**考虑警觉状态的双层网络传播策略**

**摘要**

Pass

修改记录：

1. 统一了示例图、状态转移树、MMCA方程以及模拟程序，现在已无歧义；
2. 重新修改了绪论后半部分的内容；
3. 修改了模型描述，并为示例图添加了详细说明。
4. **绪论**

*第一段：介绍多层网络上的传播；*

*第二段：但是没有考虑到……;*

*第三段：事实上，真实网络是……，我们考虑……;*

*第四段：因此，基于多层网络，我们在本文提出了……策略，这个策略考虑了……，结果表明… …*

*第五段：章节安排。*

近年来，了解疾病如何在个体之间传播一直是复杂网络领域的一个热门话题[1]。作为一种典型的动态传播过程，个体通过物理接触，将病毒传染到其他个体。迄今为止，研究者通过建立传染病模型研究流行病传播过程，并提出了很多免疫策略来抑制病毒传播。 [2-21单层]。然而，在人类社会中，每个人都不是孤立的，不论是疾病的传播过程，还是社会分工合作，作为推动人类社会进步的重要因素，信息的传播都起着不容忽视的作用[\*22]，例如，传染病的爆发可能导致通过媒体或者朋友迅速传播疾病相关的信息。相反，这些信息还可能促使人们采取相应的保护措施，例如呆在家里，戴口罩或是接种疫苗[\*22]。因此，对于流行病传播与信息传播的相互影响的研究，引起了各学科的广泛关注。

目前，流行病传播和信息扩散的交互模型一般用双层网络来描述。一层代表的是接触网络，描述…，另外一层是…，（你要介绍双层网络啊，你这写的是什么？完全让人不知道在写什么）对于多层网络上的疾病与信息的传播与交互，已有的研究通常将意识和流行病之间的相互作用建模为多层网络中的两个相互竞争的传播过程，就像物理接触网络中疾病传播的过程一样，意识也会从有意识的个体传给通信网络上的邻居，通过促使更多个体在信息层成为有意识地节点从而采取预防行为来抑制疾病在物理接触曾的传播。**【B5】**首先提出了基于SIS-UAU的多层传播模型，通过分析多重网络上意识和感染的耦合动态过程，揭示了模型中不同拓扑结构并存的传播对抗效应使得网络表现出了不同的物理现象，如出现了一个亚临界点，其中意识的扩散能够控制流行病的发作。而**【B8/ B9】**则通过更深入的研究发现易感人群的自我意识行为对抑制流行病传播的影响要明显好于对感染者的自我意识行为，并且无论是局部信息还是全局信息，自我意识行为都无法改变流行病的阈值。**【B6】**则提出了一种非线性耦合IE模型，考虑了异质性个体之间的联系，发现了流行阈值受耦合网络的拓扑结构影响，度分布的不均匀性可以降低流行阈值。这种现象意味着，要控制流行病的传播，我们需要增强对已经了解该流行病信息的人们的保护和免疫力。为了预防这种流行病，应加强信息交流，减少信息遗忘，加快流行病的治愈过程。**【B11】**通过构建具有与节点度有关的可调幂指数的异构感染率函数。异质感染率的负值更有利于预防流行。免疫枢纽节点是减轻流行病的好方法。意识的传播有助于防止流行病的传播。随着意识传播率的增加，感染的大小会减少。另一方面，**【B1】**提出了多重网络UAU-SIR模型，随着自我感知率ν的增加，自我感知对传播行为具有很大的影响，并极大地降低了流行率的患病率。**【B2】**则把上层定义为了阈值模型，揭示了流行阈值与意识扩散，拓扑结构相关，并且对传染病的认识在流行过程中起着重要作用。**【B14】**则在SIR的基础上引入了免疫状态（V），通过理论分析和数值模拟，发现疾病阈值不受信息传播的影响，即疾病暴发是仅取决于联系网络的拓扑。并且对于给定的疾病传播速率，我们发现存在一个最佳的信息传播速率，可以将疾病的大小减小到最小值。通信网络的同质性可以增加疫苗接种的规模，从而在信息传播迅速时更有效地防止疾病传播。更进一步，**【B15】**在UAU-SIS模型上引入了大众媒体的影响，结果显示，大众媒体的存在使得流行病的亚临界点消失了。**【B16】**而在UAU-SIR模型上，通过引入大众媒体，推导出了模型的流行阈值，并通过广泛的数值模拟，以验证理论预测。

