

铀矿井下作业职业病危害风险概率估计方法*

杨宏刚¹, 王瑞雪¹, 曹莹雪^{1,2}, 孟晓静^{1,2}, 王会生¹, 周宇^{2,3}

(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 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了解决铀矿井下作业职业病危害风险概率不确定性的问题,基于贝叶斯网络和置信度指标,建立了铀矿井下作业职业病危害风险概率估计模型。首先全面辨识了铀矿井下作业职业病危害风险因素,以风险因素作为网络节点构造了贝叶斯网络结构;然后依托网络结构的逻辑关系和专家决策,获取了贝叶斯网络节点的条件概率;随后在根节点的失效概率估计时引入可弱化决策主观性的置信度指标,以完成铀矿井下作业职业病危害风险概率估计模型的建立,并将模型举例应用到某铀矿企业。研究表明:该模型可以预测职业病危害的风险概率,并可以找出影响职业病危害发生的关键因素。研究成果可为有放射性危害的企业职业健康防治奠定基础。

关键词:铀矿井下作业;贝叶斯网络;职业病危害;风险概率

0 引言

铀矿山是我国核工业的前端产业,受到了国家的高度重视。我国铀矿山具有规模小、品位低,开采条件差等特点^[1],自动化装备程度低,井下作业环境同时存在放射性与非放射性职业病危害^[2]。根据《建设项目职业病危害风险分类管理目录》,铀矿井下作业属职业病危害严重类别,如果不及时地对风险因素加以控制,会对井下环境造成影响和破坏,严重时威胁到井下作业人员的身体健康。因此,分析铀矿井下作业中职业病危害风险因素,精准预测职业病危害风险概率,可为铀矿企业井下作业职业病危害风险分级管控提供依据。

目前关于铀矿行业职业病危害风险分析的研究,多是基于现行检测规范采样测试^[3],然而井下作业场所存在多种风险因素,像人为操作和企业管理等因素缺乏有效数据支持,通常用模糊集理论^[4]和专家评判法来量化估计风险因素发生的可能性。但是过度依赖专家经验会造成数据的主观随意性^[5],无法客观准确地预判在多种风险因素的影响下职业

病危害风险的概率,容易导致企业职业病危害风险辨识不清、管理不到位。

贝叶斯网络(BN)具有强大的不确定性问题处理能力,是一个有效的概率推理模型,近年被广泛应用于各领域。宋英华等^[6]为量化分析化工园区内火灾爆炸事故的风险因素,基于模糊贝叶斯网络进行事故情景演练,实现了预测事故走向和推理判断薄弱环节的目的。徐坚强等^[7]将贝叶斯网络方法引入火灾风险量化评估过程,结合应用实例,分析不确定因素对风险评估的影响。ZHANG L M等^[8]为保证在专家调查过程中收集到数据的可靠性,提出了一种专家置信度指标,对风险因素进行模糊概率估计。鉴于这两个方法的优点,ZHANG G H等^[9]为评价隧道坍塌风险,提出了一种基于多状态模糊贝叶斯网络的钻爆隧道坍塌失效概率评估方法。综上所述,贝叶斯网络与基于置信度指标的专家调查法两者的结合,可以解决本研究中铀矿井下作业职业病危害风险概率的不确定性。

因此,本研究基于贝叶斯网络和置信度指标,构建了铀矿井下作业职业病危害风险概率估计模型,

* 收稿日期: 2023-03-05

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2022JQ-406);陕西省教育厅协同创新项目(20JY035)。

作者简介: 杨宏刚(1981—),男,陕西岐山人,博士,讲师,主要从事工业粉尘控制理论与技术研究,E-mail: yanghonggang@xauat.edu.cn。

通信作者: 曹莹雪(1988—),女,辽宁沈阳人,博士,讲师,主要从事复杂工业建筑污染气流运移机理与职业健康评估方向的研究,E-mail: yxcao1206@xauat.edu.cn。

