

洪梅,王瀚霆,张春鹏,等. 基于模糊认知图组合赋权的酸性矿山废水污染土壤生态风险评价. 吉林大学学报(地球科学版), 2026, 56(4): 1362–1371. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250010.

Hong Mei, Wang Hanting, Zhang Chunpeng, et al. Ecological Risk Assessment of Soil Contaminated by Acidic Mine Wastewater Based on Fuzzy Cognitive Map Combination Weighting. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026, 56(4): 1362–1371. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250010.

基于模糊认知图组合赋权的酸性矿山废水污染土壤生态风险评价

洪梅^{1,2}, 王瀚霆^{1,2}, 张春鹏¹, 徐万洲^{1,2}, 宋博宇³

1. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130021

2. 吉林大学石油化工污染场地控制与修复技术国家地方联合工程实验室, 长春 130021

3. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029

摘要:酸性矿山废水是造成矿山土壤环境退化的主要因素之一, 对其进行生态风险评价至关重要。在这一评估过程中, 指标权重分配起关键作用。本研究针对现有赋权方法中对逆向指标考虑不足及人为赋权主观性强的问题, 提出了一种基于模糊认知图(FCM)的赋权方法。筛选 8 项含逆向指标的核心风险因子, 采用双曲正切函数构建模糊认知图, 通过迭代收敛计算权重; 结合敏感性分析与皮尔逊相关性检验进行验证, 并将该方法应用于安徽省某矿区开展实地评价。结果表明: 污染物潜在生态危害指数权重最高(0.856), 裂隙率、巷道规模等权重均高于 0.770, 生态恢复措施为负权重(−0.749); 敏感性分析显示模型稳定性高; 皮尔逊相关系数均在 0.85 以上; 实地评价中, 引入 FCM 权重后低风险区减少 5.3%、中高风险区增加 6.5%, 成功识别出矿区混合井处被忽视的高风险区域, 评价结果更符合实际。

关键词:酸性矿山废水; 模糊认知图; 权重分配方法; 土壤生态风险

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20250010

中图分类号: X826

文献标志码: A

Ecological Risk Assessment of Soil Contaminated by Acidic Mine Wastewater Based on Fuzzy Cognitive Map Combination Weighting

Hong Mei^{1,2}, Wang Hanting^{1,2}, Zhang Chunpeng¹, Xu Wanzhou^{1,2}, Song Boyu³

1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China

2. National Local Joint Engineering Laboratory of Petrochemical Pollution Site Control and Remediation Technology, Jilin University, Changchun 130021, China

3. Technical Center for Solid Waste and Chemical Management, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

收稿日期: 2025-01-14

作者简介: 洪梅(1972—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事污染场地的控制与修复方面的研究, E-mail: hongmei@jlu.edu.cn

通信作者: 宋博宇(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事固体废物污染防治、环境风险评估方面的研究, E-mail: boyu_song@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3702200)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFC3702200)

Abstract: Acid mine drainage is one of the major factors causing soil environmental degradation in mining areas, and it is crucial to conduct ecological risk assessment on it. In this evaluation process, indicator weight allocation plays a key role. To address the problems of insufficient consideration of reverse indicators and high subjectivity in manual weighting in existing weighting methods, this study proposes a weighting method based on fuzzy cognitive map (FCM). Eight core risk factors (including reverse indicators) were screened, the hyperbolic tangent function was used to construct the fuzzy cognitive map, weights were calculated through iterative convergence, and sensitivity analysis and Pearson correlation test were integrated for validation, and finally the method is applied to a field evaluation in a mining area of Anhui Province. The results show that the potential ecological risk index of pollutants has the highest weight (0.856), the weights of fracture rate, roadway scale, etc. are all higher than 0.770, and the ecological restoration measure has a negative weight (-0.749). Sensitivity analysis shows that the model has high stability. The Pearson correlation coefficients are all above 0.85. In the field evaluation, after introducing the FCM-based weights, the low-risk area decreased by 5.3%, and the medium-high-risk area increased by 6.5%. A previously overlooked high-risk area at the mixed shaft in the mining area was successfully identified, and the evaluation results are more consistent with the actual situation.

Key words: acid mine drainage; fuzzy cognitive map; weighting allocation method; soil ecological risk

0 引言

随着工业化的快速发展,酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)已成为引发环境污染的关键因素,对土壤生态构成严重威胁^[1]。AMD源于硫化矿物氧化,具有pH值低、重金属浓度高的特性^[2-3]。这些特性导致土壤酸化^[4]、营养元素流失、重金属累积^[5-6]和生物活性下降^[7],进而影响生态系统功能^[8-9]。因此,开展针对AMD的土壤环境生态风险评价尤为关键。在生态风险评价中,确定各风险指标的权重是确保评估结果科学性和实用性的核心环节之一^[10]。

模糊认知图(fuzzy cognitive map, FCM)是一种融合了模糊逻辑与图论分析的模型^[11]。FCM具有能够识别出系统中特征指标间相互作用模式和因果关系的特性^[12],这得益于模糊逻辑与图论分析在处理复杂系统时的出色表现^[13]。FCM的技术核心为转换函数和迭代规则,通过解析专家对风险指标间相互影响的判断,实现生态风险评价。目前,FCM已在国内外生态风险评价领域广泛应用于复杂系统关键因素的分析与识别,并取得了一定进展。Vasslides等^[14]运用FCM对巴尼加特湾进行生态系统评价时,有效解决了传统方法难以揭示各因素间因果关系及交互机制的问题。Obiedat等^[15]通过FCM分配权重,识别出了约旦水资源短缺问题中的

