

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 03. 001

复杂流域水资源系统风险多链路网络 研究(Ⅱ):风险传播

冯仲恺^{1,2,3},高浩宇^{1,2,3},牛文静⁴,王 煜⁵,彭少明⁶,郑小康⁷

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;
3. 河海大学流域水土过程省高校重点实验室,江苏 南京 210098; 4. 长江水利委员会长江水文局,湖北 武汉 430010;
5. 水利部黄河水利委员会,河南 郑州 450003; 6. 水利部水利水电规划设计总院,北京 100120;
7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:为探明流域水资源系统风险传播过程,以风险多链路网络为基础,建立了统筹启动阶段、传播阶段、消退阶段的风险传播模型,提出了节点风险灵敏指数、链路承载风险量、网络风险扩散指数及网络结构脆弱性指数等风险传播指标,并进一步分析了典型年下的网络风险传播,构建了介数防控、度值防控、节点风险灵敏指数防控、随机防控等风险防控策略。结果表明:节点风险灵敏指数与节点负荷增量呈正相关关系;链路承载风险量与传播次数呈负相关关系,与风险源负荷增量呈正相关关系;一般情况下,网络风险扩散指数呈先增大后减小趋势,网络结构脆弱性指数呈持续衰减趋势,而且二者随消退系数、负荷保留系数动态变化;典型年情景下,特枯年、枯水年的网络风险传播指标变化较为显著;在减缓风险扩散程度时,防控效果由好到差依次为介数防控、度值防控、节点风险灵敏指数防控、随机防控、无防控策略,即优先调控介数中心性较大的关联要素可以降低网络风险传播速率;在削减风险节点数量时,防控效果由好到差依次为节点风险灵敏指数防控、随机防控、介数防控、度值防控、无防控策略,即优先调控节点风险灵敏指数较高的关联要素可以降低网络结构脆弱性。

关键词:水资源系统;风险多链路网络;风险传播;复杂网络分析;黄河流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)03 - 0001 - 012

Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (Ⅱ): risk propagation// FENG Zhongkai^{1,2,3}, GAO Haoyu^{1,2,3}, NIU Wenjing⁴, WANG Yu⁵, PENG Shaoming⁶, ZHENG Xiaokang⁷ (1. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Key Laboratory of Soil and Water Process in Watershed, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China*; 5. *Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China*; 6. *General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China*; 7. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: To investigate the risk propagation process of the watershed water resources system, a risk propagation model was established based on a risk multi-link network, which includes the coordinated initiation stage, propagation stage, and dissipation stage. Risk propagation indicators, such as node risk sensitivity index, link carrying risk, network risk diffusion index and network structure vulnerability index, were proposed. Through these indicators, the comprehensive analysis of network risk propagation under typical hydrological years was conducted. And risk prevention strategies were constructed, such as betweenness control, degree control, node risk sensitivity index control, and random control. The results indicate that there is a positive correlation between the node risk sensitivity index and the node load increment. The risk carried by the link is negatively correlated with the number of transmissions, and positively correlated with the increase in load of the risk source. In general, the network risk diffusion index shows a first increasing and then decreasing trend, while the network structure vulnerability index shows a continuous decreasing trend, and both dynamically change with the attenuation

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52379009,52441901);江苏省优秀青年基金项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会水利青年科技英才项目(JHYC202310);湖北省自然科学基金三峡联合基金项目(2023AFD203);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152E2)

作者简介:冯仲恺(1988—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:myfellow@163.com

coefficient and load retention coefficient. Under typical hydrological years, risk propagation indicators change significantly in extremely dry years and dry years. When slowing down the spread of risks, the prevention and control effects are ranked from good to poor as betweenness centrality prevention and control, degree value prevention and control, node risk sensitivity index prevention and control, random prevention and control, and no prevention and control strategies, which means prioritizing the regulation of the correlation elements with high betweenness centrality can reduce the spread rate of network risks. When reducing the number of risk nodes, the order of prevention and control effectiveness from good to poor is node risk sensitivity index prevention and control, random prevention and control, betweenness prevention and control, degree value prevention and control, and no prevention and control strategy. This indicates that prioritizing the control of associated elements with high node risk sensitivity index can reduce the vulnerability of network structure.

Key words: water resources system; risky multi-link network; risk propagation; complex network analysis; the Yellow River Basin

流域水资源系统关联要素数量众多、来源广泛、随机性强^[1-2],并通过串联、并联、混联等链路形式影响系统安全,呈牵一发而动全身的特征,给水资源系统风险管理带来严峻挑战^[3]。已有研究多从静态视角开展风险分析^[4-5],较少精细刻画和描述关联要素在复杂网络中的动态风险传播过程,难以满足变化条件下流域水安全保障需求。作为描述和理解现实世界中复杂系统的有力工具^[6],复杂网络被国内外学者广泛用于研究多维要素耦合作用^[7-9],在金融风险识别等领域取得了丰硕成果^[10-11],也为水资源系统风险分析提供了新思路。例如:胡立伟等^[12]将交通拥塞因子抽象为病毒感染比例因子,采用传染病(susceptible infected recovered, SIR)模型模拟了复杂交通网络风险扩散过程,取得了较好效果;Hao等^[13]将病毒传播理论与复杂网络理论相结合,解析了产业链网络系统的风险传播机制,助力制定科学决策;马书红等^[14-15]运用复杂网络理论构建了城市群多模式多层次交通网络模型,研究了风险扩散下城市群交通网络韧性演化特性。因此,以复杂网络为基础,探明多维要素的风险传播机制,提高水资源系统风险防控能力,能够切实服务流域高质量发展。

在现实世界中,不同子系统所辖关联要素均会直接或间接影响水资源系统特性,当某些关联要素发生风险时,会通过一定的传播机制和级联效应感染其他节点或链路,使得风险在复杂网络(流域水资源系统)中发生传导和扩散,导致水资源供需失衡、引发水危机等严重灾害^[16-17]。为此,本文参照灾害链相关成果^[18],将危机演化过程的驱动力称为能量,将风险在关联要素中的分配结果称为负荷,将风险视为水资源系统关联要素发生危机的概率及其负荷增量的组合。其中,负荷常用于供需水失衡研究^[19]、水质污染控制^[20]等,当负荷较大时,表明系统积攒了较多能量,更易引发严重危害。本文基于论文(I)部分^[21]构建的复杂流域水资源系统风险多链路网络,利用复杂网络理论建立风险传播模型,确定风险传播评价指标,解析风险传播过程,提出风

险防控策略,以期为应对复杂流域水资源系统风险问题提供理论依据。研究框架如图 1 所示。

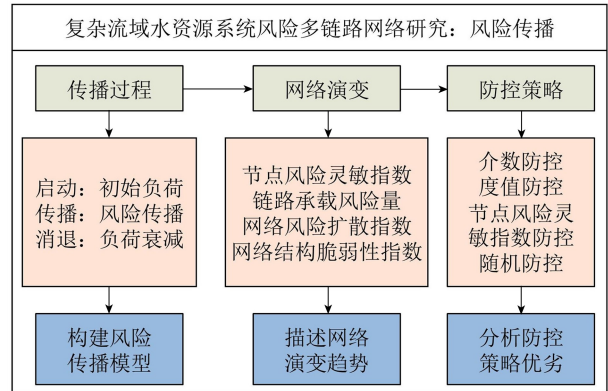


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

1 风险传播指标确定

1.1 指标含义

针对水资源系统风险问题,王红瑞等^[22]认为水资源系统风险产生和存在的必要条件是风险源和承险体,即风险是风险源的危险性和承险体的脆弱性共同作用的结果。①在风险源的危险性方面,通常用灾害强度和频率表示。本文将风险源视为复杂网络中不受其他节点干扰(即无父节点)的关联要素,当其受到扰动后,会对后续节点造成影响,因此单次节点风险传播过程中的风险源为开启传播的父节点,承险体为接收扰动的子节点;危险性的灾害强度和频率则分别通过节点的负荷和传播概率予以体现。②在承险体的脆弱性方面,通常用敏感性和抗压力表示^[23]。其中,敏感性是指某一要素变化引起另一要素的变化率,采用风险敏感度表示;抗压力则是与水资源承载力相关的指标,采用安全承载阈值表示。③在多链路网络中,“传播”是风险从节点到节点的过程,凸显节点关联性和风险流动性;而“演变”则是针对网络风险变化过程,凸显网络整体性和系统性。综上,为科学描述水资源系统风险传播过程,按照论文(I)部分^[21],将关联要素及其因果

