

基于AHP–集对分析的矿井水资源利用风险评估

王亨力, 倪深海

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis

WANG Hengli, NI Shenhai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/0201120002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于网络层次分析法的节水型社会综合评价

Comprehensive evaluation of water-saving society based on analytic network process

水利水运工程学报. 2017(2): 29 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.004>

熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用

Application of fuzzy set pair analysis method based on entropy weight in flood season staging of Xiluodu Reservoir

水利水运工程学报. 2020(6): 16 <https://doi.org/10.12170/20191205001>

特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

水利水运工程学报. 2020(1): 112 <https://doi.org/10.12170/20181201002>

基于联系期望的泥石流易发性评价模型

An assessment model for debris flow liability to occurrence based on connectional expectation

水利水运工程学报. 2017(2): 59 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.008>

水资源利用效率频谱分析方法及应用

Spectrum analysis method for assessing water use efficiency

水利水运工程学报. 2019(6): 132 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.015>

水库灾变链链式风险评估

Risk assessment on reservoir disaster chain

水利水运工程学报. 2019(2): 79 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.011>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/0201120002

王亨力,倪深海.基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估[J].水利水运工程学报,2021(3):126-135.(WANG Hengli, NI Shenhai. Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3): 126-135. (in Chinese))

基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估

王亨力^{1,2},倪深海¹

(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,江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 识别了矿井水资源利用风险因素,基于供需双侧协调目标,筛选出水量、水质、经济(成本)3个一级指标及12个风险评估二级指标建立矿井水资源利用风险评估指标体系,构建基于集对分析理论的矿井水利用风险评估模型。选取冀中煤炭基地邢邯地区的7个矿区作为典型案例,运用层次分析法评价和集对分析综合评价进行矿井水资源利用风险评估。评估结果表明:邢台、葛泉为低风险,章村、显德汪、邢东、东庞及西庞为中风险;风险等级主要受水质、水量因素的影响,受经济因素影响最小。评估结果与矿区矿井水资源利用实际情况基本符合,这表明基于集对分析理论用于矿井水资源利用的风险评估是可行的,模型可用于其他矿区矿井水资源利用风险评估。

关键词: 矿井水利用;层次分析法;集对分析;风险评估;邢邯地区

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)03-0126-10

我国煤炭资源丰富,开采过程中会产生大量的矿井水,直接排放既浪费水资源,又会引起环境污染。2019年,我国煤矿矿井水资源量达 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$,利用率达到80%。全国75%以上的矿井水来自缺水地区和严重缺水地区的大型煤炭基地,区域水资源供需矛盾十分尖锐,水资源短缺已经成为煤炭资源富集区生态文明建设和经济社会可持续发展的制约瓶颈^[1-2]。矿井水处理利用不仅对缓解区域水资源供需矛盾具有重要意义,而且可以避免对地下水造成污染,产生的经济效益可促进煤炭行业健康发展^[3-6]。

近年来,相关学者分析了我国矿井水管理现状,提出地下水库的概念及技术框架,得到了行业内认可^[7-8];从矿井水供需双方相互关系出发,构建矿井水资源潜力评价指标体系,提出了就地利用、异地利用和回归河湖3种利用模式及其组合的7种最终利用模式^[9]。由于矿井涌水量的不稳定性,不同矿区水质及处理工艺的差异,导致矿井水资源利用存在风险。风险的概念被广泛应用于安全、军事、环境等多个学科领域^[10]。有关学者以风险理论为基础,根据迭置指数法原理,结合层次分析法、专家打分法,构建了废弃矿井地下水污染风险评价指标体系、水资源安全风险评价模型及水资源短缺风险模糊综合评价模型^[11-13]。集对分析法^[14]自提出以来,在降水空间特征分析、风险评估、短期预测等领域得到了成功应用^[15-16]。基于集对分析方法对降水空间特征、泥石流易发性、水库汛期分期、农田排水沟道边坡稳定性及节水型社会建设进度进行评价,取得了较为理想的评价结果^[17-20]。

针对矿井水等非常规水资源利用的风险评估研究成果鲜见。本文基于矿井水利用供需双侧协调的目标,识别矿井水开发利用过程中的风险因子,建立风险评估指标体系,运用集对分析理论,构建涵盖水量、水

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0403505, 2017YFC1502401)

