



考虑个体警觉行为的双层网络流行病传播模型

王 帅¹, 宋玉蓉^{1,2}, 宋 波³

(1. 南京邮电大学 自动化学院, 南京 210003; 2. 江苏省物联网智能机器人工程实验室, 南京 210003;

3. 南京邮电大学 现代邮政学院, 南京 210003)

摘 要: 流行病传播过程中常伴随个体意识信息的扩散, 然而目前关于流行病与意识信息关系的研究大部分未考虑意识信息在传播过程中对个体接触行为的影响。提出一种基于个体警觉状态的双层网络流行病传播模型。建立下层物理接触网络描述流行病的传播, 构建上层信息扩散网络描述流行病传播中信息扩散, 根据个体的行为偏好和警觉性设计警觉个体避免与非警觉个体接触、警觉个体避免与警觉个体接触两种接触行为策略, 并在 BA-BA、BA-WS 和 WS-WS 3 种双层网络中模拟两种行为策略对流行病传播的影响。仿真结果表明, 该模型中两种个体警觉行为策略通过调节警觉性参数均能有效降低流行病感染规模并提高流行病爆发阈值, 从而抑制流行病在人群中传播。

关键词: 双层网络; 流行病传播; 信息扩散; 警觉行为; 传播过程

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 王帅, 宋玉蓉, 宋波. 考虑个体警觉行为的双层网络流行病传播模型[J]. 计算机工程, 2021, 47(3): 131-138.

英文引用格式: WANG Shuai, SONG Yurong, SONG Bo. Epidemic spreading model considering individual alert behavior using bilayer network[J]. Computer Engineering, 2021, 47(3): 131-138.

Epidemic Spreading Model Considering Individual Alert Behavior Using Bilayer Network

WANG Shuai¹, SONG Yurong^{1,2}, SONG Bo³

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Province Engineering Lab for IoT Intelligent Robots, Nanjing 210003, China;

3. School of Modern Posts, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

[Abstract] The process of epidemic spreading process is often accompanied by the diffusion of individual awareness information. Most of current researches as on the relationship between epidemic and awareness information do not consider the impact of awareness information on individual contact behavior in spreading process. This paper proposes an epidemic spreading model using bilayer network based on individual alert state. The lower physical contact network is established to describe the spread of epidemic, and the upper information diffusion network is constructed to describe the information diffusion in the spread of epidemic. According to the individual's behavior preference and alertness, two kinds of contact behavior strategies are designed, which are avoidance of contact between alert individuals and non-alert individuals, and avoidance of contact between alert individuals. The impact of two behavior strategies on epidemic spreading is simulated in three bilayer networks, BA-BA, BA-WS and WS-WS. Simulation results show that both the individual alert behavior strategies can effectively reduce the epidemic infection scale and increase the epidemic outbreak threshold by adjusting the alertness parameters, and thus inhibit the spread of the epidemic in the population.

[Key words] bilayer network; epidemic spreading; information diffusion; alert behavior; spreading process

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0057021

0 概述

近年来, 流行病传播在复杂网络领域受到广泛关注^[1]。人类社会流行病传播过程常伴随信息传

播等其他传播过程, 流行病信息通过媒体在人群中迅速扩散, 进而改变大众对流行病的认识。人们了解到流行病相关信息后, 为避免被感染其行为也

基金项目: 国家自然科学基金(61672298)。

作者简介: 王 帅(1993—), 男, 硕士研究生, 主研方向为复杂网络病毒传播; 宋玉蓉, 教授、博士、博士生导师; 宋 波, 讲师、博士。

收稿日期: 2019-12-25 修回日期: 2020-04-02 E-mail: songyr@njupt.edu.cn

会发生相应改变,如戴口罩、避免接触以及服用药物等^[2],这些行为在一定程度上可有效抑制流行病传播^[3-5]。因此,对流行病传播与信息扩散关系的研究具有重要意义。

目前,流行病传播与信息扩散的交互模型为双层网络^[6-7],一层为模拟流行病在物理接触网络中传播过程的物理接触网络,另一层为描述流行病传播所引发信息扩散的信息网络。在物理接触网络中,通常采用易感-感染-易感(Susceptible-Infected-Susceptible, SIS)流行病传播模型或易感-感染-恢复(Susceptible-Infected-Recovered, SIR)流行病传播模型^[8-10]模拟流行病的传播。在SIS模型中,个体分为易感(S)个体和感染(I)个体,易感个体在和感染个体接触后以概率 β 变为感染个体,而感染个体则以概率 μ 自我恢复,重新成为易感个体。在SIR模型中,个体除了SIS模型中的S状态和I状态外,还存在恢复(R)状态。I状态的个体不再重新变为S状态,而是以概率 γ 恢复或死亡成为R状态。在信息网络中,通常采用未知-已知-未知(Unaware-Aware-Unaware, UAU)信息传播模型描述流行病传播引起的信息扩散。其中,个体根据对信息的了解程度分为不了解信息的无意识(U)状态和已了解信息的有意识(A)状态,其传播动力学与SIS模型相同。

现有研究通常将流行病传播与信息扩散之间的相互作用建模为多层网络中两个相互竞争的传播过程。与物理接触网络中流行病传播过程相同,意识信息从有意识个体传给其在信息网络上的无意识邻居,通过促使更多个体在信息网络中产生意识,从而使其能够采取预防行为以抑制流行病在物理接触网络中传播。文献[6]提出UAU-SIS网络传播模型以描述网络中意识和流行病之间的动态相互作用,指出存在意识传播速率临界点,当意识传播速率小于该临界点时,流行病阈值不受意识传播影响。文献[11]发现易感个体在了解信息后采取的自我意识行为对流行病传播的抑制作用明显优于感染个体的自我意识行为,其原因在于易感个体的自我意识行为能降低其被感染的可能性。文献[12]研究多层网络UAU-SIR模型后发现,随着自我感知率 ν 的增加,个体自我感知会极大降低流行病感染规模。文献[13]在UAU-SIS传播模型的基础上调整UAU信息传播过程,使个体在其具有意识的邻居比例超过给定值时会产生自我意识,并指出流行病爆发与意识扩散及接触网络的拓扑结构有关。文献[14]在接触网络的SIR传播模型基础上引入免疫状态,个体可通过接种疫苗对流行病免疫,且信息网络的同质性能促进疫苗接种规模扩大,从而有效抑制流行病传播。