关系分别抽象为节点和边,将一定的节点和边汇集构成的网络结构视为复杂网络,而后确定安全承载阈值、重要性水平等网络特征以及风险、负荷等指标^[24]。风险传播相关指标的含义如表 1 所示。

表 1 风险传播指标含义

指标	含义
节点(关联要素)	影响水资源系统特性的不同对象(要素)
边(链路)	表征不同节点(关联要素)的因果联系
复杂网络	由一定的节点和边汇集构成的网络结构
危机	风险积聚到一定程度的结果,通常会对自然或社会造成一定的破坏
风险	水资源系统关联要素发生危机的概率及其负荷增量的组合
能量	危机事件演化过程的驱动力
负荷	危机事件发生时关联要素承载的能量
概率	危机事件发生的可能性
风险状态	若节点指标超出安全承载阈值,则处于风险状态,否则为安全状态
安全承载阈值	触发系统改变其内部结构和外在特征的阈值
超载负荷	超过其安全承载阈值的负荷部分
重要性水平	表示对节点的重视程度,通常节点与其他节点的关系越多,重要性水平就越高
风险敏感度	反映要素对风险传播的敏感程度,通常节点的通行路径越多,风险敏感度就越高
初始负荷	节点在风险传播开始前所具有的负荷
节点风险传播过程	风险从父节点传播至子节点的过程,包括启动阶段、传播阶段和消退阶段
网络风险传播过程	风险传播遍历复杂网络所有节点的过程,通常包括若干次节点风险传播过程

1.2 重要性水平

在水资源系统中,部分关联要素(如总降水量、断面流量)作为节点与其他节点的因果关系密切,更易发生风险,需要加强对此类节点的防护。因此,利用重要性水平反映节点在网络中的重要程度,计算公式为

$$\lambda_i = NK_i \Big/ \sum_{j \in V_G} K_j \tag{1}$$

式中: λ_i 为节点 i 的重要性水平; N 为网络节点数量; V_G 为网络 G 下的节点集合; K_i 为节点 i 的度。

1.3 安全承载阈值

节点指标超过某一阈值时会改变内部结构或外在特征,进而引发风险传播。因此,安全承载阈值是节点抵抗风险、保障水资源系统安全的临界值^[25],计算公式为

$$C_{Ti} = (1 + \lambda_i)K_{outi} + \sum_{j \in \varphi_i} (1 + \lambda_j)K_{outj} / n_{\varphi_i} \tag{2}$$

式中: C_{Ti} 为节点 i 的安全承载阈值; K_{outi} 为节点 i 的出度; φ_i 为节点 i 的父节点集合; n_{φ_i} 为集合 φ_i 的元素数量。

1.4 风险状态

在第 m 次节点风险传播过程中,节点 i 在 t 时

刻的状态记为 S_{mit} 。若负荷量超过安全承载阈值,则为风险状态,记为风险节点;反之为安全状态,记为安全节点。表达式为

$$S_{mit} = \begin{cases} 1 & L_{mit} > C_{Ti} \\ 0 & L_{mit} \leq C_{Ti} \end{cases} \tag{3}$$

式中 L_{mit} 为第 m 个节点风险传播过程中节点 i 在 t 时刻的负荷量。

1.5 风险敏感度

在复杂网络中,部分节点承担着关键桥梁和枢纽作用,对水资源系统风险传播过程具有重要影响。换言之,当这些节点负荷发生变化时,更易影响后续节点。因此,利用介数中心性指标描述节点风险敏感度,计算公式为

$$\psi_i = C_{bi} \Big/ \sum_{j \in V_G} C_{bj} \tag{4}$$

式中: ψ_i 为节点 i 的风险敏感度; C_{bi} 为节点的介数中心性。

2 风险传播过程

将风险传播过程划分为启动阶段、传播阶段和消退阶段。其中,启动阶段主要计算节点初始负荷,判断节点是否为风险节点;传播阶段是父节点向子节点传播负荷的阶段,包括风险传播概率计算、子节点负荷分配及父节点负荷更新;消退阶段描述了节点的负荷衰减过程,同时开始下轮次节点传播过程。

2.1 启动阶段

初始负荷是指节点在风险传播开始时便具有的负荷,与安全承载阈值、重要性水平等指标有关,计算公式为

$$L_{mit} = \begin{cases} C_{Ti} \left(1 + \sum_{k \in \varphi_i} \lambda_k \right) / \left(\lambda_i + \sum_{k \in \varphi_i} \lambda_k \right) & m = 0, 1 \\ L_{(m-1)t_f} & m > 1 \end{cases} \tag{5}$$

式中 t_f 为一次节点传播阶段结束的時刻。

需要说明的是,水资源系统风险多链路网络在启动阶段进行首次传播的父节点为网络的风险源节点(即无父节点的节点,可能为 1 个或者多个),后续风险传播的父节点为上次传播过程中接收负荷的子节点。

2.2 传播阶段

2.2.1 风险传播概率

节点 j 转为风险节点的概率通常由自身特征和关联节点决定。当节点自身具有较大风险敏感度或与其他节点的联系密切时,二者均会导致风险传播更频繁。因此,节点 i 向节点 j 的风险传播概率计算公式为

$$P_{ij} = \lambda_j \psi_j / \sum_{k \in \theta_i} \lambda_k \psi_k \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为节点 i 向节点 j 的风险传播概率, 取值范围为 $0 \sim 1$; θ_i 为节点 i 的子节点集合。

对任一节点 j 而言, 所有与之相连的父节点都可能导致节点 j 产生风险, 因此其风险传播概率需要统筹节点 j 的所有父节点的影响, 计算公式为

$$f_{mj(t+1)} = 1 - \prod_{i \in \varphi_j} (1 - P_{ij} f_{mit}) \quad (7)$$

式中: $f_{mj(t+1)}$ 为第 m 个节点风险传播过程中, $t+1$ 时刻节点 j 转为风险节点的概率; f_{mit} 为第 m 个节点风险传播过程内, t 时刻节点 j 的父节点 i 转为风险节点的概率。

