



在线社交超网络的信息全局传播模型

巩云超^{1,2,3}, 李发旭^{1,2,3}, 周丽娜^{1,2,3}, 胡 枫^{1,2,3*}

(1. 青海师范大学计算机学院 西宁 810008; 2. 青海省藏文信息处理与机器翻译重点实验室 西宁 810008;
3. 藏语智能信息处理及应用国家重点实验室 西宁 810008)

【摘要】信息爆炸时代, 在线社交网络作为信息传播的主要途径被广泛应用, 但在线社交网络中信息传播的动态过程往往难以准确预测和防控。该文引入超图中的超边描述两个或两个以上个体之间复杂的社交关系, 利用基于超网络动态演化模型构建在线社交超网络, 并结合基于反应过程策略的 SIS 模型, 对在线社交超网络中信息全局传播的动态过程进行理论分析和仿真实验。使用平均场理论得到超网络结构参数与传播率、恢复率之间的解析表达式, 并通过仿真实验分析超网络规模、传播率、恢复率、超网络结构参数以及初始传播节点对信息全局传播的影响。进一步, 对超网络和复杂网络结构下的信息全局传播过程进行了对比分析。研究结果有助于深层次理解在线社交网络中信息全局传播的传播规律及发展趋势, 并为信息侦测和舆情控制等实际应用提供科学依据。

关键词 超网络; 信息传播; 反应过程策略; SIS 模型

中图分类号 TN92; O41 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2020401

Global Dissemination of Information Based on Online Social Hypernetwork

GONG Yun-chao^{1,2,3}, LI Fa-xu^{1,2,3}, ZHOU Li-na^{1,2,3}, and HU Feng^{1,2,3*}

(1. School of Computer, Qinghai Normal University Xining 810008;
2. Tibetan Information Processing and Machine Translation Key Laboratory of Qinghai Province Xining 810008;
3. The State Key Laboratory of Tibetan Intelligent Information Processing and Application Xining 810008)

Abstract In the era of information explosion, online social network has been widely depended and applied as the main way of information transmission. However, the dynamic process of information transmission is often difficult to accurately predict and prevent in online social network. In this paper, the hyperedges in hypergraphs are introduced to describe complex social relationships between two or more individuals. Based on the hypernetwork dynamic evolution model, we construct online social hypernetwork, and combine with the susceptible infected susceptible (SIS) model based on the reaction process strategy, the theoretical analysis and simulation of the dynamic process of global information dissemination in the online social hypernetwork are carried out. The analytical expressions between structure parameters of the hypernetwork, spreading rate and recovering rate are obtained by using the mean field theory. And then we discuss the impact of parameters including the hypernetwork scale, spreading rate, recovering rate, structure parameters of the hypernetwork as well as initial spreading nodes on the global dissemination of information. Further, a comparative analysis of the process of global information dissemination under the hypernetwork and complex network structure is carried out. The results of the study are helpful for a deeper understanding of the dissemination laws and development trends of global dissemination of information in online social network, and provide scientific basis for practical applications such as information detection and public opinion control.

Key words hypernetwork; information dissemination; reaction process strategy; SIS model

随着互联网的发展与普及, 以 QQ、微信、微博、Twitter、Facebook 为代表的在线社交平台, 使数以亿计的互联网用户不再受时间、地域的限制就能够快速发布、接收和分享信息。同时, 在线社交

收稿日期: 2020-11-21; 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61663041); 青海科技计划项目(2018-ZJ-718)

作者简介: 巩云超(1995-), 女, 主要从事超网络、信息传播动力学方面的研究。

通信作者: 胡枫, Email: qhhuf@163.com

网络中信息传播的速度快和范围广的特点,给信息传播带来了前所未有的影响。因此,研究在线社交网络中信息传播的机理及规律,对网络中信息传播的预测和控制有着重要的理论依据和现实意义。

鉴于在在线社交网络中的信息传播过程类似于传染病传播过程,以传染病传播模型为基础建立的信息传播模型的研究最为广泛^[1-2],经典模型有 SIS 模型^[3]、SIR 模型^[4-5]、SIRS 模型^[6]和 SEIR 模型^[7]。在此基础上,许多信息传播模型被提出,如 H-SEIR 模型^[8]、SHIR 模型^[9]和 ESIS 模型^[10]等。与此同时,信息传播过程中的影响因素也被分析,如记忆效应与社会强化效应^[11-13]、节点属性与信息价值^[14-16]和节点影响力^[17-18]等。目前,关于信息传播的研究主要基于普通图结构构建在线社交网络,但这类网络并不能准确地描述在线社交网络中的群聚特性。例如,在微信或 QQ 中,用户可以私发信息给某个好友用户,也可群发信息到多个社交群组;在微博中,用户能同时被多个用户所关注。当用户发布或转发一条信息时,其被关注群组中的多个用户都能够转发和评论该信息。为了更精准地描述真实在线社交网络中用户之间复杂的社交关系和信息交互行为,文献 [19] 引入了超图中的超边表示多个个体之间的群聚关系,且考虑反应过程策略和接触过程策略,提出了两种策略下的 SIS 信息传播模型。文献 [20] 基于超图的超网络模型构建动态社交超网络,建立了一种基于 SIS 的信息传播模型。

迄今为止,超网络中信息传播模型的研究均在文献 [21] 提出的超网络演化模型基础上构建社交网络,该模型每次增加多个用户与网络中已存在的单个用户组成社交群组。分析现实在线社交网络,更多的情形是用户与网络中已存在的多个用户组成社交群组,即基于 BA 无标度的超网络演化模型更契合现实在线社交网络的群组特性。针对这一问题,本文在文献 [22] 提出的基于 BA 无标度网络的超网络动态演化模型基础上构建在线社交超网络,结合基于反应过程策略的 SIS 模型,对在线社交超网络中信息全局传播过程进行理论分析和仿真实验。

1 相关理论

1.1 超网络相关概念

设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 若 $e_i \neq \emptyset (i = 1, 2, \dots, m)$, 且 $\bigcup_{i=1}^m e_i = V$, 则称二元关系

