深海水力集矿关键影响因素及方案优选*

孙国帅[1],马琦[1],冯娇[2]

(1.新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2.新疆财经大学 信息管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要:为保障资源高效采集的同时,最大限度地降低对环境的影响和提高经济的可行性,并推动深海水力集矿技术可持续发展,构建了一种混合评价体系,用于关键影响因素的识别和方案优选。首先,基于扎根理论,从技术、环境、经济3个维度构建了环境扰动、采集效率、能耗特性、结构可靠性与采集经济性5个一级指标及其对应20个二级指标的综合评价体系;其次,结合Fuzzy-DEMATEL法和CRITIC法分别获取主、客观权重并进行综合赋权;最后,基于PFHWD-TOPSIS的毕达哥拉斯模糊多属性决策方法对备选方案进行排序,实现科学优选。结果表明:所构建的混合评价体系能够有效支持因素分析和方案决策,其中环境扰动与经济稳定性是深海水力集矿方案决策中的关键约束因素;4种深海水力集矿方案中,附壁射流式方案(C_2)综合性能最优,在环境扰动、能耗特性和经济性方面均表现突出。研究结果可以为深海水力集矿方案优选提供理论参考,助力该技术可持续化发展。

关键词:深海环境;水力集矿;影响因素;方案优选

中图分类号:TD807 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0010-11

Key Influencing Factors and Scheme Optimization for Deep-Sea Hydraulic Mining

Sun Guoshuai[1], *Ma Qi*[1], *Feng Jiao*[2]

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China;
2.School of Information Management, Xinjiang University of Finance & Economics, Urumqi, Xinjiang 830012, China)

Abstract: To ensure efficient resource collection while minimizing environmental impact, enhancing economic feasibility, and promoting the sustainable development of deep-sea hydraulic mining technology, a hybrid evaluation system was constructed for identifying key influencing factors and optimizing solution selection. Firstly, based on grounded theory, a comprehensive evaluation system was constructed from three dimensions of technology, environment and economy, which includes 5 primary indicators (environmental disturbance, collection efficiency, energy consumption characteristics, structural reliability and collection economy) and their corresponding 20 secondary indicators. Next, the Fuzzy-DEMATEL method and the CRITIC method were applied to determine subjective and objective weights, respectively, followed by comprehensive weighting. Finally, the Pythagorean fuzzy multi-attribute decision-making method based on PFHWD-TOPSIS was used to sort the alternatives and achieve scientific optimization. The results show that the constructed hybrid evaluation system can effectively support factor analysis and scheme decision-making, among which environmental disturbance and economic stability are the key constraint factors in the decision-making of deep-sea hydraulic mining schemes. In the four deep-sea hydraulic mining schemes, the wall-attached jet scheme (C_2) has the optimal comprehensive performance, and performs prominently in terms of environmental disturbance, energy consumption characteristics and economy. The research results can provide a theoretical reference for the optimization of deep-sea hydraulic mining schemes and help the sustainable development of the technology.

Key words: Deep-sea environment, Hydraulic mining, Influencing factor, Scheme optimization

0 引言

作为“三深”找矿突破战略行动的重要组成部分,深海蕴藏着丰富的多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等矿产资源,这些资源富含镍、钴、锰、铜等战略金属,对支撑我国清洁能源转型、高端装备制造以及

* **收稿日期**:2025-08-05

基金项目:自治区社科联新时代党的治疆方略理论与实践研究课题(2024ZJFLY36,2025ZJFLTD10);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2024D01C18);新疆财经大学校级科研基金项目(2024XGC009)

作者简介:孙国帅(1979—),男,辽宁锦州人,博士,教授,主要从事绿色矿业与可持续发展方面的教学与研究工作。E-mail:guoshuaisun@xju.edu.cn

海洋经济发展具有不可替代的战略价值[1]。党的二十大报告明确指出:“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”[2]。随着陆地矿产资源的日益枯竭和深海采矿技术的不断进步,开发海洋资源已成为世界各国应对陆地资源短缺和生态环境恶化的重要途径[3]。各国正致力于在深海矿产开发、核心装备制造、矿产资源利用等方面取得国际领先地位[4]。然而,深海采矿也面临着采矿技术复杂、成本高昂、深海环境恶劣、对设备要求高等挑战,并可能对周围生态系统和环境产生破坏。因此,如何在保障资源高效采集的同时,最大限度地降低环境影响并确保经济可行性,成为当前深海采矿技术发展亟须解决的难题之一。