若干关键因素。Chen等^[16]在对中国某村庄污水处理项目的风险进行评价时,使用FCM确定了需要优先控制与管理的风险因素。以上研究表明,FCM能深入解析复杂系统中各种因素的交互机制,揭示关键因素之间的因果关系及其对系统整体行为的影响模式。本研究借鉴了FCM能在复杂系统中分析识别关键因素这一优势,针对AMD土壤环境污染问题,提出了一种改进的权重分配方法,以更准确地反映各风险因子的重要性并提升评价结果的可靠性。

在生态风险评价中,数值大、对风险抑制作用强的指标称为逆向指标^[17],反之则为正向指标。尽管引入逆向指标可使传统生态风险评价更为全面,但正向指标与逆向指标间存在多样的协同和拮抗相互作用,显著增加了系统复杂性和数据处理难度。FCM能够识别出系统中特征指标间相互作用模式和因果关系的特性,适合处理这种复杂性高的系统,但其结果通常被FCM中的sigmoid转换函数局限于区间 $[0, 1]$ 内,难以有效表达各因素的作用方向。此外,由于专家意见可能存在主观性,虽然FCM能通过迭代调整提高客观性,但其客观性验证需要依赖其他方法^[18],增加了确定难度。因此,有必要提出一种改进的FCM方法,克服上述不足。

综上所述,本研究针对单一矿山AMD土壤生态风险评价,提出了一种基于FCM的赋权方法。

该方法首先采用双曲正切函数替换 sigmoid 作为 FCM 的转换函数,旨在适配逆向指标对作用方向和强度的表达需求,将结果范围控制在 $[-1,1]$ 内。接着,通过迭代与收敛优化,确保结果的客观性,并采用 Python 3.12 版本进行自主编程,构建了一种集成客观性与可靠性验证机制的 FCM 方法,在展现结果的同时进行可视化呈现,使处理过程更加透明且降低操作难度。最后,通过指标叠加对安徽省某矿山进行实例分析,验证该方法的可行性,以期 AMD 影响下土壤环境的生态风险评价提供一定参考。

1 研究方法

1.1 评价指标选取

基于 AMD 的生成和迁移机制,综合考虑 AMD 酸性和重金属成分带来的生态风险,结合专家咨询意见,选取降水量等 8 个指标(表 1)进行 AMD 土壤环境生态风险评价。其中,鉴于生态恢复措施在修复 AMD 污染方面具有时效快、效果显著的特点,将

其作为逆向指标纳入后续评价。

各指标对综合风险的影响程度不同,因此需要定量计算各指标权重,确保对生态系统影响更大的因素得到更多关注^[28-29]。在耦合权重开展综合计算前,需对获取的指标数据进行归一化处理,以确保所有指标统一至同一数值区间以反映其相对风险,公式为

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X_n 为归一化指标值; X 为获取的指标值; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为归一化映射区间最小值与最大值。

归一化过程的原始值映射区间范围基于文献、现场调研及国家或行业标准设定,通过将实际观测值映射到预定义的标准化区间内,使各指标之间可以进行比较和综合评价。详细划分情况见表 2。

1.2 模糊认知图赋权

FCM 的定义如图 1 所示。本研究聚焦于权重,因此将节点值初始化为 1,旨在确保历经多次迭代过程后,节点的初始状态不会对权重结果产生影响。

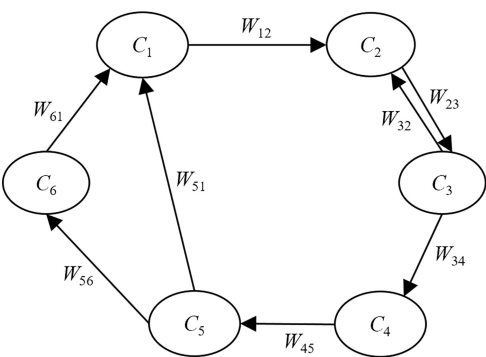
表 1 风险指标体系
Table 1 Risk indicators system

指标	指标含义	来源文献
降水量	直接影响 AMD 的生成	[19]
岩体产酸能力(AGP)	岩体包含硫化矿物成分,氧化后遇水产酸。高产酸能力的岩石会释放更多的酸	[20]
矿井涌水量	影响 AMD 生成和迁移模式	[21]
渗透系数	反映土壤或岩石介质允许 AMD 通过的能力。高渗透系数可能导致污染物更远距离的扩散	[22]
巷道规模	巷道规模以长度量化,决定矿井内的通风条件和氧化反应的表面积	[23]
裂隙率	促进氧气和水的渗透,并在迁移中作为优先通道,使 AMD 快速通过岩体,更容易从矿井内部迁移到周围的土壤	[24]
污染物潜在生态危害指数(RI)	用于评估污染物对生态环境的潜在危害程度。综合考虑污染物的种类、浓度和生物毒性	[25-26]
生态恢复措施	根据与国家标准的相符程度,评估现有生态恢复措施的有效性	[27]

