

中文引用格式:江新,曹路,杨静,等. 基于 SFEP-SD 的高海拔地区水电工程施工安全风险传递路径研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 27-37.

英文引用格式:Jiang Xin, Cao Lu, Yang Jing, et al. Research on safety risk transmission paths of hydropower engineering construction in high-altitude area based on SFEP-SD[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 27-37.

基于 SFEP-SD 的高海拔地区水电工程施工安全风险传递路径研究*

江新^{1,2}教授, 曹路^{**2}, 杨静², 李冰姿², 晋良海^{1,2}教授

(1 三峡大学 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

中图分类号:X948

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.1176

基金项目:国家自然科学基金资助(52179136)。

【摘要】 为管控风险传递,降低施工安全事故发生概率,探究高海拔地区水电工程施工安全风险传递的演化过程和特征。首先,基于高海拔地区水电工程施工事故报告和 4M1E 理论,从人员、机械设备及材料、管理、技术和环境 5 个方面构建施工安全风险因素体系,采用决策试验和评价试验法(DEMATTEL)分析风险因素引发的风险事件;然后,基于系统故障演化过程(SFEP)理论建立施工安全风险传递网络,通过关联规则计算各路径风险传递概率;利用系统动力学(SD)构建施工安全风险传递网络 SD 模型;最后,以西藏某大型水电工程为例,开展仿真验证。结果表明:施工安全风险传递网络 SD 模型揭示了从 17 种边缘事件、15 种过程事件至 5 种最终事件的 29 条风险传递路径及其演化趋势与敏感性,确定环境与管理风险事件为关键节点,识别出 3 条关键传递路径。据此,立足关键节点与关键路径阻断风险传递,有效降低事件发生与演化概率,减少施工安全事故。

【关键词】 高海拔地区水电工程; 施工安全风险; 风险传递路径; 系统故障演化过程(SFEP); 系统动力学(SD)

Research on safety risk transmission paths of hydropower engineering construction in high-altitude area based on SFEP-SD

Jiang Xin^{1,2}, Cao Lu², Yang Jing², Li Bingzi², Jin Lianghai^{1,2}

(1 Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China

Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2 College of Hydraulic &

Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: To manage risk transmission and reduce the probability of construction safety accidents, the evolution process and characteristics of construction safety risk transmission in high-altitude areas were explored. Firstly, based on construction accident reports of hydropower projects in high-altitude areas and the 4M1E theory, a construction safety risk factor system was constructed from five aspects: personnel, machinery and equipment, materials, management, technology, and environment. The Decision-Making

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0027-11; 收稿日期:2025-12-25; 修稿日期:2026-03-02

** 通信作者:曹路(1997—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为水利水电工程施工与管理、系统决策理论及安全评价。E-mail: 1160837362@qq.com。

Experiment and Assessment Technique (DEMATEL) was used to analyze risk events triggered by risk factors. Then, based on the SFEP theory, a construction safety risk transmission network was established, and the risk transmission probability of each path was calculated through association rules. The SD method was utilized to construct an SD model of the construction safety risk transmission network. Finally, a large hydropower project in Xizang was taken as an example for simulation verification. The results show that the SD model of the construction safety risk transmission network reveals 29 risk transmission paths from 17 edge events, 15 process events, to 5 final events, as well as their evolution trends and sensitivities. Environmental and management risk events are identified as key nodes, and three key transmission paths are identified. Based on this, targeted risk transmission prevention and control measures are proposed, providing a theoretical basis for the management of construction safety risks in hydropower projects in high-altitude areas.

Keywords: hydropower projects in high-altitude areas; construction safety risk; risk transmission paths; system fault evolution process (SFEP); system dynamics (SD)

0 引言

水电作为实现“双碳”目标的重要清洁能源,其待开发资源一半以上集中在高海拔地区^[1]。高海拔地区水电建设具有“四高”(高寒、高地应力、高地震烈度、高水头)“四大”(大埋深、大落差、大保护、大温差)“三长”(长冬歇、长隧洞、长周期)特点^[2],施工安全风险因素相互传递、不断积累,易诱发安全事故。将风险传递理论引入高海拔地区施工安全管理,探究风险形成机制、传递路径及动态演化规律,提出风险传递防控策略,对预防施工安全事故、保障工程高质量建设具有重要意义。

目前,国内外学者围绕高海拔地区施工安全风险已展开系列研究。莫俊文等^[3]构建了铁路工程施工人员不安全行为评估体系;成连华等^[4]建立了建筑施工项目应急能力风险评价指标体系;Zhao Jing等^[5]构建了大坝建设安全综合风险评价模型;牛衍亮等^[6]提出了高海拔铁路隧道施工安全管理策略框架;谢雪凌^[7]针对高海拔作业人员职业健康问题提出了防护行为意识培育路径;Wu Peng等^[8]提出隧道施工海拔分级规则,为不同海拔等级的供氧和防冻提供依据;Zhang Yuxiang等^[9]提出了施工保温层加装方案。现有研究多集中于建筑、铁路、隧道等领域,侧重工程结构稳定性分析与风险因素间相互作用关系,而针对高海拔地区水电工程施工安全风险传递过程的系统性研究尚显不足。

鉴于此,笔者拟运用系统故障演化过程(System Fault Evolution Process, SFEP)理论,建立高海拔地区水电工程施工安全风险传递网络,结合系统动力学(System Dynamics, SD),构建施工安全风险传递

网络SD模型,并通过工程案例仿真验证,旨在揭示高海拔地区水电工程施工安全风险传递效应、识别关键节点和关键路径,据此提出针对性的风险防控策略,降低施工安全事故发生概率。

1 安全风险事件分析

1.1 安全风险因素识别

参照文献[10-12],统计分析83例高海拔地区施工事故案例,依据人-机-料-法-环(Man, Machine, Material, Method, Environment, 4M1E)理论,将施工安全风险因素划分为人员、机械设备及材料、管理、技术和环境5类,按照具体的、可衡量的、可达到的、相关的、有时限的(Specific, Measurable, Attainable, Relevant, Time-based, SMART)原则^[13]确定32个具体风险因素,构建施工安全风险因素体系如图1所示。

1.2 安全风险事件关系分析

风险事件的发生是孕灾环境中风险因素相互作用的过程^[14]。在高海拔地区复杂施工环境下,安全风险因素相互作用、持续累积,形成具体的风险事件,且事件间存在复杂的连锁影响关系。为量化风险事件间的影响关系,采用决策试验和评价试验法(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)计算中心度和原因度。该方法结合图论和矩阵运算开展系统因素分析,邀请15位高海拔地区施工专家采用“0~4标度法”对风险事件间直接影响程度打分,并运用德尔菲法经3轮专家打分和反馈修正,以降低专家意见离散度。基于有效评分数据构建直接影响矩阵,经标准化处理后推导综合影响矩阵,最终计算各风险事件的中心度和原因度^[15],得到的风险事件的影响关系见表1。



