

基于博弈论组合赋权和 TOPSIS 法的矿区水资源安全性综合评价

薛晓强¹, 周雅清¹, 许乐杰², 张少坤³, 王鹏皓³

(1. 陕西小保当矿业有限公司; 2. 陕西飞海工程管理有限公司; 3. 西安理工大学土木建筑工程学院)

摘要:为定量评价矿区水资源安全性,以陕北 X 矿区为研究对象,构建了包含水质状况、水资源数量、用水效率、生态可持续性 4 个准则层共 16 个二级指标的评价指标体系,并划分了各指标的风险等级;运用博弈论组合赋权法将层次分析法和熵权法得到的指标权重进行组合优化,将组合权重与 TOPSIS 法结合,根据指标与理想解的贴近度分析矿区多年的水资源安全性。结果表明:该矿区 2017—2023 年水资源综合安全级别为“较安全”,与矿区实际情况相符;影响矿区水资源安全性的主要因素为地表水水质达标率、矿区废水排放达标率和地下水污染指数。

关键词:博弈论;TOPSIS 法;矿区;水资源;综合评价

Comprehensive evaluation of water resources security in mining areas based on game theory combination weighting and TOPSIS method//Xue Xiaoqiang¹, Zhou Yaqing¹, Xu Lejie², Zhang Shaokun³, Wang Penghao³ (1. Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd.; 2. Shaanxi Feihai Engineering Management Co., Ltd.; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology)

Abstract: To quantitatively evaluate water resources security in mining areas, this study takes the X mining area in northern Shaanxi as the research object and constructs an evaluation index system comprising four dimensions (water quality status, water resources quantity, water use efficiency, and ecological sustainability) with a total of 16 secondary indicators, and classifies the risk levels of the indicators. The game theory combination weighting approach is employed to optimize the integration of indicator weights derived from the analytic hierarchy process and the entropy weight method. The combined weights are then incorporated into the TOPSIS method to analyze the multi-year water resources security of the mining area based on the closeness of each indicator to the ideal solution. The results indicate that the comprehensive water resources security level of the mining area from 2017 to 2023 is relatively safe, which is consistent with the actual conditions of the mining area. The primary factors affecting water resources security in the mining area are the surface water quality compliance rate, the wastewater discharge compliance rate of the mining area, and the groundwater pollution index.

Key words: game theory; TOPSIS method; mining area; water resources; comprehensive evaluation

矿区水资源是矿区生产活动和生态平衡的命脉,其安全性直接影响着矿区的可持续发展以及区域的稳定性。随着矿产资源开发规模的扩大和开采深度的增加,矿区水资源系统面临着水质污染加剧、人均可用水量减少等问题,水资源的供需矛盾日益突出,导致水资源安全风险事件频发^[1],严重影响了矿区的生产效率和生活质量^[2-3]。矿区水资源安全性评价已成为助力矿区可持续发展与区域稳定的必要环节^[4]。

国内外学者关于矿区水资源安全性评价的研究主要集中于三个层面。在以水质健康风险为核心的水环境质量类评价层面,Akakuru 等^[5]针对尼日利

亚的铅锌矿区进行了致癌风险和地下水质量评价,并采用机器学习模型预测了矿区周围地下水的污染水平,为受采矿活动严重影响地区的公共卫生和环境管理提供了重要帮助;卢振等^[6]对神东矿区不同水体进行了取样测试,采用 CCME-WQI 法对矿区开展了水质评价,揭示了矿区内不同类型人群的水质健康风险及空间分布特征;庞红璐等^[7]对厄立特里亚 Zara 矿区的 11 处地下水和 6 处地表水采样点进行了抽样检测,采用单因子法对矿区的水质进行了评价。在侧重于水资源数量的供需平衡类评价层面,姚强岭等^[8]建立了包含 3 个方面 15 种参数的矿区采动水资源潜力评价体系,探讨了维持生态平衡