作者简介: 王亨力(1997—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事水资源保护与管理研究。E-mail: hlwang@nhri.cn
通信作者: 倪深海(E-mail: shni@nhri.cn)

质、经济3个影响因素的矿井水资源利用风险评估模型。以邢邯地区的7个矿区为例,采用层次分析法和集对分析法进行矿井水资源利用风险评估,分析比较7个矿区矿井水资源利用的风险大小,验证集对分析方法在矿井水资源利用风险评估中的可行性,并提出规避风险的对策。

1 矿井水资源利用风险识别与指标体系

1.1 矿井水资源利用风险识别

风险识别,即对现有的及潜在的风险进行判断、分类及鉴别风险性质的过程。可利用感性认识和经验或通过对众多客观事件、统计资料进行整理、归纳,进行风险的识别。矿井水作为非常规水资源参与水资源统一配置,利用风险主要包括:水量、水质、经济(成本)等因素。

①水量因素:其风险大小主要体现在不稳定上。当涌水量、处理水量、潜力量、用户需水量等水量因素的稳定性很明显会影响到矿井水利用的风险。当水量的稳定性较好时则风险小;反之,则风险大。水量因素对矿井水利用风险的影响可以用以下几个指标来表征:矿井涌水变化率、矿井水潜力量占比、用户需水量变化幅度、供水保证率等。

②水质因素:矿井水分为含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水、特殊污染物的矿井水、洁净的矿井水^[3]。矿井水本身的水质和处理过程都会对再处理后的矿井水水质产生不同的影响。不同的用户(生态用水、景观用水、灌溉用水、工业用水、矿井水回灌)对水质的要求不同,所以相对应就存在不同的风险。总体来说,水质越好,风险越小,反之则越大。水质因素对矿井水利用风险的影响可以用以下指标进行表征:悬浮物含量、总矿化度、有毒物质(氟、砷、硫化物、铅、六价铬、挥发性酚等)含量、总铁(锰)含量、总放射性 α 含量、总放射性 β 含量等。

③经济(成本)因素:矿井水的收集、处理、输送等过程需要投入相应的设备成本、药物处理成本、输送管道的成本及水资源税等,这些都会增加矿井水利用的成本,成本越高,则风险越高。所以用户在使用矿井水作为供水水源时就存在比常规水源供水成本高的风险,对于用户来说利用矿井水就不是更好的选择,国家政策、资金支持,则会有效降低此类风险。经济成本因素对矿井水利用风险的影响可用以下指标进行表征:处理成本、输送成本、余量成本、效益大小、激励政策等。

1.2 矿井水利用风险指标体系

矿井水利用涉及供需双侧,供给侧风险体现在量的变化率,需求侧风险则体现在对矿井水水质的要求,两者同时受到经济因素的影响。综合考虑矿井水利用的各个环节、影响因素及可行性,选择水量、水质、经济3个方面因素及相对应共12个风险指标建立风险评估指标体系。

由于不同地区经济社会发展状况、矿井水水量、水质存在差异,所以建立风险等级标准需要综合权衡各方面的因素。根据综合评估指标体系原则,考虑当地实际情况,参考国家行业标准^[21]及相关指标的统计结果及含义,结合专家意见确定各个评估指标风险等级划分临界值,将3个因素的12个指标风险分为1级(低风险(区间为 $[f_0, f_1]$))、2级(中风险(f_1, f_2))、3级(中高风险(f_2, f_3))、4级高风险(f_3, f_4)),见表1。

表1 矿井水资源利用风险评估指标体系及等级划分标准

Tab. 1 Mine water resource utilization risk assessment index system and grade division standard

因素	指标	1级	2级	3级	4级
水量	矿井涌水量变化率 $C_1/\%$	(0,10]	(10,20]	(20,30]	(30,100]
	矿井水潜力量占比 $C_2/\%$	(100,85]	(85,70]	(70,55]	(55,0]
	用户需水量变化幅度 $C_3/\%$	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,100]
	供水保证率 $C_4/\%$	(100,95]	(95,90]	(90,85]	(85,50]