$H = (V, E)$ 为超图^[23]。其中 V 称为超图的节点集合, E 称为超图的超边集合, $e_i = \{v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_j}\} (i = 1, 2, \dots, m)$ 称为超图的超边。如果节点 $v_i (i \leq n)$ 和 $v_j (j \neq i, j \leq n)$ 属于同一条超边, 则称节点 v_i 和 v_j 邻接。如果超边 $e_i (i \leq m)$ 和 $e_j (j \neq i, j \leq m)$ 的交集不为空, 则称超边 e_i 和 e_j 邻接。 $|e_i|$ 表示超边 e_i 的基数, 若 $|e_i| = k (i = 1, 2, \dots, m)$, 则 $H = (V, E)$ 是 k -一致超图, 也称为均匀超图。若 $|e_i| = 2$, 则超图 $H = (V, E)$ 退化为复杂网络中的普通图。

设 $\Omega = (V, E)$ 是有限超图, G 是从 $[0, \infty)$ 到 Ω 的映射, 则对于给定的 $t \geq 0$, $G(t) = (V(t), E(t))$ 是一个有限超图^[24]。超网络 $G(t)$ 是一个随时间 t 演化的超图集合, 其中, 节点 v_i 的超度 $d_H(i)$ 定义为该节点所在超边的数量。例如在线社交超网络中, 节点代表个体, 超边代表个体参与的社会关系, 如朋友关系、家人关系、同学关系、同事关系等, 节点的超度表示个体参与的社会关系数量。如图 1 所示超网络, 节点集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9\}$, 超边集合 $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$, 其中 $e_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, $e_2 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_6\}$, $e_3 = \{v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$, $e_4 = \{v_1, v_3, v_4, v_5, v_8\}$, $e_5 = \{v_2, v_3, v_6, v_7, v_9\}$ 。节点 v_1 和 v_2 同属于超边 e_1 , 则节点 v_1 和 v_2 邻接, 超边 e_1 和 e_4 的交集为 $\{v_1, v_3, v_4, v_5\}$, 则超边 e_1 和 e_4 邻接。 $|e_i| = 5 (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 则该超网络为 5-一致超网络。节点 v_1 和 v_4 的超度分别为 3 和 4。

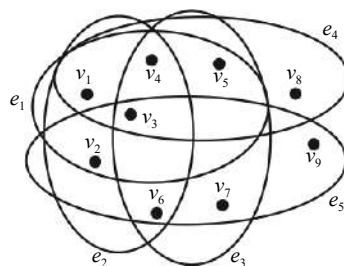


图 1 超网络示意图

1.2 RP 策略的 SIS 模型超网络相关概念

反应过程策略 (reactive process strategy, RP)^[25-26] 表现为全局传播, 即初始传播节点所在的所有超边中的节点均为初始传播节点的邻居节点, 并对所有邻居节点进行信息传播。例如, 在企业微信群中, 领导在本部门群组中发布信息, 那么该群组中所有员工都能够接受并传播该信息。基于 RP 策略的 SIS 模型描述如下:

1) 网络中的个体划分为易感者 (S 状态) 和染病者 (I 状态)。

2) 初始时, 随机选择网络中的一个或者多个节点为染病者, 其他节点均为易感者。

3) 每个时间步内, 染病者与其相邻的所有易感者接触后, 染病者依照事先设定的概率 β 将易感者感染为染病者, 该概率 β 被称为传播率。同时网络中的染病者依照事先设定的概率 γ 将染病者治愈为易感者, 该概率 γ 被称为恢复率, 治愈后的易感者仍有可能再次感染变成新的染病者。

4) 随着疾病在网络中不断传播, 染病者所占密度将会达到一个相对稳定值, 并在这个相对稳定值附近进行小幅度波动, 这意味着网络中的疾病传播达到稳定状态, 简称为稳态。

2 超网络中的信息全局传播

2.1 超网络的构造过程

在线社交超网络模型构建基于文献 [22] 提出的 BA 无标度超网络演化模型, 构造算法如下:

1) 初始化: 初始时网络中包含 m_0 个个体, 这 m_0 个个体构成一种社交群组关系, 即 m_0 个节点构成一条超边。

2) 增长: 每个时间步 t 内, 添加一个个体, 新加入的个体与超网络中的 m_1 个已存在的个体构成一种新的社交群组关系, 即新添加的节点与 m_1 个旧节点构成一条新超边。

3) 优先连接: 从已有的超网络中按照超度优先选取 m_1 个旧节点, 与新添加的节点结合生成超边。每次选取连接的节点 v_i 的概率 $\Pi d_H(i)$ 等于节点 v_i 的超度 $d_H(i)$ 与超网络中的已有节点 v_j 的超度 $d_H(j)$ 总和之比, 即:

$$\Pi d_H(i) = \frac{d_H(i)}{\sum_j d_H(j)} \quad (1)$$

式中, $d_H(i)$ 为节点 v_i 参与的超边数量, 即为节点 v_i 的超度。

超度分布 $P(k)$ [22] 指超网络中超度为 k 的节点在整个网络中所占的比例, 经过 t 个时间步后, 超网络中节点的超度分布独立于时间 t , $P(k)$ 为:

$$P(k) = \frac{(m_1 + 1)}{m_1} \left(\frac{1}{k} \right)^{\left(2 + \frac{1}{m_1} \right)} \quad (2)$$

2.2 超网络中的信息全局传播过程

根据信息在社交群组中传播的特点, 在线社交超网络中信息全局传播的动态过程可以近似地用基于 RP 策略的 SIS 模型来描述。

1) 在线社交超网络中的个体划分为不知情者 (S 状态) 和知情者 (I 状态)。其中, 不知情者为尚未获得信息或者不关心且不愿意传播信息的个体, 知情者为已获得信息并愿意继续向其他人传播信息的个体。

2) 初始时, 从超网络中随机选择一个节点为传播节点, 该节点为超网络中第一个获得信息的知情者, 处于 I 状态, 其他节点则处于 S 状态。

3) 每个时间步内, 超网络中处于 I 状态的节点向其所在超边中的所有邻接节点传播信息。其中, 处于 S 状态的节点以概率 β 接收信息后转变为 I 状态, 处于 I 状态的节点以概率 γ 恢复到 S 状态。