表 2 归一化区间
Table 2 Normalized interval

指标	降水量/ (mm/a)	岩体产酸 能力	矿井涌水量/ (m ³ /d)	渗透系数/ (m/d)	巷道规模/ km	裂隙率/%	污染物潜在 生态危害指数	生态恢复 措施
归一化 映射区间	600~1 600	2~5	0~432	0~81	0.2~8.0	3~25	150~600	1~10

注:表中区间表示各指标原始数据的实际取值范围,用于归一化映射;归一化后各指标均为无量纲值,范围在 $[0,1]$ 内。



C_i . 模型中的概念节点; W_{ij} . 两个节点之间的关联权重。

图 1 模糊认知图基本结构

Fig.1 Basic structure of fuzzy cognitive map

FCM 作为一种有向图模型,其数学表示主要通过邻接矩阵描述节点之间的因果关系^[30]。在获取专家评分数据后,汇总得到群体认知图,记其邻接矩阵为 W_{ag} ,并据此构建 FCM。为确保模型稳定性及权重在迭代过程中维持在合理范围内,需引入转换函数。本研究采用双曲正切函数 $\tanh(x)$ 作为转换函数,将权重限定在 $[-1, 1]$ 区间,以准确表征正向与逆向指标的作用方向和强度。计算公式为

$$\tanh(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}。$$

(2)

本研究基于 Python 平台,通过用户交互的方式实现权重分配过程及其可视化展示,以降低因方法不透明可能引发的可靠性问题,提升结果的可信度。

1.3 迭代调整

为使 FCM 能够客观融合专家意见,需对 W_{ag} 进行迭代调整,以更新各节点的权重状态。当节点状态经连续多次迭代后变化幅度较小时,即可判定模型已收敛至稳态,此时输出节点状态值可作为权重结果。迭代公式为

$$\begin{cases} A_i(t+1)=f\left(A_i(t)+\sum_{j=1}^nW_{ji}A_j(t)\right); \\ f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}。 \end{cases}$$

(3)

式中: i 为第 i 个节点; j 为邻接矩阵中对节点 i 有输入影响的节点; $A_i(t+1)$ 为第 $t+1$ 次迭代时节点 i 的状态; n 为网络内所有节点总数; W_{ji} 为从节点 j 指向节点 i 的权重; $f(x)$ 为节点的状态激活函数。

1.4 权重结果验证

1.4.1 敏感性分析

一般情况下,如果 FCM 赋权方法对输入参数的变化非常敏感,意味着其结果易受个别专家意见的强烈影响,从而引入主观偏见,削弱权重结果客观性^[31]。

本研究基于 FCM 迭代调整中的稳态推断逻辑,通过控制特定指标变动,模拟当某一关键指标发生变化时整个系统的动态演化过程,并绘制图表进行可视化展示。

1.4.2 皮尔逊相关性分析

皮尔逊相关性分析是一种衡量变量之间线性相关程度的方法,其相关系数取值范围为 $[-1, 1]$ 。绝对值越接近 1,表示变量之间的相关性越强;正负号则分别表示正相关与负相关^[32]。

本研究调用 Python 开源的 Scipy 模块进行皮尔逊相关性分析,通过计算原始权重集和测试权重集的皮尔逊相关系数,定量评估数据生成方法的可靠性。

2 研究区域及数据来源

本研究以安徽省某矿区为研究对象。利用 ArcGIS 进行流域分析,以累积流量阈值 300 像元所确定的分水岭为界,结合矿区企业授权范围,划定小尺度研究区域,如图 2 所示。

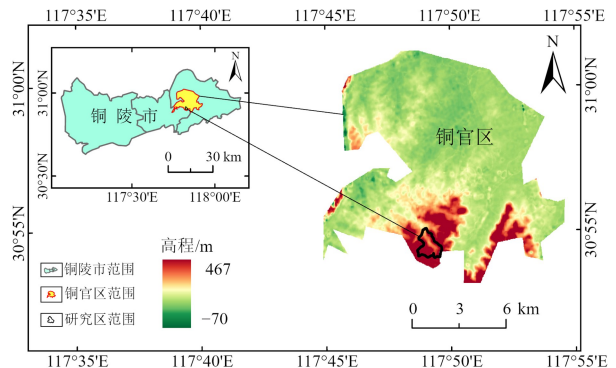


图 2 研究区域地理位置图

Fig.2 Location of the study area

研究区域的 DEM 高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台;降水量数据来自国家青藏高原科学数据中心;其他数据通过现场调研及国家重点研发计划专项支持获取,数据处理结果如图 3 所示。