并将该模型应用到某铀矿企业,预测了职业病危害的风险概率,并找出了影响职业病危害发生的关键因素。

1 贝叶斯网络基本原理

贝叶斯网络是一种概率图模型,它可以将某一领域的概率模型可视化,回顾所有随机变量之间的关系,在给定可用证据的情况下得到因果概率的原因。其网络拓扑结构是一个有向无环图(DAG)^[10],如图1所示。一个完整的贝叶斯网络拓扑结构由网络节点、有向弧及条件概率表(CPT)构成^[11]。

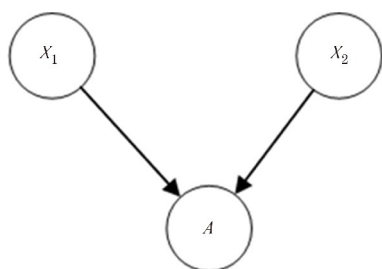


图1 贝叶斯网络结构

图1中 X_1, X_2 为父节点,箭头指向的 A 为子节点,有向弧表示 X_1 与 X_2 影响 A 发生。

贝叶斯网络推理功能分别为因果推理和诊断推理。因果推理指通过已知 X_1 与 X_2 的失效概率,用式(1)^[12]计算 A 的概率,预测职业病危害的风险概率。诊断推理指当给定 A 发生时,由式(2)得到 X_1 与 X_2 的后验概率,即可分析影响职业病危害发生的因素。

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(X_i)P(A | X_i) \quad (1)$$

$$P(X_i | A) = \frac{P(A | X_i)P(X_i)}{P(A)} = \frac{P(A | X_i)P(X_i)}{\sum_{i=1}^n P(X_i)P(A | X_i)} \quad (2)$$

式中, $P(X_i)$ 为 X_i 的先验概率; $P(A | X_i)$ 表示在 X_i 发生的条件下 A 的概率; $P(X_i | A)$ 表示 X_i 的后验概率; $P(A)$ 为 A 的先验概率。

2 铀矿井下作业职业病危害风险概率估计模型

2.1 数据来源与风险因素选取

井下职业病危害风险较多,本研究基于多家铀矿企业职业卫生调查报告、通风监测报告等资料,确

定放射性、粉尘、物理因素(噪声)和化学毒物是主要的职业病危害类型。并从人-机-环-管多维度分析可能导致职业病危害发生的各种风险和隐患,作为各类职业病危害的风险因素。结合专家经验,最终的归纳结果见表1。

2.2 职业病危害贝叶斯网络拓扑结构构建

对铀矿井下作业职业病危害风险因素进行辨识后,经与专家讨论揭示了风险因素的逻辑关系,进而确定了贝叶斯网络的根节点(RN)、中间节点(IN)及其叶节点(LN),依据逻辑关系分别构建放射性危害、粉尘危害、物理因素(噪声)危害和化学毒物危害的贝叶斯网络结构,如图2所示。

2.3 模型参数估计

2.3.1 确定节点的失效概率

(1) 概率区间划分。结合模糊集理论和专家知识对风险因素发生的可能性按提供的语言变量进行判断,随后将语言变量转化为对应的概率区间,将风险因素发生的可能性分为5个区间,各区间的语言变量与三角模糊数的对应关系见表2。

(2) 专家判断能力确定。从职称、工龄、学历等方面参考将专家判断能力 ξ 划分为5个等级,用“Ⅰ~Ⅴ”表示,见表3。但是依靠专家判断能力得到的数据主观性较强,并且忽略了专家判断中的不确定性。因此,为提高数据的可靠性,在判断中引入置信度指标 δ ,综合考虑专家判断能力 ξ 与主观置信度 ψ 。置信度指标 δ 可按式(3)计算。

$$\delta_n = \xi_n \times \psi_n \quad (3)$$

式中, ψ_n 为第 n 个风险因素的主观置信度,表示专家做决策时对自己判断结果的可靠性,主观置信度分为5个等级,取值为[0.6~1.0]; δ_n 表示第 n 个风险因素发生在专家选中的概率区间内的可能性; ξ_n 为第 n 个风险因素的专家判断能力。