基金项目:薛晓强(1984—),男,高级工程师,主要从事煤矿管理及生产研究。E-mail:18235783113@163.com

作者简介:周雅清(1992—),男,助理工程师,主要从事煤矿环保管理研究。E-mail:410704510@qq.com

所需采动水资源总量的计算方法;李琳^[9]为解决宁东煤炭基地水资源供需矛盾,采用基于熵权的TOPSIS法评价了该基地矿井水的供需双向协调情况;Guo等^[10]考虑经济、社会和生态因素,对平朔矿区供水需水平衡进行了评价分析,并通过粒子群优化算法建立了矿区水资源优化配置模型,为矿区水资源的优化配置提供了方法参考。在生态效应与可持续管理类评价层面,刘晓民等^[11]以大海则煤矿为例,综合考虑地质、采动、自然资源、生态环境、地质灾害以及社会经济6个维度,建立了生态脆弱区煤-水绿色开采度评价指标体系;解馨馨等^[12]基于煤炭生产、水资源和环境生态3个维度的21项指标,构建了煤-水-生态协调发展的TOPSIS评价模型,为矿区煤矿及水资源开采提供了理论参考。

国内外现有研究虽在各领域取得了进展,但仍存在两大局限:①在研究视角上,多侧重于单一维度(水质或水量),未能将影响矿区水资源安全性的众多因素纳入统一框架进行系统综合评估;②在方法上,权重确定方法存在主观或客观的片面性,且评价模型多局限于静态分析,缺乏对安全水平动态演变趋势的分析与预警能力。因此,本文采用博弈论将层次分析法与熵权法所得权重进行组合优化,并将组合权重融入TOPSIS模型,通过计算历年指标与理想解的贴近度,同时识别影响安全水平的关键因子,以期对矿区水资源安全管理提供决策参考,并为同类矿区的风险预警与调控策略提供方法借鉴。

1 研究区概况与评价指标体系构建

1.1 研究区概况

陕北X矿区处于秃尾河流域及榆溪河流域的中间地带,总面积220km²,拥有职工近2000人。井田范围内无地表河流,仅分布有一些海子,其蓄水量季节性变化明显。本文基于矿区2017—2023年水质监测报告、项目水资源论证报告及水平衡测试报告,对其进行水资源安全性综合评价。

1.2 评价指标体系构建

矿区水资源系统是一个复杂的多维动态系统,其安全水平受自然、经济、生态及社会等多方面因素的综合影响。为克服上述研究视角单一的问题,本文构建了一个逻辑递进的四维评价框架,其核心创新在于针对矿区这一特殊情境,将水质、水量、用水效率和生态可持续性整合为一个具有内在联系的有机系统。具体而言,本文依据《全国水资源综合规划技术大纲》《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》等相关法规标准,结合水资源安全理论和系统科学理论,通过文献研究、专家访谈等方

式,基于以下4个方面考量构建了矿区水资源安全性综合评价指标体系:①水质状况是水资源安全的基础前提,直接决定水资源的可利用性;②水资源数量是安全的物质保障,反映水资源的供给能力与承载规模;③用水效率是安全的调控核心,体现了人类对水资源的集约利用水平;④生态可持续性安全的终极目标,必须确保水资源开发不损害生态系统的长期健康。这4个方面遵循“前提→保障→调控→约束”的递进逻辑,构成了一个从资源本底到人类利用再到生态持续的完整闭环,实现了从单一判断到系统性综合诊断的跨越。该评价指标体系包含4个准则层和16个二级指标,见图1。

