

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0099

李强, 李子阳, 王长生, 等. 长距离输水隧洞盾构法施工风险事件路径预测[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 999-1009.
LI Q, LI Z Y, WANG C S, et al. Prediction of risk event path for shield tunneling of long-distance water conveyance tunnel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 999-1009. (in Chinese)

长距离输水隧洞盾构法施工风险事件路径预测

李强¹, 李子阳¹, 王长生², 许林军², 靳文超²

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

2. 西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 郑州 450008)

摘要: 对长距离输水隧洞盾构施工可能的风险路径进行预测分析, 对保障隧洞工程安全施工具有重要作用。基于大量盾构施工风险事故统计分析, 提取隧洞工程盾构施工风险致因指标, 利用解释结构模型对盾构施工风险因素进行因果层次关系分析和网络拓扑图构建; 建立基于贝叶斯网络的盾构施工风险事件预测模型, 运用贝叶斯网络的反向诊断推理技术计算风险事件发生的最大可能路径, 确定导致盾构施工风险事件的关键因素; 将所得的风险预测模型应用到西霞院灌区工程穿沁隧洞盾构施工项目中。结果表明, 模型运算得到的风险事故路径与工程现阶段实际施工情况一致, 验证模型的可靠性与适用性, 并根据风险事故路径预测结果为穿沁隧洞后续施工的风险隐患排查治理提供指导意见。

关键词: 盾构施工; 风险路径; 解释结构模型; 贝叶斯网络; 反向诊断

中图分类号: TV512 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



我国水资源空间分布不均, 总体呈南多北少^[1], 跨区域调水工程是调配水资源空间分布的重要基础设施, 隧洞工程是长距离调水工程的重要组成部分。盾构法作为一种新兴工艺逐渐应用于长距离隧洞工程施工^[2], 但盾构法施工是一个复杂的系统过程^[3], 受到多种风险因素的制约, 施工风险事故时有发生, 导致工期延误的同时也带来了生命财产损失^[4]。研究盾构法在隧洞工程施工过程的风险事件发生路径, 可帮助管理者及时规避施工风险, 有效管控隧洞工程施工进度, 对提高盾构施工安全管理具有重要意义。

国内外学者针对隧洞工程施工中的突水、溶洞等地质风险及盾构施工风险预测进行研究。李术才等^[5]利用岩溶突涌水灾害的 7 个影响因素建立隧洞施工突水风险评价模型, 采用综合赋权法进行突

水风险指标的权重分析, 构建了一种可量化的属性区间评价理论与方法。章龙管等^[6]分析了盾构机在运行中产生的大量施工参数和报警数据, 研究了隧洞施工重要风险与盾构机故障报警数据之间的关联, 采用故障树和贝叶斯网络建立了盾构机风险预测模型, 可通过盾构机故障对后续施工可能发生的风险事件进行预测。Li 等^[7]综合运用地质分析、三维激发极化与地震超前地质预报方法, 提出了适用于 TBM 隧洞施工的综合超前地质预报技术体系, 可对 TBM 施工隧洞掌子面前方的溶洞、断层破碎带等不良地质进行准确预报。Chung 等^[8]考虑了地质风险因素和 TBM 类型建立了一种基于贝叶斯网络的盾构 TBM 风险分析模型, 并系统分析了意外风险事件导致项目进度延迟的原因。综合来看, 现有的隧洞盾构法施工进度风险管理研究尚不完善,

收稿日期: 2022-07-05 修回日期: 2022-08-25 网络出版时间: 2022-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220926.0900.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900603); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y721009)

作者简介: 李强(1997—), 男, 山西吕梁人, 主要从事水工结构风险评估研究。E-mail: 799624513@qq.com

通信作者: 李子阳(1983—), 男, 安徽亳州人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利工程安全监控、健康诊断与风险管理研究。E-mail: zyl@nhri.cn

还存在如下局限性:一是未考虑引水隧洞盾构法施工风险因素之间的关联性;二是现有研究成果多基于地铁和交通隧道,对于水利工程长距离引水隧洞施工技术及管理风险的差异性没有考虑。

针对现有研究的局限性,以水利工程引调水工程中的长距离输水隧洞盾构法施工为研究对象,对已收集的引水隧洞施工案例资料进行统计。在对盾构施工风险事件统计分析的基础上,利用解释结构模型建立风险因素和风险事件之间的关联性,利用贝叶斯网络预测风险事件发生的最大可能路径,并对典型长距离输水隧洞工程——穿沁隧洞的施工风险状况进行验证分析,为其后续施工安全提供必要支撑。

1 盾构施工风险因素网络拓扑图的构建

1.1 盾构施工风险因素和风险事件提取

引水隧洞工程施工过程中由于盾构致使周围土体的初始应力释放,土体内部的应力进行重新分布,除此之外,引水隧洞还有较大的地下水压力作用,

这些都会导致隧洞受力情况复杂,使其存在巨大风险^[9]。其风险特点为:风险具有“多米诺骨牌”效应,引水隧洞工程施工中,各风险因素和风险事件之间是相互关联的,一种风险因素出现,可能会导致多种风险事件同时发生,产生“多米诺骨牌”效应;风险概率高,不同的引水隧洞所处的地质条件、气候条件以及施工设备等因素都存在差异,因此一个引水隧洞工程很难找到同类可借鉴的工程实例,风险事件难以预测,导致施工过程中风险事故发生概率较高;风险损失严重,引水隧洞工程资金投入大,危险性高,一旦风险因素演变成风险事故,通常会带来巨大的经济损失,甚至人员伤亡,尤其是发生突水涌水事故时,有可能造成隧洞塌方,带来严重后果^[10]。

结合已有隧洞工程盾构施工风险因素分析成果^[11-19],从人为风险、机器设备风险、材料风险、施工技术风险、环境风险 5 个方面总结提炼出盾构施工的 30 个风险因素以及可能引起的 20 种风险事件,见表 1。