2.2.2 节点负荷传播

a. 子节点负荷分配。在复杂网络理论中, 当父节点负荷超过其安全承载阈值时, 会将自身超载负荷传播到所有与之相连的子节点, 各子节点接收父节点传递的负荷总量与二者之间的因果强度密切相关。因此, 采用论文(I)部分^[21]中的传递熵关系来定量评估父、子节点之间的因果强度(即负荷分配比例), 计算公式为

$$u_{ij} = H_{ij} / \sum_{k \in \theta_i} H_{ik} \quad (8)$$

式中: u_{ij} 为节点 i 对节点 j 的因果强度; H_{ij} 为节点 i 到节点 j 的传递熵。若父节点 i 的负荷 L_{mit} 未超过其安全承载阈值 C_{Ti} , 则不会发生负荷变化和传播, 此时有 $L_{mi(t+1)} = L_{mit}$; 否则, 若 L_{mit} 超过 C_{Ti} , 父节点 i 超出安全承载阈值的负荷(记为超载负荷)会传播到子节点 j , 记为

$$\Delta L_{mijt} = (L_{mit} - C_{Ti}) u_{ij} \quad (9)$$

式中 ΔL_{mijt} 为第 m 个节点风险传播过程中, t 时刻由父节点 i 传播至子节点 j 的超载负荷。在接收到所有父节点的超载负荷后, 子节点 j 的负荷总量记为

$$L_{mj(t+1)} = L_{mjt} + \sum_{k \in \varphi_j} \Delta L_{mkjt} f_{mkj(t+1)} S_{mkt} \quad (10)$$

b. 父节点负荷更新。在发生负荷传递后, 父节点的负荷会有所损耗, 但通常不会立刻完全消失。因此, 本文认为当风险节点传播结束后, 仍会保留一定比例超载负荷, 此时父节点 i 给所有子节点传播对应的超载负荷后, 自身的负荷总量变为

$$L_{mi(t+1)} = C_{Ti} + v(L_{mit} - C_{Ti}) \quad (11)$$

式中: $L_{mi(t+1)}$ 为父节点 i 在第 m 个节点风险传播过程内, $t+1$ 时刻的负荷量; v 为负荷保留系数, 反映节点极限承载程度。特别地, 若 $v=0$, 表明节点在传播完成后负荷消减至安全承载阈值; 若 $v=1$, 表明风险传播前后父节点负荷不变。

2.3 消退阶段

在水资源系统风险传播过程中, 可通过外部作用(如政策引导、市场调控、生态修复等)进行干预, 从而使节点负荷量逐步衰减, 恢复到理想状态, 保障水资源系统安全。因此, 本文引入消退系数 e (取值范围为 $0 \sim 1$), 则节点 i 的负荷总量为

$$L_{mi(t+1)} = L_i^* + (1 - e)(L_{mit} - L_i^*) \quad (12)$$

式中 L_i^* 为节点 i 的理想状态负荷量。特别地, 若消退系数 $e=0$ 时, 节点无消退阶段, 此时相邻阶段的负荷总量保持不变。

图2为上述网络风险传播具体流程, 图3为网络风险传播示意图, 展示了两轮网络风险传播过程中的节点负荷及风险状态变化。首先是节点 A→节点 B 风险传播过程: 启动阶段——计算得到节点 A 和 B 的初始负荷, 传播阶段——节点 A 的部分负荷传递至节点 B, 消退阶段——节点 A 和 B 负荷逐步衰减; 接下来是下一轮次节点风险传播过程, 即节点 B→节点 C 风险传播过程。综上所述, 复杂流域水资源系统多链路网络的风险传播过程具体为: ①识别出没有父节点的关联要素作为风险源节点集合, 根据网络特征指标计算各个风险源节点的重要性水平、风险敏感度、安全承载阈值等; ②推算各个风险源节点的初始负荷并判定是否发生风险传播, 若负荷未超过安全承载阈值, 则直接进入消退阶段, 否则将发生风险传播, 此时根据节点特征和传递熵计算其所辖子节点成为风险节点的概率、负荷增量等信息, 随后进入消退阶段; ③将所有接收风险的子节点依次作为传播风险的父节点, 更新所有节点初始负荷, 重复上述步骤直至完成网络风险传播过程。

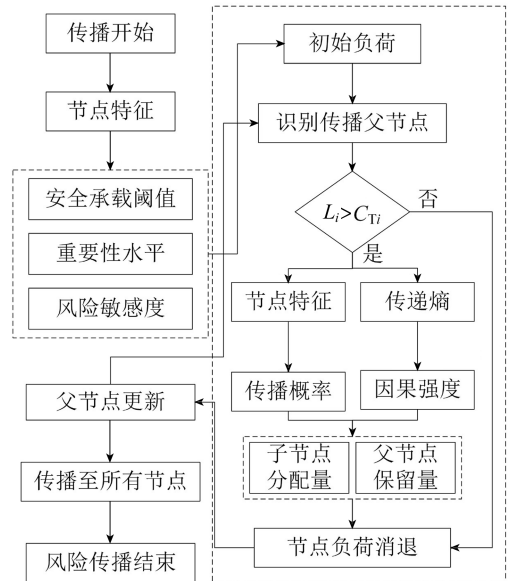


图2 网络风险传播流程

Fig. 2 Network risk propagation process

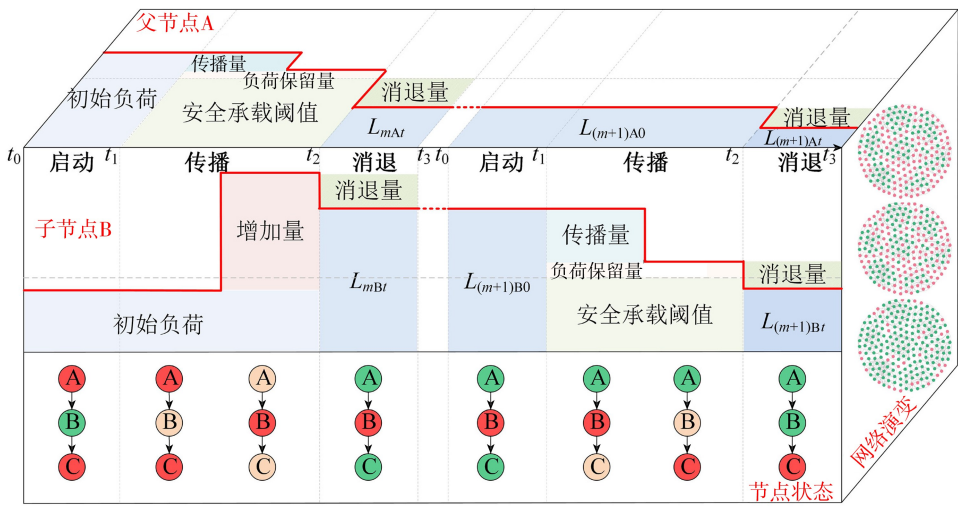


图3 网络风险传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of network risk propagation

3 风险传播指标计算

3.1 节点风险传播指标

节点风险灵敏指数用于评价节点负荷变化对其他节点的影响程度,其值越大,表明该节点负荷微调亦会引发风险传播,对其他节点造成显著影响,计算公式为

$$I_{Si} = (\Delta L_i / L_i) \sum_{j \neq i, j \in V_G} |\Delta L_j| / L_j \quad (13)$$

式中: I_{Si} 为节点 i 的风险灵敏指数; L_i 、 L_j 分别为节点 i 、 j 的负荷; ΔL_i 、 ΔL_j 分别为节点 i 、 j 的负荷增量。

3.2 链路风险传播指标

链路承载风险量用于评价边在复杂网络中的风险传播能力,其值越大,表明链路传递的负荷量更多,计算公式为

$$R_{LCij} = \Delta L_{ij} P_{ij} \quad (14)$$

式中: R_{LCij} 为链路 $i \rightarrow j$ 的链路承载风险量; ΔL_{ij} 为节点 i 传播至子节点 j 的超载负荷。

3.3 网络风险传播指标

网络风险扩散指数用于评价节点的风险扩散能力,通常与节点的传播路径总数成正比,即介数中心性越大,传播能力越强,计算公式为

$$I_{RD} = \sum_{i \in V_G} C_{bi} L_i [1 + |L_i - C_{Ti}| / (L_i - C_{Ti})] \quad (15)$$

