**考虑警觉状态的双层网络传播策略**

**摘要**

Pass

1. **绪论（一页左右）**

*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。*

**P1** 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]。通常，疾病的传播是一个动态过程，疾病在接触网络中通过物理接触从一个个体传染到另一个个体。迄今为止，针对复杂网络中的病毒传播，优秀的学者们已经进行了深入而细致的研究，并提出了很多优秀的模型和策略[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]。**【举例子（如信息和疾病相互影响的趋势图），可以代替前面一个引用，例子够长可以单独作为一段】**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]。这种个体的行为反应可能会进一步影响传染病的传播情况。因此，对于流行病传播与信息传播之间耦合作用的研究，引起了各学科的广泛关注。

[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 .

**P2** 对于多层网络上的疾病与信息的传播，已有的研究多数基于对模型本身的分析。**【列举之前看的已有的具体工作】【B5**这个人有两篇**】**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】**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**【B9得出同样结论】**。**【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，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。**【B18】**则提出了一种使用多重网络框架的带有政策规定的绿色意识-行为传播模型。政策调控的力度在传播阈值和最终绿色行为规模方面都起着至关重要的作用。绿色行为阈值的表达与政策强度直接相关

[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.

[B18] Gao X, Tian L. Effects of awareness and policy on green behavior spreading in multiplex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 514: 226-234.

**P3** 而要想探索在现实世界里信息传播对疾病扩散的抑制作用，仅对于模型本身的研究是不够的，我们需要在此之上探索不同的交互策略，通过相互比较寻找更具有指导意义的有效策略，从而在疾病扩散时制定出更有效的应对方法。

**P4** 因此，基于多层网络的疾病与信息的传播模型，我们在本文提出了一种新的考虑个体警觉状态的策略，一方面，我们考虑了个体的警觉性，警觉的节点倾向于和同样警觉的节点接触。**【具体的解释】**如在现实环境中，归功于疾病信息的传播，知道疾病已经在大范围传播后大家都会采取适当的防护措施，如勤洗手，注意保暖，吃预防性的药物等。另一方面，我们还考虑了个体异质性的影响，因为在社会中个体很难完全切断与所有邻居的连接，所以每个个体都可以依据警觉性改变其部分行为状态，警觉的节点因为已经了解了疾病的信息，一定会采取适当的防护措施，所以在和邻居接触时，与同样是警觉状态的节点接触后，被疾病感染的概率更小。而非警觉的节点，则会和所有邻居接触，若其已经了解了疾病相关的信息，仍可以从一定程度上降低被感染的概率。结果表明，引入节点的警觉性能够有效抑制疾病在接触层的扩散，在我们的仿真实验中，相比较于原始模型，引入节点的警觉性后**【对实验结果的数字描述】【（具体的信息，如能否改变阈值什么的）】**。

**P5** 本文的章节安排如下：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。在第三章，基于微观马尔可夫分析，我们对模型做了理论分析。在第四章，我们通过仿真实验验证了模型，并且证明了MMCA在解决所提出的模型中的准确性，并研究了**【联系信息，患病率信息，意识传播和感染者的无私行为对流行传播动态的影响】**。在第五章，我们总结本文并给出了结论。

1. **模型**

*第一段：模型中用到的双层网络传播规则；*

*第二段：我的策略，假设（1）（2）……；*

*第三段：数学模型*

**P1** 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。注意信息层中的连边情况和接触层中不同。【图1】展示了我们的SIS-UAU多层网络传播模型，

图片包含 天空

描述已自动生成

图 1 - SIS-UAU多层网络传播模型【还要修改】

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-知觉-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）状态或者是知觉（A）状态。那些在接触层感染疾病的个体在信息层会以概率转变为知觉状态。随后，知觉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知觉个体，并且以概率恢复为未知个体。在变为知觉状态后，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，吃药或是多穿些衣服等举措。参数的详细信息可以见【表1】。注意，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，在我们的模型中，A状态代表的是个体在信息层传播关于疾病的信息的意愿，而非对于疾病本身的知晓情况，信息上传率正是为此设置。

**P2** 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，知觉个体会在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同样会以概率恢复为非警觉状态（R），其中，。*【讲的事，可参考活跃那篇论文】*处于警觉状态的个体在接触层只会和同样为警觉状态的个体接触，而非警觉状态的个体则会和所与邻居接触。【这里可以讲一下原因，或是**放到第一章讲**】。

[1]

[2] Gao X, Tian L. Effects of awareness and policy on green behavior spreading in multiplex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 514: 226-234.

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）。

**P3 【**数学描述】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：



---【这个式子已弃置】



---【这个式子已弃置】



而，，。

*注：这里，2，4式子非警觉节点和警觉节点接触实际是会被拒绝的，只不过3，5考虑的是警觉节点主动拒绝（还是加上更细的分类吧）。*

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 - 状态转移树【还要修改】【一些解释】

结合式子【以上四个】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：

【八个方程】



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 |
|  |  |

1. **分析/仿真结果：**

*传播规模I(t) si-uau/SIS-uav/(SIR/UAU)*

*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**