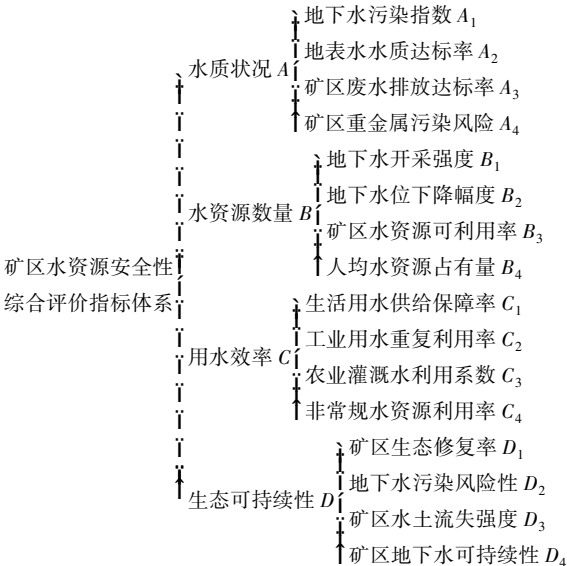


图1 矿区水资源安全性综合评价指标体系

1.3 评价指标风险等级划分

考虑影响矿区水资源安全水平的多种因素,参照水资源安全等级划分^[13]和国内外相关分级标准,并结合矿区实际情况对评价指标进行定性和定量分级,将矿区水资源安全性划分为5个风险等级,并按综合得分评判风险等级,分别为安全(Ⅰ级,>0.8)、较安全(Ⅱ级,>0.6~0.8)、较不安全(Ⅲ级,>0.4~0.6)、不安全(Ⅳ级,0.2~0.4)和极不安全(Ⅴ级,<0.2),结果见表1。

2 研究方法

2.1 模型构建

针对研究方法上的局限性,本文提出了一种基于博弈论组合赋权和TOPSIS法的矿区水资源安全性评价模型。通过博弈论将层次分析法(AHP法)主观赋权与熵权法客观赋权进行折中处理,得到各影响因素的组合权重;随后利用TOPSIS法计算评价对象与理想解的贴近度,并据此对矿区水资源安全性进行合理排序,最终确定其安全等级。该模型

表 1 评价指标风险等级划分及 2017 年样本数据

指标	不同风险等级指标值					2017 年样本指标值
	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级	
A ₁	≤1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0	>3.0~4.0	>4.0	1.62
A ₂	≥95%	85%~<95%	70%~<85%	50%~<70%	<50%	87%
A ₃	≥95%	85%~<95%	70%~<85%	50%~<70%	<50%	83%
A ₄	≤1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0	>3.0~4.0	>4.0	2.3
B ₁	≤30%	>30%~50%	>50%~70%	>70%~90%	>90%	51%
B ₂	≤0.5	>0.5~1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0	>3.0	1.13
B ₃	≥70%	50%~<70%	30%~<50%	10%~<30%	<10%	72%
B ₄	≥1700	1000~<1700	500~<1000	200~<500	<200	1233.67
C ₁	≥95%	85%~<95%	70%~<85%	50%~<70%	<50%	86%
C ₂	≥80%	60%~<80%	40%~<60%	20%~<40%	<20%	93%
C ₃	≥0.6	0.5~<0.6	0.4~<0.5	0.3~<0.4	<0.3	0.53
C ₄	≥30%	20%~<30%	10%~<20%	5%~<10%	<5%	67%
D ₁	≥70%	50%~<70%	30%~<50%	10%~<30%	<10%	49%
D ₂	≤1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0	>3.0~4.0	>4.0	3.72
D ₃	≤500	>500~1000	>1000~2000	>2000~5000	>5000	863
D ₄	≥95%	85%~<95%	70%~<85%	50%~<70%	<50%	83%

综合考虑了矿区水质状况、水资源数量、用水效率、生态可持续性等多维度因素,兼顾了主观经验与客观数据的权重分配合理性,具有科学性和适用性。矿区水资源安全性综合评价流程如图 2 所示。

2.2 基于 AHP 法的主观权重确定

AHP 法是一种用于权重决策的分析方法,它将复杂的决策问题分解为多个层次,由专家根据经验对层次结构中的各项指标进行两两比较,从而利用标度赋值标准(如 1~9 标度法)构建判断矩阵^[14-15]。本文研究邀请了 8 位专家,包括 3 位市级水利勘测设计院的高级工程师、3 位来自矿区环境管理部门的负责人以及 2 位高校水资源评价研究领域的教授。采用德尔菲法进行两轮匿名咨询,首轮正常发放调查问卷,次轮则将首轮统计结果反馈给专家,使其参考群体意见并修正判断,促使意见收敛。在此基础上,将所有专家的打分结果进行几何平均,以此构建目标层对准则层以及准则层对指标层的判断矩阵,借助 SPSSPRO 平台计算各指标权重。随后,对

判断矩阵进行一致性检验,所有矩阵的一致性比率均小于 0.1,证明主观权重分配较为合理。

2.3 基于熵权法的客观权重确定

熵权法是一种基于信息熵概念的客观赋权方法,通过熵值来衡量系统的无序程度。其核心原理为,指标的熵值越小,表明该指标数据的离散程度越大,所提供的信息量越多,在综合评价中所应赋予的权重也越高^[16]。借助 MATLAB 软件计算出各指标客观权重。