4) 随着信息在网络中不断传播, 处于 I 状态节点所占密度将会达到一个相对稳定值, 并在这个相对稳定值附近进行小幅度波动, 这意味着网络中的信息全局传播达到稳态。

信息全局传播过程描述如图 2 所示。其中, 黑色节点表示该个体处于 S 状态, 白色节点表示该个体处于 I 状态。 $t=0$ 时刻, 超网络中的全部节点处于 S 状态; $t=1$ 时刻, 从超网络中随机选择一个节点(编号为 v_5)处于 I 状态; $t=2$ 时刻, 由于节点 v_5 被超边 e_1 、 e_3 和 e_4 所包围, 所以其邻接节点 v_2 、 v_7 和 v_8 获得信息处于 I 状态; $t=3$ 时刻, 由于节点 v_2 、 v_5 、 v_7 和 v_8 被超边 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 和 e_5 所包围, 所以其邻接节点 v_1 、 v_3 、 v_6 和 v_9 获得信息处于 I 状态, 而节点 v_2 和 v_5 恢复为 S 状态。

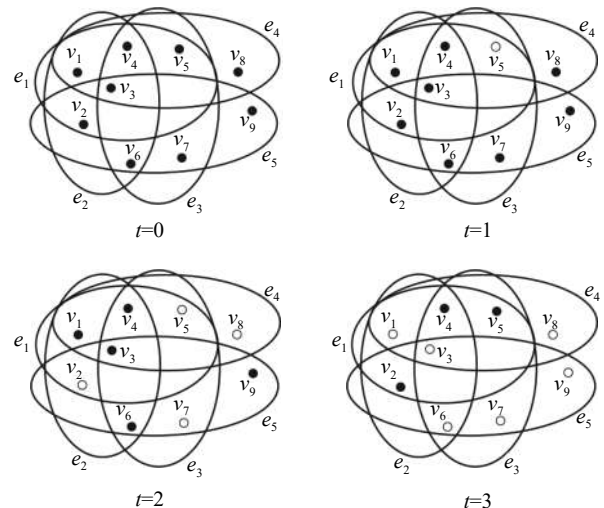


图 2 超网络结构下的信息全局传播示意图

2.3 理论分析

根据平均场理论, 超网络中的信息全局传播动力学的平均反应速率方程可记为:

$$\partial_t \rho_k(t) = -\gamma \rho_k(t) + \beta(k+m_1-1)[1-\rho_k(t)]\theta(\rho_k(t)) \quad (3)$$

式中, $\rho_k(t)$ 是 t 时刻超度为 k 的 I 状态节点的密度; 右边第一项为湮灭项, 表示超度为 k 的 I 状态节点以概率 γ 恢复为 S 状态; 第二项是产生项, 表示超度为 k 的 S 状态节点以概率 β 感染为 I 状态; $\theta(\rho_k(t))$ 表示超度为 k 的节点的邻接节点与 I 状态节点邻接的概率。由于在稳定状态下, ρ 是传播率 β 和恢复率 γ 的函数, 因此, 邻接概率 $\theta(\rho_k(t))$ 为 β 和 γ 的隐函数, 记为 $\theta(\beta, \gamma)$ 。系统达到稳定状态时, I 状态节点的总密度为 $\rho(t) = \sum_k P(k)\rho_k(t)$ 。

利用稳态条件 $\partial_t \rho_k(t) = 0$, 得到:

$$\rho_k = \frac{\beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} \quad (4)$$

式 (4) 表明邻居数越多的节点, 其被感染的概率越大, 获得信息的机会越高。

在 $\theta(\beta, \gamma)$ 的计算中, 超边中超度为 s 的节点的概率与 $sP(s)$ 成正比, 因此:

$$\theta(\beta, \gamma) = \frac{\sum_k kP(k)\rho_k}{\sum_s sP(s)} = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k kP(k)\rho_k = \frac{1}{\langle k \rangle} \int_1^\infty kP(k)\rho_k dk \quad (5)$$

式中,

$$\langle k \rangle = \int_1^\infty kP(k)dk = \int_1^\infty k \frac{(m_1+1)}{m_1} \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(2+\frac{1}{m_1}\right)} dk = m_1 + 1 \quad (6)$$

将式 (2) 和式 (4) 代入式 (5) 可得:

$$\theta(\beta, \gamma) = \frac{1}{\langle k \rangle} \int_1^\infty k \frac{(m_1+1)}{m_1} \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(2+\frac{1}{m_1}\right)} \times \frac{\beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk \quad (7)$$

解式 (7) 可得:

$$\frac{m_1}{\beta} = \int_1^\infty \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(1+\frac{1}{m_1}\right)} \frac{(k+m_1-1)}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk \quad (8)$$

由式 (8) 可得:

$$\int_1^\infty \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(1+\frac{1}{m_1}\right)} \frac{1}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk = \frac{m_1}{\beta(m_1-1)} - \frac{1}{(m_1-1)} \int_1^\infty \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(\frac{1}{m_1}\right)} \times \frac{1}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk \quad (9)$$

其中式 (9) 左项为:

$$\int_1^\infty \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(1+\frac{1}{m_1}\right)} \frac{1}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk = \frac{\frac{m_1}{\gamma + \beta(m_1-1)\theta(\beta, \gamma)}}{\frac{\beta\theta(\beta, \gamma)}{\gamma + \beta(m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} \int_1^\infty \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(\frac{1}{m_1}\right)} \times \frac{1}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk} \quad (10)$$

结合式 (9) 和式 (10), 可解得:

$$\theta(\beta, \gamma) = 1 - \frac{\gamma}{\beta(m_1-1)} \quad (11)$$

当系统到达稳态时, $\rho = \sum_k P(k)\rho_k$ 且当 $k \rightarrow \infty$ 时:

$$\rho = \int_1^\infty \frac{(m_1+1)}{m_1} \left(\frac{1}{k}\right)^{\left(2+\frac{1}{m_1}\right)} \frac{\beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)}{\gamma + \beta(k+m_1-1)\theta(\beta, \gamma)} dk \quad (12)$$