以上研究均假设网络中个体具有相同特性,而现实中个体行为通常受邻居数量等异质性影响。考虑到不同个体在网络中邻居关系的异质性,文献[15]提出一种非线性耦合信息-流行病模型,指出流行病阈值由耦合网络的拓扑结构决定,其中节点的度分布的不均匀性会降低流行病阈值,控制流行病传播需增强对已了解该流行病信息个体的保护。文献[16]通过研究具有异质感染率的多重网络流行病传播过程,构建可调整指数与节点的度相关的异质感染率函数,证明负幂指数会使流行病感染率降低,即异质感染率与节点的度负相关,免疫枢纽节点有利于抑制流行病传播。虽然上述研究考虑到个体在了解流行病传播产生的信息后都会产生警觉意识,却忽视了不同个体在接触行为选择上的异质性,即不同个体在了解到流行病相关信息后会采取不同行为以避免感染流行病或者维持网络功能正常运行。例如,在流行病传播期间,一部分具有流行病信息意识的个体可能会提高自身警觉性,注意基本的健康防护或采取其他措施来保证自身健康。此外,其还可能对其他邻居产生警觉性,通过主动切断与部分邻居的接触来避免自身被感染。而另一部分个体虽然具有流行病信息的意识,但是由于其存在日常工作与社交需求,不会对周围个体产生警觉性,无法切断与部分邻居的接触。

考虑不同个体在接触行为上的异质性,文献[17]在双层网络UAU-SIS传播模型中引入个体的积极状态与非积极状态,在流行病传播过程中,积极状态的个体在信息网络和接触网络中会断开与同为积极状态个体的连接,并证明这种基于个体活跃性状态的引入可有效降低流行病传播规模。此外,积极状态与非积极状态的切换是随机发生的,其与信息和流行病的传播相互独立,由于现实中意识信息的传播会对个体行为产生影响,因此由意识信息传播引发个体行为的变化更符合现实情况。本文受文献[17]启发,考虑到流行病传播时个体接触行为存在异质性,即个体了解流行病信息后会以一定概率成为警觉个体,进而改变个体接触行为以规避被流行病所感染,提出一种基于个体警觉状态的UAU-SIS双层网络传播模型。建立物理接触网络和信息扩散网络,设计两种个体警觉性接触行为策略,并研究其在3种双层网络中对流行病传播的影响。

1 流行病传播与信息扩散交互模型

1.1 传播模型

由于社交网络中信息传播和个人行为的改变是一种复杂的社会心理过程,因此本文使用UAU-SIS双层网络建立模型并简化传播机制,如图1所示。

定义下层 SIS 网络为物理接触网络,用以描述流行病在人群中的传播;节点表示个体,连边表示人与人之间的物理接触。定义上层 UAU 网络为信息扩散网络,用以描述随流行病传播发生的信息扩散;节点表示个体,连边表示个体之间的信息交流。两层网络的对应节点为同一个体,由于相同个体在进行物理接触和信息交流时其邻居集合通常不相同,因此上下两层网络结构不同。个体在信息网络中成为已了解信息的有意识个体后会以概率 a 变成警觉性个体(警觉节点),否则为非警觉性个体(非警觉节点)。

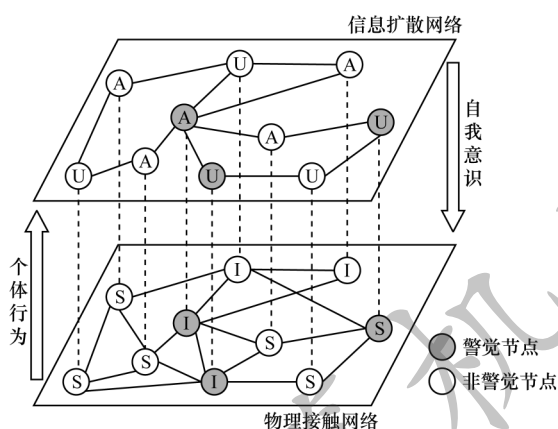


图1 UAU-SIS 双层网络传播模型

Fig.1 UAU-SIS bilayer network spreading model

在物理接触网络中用 SIS 模型模拟流行病在网络中的传播,个体在每个时刻为易感状态或感染状态。在流行病传播过程中,当感染个体与易感个体接触时,易感个体会以概率 β 被感染,同时感染个体也会以概率 μ 恢复为易感个体。在信息网络中用 UAU 模型模拟流行病传播时的信息扩散,与 SIS 模型类似,个体在每个时刻均为不了解信息的无意识状态或了解信息的有意识状态。假设信息层有意识个体来源于两个方面:1)接触网络中无意识的感染个体在信息网络中以概率 κ 转变为有意识个体,并自发地向邻居个体传播流行病相关信息;2)信息网络中了解信息的有意识个体在每个时刻会向信息层中的邻居传播流行病相关信息,在与无意识邻居接触后以概率 λ 使其变为有意识个体。同时,因为大部分流行病的传播都具有一定季节性或周期性,使得散播信息的有意识个体遗忘或者不再传播流行病相关信息,所以有意识个体会以概率 δ 重新变为无意识个体。

在流行病相关信息的传播过程中,由于不了解流行病相关信息的无意识个体不会考虑如何预防被流行病感染的问题,而了解流行病相关信息的有意识个体会采取适当的防护措施以减少被感染的风险,因此有意识的易感个体被流行病感染的概率小