式中 I_{RD} 为网络风险扩散指数。

网络结构脆弱性指数反映了风险传播对网络整体结构的影响,其值越大,表明风险节点数量越多,网络越趋于脆弱,更易传播风险,计算公式为

$$I_{SV} = h / N [N_d / (N - N_d)] \quad (16)$$

式中: I_{SV} 为网络结构脆弱性指数; N_d 为发生风险的节点数量; h 为网络中最大半连通子图的节点总

数。若节点 i 和节点 j 之间存在因果关系,就称节点 i 和节点 j 是半连通的;若任意两个节点之间都是半连通关系,则该网络为半连通图。

4 结果与分析

按照论文(I)部分^[21]将黄河流域划分为7个水资源分区:龙羊峡以上(分区 I)、龙羊峡-兰州(分区 II)、兰州-河口(分区 III)、河口-龙门(分区 IV)、龙门-三门峡(分区 V)、三门峡-花园口(分区 VI)和花园口以下(分区 VII)。本文将从风险源节点开始,将负荷遍历所有节点的过程视为一次完整的网络风险传播过程。经分析发现,黄河流域水资源系统风险多链路网络依次从所有的风险源出发,经过6次节点风险传播即可将风险传播至所有节点,表明一次完整的网络风险传播过程共涉及6次节点风险传播过程。为对比负荷增量、负荷保留系数及消退系数影响,将初始负荷增加比例(即负荷增量) ΔL 分别设置为: -50%、0、50%、100%、200%、300%、400%、500%;消退系数 e 分别设置为: 0、0.02、0.05;负荷保留系数 v 分别设置为: 0、0.1、0.2、1。同时,将参数中位数作为基准,即风险源负荷增量为300%、 $e=0.02$ 、 $v=0.1$ 。为更全面展现网络的风险传播过程,本文将风险源初始概率设置为 $f_i(0)=0.5$,节点理想状态负荷 $L^*=0$,而后模拟计算得到图4所示的风险演变过程,其中 m 表示经历节点风险传播次数。由图4可见,各分区在不同时间的风险节点分布较均匀,并且在 m 为0、1时风险节点数量较多,前后期演变差距明显,表明风险节点数量降低速度随风险传播次数呈先增后减趋势。分析其原因,一方面,在传播初期与风险源相连的节点较多,风险源增加负荷后,其超载负荷较大,导致网络中风

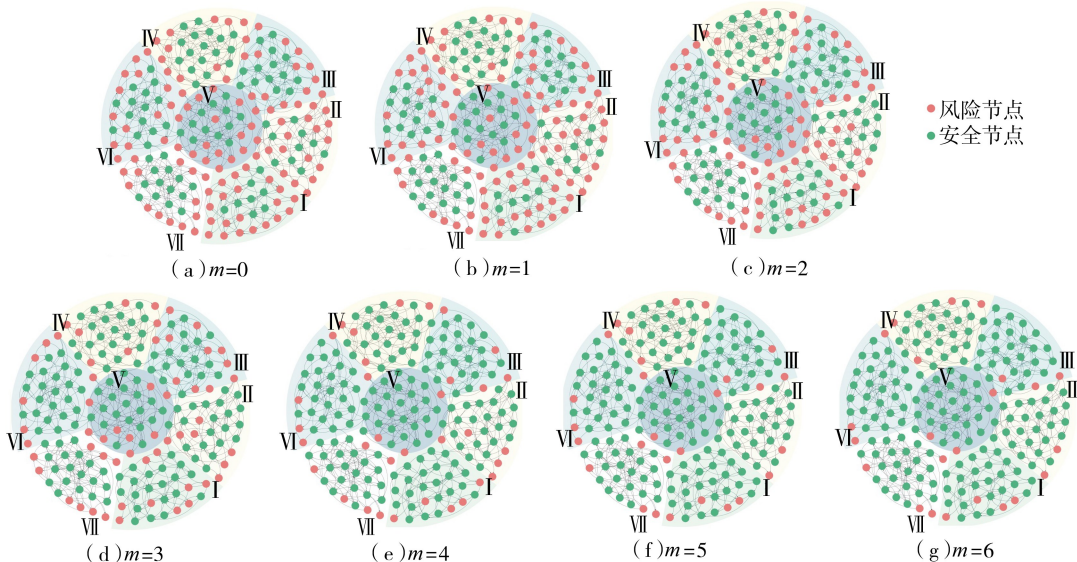


图4 黄河流域网络风险演变过程

Fig. 4 Network risk evolution of the Yellow River Basin

险节点数量增加较多,而消退阶段会使得风险节点负荷衰减,逐步转为安全节点,导致风险节点数量呈减少趋势,因此前期风险节点数量稳定,然后快速降低再次平稳;另一方面,当风险源负荷增加时,系统会根据最短路径原则优先在当前区域内发生传播,而后逐步扩散至其他区域,同时随着时间推移,不同区域的网络结构趋于稳定,使得风险节点分布较均匀。

4.1 节点风险传播指标分析

为进一步分析风险传播过程,首先计算水资源系统风险多链路网络的度、介数中心性等网络特征,然后计算各个节点的重要性水平、安全承载阈值、节点敏感度、初始负荷等指标;在此基础上将节点初始负荷分别按 $-50\% \sim 500\%$ 比例增加,设置不同的消退系数、负荷保留系数,在不同参数组合情景下模拟完成对应的网络风险传播过程,从而计算得到风险传播相关指标。为充分反映节点负荷变化的影响程度,设置 $e=0, v=1$,构建不同节点负荷增量下的风险情景,计算每个节点的风险灵敏指数,结果如图5所示。由图5可见,当负荷增加 -50% 时,节点风险灵敏指数相差不大、整体趋势基本平稳;伴随节点负荷持续增大,部分节点的风险灵敏指数和区分度开始凸显。其中,节点风险灵敏指数较大的关联要素集中在黄河中上游区域(分区I、II、III),包括有效灌溉面积、第三产业增加值和断面出流量等,与论文(I)部分^[21]水资源系统中重要性较高的要素基本吻合,表明黄河流域中上游作为风险多链路网络的源头部分,其特征变化会对下游和水资源系统造成较大影响,更易导致关联要素发生风险。

4.2 链路风险传播指标分析

构建不同风险源负荷增量下的风险情景,设置

$e=0.02, v=0.1$,计算不同阶段的链路承载风险量,结果如图6所示(图中仅筛选了发生传播的链条,因此统计边序号仅为先后关系,与编号无关)。由图6可见,各子图按照风险传播过程划分为6个阶段,在减小负荷时,链路承载风险量在各个阶段的区分并不明显,而且整体承载风险量较低;在增加负荷时,链路承载风险量在传播初期最大,而后随传播时间不断衰减;同时伴随节点负荷增大,链路承载风险量随之增大。此外,链路主要集中在中上游区域(如分区II、III等),大多为涵盖涉水关联要素(如供水管道长度 $\rightarrow$ 地下水资源量、地区生产总值 $\rightarrow$ 断面出流量)的传播链条(表2)。分析其原因,从时间上看,风险随时间延长而逐步衰减,导致链路承载风险量在传播初期较大、后期较小;从空间上看,本文采用从上游到下游的水力联系构建网络,风险从分区I到分区VII依次传播,加之中游地区承上启下、链路交汇频繁,导致部分关联要素的介数中心性较高,更易承载较多的风险量;从对象上看,涉水关联要素是连接水文、社会经济、生态等子系统的纽带,在网络中占据重要位置。此外,各阶段承载风险量链路与论文(I)部分^[21]边介数较高的链路并不完全一致,原因在于:链路承载风险量不仅受由节点介数、度构成的传播概率影响,同时也受父节点负荷影响,因此当某些节点初始负荷较大时,会在很大程度上加大自身及其子节点所在链路承载风险量。