以上研究虽然考虑了个体在了解到疾病相关的信息后会产生警觉从而采取防护措施来抑制疾病的传播，却忽视了不同个体的异质型，即不同个体在产生疾病相关的意识后会采取不同的措施来避免感染疾病。因此，本文基于多层网络的疾病与信息模型，引入了个体的警觉状态，警觉状态由个体在信息层成为已知节点后以概率转化而来。如在实际生活中，很多个体即便在了解到疾病相关的信息后也只是采取最简单的防御措施，如勤洗手，注意保暖，吃预防性的药物等，由于日常的工作与社交需求，他们并不会因为疾病的流行而切断与部分邻居的接触。在此之上，也会有少部分的有意识节点会变得更警觉，警觉节点了解疾病的严重性，为了避免被疾病感染，他们会改变自己的部分行为状态，采取更进一步的防护措施。本文会探讨警觉性所引发的个体两种不同行为对疾病传播的影响。一方面，警觉的节点因为大多是有意识的节点，所以他们都会采取基本的防护措施，因此警觉节点会考虑和警觉节点相互接触，从而避免被疾病所感染；而另一方面，警觉节点里也有相当的个体已感染疾病，因此，警觉节点若主动和非警觉节点接触，同样也有可能在一定程度上避免被疾病所感染。而非警觉节点，因为不了解疾病的严重性，则会和所有邻居主动接触。我们希望通过对节点具有警觉性后所采取的不同行为进行研究，寻找到抑制疾病最有效的策略，从而在疾病扩散时制定出更具有指导意义的应对方法。本文所关注的主要问题如下：首先，节点的警觉性能否对疾病的传播产生抑制作用？第二，不同的警觉性策略对意识与疾病之间相互作用的影响是否存在差异？

本文的其余部分安排如下：在第二章，我们介绍了所采用的多层网络的传播模型，并且引入基于节点警觉性的策略，并且基于警觉性的不同应对策略，给出了模型的微观马尔可夫描述。在第三章，我们通过仿真实验对比警觉个体采取不同策略对疾病传播造成的影响，由对不同网络结构以及不同警觉策略应对方式的仿真，我们做出了对比。在第四章，我们总结本文并给出了结论。

1. **模型**

**2.1 模型描述**

考虑到社交网络上信息的传播和个人行为的改变是一种复杂的社会心理过程，所以我们使用双层网络来建立并且简化传播机制。在我们的多层网络模型中，上下两层网络表示相同的节点集，由于现实社会中接触网络和信息传播网络的通常不会一致，所以模型中两层网络的网络结构并不相同。下层为接触网络，其中边代表了人与人之间的物理接触。而上层为信息网络，其中的连边表示了人与人之间信息的共享。【图1】展示了我们的SIS-UAU多层网络传播模型，