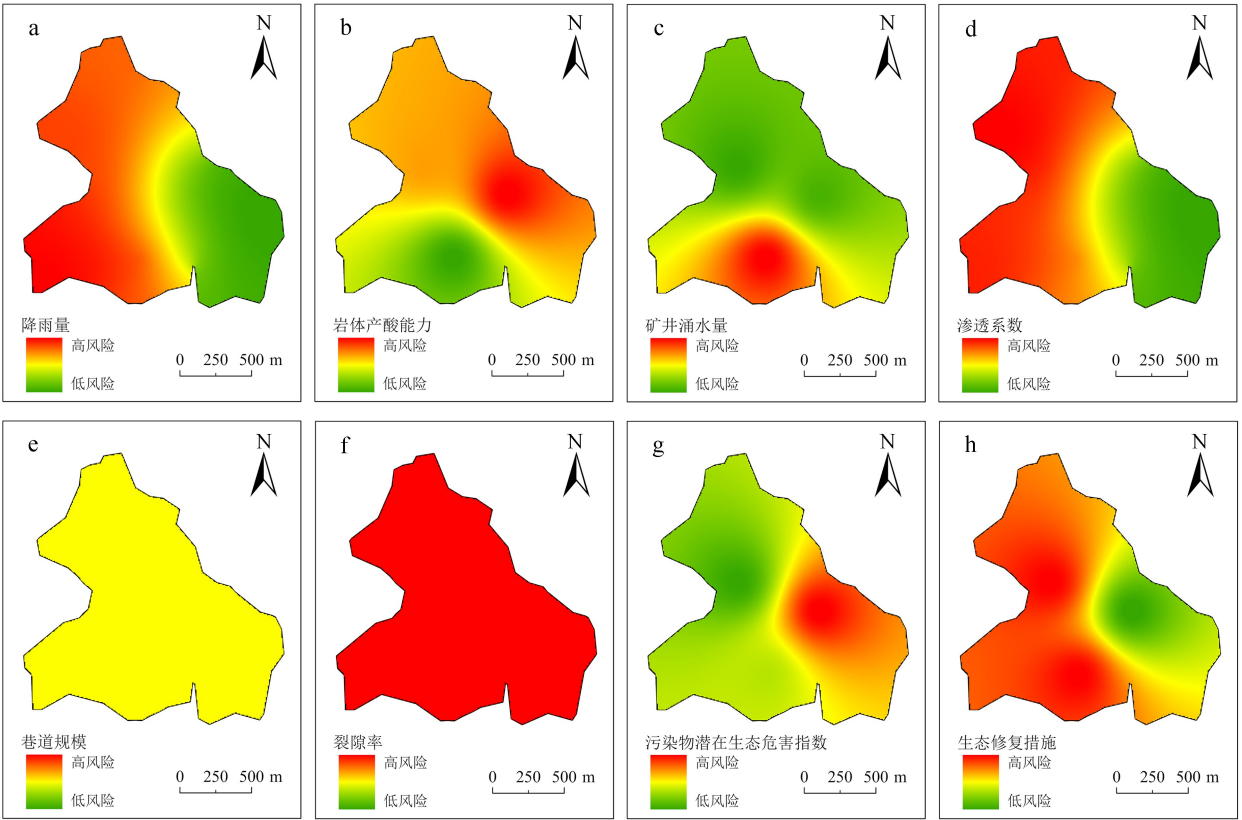


图 3 数据处理结果

Fig.3 Data processing results

3 结果与讨论

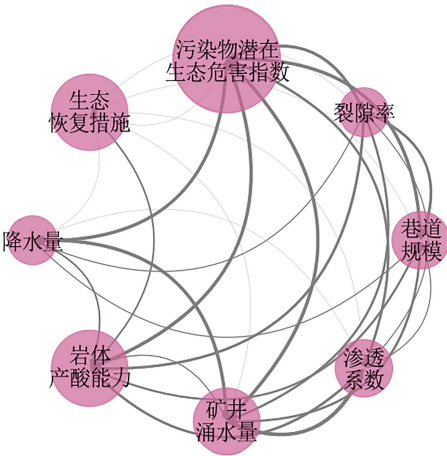
3.1 群体认知图合成

本研究邀请 8 位环境工程领域的专家,对设定的土壤环境生态风险指标间的相互作用进行了细致的量化评估。专家们针对每一对指标的相互影响程度进行评分,涵盖了从显著正向影响到显著逆向影响的范围。汇总 8 位专家的评分结果,将个人认知图合成一张群体认知图(图 4),以更直观表征各风险指标的重要性,并量化求取这些指标之间的相互影响权重系数。

表 3 展现了 8 项指标之间的相互作用关系,其中,正值表示正向影响,负值表示逆向影响,数值的绝对值大小反映了影响程度的强弱。

污染物潜在生态危害是最直接的风险影响指标,基于上述邻接矩阵,可以初步得出矿井涌水量、降水量、巷道规模和岩体产酸能力是对污染物潜在生态危害影响最大的四个因素。其中,矿井涌水量和岩体产酸能力不仅对污染物产生和扩散有显著影

响,还受到其他多种因素的影响。此外,生态修复措施在控制这些负面因素方面具有重要作用,尤其是在减少岩体产酸能力和缓解污染物扩散方面。



图中节点的大小表示指标受其他因素影响的数量,边的粗细表示影响力的不同。

图 4 群体认知图模型

Fig.4 Group cognitive map model

表 3 群体 FCM 邻接矩阵

Table 3 Adjacency matrix of group FCM

	降水量	岩体产酸能力	矿井涌水量	渗透系数	巷道规模	裂隙率	污染物潜在生态危害指数	生态恢复措施
降水量	1.00	0.38	0.72	−0.10	0.30	0.30	0.70	−0.70
岩体产酸能力	0.35	1.00	0.10	0.62	0.50	0.63	0.75	−0.80
矿井涌水量	0.78	0.30	1.00	0.90	0.59	0.59	0.75	−0.38
渗透系数	−0.10	0.48	0.70	1.00	0.28	0.28	0.50	−0.27
巷道规模	0	0.43	0.34	0.05	1.00	0.59	0.75	−0.40
裂隙率	0	0.55	0.31	0.05	0.61	1.00	0.68	−0.38
污染物潜在生态危害	0.77	0.76	0.77	0.60	0.73	0.68	1.00	−0.42
生态恢复措施	−0.73	0.45	−0.40	−0.38	−0.45	−0.41	−0.52	1.00

