

中文引用格式:马莲净,肖海波,赵宝峰,等. 煤矿水害事故致因复杂网络分析[J]. 中国安全科学学报,2025,35(4):35-42.

英文引用格式:MA Lianjing, XIAO Haibo, ZHAO Baofeng, et al. Analysis of complex network of causes of water disasters in coal mines[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 35-42.

## 煤矿水害事故致因复杂网络分析\*

马莲净<sup>1,2</sup>教授,肖海波<sup>1</sup>,赵宝峰<sup>\*\*3,4,5</sup>研究员,江松<sup>1,2</sup>教授,  
刘迪<sup>1,2</sup>工程师,王颂<sup>1</sup>

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院,陕西 西安 710055;2 西安建筑科技大学 西安智慧工业感知  
计算与决策重点实验室,陕西 西安 710055;3 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 矿井水防治  
与水资源利用研究分院,陕西 西安 710077;4 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 煤矿灾害  
防控全国重点实验室,陕西 西安 710077;5 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 陕西省  
煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710077)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1053

基金项目:国家自然科学基金资助(42307073,51974223);陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-345)。

**【摘要】** 为有效提升煤矿水害事故综合防治能力,利用复杂网络与鲁棒性分析方法探寻事故关键致因。根据近40年国内发生的111起典型煤矿水害案例报告,构建煤矿水害无权有向网络,计算网络不同尺度下度数、聚类系数、中介中心等各致因权重,挖掘关键致因,评估3种不同策略下蓄意攻击对致因网络模型的破坏,寻求系统性防治的最优解。研究表明:煤矿水害致因网络具有小世界特性,致因间关联紧密;按度数排列攻击对网络破坏最大,相应关键致因包括组织工人进行冒险作业、未落实防治水技术管理责任、未按照要求开展探放水工作、违法违规组织生产作业、安全管理机构不健全、隐患排查工作不到位、煤矿安全监管监察工作存在漏洞、上级单位未履行安全管理职责。

**【关键词】** 煤矿水害事故; 致因网络; 复杂网络; 聚类系数; 规避措施

### Analysis of complex network of causes of water disasters in coal mines

MA Lianjing<sup>1,2</sup>, XIAO Haibo<sup>1</sup>, ZHAO Baofeng<sup>3,4,5</sup>, JIANG Song<sup>1,2</sup>, LIU Di<sup>1,2</sup>, WANG Song<sup>1</sup>

(1 School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 Xi'an Key Laboratory of Perceptive Computing and Decision for Intelligent Industry, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 3 Mine Water Hazard Prevention & Control and Water Resources Utilization Research Branch, CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China; 4 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China; 5 Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

\* 文章编号:1003-3033(2025)04-0035-08; 收稿日期:2024-12-20; 修稿日期:2025-02-18

\*\* 通信作者:赵宝峰(1981—),男,河北邯郸人,博士,研究员,主要从事煤矿水害防治方面的研究。E-mail:sunman1220@163.com。

**Abstract:** In order to effectively improve the comprehensive prevention and control ability of coal mine water disaster accidents, the complex network and robustness analysis method were used to explore the key causes of accidents. According to the report of 111 typical coal mine water disaster cases in China in the past 40 years, an unweighted directed network of coal mine water disaster was constructed. The weights of each cause, such as degree, clustering coefficient and betweenness centrality at different scales of the network were calculated, and the key causes were excavated. The damage of intentional attack to the cause network under three different strategies was evaluated, and the optimal solution of systematic prevention and control was sought. The results show that the coal mine water disaster cause network has the characteristics of small world, and the causes are closely related. The attack ranked by degree has the greatest damage to the model. The corresponding key causes include organizing workers to carry out risky operations, failing to implement the management responsibility of water prevention and control technology, failing to carry out water exploration and drainage work as required, illegal organization of production operations, imperfect safety management institutions, inadequate hidden danger investigation, loopholes in coal mine safety supervision and supervision, and failure of higher-level units to perform safety management responsibilities.