于无意识个体。在本文模型中,假设有意识的易感个体被流行病感染的概率为无意识易感个体的 $\sigma_A \in [0, 1]$ 倍,若无意识的易感个体被流行病感染的概率为 β ,则有意识的易感个体被流行病感染的概率为 $\sigma_A \beta$ 。考虑个体接触行为异质性和对流行病传播的影响,本文在模型中引入基于个体警觉性的接触行为,并提出两种不同的个体接触行为策略。

1.2 个体警觉行为

本文引入个体警觉状态表示不同个体在接触行为选择上的异质性,信息层中了解流行病相关信息的有意识个体会以概率 a 变为警觉状态(V)。由于警觉性个体充分了解流行病的严重性,因此其愿意改变自身社交行为以避免感染。然而随着对流行病相关信息的遗忘,警觉性个体会停止散播信息,并以概率 b 重新恢复为非警觉状态(N)。非警觉性个体因为未认识到流行病的严重性或存在工作与社交需求,所以会与全部邻居接触。在流行病传播期间,若个体更偏向于进入警觉状态,则其通常会希望保持警觉以最大程度的避免感染风险,因此假设 $a+b=1$ 。基于上述模型,本文根据个体产生警觉性时接触行为的不同偏好,提出个体警觉行为1和个体警觉行为2两种相反的接触行为策略。

1.2.1 个体警觉行为1

具有警觉性的个体会和同样具有警觉性的邻居个体保持物理接触,同时断开与不具有警觉性邻居个体的物理接触,而不具有警觉性的个体则会和所有邻居保持接触。例如,在流行病传播期间,了解相关信息的个体比平时更加谨慎并采取戴口罩、勤洗手等防护措施,少数充分了解流行病严重性的警觉性个体为最大程度地避免被流行病感染,还会切断与不了解流行病严重性的非警觉性邻居个体之间的物理接触,仅与同样具有警觉性的邻居接触,由于这些邻居已了解流行病相关信息并采取防护措施,因此与其接触带来的感染风险更小。

1.2.2 个体警觉行为2

具有警觉性的个体会和不具有警觉性的邻居个体保持物理接触,同时断开与警觉性邻居个体的物理接触,而不具有警觉性的个体则会和所有邻居保持接触。例如,在流行病传播期间有意识的个体来源于两个方面:1)由已感染流行病的个体自发转化而来;2)在信息传播网络中接收到邻居个体散播的消息从而获得意识。因此,当一部分有意识的个体产生警觉性后,警觉性个体中会有一定比例的感染态个体,如果具有警觉性的易感个体和不具备警觉性的邻居个体进行物理接触,则被流行病感染的风险会降低。

考虑到个体警觉行为1和个体警觉行为2两种行为策略都有其合理性,本文采用这两种策略建立模型,通过参数控制不同个体选取相应警觉行为策略并分析其对流行病传播的抑制效果。

1.3 数学描述

基于上述假设,整个双层网络中的节点具有无意识易感(US)状态、无意识感染(UI)状态、有意识易感(AS)状态、有意识感染(AI)状态4种主要状态,以及包括 US_V 、 UI_V 、 AS_V 、 AI_V 4种警觉状态和 US_N 、 UI_N 、 AS_N 、 AI_N 4种非警觉状态在内的8种子状态。在4种主要状态中,US表示个体不具有流行病相关意识且未感染流行病,UI表示个体不具有流行病相关意识且已感染流行病,AS表示个体具有流行病相关意识且未感染流行病,AI表示个体既具有流行病相关意识且已感染流行病。在 t 时刻,每个节点 i 会以一个确定的概率成为以上8种子状态之一,分别表示为 $p_i^{USN}(t)$ 、 $p_i^{USV}(t)$ 、 $p_i^{ASN}(t)$ 、 $p_i^{ASV}(t)$ 、 $p_i^{UIN}(t)$ 、 $p_i^{UIV}(t)$ 、 $p_i^{AIN}(t)$ 和 $p_i^{AIV}(t)$,满足 $p_i^{USN}(t) + p_i^{USV}(t) + p_i^{ASN}(t) + p_i^{ASV}(t) + p_i^{UIN}(t) + p_i^{UIV}(t) + p_i^{AIN}(t) + p_i^{AIV}(t) \equiv 1$ 。本文以 c_{ij} 和 v_{ij} 分别表示接触层和信息层的邻接矩阵元素,定义无意识个体 i 在信息网络中不被任何邻居传播为有意识个体的概率为 r_i 。在接触网络中,定义非警觉性个体 i 在无意识时不被任何邻居感染的概率为 q_i^{UN} ,警觉性个体 i 在无意识时不被任何邻居感染的概率为 q_i^{UV} ,非警觉性个体 i 在有意识时不被任何邻居感染的概率为 q_i^{AN} ,警觉性个体 i 在有意识时不被任何邻居感染的概率为 q_i^{AV} 。假设没有传播动力学相关性^[18-19],则存在以下表达式:

$$r_i(t) = \prod_j [1 - v_{ji} \cdot p_j^A(t) \cdot \lambda] \quad (1)$$

$$q_i^{UN}(t) = \prod_j [1 - c_{ji} \cdot p_j^I(t) \cdot \beta] \quad (2)$$

$$q_i^{UV}(t) = \prod_j [1 - c_{ji} \cdot (\rho \cdot p_j^{IV}(t) + (1 - \rho) \cdot p_j^{IN}(t)) \cdot \beta] \quad (3)$$

$$q_i^{AN}(t) = \prod_j [1 - c_{ji} \cdot p_j^I(t) \cdot \sigma_A \cdot \beta] \quad (4)$$

$$q_i^{AV}(t) = \prod_j [1 - c_{ji} \cdot (\rho \cdot p_j^{IV}(t) + (1 - \rho) \cdot p_j^{IN}(t)) \cdot \sigma_A \cdot \beta] \quad (5)$$