2.4 基于博弈论的最优组合赋权

博弈论组合赋权是通过构建指标之间的博弈关系,综合考虑主、客观权重分配,寻求最佳权重值的方法^[17-18]。其核心思想是寻找一组最优的线性组合系数,使得组合权重向量与各基本权重向量的离差极小化,从而达成一种均衡状态。

a. 若采取 L 种方法对 n 个评价指标进行赋权,计算得到基本权重向量的集合 $w_k = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}\} (k=1, 2, \dots, L)$, 则基本权重向量的任意线性组

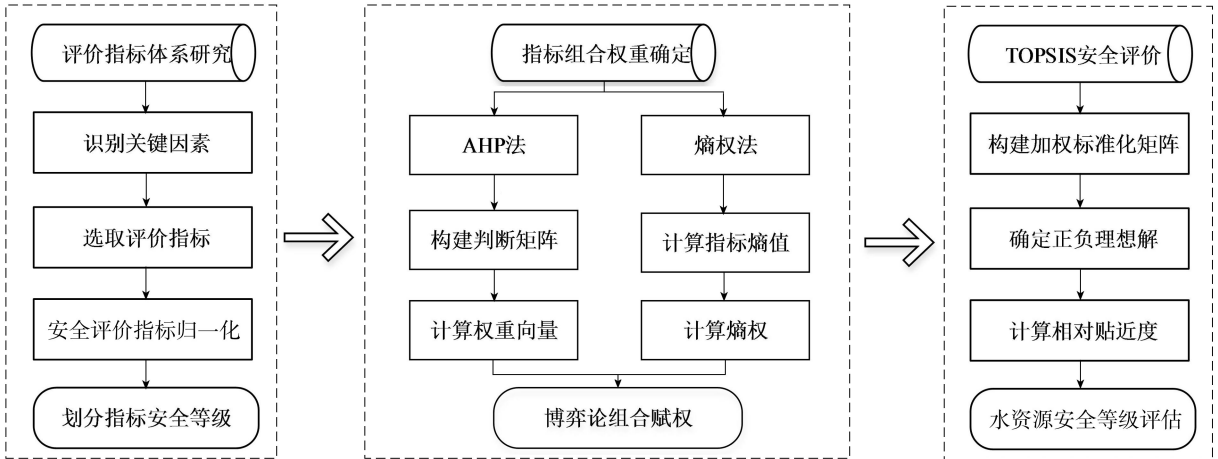


图 2 矿区水资源安全性综合评价流程

合可以表示为:

$$\boldsymbol{w} = \sum_{k=1}^L \alpha_k \boldsymbol{w}_k^T \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{w}$ 为组合权重向量; α_k 为线性组合系数。

b. 根据博弈论的基本思想,寻找最优线性组合系数 α_k^* ,使得组合权重向量 $\boldsymbol{w}$ 与基本权重向量 $\boldsymbol{w}_k$ 的离差最小化,即满足:

$$\min \parallel \sum_{k=1}^L \alpha_k \boldsymbol{w}_k^T - \boldsymbol{w}_k^T \parallel \tag{2}$$

c. 根据矩阵微分性质,求解线性方程组:

$$\begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_L^T \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_L^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \alpha_1 \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \alpha_2 \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \alpha_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_1^T \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_2^T \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_L^T \end{pmatrix} \tag{3}$$

d. 将上式解得的线性组合系数 α_k 进行归一化处理,即可得到最优线性组合系数 α_k^* :

e. 最终的最优组合权重向量为 $\boldsymbol{w}^*$:

$$\boldsymbol{w}^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \boldsymbol{w}_k^T \tag{4}$$

2.5 TOPSIS 评价模型与计算步骤

TOPSIS 法的基本原理是通过计算各评价对象与正理想解和负理想解的距离,以距离最优解最近、距离最劣解最远为原则,从而判断相对优劣的评价方法^[19]。其基本计算步骤为:

- a. 建立初始评价矩阵。
- b. 为消除不同指标量纲的影响,使数据具有可比性,对原始评价矩阵进行标准化,处理后得到标准化矩阵。
- c. 根据各指标的权重,计算加权归一化评价矩阵。
- d. 计算各评价指标的正、负理想解。在本文研究中,各评价指标的正理想解(C^+)代表理论上各指标所能达到的最优安全状态,即所有效益型指标取最大值,所有成本型指标取最小值。负理想解(C^-)则代表最劣安全状态。以用水效率维度为例,其正理想解由 2017—2023 年间生活用水供给保障率、工业用水重复利用率、农业灌溉水利用系数和非常规水资源利用率这 4 个指标各自的年度最优值构成。后续计算出的各年度贴进度,即评价该年度现状与这一理论最优状态的接近程度。
- e. 采用欧氏距离计算各评价对象与正理想解及负理想解的距离。
- f. 计算评价对象与正、负理想解的贴进度。在一般情况下,贴进度的取值越接近 1,则说明评价对象越贴近理想解。

3 结果与分析

3.1 权重计算结果

基于第 2 节博弈论组合赋权确定的最终权重,对 X 矿区 2017—2023 年的水资源安全性进行实证评价与分析。

本文中 $L=2$,基于式(1)~(4),利用 MATLAB 求解线性方程组,求得 $\alpha_1=0.5045, \alpha_2=0.4955$,权重计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,准则层权重从大到小依次为:水质状况(0.329)、水资源数量(0.254)、用水效率(0.217)和生态可持续性(0.200)。这表明水质状况和水资源数量是影响矿区水资源安全性的两个最关键维度。二级指标中,地表水水质达标率(0.093)、矿区废水排放达标率(0.088)、地下水污染指数(0.087)的权重位列前三,说明这些指标在矿区水资源安全方面发挥着重要作用。

表 2 权重计算结果

指标	主观权重	客观权重	组合权重
A_1	0.116	0.057	0.087
A_2	0.097	0.089	0.093
A_3	0.079	0.097	0.088
A_4	0.081	0.042	0.061
B_1	0.088	0.078	0.083
B_2	0.064	0.073	0.069
B_3	0.055	0.047	0.051
B_4	0.057	0.045	0.051
C_1	0.074	0.034	0.054
C_2	0.049	0.103	0.076
C_3	0.024	0.041	0.033
C_4	0.045	0.063	0.054
D_1	0.040	0.066	0.053
D_2	0.051	0.067	0.059
D_3	0.030	0.050	0.040
D_4	0.049	0.047	0.048

3.2 指标层贴进度计算与结果分析

以用水效率为例,根据上述计算方法即可得到该维度中各项二级指标的正、负理想解,可确定 2017—2023 年 X 矿区水资源用水效率中各二级指标与正、负理想解的距离 S_i^+ 和 S_i^- 为:

$$\begin{aligned} S_1^+ &= 0.0259 & S_1^- &= 0.0927 & S_2^+ &= 0.0722 \\ S_2^- &= 0.0616 & S_3^+ &= 0.0409 & S_3^- &= 0.0860 \\ S_4^+ &= 0.0828 & S_4^- &= 0.0760 & S_5^+ &= 0.0745 \\ S_5^- &= 0.0530 & S_6^+ &= 0.0945 & S_6^- &= 0.0583 \\ S_7^+ &= 0.0726 & S_7^- &= 0.0488 \end{aligned} \tag{5}$$

由此得到各二级指标贴进度 E_i 为:

$$\begin{aligned} E_1 &= 0.781 & E_2 &= 0.460 & E_3 &= 0.678 & E_4 &= 0.478 \\ E_5 &= 0.416 & E_6 &= 0.382 & E_7 &= 0.402 \end{aligned} \tag{6}$$

同理,可确定矿区水质状况、水资源数量以及生态可持续性的贴进度。各准则层的贴进度计算结果见表 3。

表 3 各准则层贴近期度计算结果

准则层	贴近期度						
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
水质状况	0.659	0.685	0.729	0.673	0.532	0.515	0.508
水资源数量	0.690	0.684	0.724	0.690	0.630	0.576	0.528
用水效率	0.781	0.460	0.678	0.478	0.416	0.382	0.402
生态可持续性	0.725	0.579	0.649	0.568	0.683	0.691	0.666