续表 1

因素	指标	1级	2级	3级	4级
水质	悬浮物含量 $C_5/(mg \cdot L^{-1})$	(0,50]	(50,400]	(400,700]	(700,1 000]
	总溶解性固体含量 $C_6/(mg \cdot L^{-1})$	(0,1 000]	(1 000,4 000]	(4 000,7 000]	(7 000,10 000]
	pH相对值 C_7	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]
	有毒物质含量(砷) $C_8/(mg \cdot L^{-1})$	(0,0.05]	(0.05,0.50]	(0.50,2.00]	(2.00,5.00]
	总铁(锰)含量 $C_9/(mg \cdot L^{-1})$	(0,0.3]	(0.3,7.0]	(7.0,14.0]	(14.0,20.0]
经济	处理成本 $C_{10}/(元 \cdot m^{-3})$	(0,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.0]	(2.0, 5.0]
	利润率 $C_{11}/\%$	(100,30]	(30,20]	(20,10]	(10,0]
	激励政策 C_{12}	1	-	-	0

注:①参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[22],可利用地表水资源pH值为6~9;②由于不同有毒物质(如氟、砷、硫、铅、挥发酚、六价铬等)对同一风险等级划分的阈值不同,所以选择矿井水中产生风险等级高的有毒物质进行风险等级划分,考虑实际情况此处选择砷;③由于铁、锰两种矿井水污染物的污染结果相似、处理方式相似,但风险等级的阈值不同,所以选取两者中风险等级高的元素进行风险等级划分。

2 AHP-集对分析法风险评估模型

结合矿井水资源利用过程中在供需双侧涉及各个指标,即水质、水量、经济成本指标,最后将其进行合理量化,得到矿井水利用供需双侧风险计算模型:

$$W = \alpha A + \beta B + \gamma C \quad (1)$$

式中: W 为风险评估综合指数; A 、 B 、 C 分别表示水量、水质、经济因素; α 、 β 、 γ 分别表示3个因素的权重。

2.1 层次分析法

层次分析法,是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统,将目标分解为多个目标或准则,进而分解为多指标的若干层次,通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序(权数)和总排序,以作为目标(多指标)、多方案优化决策的系统方法。一般层次分析法包括建立递阶层次结构模型,构造判断矩阵,层次单排序的一致性校验,层次总排序的一致性校验4个步骤。

在建立矿井水资源利用风险评估指标体系过程中,由于各个指标的重要性不同,所以应合理确定每个指标的权重。目前确定权重的方法可分为客观赋权法和主观赋权法。虽然主观赋权法具有较强的主观性,但经过众多研究的验证,主观赋权法的计算结果更加贴合实际,更具可信度,同时具有解释性强的优点。本文采用层次分析法通过比较同一层级指标的相对重要性构造判断矩阵,对矩阵进行计算最终确定各层权重,综合权重为一级指标和二级指标层权重的乘积。

首先,构造目标层 A 的判断矩阵:

$$A = [B_{ab}] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: B_{ab} 为 B_a 相对于 B_b 的重要性, $B_{ab}=1/B_{ba}$ 且 >0 。

将判断矩阵 A 按照每一列进行规范化:

$$b_{ij} = B_{ij} / \sum_{i=1}^n B_{ij} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

其次,把按照每一列规范化的矩阵,按照每一行求和:

$$v_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (4)$$

将向量 $v_i = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_n]^T$ 进行规范化:

$$w_i = v_i / \sum_{j=1}^n v_j \tag{5}$$

则 $\omega_i = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 为判断矩阵 A 的特征向量, 即各个影响因素的权重。

做判断矩阵的一致性检验, 一致性指标 C_1 的值:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{6}$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

计算判断矩阵的一致性比率 C_R 的值:

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \tag{7}$$

式中: R_1 可根据阶数 n 的值得到相对应的值。当且仅当 $C_R < 0.10$, 说明判断矩阵的一致性是可以接受的; 否则, 应重新构造判断矩阵, 直到具有可以接受的一致性为止。

根据风险指标体系, 式(1)可具体改写为:

$$W = \sum_{i=1}^4 \alpha_i A_i + \sum_{j=1}^5 \beta_j B_j + \sum_{k=1}^3 \gamma_k C_k \tag{8}$$

式中: A_i 、 α_i 为第 i 个水量评价指标的评分值及对应的权重; B_j 、 β_j 为第 j 个水质风险评价指标的评分值及对应的权重; C_k 、 γ_k 为第 k 个经济成本风险评价指标的评分值及对应的权重。当综合指数 $85 \leq W < 100$, 为高风险, $70 \leq W < 85$ 为中高风险, $55 \leq W < 70$ 为中风险, $40 \leq W < 55$ 为低风险。

