传播过程持续到没有个体再发生状态改变为止。

本文采用两种网络模型来进行研究,一是满足周期边界条件的规则 Hexagonal 格子网络(图 2),二是在这个网络的基础上通过随机交叉边获得的均匀随机网络,即节点度都相同的随机网络。在数值模拟中取网络规模  $N = mN_c$ ,具体地取群落数量  $m = 4$ ,群落规模  $N_c = 128$ ,因此  $N = 512$ 。 $\rho_t$  表示在时刻  $t$  整个网络中相信信息节点数占总节点数的百分比, $\rho$  表示传播稳定后整个网络相信信息节点数占总节点数的比例, $\rho_s, \rho_c$  分别表示传播源所在群落、任意选择的其它群落在传播稳定后相信信息的节点占群落节点数的比例。

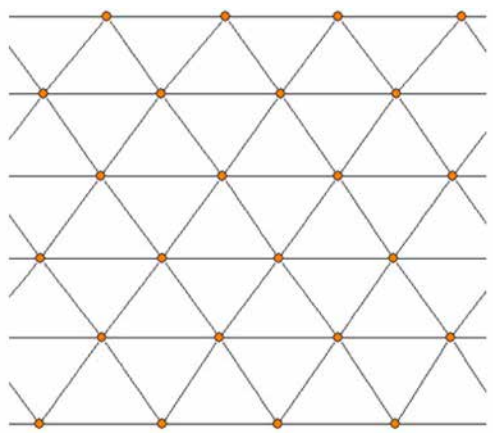


图 2 Hexagonal 格子网络示意图

Fig. 2 The neighborhood structure for the Hexagonal lattice network

## 2 不同群落及网络整体的信息传播规律

### 2.1 单个传播源对信息传播规律的影响

随机地选择某群落中一个节点作为传播源进行传播,研究保持连通的群落网络随着外部边数量的增加,各个群落和网络整体的信息传播情况,如图 3 所示,其中网络规模  $N = mN_c = 4 \times 128 = 512$ ,初始传播概率  $\lambda_1 = 0.18$ ,社会加强强度  $b = 0.4$ ,每一个点都是通过 100000 次平均获得的,以下各图参数同图 3。从图 3a 可以看出随着外部边的数量的增加,传播源所在的群落的传播范围是逐渐减小的,这是因为外部边数量的增加意味着内部边数量的减少,导致该群落中节点的集聚系数变小,而集聚系数能够显著地影响传播范围,不断减小的集聚系数使得传播范围也不断减小。而其它的群落的传播范围会先上升到最大值(与传播源所在群落的传播范围接近)然后下降,这是因为我们的结果是通过大量的演化平均获得的,当外部边非常稀疏的时候,外部边没有把信息传送给其它群落,或者即使传播了,收到该信息的节点也没有相信进而信息没有在该群落继续传播,这导致了该群落的传播范围非常小;当进一步增加外部边的数量,传播源所在的群落与其它任一群落之间有多条外部边相连,这就大大增加了信息通过外部边传播到其它群落的几率,使得信息得以在没有传播源的群落传播;当外部边的数量增加到一定程度时,比如图 3a 的 80 左右,没有传播源的群落的传播范围又缩小了,这个原因也与传播源所在的群落随着外部边的数量增加传播范围缩小的原因一致:外部边数量的增加导致群落内节点的集聚系数减小进而使得信息传播规模减小。

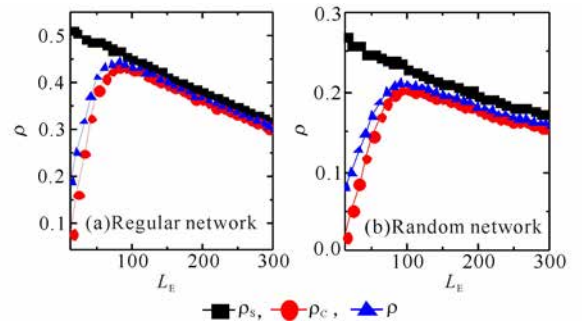


图 3 单个传播源时,传播范围  $\rho_s, \rho_c$  和  $\rho$  随外部边数量  $L_E$  的变化

Fig. 3 With one source, the changes of spreading range  $\rho_s, \rho_c$  and  $\rho$  with inter-community link number  $L_E$