4.3 网络风险传播指标分析

4.3.1 网络风险扩散指数

构建不同风险源负荷增量下的风险情景,设置不同的消退系数和负荷保留系数,计算不同阶段的

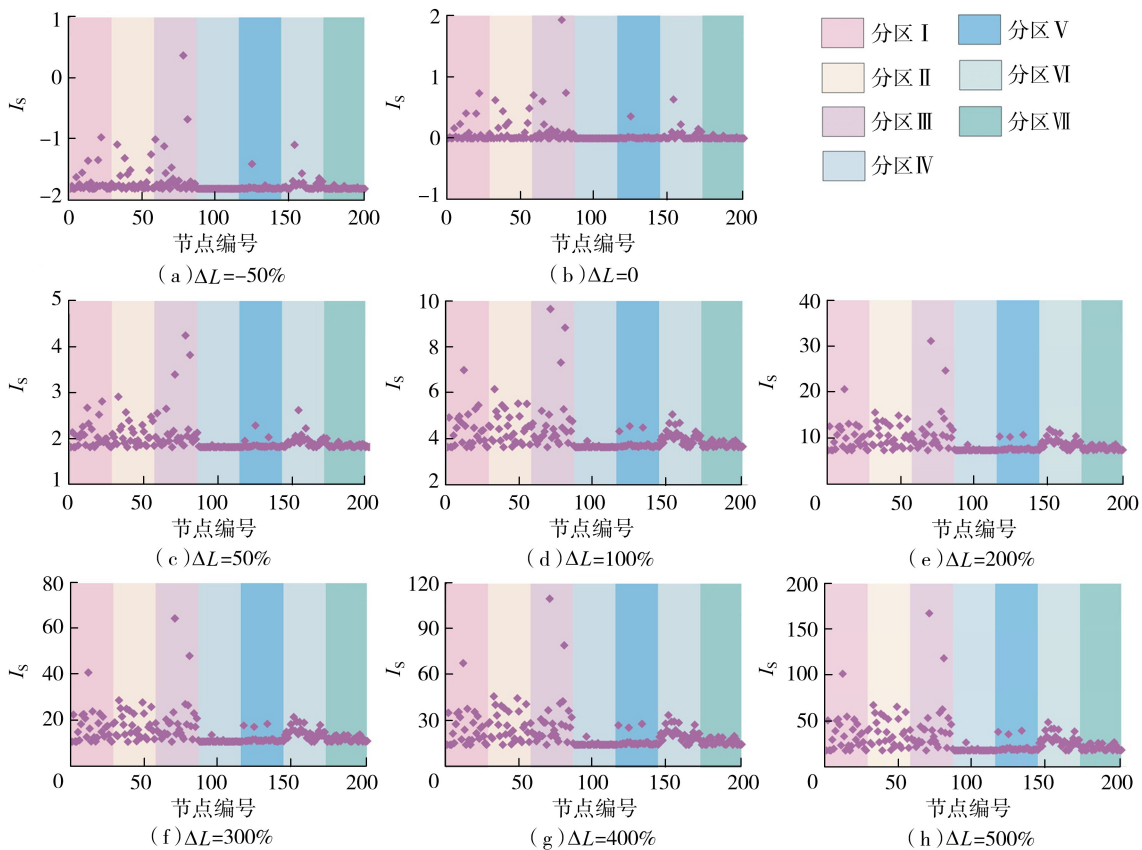


图 5 不同负荷增量下的节点风险灵敏指数

Fig. 5 Node risk sensitivity index under different load increments

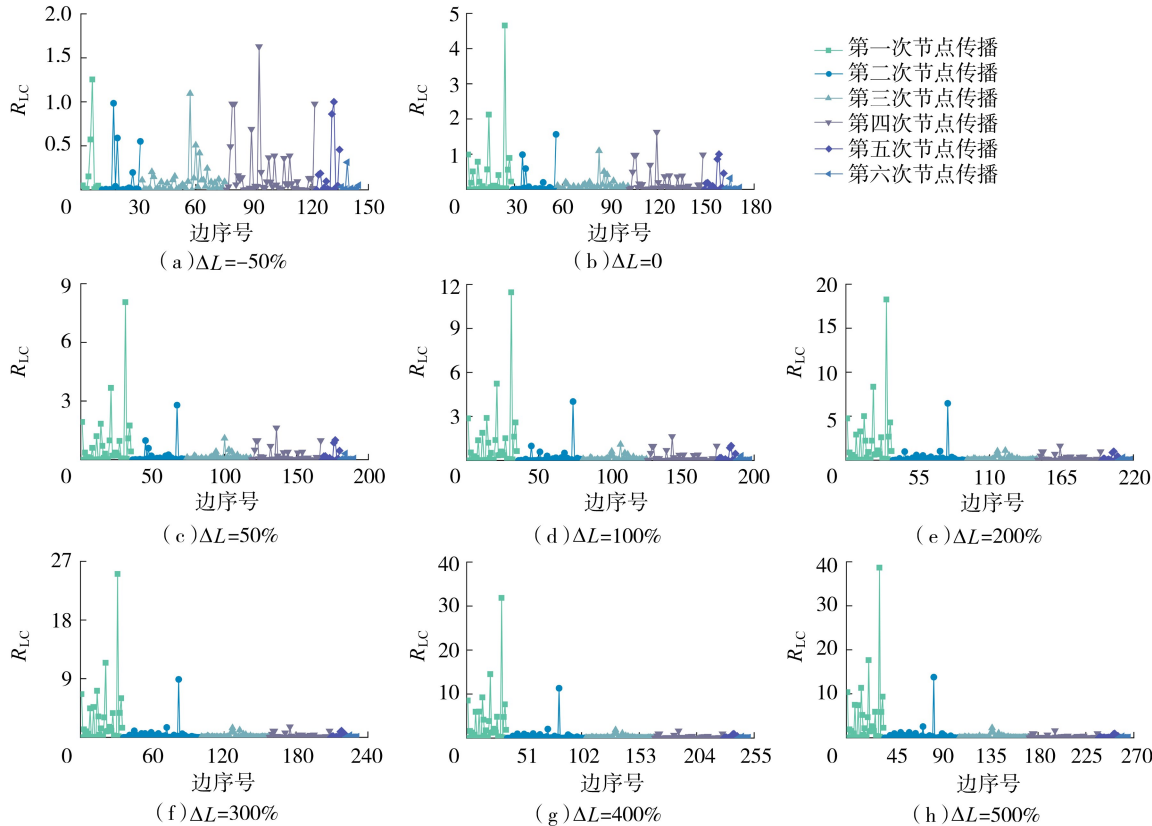


图 6 不同负荷增量下的链路承载风险量

Fig. 6 Link carrying risk under different load increments

表 2 各个阶段最大承载风险量链路

Table 2 Maximum risk-carrying links for each phase

节点传播次数	父节点	子节点
第一次	分区Ⅵ地区生产总值	分区Ⅵ下游断面出流量
第二次	分区Ⅲ农作物总播种面积	分区Ⅲ供水管道长度
第三次	分区Ⅲ供水管道长度	分区Ⅲ地下水资源量
第四次	分区Ⅱ供水生产能力	分区Ⅱ水域面积占比
第五次	分区Ⅲ生境质量指数	分区Ⅲ乡村人口
第六次	分区Ⅳ第一产业增加值	分区Ⅳ供用水量

网络风险扩散指数,结果如图 7 所示。由图 7 可见,负荷增量、消退系数和负荷保留系数都会影响网络风险扩散指数的变化趋势。图 7(e)(f)(h)(i) 存在消退阶段和极限承载的现象,负荷增加时网络风险扩散指数呈先增后减趋势,并在节点传播次数为 1 时达到极值,表明网络在第二次传播前具有较强的风险扩散能力,随后将负荷输送至关联节点,风险传播速率有所下降。网络风险扩散指数与风险源负荷增量呈正相关关系,在风险源节点负荷削减 50% 时,网络风险扩散指数较小,而且随负荷增大而逐渐增大。分析其原因,当负荷增量较大时,网络风险传播扩散较快,导致较多节点转为风险节点;当负荷增量较小时,部分节点会在较短时间内恢复为安全节点,使得风险扩散指数快速减小。网络风险扩散指