由式 (12) 可得:

$$\rho = \frac{(m_1-1)\beta\theta(\beta, \gamma) - (m_1+1)\beta\theta(\beta, \gamma)[1-\theta(\beta, \gamma)]}{\gamma + (m_1-1)\beta\theta(\beta, \gamma)} \quad (13)$$

式 (13) 表明, 信息在超网络中的全局传播到达稳态时, ρ 是一个独立于时间 t 的函数。如果已知超网络的传播率、恢复率和网络结构等参数, 就能得到超网络中 I 状态节点的密度 ρ 。

3 仿真分析

采用 2.1 节中的方法构造在线社交超网络, 在模型构造过程中每个时间步内添加的超边数也可扩展到 m 条。依据 2.1 节的构造算法, 本文对在线社交超网络中信息全局传播的动态过程进行了计算机仿真。仿真实验侧重于超网络规模 N 、传播率 β 、恢复率 γ 、新节点进入时选择旧节点数 m_1 和生成的超边数 m , 以及初始传播节点对超网络中信息全局传播的影响, 同时对超网络和复杂网络结构下的信息全局传播的动态过程进行了对比分析。为了消除随机影响, 以下每组仿真实验都是在相同初始条件下, 独立重复运行 50 次取均值的结果。

3.1 不同参数下的理论结果与稳态仿真结果

固定参数为 $N = 1000$, $m_0 = 4, 6, 8$, $m_1 = 3, 5, 7$, $m = 1$, $\gamma = 0.06$ 。图 3 为不同参数下模型的理论结果与稳态下仿真结果的对比图。仿真过程直达到稳态结束, 获得知情节点所占密度 ρ 。根据式 (13) 计算理论值, 图 3 中曲线为理论结果, 离散点为仿真结果。在不同参数下, 理论结果与仿真结果相吻

合。随着传播率 β 值逐渐增大, 信息在超网络中的全局传播到达稳态时, 知情节点所占密度越大, 波及范围越广。即使传播率很小, 信息也会传播到整个网络。

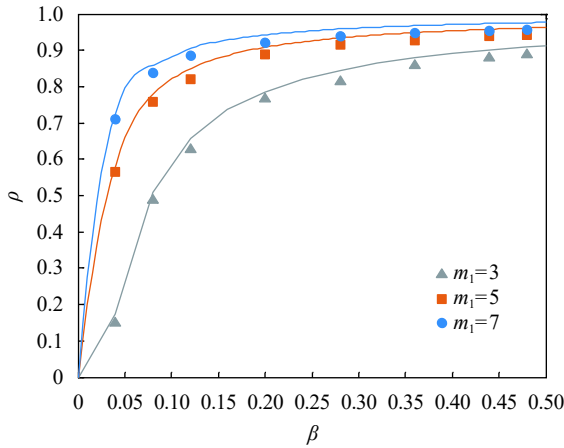


图3 理论结果与稳态下的仿真结果

3.2 超网络规模N对信息全局传播的影响

为描述信息全局传播的动态过程, 获得知情节点所占密度随时间的变化趋势。固定参数为 $m_0 = 4$, $m_1 = 3$, $m = 1$, $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.06$ 。图4为不同超网络规模下的信息全局传播曲线。超网络中节点总数分别为1000、5000和10000时, 3条曲线几乎是重叠的, 信息在超网络中的传播时间和稳态下知情节点所占密度基本一致, 表明超网络规模对信息全局传播的动态过程的影响极小。因此, 下面的仿真实验均在 $N = 1000$ 的超网络结构中进行。

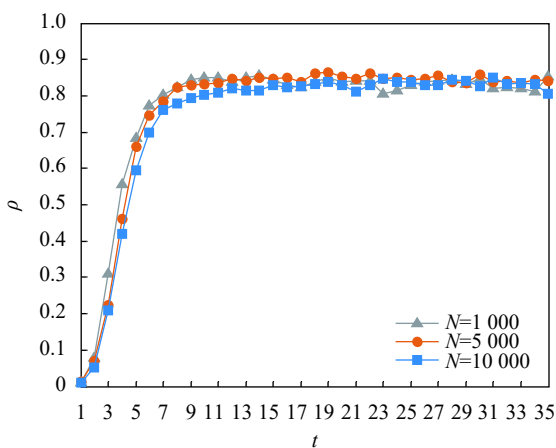


图4 不同超网络规模下的信息全局传播曲线

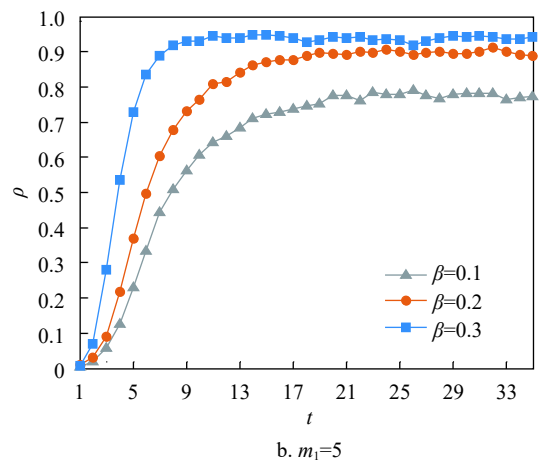
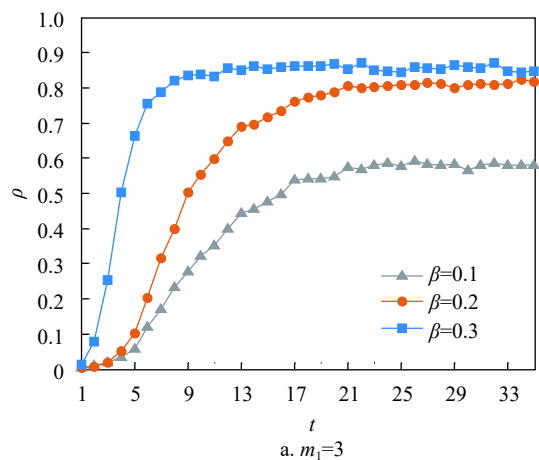
3.3 传播率 β 、恢复率 γ 对信息全局传播的影响