表 1 隧洞工程盾构施工风险因素
Tab. 1 Risk factors of shield tunneling

风险类别	风险致因指标	风险事件
人为风险A	A ₁ .施工人员技术不足;A ₂ .人员安排不合理;A ₃ .管理及操作人员培训不到位;A ₄ .设计方案存在缺陷	R ₁₁ .工程补救;R ₁₂ .人员培训;R ₁₃ .返工;R ₁₄ .撤换管理人员;R ₁₅ .撤换施工人员;R ₁₆ .修改施工方案
机械设备风险B	B ₁ .大型施工机械的安装、运行及拆卸不规范;B ₂ .起重机械设备自身的安装、拆卸作业不规范;B ₃ .盾构机尾密封失效;B ₄ .盾构机油缸系统故障;B ₅ .刀盘磨损;B ₆ .隧洞运输设备故障;B ₇ .通风系统故障	R ₂₁ .机械伤害;R ₂₂ .机械设备故障影响施工进度
材料风险C	C ₁ .管片质量不满足要求;C ₂ .材料供应不及时;C ₃ .材料搬运损坏;C ₄ .材料错误使用	R ₃₁ .更换材料;R ₃₂ .材料检验;R ₃₃ .返工
施工技术风险D	D ₁ .泥水仓压力控制不当;D ₂ .洞室支护达不到要求;D ₃ .始发接收架安装不合理;D ₄ .模板支撑工程不满足要求;D ₅ .注浆压力不合理	R ₄₁ .人身伤害;R ₄₂ .塌方;R ₄₃ .地面隆起
环境风险E	E ₁ .粉尘;E ₂ .有毒气体;E ₃ .不良地质段;E ₄ .地层变形;E ₅ .地下水位较高	R ₅₁ .人身伤害;R ₅₂ .塌方;R ₅₃ .突涌水;R ₅₄ .地面沉降;R ₅₅ .姿态偏差;R ₅₆ .卡护盾;R ₅₇ .卡刀盘

1.2 解释结构模型法

解释结构模型法^[20](interpretative structural modeling method, ISM)于 1976 年由美国科学家 Warfield 提出并用于解决复杂性问题,是现代系统工程中广泛应用的一种分析方法,是结构模型化技术的一种。ISM 在不损失系统功能的前提下给出最简的、层次化的拓扑图,展示效果直观,通过层级图可以直接了解系统因素的因果层次,阶梯结构相较于表格、文字、数学公式等方式在描述系统的本质方面具有极大优势。其步骤如下:

分析一个有 n 个因素 X_1, X_2, \dots, X_n 构成的系统

X, T 为该系统目标事件。

第一步:确定因素之间的直接作用和间接作用,构造邻接矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$,矩阵中 $a_{ij} = 1$ 则表示因素 X_i 到因素 X_j 之间存在路径, $a_{ij} = 0$ 则表示因素 X_i 到因素 X_j 之间不存在路径。

第二步:运用布尔逻辑运算,计算得到邻接矩阵 A 的可达矩阵 $R_A = [r_{ij}]_{n \times n}$ 。

布尔运算公式为

$$R = (I \cup A)^n \tag{1}$$

式中: I 为 n 阶单位方阵。

第三步:对可达矩阵进行层次化处理,按照每行

“1”个数的多少从前到后重新排列矩阵,重新排列的矩阵为倒三角矩阵,从矩阵的左上到右下依次找出最大单位矩阵,逐步形成不同层次的要素集合。

第四步:层级划分,建立结构模型。

1.3 盾构施工风险因素网络拓扑图

对于机械设备风险 B 和施工技术风险 D ,由于其各风险因素和风险事件之间不存在交叉关联性^[21],故在识别过程中运用设备各子系统识别与技术分析直接建立层次关系,其结果见图 1、图 2。

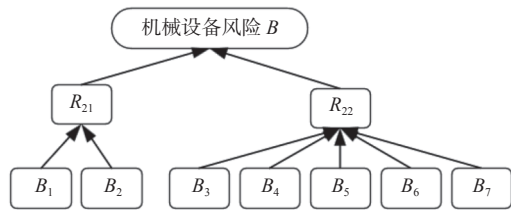


图 1 机械设备风险因素网络拓扑图

Fig. 1 Network topology of mechanical equipment risk factors

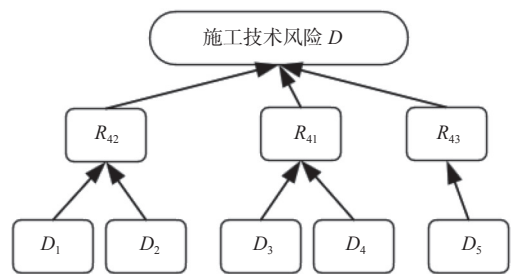


图 2 施工技术风险因素网络拓扑图

Fig. 2 Network topology of construction technology risk factors

对于人为风险、材料风险和环境影响,影响因素存在交叉关联性,则利用解释结构模型(ISM)分别建立各风险致因指标与风险事件之间的层次关系。受篇幅限制,只列出人为风险的层级关系计算步骤,材料风险和环境影响直接给出结果。

根据 ISM 法的第一步建立邻接矩阵 A , 邻接矩阵 A 的行向量从左到右与列向量从上到下对应的元素均为 $A_1, A_2, A_3, A_4, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$, 将风险致因指标与风险事件放入同一矩阵,计算出风险致因指标和风险事件相互关系的同时也能确定出风险事件之间的层次关系。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据 ISM 法第二步,计算出可达矩阵 R_A 。

$$R_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对可达矩阵 R_A 层级划分,可确定出 3 个层级:

$L_1 = \{R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{15}\}; L_2 = \{A_1, A_2, R_{14}, R_{16}\}; L_3 = \{A_3, A_4\}$ 。根据各层级风险因素和事件的关系,建立人为风险因素网络拓扑图,见图 3。

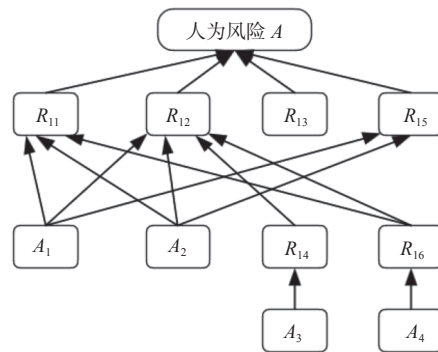


图 3 人为风险因素网络拓扑图

Fig. 3 Network topology of human risk factors

材料风险和环境影响因素网络拓扑图如图 4 和图 5。

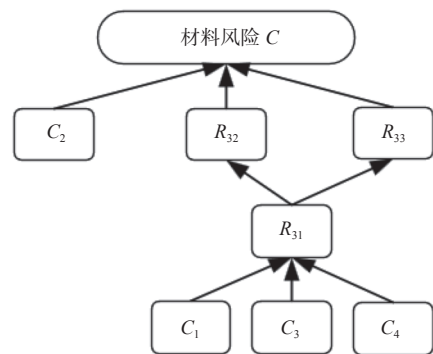


图 4 材料风险因素网络拓扑图

Fig. 4 Network topology of material risk factors

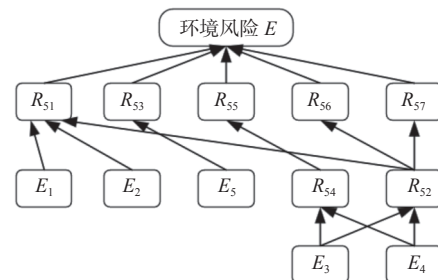


图 5 环境风险因素网络拓扑图

Fig. 5 Network topology of environmental risk factors

将得到的各风险因素网络拓扑图合并,得到盾构施工风险因素网络拓扑图,见图 6。

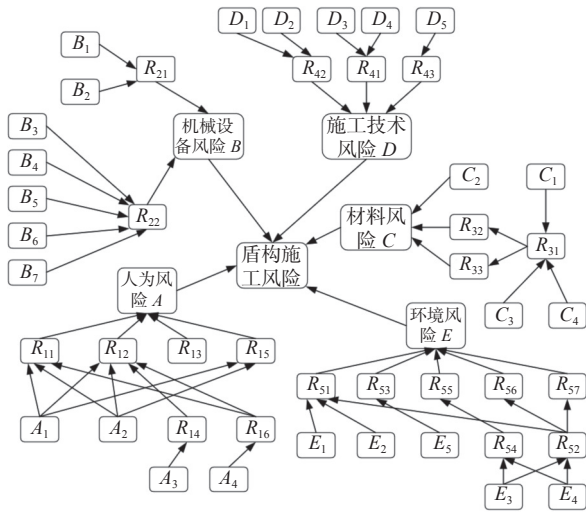


图 6 盾构施工进度风险因素网络拓扑图

Fig. 6 Network topology of risk factors in shield construction progress

2 基于贝叶斯网络的隧洞盾构施工风险路径预测

贝叶斯网络又称信度网络,是贝叶斯方法的扩

展,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型之一。贝叶斯网络对于解决事件的多态性和逻辑关系不确定的大型复杂问题具有很强的优势,在风险分析、事故致因分析及事故预测等领域得到广泛应用^[6]。基于贝叶斯网络理论原理^[22],借助历史工程案例统计结果^[23-25]、专家主观经验和客观数据,利用软件 GeNIe4.0 计算,通过分析计算结果得出盾构施工风险的最大致因链。

2.1 确定贝叶斯网络参数

通过专家经验和参考文献^[6,19]得出风险因素各等级的概率分布,以此作为先验概率,其结果见表 2,表中为了减小联合概率分布的计算量,简化先验概率和条件概率的计算,将风险因素和风险事件等级分为 4 级: I 级为可忽略风险; II 级为可接受风险; III 级为不愿接受风险; IV 级为不能接受风险。例如风险因素 A_1 施工人员技术不足,通过对收集的资料进行统计分析得出:该风险因素是可忽略风险的概率为 0.89,是可接受风险的概率为 0.11,是不愿接受风险和不能接受风险的概率为 0。

表 2 风险因素的先验概率

Tab. 2 Prior probability of risk factors

代号	风险因素	概率分布级别			
		I	II	III	IV
A_1	施工人员技术不足	0.89	0.11	0	0
A_2	人员安排不合理	0.91	0.08	0.01	0
A_3	管理及操作人员培训不到位	0.98	0.02	0	0
A_4	设计方案存在缺陷	0.52	0.45	0.02	0.01
B_1	大型施工机械的安装、运行及拆卸不规范	0.58	0.20	0.02	0
B_2	起重机械设备自身的安装、拆卸作业不规范	0.58	0.20	0.02	0
B_3	盾构机机尾密封失效	0.50	0.30	0.10	0.10
B_4	盾构机油缸系统故障	0.40	0.30	0.20	0.10
B_5	刀盘磨损	0.40	0.30	0.20	0.10
B_6	隧洞运输设备故障	0.45	0.35	0.15	0.02
B_7	通风系统故障	0.50	0.32	0.16	0.02
C_1	管片质量不满足要求	0.70	0.28	0.02	0
C_2	材料供应不及时	0.75	0.23	0.01	0.01
C_3	材料搬运损坏	0.79	0.19	0.02	0
C_4	材料错误使用	0.95	0.05	0	0
D_1	泥水仓压力控制不当	0.84	0.12	0.03	0.01
D_2	洞室支护达不到要求	0.76	0.21	0.02	0.01
D_3	始发接收架安装不合理	0.69	0.29	0.01	0.01
D_4	模板支撑工程不满足要求	0.72	0.24	0.04	0
D_5	注浆压力不合理	0.54	0.45	0.01	0
E_1	粉尘	0.60	0.38	0.01	0.01

