

中文引用格式:王甜甜,马海韵,王志荣,等. 基于多层网络的传染病与负面情绪耦合传播模型[J]. 中国安全科学学报,2026,36(1): 257-266.

英文引用格式:WANG Tiantian, MA Haiyun, Wang Zhirong, et al. Coupled transmission model of spatial infectious diseases and negative emotions based on Multilayer networks[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 257-266.

基于多层网络的传染病与负面情绪 耦合传播模型*

王甜甜¹讲师, 马海韵¹教授, 王志荣¹教授,

刘铁忠^{**2}教授, 闫晓涵³讲师

(1 南京工业大学 应急管理学院, 江苏 南京 211816; 2 北京理工大学 管理学院, 北京 100081; 3 河北经贸大学 金融学院, 河北 石家庄 050061)

中图分类号: X915.5

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0664

基金项目: 国家社科基金资助(21BGL299); 江苏省哲学社会科学联合会项目(23SSL133); 江苏高校哲学社会科学
研究一般项目(2025SJYB0169); 教育部人文社会科学青年基金项目(25YCHZ260)。

【摘要】 为揭示疾病传播强度与情绪扩散速率的协同演化关系, 基于双层复杂网络结构, 将经典易感-潜伏-感染-免疫(SEIR)模型与情绪传播的5状态动力学框架($S_e-E_e-I_e-G_e-R_e$)相融合, 构建耦合动力学模型($SEIR-S_eE_eI_eG_eR_e$), 并采用微观马尔可夫链(MMC)与蒙特卡罗(MC)法仿真进行理论推演与仿真验证。研究结果表明: 降低传染病感染概率虽可降低情绪传播规模, 但对情绪传播高峰的抑制作用有限; 而缩短传染病潜伏期与提高治愈率, 可显著调控负面情绪传播, 呈现情绪代谢迟滞效应与情绪引导者密度阈值效应的双阶段传播特征。此外, 提高个体防疫配合度可通过阻断传播链、强化社会规范与矫正认知偏差3条路径实现, 有效延缓负面情绪扩散并缩小其规模。

【关键词】 多层网络; 负面情绪; 传染病; 耦合传播模型; 微观马尔可夫链(MMC)

Coupled transmission model of spatial infectious diseases and negative emotions based on multilayer networks

WANG Tiantian¹, MA Haiyun¹, WANG Zhirong¹, LIU Tiezhong², YAN Xiaohan³

(1 School of Emergency Management, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China;

2 School of Management, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China;

3 School of Finance, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang Hebei 050061, China)

Abstract: To reveal the co-evolutionary relationship between disease transmission intensity and emotional diffusion rate, based on a two-layer complex network structure, this study integrated the classical Susceptible-Exposed-Infected-Recovered (SEIR) epidemic model with a five-state emotional dynamics framework ($S_e-E_e-I_e-G_e-R_e$) to construct a coupled dynamics model ($SEIR-S_eE_eI_eG_eR_e$). Theoretical derivation and simulation validation were conducted using the microscopic Markov chain approach and Monte Carlo simulation. The findings reveal that although reducing the disease infection probability can

* 文章编号: 1003-3033(2026)01-0257-10; 收稿日期: 2025-08-30; 修稿日期: 2025-11-01

** 通信作者: 刘铁忠(1974—), 男, 黑龙江海伦人, 博士, 教授, 主要从事风险分析与危机管理方面的研究。E-mail: liutiezhong@bit.edu.cn。

mitigate the scale of emotional propagation, its inhibitory effect on the peak of emotional propagation remains limited. In contrast, shortening the disease incubation period and improving the recovery rate significantly regulate the spread of negative emotions, exhibiting a two-stage propagation pattern characterized by emotional metabolic hysteresis and the density threshold effect of emotional guides. Furthermore, enhancing individuals' compliance with epidemic preventive measures can effectively delay the spread and reduce the scale of negative emotions through three pathways: blocking transmission chains, reinforcing social norms, and correcting cognitive biases.

Keywords: multilayer networks; negative emotion; infectious disease; coupling spreading model; Micro-Markov chain (MMC)

0 引言

数字化进程的快速发展加剧了社交网络与公共安全事件间的深度耦合,尤其是在重大公共卫生危机背景下,疫情相关的负面情绪传播已经逐渐成为新型社会风险源^[1-2]。大量研究表明:传染病暴发不仅直接影响公众身体健康,还通过社会心理应激机制诱发群体恐慌、谣言传播、政府信任危机等次生灾害,形成病毒-情绪的双链风险放大效应^[3-5]。如何有效识别并阻断这一新兴风险链条,已成为公共安全治理领域亟待解决的重要课题。

现阶段研究多集中于单一传播过程的独立建模与分析。在传染病传播领域,经典易感-潜伏-感染-免疫 (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered, SEIR) 模型及其衍生模型侧重于刻画个体间物理接触网络中的疾病传播规律,强调疾病的空间与个体层面的扩散特性;在情绪传播领域,则多借助社会感染理论,分析情绪状态在社交网络(尤其是同质化网络)中的扩散机制。然而,这2类传播过程并非孤立进行,它们在真实公共安全事件中往往通过多层网络深度耦合,呈现出复杂的时空协同传播特征^[6],但这一重要特征尚未得到充分揭示。

近年来,已有研究借助多层网络理论探讨信息与传染病传播之间的复杂协同关系,并取得一定进展。例如:WANG Zhishuang 等^[7]基于双层网络分析了大众传媒环境下多重信息与疾病传播的共同演化,但未考虑情绪状态的影响;魏静等^[8]在模型中引入情绪因素,研究了媒体情绪对舆情扩散的作用,但对情绪传播的动力学特性与节点异质性刻画不足;ZHU Xuzhen 等^[9]借助3层网络探讨了信息驱动的资源配置对疾病传播的影响,却未深入分析情绪在其中所扮演的角色;HUO Liang'an 等^[10]考察了信息扩散、疫苗接种与疾病传播之间的互动,但缺乏对情绪传播独特动力学及其耦合机制的系统探讨;

YOU Xuemei 等^[11]构建了情绪导向的多重网络模型,但主要将情绪视为信息传播的延伸,未独立解析其传播机制;于跃等^[12]建立了信息、行为、资源与疾病的4层耦合网络,揭示了多要素间的复杂交互,但对情绪传播路径与网络结构的精细分析仍显不足。已有研究在多层网络传播建模方面取得了积极进展,但仍存在2方面局限:一方面,对情绪传播自身的内在机制及其节点异质性缺乏独立性分析;另一方面,尚未系统刻画情绪与疾病传播在复杂网络中的双向耦合过程,尤其对二者如何协同放大公共风险尚待深入揭示。