3.2 指标赋权

3.2.1 赋权过程中的迭代调节

在选用 $\tanh(x)$ 作为转换函数后,通过模糊算法进行迭代计算,动态调节专家意见的评分,使系统逐步收敛至稳态。这一过程能够响应并融合不同专家的意见,确保最终结果的客观性和可靠性。具体的迭代调节过程如图 5 所示。其中,降水量、岩体产酸能力及生态恢复措施的权重经历了显著调整,其余指标则相对稳定。总体来看,所有指标在迭代初期均经过适度调整,随后迅速趋于稳态,体现了 FCM 算法的自适应性。传统层次分析法等方法依赖专家一次性构建判断矩阵,其权重结果易受主观判断偏差影响,且缺乏调整能力。相比之下,本研究

提出的方法能够融合多专家反馈,并根据专家意见进行迭代调整,从而有效提高了权重的客观性。

3.2.2 指标赋权结果

对群体认知图的 FCM 邻接矩阵进行迭代计算,得到每个指标的相应权重,结果如表 4 所示。

由表 4 可知:污染物潜在生态危害指数权重 (0.856 3) 最高。这表明重金属污染是研究区影响最为突出的风险因子,这种污染分布特征与当地有色金属冶炼产业布局密切相关:研究区域内矿业占地面积达 52%,且大量矿点坐落在居民区 500 m 范围内,重金属污染物持续富集并形成累积效应。在后续治理时,应将重金属的种类及其浓度管控视为首要关注点。

表 4 权重结果

Table 4 Weight results

指标名称	权重值
降水量	0.661 0
岩体产酸能力	0.755 8
矿井涌水量	0.746 3
渗透系数	0.653 2
巷道规模	0.770 1
裂隙率	0.771 4
污染物潜在生态危害指数	0.856 3
生态恢复措施	−0.749 2

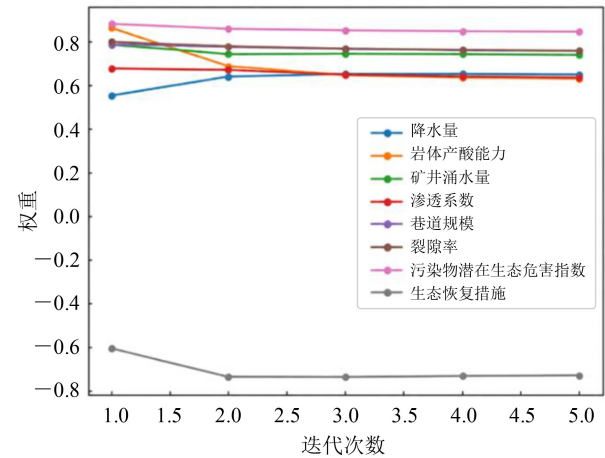


图 5 迭代过程

Fig.5 Iterative process

裂隙率 (0.771 4)、巷道规模 (0.770 1)、岩体产酸能力 (0.755 8) 及矿井涌水量 (0.746 3) 的权重均较为显著,表明矿山开采活动的直接关联指标——

包括岩体裂隙发育程度、巷道开采规模、岩石酸化能力 & 矿井开采产生的涌水量——对土壤生态风险具有重大影响。这些因素可加剧土壤酸化,削弱生态系统平衡,并促进污染物的释放与扩散。降水量 (0.661 0) 和渗透系数 (0.653 2) 的权重虽然较低,但仍超过 0.5,在一定程度上决定了生态风险的空间分布特征,表明二者是风险动态变化中不可忽视的因素,应被纳入考量。

生态恢复措施的权重 (−0.749 2) 为负值,表示该指标在这里被用作风险减缓因素,展示了通过积极干预可降低的风险程度。因此,其作用实际上是正面的,即:生态恢复措施的有效措施能降低土壤环境的生态风险,从而保证最终输出综合风险处于较低水平。

从权重结果可以看出,本研究提出的方法相较于传统层次分析法等采用单向指标的体系方法,融入了对逆向指标的处理,在权重生成阶段即完成指标方向特性的体现,避免后期模型解释的复杂性,增强了评估体系的全面性和实用性。

3.3 权重敏感性分析

本研究通过单独调整降水量的权重,并利用 W_{ng} 推断计算其他指标的权重,开展了详细的敏感性分析。图 6 展示了随着降水量指标权重从 0 逐渐增至 1.0 的过程中,其他指标权重的变化情况。

由图 6 可见,随着降水量权重的逐步增加,生态恢复措施的权重呈递减趋势。但由于生态恢复措施被定义为逆向指标,其权重的实际意义随降水量权重的增加而提升。与此同时,其他潜在风险指标