表 2 (续)
Tab. 2 (Continued)

代号	风险因素	概率分布级别			
		I	II	III	IV
E_2	有毒气体	0.71	0.27	0.01	0.01
E_3	不良地质段	0.45	0.47	0.07	0.01
E_4	地层变形	0.55	0.40	0.03	0.02
E_5	地下水位较高	0.54	0.40	0.05	0.01

风险事件的各等级概率已有工程资料统计分析,其结果作为条件概率,在有 n 个节点每个节点有 4 个等级的贝叶斯网络模型中,若某一结点有 m 个根节点,则条件概率表中有 $n \times 4^{m+1}$ 个概率值,条件概

率表数据量巨大,所以本文只列出 $A_3-R_{14}-R_{12}$ 的计算结果,见表 3。表 3 的数据表示 A_3 分别在 4 种等级时同时对对应节点 R_{14} 的 4 种等级情况下的节点 R_{12} 的条件概率分布情况。

表 3 $A_3-R_{14}-R_{12}$ 条件概率
Tab. 3 $A_3-R_{14}-R_{12}$ conditional probability

A_3 为 I 级时			A_3 为 II 级时			A_3 为 III 级时			A_3 为 IV 级时		
R_{14} 等级	R_{12} 等级	R_{12} 概率	R_{14} 等级	R_{12} 等级	R_{12} 概率	R_{14} 等级	R_{12} 等级	R_{12} 概率	R_{14} 等级	R_{12} 等级	R_{12} 概率
I	I	0.286	I	I	0.284	I	I	0.286	I	I	0.288
	II	0.254		II	0.256		II	0.254		II	0.252
	III	0.248		III	0.244		III	0.248		III	0.246
	IV	0.212		IV	0.216		IV	0.212		IV	0.214
II	I	0.218	II	I	0.216	II	I	0.218	II	I	0.216
	II	0.305		II	0.307		II	0.305		II	0.307
	III	0.243		III	0.241		III	0.243		III	0.241
	IV	0.234		IV	0.236		IV	0.234		IV	0.236
III	I	0.338	III	I	0.338	III	I	0.339	III	I	0.336
	II	0.260		II	0.260		II	0.250		II	0.262
	III	0.210		III	0.210		III	0.220		III	0.208
	IV	0.192		IV	0.192		IV	0.191		IV	0.194
IV	I	0.255	IV	I	0.253	IV	I	0.257	IV	I	0.253
	II	0.285		II	0.288		II	0.283		II	0.287
	III	0.246		III	0.247		III	0.244		III	0.248
	IV	0.214		IV	0.212		IV	0.216		IV	0.212

2.2 贝叶斯网络诊断推理

采用 GeNIe3.0 软件构建贝叶斯网络模型^[12]。将先验概率和条件概率作为证据变量输入到 GeNIe 中,控制节点“盾构法施工进度风险”的状态等级设置为 IV 级“不能接受风险”,即可反推其他节点的后验概率,运算结果见图 7。

图 7 中节点的致因可能性由后验概率值表现,

后验概率值越大说明致因可能性越大。由此可以看出,当盾构法施工发生 IV 级风险的情况下,环境风险发生 IV 级风险的概率为 59%,机械设备风险发生 IV 级风险的概率为 27%,而人为风险、材料风险和施工技术风险发生 IV 级风险的概率都很低,这表明 IV 级风险主要由环境风险和机械设备风险导致。也可通过有向箭头的粗细判断,有向箭头越粗表示

越容易致使事件的发生,由此可以判断出最大致因链有:盾构机机尾密封失效(盾构机油缸系统故障、刀盘磨损)—盾构机故障—机械设备风险—盾构法施工风险;不良地质段—地面沉降—姿态偏差—环境风险—盾构法施工风险;废弃暗井—塌方—人身伤害(卡刀盘、卡护盾)—环境风险—盾构法施工风

险;废弃暗井—地面沉降—姿态偏差—环境风险—盾构法施工风险;废弃暗井—塌方—人身伤害(卡刀盘、卡护盾)—环境风险—盾构法施工风险。由此可见,本模型实现了风险因素对后续施工的风险及发展趋势进行预判,当风险因素发生概率过高时,应加以重点监控,及时防范对应风险的发生。