因此,笔者拟构建一种多层动态耦合网络模型,刻画社交网络中节点的异质性特征,系统分析突发疫情背景下负面情绪传播的动力学机制、路径结构及其时空演化特征;通过建模推演与仿真试验,揭示疾病传播强度与情绪扩散速率的协同演化关系,以期为公共危机中双重风险的预警与干预提供理论依据和决策支持。

1 空间传染病-网络负面情绪耦合传播模型

1.1 耦合传播网络

在传染病网络中,采用经典的 SEIR 模型描述疾病传播动力学。网络节点按感染状态被划分为4类:易感者 S 、潜伏者 E 、感染者 I 和免疫者 R ,其演化动力学如下:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -(\omega I(t) + \chi E(t))S(t) + \xi R(t) \\ \frac{dE(t)}{dt} = (\omega I(t) + \chi E(t))S(t) - \theta E(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \theta E(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) - \xi R(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为演化时间; ω 为 S 个体接触 I 个体后的传染率; χ 为 S 个体接触 E 个体的传染率; ξ 为 R 态丧失免疫力后重返易感状态的概率; θ 为 E 态自发转换为 I 态的概率; γ 为 I 态自发恢复的概率。

根据社交网络中用户情绪状态的异质性,将其划分为 5 类:情绪易感者 S_e 、情绪感染者 E_e 、情绪传播者 I_e 、情绪引导者 G_e 和情绪免疫者 R_e 。其中,情绪引导者 G_e 为社交网络中发布和传播积极、理性情绪引导信息的关键角色,通常由官方媒体、专家学者或具有专业经验的人员担当。各状态间的转换与传播过程相互独立,其演化动力学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dS_e(t)}{dt} = \lambda R_e(t) - (\pi I_e(t) + \mu G_e(t) + \rho) S_e(t) \\ \frac{dE_e(t)}{dt} = \pi S_e(t) I_e(t) + \beta I_e(t) G_e(t) - (\alpha + \mu G_e(t) + \rho) E_e(t) \\ \frac{dI_e(t)}{dt} = \alpha E_e(t) - [(\mu + \beta) G_e(t) + \rho] I_e(t) \\ \frac{dG_e(t)}{dt} = \mu [S_e(t) + E_e(t) + I_e(t)] G_e(t) - \rho G_e(t) \\ \frac{dR_e(t)}{dt} = \rho [1 - R_e(t)] - \lambda R_e(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ 为 R_e 自发转变为 S_e 的概率; π 为 S_e 接触 I_e 后变为 E_e 的概率; μ 为 S_e 、 E_e 和 I_e 转变为 G_e 的概率; ρ 为 S_e 、 E_e 、 I_e 与 G_e 转变为 R_e 的概率; β 为 I_e 转变为 E_e 的概率; α 为 E_e 自发转变为 I_e 的概率。 S_e 、 E_e 、 I_e 、 G_e 、 R_e 5 类节点状态用于描述节点在情绪传播过程中的动态演化状态,具有互斥性。任一时刻,每个节点仅处于其中一种状态,且可随传播过程在状态间转移。

基于式 (1) 和式 (2), 进一步构建 SEIR- $S_e E_e I_e G_e R_e$ 双层耦合传播模型(图 1), 以刻画传染病与负面情绪扩散之间的互动机制。上层网络 $\mathcal{A}$ 模拟传染病在物理接触中的 SEIR 传播过程, 下层网络 $\mathcal{B}$ 描述负面情绪在社交网络中的 5 状态演化动态。2 层网络节点数均为 N , 且节点一一对应, 表示同一个体同时参与 2 类传播网络。跨层连接体现状态联动, 层内连接反映节点间交互, 共同构成结构耦合与状态联动的多层传播网络体系。

1.2 耦合机制分析

传染病传播与负面情绪扩散过程之间存在显著的双向耦合作用, 具体交互机制描述如下:

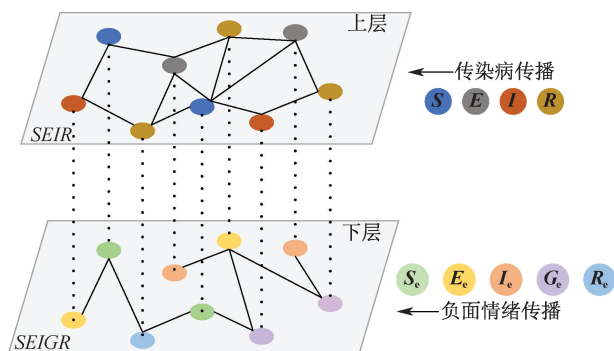


图 1 传染病-负面情绪耦合传播网络

Fig. 1 Coupled transmission network of infectious disease and negative emotions

1) 疾病感染触发负面情绪激活。当情绪传播层中的 S_e 、 G_e 或 R_e 态个体在疾病层被感染转为 I 态后, 会引发恐慌情绪, 其在情绪层状态将转为 E_e 态, 且在患病期间无法自主恢复为 G_e 或 R_e 状态。此机制揭示了传染病感染状态对个体负面情绪 (如焦虑、恐惧) 的直接激活作用, 进而影响情绪传播层中的状态转移过程。

2) 负面情绪加剧疾病传播风险。 E_e 和 I_e 态个体因负面情绪抵触防控措施 (如拒绝佩戴口罩、忽视社交距离等), 从而提升其疾病感染风险。这种行为上的负面反馈效应进一步强化了情绪传播对疾病传播的负向影响。

3) 康复个体的情绪状态转化与引导作用。当 E_e 和 I_e 态个体在疾病层康复为 R 态后, 伴随恐慌消除, 其情绪状态倾向于转为引导态 G_e , 并通过分享康复经验缓解负面情绪传播, 增强群体情绪抵抗力。需要注意的是, 模型假设单次疫情周期内康复者具备完全免疫力, 不考虑再次感染及其潜在的情绪影响。

4) 个体防疫配合度的调节作用。模型引入个体防疫配合度系数 δ (记 $0 \leq \delta < 1$), 可调节疾病传播层的感染概率, 并间接作用于情绪传播层中 S_e 、 E_e 和 I_e 状态间的转移概率。当 $\delta = 0$ 时, 个体在疾病传播层面完全免疫。

基于上述交互机制分析, 模型初步定义了疾病与情绪传播层可能形成的 20 种个体复合状态: SS_e 、 SE_e 、 SI_e 、 SG_e 、 SR_e 、 ES_e 、 EE_e 、 EI_e 、 EG_e 、 ER_e 、 IS_e 、 IE_e 、 II_e 、 IG_e 、 IR_e 、 RS_e 、 RE_e 、 RI_e 、 RG_e 、 RR_e 。依据现实情境的约束条件, 疾病感染个体 (I 态) 难以同时处于无负面情绪 (S_e) 或积极引导状态 (G_e 、 R_e), 故排除 IS_e 、 IG_e 和 IR_e 状态; 另外, 康复个体 R 因具备对应当次疫情的免疫力, 在研究周期内无感染风险与疾