**Keywords:** coal mine water hazard accidents; causal networks; complex networks; clustering coefficient; avoidance measures

## 0 引言

随着我国煤矿开采逐渐向深部延伸,煤矿开采过程中可能受到地表水、顶板水、底板水、老空水、构造水等诸多水源威胁<sup>[1]</sup>,加之我国较多矿区水文地质条件整体比较复杂<sup>[2]</sup>,频发的煤矿水害事故成为阻碍煤矿安全生产的重要因素,并成为造成煤矿群死群伤的“第二杀手”<sup>[3]</sup>。

对已发生事故案例作致因分析是完善事故防治技术的重要手段<sup>[4]</sup>,煤矿安全是一个社会技术系统问题,煤矿水害常由复杂水文地质环境、人为过失、错误开采方法及企业管理条件等多重因素相互耦合引发,具有典型的复杂性和系统性<sup>[5]</sup>,目前,较成熟的水害防控技术体系,往往着眼于对水害事故类型进行划分<sup>[6]</sup>,结合鱼刺图<sup>[7]</sup>、事故树<sup>[8]</sup>、煤矿人为因素分析和分类系统<sup>[9]</sup>(Human Factor Analysis and Classification System for Coal Mines, HFACS-CM)等多种分析方法,针对不同类型水害采取不同防治技术。不足之处是缺乏水害综合防治的系统性策略<sup>[10]</sup>,且鱼刺图、事故树等依赖逻辑推理的分析方法,难以应对复杂成因联合介入的情况。

复杂网络这一基于图论的系统性研究方法被广泛应用于能源和安全领域<sup>[11-12]</sup>,如构建电力-天然气耦合系统韧性增强优化模型<sup>[13]</sup>、探索建筑行业事故的行为风险链<sup>[14]</sup>、分析铁路事故的致因<sup>[15]</sup>、研究

房屋建筑施工过程中关键致因的识别问题<sup>[16]</sup>。复杂网络不仅能在杂乱无章的联系中准确捕捉关键线索,还可以实现模糊系统的精准量化和预测。有关煤矿火灾及瓦斯事故的研究验证了复杂网络在煤矿事故分析中的有效性<sup>[17-18]</sup>,但将复杂网络用于煤矿水害方面还鲜有报道。

因此,笔者拟基于复杂网络理论,归纳梳理煤矿水害事故案例,并从具体案例报告中提炼事故致因,依据成因间强关联关系绘制水害致因网络,同时,系统解析该网络,探寻事故关键成因,以期构建煤矿水害系统化综合防控体系奠定基础,更全面、高效地降低煤矿水害事故风险。

## 1 复杂网络原理及参数

### 1.1 复杂网络理论

复杂网络可以实现复杂系统的可视化<sup>[19-20]</sup>,在复杂网络中,剥离庞大系统内的单一元素定义成节点,节点间相互关系用连边表示。

### 1.2 网络特征参数

1) 网络直径。网络中任意2个节点之间距离的最大值称为网络直径,记为 $D$ 。

$$D = \max_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

式中 $d_{ij}$ 为网络中任意2节点 $i$ 和 $j$ 的距离,即连接 $i$ 和 $j$ 边数最少的有向路径。

2) 平均路径长度。网络的平均路径长度 $L$ 定

义为任意2个节点之间距离的平均值。

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (2)$$

式中  $N$  为网络中节点数。

3) 聚类系数。聚类系数能够衡量网络整体的聚集倾向,聚类系数越大,节点间连接越紧密,有向网络中节点  $i$  的聚类系数记为  $C_i$ 。

$$C_i = \frac{2E_i}{p_i(p_i-1)} \quad (3)$$

式中:  $E_i$  为节点  $i$  的实际连边数;  $p_i(p_i-1)$  为节点  $i$  能够拥有的最多连边数。

4) 度数分布。网络中节点  $i$  的度(连边数)  $D_i$  为节点  $i$  与周边节点的关联程度。

$$D_i = D_i^n + D_i^u \quad (4)$$

式中:  $D_i^n$  为指向节点  $i$  的连边数;  $D_i^u$  为节点  $i$  指向其他节点的连边数。

5) 中介中心性。节点  $i$  的中介中心性  $B_i$  以经过节点  $i$  的最短路径数目来刻画该节点在网络中重要程度的指标。

$$B_i = \sum_{s \neq i \neq v} \frac{\sigma_{sv}(i)}{\sigma_{sv}} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{sv}$  为节点  $s$  到节点  $v$  的所有最短路径的总数;  $\sigma_{sv}(i)$  为节点  $s$  到  $v$  的所有最短路径中,经过节点  $i$  的那部分最短路径的数量。各点差别较大时作归一化处理,节点  $i$  不能做最短路径的起点或终点,即  $s \neq i \neq v$ 。

## 2 构建煤矿水害事故致因网络

### 2.1 煤矿水害事故来源

收集 1978—2023 年 111 条煤矿水害事故报告<sup>[21]</sup>,筛选描述清晰、有代表性的案例,并按照《矿山生产安全事故报告和调查处理办法》<sup>[22]</sup>作事故分级,发现较大及以上的事故占比为 40%。