固定参数为 $N = 1000$, $m_0 = 4, 6, 8$, $m_1 = 3, 5, 7$, $m = 1$, 测试传播率、恢复率对信息全局传播的影响。在线社交超网络中信息全局传播的动态过程分

为前期增长阶段和后期稳定阶段。传播率代表个体的信息传播能力, 传播率 β 值越大, 信息全局传播的速度越快, 波及范围越大。恢复率代表个体对信息的抵抗能力, 恢复率 γ 值越大, 信息全局传播的速度越慢, 波及范围越小。

1) 传播率 β 的影响

图5所示传播率 $\beta = 0.1, 0.2, 0.3$, 恢复率 $\gamma = 0.06$ 时, 在线社交超网络中知情节点所占密度随时间的变化趋势。如图5所示, 对于不同的传播率, 信息在超网络中的传播行为极其相似。随着传播率 β 逐渐增大, 即个体的信息传播能力逐渐增强。前期增长阶段, 知情节点所占密度到达稳态时所需时间步逐渐减小, 即不知情节点获得信息的时间逐渐缩减, 信息传播的速度逐渐加快。到达稳态时峰值逐渐增大, 即信息的波及范围逐渐扩大。后期稳定阶段, 知情节点所占密度到达稳态, 并在峰值附近进行振幅较小的波动。随着信息在超网络中不断传播, 一部分处于I状态的个体将进入遗忘期, 恢复为S状态, 而恢复为S状态的个体可能会再次获得信息进入I状态。由此可见, 信息一旦在超网络中传播, 就会扩散到整个超网络。



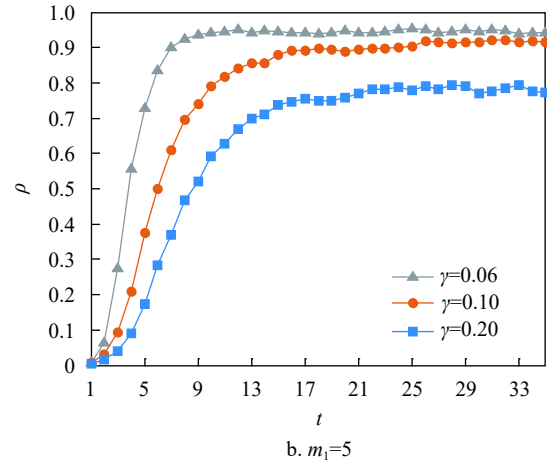
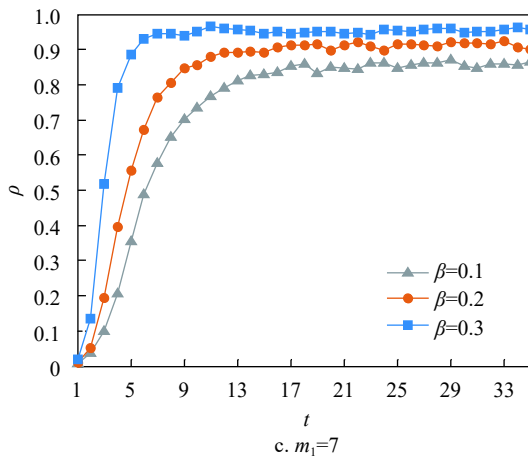


图5 不同传播率下的信息全局传播曲线

2) 恢复率 γ 的影响

图6为恢复率 $\gamma = 0.06, 0.1, 0.2$, 传播率 $\beta = 0.3$ 时, 在线社交超网络中知情节点所占密度随时间的变化趋势。如图6所示, 对于不同的恢复率, 信息在超网络中的传播行为极其相似。随着恢复率 γ 值逐渐增大, 即个体对信息的抵抗能力逐渐增强。前期增长阶段, 知情节点所占密度到达稳态时所需时间逐渐增大, 到达稳态时峰值逐渐减小。后期稳定阶段, 知情节点所占密度到达稳态, 并在峰值附近进行振幅较小的波动。由此可见, 随着恢复率 γ 值逐渐增大, 网络中知情节点所占密度逐渐下降。

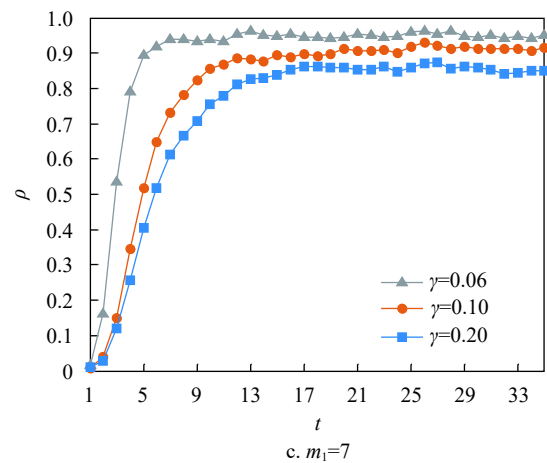
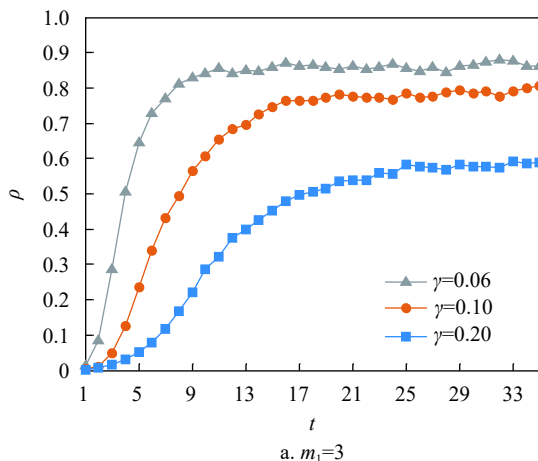