当前,深海水力集矿技术的研究主要集中在采矿工艺优化、环境影响评估及采矿设备改进研发等方面。刘杰等[5]聚焦于水力集矿头流场结构,探究了喷嘴射流速度对采集效率的影响,提出了优化喷射流速的建议。陈旭光等[6]和李征启等[7]深入研究探讨了康达效应式水力集矿的冲蚀特性,明确了关键射流参数对破土水力强度的影响规律。李雨瑶等[8]通过模拟三种主流的深海水力集矿方法,揭示了不同集矿方式在采集效率与环境扰动方面的差异。丁聪等[9]通过仿生设计和试验为深海集矿机关键部件履齿的改进提供了理论依据和技术支持;薛景天等[10]则关注抽吸式集矿过程,提出了优化集矿管运动参数以平衡采集效率与环境扰动的方案。此外,张栢源等[11]和李俊等[12]分别从集矿装置几何参数优化和小型水力式集矿机构设计的角度出发,为提高采集效率和降低环境影响提供了技术路径。总体来看,现有研究主要集中在集矿系统结构优化、流体力学特性分析、环境扰动控制及装备可靠性评估等方面,研究方法多采用数值模拟、试验验证与系统建模相结合的综合研究路径,揭示了环境与采矿之间的相互作用机理,并探索了深海采矿活动对海底环境的影响规律,为深海采矿技术的发展提供了重要的理论支持,也推动了集矿设备的优化和采矿效率的提升。然而,目前仍缺乏从系统层面对技术、环境、经济等多维因素进行综合评估的框架及兼顾科学性与可操作性的集成决策模型,且鲜有学者对深海集矿影响因素开展研究。同时,传统单一的主观或客观赋权方法难以适应深海采矿数据稀疏、指标间强耦合性的复杂特征,导致权重分配的科学性受限。此外,运用传统的多属性决策方法处理深海采矿中广泛存在的模糊不确定性信息时,往往难以有效量化专家的主观评价和数据波动,影响方案比选结果的科学性和可靠性。因此,构建一套能够系统性识别和量化深海水力集矿关键影响因素,并科学合理地进行方案优选的研究框架非常重要。

鉴于此,本文参考扎根理论,从技术、环境、经济等多维度识别关键影响因素,构建综合评价体系,并运用 Fuzzy-DEMATEL 与 CRITIC 的博弈论组合赋权模型,计算各个指标权重,再基于毕达哥拉斯模糊混合加权距离(PFHWD)测度的 TOPSIS 多属性决策方法(PFHWD-TOPSIS)计算不同方案的贴近度,并对方案进行排序与择优,旨在为选择深海水力集矿方法提供理论依据和可靠性评价借鉴。

1 深海水力集矿影响因素识别

深海水力集矿作为深海资源开发的关键技术,其影响因素涉及技术、环境、经济等多个维度且各因素间相互交织、关系复杂。扎根理论具有数据驱动、自下而上构建理论的特点[13],有助于系统识别和梳理深海水力集矿过程中的各类影响因素,有效避免先验假设带来的局限。为此,本研究参考扎根理论构建指标体系,并采用 NVivo 12.0 软件对原始材料进行编码。

首先,通过知网、万方、Web of Science 等数据系统检索 2018 年 1 月至 2025 年 8 月的核心期刊文献,分别以“深海采矿”“水力集矿”“集矿技术”为中文关键词进行检索,获取核心层次期刊文献 156 篇;以“Deep-sea Mining”为英文关键词进行搜索,获取英文期刊文献共 276 篇,进一步筛选与深海采矿技术相关的 SCI 英文期刊文献 28 篇。围绕深海水力集矿影响因素识别这一核心问题,采用主题聚类法从技术参数、环境响应、经济成本三个维度提取并汇总整理关键信息。其次,为补充文献未覆盖的实践经验性信息,设计包含 20 个问题的半结构化访谈提纲,面向 20 位来自矿业、经济、环境等相关领域的专家学者开展访谈,内容聚焦集矿过程中技术、环境、经济等层面的关键影响要素。最后,借鉴扎根理论的核心思路,将文献资料和访谈结果进行系统编码分析。在开放式编码阶段,对原始数据逐字逐句分析,将数据拆解为最小意义单元,通过归纳赋予概念标签和持续比较法合并同义概念,最终形成涵盖环境、技术、经济等维度的初始概念池。在主轴编码阶段,将相同类型的影响因素归纳整合,形成“采集效率”“能耗特性”“结构可靠性”“经济性”等主范畴,并构建初步范畴网络。在选择性编码阶段,围绕“深海水力集矿影响因素如何系统解释集矿效能”这一核心问题,提炼核心理论,验证范畴体系的逻辑一致性与解释力,最终从环境扰动、采集效率、能耗特性、结构可靠性、采集经济性五个维度系统构建深海水力