其中, $p_j^I(t) = p_j^{UIN}(t) + p_j^{AIN}(t) + p_j^{UIV}(t) + p_j^{AIV}(t)$ 、 $p_j^{IV}(t) = p_j^{UIV}(t) + p_j^{AIV}(t)$ 且 $p_j^{IN}(t) = p_j^{UIN}(t) + p_j^{AIN}(t)$ 。采用参数 ρ 控制两种个体警觉行为的选取,当 $\rho=1$ 时采用个体警觉行为1,当 $\rho=0$ 时采用个体警觉行为2。

在传播过程中,每个时刻都被分为意识传播(UAU过程)、警觉状态的改变、流行病传播(SIS过程)以及自我意识的产生(信息上传过程)4个阶段。

结合式(1)~式(5),通过微观马尔科夫分析^[17]建立每个节点 i 分别从8种状态演化的方程为:

$$p_i^{USN}(t+1) = p_i^{USN}(t) \cdot q_i^{UN} \cdot r_i + p_i^{UIN}(t) \cdot \mu \cdot r_i + p_i^{USV}(t) \cdot q_i^{UN} \cdot b \cdot r_i + p_i^{UIV}(t) \cdot \mu \cdot b \cdot r_i + p_i^{ASN}(t) \cdot q_i^{UN} \cdot \delta + p_i^{AIN}(t) \cdot \mu \cdot \delta + p_i^{ASV}(t) \cdot q_i^{UN} \cdot b \cdot \delta + p_i^{AIV}(t) \cdot \mu \cdot b \cdot \delta \quad (6)$$

$$p_i^{UIN}(t+1) = p_i^{USN}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot r_i + p_i^{UIN}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot r_i + p_i^{ASN}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot \delta + p_i^{AIN}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot \delta + p_i^{USV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot b \cdot r_i + p_i^{UIV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot r_i + p_i^{ASV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot b \cdot \delta + p_i^{AIV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot \delta \quad (7)$$

$$p_i^{ASN}(t+1) = p_i^{USN}(t) \cdot q_i^{AN} \cdot b \cdot (1 - r_i) + p_i^{UIN}(t) \cdot \mu \cdot b \cdot (1 - r_i) + p_i^{ASN}(t) \cdot q_i^{AN} \cdot b \cdot (1 - \delta) + p_i^{AIN}(t) \cdot \mu \cdot b \cdot (1 - \delta) \quad (8)$$

$$p_i^{AIN}(t+1) = p_i^{USN}(t) [(1 - q_i^{AN}) \cdot b \cdot (1 - r_i) + b \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot r_i] + p_i^{UIN}(t) [(1 - \mu) \cdot b \cdot (1 - r_i) + b \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot r_i] + p_i^{ASN}(t) [b \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot \delta + (1 - q_i^{AN}) \cdot b \cdot (1 - \delta)] + p_i^{AIN}(t) [b \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot \delta + (1 - \mu) \cdot b \cdot (1 - \delta)] + p_i^{USV}(t) \cdot b \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot b \cdot r_i + p_i^{UIV}(t) \cdot b \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot r_i + p_i^{ASV}(t) \cdot b \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot b \cdot \delta + p_i^{AIV}(t) \cdot b \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot \delta \quad (9)$$

$$p_i^{USV}(t+1) = p_i^{USV}(t) \cdot q_i^{UV} \cdot a \cdot r_i + p_i^{UIV}(t) \cdot \mu \cdot a \cdot r_i + p_i^{ASV}(t) \cdot q_i^{UV} \cdot a \cdot \delta + p_i^{AIV}(t) \cdot \mu \cdot a \cdot \delta \quad (10)$$

$$p_i^{UIV}(t+1) = p_i^{USV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UV}) \cdot a \cdot r_i + p_i^{UIV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot a \cdot r_i + p_i^{ASV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - q_i^{UV}) \cdot a \cdot \delta + p_i^{AIV}(t) \cdot (1 - \kappa) \cdot (1 - \mu) \cdot a \cdot \delta \quad (11)$$

$$p_i^{ASV}(t+1) = p_i^{USN}(t) \cdot q_i^{AV} \cdot a \cdot (1 - r_i) + p_i^{UIN}(t) \cdot \mu \cdot a \cdot (1 - r_i) + p_i^{ASN}(t) \cdot q_i^{AV} \cdot a \cdot (1 - \delta) + p_i^{AIN}(t) \cdot \mu \cdot a \cdot (1 - \delta) + p_i^{USV}(t) \cdot q_i^{AV} \cdot (1 - r_i) + p_i^{UIV}(t) \cdot \mu \cdot (1 - r_i) + p_i^{ASV}(t) \cdot q_i^{AV} \cdot (1 - \delta) + p_i^{AIV}(t) \cdot \mu \cdot (1 - \delta) \quad (12)$$

$$p_i^{AIV}(t+1) = p_i^{USN}(t) [(1 - q_i^{AV}) \cdot a \cdot (1 - r_i) + a \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot r_i] + p_i^{UIN}(t) [(1 - \mu) \cdot a \cdot (1 - r_i) + a \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot r_i] + p_i^{ASN}(t) [a \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot \delta + (1 - q_i^{AV}) \cdot a \cdot (1 - \delta)] + p_i^{AIN}(t) [a \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot \delta + (1 - \mu) \cdot a \cdot (1 - \delta)] + p_i^{USV}(t) [(1 - q_i^{UV}) \cdot (1 - r_i) + a \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UV}) \cdot b \cdot r_i + \kappa \cdot (1 - q_i^{UV}) \cdot a \cdot r_i] + p_i^{UIV}(t) [(1 - \mu) \cdot (1 - r_i) + a \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot r_i + \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot a \cdot r_i] + p_i^{ASV}(t) [\kappa \cdot (1 - q_i^{UV}) \cdot a \cdot \delta + a \cdot \kappa \cdot (1 - q_i^{UN}) \cdot b \cdot \delta + (1 - q_i^{AV}) \cdot (1 - \delta)] + p_i^{AIV}(t) [a \cdot \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot b \cdot \delta + \kappa \cdot (1 - \mu) \cdot a \cdot \delta + (1 - \mu) \cdot (1 - \delta)] \quad (13)$$