图 1 高海拔地区水电工程施工安全风险因素体系

Fig. 1 Construction safety risk factor system of hydropower projects in high-altitude areas

表 1 风险事件的影响关系

Table 1 Impact relation of risk events

风险因素	风险事件	影响度	被影响度	中心度	原因度
A_1	高海拔地区施工经验不足	0.677	0.208	0.885	0.469
A_2	与当地政府、居民对环境气候经验交流不足	0.460	0.000	0.460	0.460
A_3	人员基础身体素质较差	1.230	0.440	1.670	0.789
A_4	人员安全态度不端	0.826	0.314	1.140	0.512
A_5	人员对施工安全风险误判与处置不当	0.241	0.374	0.615	-0.133
A_6	高原反应引发高原病	0.895	0.695	1.590	0.201
A_7	劳动防护用品使用不规范	0.593	0.331	0.925	0.262
A_8	心理状态不佳	1.021	0.780	1.801	0.241
B_1	施工设备未定期检查维修	0.697	0.222	0.919	0.475
B_2	机械设备选型、采购与使用不当	0.705	0.231	0.926	0.486
B_3	施工材料选型、采购与使用不当	0.585	0.182	0.767	0.403
B_4	高海拔条件下安全物资性能不达标	0.699	0.295	0.994	0.404
B_5	高海拔条件下设备性能不佳	0.788	0.776	1.563	0.012
B_6	高海拔条件下材料性能不达标	0.359	0.321	0.680	0.038
C_1	高寒气候	1.404	0.699	2.102	0.705
C_2	低氧	0.688	0.192	0.880	0.496
C_3	强紫外线辐射	0.769	0.000	0.769	0.769
C_4	复杂地形、地质条件	1.201	0.534	1.734	0.667
C_5	冻土与冻融循环	0.769	0.863	1.632	-0.094
C_6	暴风雪、冰雹等自然灾害发生	0.746	0.974	1.720	-0.228
D_1	安全管理制度不健全与落实不到位	1.560	0.493	2.053	1.067
D_2	安全隐患排查不彻底和整改不及时	0.613	0.161	0.774	0.452
D_3	现场管理不规范	0.570	0.373	0.943	0.197
D_4	安全教育培训不到位	0.860	0.595	1.455	0.266
D_5	应急救援准备不充分	0.452	0.290	0.742	0.161
D_6	安全责任未落实	0.802	0.772	1.574	0.030
E_1	未按规定进行超前地质预报	1.283	0.521	1.804	0.763

续表 1

风险因素	风险事件	影响度	被影响度	中心度	原因度
E_2	施工方案考虑现场实际不足	0.613	0.161	0.774	0.452
E_3	高海拔设计技术标准实施存在偏差	1.285	0.277	1.562	1.008
E_4	安全技术交底不充分	0.452	0.290	0.742	0.161
E_5	混凝土施工配合比等不能满足设计要求	1.055	0.973	2.027	0.082
E_6	安全技术措施落实不到位	1.078	1.192	2.269	-0.114

2 高海拔地区水电工程施工安全风险传递网络构建

2.1 安全风险传递过程

风险传递本质上体现为风险在系统节点间的动态转移,其前提是节点间存在因果关系。初始风险因素引起风险状态转移,加之系统的整体性、关联性、脆弱性与动态性特征,最终导致系统结构

破坏,即风险传递路径基于节点间因果关系,一个风险的发生可能引起相邻节点风险水平变化^[16]。在高海拔水电工程施工中,风险源依托传播载体向系统外部扩散,在外界干扰下到达关联节点;该节点风险不断积累并超过其固有风险容量,成为触发风险者,随后可能演变为阻断风险者或进一步放大风险,最终传递至风险接受者,形成风险事件并诱发施工安全事故,该安全风险传递过程如图 2 所示。

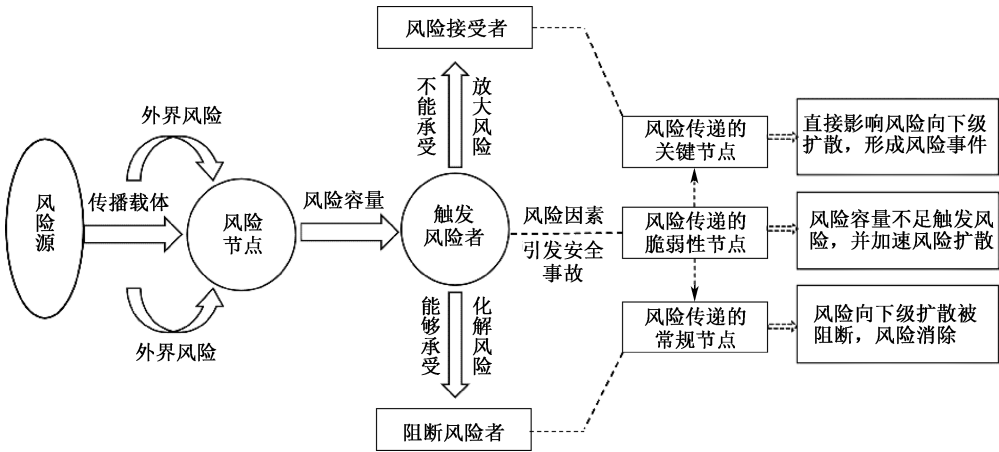


图 2 安全风险传递过程
Fig.2 Principle of safety risk transmission

2.2 安全风险传递网络构建

根据高海拔地区水电工程施工特点,结合 SFEP 理论分析施工安全 SFEP 中对象、状态和连接的关系^[17]。该 SFEP 采用由事件与连接组成并按因果关系相连的网络,其中点表示事件,线表示事件间传递路径,事件包括对象、状态和逻辑关系。SFEP 理论主要组成元素^[18]如图 3 所示。

根据 1.2 节风险事件中心度和原因度计算结果可知:事件 A_1-A_4 、 B_1-B_4 、 C_1-C_4 、 D_1-D_2 、 E_1-E_3 原因度显著为正,仅对其他风险事件产生作用,界定为边缘事件;事件 A_5-A_8 、 B_5-B_6 、 C_5-C_6 、 D_3-D_6 、 E_4-E_6 原因度在零值附近小幅波动,既受其他风险事件影响又作用于其他风险事件,归类为过程事件;最终事件为边缘事件经过程事件传递后的终端结果,结合高