(3) 数据收集及处理。邀请5位行业专家根据经验以及实际情况,对铀矿井下作业职业病危害风险因素发生的可能性进行判断。以风险因素 X_9 “爆破或装车运输造成二次扬尘”为例,专家判断结果见表4。一位判断能力为0.8的专家对 X_9 的估计结果为“高”的认可度为0.9,那么有该风险因素0.72的可能性为高,剩下0.28的可能性位于其他4个概率区间。根据式(4)、式(5)、式(6)计算风险因素在不同概率区间的分布结果。

表 1 职业病危害风险因素

编号	名称	编号	名称
T_1	放射性危害	X_{11}	井下堆存的矿石和岩石析出的氡及其子体
T_2	粉尘危害	X_{12}	地面空气中的氡随入风风流进入井下
T_3	物理因素(噪声)危害	X_{13}	放射性废物意外排放
T_4	化学毒物危害	X_{14}	铀矿石开采、近距离接触操作铀矿石
A_1	辐射源	X_{15}	人体、工作服附着和设备、地面沉积的放射性砂尘
A_2	粉尘源	X_{16}	排风量不足
A_3	高噪声源	X_{17}	排风管道泄露
A_4	化学毒物累积	X_{18}	通风时间不足
B_1	辐射防护不到位	X_{19}	职业病危害警示标识缺失
B_2	防尘措施不到位	X_{20}	未采用湿式作业
B_3	防噪措施不到位	X_{21}	钻机、风机等正常运行噪声
B_4	防毒措施不到位	X_{22}	设备故障噪声
M_1	氡及其子体	X_{23}	未安装减振装置或装置失效
M_2	β 、 γ 射线外照射	X_{24}	隔音、消音措施失效
M_3	表面污染	X_{25}	柴油动力机械产生 CO、NO _x
M_4	个体防护失效	X_{26}	爆破产生 CO、NO _x
X_1	工人铲矿石时产生粉尘	X_{27}	防护用品质量不合格
X_2	井下吸烟、饮水等违禁行为	X_{28}	矿岩壁析出的氡及其子体
X_3	体表沐浴去污处理不彻底	X_{29}	矿石溜井设置不符合要求
X_4	未佩戴防护用品	X_{30}	设备布置不合理
X_5	工作服或防护用品佩戴不规范	X_{31}	总平面布置不合理
X_6	人为操作不当	X_{32}	未定期测量并上报辐射防护、矿尘、有毒有害气体监测数据
X_7	自我保护意识薄弱	X_{33}	劳动组织和制度不合理
X_8	钻进作业产生粉尘	X_{34}	职业卫生培训不利
X_9	爆破或装车运输造成二次扬尘	X_{35}	职业健康检查不到位
X_{10}	地下水析出的氡及其子体		