2 仿真与结果分析

本文提出个体在产生警觉性后的两种个体接触行为策略:处于警觉状态的个体倾向于与同样处于警觉状态的邻居个体保持物理接触并和处于非警觉状态的邻居个体断开物理接触;处于警觉状态的个体倾向于与非警觉状态的邻居个体保持物理接触并和处于警觉状态的邻居个体断开物理接触。由于处于非警觉状态的个体不具有警觉性,因此其会和所有邻居个体保持接触。以下针对不同的多层网络类型进行仿真实验,对比分析两种个体警觉行为对流行病传播的影响。其中,流行病传播以及信息扩散参数设置为 $\beta=0.2$ 、 $\mu=0.4$ 、 $\lambda=0.3$ 、 $\delta=0.6$ 、 $\alpha=0.4$ 以及 $\sigma_s=0.5$ 。每个仿真实验均进行200次蒙特卡洛循环^[7-9]。

由于现实网络结构具有小世界特性^[20]和无标度特性^[21],因此本文实验选取具有这两种特性的小世界网络(WS)和无标度网络(BA)分别表示物理接触层和信息传播层。小世界网络又称均匀网络或指数网络,其网络连接度分布可近似用Poisson分布表示,该网络具有明显的聚类特性和较短的平均路径长度;无标度网络的连接度分布函数具有幂律形式,其无明显特征长度且具有增长特性和优先连接特性2个重要特性。本文从物理接触层为无标度网络且信息传播层为无标度网络的BA-BA双层网络、物理接触层为无标度网络且信息传播层为小世界网络的BA-WS双层网络、物理接触层为小世界网络且信息传播层为小世界网络的WS-WS双层网络,分别研究考虑个体警觉行为的双层网络流行病传播与信息扩散交互模型。由于物理接触网络结构较符合BA网络模型的增长特性与优先连接特性,而信息传播网络结构可能具有无标度特性,也可能随着时间的演化变得相对均匀,即具有小世界特性,因此在上下两层网络不同的情况下,本文暂未考虑物理接触层为小世界网络且信息传播层为无标度网络的WS-BA双层网络。

本文实验中BA网络的节点数为2 000,每个节点在加入网络时与3个节点建立连接,WS网络的节点数为2 000,平均度 $\langle k \rangle=4$,网络在生成过程中边的重连概率 $p=0.3$ 。在信息传播层,现实社会中相同个体在接触关系网络和在线社交关系网络中虽然无相同结构,但也不会产生差异化较大的人际关系。例如,在接触关系网络中拥有较多好友的个体,其在信息传播层中也同样可能拥有较多好友,即使在这两层网络中拥有的好友并不完全相同。因此,为保证这种相关性,在BA-BA双层网络和WS-WS双层网络中,上层信息传播网络以下层接触网络为基础随机增加400条边^[7-9],在BA-WS双层网络中,对上层信息传播WS网络也进行随机加边处理。

当采取个体警觉行为1时,BA-BA、BA-WS和WS-WS 3种双层网络中流行病传播规模 $i(t)$ 在不同个体警觉性概率 a 下随模拟的步骤序数 t 的变化如图2所示。可以看出,随着个体警觉性概率 a 的增大,网络中流行病传播规模也增大,即个体警觉行为1对于流行病抑制作用减弱。从易感个体角度考虑,具有警觉性的易感个体需受到保护,当其产生警觉性后可通过调整接触行为策略减小被感染的概率。例如,通过切断与部分非警觉性感染邻居个体的接触,在一定程度上可降低易感个体被感染的风险。

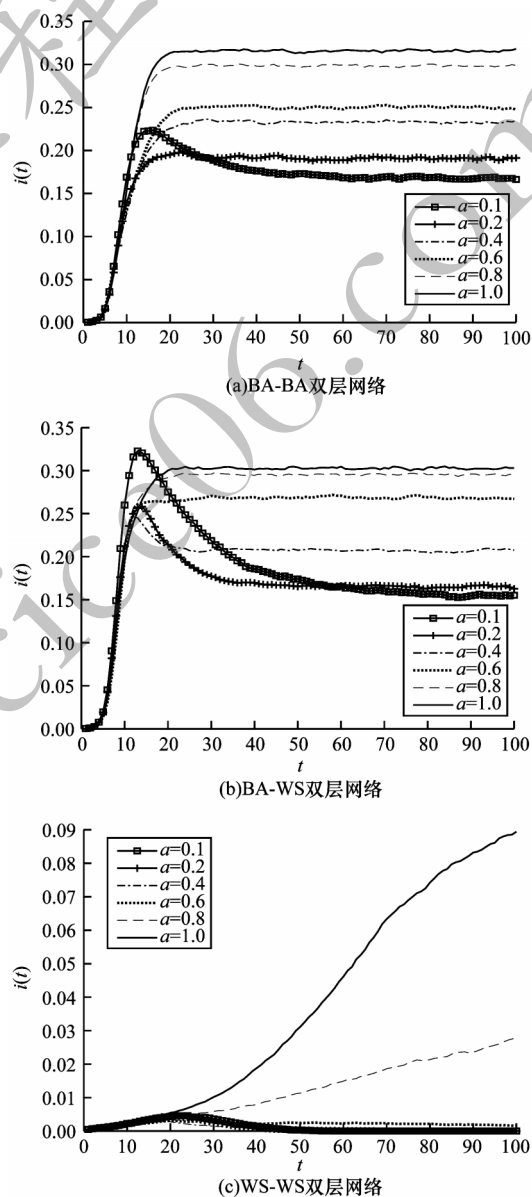


图2 3种双层网络采取个体警觉行为1时流行病传播规模随步骤序数的变化

Fig.2 The change of epidemic spreading scales with ordinal number of steps when three bilayer networks adopt individual alert behavior 1