由表 3 可知,从水质状况来看,2019 年、2018 年和 2020 年分别以贴近期度 0.729、0.685 和 0.673 排名前三位,且呈现先升后降的波动特征。2019 年的峰值得益于当时污染管控措施的加强,但此后贴近期度持续下滑至 2023 年的 0.508,反映出治理效果的衰减,其核心原因在于矿区污染源复杂,治理措施的长效性不足,初期投入的治理设施因设备老化、处理能力饱和以及运维不到位,难以应对长期、累积的污染负荷,导致水质安全水平无法巩固。从水资源数量来看,各年的相对贴近期度差异较小,2019 年、2017 年和 2020 年分别以 0.724、0.690 和 0.690 排名前三位。究其原因,2019 年的高贴近期度源于为满足生产需求而进行的高强度地下水开采。该措施虽在短期内保障了供给量,但破坏了地下水的采补平衡,直接导致后续 2021—2023 年水资源可利用率降低、供给能力衰减,使贴近期度单调下滑至 2023 年的 0.528,其根源在于水资源管理缺乏总量控制和可持续规划,未能平衡短期生产需求与长期资源可持续性。与前两个维度相比,用水效率的安全形势最为严峻,其安全状况呈现“经历冲击后持续低迷”的态势。2017 年贴近期度高达 0.781,但 2018 年急剧下滑至 0.460,此后的 2020—2023 年持续处于低位(0.382~0.478)。这表明矿区的用水效率在经历系统性冲击后,陷入了长期低效困境,其根源在于生产规模扩大时,节水技术与管理措施未能同步升级,且缺乏长效节水机制与刚性约束,导致效率失守后难以恢复。从生态可持续性来看,其安全水平呈现“震荡修复”的演变特征,2017 年贴近期度高达 0.725,经历 2018 年的回落后,于 2019 年反弹至 0.649,但 2020 年再次探至周期内最低点 0.568。结合矿区实际,2018 年的下滑可归因于矿区开始实施的初期生态修复工程造成的扰动,2019 年的反弹表明修复措施产生了初步效果,但 2020 年再次成为修复过程中的“痛点”时期,这深刻反映了生态系统的脆弱性,也表明修复效果易受持续采矿活动、气候条件等内外因素干扰,导致成效出现反复。此后,贴近期度缓慢回升,表明长期的修复投入累积效应开始显现,生态系统抵抗干扰的能力增强,进入了一个相对稳定的恢复通道。然而,其数值仍未超越 2017 年基准,说明治理成效的巩固仍需时日。

3.3 准则层评价结果

由指标层确定的贴近期度结果可得贴近期度评价矩阵 E ,将其与博弈论组合赋权法确定的组合权重相乘,可得准则层综合评价结果向量 $Q = (0.702, 0.608, 0.701, 0.616, 0.554, 0.526, 0.525)$

不同年份矿区水资源安全各年的综合水平排名先后为 2017 年、2019 年、2020 年、2018 年、2021 年、2022 年和 2023 年,其整体综合得分为 0.618。根据等级划分标准,该矿区水资源安全状况整体处于“较安全”级别。根据离差分析,2017—2023 年的离差值分别为 0.097、0.003、0.096、0.011、-0.051、-0.079、-0.080。可见,2017 年和 2019 年的安全水平显著高于平均值,表现出突出的管理成效;2020 年和 2018 年略高于平均水平,处于较不安全状态;而 2021—2023 年则持续低于平均水平,且偏离幅度逐年扩大,显示出近期水资源安全状况呈现持续下滑趋势,治理压力不断增大。

综合来看,评价结果从时间变化和系统结构两个方面表明,矿区水资源安全管理体系的适应能力和协同能力略显不足。各维度安全水平的差异以及综合得分的波动下降趋势反映出当前的管理方式在应对复杂风险时,未能将不同治理环节有效整合,难以形成持久稳定的安全保障能力。从时间变化上看,安全状况呈现“短期改善、长期承压”的特点。这表明管理行为多为事中或事后应对,缺乏基于长期风险预警的前瞻性规划。安全水平未能随治理投入持续提高,反而在初期改善后逐步下滑,说明现有措施可持续性不强,其效果容易被更深层次的系统性压力所抵消。从系统结构上看,各维度安全水平的发展不同步、不均衡,暴露出管理系统存在“各自为政”的问题。水质、水量、效率和生态等治理环节之间缺乏有效的政策协同和资源整合,导致治理效果难以在不同领域间形成合力。