病困扰,缺乏产生与疾病相关负面情绪的行为基础,因此排除 RE_e 与 RI_e 状态。最终,保留了具有现实意义的 15 种状态。

1.3 耦合动力学模型

使用微观马尔可夫链 (Micro-Markov Chain, MMC) 法^[13]构建双层网络的动态耦合传播动力学。假设在时间 t 、节点 i 处于 15 种状态的概率分别为 $p_i^{SS_e}(t), p_i^{SE_e}(t), p_i^{SI_e}(t), p_i^{SG_e}(t), p_i^{SR_e}(t), p_i^{ES_e}(t), p_i^{EE_e}(t), p_i^{EI_e}(t), p_i^{EG_e}(t), p_i^{ER_e}(t), p_i^{IE_e}(t), p_i^{II_e}(t), p_i^{RS_e}(t), p_i^{RG_e}(t), p_i^{RR_e}(t)$ 。此时,节点 i 在传染病传播层 $\mathcal{A}$ 中处于 S, E, I, R 4 种状态的概率分别为:

$$\begin{cases} p_i^S(t) = p_i^{SS_e}(t) + p_i^{SE_e}(t) + p_i^{SI_e}(t) + p_i^{SR_e}(t) \\ p_i^E(t) = p_i^{ES_e}(t) + p_i^{EE_e}(t) + p_i^{EI_e}(t) + p_i^{EG_e}(t) + p_i^{ER_e}(t) \\ p_i^I(t) = p_i^{IE_e}(t) + p_i^{II_e}(t) \\ p_i^R(t) = p_i^{RS_e}(t) + p_i^{RG_e}(t) + p_i^{RR_e}(t) \end{cases} \quad (3)$$

节点 i 在情绪传播层 $\mathcal{B}$ 中处于 S_e, E_e, I_e, G_e, R_e 等 5 种状态的概率分别为:

$$\begin{cases} p_i^{S_e}(t) = p_i^{SS_e}(t) + p_i^{ES_e}(t) + p_i^{RS_e}(t) \\ p_i^{E_e}(t) = p_i^{SE_e}(t) + p_i^{EE_e}(t) + p_i^{IE_e}(t) \\ p_i^{I_e}(t) = p_i^{SI_e}(t) + p_i^{EI_e}(t) + p_i^{II_e}(t) \\ p_i^{G_e}(t) = p_i^{SG_e}(t) + p_i^{EG_e}(t) + p_i^{RG_e}(t) \\ p_i^{R_e}(t) = p_i^{SR_e}(t) + p_i^{ER_e}(t) + p_i^{RR_e}(t) \end{cases} \quad (4)$$

令 a_{ij} 和 b_{ij} 分别为上层传染病传播层和下层情绪传播层的邻接矩阵。忽略动力学相关性 (即假设每个邻居节点对的作用是独立的), 则有:

$$h_i^S(t) = \prod_j \{1 - a_{ji} \delta[\omega p_j^I(t) + \chi p_j^E(t)]\} \quad (5)$$

$$h_i^E(t) = \prod_j \{1 - a_{ji} [\omega p_j^I(t) + \chi p_j^E(t)]\} \quad (6)$$

$$q_i^S(t) = \prod_j [1 - b_{ji} \pi p_j^{I_e}(t)] \quad (7)$$

$$q_i^E(t) = \prod_j [1 - b_{ji} \beta p_j^{G_e}(t)] \quad (8)$$

$$q_i^G(t) = \prod_j [1 - b_{ji} \mu p_j^{G_e}(t)] \quad (9)$$

式中: $h_i^S(t)$ 为节点 i 情绪积极时没有被邻居感染疾病的概率; $h_i^E(t)$ 为节点 i 情绪消极时没有被邻居感染疾病的概率; $q_i^S(t)$ 为处于 S_e 态的节点 i 感染负面情绪的概率; $q_i^E(t)$ 为处于 I_e 态的节点 i 受

引导作用恢复为 E_e 的概率; $q_i^G(t)$ 为节点 i 受引导作用成为 G_e 的概率。

为清晰描述节点状态的动力学变化过程,建立节点状态转移概率树,如图 2—图 6 所示;并根据概率树,得到节点 i 在时间 $t+1$ 时各状态的概率转移方程:

$$\begin{aligned} p_i^{SS_e}(t+1) &= [p_i^{SS_e}(t) h_i^S(t) + p_i^{RS_e}(t) \xi] q_i^S(t) q_i^G(t) (1 - \rho) + [p_i^{SR_e}(t) h_i^S(t) + p_i^{RR_e}(t) \xi] \lambda \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_i^{SE_e}(t+1) &= [p_i^{SS_e}(t) h_i^S(t) + p_i^{RS_e}(t) \xi] [1 - q_i^S(t)] + \{p_i^{SE_e}(t) q_i^G(t) (1 - \alpha) (1 - \rho) + p_i^{SI_e}(t) [1 - q_i^E(t)]\} h_i^E(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$p_i^{SI_e}(t+1) = p_i^{SE_e}(t) h_i^E(t) \alpha + p_i^{SI_e}(t) h_i^E(t) q_i^E(t) q_i^G(t) (1 - \rho) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p_i^{SG_e}(t+1) &= [p_i^{SS_e}(t) h_i^S(t) q_i^S(t) + p_i^{SE_e}(t) h_i^E(t) (1 - \alpha) + p_i^{SI_e}(t) h_i^E(t) q_i^E(t)] \\ &\quad (1 - \rho) [1 - q_i^G(t)] + p_i^{SG_e}(t) h_i^S(t) (1 - \rho) + p_i^{RS_e}(t) \xi q_i^S(t) (1 - \rho) [1 - q_i^G(t)] + p_i^{RG_e}(t) \xi (1 - \rho) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} p_i^{SR_e}(t+1) &= p_i^{SS_e}(t) h_i^S(t) q_i^S(t) \rho + p_i^{SE_e}(t) (1 - \alpha) \rho + p_i^{SI_e}(t) h_i^E(t) q_i^E(t) \rho + p_i^{SG_e}(t) h_i^S(t) \rho + p_i^{SR_e}(t) h_i^S(t) (1 - \lambda) + p_i^{RS_e}(t) \xi q_i^S(t) \rho + p_i^{RG_e}(t) \xi \rho + p_i^{RR_e}(t) \xi (1 - \lambda) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} p_i^{ES_e}(t+1) &= \{p_i^{SS_e}(t) [1 - h_i^S(t)] + p_i^{ES_e}(t) (1 - \theta)\} q_i^S(t) q_i^G(t) (1 - \rho) + p_i^{SR_e}(t) [1 - h_i^S(t)] \lambda + p_i^{ER_e}(t) (1 - \theta) \lambda \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} p_i^{EE_e}(t+1) &= p_i^{SS_e}(t) [1 - h_i^S(t)] [1 - q_i^S(t)] + \{p_i^{SE_e}(t) q_i^G(t) (1 - \alpha) (1 - \rho) + p_i^{SI_e}(t) [1 - q_i^E(t)]\} [1 - h_i^E(t)] + p_i^{ES_e}(t) (1 - \theta) [1 - q_i^S(t)] + p_i^{EE_e}(t) (1 - \theta) q_i^G(t) (1 - \alpha) (1 - \rho) + p_i^{EI_e}(t) (1 - \theta) [1 - q_i^E(t)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} p_i^{EI_e}(t+1) &= \{p_i^{SE_e}(t) [1 - h_i^E(t)] + p_i^{EE_e}(t) (1 - \theta)\} \alpha + \{p_i^{SI_e}(t) [1 - h_i^E(t)] + p_i^{EE_e}(t) (1 - \theta)\} q_i^E(t) q_i^G(t) (1 - \rho) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} p_i^{EG_e}(t+1) &= \{p_i^{SS_e}(t)[1-h_i^S(t)]q_i^S(t) + \\ &[p_i^{SE_e}(t)(1-\alpha) + p_i^{SL_e}(t)q_i^E(t)][1-h_i^E(t)]\} \\ &(1-\rho)[1-q_i^G(t)] + [p_i^{ES_e}(t)q_i^S(t) + \\ &p_i^{EE_e}(t)(1-\alpha) + p_i^{EL_e}(t)q_i^E(t)] \\ &(1-\theta)(1-\rho)[1-q_i^G(t)] + \\ &p_i^{SG_e}(t)[1-h_i^S(t)](1-\rho) + \\ &p_i^{EG_e}(t)(1-\theta)(1-\rho) \end{aligned} \quad (18)$$
$$\begin{aligned} p_i^{ER_e}(t+1) &= p_i^{SS_e}(t)[1-h_i^S(t)]q_i^S(t)\rho + \\ &p_i^{SE_e}(t)[1-h_i^E(t)](1-\alpha)\rho + \\ &p_i^{SL_e}(t)[1-h_i^E(t)]q_i^E(t)\rho + \\ &p_i^{SG_e}(t)[1-h_i^S(t)]\rho + \\ &p_i^{SR_e}(t)[1-h_i^S(t)](1-\lambda) + \\ &p_i^{ES_e}(t)(1-\theta)q_i^S(t)\rho + p_i^{EE_e}(t)(1-\theta)\rho + \\ &p_i^{ER_e}(t)(1-\theta)(1-\lambda) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p_i^{IE_e}(t+1) &= p_i^{ES_e}(t)\theta + p_i^{EE_e}(t)\theta(1-\alpha) + \\ &p_i^{EL_e}(t)\theta[1-q_i^E(t)] + p_i^{EG_e}(t)\theta + \\ &p_i^{ER_e}(t)\theta + p_i^{IE_e}(t)(1-\gamma)(1-\alpha) + \\ &p_i^{II_e}(t)(1-\gamma)[1-q_i^E(t)] \end{aligned} \quad (20)$$
$$\begin{aligned} p_i^{II_e}(t+1) &= p_i^{EE_e}(t)\theta\alpha + p_i^{EL_e}(t)\theta q_i^E(t) + \\ &p_i^{IE_e}(t)(1-\gamma)\alpha + p_i^{II_e}(t)(1-\gamma)q_i^E(t) \end{aligned} \quad (21)$$
$$\begin{aligned} p_i^{RS_e}(t+1) &= p_i^{RS_e}(t)(1-\xi)(1-\rho)q_i^G(t) + \\ &p_i^{RR_e}(t)(1-\xi)\lambda \end{aligned} \quad (22)$$
$$\begin{aligned} p_i^{RG_e}(t+1) &= p_i^{IE_e}(t)\gamma(1-\rho) + \\ &p_i^{II_e}(t)\gamma[1-q_i^E(t)\rho] + \{p_i^{RS_e}(t)[1-q_i^G(t)] + \\ &p_i^{RG_e}(t)\}(1-\xi)(1-\rho) \end{aligned} \quad (23)$$
$$\begin{aligned} p_i^{RR_e}(t+1) &= p_i^{IE_e}(t)\gamma\rho + p_i^{II_e}(t)\gamma q_i^E(t)\rho + \\ &[p_i^{RS_e}(t) + p_i^{RG_e}(t)](1-\xi)\rho + \\ &p_i^{RR_e}(t)(1-\xi)(1-\lambda) \end{aligned} \quad (24)$$

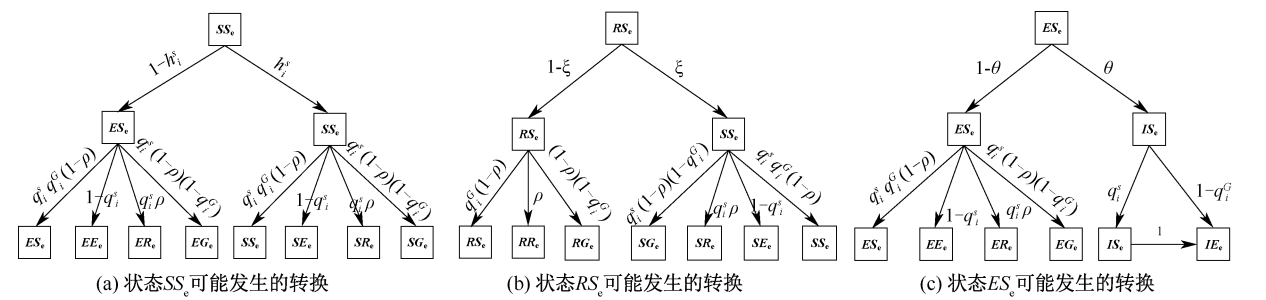


图 2 S_e 状态相关转移概率树

Fig. 2 Transition probability tree for state S_e

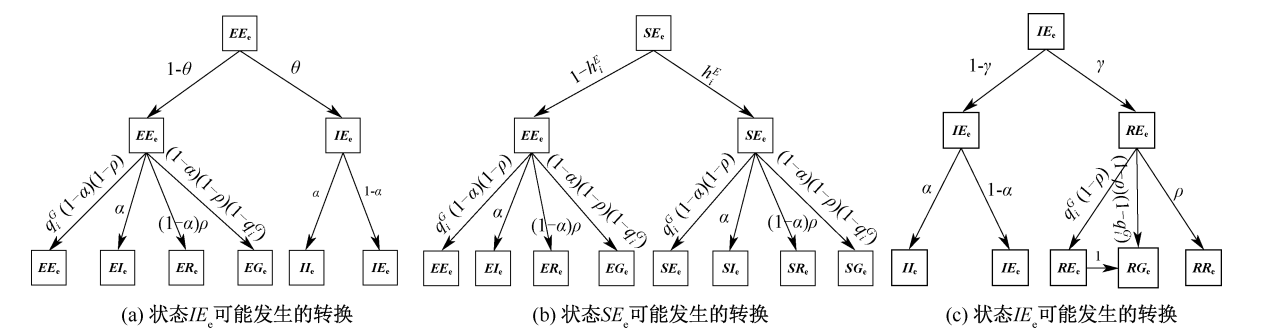


图 3 E_e 状态相关转移概率树

Fig. 3 Transition probability tree for state E_e

基于上述概率树与状态转移方程,通过运用 MMC 法,得到模型中流行病传播的临界阈值。当 t 足够大时,上述方程将达到稳态。 $p_i^E, p_i^I, p_i^{I_e}, p_i^{G_e}$ 分别表示节点 i 稳定状态时处于 4 种状态的概率。