当 a 较小时,网络中只有少数有意识个体处于警觉状态,其中具有警觉性的易感个体会切断与其他非警觉性感染态邻居的接触以降低自身感染概率。由于一部分个体意识来自信息扩散,由与有意识的邻居通信所获得,另一部分个体意识由个体自身感染流行病而自发产生,因此有意识的个体中患病个体的比例会比无意识个体中患病个体的比例更高。当 a 偏小时,由于不具备警觉性的易感个体比例高,采取个体警觉行为1可在一定程度上实现对具有警觉性个体的隔离,因此可保护不具备警觉性的易感个体。随着 a 的增大,非警觉性概率 b 减小,即网络中个体由警觉性恢复为非警觉性的概率降低,最终网络中警觉性个体比例增大,警觉个体之间形成的子网络扩大,在其子网内部各个体都会与其全部邻居进行物理接触,造成个体警觉行为1的效果减弱。当 $a=1$ 时,网络中所有具有意识的个体永久转变为警觉性个体,此时警觉性个体形成的子网络扩展到几乎整个网络,因此个体警觉行为1基本不起作用。特别地,当 a 较小时,在流行病传播初期会出现一个较高峰值(见图2中 $a=0.1$ 时的曲线峰值),这是由于网络中最初警觉性个体比例很小,随着流行病在网络中不断传播,警觉性个体比例随有意识个体数量的增加而提高,此时个体警觉行为1逐渐产生作用,使流行病感染规模逐渐下降,且随着时间延长传播规模逐渐稳定。

当采取个体警觉行为2时,BA-BA、BA-WS和WS-WS 3种双层网络中流行病传播规模在不同个体警觉性概率 a 下随模拟的步骤序数的变化如图3所示。可以看出,随着个体警觉性概率 a 增大,网络中流行病传播规模减小,即个体警觉行为2对流行病抑制作用增强。从易感个体角度考虑,警觉性易感个体会选择与非警觉性邻居个体接触,因为个体中的部分个体产生意识是因为其在物理接触网络中感染流行病,所以与无意识个体相比,有意识个体感染比例略高。警觉性个体由有意识个体根据概率转化而来,通过避免与同样具有警觉性的个体物理接触,在一定程度上可降低个体被感染的风险。当 a 较小时,网络中只有少数有意识个体处于警觉状态,其中警觉性易感个体会保持与非警觉性邻居个体(包括大部分感染个体)的物理接触,此时个体警觉行为2对于流行病传播的影响不显著。随着 a 的增大,有意识个体产生警觉性的概率增大,由于有意识个体中感染个体的比例较高,因此警觉性易感个体通过改变接触行为,切断与其他警觉性感染邻居个体的物理接触可有效降低感染风险。当 $a=1$ 时,网络中很多个体随着信息扩散永久成为警觉性个体,而警觉性个体不会主动与警觉性邻居个体接触,因此,当网络中警觉性个体比例很高时,网络中大部分连边均被切断,警觉个体之间相互孤立,此时网络基本不连通,流行病无法有效传播,随着已有感染个体逐渐康复,流行病最终在网络中消失。

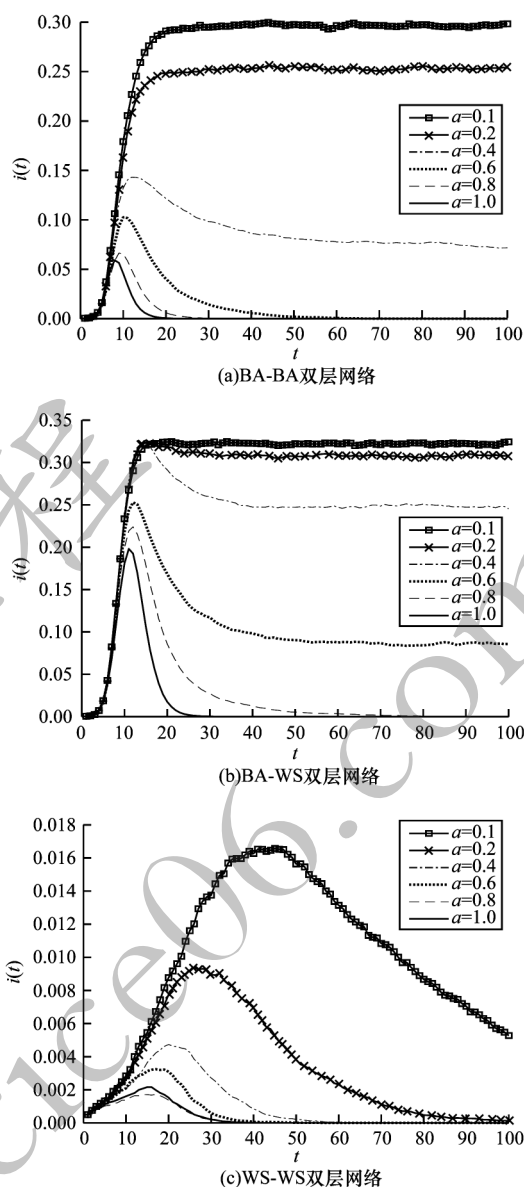


图3 3种双层网络采取个体警觉行为2时流行病传播规模随步骤序数的变化

Fig.3 The change of epidemic spreading scales with ordinal number of steps when three bilayer networks adopt individual alert behavior 2