### 2.2 煤矿水害事故致因挖掘

从人为过失、管理不当、设备因素等 5 个角度,将煤矿水害事故常见原因提炼为 53 个致灾成因。将整体组成因子集记为  $S_i = \{A_1, A_2, \dots, E_2\}$ ,统计案例中各致灾成因占总案例数的比例,见表 1。由表 1 可知:排序前 4 的致因为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $A_6$  和  $B_{11}$ 。

表 1 事故成因序号及条目概述

Table 1 Overview of accident causes and entry number

分类	编号	比例/%	致因条目	编号	比例/%	致因条目
人为过失	$A_1$	1.47	作业人员疲劳作业	$A_6$	73.53	未按照要求开展探放水工作
	$A_2$	36.76	作业人员缺乏安全意识	$A_7$	38.24	未查明水文地质条件
	$A_3$	7.35	作业人员职业技能水平不足	$A_8$	19.12	应急处置不当
	$A_4$	11.76	作业人员违规作业	$A_9$	4.41	探放水设备使用不当
	$A_5$	14.71	作业人员对突水征兆判识不足	$A_{10}$	14.71	采用非专用钻机探放水
管理不当	$B_1$	94.12	安全技术措施不合格	$B_{16}$	4.41	未严格执行在矿值守规定
	$B_2$	77.94	隐患排查工作不到位	$B_{17}$	25.00	未落实企业主体责任
	$B_3$	42.65	未落实防治水技术管理责任	$B_{18}$	27.94	安全管理机构不健全
	$B_4$	26.47	未按要求配备水文地质专业技术人员	$B_{19}$	13.24	管理人员未取得相关资质
	$B_5$	5.88	防治水工作滞后	$B_{20}$	4.41	盲目划定开采区域
	$B_6$	23.53	停产撤人措施落实不到位、不及时	$B_{21}$	17.65	蓄意超深越界开采
	$B_7$	38.24	组织工人进行冒险作业	$B_{22}$	2.94	三线管理设置不合理
	$B_8$	35.29	违法违规组织生产作业	$B_{23}$	17.65	防隔水煤(岩)柱留设宽度不符合要求
	$B_9$	20.59	安全隐患未整改到位	$B_{24}$	2.94	应急物资不足
	$B_{10}$	14.71	技术服务单位履职不到位	$B_{25}$	5.88	煤矿 6 大系统建设不完全
	$B_{11}$	63.24	上级单位未履行安全管理职责	$B_{26}$	14.71	外包承包关系混乱
	$B_{12}$	33.82	煤矿安全监管监察工作存在漏洞	$B_{27}$	2.94	无应急预案、应急预案不演练
	$B_{13}$	42.65	安全培训教育不到位	$B_{28}$	13.24	不按设计施工
	$B_{14}$	16.18	作业人员配置不合理	$B_{29}$	2.94	勘探精度不满足要求
	$B_{15}$	8.82	采煤方法设计不合理	$B_{30}$	7.35	勘探结果与实际不符
设备因素	$C_1$	7.35	排水系统不满足要求	$C_2$	1.47	排水设备未正常有效运行

续表 1

分类	编号	比例/%	致因条目	编号	比例/%	致因条目
自然因素	$D_1$	19.12	水文地质条件复杂	$D_6$	4.41	顶板存在富水含水层
	$D_2$	4.41	采掘影响范围内存在含(导)水断层或陷落柱	$D_7$	4.41	存在离层水害威胁
	$D_3$	55.88	采掘影响范围内采空区积水情况不清	$D_8$	1.47	采掘影响范围内存在底板高承压含水层
	$D_4$	1.47	采掘影响范围内存在地质异常体	$D_9$	1.47	存在溃水溃砂威胁
	$D_5$	1.47	浅埋深或急倾斜煤层开采	—	—	—
环境因素	$E_1$	4.41	汛期大量降水	$E_2$	1.47	采掘影响范围内出现地表水体

### 2.3 煤矿水害事故致因网络构建

复杂网络同时具有规则性和随机性,其中最重要的是各节点的相关性<sup>[23]</sup>,将53个致灾因子设置为节点,致因间的影响作用视为有向连边,构建无权有向复杂网络,如图1所示。该网络有53个节点和220条边,节点大小与颜色深浅反映其度数,连线粗细体现其频次,越接近网络中心的节点与其他节点联系越广。其中,度数排序前3的节点为 $B_7$ 、 $B_3$ 、 $A_6$ 。