2.2 集对分析法

集对分析理论^[14]是由我国学者赵克勤于1989年提出, 现已成功应用于节水型社会综合评价、水资源承载力评价、安全风险分析、水库健康评价等领域。其基本思路是在一定的问题背景下对所论两个集合所具有的特性作同异反分析并加以度量刻画, 得出这两个集合在所论问题背景下的同异反联系度表达式, 并推广到多个集合组成时的情况, 在此基础上去深入展开有关系统的联系、预测、控制、仿真、演化、突变等问题的研究。将确定与不确定视作一个系统。建立具有联系的两个集合集对 $H=(A, B)$, 并通过联系度 μ 对集对中两个集合的特性从同、异、反3个方面进行描述:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \tag{9}$$

式中: μ 为集对的联系度; i 为差异不确定系数, $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数, $j = -1$; N 为集对特性总数, $N = S + F + P$, S 为集对中公有特性数, P 为集对中对立特性数, F 为集对中差异特性数。

令 $\frac{S}{N} = a, \frac{F}{N} = b, \frac{P}{N} = c$, 分别为同一度、差异度、对立度, 且 $a + b + c = 1$ 。式(9)可简写成:

$$\mu = a + bi + cj \tag{10}$$

根据问题的复杂性, 参考文献 [18], 拓展式(8), 得多元联系度 μ :

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_k i_k + c j \tag{11}$$

式中: $a + b_1 + b_2 + \dots + b_k + c = 1$, 则多因素共性、对立特性和差异特性权重的联系度 μ :

$$\mu = \sum_{k=1}^S w_k + \sum_{k=S}^{S+F} w_k i_k + \sum_{k=S+F}^N w_k j_k \tag{12}$$

式中: $\sum_{k=1}^N w_k = 1$, w_k 是各指标的权重, 由层次分析法确定。

本文通过层次分析法确定各指标权重,由集对分析法建立矿区实际情况与评价指标的集对,再结合已求出的指标权重,计算集对的联系度。最后通过置信度准则对联系度数值进行分析,进而确定评价结果。

3 实例分析

邢邯矿区位于河北南部,受太行山以西黄土高原地下水的补给,有十分丰富的矿井水资源,同时,河北南部属于缺水较为严重的地区。邢邯矿区地理位置较为分散,水质情况也有较大差别,主要有邢台、章村、显德汪、葛泉、邢东、东庞和西庞等7个矿区。本文研究数据来源于各个矿区多年统计实测数据。

3.1 实例计算分析

根据层次分析法原理,按照两两对比法,结合专家打分结果,构造目标层与因素层的判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5/7 & 4/3 \\ 7/5 & 1 & 5/3 \\ 3/4 & 3/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式(2)、(3)、(4)计算得出一级指标权重 $w = [0.3198 \quad 0.4311 \quad 0.2491]^T$,最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0014$,一致性检验: $C_R = 0.00121 < 0.1$,满足要求。

同理,构造二级判断矩阵并进行一致性检验,满足条件后经过归一化处理确定所有评价指标的权重,如表2所示。

表2 各级指标权重
Tab. 2 Index weights at all levels

目标层	目标层权重	一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	综合指标权重
A	1	B ₁	0.3198	C ₁	0.2941	0.094
				C ₂	0.2015	0.064
				C ₃	0.2479	0.079
				C ₄	0.2565	0.082
		B ₂	0.4311	C ₅	0.2070	0.089
				C ₆	0.1725	0.075
				C ₇	0.1788	0.077
				C ₈	0.2360	0.102
		B ₃	0.2491	C ₉	0.2056	0.089
				C ₁₀	0.3658	0.091
				C ₁₁	0.2104	0.052
				C ₁₂	0.4238	0.106

根据邢邯地区各矿区矿井水多年统计数据对各评估指标进行赋分,结果见表3。

将邢邯地区7个矿区矿井水资源利用风险评估的12个指标组成集合 $A(C_1, C_2, C_3, \dots, C_{12})$ 与各指标对应的等级划分标准组成的集合 $B(f_1, f_2, f_3, f_4)$ 构成集对 $H(A, B)$, 计算其联系度。