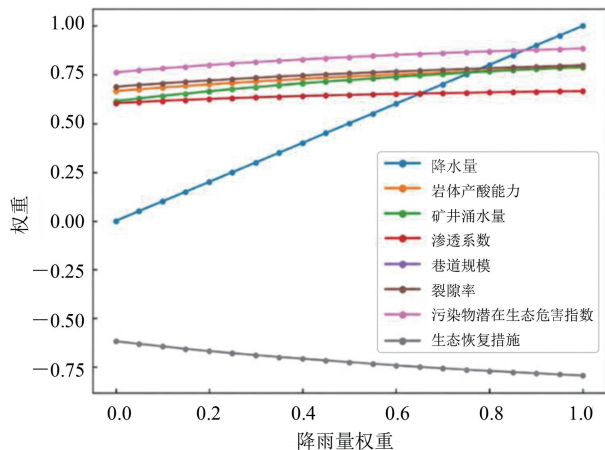


图 6 降水量权重变化下各指标权重的响应
Fig.6 Response of other indicator weights to changes in rainfall weight

(包括岩体产酸能力、矿井涌水量、渗透系数、巷道规模、裂隙率及污染物潜在生态危害指数)的权重上升幅度微弱。这表明,本方法通过专家评分的指标间相互影响评分矩阵,确保了初始权重逻辑上的协调性;同时,FCM 的模糊推理过程将专家经验转化为数学约束,使权重调整既体现专业认知,又避免主观臆断,验证了方法的合理性。

此外,即便某一权重变化幅度较大,其他权重调整的幅度仍较小,模型依然能够保持较高的稳定性,表明该方法具有较低的敏感性。这意味着 FCM 赋权方法能够避免单一变量对最终结果的过度影响。通过这种方式,该方法有效吸收并平衡了专家评分结果,增强了评估结果的客观性和可靠性。

3.4 权重皮尔逊相关性分析

为了进一步验证权重分配策略的稳定性和可靠性,本研究对权重结果进行了皮尔逊相关性分析。图 7 展示了各基准指标原始权重集与测试权重集间的皮尔逊相关系数变化情况。

从图 7 可以看出,各基准指标的权重均在 0~1.0 范围内逐步调整(生态恢复措施变动条件为 −1.0~0)。在连续变化过程中,原始权重集与测试权重集之间的皮尔逊相关系数始终保持在 0.85 以上,部分情形下甚至达到 1.0,表明两者间呈极强的正相关性。这说明,即便因专家轻微误判导致指标权重发生小幅度变化,对整体评估结果的影响也较

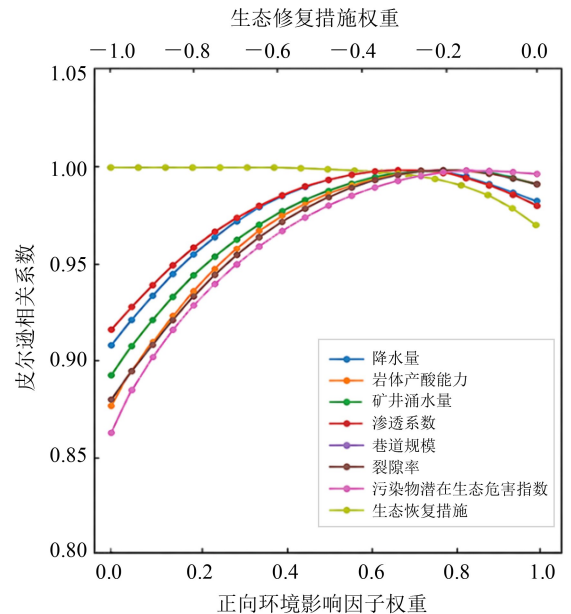


图 7 各指标皮尔逊相关系数曲线
Fig.7 Pearson correlation coefficient curve of each indicator

为有限,从而证明所采用的权重分配策略具有高度的稳定性和可靠性。

3.5 实例应用及结果分析

采用选定指标,结合研究区域,运用所提出的赋权方法开展实际评价。基于 ArcGIS 平台进行叠加分析,并采用自然断点法分级,得到最终评价结果(图 8)。图 8 表明,在仅考虑正向与逆向指标的前提下,未分配权重与使用 FCM 权重两种方案对研究区域的评价结果存在显著差异。

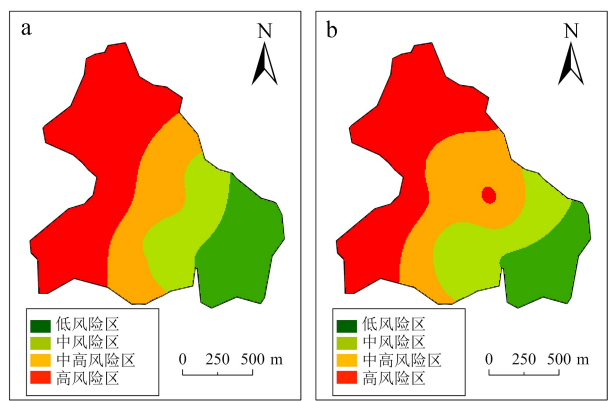


图 8 未分配权重(a)与使用 FCM 权重(b)的评价结果对比
Fig.8 Comparison of evaluation results between unassigned weights (a) and FCM weights (b)