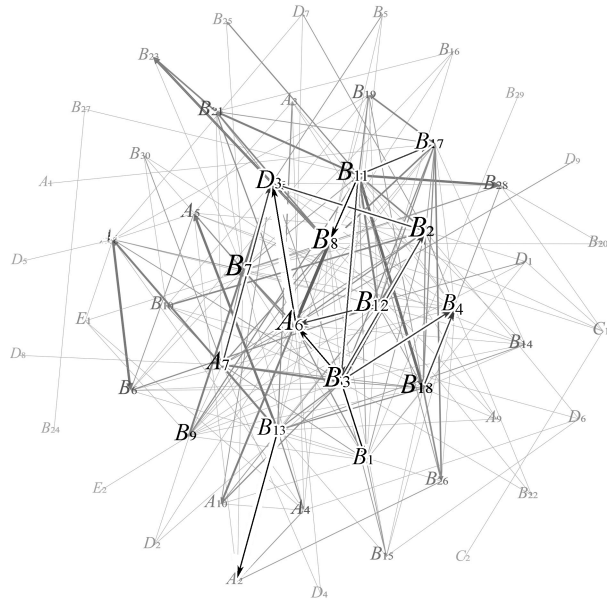


图1 煤矿水害事故致因网络

Fig. 1 Causative network of coal mine water disaster

## 3 煤矿水害事故致因网络分析

### 3.1 网络直径及平均路径长度分析

据式(1)计算煤矿水害致因网络直径为9,即网络中连接任意2节点至多只需要经过9条边,网络直径越小,说明煤矿水害事故致灾路径较短,网络中各节点间的连通性越好,各火灾致灾因子间的距离越小<sup>[24]</sup>。

据式(2)计算平均路径长度为2.847,表明网络中某点可以通过平均2.847步向其他节点施加影响,网络中节点关联性强,节点的波动极易在网络中扩散,表明防治单一致因效果有限。

### 3.2 聚类系数与度数分析

核算各致因聚类系数并按大小排列,排序前16的致因如图2所示。16个致因的聚类系数落于0.25~1,其中, $B_{20}$ 、 $D_2$ 、 $B_{23}$ 、 $B_5$ 、 $B_{25}$ 、 $D_4$ 的聚类系数较大,表明与其相连的致因聚集倾向较高,关联性强,若以上6个致因发生波动时,邻接致因也将处于波动影响范围,应给予关注。

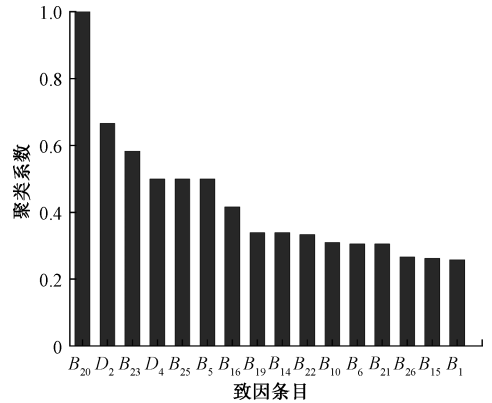


图2 各致因的聚类系数

Fig. 2 Clustering coefficient of cause

据式(3)计算平均聚类系数为0.234。煤矿水害致因网络具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数,表明具有小世界网络特性<sup>[25]</sup>,即煤矿水害致因间关联性强,随着致因数量增加,网络平均路径长度增长,系统整体走向愈发难以预测。

节点度数表明其在网络中的地位,度数越高,与其相连的节点数越多,在有向网络中,度分为连入度与连出度。据式(4)计算各致因连入度与连出度,结果如图3所示。图3中, $B_7$ 、 $B_9$ 和 $D_3$ 均为连入度较高同时连出度较低的致因,表明其更易受其他因素影响,安全检查过程中率先排查此类成因能够有

效规避风险。另外,  $B_3$ 、 $B_{11}$  和  $B_{18}$  为连出度较高, 连入度较低的致因, 一旦出现问题, 易在网络中引发广泛波动, 是日常生产中需要注意的关键成因。 $B_7$ 、 $B_3$ 、 $A_6$  和  $B_8$  度数超过 20, 其他节点的波动通过以上节点容易造成更大范围的扩散, 因此, 上述致因均为煤矿水害致因网络中的高风险因素, 需加强管控。

