

徐丹, 王双银, 甘治国, 等. 基于改进层次分析法的突发水污染事故风险分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 159-166.
 XU Dan, WANG Shuangyin, GAN Zhiguo, et al. Risk analysis of sudden water pollution accidents based on improved analytic hierarchy process [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 159-166.

基于改进层次分析法的突发水污染事故风险分析

徐丹¹, 王双银¹, 甘治国², 白云岗³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 3. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 突发水污染事故风险分析可以为事故的防治与救援提供科学依据, 保障水资源调度和供水安全。以北疆供水工程为研究对象, 采用德尔菲法对其突发水污染事故进行识别, 基于专家权重系数和D-S证据理论, 改进“五标度”层次分析法并构建事故风险分析模型, 采取改进层次分析法和传统层次分析法对工程突发水污染事故风险进行分析。结果表明, 人为投毒投药、翻车致污染物入渠、雨洪致污染物入渠和农药化肥渗透入渠四类突发水污染事故发生的相对可能性和后果的相对严重性, 改进层次分析法分析为0.0803、0.2800、0.3597、0.2800和0.7069、0.1229、0.0957、0.0745, 综合相对风险大小为0.0567、0.0344、0.0344和0.0209; 传统层次分析法分析为0.3873、0.1434、0.0940、0.0353和0.1623、0.0477、0.1101、0.0199, 综合相对风险大小为0.5496、0.1911、0.2042和0.0552。综合相对风险大小排序一致, 但从事务发生可能性和后果严重性相对风险大小可表明, 改进层次分析法相较于传统层次分析法得到的结果更具有合理性和说服力, 对工程管理提供更有力的参考价值。

关键词: 突发水污染; 风险分析; 改进层次分析法; 专家权重; D-S证据理论; 北疆供水工程

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: X52; X522

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0159-08



Risk analysis of sudden water pollution accidents based on improved analytic hierarchy process

XU Dan¹, WANG Shuangyin¹, GAN Zhiguo², BAI Yungang³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Wulumuqi 830049, Xinjiang, China)

Abstract: The risk analysis of sudden water pollution accidents can provide scientific basis for accident prevention and rescue, and ensure water resources dispatching and water supply safety. Based on expert weight coefficient and d-s evidence theory, this paper improves the "five-scale" analytic hierarchy process (AHP) and constructs an accident risk analysis model, and adopts the improved AHP and traditional AHP to analyze the engineering sudden water pollution accident risk. The relative probability and consequence of four types of sudden water pollution accidents, namely, man-made poisoning, turning over, rain flood and pesti-

收稿日期: 2020-04-19

基金项目: 国家重点研发计划之高寒区供水渠道突发险情应急调度与抢险技术(2017YFC0405105); 陕西省水利科技项目(2017slkj-1)

作者简介: 徐丹(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源可持续利用与保护研究。E-mail: xddacy@163.com

通信作者: 王双银(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文极值事件和水资源调控研究。E-mail: wshy0806@163.com

cide and chemical fertilizer, were obtained. The AHP was improved to 0.080 3, 0.280 0, 0.359 7, 0.280 0 and 0.706 9, 0.122 9, 0.095 7, 0.074 5, the generou relative risk sizes are 0.056 7, 0.034 4, 0.034 4 and 0.020 9; and the traditional AHP was 0.387 3, 0.143 4, 0.094 0, 0.035 3 and 0.162 3, 0.047, 0.010 1, 0.019 9, the general relative risk sizes are 0.549 6, 0.191 1, 0.204 2 and 0.055 2; the overall relative risk order is basically consistent. However, the relative risk size from the probabil of accident and the severity of comsequem can show that the improved AHP is more reasonable and persuasive than the traditional AHP, and provides more powerful reference value for engineering management.