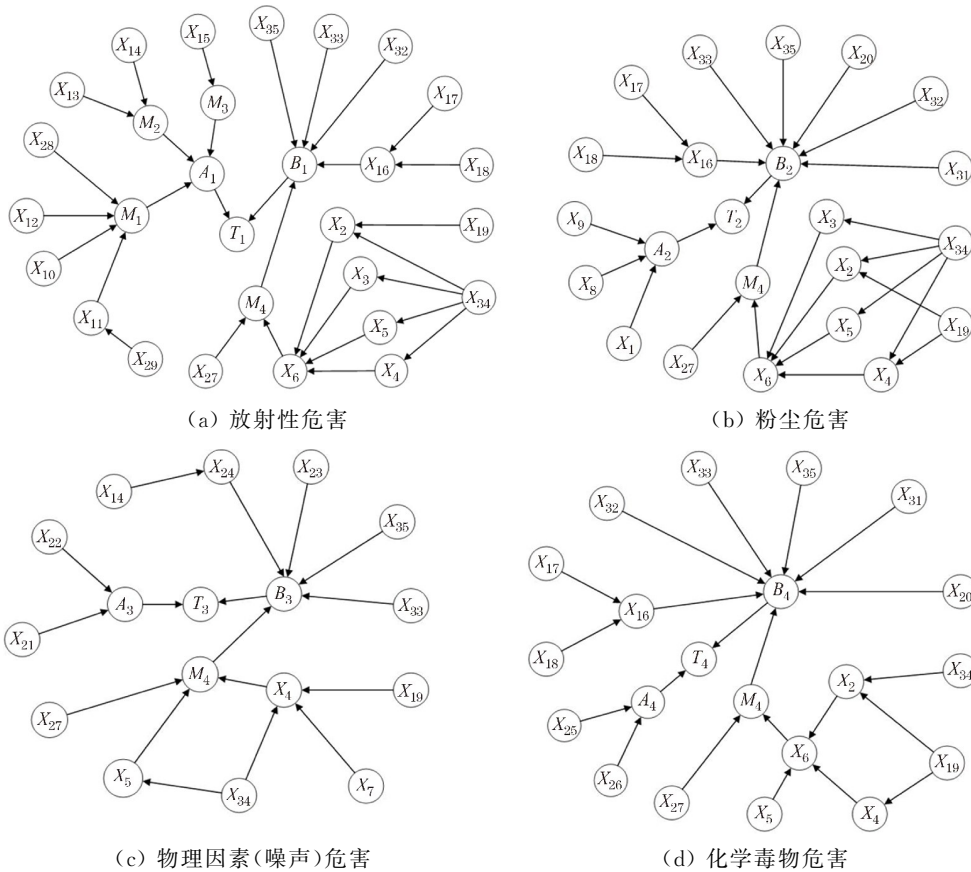


图 2 铀矿井下作业职业病危害贝叶斯网络结构

表2 风险因素概率区间划分

语言变量	三角模糊数		
	上限(a_k)	均值(c_k)	下限(a_{k+1})
不可能	0	0.05	0.10
低	0.10	0.20	0.30
中等	0.30	0.45	0.60
高	0.60	0.70	0.80
非常高	0.80	0.90	1.00

表3 专家判断能力水平

等级	工作资历/年	描述	ξ
I	>30	教授、研究级高级工程师	1.0
II	21~30	副教授、高级工程师	0.9
III	11~20	副教授、高级工程师	0.8
IV	5~10	工程师、助理研究员	0.7
V	<5	技术员、助理研究员	0.6

表4 风险因素 X_9 发生概率调查结果

专家	概率区间等级	主观信度 ψ	判断能力 ξ	置信度 δ
1	5	0.8	1.0	0.80
2	5	1.0	0.9	0.90
3	5	0.9	0.9	0.81
4	4	0.9	0.8	0.72
5	5	0.8	0.7	0.56

$$p_i = \begin{cases} \delta, i = k (k = 1) \\ \frac{a_{5+2-i} - a_1}{\sum_{n=2}^5 (a_n - a_1)} \times (1 - \delta), 2 \leq i \leq 5 \end{cases} \quad (4)$$

$$p_i = \begin{cases} \frac{a_k - a_{k-i}}{\sum_{n=1}^{k-1} (a_k - a_n)} \times \frac{1 - \delta}{2}, 1 \leq i \leq k - 1 \\ \delta, i = k \\ \frac{a_{6+k-i} - a_k}{\sum_{n=k+1}^5 (a_n - a_k)} \times \frac{1 - \delta}{2}, k + 1 \leq i \leq 5 \end{cases} \quad (5)$$

$$p_i = \begin{cases} \frac{a_5 - a_{5-k}}{\sum_{n=1}^4 a_5 - a_n} \times (1 - \delta), 1 \leq k \leq 4 \\ \delta, k = i (i = 5) \end{cases} \quad (6)$$

式中, i 和 k 为概率区间; p_i 为风险因素在 i 个不同概率区间的出现概率; a_k 为概率区间的上限; a_{k+1} 为概率区间的下限。

(4) 概率计算。将风险因素的概率区间分布结果代入式(7)^[13], 可得到每位专家对 X_9 出现概率的估计值。随后采用“3 σ 准则”计算模糊化过程的三角形模糊数的特征值, 参照式(8)、式(9)、式(10)。

$$P_s = \sum_{i=1}^5 (c_i \times p_i) \quad (7)$$

式中, P_s 为每位专家对 X_9 出现概率的估计值; c_i 为第 i 个概率区间的平均值。

$$\mu = \bar{P} = \sum_{s=1}^S P_s / S \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{D(P)} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (P_s - \mu)^2} \quad (9)$$