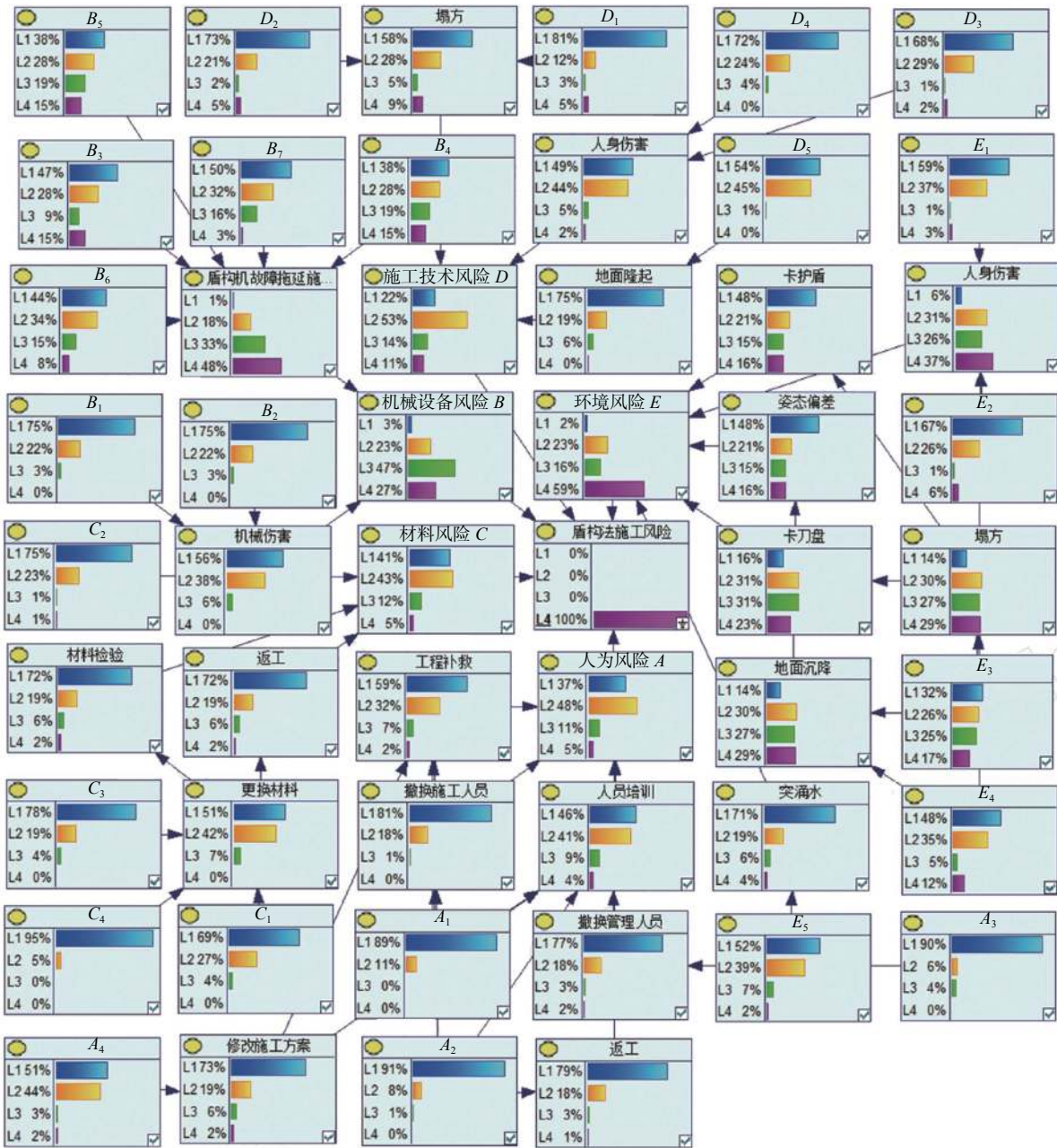


图 7 贝叶斯网络学习结果
Fig. 7 Bayesian network learning results

3 案例分析

3.1 工程概况

西霞院灌区工程穿沁隧洞全长 2.85 km(其中隧洞段长 2.646 km),洞身下穿堤防和沁河,采用泥水

盾构法施工。该隧洞地质条件复杂,场地类别为 II 类,围岩工程地质分类为 V 类,主要存在洞室围岩稳定性差、砂土液化、大变形、扰动变形等问题。同时,场区地下水位较高,且穿越沁河河床及漫滩,隧道全线位于地下水位以下,地下水对隧洞施工带来很大的安全隐患,地下水位下降会引起地层固结

沉降,影响既有堤防、建筑物基础及地下管线管道,导致堤防、周边建筑物、地下管线等的不均匀沉降甚至破坏。因此,穿沁隧洞盾构施工风险控制要求高、难度大,采用基于贝叶斯网络的隧洞盾构施工风险预测模型进行风险评估,同时根据施工实际情况验证模型的适应性。

3.2 贝叶斯网络节点概率统计

根据穿沁隧洞盾构施工现场的隐患排查治理记录,通过专家分析,统计出了人为风险、机器设备风险、材料风险、施工技术风险、环境风险各因素指标发生的概率,见表4(由于部分风险因素并未在施工现场发现,概率为0,表中不予列出)。

表4 穿沁隧洞盾构施工风险发生概率统计

Tab. 4 Probability statistics of shield construction risk of Chuanqin Tunnel

风险等级	A_1	B_2	B_3	B_4	B_5	C_2	C_4	D_1	D_5	E_3	E_4	E_5
I	1.00	1.00	0.90	0.95	0.85	1.00	0.95	0.85	0.85	0.50	0.95	0.90
II	0	0	0.10	0.05	0.15	0	0.05	0.15	0.15	0.30	0.05	0.10
III	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3 隧洞施工风险路径预测