海拔地区水电工程施工安全风险特点,划分为人员、机械设备及施工材料、环境、管理和技术 5 类。

SFEP 可用于描述风险传递过程,根据风险事件间影响关系,运用树状模型系统性描述从事故原因到结果的逻辑层级,建立高海拔地区水电工程施工安全风险传递网络(图 4),用以界定风险事件间的逻辑关系,明确风险传递的结构框架,直观呈现系统内的风险传递路径,为后续定量分析各条风险传递路径提供基础。

2.3 确定风险传递概率

安全风险事件发生的概率分布可理解为系统中元件故障的概率分布。在安全风险传递网络基础上,确定边缘事件发生概率及事件间传递概率,进而计算过程事件、最终事件的发生概率^[19-20]。

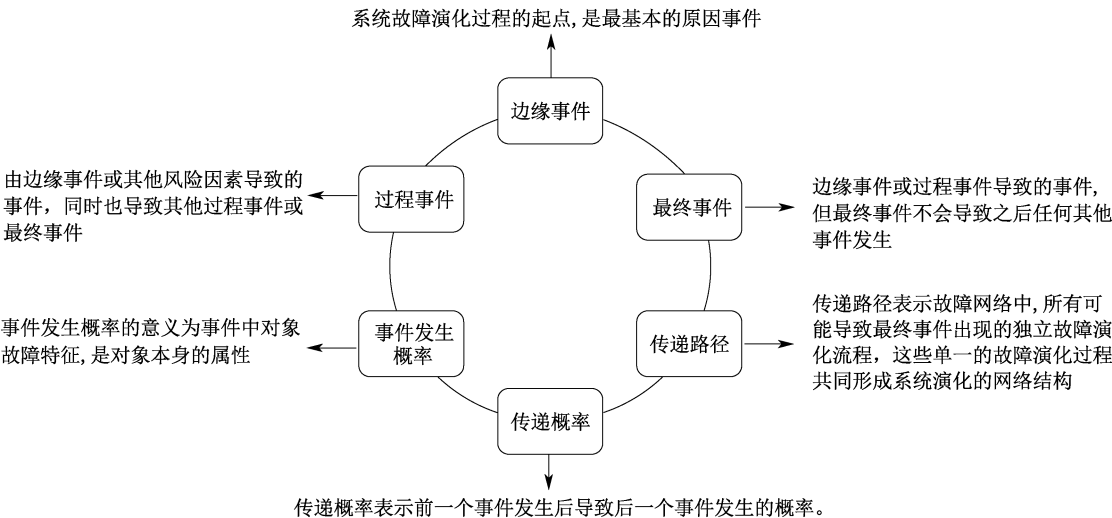


图 3 SFEP 理论主要组成元素

Fig. 3 Main elements of SFEP theory

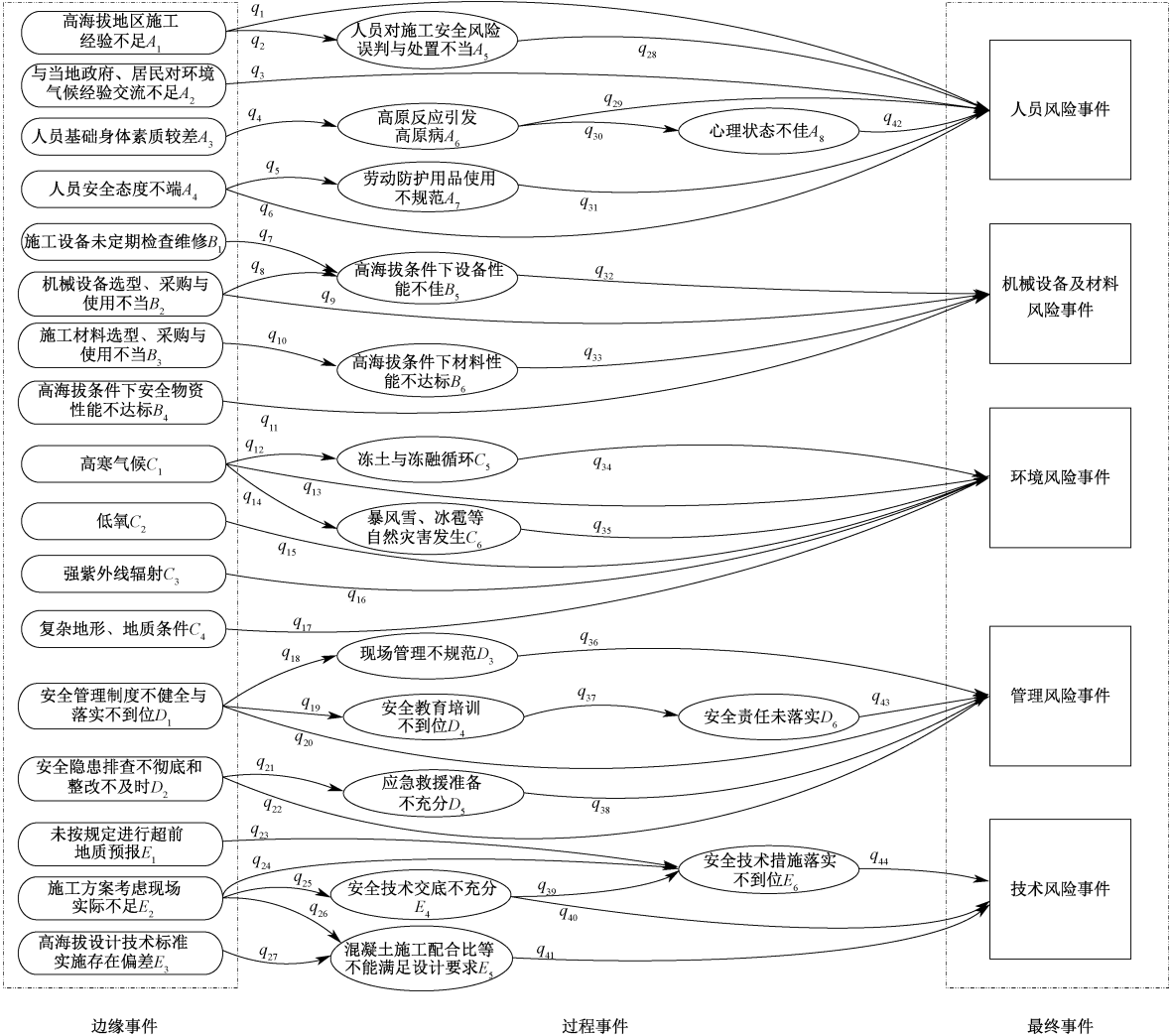


图 4 高海拔地区水电工程施工安全风险传递网络

Fig. 4 Safety risk transmission network for hydropower engineering construction in high-altitude areas