$$a = \mu - 3\sigma, m = \mu, b = \mu + 3\sigma \quad (10)$$

式中, μ 为期望; S 为专家人数; σ 为方差。 a, m 和 b 为三角模糊数的特征值。

经去模糊化后得到的模糊概率值按 Onisawa 公式转化为失效概率 $P^{[14]}$;

$$P = \begin{cases} 1/10^{k'}, P_M \neq 0 \\ 0, P_M = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$k' = [(1 - P_M/P_M)^{1/3} \times 2.301] \quad (12)$$

式中, P_M 为模糊概率; k' 为常数。

由此得到贝叶斯网络根节点 X_9 的失效概率为 2.88×10^{-2} , 同理计算其他风险因素的失效概率。

2.3.2 条件概率表

在贝叶斯网络中, 条件概率表反映根节点与非根节点逻辑关系, 本研究对铀矿井下作业职业病危害贝叶斯网络的节点状态用“0”和“1”表示, 即不发生与发生。但在实际工程中, 服从(0, 1)是不准确的。因此参考 IPCC^[15] 的概率表述将非根节点发生的可能性划为 7 档, 基于专家调查表, 结合实际情况对非根节点的条件概率进行适当调整。见表 5。

表5 非根节点“高噪声源”条件概率

X_{21}	X_{22}	A_3	
		1	0
1	1	0.92	0.08
1	0	0.55	0.45
0	1	0.65	0.35
0	0	0.12	0.88

3 实例应用

3.1 企业概况

本文以某铀矿企业为例, 该企业成立于 2013

年,于2018年全面建成投产,年产某金属上百吨,年需开采矿石量为上万吨。矿井由作业中段和竖井组成,铀矿井采用抽出式通风降氡系统,同时存在放射性与非放射性危害。由于铀矿井下作业场所环境复杂,自动化装备程度偏低,不利于管理和保护作业人员,因此提高企业职业健康和风险管理是非常重要的。

3.2 贝叶斯网络演绎推理

3.2.1 风险因素识别

通过收集该企业职业卫生防护报告、通风监测报告等资料,分析该企业井下作业存在的职业病危害风险因素,辨识结果见表6。

3.2.2 贝叶斯网络推理

运用贝叶斯网络 GeNIe2.0 软件对铀矿井下作

业职业病危害进行因果推理分析,预测四类职业病危害风险概率,结果见表7。

随后利用贝叶斯网络反向推理功能,设定当职业病危害发生时,即叶节点发生概率输入1,可以得到如图3所示的放射性危害后验概率分布图。

同理,得到其余三类职业病危害的后验概率分布。根据后验概率结果,分别对导致放射性危害、粉尘危害、噪声危害和化学毒物危害的风险因素进行由大到小排序,确定关键风险因素。

(1) 放射性危害。 $X_{16} > X_{11} > X_5 > X_4 > X_2 > X_{28} > X_3 > X_{17} > X_{32} > X_{34} > X_{19}$ 。其中,排风量不足,井下堆存的矿石和岩石析出的氡及其子体,工作服或防护用品佩戴不规范及未佩戴防护用品的后验概率较高,为放射性危害关键影响因素。