从网络整体上来看,信息的传范围也是先增大后减小的,那么对于群落网络的整体来说存在一个最优的外部边数目:当外部边数量小于该数目时,单个群

落的集聚系数比较大,有利于信息传播,但由于外部边数量稀疏,信息的传播局限于传播源所在的群落,网络整体的传播范围不是很大;当外部边数量大于该数目时,外部边会促进信息在群落间的传播,但由于群落内部边的减少导致单个群落的集聚系数变小,传播的范围也会减小。总之,集聚系数和外部边数量之间存在竞争关系:外部边数量少集聚系数大利于信息在群落内的传播,但抑制信息在群落间的传播;外部边数量大集聚系数小利于信息在群落间的传播,但抑制信息在群落内的传播。在本模拟中,对应单个传播源情况下的规则网络,当外部边的数量为80时网络整体的传播处于最优的状态。

当平均度为6,外部边的数量为80时的网络整体传播范围达到最大值,之后所有群落和网络整体的传播差异变小;而外部边数量要到1152时才会消除网络结构上的异质性,表明网络整体传播范围达到最大值时,网络的群落强度还很大。可见,在群落网络中,群落外部边虽然稀疏,但是却起到关键作用,能把信息从传播源所在的群落传到其他群落,这里体现了弱连接的强作用<sup>[18]</sup>。

该变化规律与文献[25]不同:他们认为群落结构越明显,网络整体的传播范围越大。这一结论仅与本文网络整体传播范围下降段的情况符合,其可能原因是文献[25]所采用的网络模型类型不全面。

另外,如图3b所示,以均匀随机网络作为群落的群落网络传播行为与以规则网络作为群落的群落网络传播行为不存在本质上的不同,但极值位置所对应的外部边数量更多些,表明对随机网络来说外部边的作用比规则网络的作用要弱一些。

## 2.2 多个传播源对信息传播规律的影响

在初始时刻,随机地选择同一个群落中多个节点作为传播源进行传播,图4分别给出在有3个和5个传播源时,规则网络和均匀随机网络的传播情况。从图4可以看出随着传播源数量的增加,无论是对传播源所在的群落、任意的其它群落还是网络整体,传播范围都明显增加。为比较网络整体的传播速度,我们在图5中给出规则网络和均匀随机网络的传播源数量分别是1,3,5时的传播规模随时间的变化曲线,从中可以看出传播源数量越多传播速度越快,传播范围越大。

由图4可以发现:当传播源数量增加时,使得网络整体传播规模最优所需要的外部数量有所增加。为更深入研究这一现象,我们给出规则网络和均匀随机网络中网络整体传播规模在最优值附近的曲线图(图6),从图可以明显看出最优值所对应的外部边数

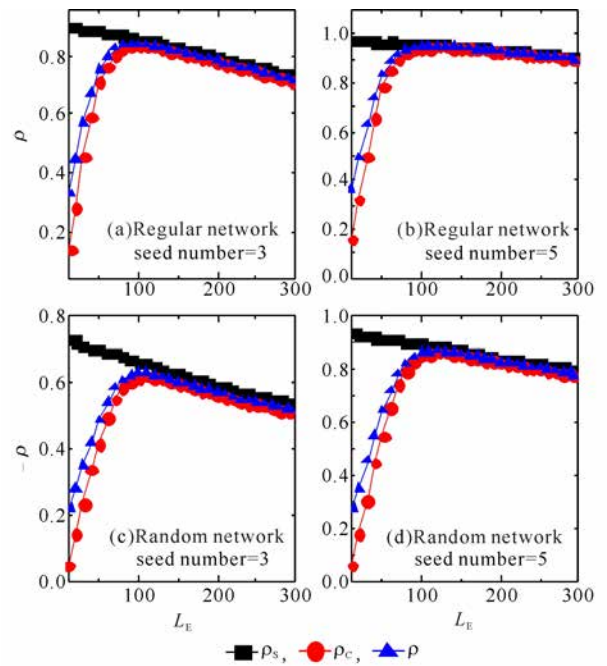


图4 传播源数量为3和5时,传播范围 $\rho_s$ 、 $\rho_c$ 和 $\rho$ 随外部边数量 $L_E$ 的变化

Fig. 4 With three and five sources, the changes of spreading range  $\rho_s$ ,  $\rho_c$  and  $\rho$  with inter-community link number  $L_E$