集矿研究框架。

综上,通过上述过程分析了各个因素之间的复杂关系,最终确立了深海水力集矿影响因素评价指标体系,如图 1 所示。

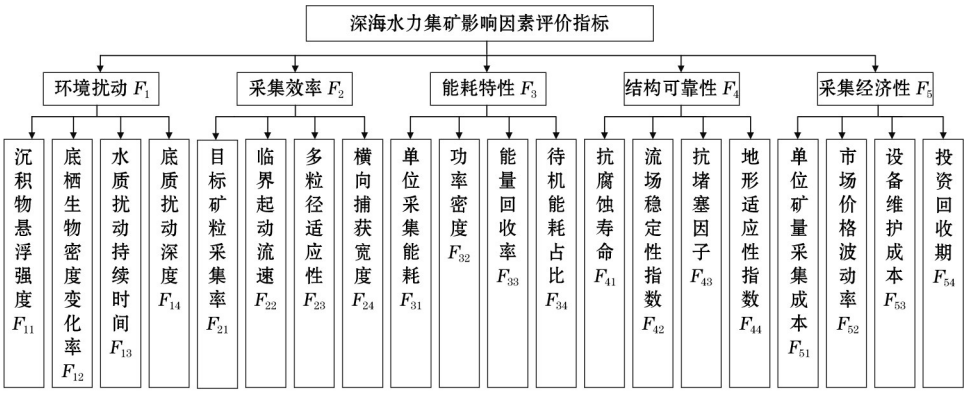


图 1 深海水力集矿影响因素评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of influencing factors of deep-sea hydraulic mining

2 关键影响因素评价及方案优选方法

在深海水力集矿研究中采用主客观组合赋权,而非单一赋权方法,主要源于该系统涉及环境扰动、采集效率、能耗特性等多维度复杂要素,且深海环境数据获取困难、指标间耦合性强。传统单一赋权法存在明显局限,CRITIC 法等纯客观赋权方法依赖完整数据体系,在深海场景下常因传感器故障、采样成本高等原因导致数据缺失,进而引发权重偏移;而决策实验室分析法(DEMATEL)等纯主观赋权方法则受制于专家经验的局限性,难以准确量化类似于沉积物悬浮强度与底栖生物密度动态耦合的非线性关系。

主客观组合赋权通过博弈论优化框架,将 Fuzzy-DEMATEL 法提取的专家知识与 CRITIC 法量化的实测数据特征进行协同整合,既克服了单一方法的片面性,又提升了权重体系对深海复杂系统的解释力,尤其适用于数据稀疏场景下的指标重要性评估。在评价方法方面,本研究在传统 TOPSIS 方法上引入毕达哥拉斯模糊理论,旨在处理深海采矿中广泛存在的模糊不确定性信息。例如,专家对"流场稳定性"的语义评价,以及复杂地形下"多粒径适应性"所呈现的区间性数据特征,均含有较高不确定性。毕达哥拉斯模糊集通过放宽隶属度与非隶属度的约束条件,能够更灵活地刻画决策信息中的犹豫度;进一步结合毕达哥拉斯模糊混合加权距离(PFHWD)测度方案与理想解之间的距离,能够在排序过程中综合考虑各指标的重要性,从而依托 TOPSIS 的理想解排序机制,使方案比选更具有合理性和科学性。

综上,基于博弈论的主客观组合赋权与 PFHWD-TOPSIS 方法的协同运用,系统性地解决了深海水力集矿中多维指标权重的分配合理性与复杂环境下方案优选不确定性的双重挑战,为深海矿产资源开发的技术选型提供了兼具理论严谨性与工程适用性的方法论支撑。结合前述的扎根理论,深海水力集矿关键影响因素及方案优选的具体实施步骤如图 2 所示。