图6 不同恢复率下的信息全局传播曲线

由图5和图6在不同的 m_1 值显示的传播曲线可以看出, 相同传播率和恢复率下, 随着超边中旧节点数量 m_1 逐渐增大, 知情节点所占密度到达稳态时的时间逐渐减小, 表明信息的传播速度越来越快, 也就是说超边中所含的节点数目越多, 意味着每个时间步内可能感染的个体会越多, 即使传播率很小, 信息也能够在此短时间内迅速波及扩散到整个网络。



3.4 超网络结构参数对信息全局传播的影响

固定参数为 $N = 1000$, $m_0 = 4, 6, 8$, $m_1 = 3, 5, 7$, $\beta = 0.4$, $\gamma = 0.06$, 测试超网络结构参数 m_1 和 m 对信息全局传播的影响。 m_1 表示超网络中新节点进入时选择的旧节点数, m_1 值越大, 意味着节点所在超网络中的邻居越多。 m 表示超网络中新节点进入时生成的超边数, m 值越大, 意味着节点所参与的社交群组越多。图7为 $m = 1, 2, 3$ 时, 在线社交超网络中知情节点所占密度随时间的变化趋势。如图7所示, 对于不同的 m_1 和 m 值, 信息在超网络中的传播行为极其相似。随着 m_1 和 m 值逐渐增大, 前期增长阶段, 知情节点所占密度到达稳态时所需时间逐渐减小, 到达稳态时峰值逐渐增大。后期稳定阶段, 知情节点所占密度到达稳态, 并在峰值附近进行振幅较小的波动。由此可见, 个体在超网络中的邻居越多, 参与的社交群组越多, 都将会使个体有更多的机会获得和传播信息, 即个体获得和传播信息的速度越快, 信息的波及范围越广。

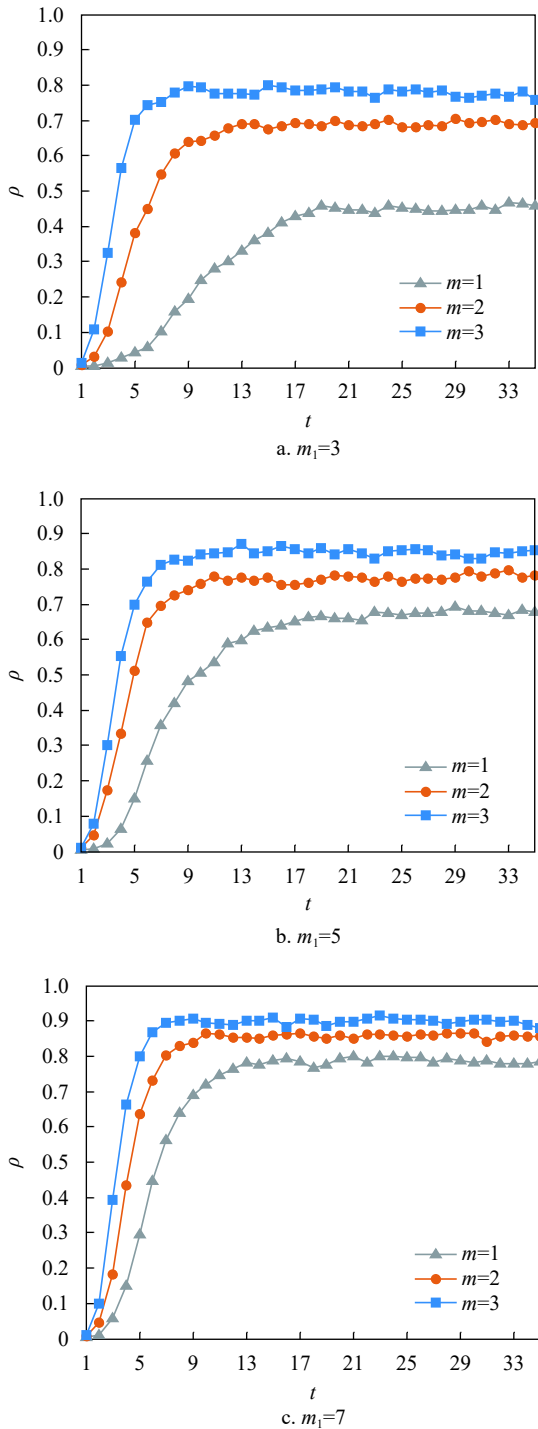


图7 不同 m 下的信息全局传播曲线

3.5 初始传播节点对信息全局传播的影响

固定参数为 $N = 1000$, $m_0 = 6$, $m_1 = 5$, $m = 1$, 分别选择超度值最大的节点 (超度最大值为 309, 节点编号为 14) 和超度值最小的节点 (超度最小值为 9, 节点编号为 195) 作为初始传播节点进行仿真实验。如图 8 所示, 初始传播节点的选择只对信息全局传播的前期增长阶段存在影响, 不影响后期稳定阶段。前期增长阶段, 参数设置为 $\beta = 0.1$,

$\gamma = 0.06$ 的情况下, 选择超度值较大的节点作为初始传播节点, 到达稳态时所需时间较少, 而选择超度值较小的节点作为初始传播节点, 到达稳态则需要一定时间; 参数设置为 $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.06$ 的情况下, 选择超度值较大的节点与选择超度值较小的节点到达稳态的时间差很小。后期稳定阶段, 两种情况分别收敛到相同的值。根据节点超度的定义可知, 超度值大的节点会出现在多条超边中, 对应于现实生活中个体具有多种社交关系, 具有较大的传播影响力。例如在线社交网络中的名人、明星和大 V 发表的信息能够在网络中迅速传播, 造成较大的社会影响。