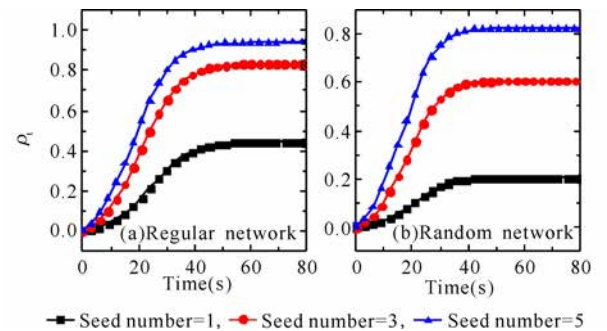


图5 传播源数量分别是1,3,5时网络整体的传播规模随时间的变化曲线

Fig. 5 Changes of spreading range of the whole network with time with seed number 1, 3 and 5

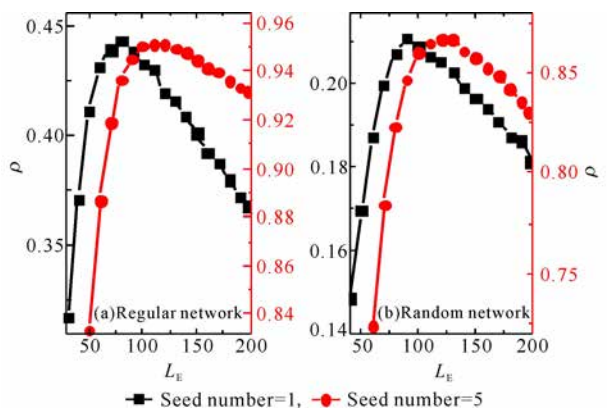


图6 不同传播源数量的情况下群落网络的整体传播范围随外部边数量的变化情况

Fig. 6 Comparing the spreading range as a function of inter-community link number between networks with 1 and 5 seeds

量随传播源数量的增加而增加。经过分析认为,产生这一现象的原因是由于传播源数量的增加导致传播源所在群落的传播范围明显增加,而网络整体传播范围最优的位置也对应着其它群落与传播源所在群落的传播范围差别消失的位置,若使其它的群落达到该传播范围(比单个传播源时的传播范围大)就需要更多的外部边,因此传播源数量的增加就导致最优传播范围所对应的外部边数量增加的现象。

### 3 不同群落的传播情况

如表 1 所示,就单次传播来说,传播源所在的群落和其它群落的传播范围有如下 3 种情况:(1)传播源所在群落的传播范围大于其它群落的情况;(2)传播源所在群落的传播范围不大而其它群落却有较大范围的传播;(3)非传播源所在群落有的传播范围大,有的传播范围小。在表中我们给出规则网络中传播源所在的群落、其它群落和网络整体的传播范围,表格中的第 1 行数据为上述第 1 种情况,表格中第 2 行数据为上述第 2 种情况,而表格中的第 3 行数据为上述第 3 种情况。这些结果表明在群落网络中,信息的传播情况非常复杂的,若要深入研究信息在群落网络上的传播行为,应具体问题具体分析。

表 1 传播源所在的群落、其它群落和网络整体的传播范围的所有可能发生的情况

Table 1 Possible spreading range in seed located community, non-seed community and the whole networks

Item	$\rho_s$	$\rho_{c_1}$	$\rho_{c_2}$	$\rho_{c_3}$	$\rho$
Case 1	126	7	85	13	231
Case 2	12	71	8	83	174
Case 3	93	8	124	20	245