收集 2014—2024 年 83 例高海拔地区施工安全事故调查报告,采用关联规则分析挖掘风险传递关系,运用 Apriori 算法的支持度和置信度描述风险传递关系强弱,相关定义如下:

1) 支持度(Support)反映风险事件在数据集中的共现程度,即事件 X 和 Y 同时出现的概率。

$$\text{Support}(X \rightarrow Y) = P(XY) \quad (1)$$

2) 置信度(Confidence)反映风险传递关系中后项对于前项的依赖程度,即事件 X 出现时 Y 也出现的概率。

$$\text{Confidence}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Support}(X \rightarrow Y)}{\text{Support}(X)} \quad (2)$$

为保证较多风险事件被数据集包含,同时过滤极端偶然事件,设置支持度 $\geq 5\%$;考虑高海拔地区施工安全风险“间接触发、弱关联但强影响”的特殊性,保留强影响但弱关联的规则,并规避低置信度下的无效关联,设置置信度 $\geq 15\%$ ^[21]。据此得到风险事件间传递关系的重要度与可靠度,计算风险事件间传递概率值(表 2)。

由传递概率值,确定边缘事件发生概率后,计算

表 2 风险事件间传递概率值

Table 2 Probability values of transmission between risk events

编号	概率值	编号	概率值	编号	概率值	编号	概率值	编号	概率值	编号	概率值
q_1	0.41	q_9	0.43	q_{17}	0.66	q_{25}	0.82	q_{33}	0.59	q_{41}	0.60
q_2	0.52	q_{10}	0.47	q_{18}	0.75	q_{26}	0.78	q_{34}	0.63	q_{42}	0.22
q_3	0.30	q_{11}	0.71	q_{19}	0.81	q_{27}	0.72	q_{35}	0.62	q_{43}	0.77
q_4	0.43	q_{12}	0.80	q_{20}	0.76	q_{28}	0.58	q_{36}	0.68	q_{44}	0.68
q_5	0.47	q_{13}	0.39	q_{21}	0.65	q_{29}	0.79	q_{37}	0.75	—	—
q_6	0.28	q_{14}	0.15	q_{22}	0.73	q_{30}	0.71	q_{38}	0.66	—	—
q_7	0.72	q_{15}	0.28	q_{23}	0.63	q_{31}	0.64	q_{39}	0.74	—	—
q_8	0.67	q_{16}	0.25	q_{24}	0.57	q_{32}	0.69	q_{40}	0.57	—	—

表 3 各条风险传递路径的概率计算式

Table 3 Probability calculation formula of each risk transmission path

编号	路径	计算式	编号	路径	计算式	编号	路径	计算式
R_1	$A_1 \rightarrow A$	$P_{A1}q_1$	R_{11}	$B_3 \rightarrow B_6 \rightarrow B$	$P_{B3}q_{10}q_{33}$	R_{21}	$D_1 \rightarrow D$	$P_{D1}q_{20}$
R_2	$A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow A$	$P_{A1}q_2q_{28}$	R_{12}	$B_4 \rightarrow B$	$P_{B4}q_{11}$	R_{22}	$D_2 \rightarrow D_5 \rightarrow D$	$P_{D2}q_{21}q_{38}$
R_3	$A_2 \rightarrow A$	$P_{A2}q_3$	R_{13}	$C_1 \rightarrow C_5 \rightarrow C$	$P_{C1}q_{12}q_{34}$	R_{23}	$D_2 \rightarrow D$	$P_{D2}q_{22}$
R_4	$A_3 \rightarrow A_6 \rightarrow A$	$P_{A3}q_4q_{29}$	R_{14}	$C_1 \rightarrow C$	$P_{C1}q_{13}$	R_{24}	$E_1 \rightarrow E_6 \rightarrow E$	$P_{E1}q_{24}q_{44}$
R_5	$A_3 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8 \rightarrow A$	$P_{A3}q_4q_{30}q_{42}$	R_{15}	$C_1 \rightarrow C_6 \rightarrow C$	$P_{C1}q_{14}q_{35}$	R_{25}	$E_2 \rightarrow E_6 \rightarrow E$	$P_{E2}q_{24}q_{44}$
R_6	$A_4 \rightarrow A_7 \rightarrow A$	$P_{A4}q_5q_{31}$	R_{16}	$C_2 \rightarrow C$	$P_{C2}q_{15}$	R_{26}	$E_2 \rightarrow E_4 \rightarrow E_6 \rightarrow E$	$P_{E2}q_{25}q_{39}q_{44}$
R_7	$A_4 \rightarrow A$	$P_{A4}q_6$	R_{17}	$C_3 \rightarrow C$	$P_{C3}q_{16}$	R_{27}	$E_2 \rightarrow E_4 \rightarrow E$	$P_{E2}q_{25}q_{40}$
R_8	$B_1 \rightarrow B_5 \rightarrow B$	$P_{B1}q_7q_{32}$	R_{18}	$C_4 \rightarrow C$	$P_{C4}q_{17}$	R_{28}	$E_2 \rightarrow E_5 \rightarrow E$	$P_{E2}q_{26}q_{41}$
R_9	$B_2 \rightarrow B_5 \rightarrow B$	$P_{B2}q_8q_{32}$	R_{19}	$D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D$	$P_{D1}q_{18}q_{36}$	R_{29}	$E_3 \rightarrow E_5 \rightarrow E$	$P_{E3}q_{27}q_{41}$
R_{10}	$B_2 \rightarrow B$	$P_{B2}q_9$	R_{20}	$D_1 \rightarrow D_4 \rightarrow D_6 \rightarrow D$	$P_{D1}q_{19}q_{37}q_{43}$	—	—	—

各条风险传递路径的概率,其计算式见表 3,从而得到最终事件的发生概率:

$$P_A = P_{A1}q_1 + P_{A1}q_2q_{28} + P_{A2}q_3 + P_{A3}q_4q_{29} + P_{A3}q_4q_{30}q_{42} + P_{A4}q_5q_{31} + P_{A4}q_6 \quad (3)$$

$$P_B = P_{B1}q_7q_{32} + P_{B2}q_8q_{32} + P_{B2}q_9 + P_{B3}q_{10}q_{33} + P_{B4}q_{11} \quad (4)$$

$$P_C = P_{C1}q_{12}q_{34} + P_{C1}q_{13} + P_{C1}q_{14}q_{35} + P_{C2}q_{15} + P_{C3}q_{16} + P_{C4}q_{17} \quad (5)$$

$$P_D = P_{D1}q_{18}q_{36} + P_{D1}q_{19}q_{37}q_{43} + P_{D1}q_{20} + P_{D2}q_{21}q_{38} + P_{D2}q_{22} \quad (6)$$

$$P_E = P_{E1}q_{23}q_{44} + P_{E2}q_{24}q_{44} + P_{E2}q_{25}q_{39}q_{44} + P_{E2}q_{25}q_{40} + P_{E2}q_{26}q_{41} + P_{E3}q_{27}q_{41} \quad (7)$$