Keywords: sudden water pollution accidents; risk analysis; analytic hierarchy process; expert weight; D-S evidence theory; water supply project in northern Xinjiang

0 引言

近年来,随着经济社会的快速发展,水污染事故的潜在风险也随之增大^[1],对区域水环境和社会稳定发展构成了潜在威胁^[2]。对河湖水污染事故进行风险分析,可以为制定水污染预防措施和应急处理预案提供科学依据,对维持区域水生态环境质量、保障安全供水具有重要意义。风险分析的内容主要包括风险识别、风险评估、风险应对与决策三个方面,风险识别和评估作为风险研究的基础,其研究方法总体可以分为三类:一是定性分析法,主要借助专家经验、知识和意见对风险成因和大小进行模糊定性判断,如头脑风暴法^[3]、德尔菲法(专家调查法)^[4]和外推法^[5]等。定性分析一般不需要建立精确的计算公式,适应性强,虽然可以避免因风险统计数据不足或不精确而产生的片面性和局限性,但风险概率与后果精度会受专家的主观性影响。二是定量分析法,以风险的实验数据或统计数据为依据,通过建立数学模型对风险进行评估,主要有蒙特卡罗法^[6]、敏感性分析法^[7]等,具有较强的科学性和严谨性,但需要大量事故统计数据或实验数据作评估,适用范围小。三是将定量分析和定性分析结合的综合分析法,主要有熵权法^[8]、故障树法^[9],风险矩阵法^[10]和层次分析法^[11-14],该类方法减少了定量分析对事故统计数据的依赖,量化定性分析的风险概率并提高了评估精度。三类方法在结果精确度和统计数据要求上各有优缺点,进行风险分析时需根据事故数据和分析目的等选择分析方法。在水利工程风险分析中,较为常用的是德尔菲法、外推法,熵权法和层次分析法等,如洪水风险^[15]和大坝失事风险^[16]等;水污染事故因其突发性和不可估计性的特点,事故统计数据很少,对其进行风险分析时,常采用对数据依赖少且有一定精确度的方法,如德尔菲法和层次分析法。层次分析法是一种定性半定量,依据少量数据将分析对象进行量化的方法,在水污染事故风险研究中应用较为广泛。本

文以北疆供水工程为研究对象,从工程特性和社会环境出发,采用德尔菲法对突发水污染事故进行识别,引入专家权重系数和 D-S 证据理论改进层次分析法,对突发水污染事故进行风险分析,减少客观误差,得到更为精确的分析结果,以期为该工程的安全运行和应急处理提供依据,同时也为其它事故风险分析提供参考价值。

1 研究工程概况

北疆供水工程位于新疆北部,由水源工程、输水工程和反调节水库三部分组成。该工程从“635”水库引水,经约 140 km 的总干渠后分南干渠和西干渠分别向克拉玛依市和乌鲁木齐市供水^[17],在南干渠和西干渠末端分别建有“500”水库和克拉玛依水库两座大型反调节水库,输水线路上设有多个分水闸,以解决沿线的生活、生产和生态用水。该工程沿线经过戈壁、沙漠和平原三种地貌,干渠总长近 600 km,除约 20 km 的隧洞和倒虹吸外,均采用明渠输水,部分渠段与输油管线相交,干渠建有十几座公路桥,干渠下游横穿农田。北疆供水工程作为新疆北部的最主要水源工程,一旦发生突发水污染事故,必将对沿线经济和社会产生巨大影响。

2 研究方法

2.1 层次分析法

层次分析法是由美国运筹学家 SAATY 在 20 世纪 70 年代提出的一种结合定量与定性分析的决策分析方法,主要将复杂问题分解为若干层次和若干因素,计算出参评因素的相互关联度和隶属关系,通过两两比较,构造比较矩阵,确定层次中各因素的相对重要性,然后构造判断矩阵,以确定各元素的权重,为决策方案的选择提供依据。

2.2 改进层次分析法

传统层次分析法的判断矩阵定量评价采用“1—9 标度”法,基础数据繁琐且迭代次数多;在国

内外学者的不断应用和改进中,产生了“三标度”法,但又存在判断信息缺失、累积优势度和一致性损失的缺陷^[18]。为此,本文采用对两类方法都有所改进的“五标度”法,并引入专家权重和D-S证据理论对专家意见融合,根据融合结果构建判断矩阵。