### 3.3 中介中心性分析

据式(5)计算煤矿水害致因网络平均中介中心性为 0.018, 其中,  $B_7$ 、 $B_2$ 、 $A_6$  和  $B_8$  中介中心性较高, 表明其在网络中承担重要桥梁作用。找出高中介中心性致因及其关联因素, 如图 4 所示。当前端成因不易察觉时, 通过集中剪除中介成因来中断危险因素传递, 可实现事故预防。

## 4 鲁棒性分析

全局效率是衡量网络信息传递效率的重要指标, 在水害致因网络中, 高全局效率意味着局部风险

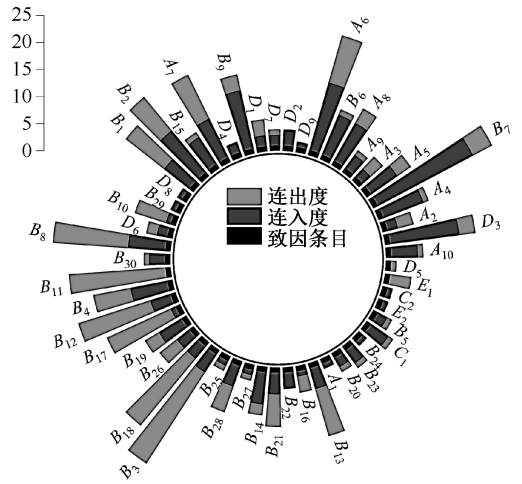


图 3 各致因的度分布

Fig. 3 Degrees of causation

极易沿最短路径在网络中转移并扩散开。为量化各致因在网络中的权重, 针对构建的致因网络, 将节点按度数、聚类系数、中介中心性 3 种不同策略由大到

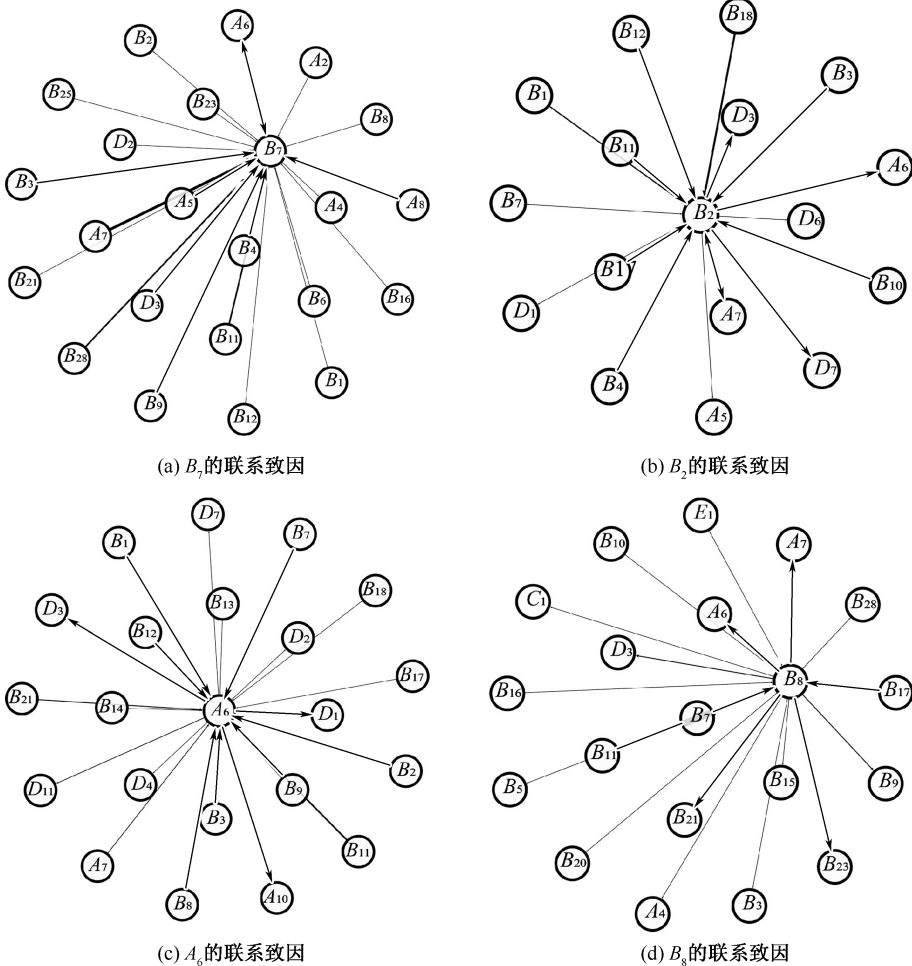


图 4 关键中介成因及其相应联系

Fig. 4 Key intermediary causes and corresponding connections

小依次删除来执行蓄意攻击,有针对性地控制致因,以此模拟现实。结合攻击后网络全局效率、平均度数、平均聚类系数等多个指标的变化,综合评估控制关键致因所取得的收益,制定高效控制和预防煤矿