表6 企业职业病危害风险因素

编号	名称	先验概率	编号	名称	先验概率
X_1	工人铲矿石时产生粉尘	9.79×10^{-3}	X_{19}	职业病危害警示标识缺失	3.52×10^{-4}
X_2	井下吸烟、饮水等违禁行为	2.96×10^{-3}	X_{20}	未采用湿式作业	1.25×10^{-2}
X_3	体表沐浴去污处理不彻底	3.02×10^{-4}	X_{21}	钻机、风机等正常运行噪声	2.71×10^{-2}
X_4	未佩戴防护用品	1.68×10^{-3}	X_{22}	设备故障噪声	4.37×10^{-4}
X_5	工作服或防护用品佩戴不规范	3.02×10^{-3}	X_{23}	未安装减振装置或减振装置失效	1.68×10^{-3}
X_8	钻进作业产生粉尘	2.49×10^{-2}	X_{25}	柴油动力机械产生 CO、NO _x	1.69×10^{-2}
X_9	爆破或装车运输造成二次扬尘	2.88×10^{-2}	X_{26}	爆破产生 CO、NO _x	3.96×10^{-2}
X_{11}	井下堆存的矿石和岩石析出的氡及其子体	3.11×10^{-2}	X_{28}	矿岩壁析出的氡及其子体	2.59×10^{-2}
X_{12}	地面空气中的氡随入风风流进入井下	1.78×10^{-4}	X_{32}	未定期测量并上报辐射防护、矿尘、有毒有害气体监测数据	2.97×10^{-3}
X_{16}	排风量不足	1.17×10^{-2}	X_{33}	劳动组织和制度不合理	4.11×10^{-4}
X_{17}	排风管道泄露	1.16×10^{-2}	X_{34}	职业卫生培训不利	2.05×10^{-3}
X_{18}	通风时间不足	2.50×10^{-3}	X_{35}	职业健康检查不到位	3.88×10^{-4}

表7 贝叶斯网络因果诊断结果

职业病危害	风险概率/%	职业病危害	风险概率/%
T_1	48.5	T_3	31.3
T_2	42.2	T_4	22.2

(2) 粉尘危害。 $X_{16} > X_5 > X_2 > X_9 > X_8 > X_3 > X_{20} > X_1 > X_{17} > X_4 > X_{18} > X_{32}$ 。其中,排风量不足,工作服或防护用品佩戴不规范,井下吸烟、饮水等违禁行为及二次扬尘的后验概率较高,为粉尘危害关键影响因素。

(3) 物理因素(噪声)危害。 $X_4 > X_{21} > X_5 > X_{23} > X_{34} > X_{19} > X_{33} > X_{22} > X_{35}$ 。其中,未佩戴防护用品,设备正常运行噪声,工作服或防护用品佩

戴不规范及未安装减振装置或减振装置失效的后验概率较高,为噪声危害关键影响因素。

(4) 化学毒物危害。 $X_{16} > X_4 > X_2 > X_{26} > X_{25} > X_{20} > X_{17} > X_5 > X_{18} > X_{32} > X_{34}$ 。其中,排风量不足,未佩戴防护用品,井下吸烟、饮水等违禁行为及爆破后产生 CO、NO_x 的后验概率较高,为化学毒物危害关键影响因素。

4 结论

(1) 本研究根据多家铀矿企业调研资料全面辨识职业病危害风险因素,分别建立了放射性危害、粉尘危害、噪声危害和化学毒物危害的贝叶斯网络,网络结构的因果关系能用可视化的形式表现出