2.2.1 建立层次结构模型

将所有可能发生的突发水污染事故进行条理化和层次化,建立包含目标层、准则层和指标层的递阶层次结构模型。

2.2.2 改进判断矩阵

判断矩阵是整个层次分析的核心,对评价结果影响极大。区别于没有考虑专家知识与经验背景的研究,首先根据事件重要性判断法则(见表1)设计调查问卷。

表1 事件重要性判断法则

标度	含义
-2	表示事件 <i>j</i> 比事件 <i>i</i> 极端或强烈重要
-1	表示事件 <i>j</i> 比事件 <i>i</i> 明显或稍微重要
0	表示事件 <i>j</i> 与事件 <i>i</i> 同等重要
1	表示事件 <i>i</i> 比事件 <i>j</i> 明显或稍微重要
2	表示事件 <i>i</i> 比事件 <i>j</i> 极端或强烈重要

2.2.2.1 专家权重

将专家按职业类别进行分组,从两个方面引入专家权重系数:一是根据专家的学历、对研究对象的了解程度和判断依据(见表2);二是考虑各专家组容量所占总样本的比例,根据式(2)可得该组专家比重^[19],从而由式(3)得到专家综合权重系数

$$Q_t = \frac{Z_t}{\sum_{t=1}^n Z_t} \quad (1)$$

$$\lambda_t = \frac{\varphi_t}{\sum_{t=1}^n \varphi_t} \quad (2)$$

$$W_e = Q_t \times \lambda_t \quad (3)$$

式中, Q_t 为经验权重系数; Z_t 为各组专家综合指标分数, $Z_t = a_i \times b_i \times c_i$; n 为专家组; φ_t 为第*t*组的专家容量; W_e 为各专家组分值比重。

表2 调查专家分值

指标	类别	分值
学历 a_i	硕士以上、本科、大专及以下	3、2、1
对研究对象了解程度 b_i	非常了解、了解、一般	3、2、1
判断依据 c_i	详细分析、参考资料、经验	3、2、1

2.2.2.2 D-S证据理论

D-S证据理论依据主体对客观世界的认识,以已

有知识对不确定事件做出合理的判断,证据理论算法结构简单、融合精度高,能较好的处理不确定性信息,是一种重要的决策融合方法,既综合了各专家不同的知识见解,也保证事物评价的客观性^[20]。对此,本文利用近年来较普遍的融合公式(BPA函数)D-S证据理论对各位专家的意见进行融合^[13],即

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \emptyset \\ \frac{1}{K} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j) & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)$,且 $K \neq 0$;

m_1 和 m_2 表示在该评价框架基本分配函数所对应的概率分配,其焦点是 A_i 和 B_j ; $m(A)$ 为专家意见 m_1 — m_i 的融合,表示各专家对命题A的支持程度。

2.2.2.3 构建判断矩阵

判断矩阵如下

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

式中, a_{ij} 由各组专家意见融合结果和判断法则所得。

2.2.3 优化矩阵一致性

传统的判断矩阵需要经过一致性检验,但随着计算方法的改进,构造一致性矩阵可代替一致性检验。

$$b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} + a_{kj}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{jk}) \quad (5)$$

式中, b_{ij} 为最优传递矩阵元素; a_{ij} 为原始判断矩阵元素; n 为矩阵维数。

由式(5)得到最优传递矩阵后,根据矩阵的定义可知^[21],本文所构建的判断矩阵属于反对称矩阵,而对于反矩阵A,若矩阵B为A的一个最优传递矩阵,那么 $A^* = \exp B$ 则是A的一个完全一致性矩阵。

2.2.4 计算权重系数

本层元素对上层元素的重要程度由权重值表示,求取权重值就是计算矩阵最大特征值及特征向量^[22]。本文采用和积法求解最大特征值对应的特征向量,具体步骤如下。

首先,将得到的判断矩阵A的元素按列归一化,并记作: $D = [d_{ij}]_{n \times n}$ 。即

$$d_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, (n = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

然后对矩阵D按行相加,记作向量: $\bar{C} = [\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n]$ 。即

$$c_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}, (1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

最后将向量 \bar{C} 归一化得

$$W_i = \frac{\bar{C}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{C}_i}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

最终得到向量 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$, 即为判断矩阵 A^* 的特征向量, 其中的每一个权重系数都对应一个指标。