3 高海拔地区水电工程施工安全风险传递路径 SD 模型构建

3.1 模型边界确定和基本假设

以高海拔地区水电工程施工安全风险为建模对象,确定人员、机械设备及材料、环境、管理和技术 5 个子系统作为模型边界。为确保模型的逻辑性与科学性,提出以下假设:①施工安全风险系统的运行是连续渐进的行为过程;②模型仅考虑 5 个子系统内风险因素相互作用导致的施工安全风险,其他影响力过小的外生变量不予考虑;③工程建设管理者对施工安全风险的调控作用有限,无法完全消除负面影响。

3.2 因果关系图建立

以施工安全风险传递网络为基础,利用 Vensim DSS 绘制风险事件间因果关系,如图 5 所示。

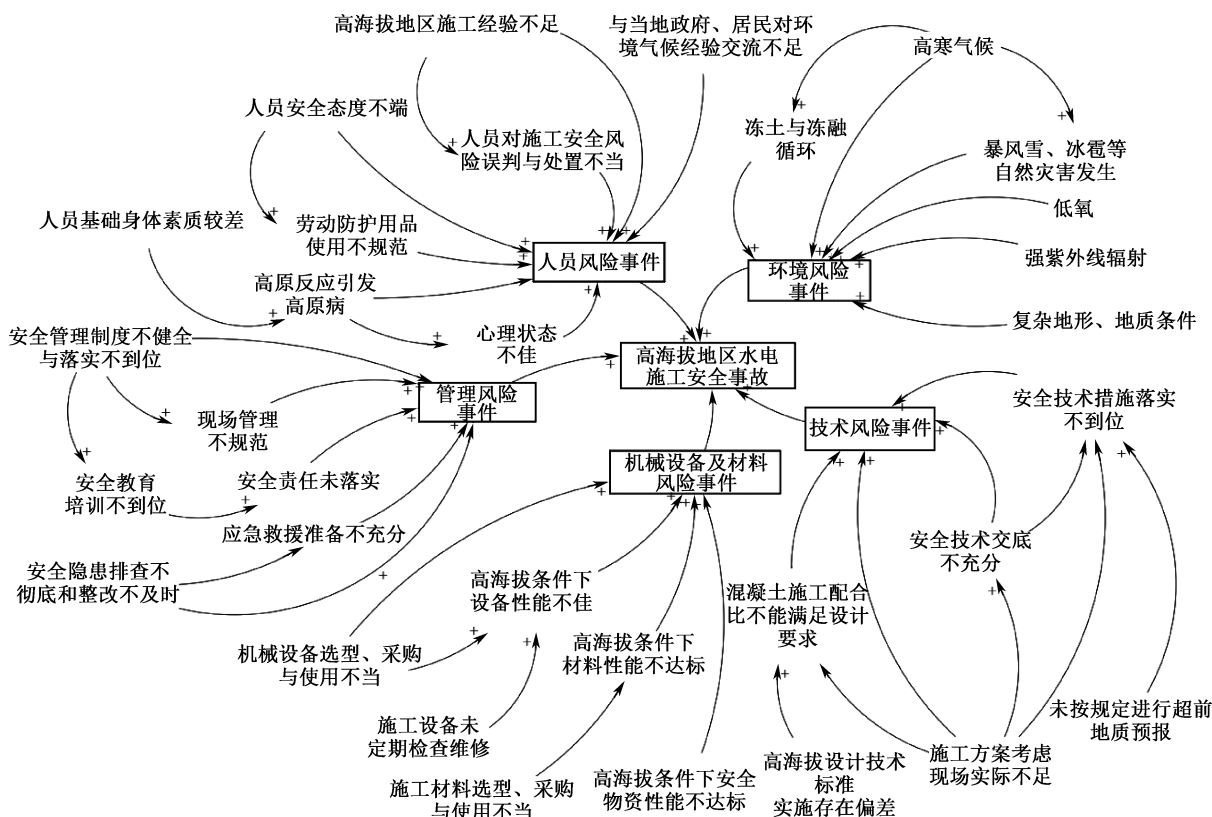


图5 风险传递网络风险事件间因果关系

Fig. 5 Causal relationships between various risk events in risk transmission network

3.3 存量流量图建立

为分析施工安全风险传递网络中最终风险事件的动态演化和传递特征,以风险事件间因果关系图为基础,应用 Vensim DSS 软件建立存量流量图模型,如图 6 所示。

3.4 模型变量函数关系式定义

根据风险传递网络及事件间传递概率,结合存量流量图,参照文献^[22-23],确定施工安全风险传递网络 SD 模型主要变量方程式如下:

$$I_k = \text{DELAY}_1(P_{X_i} \times q_i, t_1) \quad (8)$$

$$O_k = \text{IFTHENELSE}(P_X \geq 0, \text{DELAY}_1(P_X + Q + M_i, t_2, 0), 0) \quad (9)$$

$$S_k = \int_{T_0}^T (I_k(x) - O_k(x)) dx \quad (10)$$

式中: I_k 为输入率(Inflow, I); X_i 为边缘事件; P_{X_i} 为边缘事件发生概率; t_1, t_2 为延迟时间, 周; O_k 为输出率(Outflow, O); Q 为风险管控程度; M_i 为安全风险衰减程度; P_Y 为边缘事件对应于系统中最终事件

发生概率; S_k 为状态量 (Stock, S); i 为子系统的个数, $i=1, 2, \dots, 5$; k 为状态变量的个数, $k=1, 2, \dots, 6$ 。

4 高海拔地区水电工程案例仿真

以叶巴滩水电站中双曲拱坝主体坝段施工为案例,平均海拔 3 000 m,总装机容量 2 240 MW,以坝段施工开始后的 28 周为时间跨度开展模型仿真。

4.1 确定初值

采用现场调研结合工程资料,邀请施工专家、项目管理人员和一线技术人员进行三点估值法打分,取算术平均值作为模型初始值,确定边缘事件发生概率。取值范围为 $[0,1]$,其中,0表示边缘事件不发生;1表示边缘事件肯定发生,结果见表4。

表 4 边缘事件的发生概率

Table 4 Occurrence probabilities of marginal events

边缘事件	发生概率/%	边缘事件	发生概率/%	边缘事件	发生概率/%
A_1	5.3	B_3	4.5	D_1	8.0
A_2	3.5	B_4	3.6	D_2	6.0