由式(11)得:

$$\mu_c = a_c + b_{c1}i_1 + b_{c2}i_2 + c_cj \quad (14)$$

式中: μ_c 为各指标的联系度; a_c 、 $b_{c1}i_1$ 、 $b_{c2}i_2$ 、 c_cj 分别为各指标对应风险等级的可能程度。

表 3 7 个矿区各指标数值、赋分及综合指数值
Tab. 3 Index values, assignment points and comprehensive index values of seven mining areas

指标	邢台	章村	显德汪	葛泉	邢东	东庞	西庞
矿井涌水量变化率 C_1	6.14%/49.21	16.60%/64.90	27.70%/81.55	5.26%/47.89	36.00%/94.00	5.14%/47.71	35.40%/93.10
矿井水潜力占比 C_2	65.00%/75.00	45.00%/95.00	64.30%/75.70	58.30%/81.70	55.00%/85.00	56.00%/86.00	76.00%/64.00
用户需水量变化率 C_3	15.40%/86.20	18.00%/94.00	10.00%/70.00	2.60%/47.80	8.30%/64.90	3.30%/49.90	13.75%/81.25
供水保证率 C_4	97.00%/49.00	98.00%/46.00	99.00%/43.00	96.00%/52.00	97.00%/49.00	97.00%/49.00	98.00%/46.00
悬浮物含量 C_5	17/45.10	13/43.90	263/64.13	64/55.60	92/56.80	760/85.30	31/49.30
可溶性固体含量 C_6	550/48.25	1 150/55.75	1 100/55.50	625.00/49.38	2 346.00/61.73	1 613.00/58.07	1 217/56.09
pH相对值 C_7	0.8/52.00	0.7/50.50	0.8/52.00	0.7/50.50	1.2/58.00	1.3/59.50	0.5/47.50
有毒物质含量 C_8	0.012/43.60	0.022/46.60	0.010/43.00	0.037/51.10	0.033/49.90	0.038/51.40	0.021/46.30
总铁锰含量 C_9	0/40.00	16.60/91.50	0/40.00	0/40.00	0/40.00	7.02/70.03	0/40.00
处理成本 C_{10}	1.03/55.90	1.35/65.50	1.24/62.20	1.32/64.60	1.45/68.50	1.63/73.60	1.05/56.50
利润率 C_{11}	35.0/47.50	18.4/72.40	28.0/58.00	22.0/67.00	16.0/76.00	10.0/85.00	34.0/49.00
激励政策 C_{12}	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40
W	51.69	61.22	56.30	52.69	60.65	61.31	55.50

注：“/”前数据为各指标数值，“/”后数据为赋分值。

因此, 总联系度 μ 为:

$$\mu = \sum_{c=1}^{12} w_c \mu_c = \sum_{c=1}^{12} w_c a_c + \sum_{c=1}^{12} w_c b_{c1} i_1 + \sum_{c=1}^{12} w_c b_{c2} i_2 + \sum_{c=1}^{12} w_c c_{c,j} \quad (15)$$

式中: w_c 为各指标权重。

令

$$\sum_{c=1}^{12} w_c a_c = g_1, \sum_{c=1}^{12} w_c b_{c1} i_1 = g_2, \sum_{c=1}^{12} w_c b_{c2} i_2 = g_3, \sum_{c=1}^{12} w_c c_{c,j} = g_4$$

则式(15)可简写为:

$$\mu = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 \quad (16)$$

经计算, 各矿区联系度结果见表 4。

采用置信度准则对各矿区矿井水资源利用风险等级进行评估。设 h 为评估等级; 设 λ 为置信度, 一般取值为 $[0.5, 0.7]$, 值越大, 表示评价结果越稳定。本文选取置信度 $\lambda = 0.7$, 采用逆向型等级标准, 有:

$$h = \left\{ f^* \mid \sum_{f=1}^{g^*} g_f > \lambda, 1 < f < F \right\} \quad (17)$$

式中: $F=4$ 为评估等级总数; f 为所选的等级; f^* 为满足公式的风险等级。

根据式(17), $g_1=0.851>0.7$, 所以邢台矿区的矿井水利用风险评估等级为 1 级, 即为低风险。经计算各矿区的 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 及最终的风险等级结果亦见表 5。