水害事故的安全措施。3种策略所得参数的变化如图5所示。由图5可知:3种不同策略的攻击均能削弱致因网络传递风险的能力,其中,按度数策略攻击对致因网络破坏最明显。

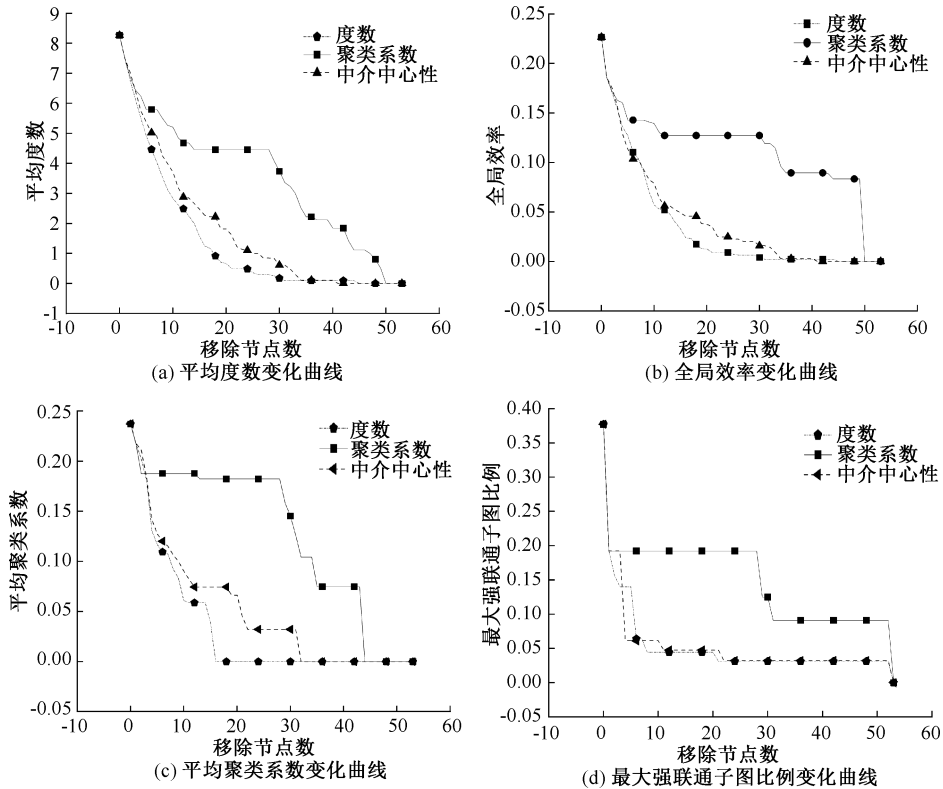


图5 3种攻击策略下4类参数的变化曲线

Fig. 5 Change curves of four types of parameters under three attack strategies

## 5 实例验证及致因规避措施

### 5.1 实例验证

度数排列识别出高风险致因分别为  $B_7$ 、 $B_3$ 、 $A_6$ 、 $B_8$ 、 $B_{18}$ 、 $B_2$ 、 $B_{12}$  和  $B_{11}$ , 均为人为因素和管理因素。结合 REASON<sup>[26]</sup> 提出的“瑞士奶酪模型”及文中数据可知:网络中人为因素和管理因素往往处在网络中心区域,度数较高,是关键桥梁。

以山西长治襄矿西故县煤业有限公司“10·25”较大水害事故<sup>[27]</sup> 为例,识别对应致因网络,如图 6a 所示;随后,依次去除  $B_7$ 、 $B_3$ 、 $A_6$ 、 $B_8$ 、 $B_{18}$  节点,如图 6b 所示。可以看出,网络中各致因离散,不能构成完整致因链条引发事故。

因此,加强水害事故预防,严格管控  $B_7$ 、 $B_3$ 、 $A_6$ 、 $B_8$ 、 $B_{18}$ 、 $B_2$ 、 $B_{12}$  和  $B_{11}$  致因,有助于更高效地阻隔致因相互勾连,限制风险在网络中的传递,保障煤矿安全生产。