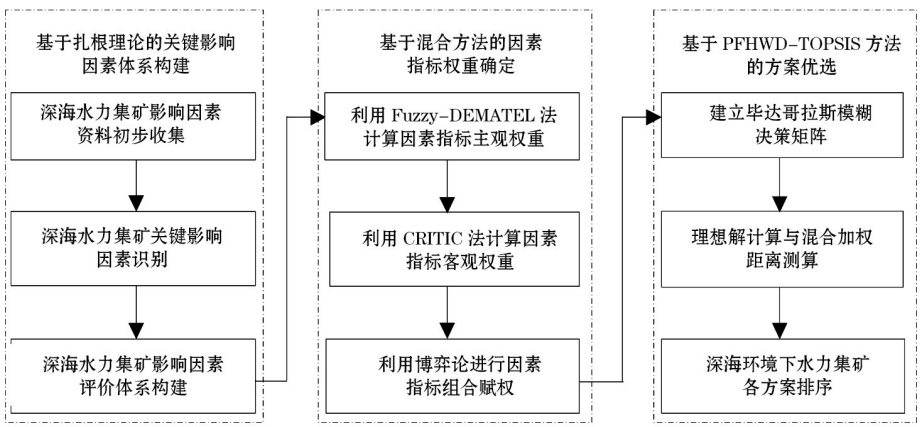


图 2 深海水力集矿关键影响因素及方案优选具体实施步骤

Fig.2 Key influencing factors of deep-sea hydraulic mining and specific implementation steps of scheme optimization

2.1 博弈论组合赋权

基于博弈论的组合赋权法,其核心目标是寻找兼顾多方因素的最优解权重分配方案,从而有效平衡主观赋权与客观赋权各自的局限性[14]。首先,邀请不同领域的专家,参照模糊语义表对二级指标间的关系进行评判打分,运用 Fuzzy-DEMATEL 法计算二级指标的主观权重。其次,依据实际工程背景中不同方案下各个二级指标数值,采用 CRITIC 法计算客观权重。最后,基于博弈论组合赋权法计算二级指标的综合权重,并据此得出一级指标权重。博弈论在此过程中发挥协调作用,通过最小化综合权重与主客观权重之间的偏差,实现赋权的最优权重配置。

2.1.1 Fuzzy-DEMATEL 法确定主观权重

决策实验室分析法(DEMATEL)通过专家评价构建因素之间的直接影响矩阵,再经过矩阵运算获得各因素的影响度、被影响度、中心度与原因度,进而辨识因素间的相互影响关系与关键影响因素[15]。然而,专家在判断因素之间相互影响程度的评价易受主观认识局限,导致评价结果存在模糊性和不确定性。为此,引入基于模糊集理论(Fuzzy Set Theory)的模糊数学方法,能够有效处理此类模糊信息,提升评价过程的客观性与可靠性,具体步骤如下。

(1) 建立直接影响矩阵。假设通过邀请 p 位专家问卷调查,完成第 i 个因素对第 j 个因素影响程度的专家评分。问卷调查结束后,对专家评分的初始值进行去模糊化,然后计算得到清晰值 z_{ij}^{k},且 $1 \leqslant k \leqslant p$。

$$L_{ij}^{k}=\frac{m_{ij}^{k}-\min l_{ij}^{k}}{m_{ij}^{k}-l_{ij}^{k}+\max r_{ij}^{k}-\min l_{ij}^{k}} \tag{1}$$

$$R_{ij}^{k}=\frac{r_{ij}^{k}-\min l_{ij}^{k}}{r_{ij}^{k}-m_{ij}^{k}+\max r_{ij}^{k}-\min l_{ij}^{k}} \tag{2}$$

$$z_{ij}^{k}=\min l_{ij}^{k}+\frac{(L_{ij}^{k}(1-L_{ij}^{k})+(R_{ij}^{k})^{2})\times(\max r_{ij}^{k}-\min l_{ij}^{k})}{1-L_{ij}^{k}+R_{ij}^{k}} \tag{3}$$

式中:l、m 和 r 分别表示三角模糊数的上限、中间值和下限;$\max r_{ij}^{k}$ 表示右矩阵每行数中的最大值;$\min l_{ij}^{k}$ 表示左矩阵每行数中的最小值;L 和 R 分别表示专家评分的左标准值和右标准值。

按照公式(3)计算 p 位专家评分的平均清晰值 z_{ij},得到直接影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$,计算标准化直接影响矩阵 $\boldsymbol{W}$。

$$z_{ij}=(z_{ij}^{1}+z_{ij}^{2}+\cdots+z_{ij}^{p})/p \tag{4}$$

$$\boldsymbol{W}=\frac{\boldsymbol{Z}}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant p}\sum\limits_{j=1}^{p}z_{ij}} \tag{5}$$