表 4 7个矿区各指标联系度
Tab. 4 Connection degree of each index of the seven mining areas

矿区	C	a_c	b_{c1i}	bc_2i	c_j	矿区	C	a_c	b_{c1i}	bc_2i	c_j
邢台	C_1	1	0	0	0	邢东	C_1	0	0	0.400	0.600
	C_2	0	0.330	0.670	0		C_2	0	0	1	0
	C_3	0	0	0.920	0.080		C_3	0.340	0.660	0	0
	C_4	1	0	0	0		C_4	1	0	0	0
	C_5	1	0	0	0		C_5	0.880	0.120	0	0
	C_6	1	0	0	0		C_6	0.551	0.449	0	0
	C_7	1	0	0	0		C_7	0.800	0.200	0	0
	C_8	1	0	0	0		C_8	1	0	0	0
	C_9	1	0	0	0		C_9	1	0	0	0
	C_{10}	0.940	0.060	0	0		C_{10}	0.100	0.900	0	0
	C_{11}	1	0	0	0		C_{11}	0	0.600	0.400	0
	C_{12}	1	0	0	0		C_{12}	1	0	0	0
章村	C_1	0.340	0.660	0	0	东庞	C_1	1	0	0	0
	C_2	0	0	0.333	0.667		C_2	0	0.067	0.933	0
	C_3	0	0	0.400	0.600		C_3	1	0	0	0
	C_4	1	0	0	0		C_4	1	0	0	0
	C_5	1	0	0	0		C_5	0	0	0.800	0.200
	C_6	0.950	0.050	0	0		C_6	0.796	0.204	0	0
	C_7	1	0	0	0		C_7	0.700	0.300	0	0
	C_8	1	0	0	0		C_8	1	0	0	0
	C_9	0	0	0.567	0.433		C_9	0	0.998	0.002	0
	C_{10}	0.300	0.700	0	0		C_{10}	0	0.740	0.260	0
	C_{11}	0	0.840	0.160	0		C_{11}	0	0	1	0
	C_{12}	1	0	0	0		C_{12}	1	0	0	0
显德汪	C_1	0	0.230	0.770	0	西庞	C_1	0	0	0.460	0.540
	C_2	0	0.620	0.380	0		C_2	0.400	0.600	0	0
	C_3	0	1	0	0		C_3	0	0.250	0.750	0
	C_4	1	0	0	0		C_4	1	0	0	0
	C_5	0.391	0.609	0	0		C_5	1	0	0	0
	C_6	0.967	0.033	0	0		C_6	0.928	0.072	0	0
	C_7	1	0	0	0		C_7	1	0	0	0
	C_8	1	0	0	0		C_8	1	0	0	0
	C_9	1	0	0	0		C_9	1	0	0	0
	C_{10}	0.520	0.480	0	0		C_{10}	0.900	0.100	0	0
	C_{11}	0.800	0.200	0	0		C_{11}	1	0	0	0
	C_{12}	1	0	0	0		C_{12}	1	0	0	0
葛泉	C_1	1	0	0	0	葛泉	C_7	1	0	0	0
	C_2	0	0.220	0.780	0		C_8	1	0	0	0
	C_3	1	0	0	0		C_9	1	0	0	0
	C_4	1	0	0	0		C_{10}	0.360	0.640	0	0
	C_5	0.960	0.040	0	0		C_{11}	0.200	0.800	0	0
	C_6	1	0	0	0		C_{12}	1	0	0	0

表5 各矿区 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 值及风险评估等级
Tab. 5 Values of g_1 , g_2 , g_3 , g_4 and risk assessment grades of each mining area

矿区	邢台	章村	显德汪	葛泉	邢东	东庞	西庞
g_1	0.851	0.587	0.652	0.833	0.596	0.576	0.774
g_2	0.027	0.173	0.251	0.117	0.225	0.199	0.073
g_3	0.116	0.112	0.097	0.050	0.122	0.207	0.102
g_4	0.006	0.128	0	0	0.056	0.018	0.051
h	1	2	2	1	2	2	1

3.2 评估结果分析

层次分析法和集对分析法计算邢邯各矿区矿井水资源利用风险等级结果见表6。

表6 各矿区矿井水资源利用风险评估结果
Tab. 6 Risk assessment results of mine water resources utilization in various mining areas