叶斯模型中,得到的结果见图8。

将实际盾构工程施工中获得的节点概率用于贝

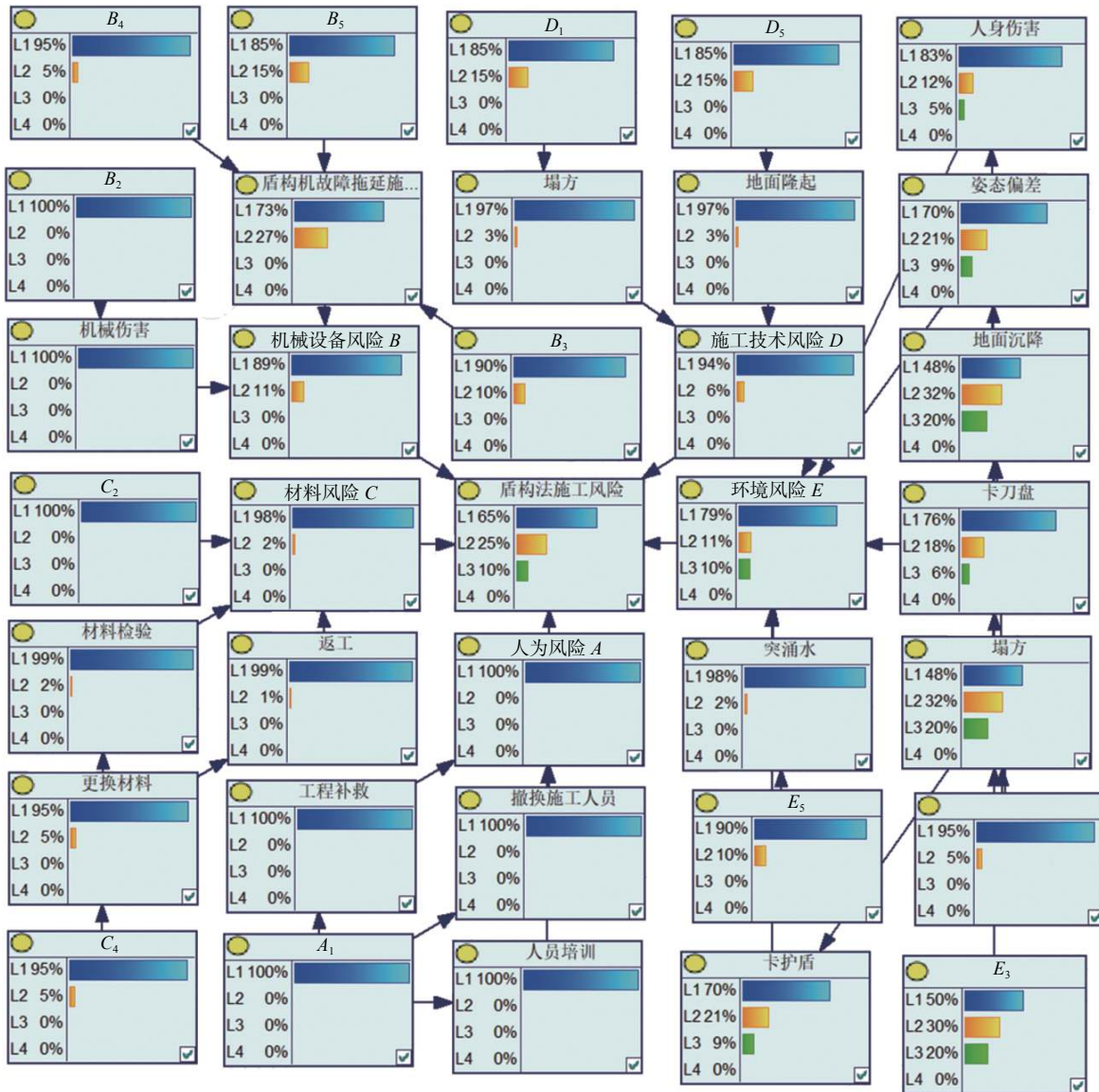


图8 穿沁隧洞施工风险贝叶斯网络学习结果

Fig. 8 Bayesian network learning results of construction risk of Chuanqin tunnel

根据贝叶斯网络学习结果,可以看出穿沁隧洞盾构施工风险主要为 I 级风险, II 级风险主要由机械设备风险和环境风险引起, III 级风险主要由环境风险中的不良地质段引起,发生 IV 级风险的概率为 0。其风险最大致因链为:不良地质段—地面沉降—姿态偏差—环境风险—盾构法施工风险;不良地质段—塌方—人身伤害—环境风险—盾构法施工风险;不良地质段—塌方—卡刀盘—环境风险—盾构法施工风险;不良地质段—塌方—卡护盾—环境风险—盾构法施工风险。

根据隧洞工程实际情况,盾构机在该村落地下掘进时发生 3 处塌陷坑,塌陷坑周边约 10 m 范围内地面明显沉降,引起附近道路、房屋发生不同程度变形开裂。塌陷坑和地面沉降的原因是隧洞工程附近存在 3 口暗井,井深 60 m 左右,暗井曾经为本地村民生活用水取水井。因长期抽取地下水的同时抽走了地层中细颗粒土体和粉细砂,暗井周围地层较为松散或存在空洞,盾构掘进过程中穿越这部分地层时,距离隧洞较近的暗井对隧洞受力产生较大影响,使泥水仓突然泄压引起附近土层变形,导致洞顶地面沉降,附近房屋局部变形、墙体开裂、门楼坍塌等。为避免盾构机停机导致沉降进一步发展,且停机易引起刀头抱死,使工程安全风险加大,在采取对地层提前注浆加固以及变形观测等措施的基础上,盾构机继续实施掘进。同时采用地质雷达对尚未到达的下穿地段是否存在暗井或空洞进行勘探,根据勘探情况,对发现的暗井或空洞进行回填封堵;沿隧洞轴线对洞顶按每隔 10 m 左右进行地面袖阀管注浆预加固,注浆采用双液浆。因为风险事件路径预测及时准确,与施工记录一致,对后续地段处理得当,在后续施工中并没有发生类似事故,也验证了风险路径预测模型的可靠性和工程适应性。

4 结论

引水隧洞施工周期长,风险事件不易预测,为了降低施工风险事故,采用解释结构模型和贝叶斯模型相结合的方法对隧洞盾构法施工风险事件路径进行预测,主要结论如下:

建立隧洞盾构施工风险路径预测模型。通过解释结构模型确定影响隧洞盾构施工进度的各风险事件之间的关联,建立贝叶斯网络模型,形成通过隧洞盾构施工风险因素对隧道盾构施工风险事件其发展趋势进行预测的有效方法。

验证该模型的可靠性与适用性。通过对穿沁隧洞工程盾构施工项目的应用,得到的风险致因链预测结果与实际施工情况一致,该模型可为管理者提供实时决策支持。

模型可以直接应用于施工情况大体相似的引水隧洞盾构工程中;而对于不同情况,如特殊地质条件、不同盾构机等情况,需要对模型的部分参数进行适当改变,但本文建立的模型以及计算流程均适用。