究其根本,当前的管理模式未能将水资源安全作为一个动态演化的整体系统来对待,治理思路仍局限于解决单个问题的技术层面,忽视了不同子系统之间的相互影响和反馈作用。这种机制上的缺陷,使得系统难以建立起抵御内外干扰的适应能力,最终表现为综合安全水平的波动和下降。

4 结论与建议

4.1 结论

a. 基于博弈论组合赋权和 TOPSIS 法对陕北 X 矿区 2017—2023 年水资源安全性的综合评价结果表明,该矿区整体安全级别为“较安全”,但安全水平呈“短期改善、长期承压”的波动下降态势,2021—2023 年持续低于平均水平且偏离幅度逐年扩大,近期水资源安全面临较大挑战。

b. 影响矿区水资源安全性的关键指标依次为地表水水质达标率、矿区废水排放达标率和地下水污染指数,水质状况与水资源数量是主导维度。各维度安全水平发展不同步,用水效率在 2018 年骤降后长期低迷,生态可持续性呈震荡修复特征,反映出管理系统存在“各自为政”问题,治理措施缺乏跨维度协同与长效机制。

c. 通过贴适度计算可直观量化各年度水资源安全程度及潜在风险,能够有效识别不同年份各维度的优势与短板,为矿区水资源的精准调控、动态预警和科学管理提供明确依据。模型兼顾主观专家经验与客观数据信息,权重分配合理,评价结果与矿区实际相符,可为同类矿区水资源安全评估及区域可持续发展提供方法借鉴与决策支持。

4.2 建议

a. 针对薄弱环节进行精准管控。在水质方面,重点加强污水处理设施的运行维护与效能监测,定期更新老化设备,确保废水排放长期稳定达标。对尾矿库、废石场等潜在污染源进行防渗加固,严防渗漏;在水资源数量方面,严格控制地下水开采,保障水资源可持续供给。将再生水、矿坑水作为生产首选水源,并提高其供应稳定性,减少对地下水的依赖,增强系统抗风险能力;在用水效率方面,对洗选、冷却等主要用水环节进行节水改造,将用水效率纳入绩效考核,形成“节水增效”的约束机制;在生态可持续性方面,落实边采边治,对排土场、沉陷区等区域及时进行植被恢复。同时,在施工区严格落实水土保持措施,降低水土流失强度。

b. 整合环保、水利、能源及矿区管理部门职能与数据,同步建设集监测、评价、预警、调度于一体的智慧水务平台,实现信息共享与业务协同,提升系统性治理能力。

c. 将水资源安全核心指标纳入考核,建立责任追究制度。鼓励产学研合作,攻关矿区水资源高效利用与生态修复关键技术,形成长效支撑。

参考文献:

[1] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利

用效率的影响研究[J]. 水利经济,2024,42(6):43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))

[2] 金菊良,常哲,周亮广,等. 流域水资源安全风险评价问题的系统分析[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5): 112-118. (Jin Juliang, Chang Zhe, Zhou Lianguang, et al. System analysis of water resources security risk assessment in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 112-118. (in Chinese))

[3] 李滕. 矿区水资源利用现状研究[J]. 世界有色金属, 2017(15):287-289. (Li Meng. Study on the utilization of water resources in mining area [J]. World Nonferrous Metals, 2017(15):287-289. (in Chinese))

[4] 陈彩红. 矿区水资源合理利用分析[J]. 世界有色金属, 2018(17):218-220. (Chen Caihong. Analysis of rational utilization of water resources in mining area [J]. World Nonferrous Metals, 2018(17):218-220. (in Chinese))

[5] Akakuru O C, Eyankware M O, Aigbadon G O, et al. Carcinogenic health risks and water quality assessment of groundwater around lead-zinc mining areas of Ebonyi state Nigeria: a data-driven machine learning approach [J]. Discover Civil Engineering, 2024, 1(1):130.