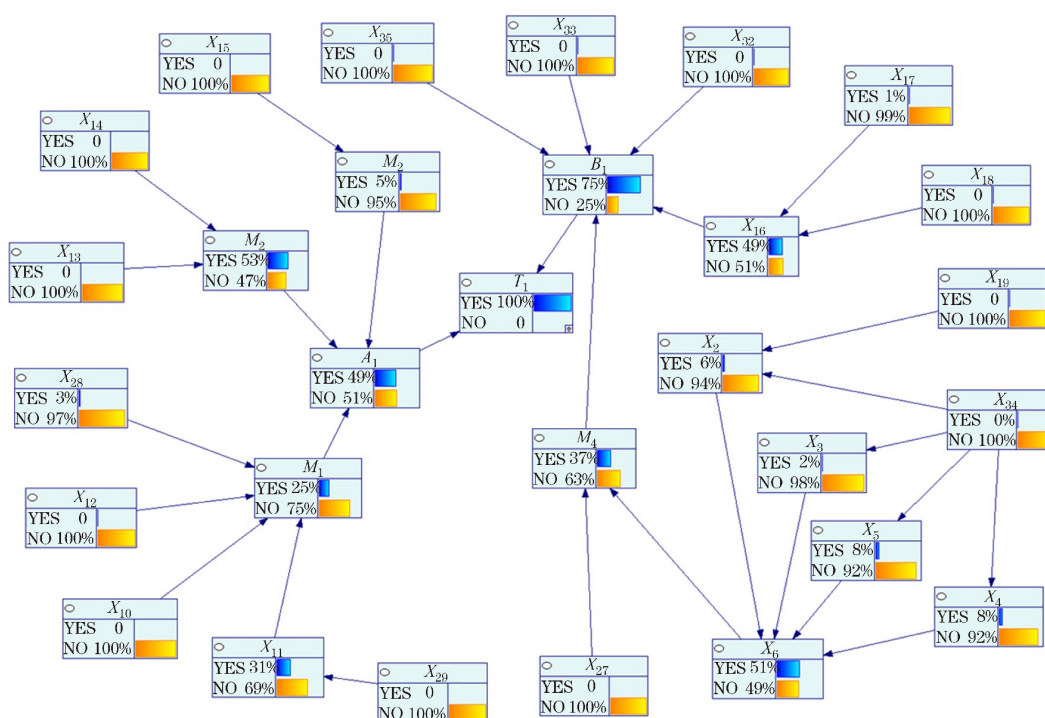


图3 铀矿井下作业放射性危害后验概率分布

来,有效解决了因素之间的不确定关系。

(2) 本研究在对风险概率评估模型中根节点失效概率进行估计时,在专家决策时引入置信度指标,采用“ 3σ 准则”计算了三角模糊数的特征值,并用“ α 加权估值法”去模糊化,以此保证数据的可靠性。有效解决了传统评估中的主观性,提高了评估的准确性。

(3) 由实例可知,利用贝叶斯网络不仅可以预测四类职业病危害的风险概率,还能推理出给定条件下风险因素的后验概率,并由概率大小排序找出导致职业病危害发生的关键因素。分析结果与实际符合,表明该模型具有较强的实用价值。

参考文献:

[1] 张奇,朱卫国 张震,等. 铀矿山项目职业病危害因素及防护措施分析[J]. 中国职业医学,2014(3):358-360.
 [2] 王淑云,黄芳,谭雄,等. 熵权法在铀矿井下空气环境安全评价中的应用研究[J]. 安全与环境学报,2021,21(2):538-545.
 [3] 刘明,杨敏,李旭东,等. 某铀矿冶工程非放射性职业病危害及其关键控制点分析[J]. 中国卫生工程学,2011(1):16-19.
 [4] 王金辉,郝伟,陶泽,等. 基于模糊贝叶斯网络的塔吊作业安全风险[J]. 安全与环境工程,2021,28(4):15-20.
 [5] KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(8): 925-932.

[6] 宋英华,刘子奇,刘丹,等. 基于模糊贝叶斯网络的化工园区火灾爆炸事故情景推演[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 86-93.
 [7] 徐坚强,刘小勇,苏燕飞,等. 基于贝叶斯网络的建筑火灾动态风险评估方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 138-144.
 [8] ZHANG L M, WU X G, SKIBNIEWSKI M J, et al. Bayesian- network-based safety risk analysis in construction projects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131(11): 29-39.
 [9] ZHANG G H, CHEN W, JIAO Y Y, et al. A failure probability evaluation method for collapse of drill-and-blast tunnels based on multistate fuzzy Bayesian network[J]. Engineering Geology, 2020, 276(9): 105752.
 [10] 寇兴怡,帅斌,黄文成. 基于贝叶斯网络的高速动车组运营故障分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 63-69.
 [11] ZHU Z W, SHI Y K, QIN G P, et al. Research on the Occupational Hazards Risk Assessment in Coal Mine Based on the Hazard Theory [J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 2157-2164.
 [12] 柳昕汝. 山区高速公路伤亡事故故障树及贝叶斯网络模型[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
 [13] 李泽荃,孙景来,陈磊. 基于事故树和贝叶斯网络的隧道塌陷风险概率估计方法研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 130-136.
 [14] 程江洲,朱偲,付文龙,等. 基于贝叶斯网络的水力发电系统动态风险评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 631-640.
 [15] 汪涛,廖彬超,马昕,等. 基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊 2): 384-391.