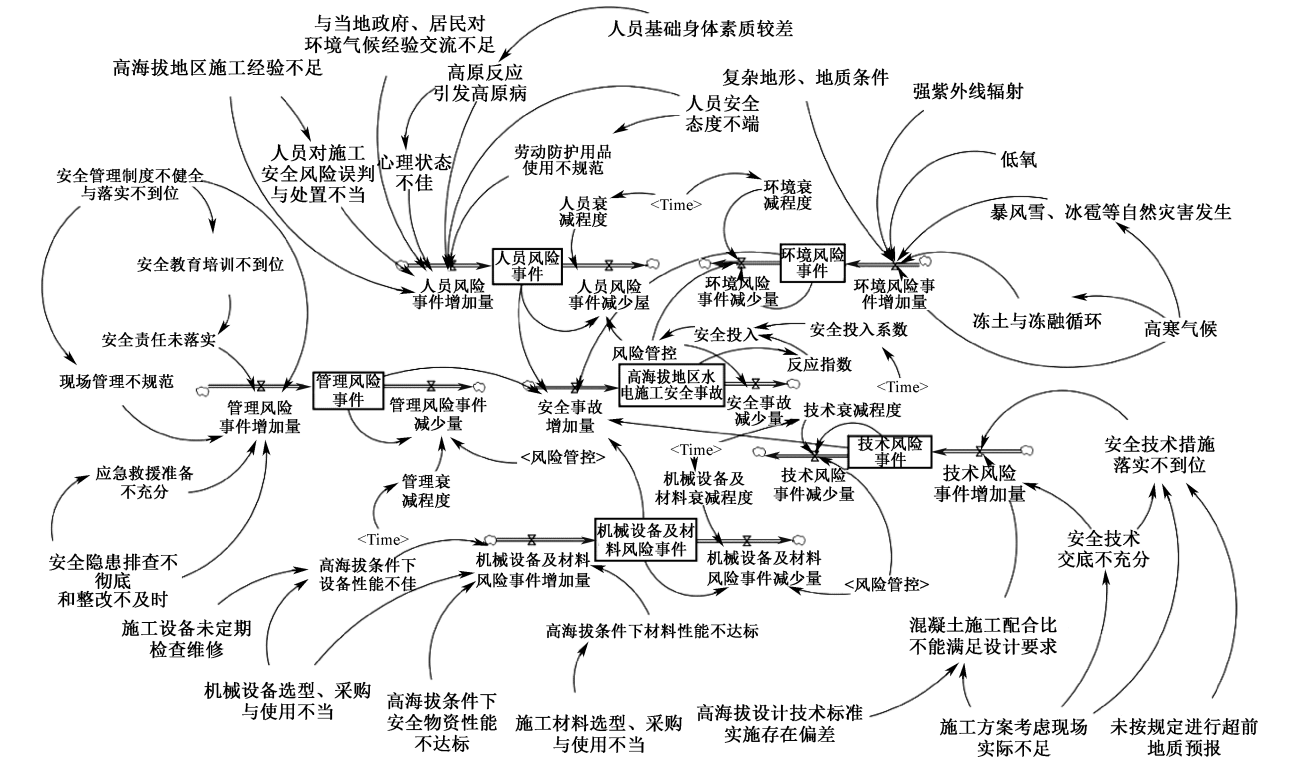


图 6 施工安全风险传递网络的存量流量

Fig. 6 Stock flow diagram of construction safety risk transmission network

续表 4

边缘事件	发生概率/%	边缘事件	发生概率/%	边缘事件	发生概率/%
A_3	4.7	C_1	8.8	E_1	6.5
A_4	4.8	C_2	9.0	E_2	5.5
B_1	4.5	C_3	5.4	E_3	6.3
B_2	3.5	C_4	10.1	—	—

确定边缘事件发生概率后,计算最终事件及各风险传递路径的发生概率,采用施工安全风险传递网络 SD 模型进行仿真分析。

4.2 施工安全风险传递路径仿真分析

借助 Vensim DSS 软件开展施工安全风险传递演化分析,设定步长为 0.125,时间跨度 0~28 周。

4.2.1 最终事件风险概率演化分析与敏感性分析

运用施工安全风险传递网络 SD 模型,分析风险传递最终事件的风险概率演化趋势(图 7)和其敏感性。由图 7 可知:最终风险事件概率均呈先快速上升后下降态势,施工前期增速排序为:环境>管理>技术>机械设备及施工材料>人员;峰值排序为:环境>管理>技术>机械设备及施工材料>人员。模拟最终风险事件敏感性,不同颜色条带代表不同程度的敏感置信区间,敏感性以带宽为参考量,带宽越

大,敏感性越高^[24]。其中,管理风险事件、环境风险事件、技术风险事件、人员风险事件、机械设备及材料风险事件的敏感性带宽分别约为 3.48、5.12、2.96、2.62、2.84,敏感性排序为:环境>管理>技术>机械设备及施工材料>人员。环境、管理敏感性较为突出,与基于 SFEP 理论的风险传递概率分析结果基本相符,确定二者为风险传递控制关键节点。

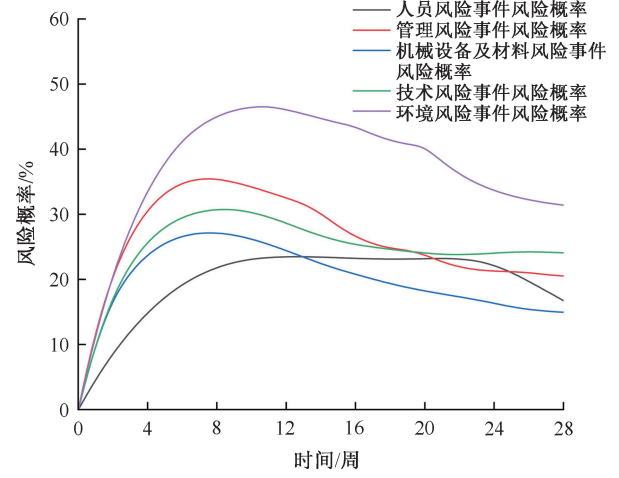


图 7 最终风险事件风险概率演化趋势

Fig. 7 Evolution trends of risk probability of final risk events

4.2.2 安全风险传递路径分析

环境作为原生风险载体,管理作为核心调控变量,决定施工安全系统整体风险阈值。根据表 3 和表 4,得到导致管理风险事件的各路径概率排序为: R_{20} (2. 64%) > R_{19} (2. 57%) > R_{22} (2. 22%) > R_{21} (1. 97%) > R_{23} (1. 43%)。利用施工安全风险传递网络 SD 模型进行敏感性验证,管理风险事件风险传递路径概率变化如图 8 所示。由图 8 可知:路径敏感性排序为: R_{20} > R_{19} > R_{22} > R_{21} > R_{23} ,其中, R_{20} 、 R_{19} 、 R_{22} 影响程度明显。由此可得 3 条关键路径:① R_{20} ,安全管理制度不健全→安全教育培训落实不到位→安全责任未落实→管理风险事件;② R_{19} ,安全管理制度不健全→现场管理不规范→管理风险事件;③ R_{22} ,安全隐患排查不彻底和整改不及时→应急救援准备不充分→管理风险事件。施工安全风险传递网络 SD 模型揭示了 29 条风险传递路径(3 条关键路径、26 条常规路径),确定环境及管理风险事件为关键节点,契合案例实际安全管理重点,验证了模型有效性。