### 4 结论

本文考察了群落网络中信息传播的情况,发现当外部边数量比较少时传播源所在的群落的传播范围要大于其它群落,随着外部边的数量的增加传播源所在的群落的传播范围会逐渐变小,而其它群落的传播范围会迅速增大,当两者比较靠近后就一同减小,此时网络整体的传播范围处于最优值。此外我们还发现当传播源数量增加时,无论单个群落还是网络整体的传播范围都明显增加,而使得网络整体的传播范围处于最优值时所对应的外部边在数量上有所增加,这是因为需要更多的外部边才能实现非传播源所在的群落与传播源所在的群落的传播范围的一致。另外,我们还考察了信息单次传播的情况,发现有以下 3 种情况:(1)传播源所在的群落传播范围很大,但其它群

落的传播范围都比较小;(2)传播源所在的群落传播范围比较小但其它群落传播的范围比较大;(3)与传播源所在的群落比较而言,其它的群落有的传播范围大,有的传播范围很小。

### 参考文献:

[1] Kocsis G, Kun F. Competition of information channels in the spreading of innovations[J]. *Physical Review E*, 2011, 84(2):026111.

[2] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:3-321.  
Wang X F, Li X, Chen G R. *Complex Networks Theory and Its Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2006:3-321.

[3] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. *Siam Review*, 2003, 45(2):167-256.

[4] 汪小帆,李翔,陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京:高等教育出版社,2012.  
Wang X F, Li X, Chen G R. *Network Science: An Introduction*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.

[5] Arenas A, Diaz-Guilera A, Pérez-Vicente C J. Synchronization reveals topological scales in complex networks[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(11):114102-1-114102-4.

[6] Centola D. The spread of behavior in an online social network experiment[J]. *Science*, 2010, 329(5996):1194-1197.

[7] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(11):888-893.

[8] Schwämmle V, González M C, Moreira A A, et al. Different topologies for a herding model of opinion[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(6):066108.

[9] Lv L Y, Shang M S, Zhang Y C, et al. Identifying influential nodes in complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 391(4):1777-1787.

[10] Zheng M H, Lv L Y, Zhao M. Spreading in online social networks[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(1):012818.

[11] Agliari E, Burioni R, Cassi D. Universal features of information spreading efficiency on d-dimensional lattices[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(2):021119.

[12] Wang Y B, Xiao G X, Liu J. Dynamics of competing ideas in complex social systems[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(1):013015.

[13] Huang L, Park K, Lai Y C. Information propagation on modular networks[J]. *Physical Review E*, 2006, 73(3):035103.

[14] Xie M S, Jia Z, Chen Y F, et al. Simulating the spreading of two competing public opinion information on

- complex network [J]. *Applied Mathematics*, 2012, 3 (9):1074-1078.
- [15] Svenson P, Johnston D A. Damage spreading in small world Ising models [J]. *Physical Review E*, 2002, 65 (3):036105.
- [16] Miritello G, Moro E, Lara R. Dynamical strength of social ties in information spreading [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(4):045102.
- [17] Iribarren J, Moro E. Impact of human activity patterns on the dynamics of information diffusion [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(3):038702.
- [18] Zhao J C, Wu J J, X K. Weak ties: Subtle role of information diffusion in online social networks [J]. *Physical Review E*, 2010, 82(1):016105.
- [19] Lind P G, Da Silva L R, Andrade J S, et al. Spreading gossip in social networks [J]. *Physical Review E*, 2007, 76(3):036117.
- [20] Centola D. An experimental study of homophily in the adoption of health behavior [J]. *Science*, 2011, 334 (6060):1269-1272.
- [21] Lv L Y, Chen D B, Zhou T. The small world yields the most effective information spreading [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(12):123005.
- [22] Ma X J, Wang W X, Lai Y C, et al. Information explosion on complex networks and control [J]. *The European Physical Journal B*, 2010, 76(1):179-183.
- [23] Liu C, Zhang Z K. Information spreading on dynamic social networks [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, 19(4):896-904.
- [24] Wu Z X, Holme P. Local interaction scale controls the existence of a nontrivial optimal critical mass in opinion spreading [J]. *Physical Review E*, 2010, 82(2):022102.
- [25] 杨帆, 郭平, 马龙邦, 等. 群落网络中谣言传播仿真与分析 [J]. *后勤工程学院学报*, 2012, 28(6):85-89.  
Yang F, Guo P, Ma L B, et al. Simulation and analysis on rum or prop agation within community network [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2012, 28 (6):85-89.

(责任编辑:米慧芝)