模型中各传播概率均接近临界阈值时,网络中感染态个体的比例均接近 0,即 $p_i^E = p_i^I = p_i^{I_e} = p_i^{G_e} = \varepsilon_i \ll 1$ 。忽略高阶项,对各接触感染概率做近似,可得:

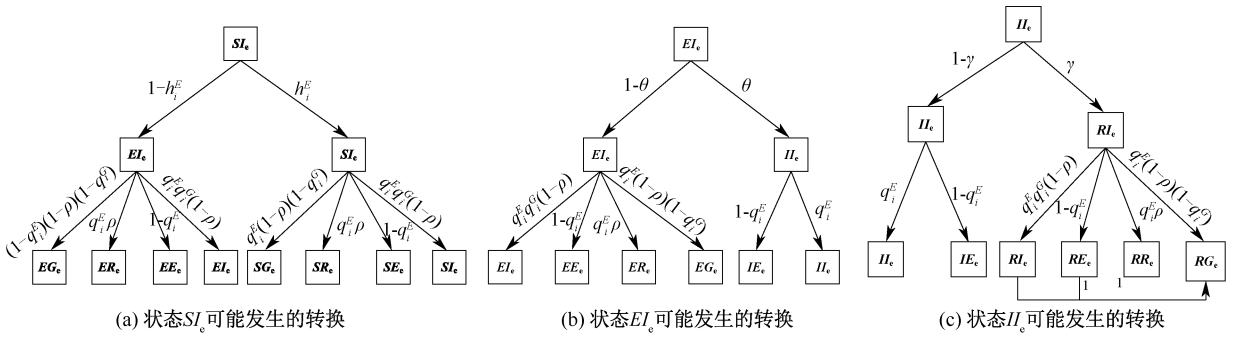


图 4 I_e 状态相关转移概率树

Fig. 4 Transition probability tree for state I_e

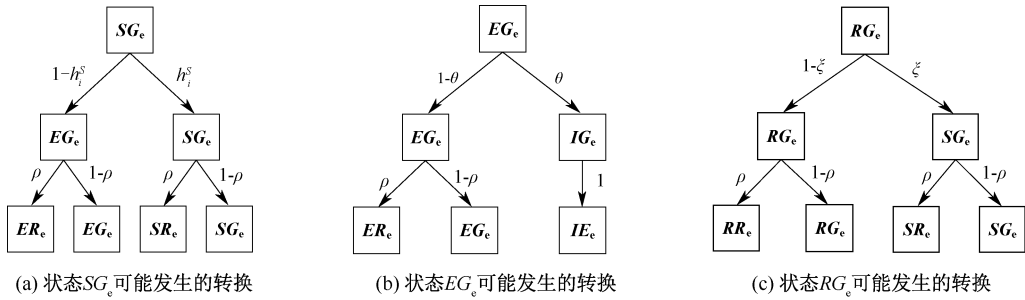


图 5 G_e 状态相关转移概率树

Fig. 5 Transition probability tree for state G_e

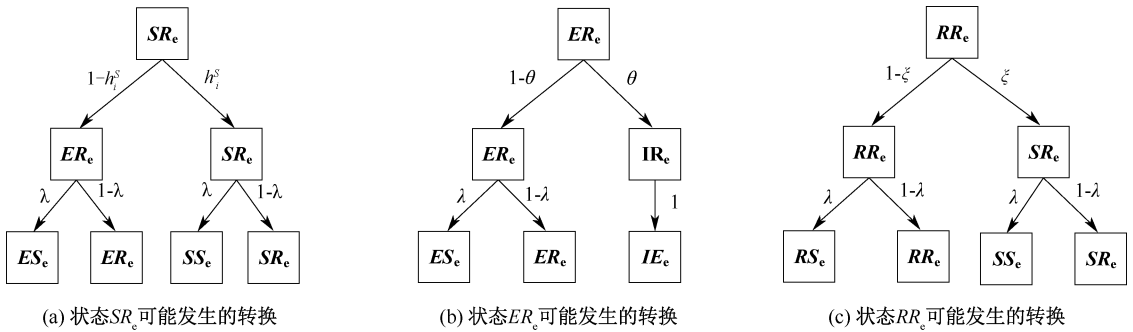


图 6 R_e 状态相关转移概率树

Fig. 6 Transition probability tree for state R_e

$$\begin{cases}
 p_i^S = (p_i^{SS_e} + p_i^{SG_e} + p_i^{SR_e})(1 - \delta(\omega + \chi) \sum_j a_{ji} \varepsilon_i) + \\
 (p_i^{SE_e} + p_i^{SI_e})(1 - (\omega + \chi) \sum_j a_{ji} \varepsilon_i) + p_i^R \xi \\
 p_i^E = (p_i^{SS_e} + p_i^{SG_e} + p_i^{SR_e})\delta(\omega + \chi) \sum_j a_{ji} \varepsilon_i + \\
 (p_i^{SE_e} + p_i^{SI_e})(\omega + \chi) \sum_j a_{ji} \varepsilon_i + p_i^E(1 - \theta) \\
 p_i^I = p_i^E \theta + p_i^I(1 - \gamma) \\
 p_i^R = p_i^I \theta + p_i^R(1 - \xi)
 \end{cases}
 \quad (25)$$

$$\sum_j \left[\left[1 - (1 - \delta)(p_i^{S_e} + p_i^{G_e} + p_i^{R_e}) \right] a_{ji} - \frac{\theta}{\omega + \chi} \delta_{ji} \right] \varepsilon_i = 0 \quad (26)$$

式中 δ_{ij} 为单位矩阵的元素。

定义矩阵 $\mathbf{H}$,其元素为 $[1 - (1 - \delta)(p_i^{S_e} + p_i^{G_e} + p_i^{R_e})]a_{ji}$,则方程(26)的解归结为求矩阵特征值的问题。满足上述方程的最小 $\omega + \chi$ 值即为疾病传播层的传染病暴发临界值。设矩阵 $\mathbf{H}$ 的最大特征值为 $\Lambda_{\max}(\mathbf{H})$,则有:

$$\omega + \chi = \frac{\theta}{\Lambda_{\max}(\mathbf{H})} \quad (27)$$

其中, $\omega + \chi$ 的值依赖于情绪传播层的动力学机

假设疾病传播层达到稳态时,所有节点均为易感者,即 $p_i^E \approx 0, p_i^I \approx 0, p_i^R \approx 0$,可得:

制,即与 $p_i^{S_e} + p_i^{G_e} + p_i^{R_e}$ 有关。

分析负面情绪传播层可得:

$$\begin{aligned} p_i^{S_e} &= (p_i^{SS_e} q_i^{S_e} + p_i^{ES_e} (1 - \theta) q_i^S + \\ p_i^{RS_e} (1 - (1 - q_i^S) \xi)) q_i^G (1 - \rho) + \\ & (p_i^{SR_e} + p_i^{ER_e} (1 - \theta) + p_i^{RR_e}) \lambda \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} p_i^{E_e} &= (p_i^{SS_e} + p_i^{RS_e}) (1 - q_i^S) + \\ p_i^{ES_e} (\theta + (1 - \theta) (1 - q_i^S)) + \\ p_i^{SE_e} q_i^G (1 - \alpha) (1 - \rho) + \\ p_i^{EE_e} (1 - \alpha) (\theta + (1 - \theta) q_i^G (1 - \rho)) + \\ p_i^{IE_e} (1 - \gamma) (1 - \alpha) + (p_i^{SI_e} + \\ p_i^{EI_e} + p_i^{II_e} (1 - \gamma)) (1 - q_i^E) + \\ (p_i^{EG_e} + p_i^{ER_e}) \theta \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} p_i^{I_e} &= (p_i^{SE_e} + p_i^{EE_e}) \alpha + \\ (p_i^{SI_e} + p_i^{EI_e} (1 - \theta)) q_i^E q_i^G (1 - \rho) \\ + p_i^{EI_e} \theta q_i^E + (p_i^{IE_e} \alpha + p_i^{II_e} q_i^E) (1 - \gamma) \quad (30) \\ p_i^{G_e} &= (p_i^{SS_e} q_i^S + p_i^{ES_e} q_i^S (1 - \theta) + \\ p_i^{RS_e} (1 - (1 - q_i^S) \xi)) \\ (1 - \rho) (1 - q_i^G) + \\ (p_i^{SE_e} + p_i^{EE_e} (1 - \theta)) (1 - \alpha) (1 - \rho) (1 - q_i^G) + \\ (p_i^{SI_e} + p_i^{EI_e} (1 - \theta) (1 - \alpha) + p_i^{IE_e} \gamma) \rho + \\ (p_i^{SG_e} + p_i^{EG_e} (1 - \theta) + p_i^{RG_e}) (1 - \rho) + \\ (p_i^{IE_e} (1 - \rho) + p_i^{II_e} (1 - q_i^E \rho)) \gamma \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} p_i^{R_e} &= (p_i^{SS_e} + p_i^{ES_e} (1 - \theta) + \\ p_i^{RS_e} \xi) q_i^S \rho + p_i^{RE_e} (1 - \xi) \rho + \\ (p_i^{SE_e} (1 - \alpha) + p_i^{EE_e} (1 - \theta) (1 - \alpha) + p_i^{IE_e} \gamma) \rho + \\ (p_i^{SI_e} + p_i^{EI_e} (1 - \theta) + p_i^{II_e} \gamma) p_i^E \rho + \\ (p_i^{SG_e} + p_i^{EG_e} (1 - \theta) + p_i^{RG_e}) \rho + \\ (p_i^{SR_e} + p_i^{ER_e} (1 - \theta) + p_i^{RR_e}) (1 - \lambda) \end{aligned} \quad (32)$$

根据式(28)一式(32)可得:

$$\begin{aligned} p_i^{S_e} &= p_i^{S_e} q_i^S + (p_i^{E_e} (1 - \alpha) + \\ p_i^{I_e} q_i^E) (1 - (1 - \rho) q_i^G) \end{aligned} \quad (33)$$

根据式(26)发现,情绪传播层的稳态会对疾病传播层造成一定影响。当情绪传播层最终达到无负面情绪的平衡状态时, $p_i^{S_e} + p_i^{G_e} + p_i^{R_e} = 1$, 疾病的爆发阈值取得最大值;从式(33)看出,当疾病传播层达到无疾病的平衡状态时,情绪传播层的稳态求解与疾病传播层的动力学及结构无关。

2 耦合传播模型仿真分析

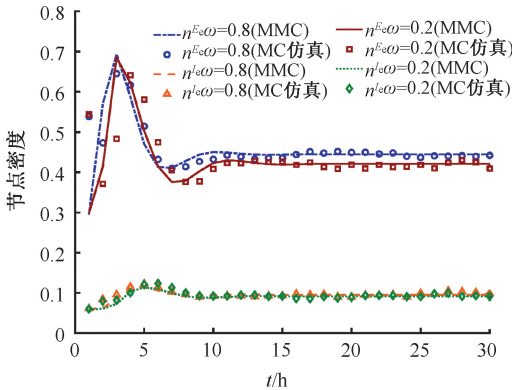
仿真分析传染病-负面情绪耦合传播模型,重点研究疾病传播对负面情绪扩散规模的影响。采用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo, MC)与MMC理论方法,在2类典型网络结构中进行:上层疾病传播使用平均度为5的Erdős-Rényi random(ER)网络,模拟现实中的随机接触;下层情绪传播采用幂指数为3的Barabási-Albert(BA)无标度网络,体现社交媒体的异质传播特征。为降低随机误差,每组试验重复100次,结果取平均值。为量化传播动态,定义情绪网络中感染、传播和引导者的密度,分别为 n^{E_e} 、 n^{I_e} 和 n^{G_e} , 疾病网络中潜伏者与感染者的密度分别为 n^E 和 n^I 。

2.1 传染病感染概率对负面情绪传播的影响

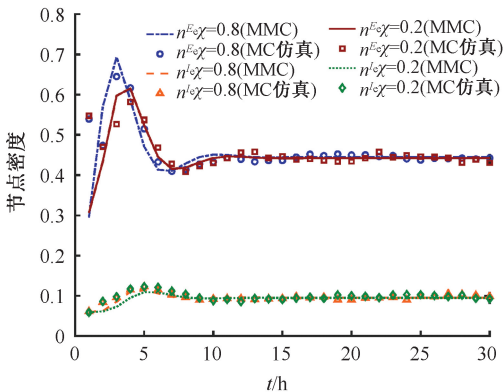
图7为 ω 与 χ 不同参数组合下负面情绪传播规模的演化特征,MC仿真结果与MMC理论曲线基本吻合。分析表明:降低 ω 主要减少系统中 E_e 态的稳态比例,而对 I_e 态的演化趋势及负面情绪的最大扩散规模影响有限;降低 χ 则显著降低 E_e 态在传播高峰时的最大规模,但对其稳态比例及 I_e 态变化趋势作用较小。整体来看,调整传染病感染概率对负面情绪传播规模的影响相对有限。分析表明:在疫情防控中,降低传染病感染概率虽有助于抑制负面情绪的传播峰值,但一旦形成恐慌蔓延的高峰,仅靠此单一措施难以迅速控制其扩散。这提示后真相时代的公共卫生治理需兼顾疾病防控与认知生态修复。仅控制疾病传播不足以阻断负面情绪蔓延,还需配合情绪疏导、心理韧性培养等精细化干预策略。此外,面对疫情后期或长期不确定性,应加强社会支持体系建设,推动情绪管理从应急干预向长期稳定性维护转变。