[6] 卢振,郭洋楠,李国庆,等. 神东矿区地表水、地下水和矿井水水质特征及健康风险评价[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5):222-234. (Lu Zhen, Guo Yangnan, Li Guoqing, et al. Water quality and health risk of surface water, groundwater and mine water in Shendong Mining Area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(5):222-234. (in Chinese))

[7] 庞红璐,陈意,吴先勇,等. 厄立特里亚科卡矿区水质量评价及水污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(7):19-24. (Pang Honglu, Chen Yi, Wu Xianyong, et al. Water quality evaluation and water pollution characteristics of Zara Koka mine in Eritreap [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(7): 19-24. (in Chinese))

[8] 姚志岭,于利强,陈胜焱,等. 西部生态脆弱矿区采动水资源与生态环境效应[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2):748-767. (Yao Qiangling, Yu Liqiang, Chen Shengyan, et al. Mining-affected water resources and ecological effects in ecologically fragile mining areas of western China [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2):748-767. (in Chinese))

[9] 李琳. 宁东煤炭基地矿井水供需双向协调评价:基于 TOPSIS 方法的实证研究[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 5-8. (Li Lin. Two-way coordinated evaluation of mine water supply and demand in Ningdong Coal Base: an

empirical study based on TOPSIS method [J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 5-8. (in Chinese))

[10] Guo Liangliang, Xie Xinxin, Zeng Jian, et al. Optimization model of water resources allocation in coal mine area based on ecological environment priority[J]. Water, 2023, 15(6): 1205.

[11] 刘晓民, 王文娟, 王震宇, 等. 基于 GT-ANP 理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 203-210. (Liu Xiaomin, Wang Wenjuan, Wang Zhenyu, et al. Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 203-210. (in Chinese))

[12] 解馨馨, 杨军耀, 陈军锋. 露井联采矿区煤-水-生态协调发展评价体系研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 135-140. (Xie Xinxin, Yang Junyao, Chen Junfeng. Study on evaluation system of coal-water-ecology coordinated development model in open-pit combined mining area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 135-140. (in Chinese))

[13] 张彦, 李明然, 寇利卿. 基于 PSR-PCA-ANFIS 模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 68-75. (Zhang Yan, Li Mingran, Kou Liqing. Evaluation of water resources security in Baoding central city based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 68-75. (in Chinese))

[14] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 80-87. (in Chinese))

[15] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (Ai Yadi, Wei Chuanjiang, Ma Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

[16] 何婧, 孙银光. 高职院校国家助学金评定如何帮助较不利学生?: 基于 AHP-熵权法的评定[J]. 教育与经济, 2024, 40(6): 84-93. (He Jing, Sun Yingguang. How does the selection of state grants for higher vocational colleges help disadvantaged students? an evaluation study based on AHP and entropy[J]. Education & Economy, 2024, 40(6): 84-93. (in Chinese))

[17] 杨毅彪, 孙恒五, 戴震, 等. 基于博弈论组合赋权的地方高校校内专业评估[J]. 系统科学学报, 2025, 33(2): 149-154. (Yang Yibiao, Sun Huanwu, Dai Zhen, et al. Research on specialty evaluation in local colleges and universities based on the combination weighting of game theory[J]. Journal of System Science, 2025, 33(2): 149-154. (in Chinese))

[18] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 55-61. (in Chinese))

[19] 刘睿佳, 杨侃, 陈静, 等. 基于区间直觉模糊 TOPSIS 法的水资源空间均衡评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 56-61. (Liu Ruijia, Yang Kan, Chen Jing, et al. Evaluation of water resources spatial equilibrium based on extended TOPSIS method with interval intuitionistic fuzzy sets[J]. Yellow River, 2023, 45(3): 56-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-24 编辑: 俞云利)

+++++

(上接第 64 页)

[26] 王丽娟, 宋翹楚, 吴为, 等. 江苏沿海滩涂地下水埋深及矿化度变化规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 52-57. (Wang Lijuan, Song Qiaochu, Wu Wei, et al. Variation law of groundwater depth and mineralization of coastal tidal flats in Jiangsu Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 52-57. (in Chinese))

[27] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624. (Liu Zhandong, Liu Zugui, Yu Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624. (in Chinese))

[28] 肖俊夫, 南纪琴, 刘战东, 等. 不同地下水埋深夏玉米产量及产量构成关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 36-39. (Xiao Junfu, Nan Jiqin, Liu Zhandong, et al. Study on yield and yield components of summer maize under different groundwater levels [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 36-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 俞云利)