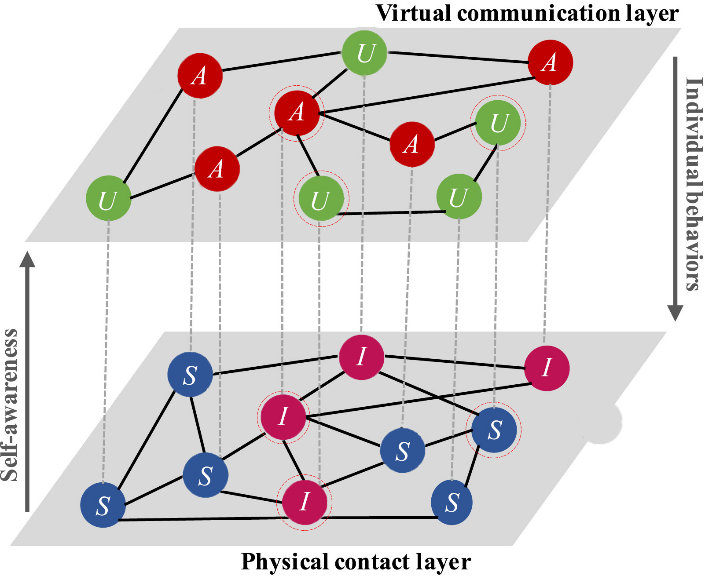


图 1 - SIS-UAU多层网络传播模型。其中下层为物理接触层，模拟S-I-S疾病传播过程；上层为信息层，模拟U-A-U信息传播过程，个体在信息层成为A状态后则有的概率成为警觉节点，在图中以有红色虚线包围的节点表示。

在接触层中，我们用易感-感染-易感（SIS）模型来表示疾病的传播过程。个体在每个时刻可以是易感状态（S）或者是感染状态（I）。在传播过程中，每个时刻感染个体在和邻居接触时会以一个固定概率感染对方，而感染个体也会以概率恢复为易感个体[1]。

在信息层中，有关疾病信息的传播遵循未知-已知-未知（UAU）传播模型[2]。和SIS传播模型类似，个体在每一个时刻可以是未知（U）状态或者是已知（A）状态。那些在接触层感染疾病的个体在信息层会每个时刻以概率转变为已知状态。随后，已知个体每个时刻会在信息层中传播信息，以概率使得邻居也变为已知个体，同时也会以概率恢复为未知个体。在变为已知状态后，易感个体会采取防护措施来减小在接触感染个体时疾病的传染性，如采取在实际生活中对应勤洗手，吃预防性药物或是注意保暖穿衣等举措。参数的详细信息可以见【表1】。注意，在我们的模型中，A状态代表散播疾病相关信息，而非对于疾病本身的知晓情况，而U状态表示布散播疾病相关信息。考虑到在实际生活中，依据每个个体的行为喜好，存在个体即便是感染疾病也未必会在信息层传播关于该疾病的信息，因此，信息上传率正是为此设置。

个体行为：在此之上，我们引入了节点的警觉状态，在信息层中，知觉个体会每个时刻会以概率进入警觉状态（V），而已经处于警觉状态个体在重新变为U状态时同样会以概率恢复为非警觉状态（R），其中，。

考虑到不同的个体在了解到疾病相关的信息后会做出不同的反应，我们考虑了个体获得警觉性后的两种不同应对策略：

1. 警觉节点在接触层只会和警觉节点主动接触，而非警觉节点在接触层则会和所有邻居节点主动接触。
2. 警觉节点在接触层只会和非警觉节点主动接触，而非警觉节点在接触层则会和所有邻居节点主动接触。

考虑到两种应对方式都有其合理性，我们在建立模型把这两种方式都纳入了模型之中，将通过参数控制不同策略的选取。

**2.2 数学描述**

基于以上假设，整个多层网络中的节点存在四种主要状态：未知易感（），未知感染（），已知易感（），已知感染（ ）。以及八种子状态：四种警觉状态，，，，以及四种非警觉状态，，，（其中下标V代表警觉状态，而R代表非警觉状态）。

由于MMCA在解决淬火网络中的扩散动力学方面有很高的准确定[\*]，我们在本文中使用MMCA对我们的模型进行理论分析。根据前文给出的模型，在t时刻，每个节点都会以一个确定的概率成为以下八个状态之一：，，，，，，以及，分别以，，，，，，， 表示。显然有， 。我们分别以，来表示接触层和信息层的邻接矩阵元素。随后，我们在信息层定义个体不被任何邻居传播为知觉个体的概率为。在接触层，我们定义非警觉个体在未知状态时，不被任何邻居感染的概率为，警觉个体在未知状态时，不被任何邻居感染的概率为。同样，非警觉个体在知觉状态时，不被任何邻居感染的概率为，警觉个体在知觉状态时，不被任何邻居感染的概率为。假设没有动力学相关性[\*]，我们有以下方程式：