矿区名称	邢台	章村	显德汪	葛泉	邢东	东庞	西庞
层次分析法	低	中	中	低	中	中	中
集对分析法	低	中	中	低	中	中	低

评估结果显示:邢台、葛泉为低风险,章村、显德汪、邢东及东庞都为中风险;层次分析法评估西庞矿区为中风险,而集对分析法评估结果为低风险,但从层次分析法得出的西庞矿区的风险综合指数 $w=55.50$,与低风险的区间 $(40, 55]$ 接近。总体结果基本相同。就各个二级指标评估赋分来分析,两种方法的评估结果也基本一致。

对比矿区实际情况,章村矿区周围交通便利但缺少大型企业,缺少对矿井水资源的需求,矿区经过多年开采后资源接近枯竭,矿井水涌水量减少且不稳定,矿井水铁、锰含量超标且矿井水处理厂处理能力远超矿井水涌水量,使得矿井水处理成本增加;葛泉矿区开采时间较短,目前开采量和涌水量正处于一个较为稳定的时期,且水质较好。葛泉矿区经营机制较为先进与完善,经济效益显著,矿井水处理技术较为先进,处理后的矿井水可满足不同用户的要求,综合影响下矿井水资源利用率较高。

综上,两种方法评估结果基本一致,且评估结果与实际情况相吻合,表明集对分析法应用于矿井水资源利用风险评估是可行的,相比之下集对分析法的评估结果更加符合矿区实际情况。集对分析法相较于层次分析法具有原理可靠、计算过程精确,计算结果直观稳定的优势。

4 结 语

(1)在矿井水资源利用风险识别基础上,从供需双侧出发,筛选出的水量、水质、经济3个子系统和12个指标,建立了矿井水资源利用风险指标体系,构建了矿井水资源利用风险评估模型。

(2)选取冀中煤炭基地邢邯地区的7个矿区作为典型,采用层次分析法和集对分析法对其进行风险评估。两种方法评估结果基本一致:邢台、葛泉为低风险,章村、显德汪、邢东、东庞以及西庞为中风险;这表明集对分析法用于矿井水资源利用风险评估具有可行性。

(3)水质子系统对风险影响最大,其次为水量,影响最小的为经济子系统。可针对分析结果采取规避风险措施,提高矿井水资源利用率。

参 考 文 献:

- [1] 国家发展改革委, 水利部. 国家节水行动方案[N]. 中国改革报, 2019-04-19(003). (National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. National water conservation action plan[N]. China Reform Daily, 2019-04-19(003). (in Chinese))
- [2] 国家发展改革委:《矿井水利用发展规划》发布[J]. 现代矿业, 2013, 29(3): 115. (National Development and Reform Commission: Mine water utilization development plan[J]. Modern Mining, 2013, 29(3): 115. (in Chinese))
- [3] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805. (WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805. (in Chinese))
- [4] 何绪文, 杨静, 邵立南, 等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66. (HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, et al. Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66. (in Chinese))
- [5] 梁永生. 煤矿矿井水的处理与综合利用[J]. 山西科技, 2018, 33(3): 84-86. (LIANG Yongsheng. Treatment and comprehensive utilization of coal mine water[J]. Shanxi Science and Technology, 2018, 33(3): 84-86. (in Chinese))
- [6] 马立新, 王勇, 吴丽, 等. 煤矿矿井水处理工艺与效益分析[J]. 能源与环保, 2017, 39(9): 61-65. (MA Lixin, WANG Yong, WU Li, et al. Coal mine water treatment technology and benefit analysis[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(9): 61-65. (in Chinese))
- [7] 郭雷, 张砾, 胡婵娟, 等. 我国矿井水管理现状分析及对策[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 484-489. (GUO Lei, ZHANG Luo, HU Chanjuan, et al. Status analysis and measures taken for mine water management in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Suppl2): 484-489. (in Chinese))
- [8] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246. (GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246. (in Chinese))
- [9] 李恩宽, 白乐, 韩瑶瑶, 等. 基于供需双向协调的煤矿矿井水利用及其潜力评价指标体系研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(12): 103-106. (LI Enkuan, BAI Le, HAN Yaoyao, et al. Research on coal mine water utilization and its potential evaluation index system based on two-way coordination of supply and demand[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(12): 103-106. (in Chinese))
- [10] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009. (YIN Zhan'e. Research of urban natural disaster risk assessment and case study[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. (in Chinese))
- [11] 梁缘毅, 吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 775-789. (LIANG Yuanyi, LÜ Aifeng. Risk assessment of water resource security in China[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775-789. (in Chinese))
- [12] 李庭. 废弃矿井地下水污染风险评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. (LI Ting. Study on groundwater pollution risk assessment of abandoned coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))
- [13] 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1097, 1104. (LUO Jungang, XIE Jiancang, RUAN Benqing. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1092-1097, 1104. (in Chinese))
- [14] 赵克勤. 基于集对分析的方案评价决策矩阵与应用[J]. 系统工程, 1994, 12(4): 67-72. (ZHAO Keqin. An applications of the scheme-appraisal decision matrix based on set pair analysis[J]. Systems Engineering, 1994, 12(4): 67-72. (in Chinese))
- [15] 王佳, 周玉良, 周平, 等. 基于集对分析的安徽省梅雨期降水空间特征研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 1-4. (WANG Jia, ZHOU Yuliang, ZHOU Ping, et al. Study on spatial characteristics of plum rains in Anhui province based on set pair analysis[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 1-4. (in Chinese))
- [16] 孙勇, 李宝聚, 孙志博, 等. 融合RBF神经网络和集对分析的风电功率超短期预测[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 49-58. (SUN Yong, LI Baoju, SUN Zhibo, et al. Ultra-short-term wind power forecasting integrated RBF neural network and set pair analysis[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(5): 49-58. (in Chinese))