数与消退系数呈负相关关系。当消退系数取 0.02 或 0.05 时,网络风险扩散指数在传播末期基本相等,两种情景下该指标分别在第三次和第四次节点风险传播后时趋于收敛,表明消退系数越大,网络风险扩散指数收敛越快。另外,当消退系数为 0,即没有消退阶段,网络风险扩散指数相差较大。分析其原因,当消退系数增大时,节点会迅速减少负荷、较快转为理想状态和安全节点。因此,十分有必要采取措施来降低节点负荷及其传播速率,进而保障水资源系统安全。伴随负荷保留系数增大,即节点极限承载程度增大,网络风险扩散指数整体变化较小,但收敛至相同数值的耗时越长。分析其原因,当负荷保留系数增大时,负荷增量对网络的影响越难以消除,节点难以恢复为安全节点。因此需要高度关注风险节点,降低风险累积。

4.3.2 网络结构脆弱性指数

构建不同风险源负荷增量下的风险情景,设置不同的消退系数和负荷保留系数,计算不同阶段的网络结构脆弱性指数,结果如图 8 所示。由图 8 可见,网络结构脆弱性指数随负荷增量、传播次数动态变化。分析其原因,网络结构脆弱性指数与风险节点数量呈正相关关系,而负荷增量会影响全体节点

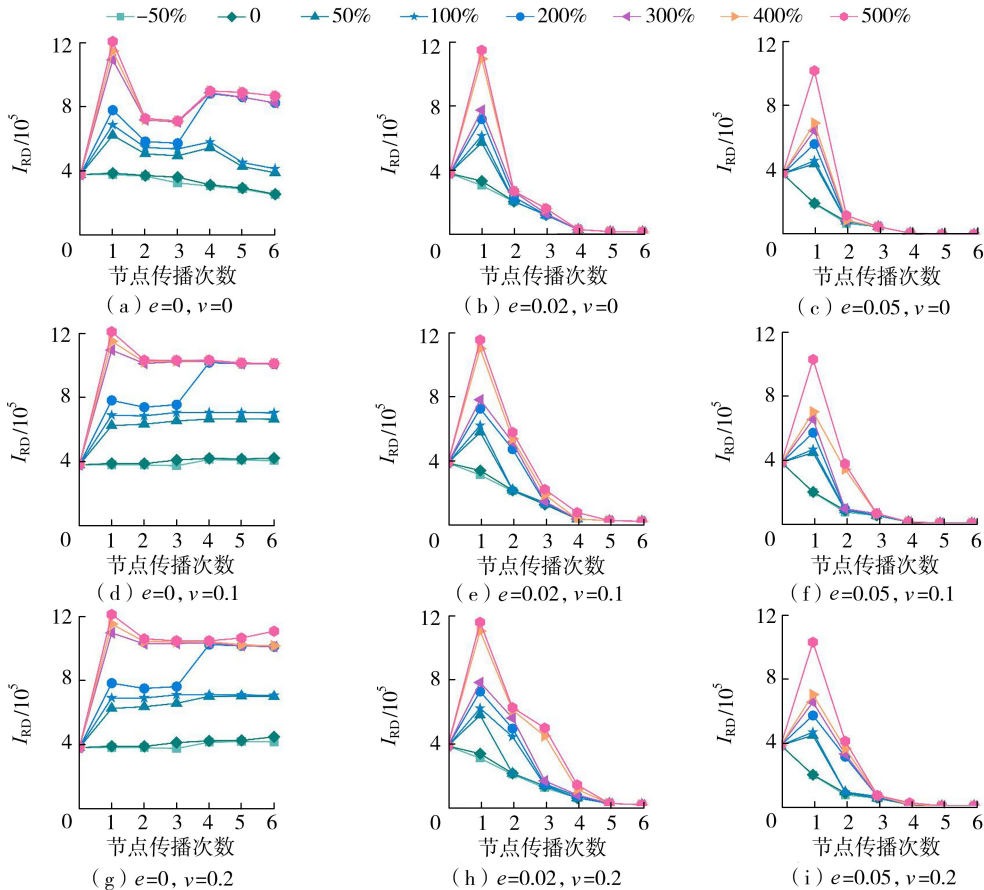


图 7 不同参数设置下网络风险扩散指数变化

Fig. 7 Change in network risk diffusion index under different parameter settings

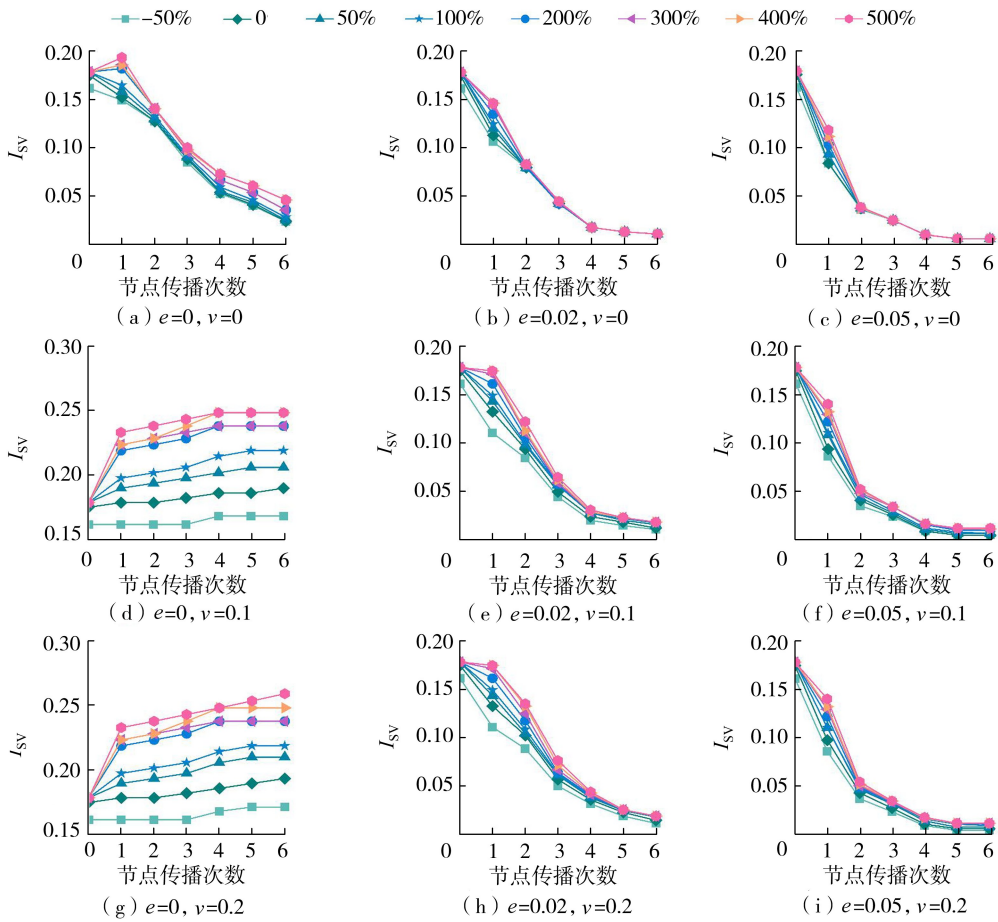


图 8 不同参数设置下网络结构脆弱性指数变化

Fig. 8 Change in network structural vulnerability index under different parameter settings