(2) 建立综合影响矩阵。综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的计算公式如下:

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{W}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{W})^{-1} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

(3) 综合矩阵分析。影响度 f 是矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的各行之和,表示该因素对其他因素的影响程度;被影响度 e 是矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的各列之和,表示该因素受其他因素影响的程度。中心度是影响度 f 与被影响度 e 之和,表示该因素在影响因素体系中的重要性和作用程度;原因度是影响度 f 与被影响度 e 之差,原因度数值有正负,正值表示该因素影响其他因素,属于原因因素,负值表示该因素受其他因素影响,属于结果因素。

(4) 绘制因果关系图。因果关系图将中心度作为横坐标,原因度作为纵坐标,每个因素在图中的位置由其中心度和原因度决定。这种图形可以直观地展示因素之间的相互影响和相对重要性[16]。

(5) 计算二级指标主观权重 $\boldsymbol{\eta}$。得到影响度和被影响度之后,通过矩阵 $\boldsymbol{T}$ 求得权重。

$$\eta_{i}=\frac{\sqrt{(f_{i}+e_{i})^{2}+(f_{i}-e_{i})^{2}}}{\sum\limits_{i=1}^{p}\sqrt{(f_{i}+e_{i})^{2}+(f_{i}-e_{i})^{2}}} \tag{7}$$

经过 Fuzzy-DEMATEL 法计算后的二级指标主观权重为 η_{i}。

2.1.2 CRITIC 法确定客观权重

用 CRITIC 法综合指标间的关联性和冲突性来确定指标权重,可提高权重的准确性[17]。假设方案数为 q,评价指标个数为 t,b_{ij} 表示第 i 种方案的第 j 个评价指标的得分,则不同方案的评判指标矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为:

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1q} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{t1} & b_{t2} & \cdots & b_{tq} \end{pmatrix} \tag{8}$$

(1) 数据标准化 y_{ij} 计算公式为:

$$y_{ij}=\begin{cases}\dfrac{b_{ij}-\min b_{ij}}{\max b_{ij}-\min b_{ij}} & \text{(效益型指标)} \\ \dfrac{\max b_{ij}-b_{ij}}{\max b_{ij}-\min b_{ij}} & \text{(成本型指标)}\end{cases} \tag{9}$$

式中,$\max b_{ij}$、$\min b_{ij}$ 分别为第 j 个指标元素在所有评价对象中的最大值和最小值。

(2) 相关系数 r_{ij} 计算公式:

$$r_{ij}=\frac{\sum_{j=1}^{q}(b_{ij}-\bar{b}_{ij})(y_{ij}-\bar{y}_{ij})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{q}(b_{ij}-\bar{b}_{ij})^2\sum_{j=1}^{q}(y_{ij}-\bar{y}_{ij})^2}} \tag{10}$$

式中,$\bar{b}_{ij}$、$\bar{y}_{ij}$ 分别为 b_{ij}、y_{ij} 的均值。

(3) 信息量值 G_j 计算公式:

$$G_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{q}(b_{ij}-\bar{b}_{ij})^2}{(q-1)}}\times\sum_{i=1}^{t}(1-r_{ij}) \tag{11}$$

(4) 第 j 个评价指标客观权重 δ_j 计算公式:

$$\delta_j=G_j/\sum_{j=1}^{t}G_j \tag{12}$$

经过 CRITIC 法计算后的二级指标客观权重为 δ_j。

2.1.3 基于博弈论组合赋权法确定综合权重

博弈论组合赋权本质是对不同方法计算的权重进行优化,找到最佳权重值,计算步骤如下[18]。

(1) 将 Fuzzy-DEMATEL 法和 CRITIC 法得到的权重进行组合优化,将权重的离差极小化,等价转换为线性方程组的最优化一阶导数形式,见式(13)。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{\eta}$ 为 Fuzzy-DEMATEL 法权重;$\boldsymbol{\delta}$ 为 CRITIC 法权重;θ_1、θ_2 分别代表 Fuzzy-DEMATEL 法和 CRITIC 法的线性组合系数,且 θ_1、θ_2 均大于 0。