2.2 传染病自发感染与治愈概率对负面情绪传播的影响

图8为自发感染概率 θ 对疾病-情绪耦合传播的动态影响,MC仿真与MMC理论结果吻合良好。随着 θ 值的增大,疾病潜伏期缩短, E 态节点比例显著下降, I 态节点比例同步上升,表明疾病传播加速。这一变化进一步引发 E_e 态与 I_e 态节点比例的增加。这一现象揭示了疾病传播与负面情绪传播之间的间接关系:传染病传播的加速不仅直接影响感染个体的数量,还通过改变网络中不同状态节点的



(a) 不同 ω 下负面情绪传播趋势



(b) 不同 χ 下负面情绪传播趋势

图7 ω 与 χ 不同组合下负面情绪传播趋势

Fig.7 Negative emotion propagation trends under different combinations of ω and χ

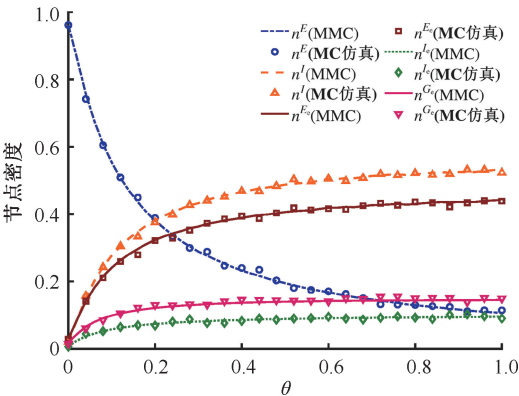


图8 各状态节点在网络中随 θ 的演化过程

Fig.8 Evolution process of each state node with θ

图9为治愈率 γ 对疾病-情绪耦合传播的影响。随着 γ 增大,疾病传播层中 I 态比例下降,群体免疫逐步形成,情绪层中 G_e 比例显著上升。 E_e 态比例呈现非单调变化: γ 较低时($\gamma \leq 0.4$), I 态积累促使 I_e 向 E_e 退化,造成 E_e 短期增加; γ 进一步提高后($0.4 < \gamma \leq 0.6$),更多康复个体转为 G_e ,推动 I_e 向

E_e 与 G_e 双向转化, E_e 达到峰值后下降;当 γ 超过临界值($\gamma > 0.6$), G_e 密度超过15%,形成正向信息级联, I_e 进入指数衰减,实现情绪群体免疫。

该过程揭示了2阶段机制:一是情绪代谢存在迟滞, I_e 向 G_e 转化需经 E_e 中间态,导致情绪净化速率滞后于疾病治愈速率;二是引导者需达到密度阈值才能引发情绪传播链崩溃。分析参数表明: γ 对情绪传播的调控效率高于其对疾病传播的影响,说明治愈率提升不仅抑制疾病传播,还可通过重构情绪传播路径实现认知生态的协同优化。

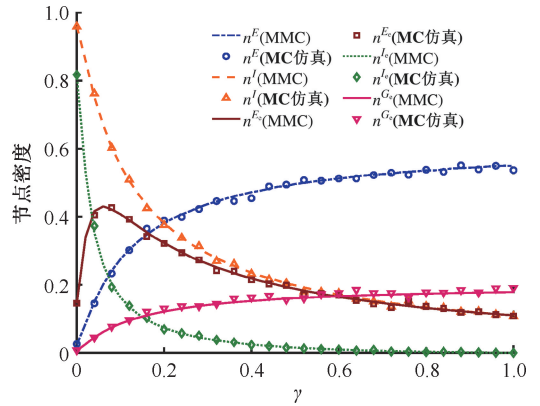


图9 各状态节点在网络中随 γ 的演化过程

Fig.9 Evolution process of each state node with γ

图10为通过双参数耦合分析得到的潜伏期 $1/\theta$ 与治愈率 γ 对负面情绪传播规模的联合调控效应。以 E_e 和 I_e 态节点总占比 $N(\infty)$ 作为负面情绪扩散规模的衡量指标,MMC理论结果(图10a)与MC仿真结果(图10b)呈现良好一致性。研究显示,当 γ 值较低时($\gamma \leq 0.4$), θ 的变化对 $N(\infty)$ 影响微弱。虽然延长潜伏期可减缓情绪传播速率,但由于免疫屏障缺失,系统仍维持高传播规模状态。当 γ 超过临界阈值后($\gamma > 0.6$),增大 θ 会导致 $N(\infty)$ 阶段性上升,但其整体传播规模已受到显著限制。以上分析表明:传染病潜伏期 $1/\theta$ 对负面情绪扩散规模的影响取决于免疫能力 γ 的大小。具体而言, γ 值越大,负面情绪在网络中的扩散规模越小,进一步验证了免疫能力的增强在一定程度上抑制了负面情绪的传播。

2.3 个体防疫配合度对负面情绪传播的影响

通过参数 δ 量化个体防疫配合度(δ 越小配合度越高),分析其对负面情绪传播的影响(图11)。结果显示:当 $\delta = 0.2$ 时,负面情绪在 $t = 4$ h时达到峰值69%,稳态时维持在47%左右;而当 $\delta = 0.8$ 时,

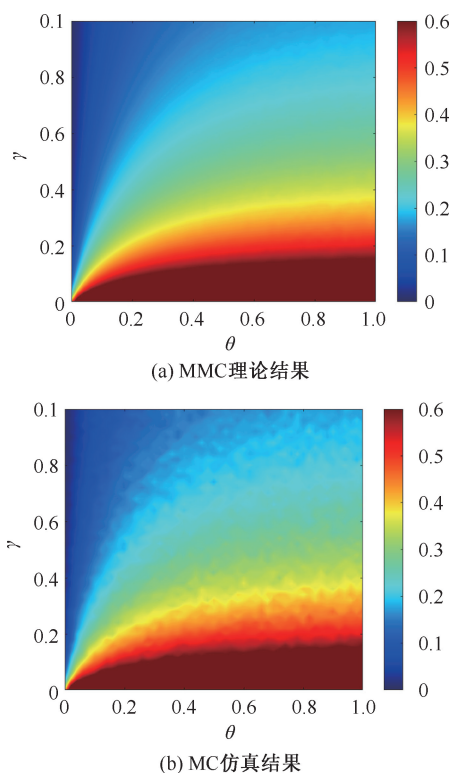


图 10 ER-SF 网络中双参数平面 (θ, γ) 上负面情绪最终扩散规模 $N(\infty)$ 的变化相图

Fig. 10 Phase diagram of final propagation scale $N(\infty)$ of negative emotions in ER-SF network on two-parameter plane (θ, γ)