的负荷,进而影响风险节点数量;负荷传播完成后父节点保留部分超载负荷量,但其负荷仍然高于安全承载阈值,维持风险状态,其子节点可能转变为风险节点,导致网络结构脆弱性上升,而消退阶段使得风险节点逐步转为安全节点,降低网络结构脆弱性。一般情况下,由于消退阶段涉及的节点更多,使得网络结构脆弱性指数呈持续衰减趋势。随着消退系数的增大,网络结构脆弱性指数减小、稳定性逐步增强。例如, $e=0.02$ 情景传播末期的网络结构脆弱性指数大于 $e=0.05$ 的情景而小于 $e=0$ 的情景。特别地,若消退系数为 0,即没有消退阶段,不同负荷增量下网络结构脆弱性指数相差较大,表明消退阶段有利于降低风险节点数量。随着负荷保留系数的增大,网络结构脆弱性指数的衰减速度降低,但在传播结束阶段具有相似结果。分析其原因,负荷保留系数越大,传播末期风险节点越难以转为安全节点,导致网络结构脆弱性衰减速度减缓;在消退系数相同时,不同负荷保留系数情景的节点负荷消退量大致相同,因此传播末期的负荷相似,表明了降低节点负荷累积有利于减缓风险传播速度。

4.3.3 典型年应用

为进一步验证方法有效性,参照王煜等^[26]研究中的径流分析结果选取典型年,分别选取 2002 年、2006 年、2007 年、2012 年作为特枯年、枯水年、平水年、丰水年。采用式 (17) 计算关联要素(如断面流量、地表水资源量)在不同典型年的负荷增量,设置不同的消退系数和负荷保留系数,解析网络风险扩散指数和结构脆弱性指数的传播规律,计算结果见图 9。由图 9 可见,丰水年和平水年的网络风险扩散指数和结构脆弱性指数均小于枯水年、特枯年,而且在传播周期内变化较为平缓,表明水资源充沛情景可有效降低风险节点数量,缓解网络风险扩散和链路传播速度,进而增强水资源系统的稳定性和安全性;特枯年、枯水年的网络风险传播指标变化较为显著,前期变化较大,后期变化较小,表明缺水情景对水资源系统安全会快速造成较大破坏,导致网络失稳并转变为非安全结构,后期伴随风险传播逐步趋于稳定。

$$\Delta L = \tau(\bar{x} - x) / \bar{x} \quad (17)$$

式中: ΔL 为关联要素的负荷增量; x 为关联要素值; $\bar{x}$ 为关联要素多年平均值; τ 为调整系数。

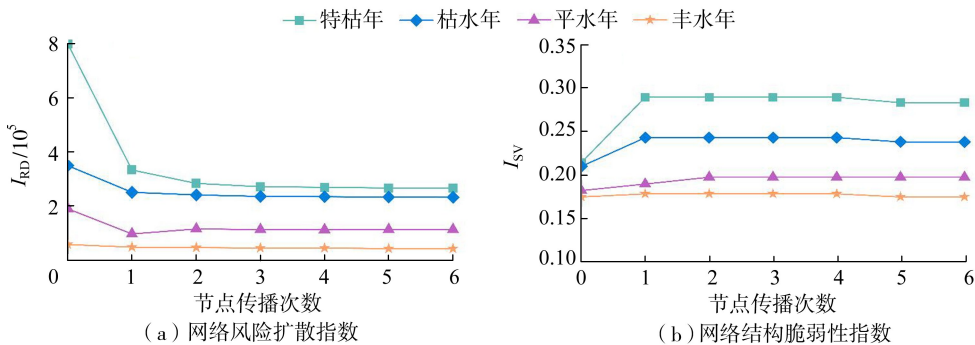


图 9 不同典型年网络风险扩散指数和网络结构脆弱性指数

Fig. 9 Network risk diffusion index and network structural vulnerability index under different typical years

4.4 防控策略

在风险传播过程中,适当防控某些节点能够显著降低甚至规避网络风险。为此,本文分别从降低风险扩散程度、削减风险节点数量的角度出发,选取介数防控、度值防控、节点风险灵敏指数防控、随机防控等 4 种防控策略,分析在不同防控策略下风险传播指数的变化。4 种防控策略分别选取全部节点数量的 10%(20 个节点),防控策略为:每次传播结束后,对选取的节点进行控制,将其负荷降低至原负荷的 r_1 倍。在随机防控策略中,重复进行 100 次操作,每次操作都从全部节点中随机选取 20 个节点,从而保证计算结果的可靠性和网络节点的随机性,将各次风险传播指标的平均值作为最终结果;在度值防控策略中,将全部节点按照度中心性指标降序排列,选取前 20 个度中心性较大的节点作为防控节点;在介数防控策略中,将全部节点按照介数中心性降序排列,取前 20 个介数中心性较大的节点作为防控节点;在节点风险灵敏指数防控策略中,将全部节点按节点风险灵敏指数降序排列,取前 20 个节点风险灵敏指数较大的节点作为防控节点。为体现风险扩散变化,增加空白对照试验,即无防控策略的风险传播指标,同时为控制节点负荷衰减速度,设置网络中风险源负荷增量为 300%, $e=0$, $r_1=0.98$, $v=0.1$ 。

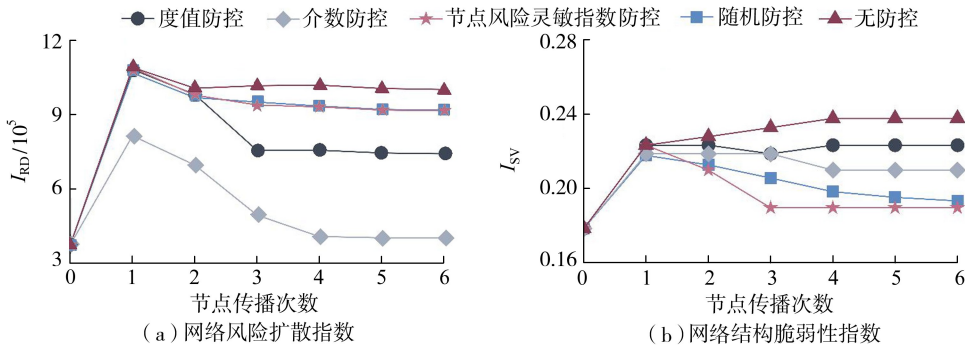


图 10 不同防控策略下网络风险扩散指数和网络结构脆弱性指数

Fig. 10 Network risk diffusion index and network structural vulnerability index under different prevention and control strategies

图 10 为不同防控策略下的网络风险扩散指数和网络结构脆弱性指数。由图 10 可见,4 种防控策略下的网络风险扩散指数均低于无防控策略,表明防控策略能够有效减缓风险扩散。在风险传播最终阶段,不同防控策略的网络风险扩散指数由小到大依次为:介数防控、度值防控、节点风险灵敏指数防控、随机防控。分析其原因,介数防控策略直接降低了具有较高介数中心性的节点的风险,导致网络风险扩散指数降低,这也是减少风险扩散的最优策略;当度值较高时,节点通行链路较多,介数中心性也较高,导致网络风险扩散指数较低;节点风险灵敏指数受网络负荷增量影响,与节点负荷和风险节点数密切相关,导致节点风险灵敏指数防控策略略优于随机防控策略。因此,对风险传播高频通行节点加以防控,可降低网络风险扩散程度。4 种防控策略下的网络结构脆弱性指数均低于无防控策略,表明防控策略能够有效削减风险节点数量。在风险传播最终阶段,不同防控策略的网络结构脆弱性指数由小到大依次为:节点风险灵敏指数防控、随机防控、介数防控、度值防控。分析其原因,网络结构脆弱性指数与风险节点数量有关;在节点风险灵敏指数防控策略中,节点风险灵敏指数与负荷增量直接相关,其值较大,说明该节点更易增大网络风险负荷和风险