其中，，，而控制着两种应对方式的选取，时对应于采用策略1，时对应于则采用策略2。

因此，对于每个个体，所有八种状态变化可能性的概率转移树如图2所示。





图 2 – UAU-SIS模型中个体在每个时刻八个状态的概率转移树。状态包括，，，，，，以及。每棵树的根节点表示在时间的个体的状态，而叶子节点表示时刻个体的状态。每个时刻都被分为四个阶段：意识传播(UAU过程)，警觉状态的改变，疾病传播(SIS过程)，以及自我意识的产生(信息上传过程)。

结合以上四个式子以及图2的概率转移树，我们可以用MMCA建立每个节点从所有八种状态演化的方程为：



s表格 1 - 传播过程中的参数表示

|  |  |
| --- | --- |
| 参数符号 | 含义 |
|  | 未知节点在接触层的疾病感染率 |
|  | 知觉节点在接触层的疾病感染率 |
|  | 接触层疾病的康复率 |
|  | 信息层信息的传播率 |
|  | 信息层信息的遗忘率 |
|  | 信息上传率 |
|  | 传播信息的个体在接触层的感染率衰减 |
|  | 信息层知觉节点进入警觉状态的概率 |
|  | 警觉状态节点恢复为非警觉的概率 |
|  | 时采用策略1，时则采用策略2 |

1. **分析/仿真结果：**

*传播规模I(t) SIS-uav*

*~~传播阈值~~*

*传播速度(i(t)-i(t-1))/N;*

***P1*** *【讲一下模拟的具体网络细节以及参数】在此，我们分别研究疾病的传播规模、传播阈值以及传播速度。（X个主要参数的影响：X（），X（），X（））。我们使用的多层网络如下：与物理接触层相对应的网络采用无标度（BA）网络，由【网络生成的参数】生成的。与信息传播层相对应的网络同为是BA网络，但是考虑到现实社会中同一个个体的在接触关系网络和在线社交关系网络中，不会产生过于差异化的人际关系，如在接触关系网络中拥有更多好友的个体，在信息传播层中同样更有可能是有较多好友，虽然个体在两层中拥有的好友并不一定完全一致。为了保证这种相关性，上层的信息层BA网络以下层的接触层网络为基础，随机增加400条边。接下来，我们将分析针对不同参数值的流行病的传播情况。*

***P2*** *【具体的参数取值】pass*

1. **结论**

**参考文献**

[1] R. Pastor-Satorras , C. Castellano , P. Van Mieghem , A. Vespignani , Epidemic processes in complex networks, Rev. Mod. Phys. 87 (3) (2015) 925 . march

[2] R. Durrett , Some features of the spread of epidemics and information on a random graph, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107 (10) (2010) 4 491–4 498 .

[3] R. Pastor-Satorras , A. Vespignani , Epidemic spreading in scale-free networks, Phys. Rev. Lett. 86 (14) (20 01) 320 0 . *X.-X. Zhan et al. / Applied Mathematics and Computation 332 (2018) 437–448* 447

[4] M. Barthélemy , A. Barrat , R. Pastor-Satorras , A. Vespignani , Velocity and hierarchical spread of epidemic outbreaks in scale-free networks, Phys. Rev. Lett. 92 (17) (2004) 178701 . [5] M. Kuperman , G. Abramson , Small world effect in an epidemiological model, Phys. Rev. Lett. 86 (13) (2001) 2909 .

[6] A. Kleczkowski , K. Ole ´s , E. Gudowska-Nowak , C.A. Gilligan , Searching for the most cost-effective strategy for controlling epidemics spreading on regular and small-world networks, J. R. Soc. Interface 9 (66) (2012) 158–169 .

[7] M. Dickison , S. Havlin , H.E. Stanley , Epidemics on interconnected networks, Phys. Rev. E 85 (6) (2012) 066109 .

[8] D. Li , P. Qin , H. Wang , C. Liu , Y. Jiang , Epidemics on interconnected lattices, Eur.Phys. Lett. 105 (6) (2014) 68004 .

[9] L. Hufnagel , D. Brockmann , T. Geisel , Forecast and control of epidemics in a globalized world, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101 (42) (2004) 15124–15129 .