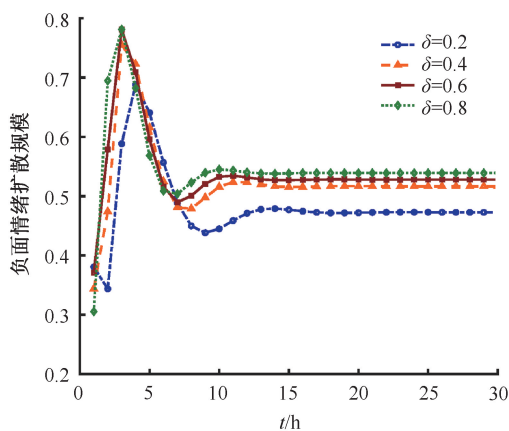


图 11 不同 δ 下负面情绪随时间动态演化趋势

Fig. 11 Temporal evolution trends of negative emotions under different δ values

负面情绪在 $t=2\text{ h}$ 时达到峰值 78%, 最终稳态占比约为 54%。这表明提高防疫配合度可有效减缓负面情绪传播速度并缩小其规模。其作用机制主要体现在 3 个方面: ①通过降低接触感染概率, 从物理层面阻断传播链; ②促进群体行为趋同, 强化社会规范, 构建正向信息生态; ③提升群体理性评估能力, 矫正认知偏差, 降低恐慌性。

3 结 论

1) 传染病的蔓延显著加剧了负面情绪扩散, 降低疾病传播率虽可缩减情绪传播总体规模, 但对传播峰值抑制有限; 相比之下, 缩短传染病潜伏期与提高治愈率可显著调控负面情绪扩散的速度与峰值规模, 二者构成情绪传播动力学的关键序参量, 为解析群体心理危机的时变演化规律提供了动力学解释框架。

2) 疾病传播与情绪扩散的双阶段交互机制为: 情绪代谢滞后效应导致负面情绪的消退过程明显慢于疾病治愈进程; 同时, 情绪引导者的密度需达到临界阈值方能产生有效的抑制作用, 从而形成“情绪代谢迟滞效应”与“引导者密度阈值效应”的复合传播特征。这为精准实施情绪干预与引导策略提供了理论支撑。

3) 提高个体防疫配合度可通过阻断传播链、强化社会规范及矫正认知偏差 3 条路径实现, 从而有效延缓负面情绪扩散并缩小其传播规模。这表明: 公共安全治理应从单一的强制防控转向以公众自愿参与、心理韧性培育与社会规范建设为核心的综合治理模式, 构建危机情境下更具适应性与韧性的社会应对体系。

4) 未来研究可进一步引入信息传播、政策干预及媒介舆情等外部因素, 深化对多维风险耦合机制的理解, 发展更精准的预测与干预模型, 以提升社会治理体系的智能化与韧性水平。

参 考 文 献

[1] SIBLEY C G, GREAVES L M, SATHERLEY N, et al. Effects of the COVID-19 pandemic and nationwide lockdown on trust, attitudes toward government, and well-being [J]. American Psychologist, 2020, 75(5): 618–630.

[2] LUO Huiting, LUO Dan, TANG Qiao, et al. The combined impact of social networks and connectedness on anxiety,

- stress, and depression during COVID-19 quarantine: a retrospective observational study [J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11; DOI: 10.3389/fpubh.2023.1298693.
- [3] WANG Jianghao, FAN Yichun, PALACIOS J, et al. Global evidence of expressed sentiment alterations during the COVID-19 pandemic [J]. *Nature Human Behaviour*, 2022, 6(3): 349–358.
- [4] 王甜甜, 刘铁忠, 李聪聪. “社会强化-个体调节”双重机制影响下突发公共危机事件网络负面情绪传播模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2025, 65(6): 1 040–1 049.
WANG Tiantian, LIU Tiezhong, LI Congcong. Modeling the spread of negative emotions in social networks during sudden public crisis events: dual mechanisms of social reinforcement and individual regulation [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2025, 65(6): 1 040–1 049.
- [5] 汪祚军, 侯怡如, 匡仪, 等. 群体共享情绪的放大效应[J]. *心理科学进展*, 2017, 25(4): 662–671.
WANG Zuojun, HOU Yiru, KUANG Yi, et al. Amplification effect of collective shared emotions [J]. *Advances in Psychological Science*, 2017, 25(4): 662–671.
- [6] ZHANG Kebo, HONG Xiao, HAN Yuexing, et al. Combined effects of information dissemination and resource allocation on spatial spreading of the epidemic [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2025, 137; DOI: 10.1016/j.apm.2024.115672.
- [7] WANG Zhishuang, XIA Chengyi. Co-evolution spreading of multiple information and epidemics on two-layered networks under the influence of mass media [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 102: 3 039–3 052.
- [8] 魏静, 丁乐蓉, 朱恒民, 等. 全媒体时代基于情感和耦合网络的舆情传播模型研究[J]. *情报杂志*, 2020, 39(8): 110–116.
WEI Jing, DING Lerong, ZHU Hengmin, et al. Research on the model of public opinion communication based on emotion and coupling network in the Omnimedia rea[J]. *Journal of Intelligence*, 2020, 39(8): 110–116.
- [9] ZHU Xuzhen, LIU Yuxin, WANG Xiaochen, et al. The effect of information-driven resource allocation on the propagation of epidemic with incubation period [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 110(3): 2 913–2 929.
- [10] HUO Liang'an, WU Bingjie. Studying the co-evolution of information diffusion, vaccination behavior and disease transmission in multilayer networks with local and global effects [J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(3): 774–786.
- [11] YOU Xuemei, ZHANG Man, MA Yinghong. Emotion-based epidemic dynamics coupling information with diseases in multiplex networks [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(22): 21 351–21 370.
- [12] 于跃, 霍良安. 多层网络中的信息-行为-资源-疾病耦合传播模型研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(10): 3 386–3 399.
YU Yue, HUO Liang'an. Coupled propagation model of information-behavior-resource-disease in multilayer networks[J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2024, 44(10): 3 386–3 399.
- [13] ZHANG Zehui, ZHU Kangci, WANG Fang, et al. Effects of isolation and information dissemination on epidemic dynamics in multiplex networks [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2025, 199; DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116889.



作者简介: 王甜甜 (1994—), 女, 山东德州人, 博士, 讲师, 主要从事风险分析与应急管理等方面的研究。E-mail: wangtiantian@njtech.edu.cn。