2.2.5 综合风险分析

国内外学者主要将风险定义为某一事件发生负面影响的概率乘以该负面事件产生后果的量级^[23-25], 由于不确定事件发生后果量级的不可估计性, 本文将其转换为两两事件之间发生后果严重性的相对权重。根据事件发生负面影响的相对概率和后果相对严重性, 得到风险综合评估值。即: 若将 R 表示风险, P 表示风险发生负面影响的相对概率, C 表示风险产生后果严重性的相对权重, 则风险可用数学公式表达为

$$R = P \times C \quad (9)$$

3 结果及其分析

3.1 突发水污染事故识别

通过参考文献和各类报道可得, 近十年来国内外突发水污染事故逐渐增多, 根据发生的方式可分为以下几类^[26]: 一是交通事故突发水污染, 如 2014 年富阳四氯化乙烷罐装车翻车, 部分四氯化乙烷进入富春江; 二是人为投毒投药导致水污染, 如 2002 年新疆博乐市某工地因人为投毒致多人中毒昏迷^[27]和 2012 年西安户县人为投毒致野生鱼类死亡^[28]; 三是暴雨等自然灾害, 如 2012 年新疆阿勒泰遭受暴雨, 洪水使水质浑浊; 四是违法排放废水, 如 2013 年槽罐运输车违法向河中倾倒油性废弃物。

根据北疆供水工程额河管理局提供的 16 年运行水情和工程管理资料, 并参考国内近年来发生的各类突发水污染事故的基础上, 采用德尔菲法征求 30 位

水利行业专家意见, 将北疆供水工程潜在突发水污染事故分为以下四类: (1) 人为投毒投药致污染物入渠; (2) 翻车致污染物入渠; (3) 雨洪致污染物入渠; (4) 农药化肥渗透入渠。

3.2 改进层次分析法风险分析及结果

3.2.1 构建层次结构模型

突发事故因其自身的突发性和不可控性不仅会导致自身状态发生变化, 影响工程供水的连续性和安全性, 还会引发一系列的连锁响应, 比如人员伤亡、经济损失、生态环境等发生改变, 甚至引起社会恐慌^[29]。故主要从突发水污染事故发生后可能所带来的经济损失、人员伤亡和生态环境这三个方面对四类事故发生相对可能性和相对发生后果严重性两方面进行评价。将事故识别得到的四类突发水污染事故构建层次结构, 如图 1 所示。

3.2.2 专家意见统计及分析

根据四类突发水污染事故和层次分析法特点设计相应的专家调查问卷。对 30 位专家就“突发事故可能性”和“事故危害严重性”进行问卷调查, 其中水利技术类专家 20 名, 水利管理类专家 5 名, 科研类专家 5 名, 分别将其表示为 m_1 、 m_2 、 m_3 。由式 (1) 得到三组专家经验权重系数分别为 7/16、3/8 和 3/16(见表 3); 专家组容量比例分别为 2/3、1/6 和 1/6。根据式 (3) 得到三组专家权重系数为 $W_{ei} = (0.292, 0.063, 0.031)$ 。对这 30 份问卷数据进行处理的结果如表 4、表 5 所列, 其中前三行是每一类专家对各类评价指标的评分占比。第四行是根据专家权重系数和 D-S 证据理论对前三行进行融合的结果。

表 3 专家权重经验系数得分表

专家组	学 历	对研究对象了解程度	判断依据	经验权重系数
技术类	2.8	2.5	2	7 / 16
管理类	2.0	2.0	3	3 / 8
科研类	2.0	1.0	3	3 / 16