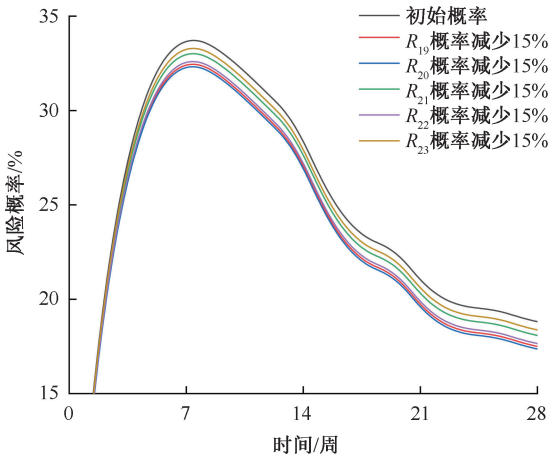


图 8 管理风险事件风险传递路径概率变化
Fig. 8 Probability changes of risk transmission paths of management risk events

4.3 防控策略

从关键节点与关键路径入手,通过“阻断”风险传递进程,降低边缘事件发生概率或事件间传递概率,进而降低最终事件发生概率,以减少施工安全事故的发生,具体措施如图 9 所示。

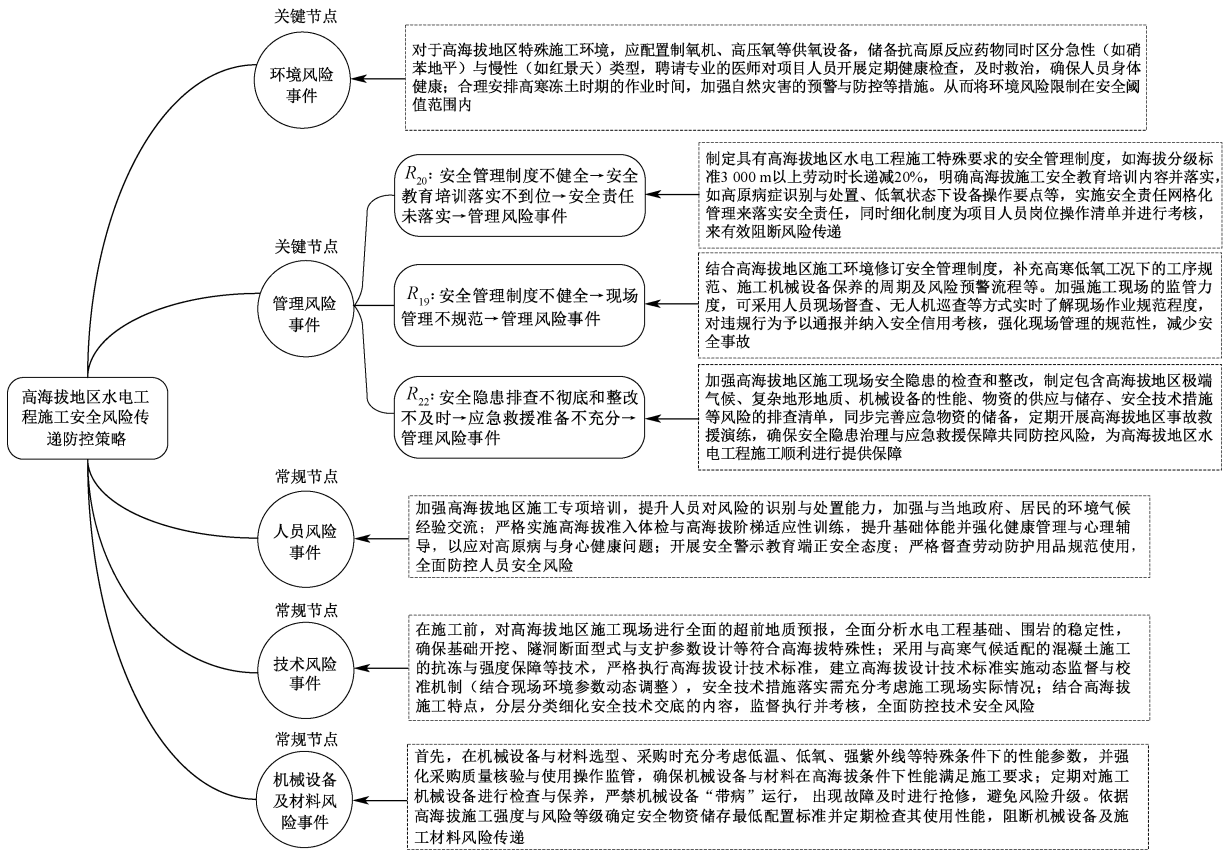


图 9 高海拔地区水电工程施工安全风险传递防控策略

Fig. 9 Prevention and control strategies for safety risk transmission in hydropower engineering construction in high-altitude areas

5 结 论

1) 高海拔地区水电工程施工安全风险传递过程中,环境风险事件与管理风险事件为关键节点,二者的风险概率演化速度、峰值及敏感性均高于其他风险事件,对系统整体风险水平具有重要影响。

2) 通过仿真分析,识别出3条关键风险传递路径:①安全管理制度不健全→安全教育培训落实不

到位→安全责任未落实→管理风险事件;②安全管理制度不健全→现场管理不规范→管理风险事件;③安全隐患排查不彻底和整改不及时→应急救援准备不充分→管理风险事件。

3) 高海拔地区水电工程施工安全风险防控以环境、管理关键节点为核心,对3条关键传递路径实施精准干预,同时兼顾常规风险节点及对应路径,有助于有效抑制风险传递进程,降低施工安全风险。