对引水隧道盾构施工风险事件路径进行预测,可以帮助管理人员有效控制工程风险,并根据工程风险的发生情况提前制定预防措施,为引水隧洞施工管理提供合理的科学依据,对隧洞盾构施工风险防范具有指导意义和应用价值。

参考文献(References):

- [1] 关炜. 南水北调工程关键技术研究进展[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 167-174,181. (GUAN W. Summary on key technology research progress of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(1): 167-174,181. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.01.026.
- [2] 熊自明, 卢浩, 王明洋, 等. 我国大型岩土工程施工安全风险研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3703-3716. (XIONG Z M, LU H, WANG M Y, et al. Research progress on safety risk management for large scale geotechnical engineering construction in China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3703-3716. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2138.
- [3] 郑清君, 仲生星. 南水北调中线穿黄隧洞工程的技术难点分析和对策[J]. 隧道建设, 2013, 33(5): 398-406. (ZHENG Q J, ZHONG S X. Analysis on and countermeasures for technical difficulties in construction of Yellow River crossing tunnel on central route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(5): 398-406. (in Chinese)) DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2013.05.012.
- [4] 汪伦焰, 王若腾, 赵荣生. 水工盾构隧道施工安全风险综合评价与判定[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 142-148. (WANG L Y, WANG R T, ZHAO R S. Study on comprehensive evaluation and judgment of shield tun-

- neling safety risk in hydraulic engineering[J]. *Yellow River*, 2021, 43(5): 142-148. (in Chinese) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.05.28](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.05.28).
- [5] 李术才,周宗青,李利平,等.岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J].*岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9): 1858-1867. (LI S C, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1858-1867. (in Chinese) DOI: [10.3969/j.issn.1000-6915.2013.09.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6915.2013.09.018)).
- [6] 章龙管,刘绥美,李开富,等.基于故障树与贝叶斯网络的地铁盾构施工风险预测[J].*现代隧道技术*, 2021, 58(5): 21-29,55. (ZHANG L G, LIU S M, LI K F, et al. Prediction of shield construction risks in subway tunnelling based on fault tree and Bayesian network[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(5): 21-29,55. (in Chinese) DOI: [10.13807/j.cnki.mtt.2021.05.003](https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2021.05.003)).
- [7] LI S C, NIE L C, LIU B. The practice of forward prospecting of adverse geology applied to hard rock tbn tunnel construction: The case of the Songhua River water conveyance project in the middle of Jilin Province[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 281-294. DOI: [10.1016/j.eng.2017.12.010](https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.010).
- [8] CHUNG H Y, LEE I M, JUNG J H, et al. Erratum to: Bayesian networks-based shield TBM risk management system: Methodology development and application[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(8): 3735. DOI: [10.1007/s12205-019-0912-6](https://doi.org/10.1007/s12205-019-0912-6).
- [9] 郭卫社,梁奎生,游永峰.台山核电越海盾构隧洞主要风险及措施研究[J].*现代隧道技术*, 2015, 52(6): 195-202. (GUO W S, LIANG K S, YOU Y F. Study of the main risks and countermeasures for the sea-crossing shield tunnel of the Taishan nuclear power station[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2015, 52(6): 195-202. (in Chinese) DOI: [10.13807/j.cnki.mtt.2015.06.029](https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2015.06.029)).
- [10] 郝继锋,李明新.冷冻封水技术在南水北调中线穿黄隧洞盾构始发中的应用[J].*南水北调与水利科技*, 2008, 6(6): 13-15. (HAO J F, LI M X. Freezing technology application in the beginning of TBM for the project of Yellow River crossing tunnel in the South-to-North Water Diversion Middle Route[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(6): 13-15. (in Chinese) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.06.032](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.06.032)).
- [11] 仲生星,李荣智.穿黄隧洞工程泥水盾构掘进施工技术[J].*人民长江*, 2011, 42(8): 70-76. (ZHONG S X, LI R Z. Tunneling construction technology by slurry shield machine[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(8): 70-76. (in Chinese) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2011.08.014](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2011.08.014)).
- [12] LIU B, WANG Y Z, NIU M T. Risk analysis and control in the Yellow River-crossing tunnel of South-to-North Water Diversion East Line[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2546(717): 2655-2658. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.2655](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.2655).
- [13] CHEN Z Y, ZHANG Y P, LI J B, et al. Diagnosing tunnel collapse sections based on TBM tunneling big data and deep learning: A case study on the Yinsong Project, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108(Feb): 103700.1-103700.10. DOI: [10.1016/J.TUST.2020.103700](https://doi.org/10.1016/J.TUST.2020.103700).
- [14] HUANG M S, LI Y H, SHI Z H, et al. Face stability analysis of shallow shield tunneling in layered ground under seepage flow[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2022(119): 104201. DOI: [10.1016/J.TUST.2021.104201](https://doi.org/10.1016/J.TUST.2021.104201).
- [15] ZHAI J L, WANG Q, YUAN D Y, et al. Clogging risk early warning for slurry shield tunneling in mixed mudstone gravel ground: A real-time self-updating machine learning approach[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1-21. DOI: [10.3390/SU14031368](https://doi.org/10.3390/SU14031368).
- [16] LI X G, YANG Y, LI X C, et al. Criteria for cutting head clogging occurrence during slurry shield tunneling[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1001. DOI: [10.3390/APPI2031001](https://doi.org/10.3390/APPI2031001).
- [17] JIN D L, NG Y C H, HAN B Y, et al. Modeling hydraulic fracturing and blow-out failure of tunnel face during shield tunneling in soft soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(3): 06021041.