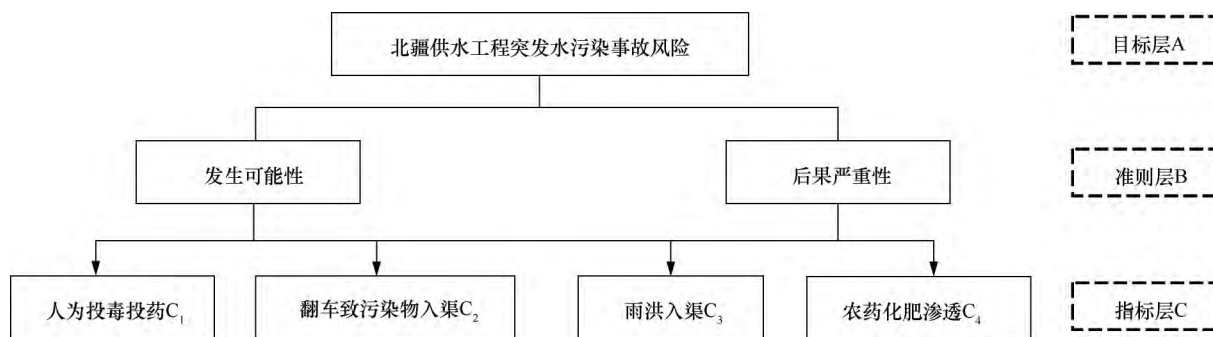


图 1 北疆供水工程突发水污染事故层次结构

“人为投毒投药与翻车致污染物入渠”的融合过程如下:首先对水利技术类专家和水利管理类专家意见进行融合。水利技术类专家对各指标的分配函数是: $m_1[A_1] = 0.15$, $m_1[A_2] = 0.05$, $m_1[A_3] = 0.3$, $m_1[A_4] = 0.25$, $m_1[A_5] = 0.25$ 。水利管理类专家对各指标的分配函数是: $m_2[B_1] = 0.2$, $m_2[B_2] = 0.2$, $m_2[B_3] = 0.2$, $m_2[B_4] = 0.4$, $m_2[B_5] = 0$, 其中 A_i 和 B_j 代表五个标度。根据式(4)和专家权重可以得到

$$K_{1,2} = 1 - W_{e1} \times W_{e2} \times \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j) = 1 - 0.292 \times 0.063 \times [0.15 \times (1 - 0.2) + 0.05 \times (1 - 0.2) + 0.3 \times (1 - 0.2) + 0.25 \times (1 - 0.4) + 0.25] = 0.98542$$

故融合之后的分配概率为

$$m_{1,2}[A_1] = \frac{0.15 \times 0.2}{0.9854} = 0.00055$$

同理可得 $m_{1,2}[A_2] = 0.00018$, $m_{1,2}[A_3] = 0.00111$, $m_{1,2}[A_4] = 0.00185$, $m_{1,2}[A_5] = 0$ 。

然后将水利技术类专家、水利管理类专家与科研类专家进行融合,根据式(4)重复以上计算得 $K_{1,2,3} = 0.99991$, 故融合之后的分配概率为 $m_{1,2,3}[A_1] = 0.00000013$ 。同理可得 $m_{1,2,3}[A_2] = 0$, $m_{1,2,3}[A_3] = 0.00000026$, $m_{1,2,3}[A_4] = 0$, $m_{1,2,3}[A_5] = 0$ 。其它事故发生可能性专家意见融合结果如表4所列。

根据上述同样的计算方法可得突发水污染事故后果相对严重性专家意见融合结果如表5所列。

表4 北疆供水工程突发水污染事故相对可能性专家意见统计分析

元素	专家组	程度				
		2	1	0	-1	-2
人为投毒与翻车致污染物入渠 C_{12}	技术类 m_1	0.15	0.05	0.3	0.25	0.25
	管理类 m_2	0.2	0.2	0.2	0.4	0
	科研类 m_3	0.4	0	0.4	0	0.2
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000013	0	0.00000026	0	0
人为投毒投药与雨洪入渠 C_{13}	技术类 m_1	0.15	0.05	0.15	0.25	0.4
	管理类 m_2	0.2	0	0.2	0.4	0.2
	科研类 m_3	0.2	0.2	0.4	0	0.2
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000009	0	0.00000013	0	0.00000023
人为投毒投药与农药渗透入渠 C_{14}	技术类 m_1	0.15	0.1	0.05	0.25	0.45
	管理类 m_2	0.2	0.2	0	0.4	0.2
	科研类 m_3	0.4	0.2	0	0	0.2
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000013	0.00000006	0	0	0.00000026
翻车致污染物入渠与雨洪入渠 C_{23}	技术类 m_1	0.25	0.1	0.15	0.3	0.15
	管理类 m_2	0.2	0	0.2	0.6	0
	科研类 m_3	0	0.2	0.6	0	0.2
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0	0.00000013	0	0
翻车致污染物入渠与农药渗透入渠 C_{24}	技术类 m_1	0.15	0.4	0.1	0.1	0.25
	管理类 m_2	0.2	0.4	0.2	0	0.2
	科研类 m_3	0	0.4	0.4	0.2	0
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0.00000069	0.00000009	0	0
雨洪入渠与农药渗透入渠 C_{32}	技术类 m_1	0.15	0.1	0.45	0.25	0.05
	管理类 m_2	0.2	0.2	0.2	0.4	0
	科研类 m_3	0	0.4	0.6	0	0
	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0.00000009	0.00000039	0	0