在未分配权重的情况下(图 8a):低风险区广泛分布于东南部,占总面积的 19.0%;中风险区主要集中在中部略偏东南,面积占比为 15.9%;中高风险区沿东北至西南的方向贯穿整个中部地区,面积占比为 20.8%;西部为高风险区的主体分布区,其面积占比达 44.3%。引入 FCM 权重后(图 8b):低风险区的范围在东南部有所收缩,面积占比降至 13.7%,比未分配权重的情况下减少了 5.3%;同时,中风险区在东南部有所扩展,在中部则有所收缩,其面积占比增至 18.7%,较之前增加了 2.8%;中高风险区呈蝌蚪状分布,其“头部”位于中部偏东北,“尾部”向南延伸,该区占总面积的 27.3%,增加了 6.5%;高风险区的空间格局基本保持不变,仍主要集中在西部,面积占比为 40.3%。

根据现场实际情况,使用 FCM 权重后的评价结果能够识别出中心部位的高风险区域,其位置与矿区混合井所在位置一致;而未分配权重的评价结果未能适当调节逆向与正向指标的权重,导致该关键高风险区域未被准确识别。同时,未分配权重时

混合井西北部存在部分被误判为高风险的区域(图 8a),但考虑到该区域实际存在净化设施,其风险水平在使用 FCM 权重后被合理下调至中高风险(图 8b)。此外,在东南方向,原本在图 8a 中评定为中风险和低风险的区域,受混合井的影响,在图 8b 中均有部分区域的风险等级有所上调。

通过运用 FCM 权重评估,部分原高风险区域被重新评定为中高风险,并由此识别出中高风险区中心一处之前被忽略的高风险区域。这证明了自我调节机制的有效性及其逆向指标权重分配的合理性,确保了评估结果的客观性和可靠性。

4 结论

1)本研究针对 AMD 条件下的土壤生态风险评价,提出了一种基于 FCM 的赋权方法。与传统的主观赋权法相比,此方法考虑逆向指标,使用双曲正切函数明确指标间的影响方向和强度,同时结合专家经验与模糊算法迭代优化,有效降低了人为赋权的主观性。通过敏感性分析和皮尔逊相关性检验验证了权重结果的客观性和可靠性。

2)研究最终获得的权重结果显示,污染物潜在生态危害指数权重(0.856 3)最高,反映了重金属污染在 AMD 背景下的关键作用。裂隙率(0.771 4)、巷道规模(0.770 1)、岩体产酸能力(0.755 8)及矿井涌水量(0.746 3)也显示出较高的权重,表明了矿山开采活动对土壤生态系统的直接影响。降水量(0.661 0)和渗透系数(0.653 2)权重较低。生态恢复措施作为逆向指标,可以有效降低土壤环境的生态风险,其权重为 -0.749 2。

3)实例应用表明,引入 FCM 权重后,低风险区面积缩减,中风险区扩展,中高风险区空间形态发生了变化,并由此识别出之前被忽视的高风险区域,验证了调节机制的有效性和逆向指标权重分配的合理性,体现了该方法的有效性和实用价值。未来可尝试在更广泛的区域或不同类型的污染场地进行全面测试。

参考文献(References):

[1] Patel K F, Fansler S J, Campbell T P, et al. Soil Texture and Environmental Conditions Influence the Biogeochemical Responses of Soils to Drought and Flooding[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 127.