参 考 文 献

- [1] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[C]. 中国企业改革发展2020 蓝皮书. 新华社,2020:371-386.
- [2] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等. 高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J]. 水利学报,2021,52(12):1404-1417.
Fan Qixiang, Lin Peng, Wei Pengcheng, et al. Intelligent construction of hydraulic engineering in high altitude areas: challenges and strategies[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12):1404-1417.
- [3] 莫俊文,王锐锐,滕仓国. 高海拔铁路工程施工人员不安全行为评估[J]. 中国安全科学学报,2023,33(8):30-38.
Mo Junwen, Wang Ruirui, Teng Cangguo. Assessment of unsafe behavior of construction personnel in high-altitude railway projects[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8):30-38.
- [4] 成连华,李梓凡,郭慧敏,等. 基于区间二元语义信息的高海拔地区建筑施工项目应急能力评价[J]. 科学技术与工程,2024,24(21):9252-9259.
Cheng Lianhua, Li Zifan, Guo Huimin, et al. Construction projects in high altitude areas based on interval binary semantic information emergency response capacity evaluation[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(21):9252-9259.
- [5] Zhao Jing, Wang Yuanming, Li Huimin, et al. Analysis of construction safety risk management for cold region concrete gravity dams based on fuzzy VIKOR-LEC[J]. Buildings, 2025, 15(12):DOI:10.3390/buildings15121981.
- [6] 牛衍亮,苏丽娟,纪文雅,等. 高海拔铁路隧道施工安全风险管控策略研究[J]. 中国安全生产科学技术,2024,20(6):168-175.
Niu Yanliang, Su Lijuan, Ji Wenya, et al. Study on safety risk management strategy of railway tunnel construction in high-altitude area[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(6):168-175.
- [7] 谢雪凌. 高海拔地区作业人员职业健康防护行为意识研究[D]. 宜昌:三峡大学,2019.
Xie Xueling. Study on occupational health protection behavior awareness of workers in high altitude area[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [8] Wu Peng, Yang Feng, Zheng Jinlong, et al. Evaluating the highway tunnel construction in western Sichuan plateau considering vocational health and environment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23):DOI: 10.3390/ijerph16234671.
- [9] Zhang Yuxiang, Pan Jianwen, Sun Xinjian, et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions[J]. Engineering Structures, 2021, 230:DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111721.
- [10] 姚可夫,田始光,漆一宁,等. 高海拔区特征环境驱动下混凝土坝服役性能研究进展[J]. 水利学报,2023,54(6):717-728.
Yao Kefu, Tian Shiguang, Qi Yining, et al. Performance of concrete dams impacted by characteristic climate in high-altitude area: a review[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(6):717-728.
- [11] 赵树磊,孙兵,陈稳干,等. 超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(4):239-246.
Zhao Shulei, Sun Bing, Chen Wen'gan, et al. Physiological indicators and labor intensity of tunnel construction workers at ultra-high altitude[J]. China Safety Sciences Journal, 2024, 34(4):239-246.
- [12] 刘毅,杜雷功,钱文勋,等. 高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J]. 水利水电技术,2020,51(3):45-52.

- Liu Yi, Du Leigong, Qian Wenxun, et al. Study on key technical problems of high concrete dam construction in alpine region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(3):45-52.
- [13] 潘丹,罗帆. 基于结构方程模型的建筑施工项目安全绩效评价[J]. 安全与环境学报,2018,18(2):602-609.
Pan Dan, Luo Fan. Safety performance evaluation of the construction projects based on the structural equation model[J]. Journal of Safety and Environment, 2018,18(2):602-609.
- [14] 李藐,陈建国,陈涛,等. 突发事件的事件链概率模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(8):1173-1177.
Li Miao, Chen Jianguo, Chen Tao, et al. Probability for disaster chains in emergencies[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2010, 50(8):1173-1177.
- [15] 吴翊鸣,申霞. 数智赋能应急管理体系和能力现代化建设影响因素分析:基于 DEMATEL-ISM 方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):236-244.
Wu Yiming, Shen Xia. Analysis of influencing factors on digital intelligence empowering emergency management system and capacity modernization: based on DEMATEL-ISM method[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11):236-244.
- [16] Fang Chao, Marle F, Zio E, et al. Network theory-based analysis of risk interactions in large engineering projects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 106: 1-10.
- [17] 崔铁军,李莎莎. 系统故障演化过程最终事件状态及发生概率研究[J]. 中国安全科学学报,2021,31(8):1-7.
Cui Tiejun, Li Shasha. Study on target event state and occurrence probability of system fault evolution process[J]. China Safety Sciences Journal, 2021, 31(8):1-7.
- [18] 李莎莎,崔铁军. 基于过滤性传递概率的 SFN 最终事件发生概率计算方法研究[J]. 模糊系统与数学,2024,38(1):88-97.
Li Shasha, Cui Tiejun. Research on calculating method of target event occurrence probability of SFN based on filterability transfer probability[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2024,38(1):88-97.
- [19] Xiang Pengcheng, Yang Yingliu, Yan Kesheng, et al. Identification of key safety risk factors and coupling paths in mega construction projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2024, 40(4): DOI: 10.1061/JMENE. MEENG - 5926.
- [20] Cui Tiejun, Li Shasha. Research on basic theory of space fault network and system fault evolution process[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(6): 1725-1744.
- [21] 郭明阳,陈淼,吕佳,等. 基于关联规则算法-解释结构模型-贝叶斯网络的船舶碰撞破损进水风险及致因分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2025,46(9):1693-1700.
Guo Mingyang, Chen Miao, Lyu Jia, et al. Risk and causation analysis of ship collision breakage into water based on Apriori-ISM-BN[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025,46(9):1693-1700.
- [22] 江新,李雪莲,吴静涵,等. 敏感性水利工程社会稳定风险演化 SD 模型[J]. 中国安全科学学报,2021,31(4):18-26.
Jiang Xin, Li Xuelian, Wu Jinghan, et al. SD model of social stability risk evolution for sensitive water conservancy projects[J]. China Safety Sciences Journal, 2021,31(4):18-26.
- [23] Ma Hui, Wu Zhiguo, Chang Peng. Social impacts on hazard perception of construction workers: a system dynamics model analysis[J]. Safety Science, 2021, 138: DOI:10.1016/j.ssci.2021.105240.
- [24] 江新,张腾飞,陈婧,等. 复杂系统视角下洞室施工人员安全认知仿真研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(2):22-30.
Jiang Xin, Zhang Tengfei, Chen Jing, et al. Numerical study on safety cognition of cavern constructors from perspective of complex system[J]. China Safety Science Journal,2024,34(2):22-30.

作者简介: 江新 (1966—),男,安徽寿县人,硕士,教授,主要从事工程项目群管理、系统决策理论及安全评价等方面的研究。E-mail: zgsxdxjx@qq.com。