表5 北疆供水工程突发水污染事故后果相对严重性专家意见统计分析

元素	专家	程度				
		2	1	0	-1	-2
人为投毒投药与翻车致污染物入渠 B_{12}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000143	0	0	0	0
人为投毒投药与雨洪入渠 B_{13}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000043	0	0	0	0
人为投毒投药与农药渗透入渠 B_{14}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0.00000052	0.00000026	0.00000009	0	0
翻车致污染物入渠与雨洪入渠 B_{23}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0.00000069	0	0.00000006	0
翻车致污染物入渠与农药渗透入渠 B_{24}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0	0.00000017	0.00000006	0
雨洪入渠与农药渗透入渠 B_{32}	$W_1 m_1 \oplus W_2 m_2 \oplus W_3 m_3$	0	0.00000017	0	0	0

3.2.3 构建判断矩阵

构建判断矩阵行列从左往右依次为: 人为投毒投药、翻车致污染物入渠、雨洪入渠和农药化肥渗透。根据数据统计和融合结果, 可知 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} 、 C_{23} 、 C_{24} 和 C_{32} 的值为 0、-2、-2、0、1 和 0; B_{12} 、 B_{13} 、 B_{14} 、 B_{23} 、 B_{24} 和 B_{32} 的值为 2、2、2、1、0 和 -1。最终得到突发事件发生可能性矩阵 C 和事故发生后果严重性矩阵 B 如下

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 2 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.4 优化一致性矩阵

根据式(5)和矩阵定义, 将矩阵 C 和矩阵 B 转换为完全一致性矩阵 C^* 和 B^* 如下

$$C^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.2865 & 0.2231 & 0.2865 \\ 3.4903 & 1 & 0.7788 & 1 \\ 4.4817 & 1.2840 & 1 & 1.2840 \\ 3.4903 & 1 & 0.7788 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 1 & 5.7546 & 7.3891 & 9.4877 \\ 0.1738 & 1 & 1.2840 & 1.6487 \\ 0.1353 & 0.7788 & 1 & 1.2840 \\ 0.1054 & 0.6065 & 0.7788 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.5 计算元素权重系数

根据式(6), 式(7)和式(8), 得到矩阵 C^* 和 B^* 中各元素的相对权重值如表6所示。

表6 元素权重计算

元素 C_i	相对权重	元素 B_i	相对权重
C_1	0.0803	B_1	0.7069
C_2	0.2800	B_2	0.1229
C_3	0.3597	B_3	0.0957
C_4	0.2800	B_4	0.0745

由表6得到人为投毒投药、翻车致污染物入渠, 雨洪致污染物入渠和农药化肥渗透入渠四类突发水污染事故发生可能性相对权重为: $W=(W_1, W_2, W_3, W_4)=(0.0803, 0.2800, 0.3597, 0.2800)$, 事故发生后果严重性相对权重为: $W=(W_1, W_2, W_3, W_4)=(0.7069, 0.1229, 0.0957, 0.0745)$ 。

3.2.6 综合风险计算

根据风险因子的含义与分析, 对所得权重矢量处

理如下: $W=C_i B_i^T=(0.0567, 0.0344, 0.0344, 0.0209)$ 。故通过改进层次分析法得到的综合风险 $W=(0.0567, 0.0344, 0.0344, 0.0209)$ 。