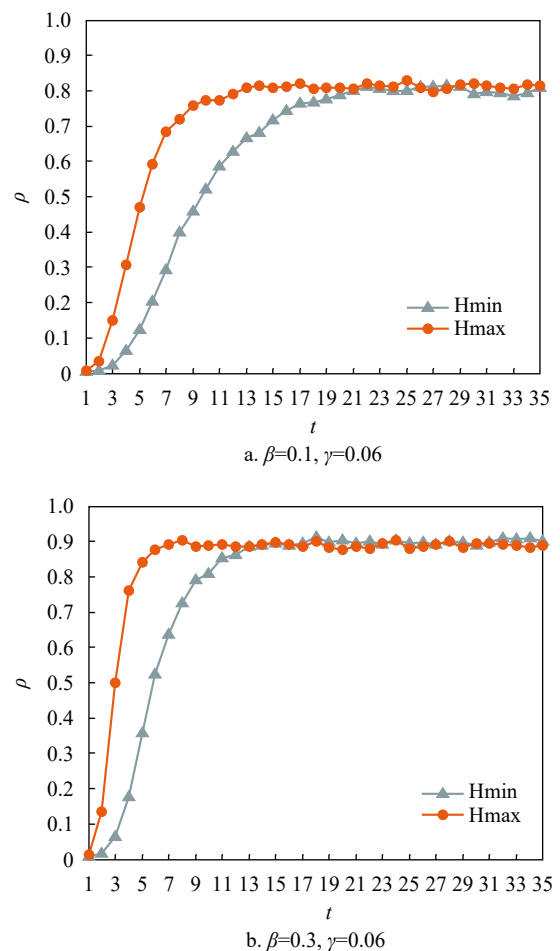


图8 不同初始传播节点下的信息全局传播曲线

3.6 超网络和复杂网络结构下信息全局传播对比

针对信息在不同网络结构下的全局传播过程, 分别生成两个规模为 1000 的网络: 复杂网络和超网络。复杂网络按照 BA 模型构造, 其中参数设置为 $m = 2$ 。超网络按照 2.1 节模型构造, 其中参数设置为 $m_0 = 6$, $m_1 = 5$, $m = 2$ 。固定参数为传播率 $\beta = 0.4$, 恢复率 $\gamma = 0.06$ 。图 9 为两个网络结构下的

信息全局传播曲线。如图9所示,复杂网络结构中的信息全局传播需要一定时间,而超网络结构中的信息能够迅速扩散到整个网络,同复杂网络结构相比较,超网络结构下的信息全局传播到达稳态时,波及范围较广,即获得信息的人数较多。事实上,复杂网络中每个个体只受其邻居节点的影响,而超网络中每个个体都会受到社交关系中其他所有邻居的影响。因此,超网络结构中的信息全局传播能够更精准地反映在线社交网络中信息传播的规律。

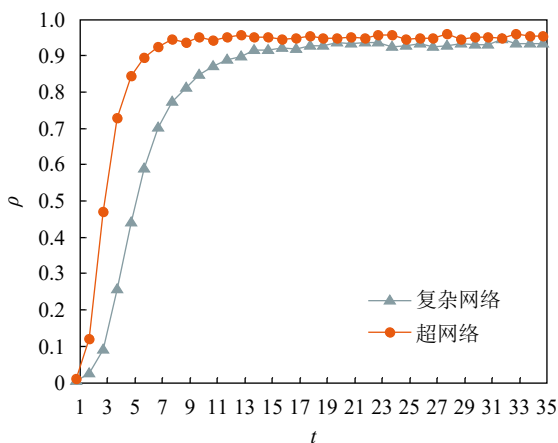


图9 不同网络结构下的信息全局传播曲线

进一步,超网络按照2.1节模型构造,其中参数设置为 $m_0 = 2$, $m_1 = 1$, $m = 2$ 。固定参数传播率 $\beta = 0.4$,恢复率 $\gamma = 0.06$ 。如图10所示,在传播率、恢复率相同的情况下,超网络和复杂网络中的信息全局传播曲线在前期增长阶段和后期稳定阶段基本吻合。仿真结果表明,当超网络结构参数设置为 $m_0 = 2$, $m_1 = 1$, $m = 2$ 时,该超网络模型就退化为BA模型。因此,BA模型上的信息全局传播可视为本文模型的特例。

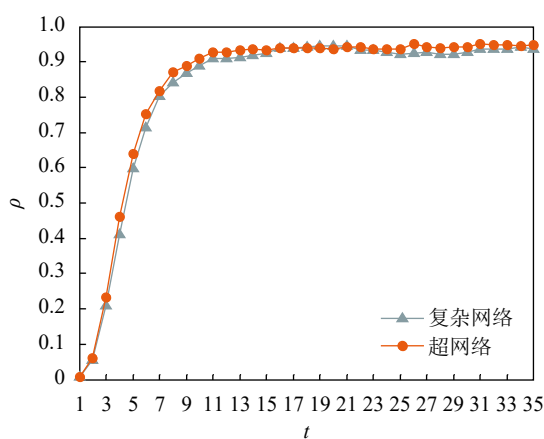


图10 退化的超网络和复杂网络结构下的信息全局传播曲线

4 结束语

本文为刻画现实在线社交网络中的信息全局传播规律,在基于BA无标度网络的超网络动态演化模型的基础上构造在线社交超网络,结合基于RP策略的SIS模型,研究了超网络结构下的信息全局传播的动态过程。仿真发现,理论分析和仿真实验完全吻合。超网络的规模对信息全局传播的影响极小,而传播率和恢复率不仅影响信息在前期增长阶段的传播,还影响信息在后期稳定阶段的传播。超网络中新节点进入时每次选择的旧节点数和每次生成的超边数越多,信息传播速度越快,波及范围越广。初始传播节点的选择只对信息在前期增长阶段的传播时间存在影响,不影响信息在后期稳定阶段的传播。同复杂网络结构相比,基于超图结构的超网络中的信息全局传播速度更快,波及范围更广。本文的研究侧重于在线社交超网络的信息传播的动态过程,而信息传播的动态过程往往受多种复杂因素的影响,如信息的时效性、个体的从众心理等等。研究复杂因素下的信息传播规律并建立验证模型,以及在真实网络数据上展开研究将是今后的研究方向。