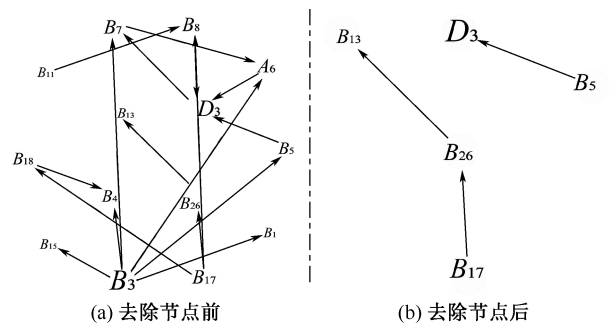


图6 去除高风险节点前后的致因网络

Fig. 6 Causal network before and after removing high-risk nodes

### 5.2 致因规避措施

针对煤矿水害事故致因网络识别出的高风险致因提出规避措施,见表 2。

## 6 结论

1) 煤矿水害网络具备小世界特性,事故路径较短,网络直径小,节点的波动极易在网络中扩散,整

表2 高风险致因规避措施  
Table 2 High-risk causal mitigation measures

高风险致因	规避措施
组织工人进行冒险作业 $B_7$	组织学习水害征兆及应急处置办法,制定应急预案,对违章指挥加强惩处
未落实防治水技术管理责任 $B_3$	核实技术人员资质、能力,组织技能测试、实操考核,全面评估专业技能,建立健全安全责任追溯制度,组建快速响应团队收集反馈井下技术问题
未按照要求开展探放水工作 $A_6$	严格遵守《煤矿防治水细则》,加强工作面监管,聘请专业探放水人员,加强探放水工作章程的教育普及工作
违法违规组织生产作业 $B_8$	对存在违法违规行为、存在重大安全隐患仍组织生产的严肃问责、追责
安全管理机构不健全 $B_{18}$	健全责权一致的企业安全管理机构,推行注册安全工程师制度,实行安全监察专员委派制
隐患排查工作不到位 $B_2$	定期开展水害隐患排查,水文地质条件复杂、极复杂的矿井至少每月开展1次;其他矿井至少每季度开展1次
煤矿安全监管监察工作存在漏洞 $B_{12}$	加强内部执法案宗审核、分析、评比及执法过程的监督检查,健全完善相关执法工作考核机制,推进执法量化考核
上级单位未履行安全管理职责 $B_{11}$	开展多部门联合检查机制,相互监督,落实责任机制

体防治过程中针对单一致因的防治措施作用有限。

2) 按度数策略执行蓄意攻击对网络破坏最大,相应关键致因包括组织工人进行冒险作业、未落实防治水技术管理责任、未按照要求开展探放水工作、违法违规组织生产作业、安全管理机构不健全、隐患排查工作不到位、煤矿安全监管监察工作存在漏洞、

上级单位未履行安全管理职责。在水害综合防治过程中,致因危险程度应依据致因的度数具体衡量。

3) 建立煤矿水害致因网络有助于风险定性评估,后续可以扩大事故案例集,丰富网络架构,引入边耦合网络,结合风险评价对致因在网络中所处位置及其危险度进行定量分析。

## 参考文献

- [1] GUI Herong, LIN Manli. Types of water hazards in China coalmines and regional characteristics[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1501-1512.
- [2] 曾一凡,武强,赵苏启,等. 我国煤矿水害事故特征、致因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1-14.  
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- [3] 丁百川. 我国煤矿主要灾害事故特点及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 109-114.  
DING Baichuan. Features and prevention countermeasures of major disasters occurred in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 109-114.
- [4] ZHOU Zhipeng, IRIZARRY J, GUO Wenya. A network-based approach to modeling safety accidents and causations within the context of subway construction project management[J]. Safety Science, 2021, 139(10): DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105261.
- [5] QIU Zunxiang, LIU Quanlong, LI Xinchun, et al. Construction and analysis of a coal mine accident causation network based on text mining[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 153: 320-328.
- [6] 武强,崔芳鹏,赵苏启,等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561-565.  
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561-565.
- [7] 邢冬梅. 矿山透水事故致因模型构建及防治对策研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.  
XING Dongmei. Research on causation model and prevention countermeasure of mine water inrush accident[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [8] 潘瑶, 申建军, 徐瑞. 基于鱼刺图—事故树的煤矿水害事故致因分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(23): 102-103, 145.  
PAN Yao, SHEN Jianjun, XU Rui. Cause analysis of coal mine water disaster accident based on fishbone map-accident tree[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2018(23): 102-103, 145.
- [9] LIU Rulin, CHENG Weimin, YU Yanbin, et al. An impacting factors analysis of miners' unsafe acts based on HFACS-CM