3.3 传统层次分析法风险分析及结果

用传统“1—9标度”层次分析法分析水污染事故风险, 1—9代表指标 i 比指标 j 的重要程度递增, 倒数则为指标 j 与指标 i 的相比结果。构建事故层次结构(如图1), 按问卷数据建立四类事故的可能性和后果严重性判断矩阵, 并进行权重计算和一致性检验, 如表7和表8所列。

表7 事故发生的可能性判断矩阵

可能性评价指标	C_1	C_2	C_3	C_4	相对权重
C_1	1	4	5	7	0.58685
C_2	1/4	1	2	5	0.21723
C_3	1/5	1/2	1	4	0.14245
C_4	1/7	1/5	1/4	1	0.05348
一致性检验	一致性指标 $CI=0.057$ 一致性比例 $CR=0.064<0.1$				

表8 事故发生后果的严重性判断矩阵

后果程度评价指标	C_1	C_2	C_3	C_4	相对权重
C_1	1	4	2	6	0.47722
C_2	1/4	1	1/4	4	0.14025
C_3	1/2	4	1	5	0.32391
C_4	1/6	1/4	1/5	1	0.05861
一致性检验	一致性指标 $CI=0.067$ 一致性比例 $CR=0.075<0.1$				

得到指标层相对于准则层的相对权重后, 再计算指标层对目标层的相对权重, 即层次总排序。准则层只有两个元素, 直接利用加权平均确定发生可能性和后果严重性风险相对权重为 2, 两层相对权重相乘, 得到指标层相对目标层的总排序, 并进行一致性检验, 结果如表9所列。

表9 层次总排序

总排序	B_1	B_2	综合权重
	0.66	0.34	
C_1	0.58685	0.47722	0.54958
C_2	0.21723	0.14025	0.19106
C_3	0.14245	0.32391	0.20415
C_4	0.05348	0.05861	0.05522
一致性检验	一致性指标 $CI=0.059$, 一致性比例 $CR=0.067<0.1$		

由表9得到人为投毒投药、翻车致污染物入渠, 雨洪致污染物入渠和农药化肥渗透入渠四类突发水污染事故发生可能性相对权重为: $W=(W_1, W_2, W_3, W_4)=(0.3873, 0.1434, 0.0940, 0.0353)$, 事故发生后果严重性相对权重为: $W=(W_1, W_2, W_3, W_4)=$

(0.162 3, 0.047 7, 0.110 1, 0.019 9)。综合相对风险为: $W = (W_1, W_2, W_3, W_4) = (0.549 6, 0.191 1, 0.204 2, 0.055 2)$ 。

3.4 结果对比及合理性分析

人为投毒投药、雨洪致污染物入渠、翻车致污染物入渠和农药化肥渗透入渠四类突发水污染事故的相对风险,改进层次分析法分析为0.056 7、0.034 4、0.034 4和0.020 9,其中人为投毒投药发生可能性相对风险为0.080 3,其后果严重性相对风险却达到了0.706 9;传统层次分析法分析为0.549 6、0.191 1、0.204 2、0.055 2,其中人为投毒投药发生可能性相对风险为0.387 3,发生后果严重性相对风险为0.162 3。

从两种方法计算结果看,四类突发水污染事故的综合相对风险排序大致相同,但从可能性相对风险和后果严重性相对风险来看,改进层次分析法得到的结论更加合理,如人为投毒投药在当今社会发生的可能性是极小的^[28],但发生后果却极其严重,由此导致综合风险相对于其它三类突发水污染事故较高。综上,认为改进层次分析法得到的四类突发水污染事故相对风险大小排序合理。

4 结 论

本文在利用改进的“五标度”层次分析法时,同时加入专家权重系数和D-S证据理论对多位专家的意见进行融合,以此建立了事故风险分析模型,并将其应用到北疆供水工程,得到如下结论:

(1) 利用德尔菲法对北疆供水工程突发水污染事故进行识别,确立了人为投毒投药、翻车致污染物入渠、雨洪入渠和农药化肥渗透入渠四类最可能突发水污染事故;

(2) 利用改进层次分析法对人为投毒投药、雨洪入渠、翻车致污染物入渠、农药化肥渗透入渠四类突发水污染事故的综合风险相对值分别为0.056 7、0.034 4、0.034 4和0.020 9;传统层次分析法得到的综合风险相对值为0.549 6、0.191 1、0.204 2、0.055 2;

(3) 改进的层次分析法得到的结论相对于传统层次分析法得到的结论更具合理性和严谨性,对工程管理具有更多参考价值。

参考文献:

[1] 杨海东,肖宜,王卓民,等. 突发性水污染事件溯源方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 122-129.