- DOI: [10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002279).
- [18] 冯欢欢, 洪开荣, 杨延栋, 等. 极端复杂地质条件下TBM隧道施工关键技术研究及应用[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(1): 42-54. (FENG H H, HONG K R, YANG Y D, et al. Research and application of key construction technologies for TBM-driven tunnels under extreme complex geological conditions[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(1): 42-54. (in Chinese)) DOI: [10.13807/j.cnki.mtt.2022.01.005](https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2022.01.005).
- [19] 朱莎. 基于层次分析-灰色理论的南水北调中线穿黄隧洞施工风险评价研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. (ZHU S. The construction risk assessment and research of the Yellow River crossing tunnel of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion based on AHP and grey theory[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017, (in Chinese))
- [20] 孟康, 李明达, 周晶. 基于ISM-FT-BN的海底隧道盾构施工风险分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(3): 151-157. (MENG K, LI M D, ZHOU J. Risk analysis on submarine tunnel shield construction based on interpretative structural model, fuzzy set theory and Bayesian network[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(3): 151-157. (in Chinese)) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.03.026](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.03.026).
- [21] 颀芳弟. 基于贝叶斯网络方法的TBM施工项目进度风险研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. (XIE F D. Study on schedule risk of TBM construction project based on Bayesian network method[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021. (in Chinese)) DOI: [10.27205/d.cnki.gltec.2021.000884](https://doi.org/10.27205/d.cnki.gltec.2021.000884).
- [22] ZHAO H B, CHEN B R, LI S J, et al. Updating the models and uncertainty of mechanical parameters for rock tunnels using Bayesian inference[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(5): 101198. DOI: [10.1016/J.GSF.2021.101198](https://doi.org/10.1016/J.GSF.2021.101198).
- [23] KOSEOGLU BALTA G C, DIKMEN I, BIRGONUL M T. Bayesian network based decision support for predicting and mitigating delay risk in TBM tunnel projects[J]. *Automation in Construction*, 2021: 129. DOI: [10.1016/J.AUTCON.2021.103819](https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103819).
- [24] 陈发达, 吴贤国, 王彦玉, 等. 基于贝叶斯网络的土压盾构刀盘失效故障诊断[J]. *土木工程与管理学报*, 2017, 34(6): 57-62, 72. (CHEN F D, WU X G, WANG Y Y, et al. Fault diagnosis of cutterhead failure of earth pressure shield based on Bayesian network[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 34(6): 57-62, 72. (in Chinese)) DOI: [10.13579/j.cnki.2095-0985.2017.06.010](https://doi.org/10.13579/j.cnki.2095-0985.2017.06.010).
- [25] 卢鑫月, 许成顺, 侯本伟, 等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(3): 492-501. (LU X Y, XU C S, HOU B W, et al. Risk assessment of metro construction based on dynamic Bayesian network[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(3): 492-501. (in Chinese)) DOI: [10.11779/CJGE202203011](https://doi.org/10.11779/CJGE202203011).

Prediction of risk event path for shield tunneling of long-distance water conveyance tunnel

LI Qiang¹, LI Ziyang¹, WANG Changsheng², XU Linjun², JIN Wenchao²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;

2. Water Conservancy and District Engineering Construction Administration of Xixiyuan Water Conservancy Project, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: In order to solve the problems of uneven distribution of water resources, mismatched water and soil resources, and serious shortage of water resources, China has launched many long-distance water diversion projects during recent years. With the implementation of these projects, a large number of headrace tunnels has also been constructed, which is continuously developing and improving the construction methods, and now the shield method has gradually become the main construction method of tunnels. As the shield tunneling is a complex system process influenced by a variety of risk factors, construction risk accidents occur from time to time, resulting in delays of the construction period as well as loss of life and property. Therefore, predicting and analyzing the possible risk path of

the shield tunneling of long-distance water conveyance tunnel plays an important role in ensuring the safe construction of the tunnel project.

At present, the risk analysis of tunnel shield construction schedule have several limitations. First, the correlation between the risk factors of shield tunneling of headrace tunnel is not considered; Secondly, the existing research results are mostly based on subway and traffic tunnel, and the differences in construction technology and risk management of long-distance headrace tunnel of hydraulic engineering are not considered. This paper takes the shield tunneling of long-distance water conveyance tunnel in the water diversion project of hydraulic engineering as the research object. Statistical analysis are made on a large number of collected data of water diversion tunnel construction cases, and the risk causing indicators and possible risk events are extracted of tunnel engineering shield tunneling. By using interpretative structural model, the causal hierarchy analysis and network topology diagram construction are conducted. Then a prediction model of shield construction risk events based on Bayesian network is established, and the reliability of the model is preliminarily verified through Bayesian network learning.

Finally, the risk event prediction model obtained has been applied to the shield construction project of Xixiyuan Chuanqin Tunnel. The reverse diagnosis reasoning technology of Bayesian network is used to calculate the maximum possible path of risk events and determine the key factors leading to risk events in shield construction. The results show that the risk accident path calculated by the model is consistent with the actual construction situation at the current stage of the project. The reliability and applicability of the model are verified, and according to the prediction results of the risk accident path, the guidance is provided for the troubleshooting and governance of the risk hidden dangers in the subsequent construction of Chuanqin Tunnel.

Conclusion: (1) The risk path prediction model of tunnel shield construction is established. Through the interpretation of the structural model, the correlation between various risk events that affect the tunnel shield construction progress is determined, and then the Bayesian network model is established, forming an effective method to predict the development trend of the tunnel shield construction risk events through the tunnel shield construction risk factors. (2) The reliability and applicability of the model are verified. Through the application of the shield construction project of Chuanqin Tunnel Project, the predicted result of risk causal chain is consistent with the actual construction situation, and the model can provide real-time decision support for managers. (3) This model can be directly applied to shield tunneling of headrace tunnels with similar construction conditions; for different situations, such as special geological conditions and different shield machines, some parameters of the model need to be appropriately changed, but the model and calculation process established in this paper are applicable.

Key words: shield construction; risk path; interpretative structural modeling; Bayesian network; reverse diagnosis