[10] T.C. Germann , K. Kadau , I.M. Longini , C.A. Macken , Mitigation strategies for pandemic influenza in the united states, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103 (15) (2006) 5935–5940 .

[11] J. Gómez-Gardeñes , V. Latora , Y. Moreno , E. Profumo , Spreading of sexually transmitted diseases in heterosexual populations, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 105 (5) (2008) 1399–1404 .

[12] S. Risau-Gusman , Influence of network dynamics on the spread of sexually transmitted diseases, J. R. Soc. Interface 9 (71) (2012) 1363 .

[13] J.E. Childs , A.T. Curns , M.E. Dey , L.A. Real , L. Feinstein , O.N. Bjørnstad , J.W. Krebs , Predicting the local dynamics of epizootic rabies among raccoons in the united states, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 97 (25) (20 0 0) 13666–13671 .

[14] J. Zhang , Z. Jin , G.-Q. Sun , T. Zhou , S. Ruan , Analysis of rabies in china: transmission dynamics and control, PLoS One 6 (7) (2011) e20891 .

[15] A. Vespignani , Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems, Nat. Phys. 8 (1) (2012) 32 .

[16] A. Vazquez , B. Racz , A. Lukacs , A.-L. Barabasi , Impact of non-poissonian activity patterns on spreading processes, Phys. Rev. Lett. 98 (15) (2007) 158702 .

[17] S. Meloni , N. Perra , A. Arenas , S. Gómez , Y. Moreno , A. Vespignani , Modeling human mobility responses to the large-scale spreading of infectious diseases, Sci. Rep. 1 (2011) 62 . [18] M. Starnini , A. Baronchelli , R. Pastor-Satorras , Modeling human dynamics of face-to-face interaction networks, Phys. Rev. Lett. 110 (16) (2013) 168701 .

[19] M. Karsai , M. Kivelä, R.K. Pan , K. Kaski , J. Kertész , A.-L. Barabási , J. Saramäki , Small but slow world: how network topology and burstiness slow down spreading, Phys. Rev. E 83 (2) (2011) 025102 .

[20] P. Holme , J. Saramäki , Temporal networks, Phys. Rep. 519 (3) (2012) 97–125 .

[21] L. Wang , Z. Wang , Y. Zhang , X. Li , How human location-specific contact patterns impact spatial transmission between populations? Sci. Rep. 3 (2013) 1468 .

[22] S. Funk , E. Gilad , C. Watkins , V.A. Jansen , The spread of awareness and its impact on epidemic outbreaks, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106 (16) (2009) 6 872–6 877 .

[B5] Granell C, Gómez S, Arenas A. Dynamical interplay between awareness and epidemic spreading in multiplex networks[J]. Physical review letters, 2013, 111(12): 128701.

[B8] Kan J Q, Zhang H F. 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: 193-203.

[B6] Gao C, Tang S, Li W, et al. Dynamical processes and epidemic threshold on nonlinear coupled multiplex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 496: 330-338.

[B11] Yang J X. Epidemic spreading in multiplex networks with heterogeneous infection rate[J]. EPL (Europhysics Letters), 2019, 124(5): 58004.

[B1] Zheng C, Wang Z, Xia C. A novel epidemic model coupling the infectious disease with awareness diffusion on multiplex networks[C]//2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2018: 3824-3830.

[B2] Wang Z, Guo Q, Sun S, et al. The impact of awareness diffusion on SIR-like epidemics in multiplex networks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 349: 134-147.

[B14] Wang W, Liu Q H, Cai S M, et al. Suppressing disease spreading by using information diffusion on multiplex networks[J]. Scientific reports, 2016, 6: 29259.

[B15] Granell C, Gómez S, Arenas A. Competing spreading processes on multiplex networks: awareness and epidemics[J]. Physical review E, 2014, 90(1): 012808.

[B16] Xia C, Wang Z, Zheng C, et al. A new coupled disease-awareness spreading model with mass media on multiplex networks[J]. Information Sciences, 2019, 471: 185-200.