参考文献

- [1] 张子柯. 在线社交网络信息传播机制与动力学研究综述[J]. 情报学报, 2017, 36(4): 422-431.
ZHANG Zi-ke. Mechanisms and dynamics of information spreading on online social networks: A state-of-the-art survey[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2017, 36(4): 422-431.
- [2] 徐涵, 张庆. 复杂网络上传播动力学模型研究综述[J]. 情报科学, 2020, 38(10): 159-167.
XU Han, ZHANG Qing. A review of epidemic dynamics on complex networks[J]. Information Science, 2020, 38(10): 159-167.
- [3] 曹莫言, 彭宇楠. 信息传播模型发展及其作用机理[J]. 新媒体研究, 2020, 6(9): 9-13, 24.
CAO Mo-yan, PENG Yu-nan. Development and mechanism of information transmission models[J]. New Media Research, 2020, 6(9): 9-13, 24.
- [4] 赵剑华, 万克文. 基于信息传播模型-SIR传染病模型的社交网络舆情传播动力学模型研究[J]. 情报科学, 2017, 35(12): 34-38.
ZHAO Jian-hua, WAN Ke-wen. Research on the communication dynamics model of social network public opinion based on the SIS model[J]. Information Science, 2017, 35(12): 34-38.
- [5] 张彦超, 刘云, 张海峰, 等. 基于在线社交网络的信息传播模型[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 66-72.
ZHANG Yan-chao, LIU Yun, ZHANG Hai-feng, et al. The research of information dissemination model on online

- social network[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 66-72.
- [6] 李鑫, 张军. 基于系统动力学的 SIRS 信息传播模型研究[J]. *情报科学*, 2017, 35(11): 17-22.
LI Xin, ZHANG Jun. Research on SIRS information diffusion model based on system dynamics[J]. *Information Science*, 2017, 35(11): 17-22.
- [7] 王超, 杨旭颖, 徐珂, 等. 基于 SEIR 的社交网络信息传播模型[J]. *电子学报*, 2014, 42(11): 2325-2330.
WANG Chao, YANG Xu-ying, XU Ke, et al. SEIR-based model for the information spreading over SNS[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(11): 2325-2330.
- [8] 崔金栋, 郑鹤, 孙硕. 基于改良 SEIR 模型的微博话题式信息传播研究[J]. *情报科学*, 2017, 35(12): 22-27.
CUI Jin-dong, ZHENG Que, SUN Shuo. Research on micro-blog topic information dissemination based on improved SEIR model[J]. *Information Science*, 2017, 35(12): 22-27.
- [9] LIU Y, DIAO S, ZHU Y, et al. SHIR competitive information diffusion model for online social media[J]. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016(461): 543-553.
- [10] WANG Q, LIN Z, JIN Y, et al. ESIS: Emotion-based spreader-ignorant-stifler model for information diffusion[J]. *Knowledge Based Systems*, 2015(81): 46-55.
- [11] LU L Y, CHEN D B, ZHOU T. The small world yields the most effective information spreading[J]. *New J Physics*, 2011, 13: 123005.
- [12] 陈琰宇, 贾贞, 祝光湖. 社交网络上基于信息驱动的行为传播研究[J]. *电子科技大学学报*, 2015, 44(2): 172-177, 182.
CHEN Wen-yu, JIA Zhen, ZHU Guang-hu. Information-driven behavior spread on social networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44(2): 172-177, 182.
- [13] 阚佳倩, 谢家荣, 张海峰. 社会强化效应及连边权重对网络信息传播的影响分析[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(1): 21-25.
KAN Jia-qian, XIE Jia-rong, ZHANG Hai-feng. Impacts of social reinforcement and edge weight on the spreading of information in networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(1): 21-25.
- [14] 周东浩, 韩文报, 王勇军. 基于节点和信息特征的社会网络信息传播模型[J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(1): 156-166.
ZHOU Dong-hao, HAN Wen-bao, WANG Yong-jun. A fine-grained information diffusion model based on node attributes and content features[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, 52(1): 156-166.
- [15] 黄宏程, 孙欣然, 胡敏. 基于节点态度的社交网络信息传播模型[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(1): 113-119.
HUANG Hong-cheng, SUN Xin-ran, HU Min. An information diffusion model of social network based on node attitude[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 113-119.
- [16] 张楠, 刘厚泉, 蒋乐乐. 基于节点属性和信息价值的 V-UKIR 传播模型研究及仿真[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(10): 2912-2916.
ZHANG Nan, LIU Hou-quan, JIANG Le-le. Research and simulation of V-UKIR propagation model based on node attributes and information value[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(10): 2912-2916.
- [17] 陆豪放, 张千明, 周莹, 等. 微博中的信息传播: 媒体效应与社交影响[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(2): 167-173.
LU Hao-fang, ZHANG Qian-ming, ZHOU Ying, et al. Information spreading in microblogging systems: Media effect versus social impact[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(2): 167-173.
- [18] 张永, 和凯. 基于邻居节点间相互影响和改进概率的社交网络信息传播模型[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(3): 755-759, 764.
ZHANG Yong, HE Kai. Information propagation model with improved probability based on influence of neighbors for social network[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(3): 755-759, 764.
- [19] SUO Q, GUO J L, SHEN A Z. Information spreading dynamics in hypernetworks[J]. *Physica A*, 2018, 495: 475-487.
- [20] JIANG X, WANG Z P, LIU W. Information dissemination in dynamic hypernetwork[J]. *Physica A*, 2019, 532: 121578.
- [21] WANG J W, RONG L L, DENG Q H, et al. Evolving hypernetwork model[J]. *Eur Phys J B*, 2010, 77(4): 493-498.
- [22] 胡枫, 赵海兴, 马秀娟. 一种超网络演化模型构建及特性分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(1): 16-22.
HU Feng, ZHAO Hai-xing, MA Xiu-juan. An evolving hypernetwork model and its properties[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(1): 16-22.
- [23] BERGE C. *Graphs and hypergraphs*[M]. New York: Elsevier, 1973.
- [24] 郭进利. 非均匀超网络中标度律的涌现——富者愈富导致幂律分布吗?[J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 402-407.
GUO Jin-li. Emergence of scaling in non-uniform hypernetworks——does “the rich get richer” lead to a power-law distribution?[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(20): 402-407.
- [25] GALLOS L K, ARGYRAKIS P. Absence of kinetic effects in reaction-diffusion processes in scale-free networks[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(13): 138301.
- [26] COLIZZA V, PASTORSATORRAS R, VESPIGNANI A. Reaction-diffusion processes and metapopulation models in heterogeneous networks[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(4): 276-282.