- [17] 柴鹏翔,王红雨,马利军,等.基于集对法的土工袋砌护农田排水沟道边坡稳定性评价[J].*中国农村水利水电*,2020(8):117-121,125.(CHAI Pengxiang,WANG Hongyu,MA Lijun,et al.The stability evaluation of soilbags protecting farmland drainage ditches slope based on the set pair analysis method[J].*China Rural Water and Hydropower*,2020(8):117-121,125.(in Chinese))
- [18] 刘泽岸,王颖.基于AHP与集对分析法的节水型社会建设综合评价[J].*西安理工大学学报*,2020,36(4):530-537.(LIU Zean,WANG Ying.Comprehensive evaluation of water-saving society construction based on AHP and set pair analysis[J].*Journal of Xi'an University of Technology*,2020,36(4):530-537.(in Chinese))
- [19] 方成杰,钱德玲,徐士彬,等.基于联系期望的泥石流易发性评价模型[J].*水利水运工程学报*,2017(2):59-66.(FANG Chengjie,QIAN Deling,XU Shibin,et al.An assessment model for debris flow liability to occurrence based on connectional expectation[J].*Hydro-Science and Engineering*,2017(2):59-66.(in Chinese))
- [20] 刘浅奎,王文圣,余思怡,等.熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用[J].*水利水运工程学报*,2020(6):16-22.(LIU Qiankui,WANG Wensheng,YU Siyi,et al.Application of fuzzy set pair analysis method based on entropy weight in flood season staging of Xiluodu Reservoir[J].*Hydro-Science and Engineering*,2020(6):16-22.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.煤矿矿井水分类:GB/T 19223—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Classification of coal mine water: GB/T 19223—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese))
- [22] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.(State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis

WANG Hengli^{1,2}, NI Shenhai¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study identifies risk factors associated with the utilization of mine water resources, and based on the objective of a bilateral coordination between supply and demand, selects three primary indicators, namely water volume, water quality, and economy (cost), and 12 secondary indicators of risk assessment to establish a risk assessment index system for mine water use. A mine water utilization risk assessment model is constructed on the basis of the set pair analysis (SPA) theory. Seven mining areas in the Xinghan area of the Jizhong coal base are selected as typical cases, and the analytic hierarchy process and SPA are applied to conduct mine water utilization risk assessment. The evaluation results of the two methods are consistent: Xingtai and Gequan have a low risk, whereas Zhangcun, Xiandewang, Xingdong, Dongpang, and Xipang have a medium risk. The risk level is mainly affected by water quality and volume, and is least affected by economy. The evaluation results are in line with the actual conditions of mine water resource utilization, thus confirming the feasibility of the SPA theory for mine water utilization risk assessment. The model can also be applied to risk assessment in other mining areas.

Key words: mine water utilization; analytic hierarchy process; set pair analysis; risk assessment; Xinghan area