- and SEM[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 122: 221–231.
- [10] 崔芳鹏, 武强, 林元惠, 等. 中国煤矿水害综合防治技术与方法研究[J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(3): 219–228.  
CUI Fangpeng, WU Qiang, LIN Yuanhui, et al. Prevention and control techniques & methods for water disasters at coal mines in China[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(3): 219–228.
- [11] BULDYREV S, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464: 1 025–1 028.
- [12] ZHOU Lili, YIN Jun, TAN Fei, et al. Robustness analysis of edge-coupled interdependent networks under different attack strategies [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2023, 632: DOI: 10.1016/j.physa.2023.129338.
- [13] ZHANG Chenwei, WANG Ying, ZHENG Tao, et al. Complex network theory-based optimization for enhancing resilience of large-scale multi-energy system[J]. *Applied Energy*, 2024, 370: DOI:10.1016/j.apenergy.2024.123593.
- [14] GUO Shengyu, ZHOU Xinyu, TANG Bing, et al. Exploring the behavioral risk chains of accidents using complex network theory in the construction industry [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 560: DOI: 10.1016/j.physa.2020.125012.
- [15] 花玲玲, 郑伟. 基于复杂网络理论的铁路事故致因分析[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(增 1): 114–119.  
HUA Lingling, ZHENG Wei. Research on causation of railway accidents based on complex network theory[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(S1): 114–119.
- [16] 成连华, 曹东强, 李欣. 房屋建筑施工事故致因因素分类研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(2): 16–22.  
CHENG Lianhua, CAO Dongqiang, LI Xin. Research on cause factors classification of housing construction accidents[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(2): 16–22.
- [17] 杨应柳, 晋良海, 邵波, 等. 基于复杂网络的煤矿火灾爆炸致因研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 145–151.  
YANG Yingliu, JIN Lianghai, SHAO Bo, et al. Research on causes of coal mine fire and explosion based on complex network[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 145–151.
- [18] WANG Yuxin, FU Gui, LYU Qian, et al. Modelling and analysis of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on network theory[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 170: 28–44.
- [19] ZHANG Mengyao, HUANG Tao, GUO Zhaoxia, et al. Complex-network-based traffic network analysis and dynamics: a comprehensive review[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 607: DOI: 10.1016/j.physa.2022.128063.
- [20] NEWMAN M. The structure and function of complex networks[J]. *SIAM Review*, 2003, 45: 167–256.
- [21] 煤矿安全网. 煤矿事故/事故案例[EB/OL]. [2023-01-27]. <https://www.mkaq.org/sggl/shigual/>.
- [22] 国家矿山安全监察局. 矿山生产安全事故报告和调查处理办法[Z]. [2023-01-18]. [https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/tzgg/202301/t20230118\\_440874.shtml](https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/tzgg/202301/t20230118_440874.shtml).
- [23] TANG Yongchuan, DAI Guoxun, ZHOU Yonghao, et al. Conflicting evidence fusion using a correlation coefficient-based approach in complex network[J]. *Solitons & Fractals*, 2023, 176: DOI:10.1016/j.chaos.2023.114087.
- [24] 陆菲菲, 谢向辉, 郭得科, 等. 一种构建超大规模数据中心的模块化网络结构[J]. *软件学报*, 2017, 28(8): 2 196–2 213.  
LU Feifei, XIE Xianghui, GUO Deke, et al. Modular network structure for building mega-modular data center[J]. *Journal of Software*, 2017, 28(8): 2 196–2 213.
- [25] 马小薇. 基于复杂网络的地铁事故致因机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
MA Xiaowei. Research on the causation mechanism of metro accidents based on complex network theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [26] REASON J. Human error: models and management[J]. *British Medical Journal*, 2000, 320(7237): 768–770.
- [27] 国家矿山安全监察局. 山西省长治市襄矿西故县煤业有限公司“10·25”较大水害事故案例[EB/OL]. [2021-01-11]. [https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/sgcc/sgalks/202101/t20210111\\_376868.shtml](https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/sgcc/sgalks/202101/t20210111_376868.shtml).

作者简介: 马莲净 (1986—), 女, 河北衡水人, 博士, 教授, 主要从事矿业安全与环保方面的研究。E-mail: 860909mlj@163.com。