- [2] 左其亭,罗增良,马军霞. 水生态文明理论体系研究[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 1-6.
- [3] SHAW K., SHANKAR R., YADAV SS, et al. Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain. *Expert Systems With Application*, 2012(39): 8182-8192.
- [4] 李廷鹏,李岳,徐永成,等. 基于改进PERT的装备使用保障过程建模分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1575-1580.
- [5] 薛利红,杨林章. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008(9): 165-169.
- [6] 罗启华,周研来,杨娜,等. 基于SAR模型和蒙特卡罗法的防洪调度风险分析[J]. 人民长江, 2011, 42(1): 4-8.
- [7] GRIENSVEN A V, MEIXNER T, GRUNWALD S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1-4): 1-23.
- [8] 顾晓昀,徐宗学,刘麟菲,等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2576-2587.
- [9] 林少华,刘嘉宁,陈东等. 基于故障树理论的电网调度操作实时风险评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 121-125.
- [10] SHI S G, CAO J C, FENG L, et al. Construction of a technique plan repository and evaluation system based on AHP group decision-making for emergency treatment and disposal in chemical pollution accidents. *Journal of Hazardous Materials*, 2014(276): 200-206.
- [11] 程远,刘志彬,刘松玉,等. 基于层次分析法的大跨浅埋公路隧道施工风险识别[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 198-202.
- [12] 冯平,闫大鹏,耿六成,等. 南水北调中线总干渠防洪风险评估方法的研究[J]. 水利学报, 2003, 24(4): 40-45.
- [13] 练继建,孙萧仲,马超,等. 水库突发水污染事件风险评价及应急调度方案研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(10): 1005-1010.
- [14] 林锦国,魏世孝. AHP中(0, 2)EM法与(1/9, 9)EM法的比较研究[J]. 系统工程理论与实践, 1994(5): 64-69.
- [15] 王艳艳,韩松,喻朝庆,等. 太湖流域未来洪水风险及土地风险管理减灾效益评估[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 327-335.
- [16] 顾冲时,苏怀智,刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26-35.
- [17] 胡德秀. 供水系统环境影响风险分析研究——以“引额济乌”工程供水系统为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.
- [18] 林锦国,魏世孝. AHP中(0, 2)EM法与(1/9, 9)EM法的比较研究[J]. 系统工程理论与实践, 1994(5): 64-69.
- [19] 夏蓓鑫,陈鑫,李龙,等. 采用模糊层次分析法的PFMEA方法改进及应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 868-874.
- [20] PAGER R R. Comparing approximate reasoning and probabilistic reasoning using the Dempster-Shafer framework[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009, 50(5): 812-821.
- [21] 陈广洲,汪家权,李如忠,等. 基于D-S证据理论的水利工程招标评价[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 263-266.
- [22] EVES H. *Elementary Matrix Theory*[M]. New York: Dover Publications, 1980.

- [23] 何理. 水环境突发性与非突发性风险分析的理论和方法初步研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2002.
- [24] 陈志鼎, 刘豪, 肖芳. 水电工程 EPC 项目采购风险评估 [J]. 人民长江, 2015, 46(5): 109-112.
- [25] Sexsmith R C, Reid S C. Safety factors for bridge falsework by risk management [J]. Structural Safety, 2003, 25: 227-243.
- [26] 韩晓刚, 黄廷林. 我国突发性水污染事件统计分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 84-86.
- [27] 李玉峰, 张静, 青剑英, 等. 一起人为投毒引起的食物中毒调查 [J]. 地方病通报, 2007(3): 76.
- [28] 赵然杭, 陈超, 李莹芹, 等. 南水北调东线工程山东段突发事故风险评估 [J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 180-186.
- [29] 杜兆林, 张志浩, 曹慧哲, 等. 基于响应时间效应的突发水污染应急决策分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(2): 122-130.

(责任编辑 王璐)