特别地,与个体警觉行为1时情况类似,当采取个体警觉行为2时,若 a 较大则在流行病传播初期会出现一个较高峰值(见图3中 $a=1.0$ 时的曲线峰值),此时网络中处于感染态的有意识个体比例偏高,在流行病传播初期这些个体在产生警觉性后通过与大量非警觉性个体接触传播流行病,而这些非警觉性个体并无流行病相关意识且防护能力较弱,随着流行病在网络中不断传播,警觉性个体比例随着有意识个体数量的增加而提高,流行病的传播规模逐渐稳定。

因为BA网络具有无标度特性,所以在网络中存在少数度较大的个体,当其被流行病感染时会通过

与大量邻居个体接触而加快流行病在网络中的传播,体现出BA网络的脆弱性。WS网络由于节点的度分布较均匀,其流行病传播速度比同等规模的BA网络更慢。因此,当采用WS-WS网络时,个体警觉行为对流行病的抑制作用比采用BA-BA网络更明显。当采用BA-WS网络时,由于仅信息传播层为WS网络,信息意识传播速度较同等规模的BA网络更慢,使得上层信息传播网络中具有信息意识的个

体比例较少,造成具有警觉性意识的个体比例也较少,因此,当采取个体警觉行为1时,若 a 较小,则BA-WS网络在传播初期的峰值较BA-BA双层网络更高(见图2(a)和图2(b));当采取个体警觉行为2时,若 a 较大,则BA-WS网络在传播初期的峰值较BA-BA双层网络更高(见图3(a)和图3(b))。

图4~图6分别为BA-BA、BA-WS和WS-WS 3种双层网络中不同个体警觉行为对传播阈值的影响。

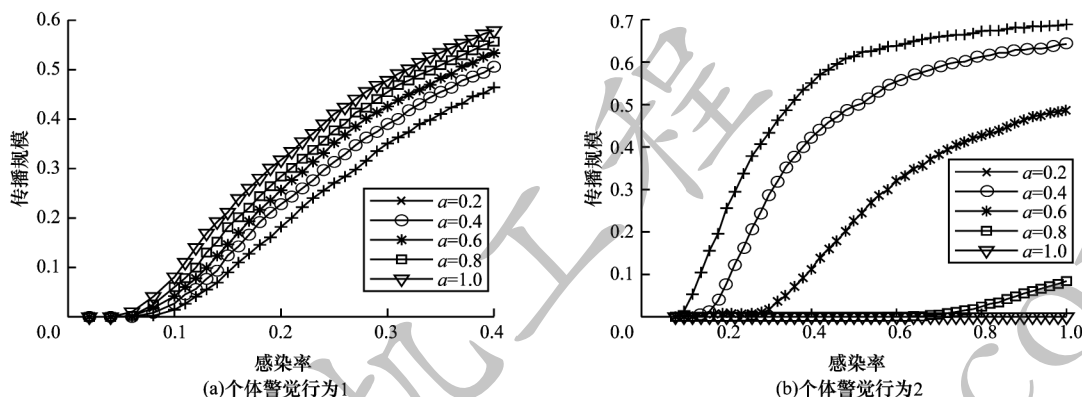


图4 BA-BA网络采用不同个体警觉行为对流行病阈值的影响

Fig.4 The influences of BA-BA network with different individual alert behaviors on epidemic threshold

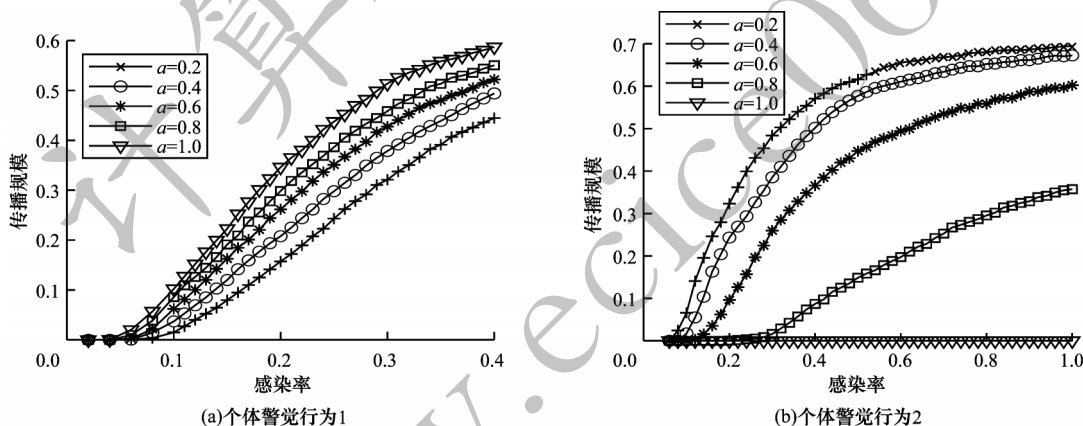


图5 BA-WS网络采用不同个体警觉行为对流行病阈值的影响

Fig.5 The influences of BA-WS network with different individual alert behaviors on epidemic threshold

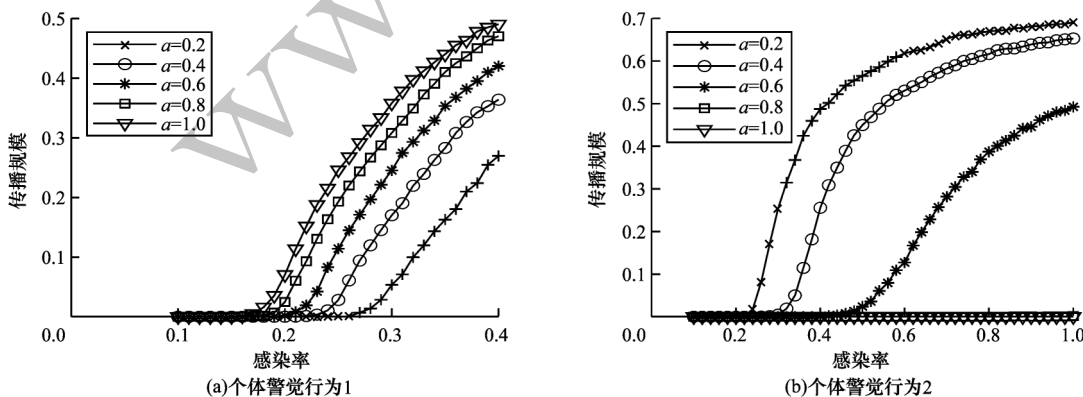


图6 WS-WS网络采用不同个体警觉行为对流行病阈值的影响

Fig.6 The influences of WS-WS network with different individual alert behaviors on epidemic threshold