- [2] 曹星星, 吴攀, 周少奇, 等. 酸性矿山排水影响的水库沉积物微量元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1112–1126.
Cao Xingxing, Wu Pan, Zhou Shaoqi, et al. Trace Elements Geochemical Characteristics of Reservoir Sediments Affected by Acid Mine Drainage[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1112–1126.
- [3] 洪梅, 赵明明, 魏涛, 等. 基于 SWAT 模型的滄阳河流域断流河道复流研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 253–263.
Hong Mei, Zhao Mingming, Wei Tao, et al. Study on Water Restoration in the Dried-up River of the Fuyang River Basin Based on the SWAT Model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 253–263.
- [4] Pan Y, Fu Y, Liu S, et al. Spatial and Temporal Variations of Metal Fractions in Paddy Soil Flooding with Acid Mine Drainage[J]. Environmental Research, 2022, 212: 113241.
- [5] 谭晓辉, 黄灏, 胡荣光, 等. 东莞市水乡地区农业土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(2): 587–600.
Tan Xiaohui, Huang Hao, Hu Rongguang, et al. Pollution Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Pollution in Agricultural Soils in Water Town Area of Dongguan City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(2): 587–600.
- [6] Xu R, Zhang M, Lin H, et al. Response of Soil Protozoa to Acid Mine Drainage in a Contaminated Terrace[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126790.
- [7] Anekwe I M, Isa Y M. Wastewater and Bioventing Treatment Systems for Acid Mine Drainage-Contaminated Soil [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2021, 30(5): 518–531.
- [8] 冉泽宇, 贾永锋, 姜永海, 等. 地下水污染源解析方法研究进展[J]. 地质通报, 2024, 43(1): 153–162.
Ran Zeyu, Jia Yongfeng, Jiang Yonghai, et al. Research Progress of Groundwater Pollution Source Analysis Methods[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(1): 153–162.
- [9] Wu Q, Yang L, Mi J. Detecting the Effects of Opencast Mining on Ecosystem Services Value in Arid and Semi-Arid Areas Based on Time-Series Remote Sensing Images and Google Earth Engine (GEE)[J]. BMC Ecology and Evolution, 2024, 24(1): 28.
- [10] Liu R, Liu H C, Shi H, et al. Occupational Health and Safety Risk Assessment: A Systematic Literature Review of Models, Methods, and Applications[J]. Safety Science, 2023, 160: 106050.
- [11] Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps [J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1986, 24(1): 65–75.
- [12] Papageorgiou E I, Salmeron J L. A Review of Fuzzy Cognitive Maps Research During the Last Decade[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(1): 66–79.
- [13] 王常明, 田书文, 王翊虹, 等. 泥石流危险性评价: 模糊 c 均值聚类-支持向量机法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1168–1175.
Wang Changming, Tian Shuwen, Wang Yihong, et al. Risk Assessment of Debris Flow: A Method of SVM Based on FCM [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1168–1175.
- [14] Vassilides J M, Jensen O P. Fuzzy Cognitive Mapping in Support of Integrated Ecosystem Assessments: Developing a Shared Conceptual Model Among Stakeholders [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166: 348–356.
- [15] Obiedat M, Al-Yousef A, Khasawneh A, et al. Using Fuzzy c-Means for Weighting Different Fuzzy Cognitive Maps [J/OL]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2020, 11(5). [2025-01-12]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-Fuzzy-c-Means-for-Weighting-Different-Fuzzy-Obiedat-Al-Yousef/ba859-b3e71b441ab11ae1c-1c1a4dd9b082a290ef>.
- [16] Chen H, Wang J, Feng Z, et al. Research on the Risk Evaluation of Urban Wastewater Treatment Projects Based on an Improved Fuzzy Cognitive Map [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104796.
- [17] Bruggen A H C, Semenov A M. In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 13–24.
- [18] Bakhtavar E, Valipour M, Yousefi S, et al. Fuzzy Cognitive Maps in Systems Risk Analysis: A Comprehensive Review[J]. Complex & Intelligent Systems, 2021, 7(2): 621–637.
- [19] Natarajan R, Subramanian J, Papageorgiou E I. Hybrid Learning of Fuzzy Cognitive Maps for

- Sugarcane Yield Classification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 147–157.
- [20] Oh C, Ji S, Yim G, et al. Evaluation of Net Acid Generation pH as a Single Indicator for Acid Forming Potential of Rocks Using Geochemical Properties[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(4): 165.
- [21] Lesley B, Daniel H, Paul Y. Iron and Manganese Removal in Wetland Treatment Systems: Rates, Processes and Implications for Management[J]. Science of the Total Environment, 2008, 394(1): 1–8.
- [22] Koroša A, Mali N. Control of Organic Contaminants in Groundwater by Passive Sampling and Multivariate Statistical Analysis[J]. J Environ Manage, 2022, 318: 115440.
- [23] Ighalo J O, Kurniawan S B, Iwuzor K O, et al. A Review of Treatment Technologies for the Mitigation of the Toxic Environmental Effects of Acid Mine Drainage (AMD) [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 157: 37–58.
- [24] Zhang P, Zhong Q, Li M, et al. Wilderness Mapping in Northeast China Based on Deep Learning[C]// 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE, 2022: 2880–2883.
- [25] Hakanson L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975–1001.
- [26] Dou Y, Yu X, Liu L, et al. Effects of Hydrological Connectivity Project on Heavy Metals in Wuhan Urban Lakes on the Time Scale[J]. Science of the Total Environment, 2022, 853: 158654.
- [27] 酸性矿井水处理与回用技术导则: GB/T 37764—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Technical Guidelines for the Treatment and Reuse of Acid Mine Water: GB/T 37764—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [28] 徐容, 杨金中, 邢宇, 等. 基于卫星遥感数据的矿山生态修复评价体系及其修复建议: 以云南省三江成矿带为例[J]. 地质通报, 2025, 44(7): 1313–1323.
- Xu Rong, Yang Jinzhong, Xing Yu, et al. Mine Ecological Restoration Assessment and Restoration Suggestions Based on Satellite Remote Sensing Data: A Case Study of the Sanjiang Metallogenic Belt in Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(7): 1313–1323.
- [29] 张静, 代雅建, 崔健, 等. 沈阳市城区地下水污染风险评估及其对生态环境的影响[J]. 地质通报, 2025, 44(8): 1462–1471.
- Zhang Jing, Dai Yajian, Cui Jian, et al. Risk Assessment of Groundwater Pollution and Its Impact on Ecological Environment in Urban Area of Shenyang[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(8): 1462–1471.
- [30] Salmeron J L, Arévalo I. A Privacy-Preserving, Distributed and Cooperative FCM-Based Learning Approach for Cancer Research[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 477–487.
- [31] Sorgog K, Kamo M. Quantifying the Precision of Ecological Risk: Conventional Assessment Factor Method vs Species Sensitivity Distribution Method [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 183: 109494.
- [32] Huang R, Hanif M F, Siddiqui M K, et al. On Analysis of Entropy Measure via Logarithmic Regression Model and Pearson Correlation for Tri-s-Triazine[J]. Computational Materials Science, 2024, 240: 112994.