节点数目,因而需要调整节点风险灵敏指数较大的指标,从而有效减少网络风险;在度值防控策略中,所选节点初始负荷未超过阈值(即为安全状态),调控作用不大;在随机防控策略中,启动阶段100次随机选取中大约有11个风险节点,而且经过风险传播后大概率演化为安全节点,导致其效果优于度值防控策略、介数防控策略。因此,防控节点风险灵敏指数较高(更容易成为风险状态)的关联要素,有助于降低网络整体负荷和风险节点数量。

5 结 论

a. 当节点负荷增量较小时,不同关联要素的节点风险灵敏指数差异并不明显;节点风险灵敏指数随负荷增量增大而增大,使得关联要素特征逐步得以区分;节点风险灵敏指数较高的关联要素多集中在黄河中上游区域,表明系统更易将风险传播至下游区域。链路承载风险量随传播时间延长而衰减,随风险源负荷增量增加而增大,而且承载风险量较高的链路多集中在黄河中上游区域。此外,在负荷增加时,网络风险扩散指数呈先增后减趋势,结构脆弱性指数呈持续衰减趋势,而且二者与消退系数、负荷保留系数密切相关,表明需对水资源系统关联要素采取必要的防控策略,以加快风险消退,降低风险累积。在选取的典型年情景下,特枯年、枯水年的网络风险传播指标变化较为显著,前期变化较大,后期变化较小。

b. 在减缓风险扩散程度时,4种风险防控策略的网络风险扩散指数均小于无防控策略,防控效果由好到差依次为:介数防控、度值防控、节点风险灵敏指数防控、随机防控、无防控。在减小风险节点数量时,4种防控策略的网络结构脆弱性指数均低于无防控策略,防控效果由好到差依次为:节点风险灵敏指数防控、随机防控、介数防控、度值防控、无防控。因此,有必要采用防控策略来应对风险,若降低网络风险扩散程度,则应防控介数中心性较大的关联要素;若削减风险节点数量,则应防控节点风险灵敏指数较高的关联要素。

需要说明的是,本文围绕复杂流域水资源系统风险多链路网络开展前瞻性和创新性研究,在细节上尚不够精细,如未考虑多维要素的差异性、风险传播的持续性等,未来将在数据尺度、时空范围、要素集合、态势推演等方面进一步深化研究,建立更为完备的水资源系统风险传播模型和方法,为变化条件下水资源风险管理和高效调控提供理论支撑。

参考文献:

[1] 杨亚锋,王红瑞,巩书鑫,等. 可变勾股模糊 VIKOR 水

资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021,52(6):633-646. (YANG Yafeng,WANG Hongrui, GONG Shuxin, et al. Variable Pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(6):633-646. (in Chinese))

[2] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(2):35-41. (AN Lina,FAN Guofu,WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):35-41. (in Chinese))

[3] 桑学锋,王浩,王建华,等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I):模型原理与构建[J]. 水利学报,2018,49(12):1451-1459. (SANG Xuefeng,WANG Hao,WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part I: theory and development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12):1451-1459. (in Chinese))

[4] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护,2023,39(5):39-48. (LI Wei, JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):39-48. (in Chinese))

[5] 钱龙霞,王红瑞,张韧,等. 基于投影寻踪的水资源脆弱性 S 型函数模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016,24(1):185-196. (QIAN Longxia, WANG Hongrui,ZHANG Ren, et al. An S type function model for water resources vulnerability based on projection pursuit and its application [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016,24(1):185-196. (in Chinese))

[6] 刘波,曾钰洁,杨荣湄,等. 高阶网络统计指标综述[J]. 物理学报, 2024,73(12):128901. (LIU Bo, ZENG Yujie, YANG Rongmei, et al. Fundamental statistics of higher-order networks:a survey [J]. Acta Physica Sinica, 2024,73(12):128901. (in Chinese))

[7] WANG Jiepeng, ZHOU Hong, JIN Xiaodan. Risk transmission in complex supply chain network with multi-drivers[J]. Chaos,Solitons & Fractals,2021,143:110259.

[8] 王岩韬,刘毓. 基于复杂网络的航班运行风险传播分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(1):198-205. (WANG Yantao,LIU Yu. Flight operation risk propagation based on complex network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020,20(1):198-205. (in Chinese))

[9] LIU Yating, CHEN Bin. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses[J]. Applied Energy,

2020,268:114974.

[10] DONG Yiqi, DONG Zuoji. An innovative approach to analyze financial contagion using causality-based complex network and value at risk[J]. Electronics, 2023, 12(8): 1846.

[11] 周欢,郭红洁,王坚强,等. 跨界融合供应链网络风险传播建模及抗毁性研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 3126-3134. (ZHOU Huan, GUO Hongjie, WANG Jianqiang, et al. Risk propagation modeling and invulnerability research of crossboundary integrated supply chain network[J]. Control and Decision, 2024, 39(9): 3126-3134. (in Chinese))

[12] 胡立伟,范仔健,张苏航,等. 基于复杂网络的城市交通拥塞因子风险传播机理及其应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 224-230. (HU Liwei, FAN Zijian, ZHANG Suhang, et al. Risk propagation mechanism and application of urban traffic congestion factors based on complex networks [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 224-230. (in Chinese))

[13] HAO Hongchang, XING Wanli, WANG Anjian, et al. Multi-layer networks research on analyzing supply risk transmission of lithium industry chain [J]. Resources Policy, 2022, 79: 102933.

[14] 马书红,杨磊,陈西芳. 风险扩散下城市群多模式交通网络的韧性演化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 42-51. (MA Shuhong, YANG Lei, CHEN Xifang. Resilience evolution of multi-mode transportation network in urban agglomeration based on risk diffusion[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 42-51. (in Chinese))

[15] 王冬. 复杂网络的拓扑结构对传播动力学的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.

[16] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))

[17] 李平,黄跃飞,李兵. 基于贝叶斯网络的梯级水库连溃风险[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 677-684. (LI Ping, HUANG Yuefei, LI Bing. Risk of cascade reservoirs collapse based on Bayesian network [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 677-684. (in Chinese))

[18] 肖盛燮. 生态环境灾变链式理论原创结构梗概[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2593-2602. (XIAO Shengxie. Originality structure sketch on chain-styled theory of disaster in eco-environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 2593-2602. (in Chinese))

[19] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 130-136. (in Chinese))

[20] 谢三桃,朱慧雯,叶勇,等. 环巢湖地区沙河流域污染负荷总量控制及削减措施[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 127-134. (XIE Santao, ZHU Huiluan, YE Yong, et al. Total pollution load control and reduction measures in the Shahe River Basin around Chaohu Lake [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 127-134. (in Chinese))

[21] 冯仲恺,高浩宇,牛文静,等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究 I: 网络构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 1-11. (FENG Zhongkai, GAO Haoyu, NIU Wenjing, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (I): network construction [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 1-11. (in Chinese))

[22] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 980-989. (WANG Hongrui, QIAN Longxia, ZHAO Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese))

[23] 夏军,邱冰,潘兴瑶,等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451. (XIA Jun, QIU Bing, PAN Xingyao, et al. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 443-451. (in Chinese))

[24] 吴维,吴泽萱,王兴隆. 机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(7): 2225-2236. (WU Wei, WU Zexuan, WANG Xinglong. Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(7): 2225-2236. (in Chinese))

[25] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))

[26] 王煜,彭少明,郑小康,等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 11-23. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River basin under the layout of water network[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 11-23. (in Chinese))