可以看出:在3种双层网络中,当采取个体警觉行为1时,随着有意识个体警觉性概率 a 的增大,流行病爆发阈值会降低;当采取个体警觉行为2时,随着有意识个体警觉性概率 a 的减小,流行病爆发阈值会降低。本文提出的两种基于个体警觉行为的接触策略均可通过提高流行病爆发阈值有效抑制流行病爆发。由于BA为非均匀网络,其传播阈值远小于WS网络^[22],因此当物理接触层为BA网络时,其流行病传播阈值较物理接触层为WS网络更小。由图4~图6还可以看出:当采取个体警觉行为1时,若 a 减小则流行病传播规模减小,流行病传播阈值升高,而随着 a 增大,个体警觉行为1对流行病传播规模的影响减小,流行病阈值降低;当采取个体行为2时,若 a 增大则流行病传播规模减小,流行病传播阈值升高,而随着 a 减小,个体警觉行为2对流行病传播规模的影响减小,流行病阈值降低。由上述分析可知,基于个体警觉行为的接触策略能有效抑制流行病传播。

3 结束语

考虑到流行病传播时个体警觉性对其接触行为的影响,本文提出一种基于个体警觉行为的双层网络传播模型。分别建立下层物理接触网络和上层信息扩散网络,设计警觉个体避免与非警觉个体接触以及警觉个体避免与警觉个体接触两种接触行为策略,并在3种双层网络模型中研究上述行为策略对流行病传播的影响。仿真结果表明,该模型中两种基于个体警觉状态的接触行为策略能有效降低流行病传播规模,提高流行病爆发阈值。后续将研究自适应双层网络模型,通过引入节点自适应断边重连策略,进一步探索信息扩散对流行病传播的抑制作用。

参考文献

- [1] PASTOR-SATORRAS R, CASTELLANO C, VAN M P, et al. Epidemic processes in complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(3): 925-979.
- [2] RUAN Zhongyuan, TANG Ming, LIU Zonghua. Epidemic spreading with information-driven vaccination[J]. *Physical Review E*, 2012, 86(3): 117-125.
- [3] FUNK S, GILAD E, WATKINS C, et al. The spread of awareness and its impact on epidemic outbreaks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(16): 6872-6877.
- [4] FERGUSON N. Capturing human behaviour[J]. *Nature*, 2007, 446(7137): 733-733.
- [5] WANG Z, ANDREWS M A, WU Z X, et al. Spatial coupled disease behavior framework as a dynamic and adaptive system; reply to comments on "coupled disease behavior dynamics on complex networks: a review"[J]. *Physics of Life Reviews*, 2015, 15(12): 57-60.
- [6] GRANELL C, GOMES S, ARENAS A. Dynamical interplay between awareness and epidemic spreading in multiplex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(12): 128-136.
- [7] GRANELL C, GOMES S, ARENAS A. Competing spreading processes on multiplex networks: awareness and epidemics[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(1): 82-89.
- [8] BAILEY N T J. The mathematical theory of infectious diseases and its applications[M]. High Wycombe, UK: Charles Griffin & Company Ltd., 1975.
- [9] ANDERSON R M, ANDERSON B, MAY R M. Infectious diseases of humans: dynamics and control[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1992.
- [10] DIEKMANN O, HEESTERBEEK J A P. Mathematical epidemiology of infectious diseases: model building, analysis and interpretation[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Press, 2000.
- [11] KAN Jiaqian, ZHANG Haifeng. Effects of awareness diffusion and self-initiated awareness behavior on epidemic spreading—an approach based on multiplex networks[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2017, 44(3): 193-203.
- [12] ZHENG Chunyuan, WANG Zhishuang, XIA Chengyi. A novel epidemic model coupling the infectious disease with awareness diffusion on multiplex networks[C]//*Proceedings of 2018 Chinese Control and Decision Conference*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 3824-3830.
- [13] WANG Zhishuang, GUO Quantong, SUN Shiwen, et al. The impact of awareness diffusion on SIR-like epidemics in multiplex networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 349(5): 134-147.
- [14] WANG Wei, LIU Quanhui, CAI Shimin, et al. Suppressing disease spreading by using information diffusion on multiplex networks[EB/OL]. [2019-11-10]. <https://www.nature.com/articles/srep29259#Fig6>.
- [15] GAO Chao, TANG Shaoting, LI Weihua, et al. Dynamical processes and epidemic threshold on nonlinear coupled multiplex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 496(4): 330-338.
- [16] YANG Jinxuan. Epidemic spreading in multiplex networks with heterogeneous infection rate[J]. *Europhysics Letters*, 2019, 124(5): 25-32.
- [17] FAN Chongjun, JIN Yang, HUO Liang'an, et al. Effect of individual behavior on the interplay between awareness and disease spreading in multiplex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 461(11): 523-530.
- [18] GUO Quantong, JIANG Xin, LEI Yanjun, et al. Two-stage effects of awareness cascade on epidemic spreading in multiplex networks[J]. *Physical Review E*, 2015, 91(1): 35-42.
- [19] CAI C R, WU Z X, CHEN M Z Q, et al. Solving the dynamic correlation problem of the susceptible-infected-susceptible model on networks[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 302-310.
- [20] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [21] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [22] WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. Network science: an introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)

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.

编辑 宋 圆