(2) 由式(13) 可以解得线性组合系数 θ_1、θ_2 的值,然后对其进行归一化处理得出最优组合系数 θ_1'、θ_2',并代入式(14),由此得出评价指标综合权重 $\boldsymbol{\varepsilon}$。

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\theta_1'\boldsymbol{\eta}+\theta_2'\boldsymbol{\delta} \tag{14}$$

2.2 PFHWD-TOPSIS 法

PFHWD-TOPSIS 法是一种基于毕达哥拉斯模糊混合加权距离的多属性决策方法。通过计算各方案与正、负理想解之间的距离,进而求得方案与理想解的相对贴近度,并据此对方案进行排序与择优,从而为复杂决策问题提供科学依据[19]。在深海水力集矿方案比选中,该方法具有显著优势:首先,针对深海采矿环境复杂、数据获取困难的特点,PFHWD 测试在考虑各指标重要性的同时,还能体现每个指标数据位置本身的关键作用;其次,TOPSIS 方法的系统性使得方案比选过程更加科学、客观,能够综合考虑多种因素,为深海水力集矿方案的优选提供有力支持。

2.2.1 毕达哥拉斯模糊集的含义

(1) 设 $\boldsymbol{X}$ 为论域,则称 $\boldsymbol{A}=\{(\alpha,\mu_\alpha,\nu_\alpha)\mid\alpha\in\boldsymbol{X}\}$ 为论域 $\boldsymbol{X}$ 上的毕达哥拉斯模糊集,其中 μ_α、ν_α 为 $\boldsymbol{X}$ 到区间[0,1]的两个映射,分别表示 $\boldsymbol{X}$ 上元素 α 属于 $\boldsymbol{A}$ 的隶属度和非隶属度,且 $0\leqslant\mu_\alpha^2+\nu_\alpha^2\leqslant1$,称 $\alpha=(\mu_\alpha,\nu_\alpha)$ 为毕达哥拉斯模糊数(PFN)。此外,式(15) 中的 π_α 表示 $\boldsymbol{X}$ 中元素属于 $\boldsymbol{A}$ 的犹豫度。

$$\pi_\alpha=\sqrt{1-\mu_\alpha^2-\nu_\alpha^2},\forall\alpha\in\boldsymbol{X} \tag{15}$$

(2) 邀请 g 位专家对 q 个方案的 t 个指标进行评价,得到每位专家的毕达哥拉斯模糊个人决策矩阵 $\boldsymbol{O}$,见式(16)。$\boldsymbol{A}^c$ 表示非正向指标矩阵的规范化处理。

$$\boldsymbol{O}=\begin{pmatrix}(\mu_{11},\nu_{11}) & (\mu_{12},\nu_{12}) & (\mu_{13},\nu_{13}) & \cdots & (\mu_{1t},\nu_{1t})\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ (\mu_{q1},\nu_{q1}) & (\mu_{q2},\nu_{q2}) & (\mu_{q3},\nu_{q3}) & \cdots & (\mu_{qt},\nu_{qt})\end{pmatrix} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{A}^c=(\nu,\mu) \tag{17}$$

2.2.2 得分值 s 和精确度 h

任意两个 PFN 的得分值 $s(\alpha)$ 和精确度 $h(\alpha)$ 可分别由式(18) 和式(19) 计算得出。

$$s(\alpha)=\mu_\alpha^2-\nu_\alpha^2 \tag{18}$$

$$h(\alpha)=\mu_\alpha^2+\nu_\alpha^2 \tag{19}$$

比较两个毕达哥拉斯模糊数时,首先比较得分值:若得分值不同,则得分值较高的更优;若得分值相同,则需进一步比较精确度,此时精确度较高的更优。

2.2.3 毕达哥拉斯模糊正理想解 $\boldsymbol{A}^+$ 和负理想解 $\boldsymbol{A}^-$

正理想解是指在毕达哥拉斯模糊数集合中得分值最高的模糊数,代表了各属性表现最为理想的状态,是决策目标的最优参照点。相对地,负理想解则是指在相同集合中得分值最低的模糊数,反映了各属性表现最为不利的情形,构成决策空间中的最劣边界。

2.2.4 毕达哥拉斯模糊集的混合加权距离(PFHWD) 计算

假设 $\alpha_1=(\mu_1,\nu_1)$ 和 $\alpha_2=(\mu_2,\nu_2)$ 为两个

PFN,对应的犹豫度为 π_1 和 π_2,则 $d_{\mathrm{PFD}}(\alpha_1,\alpha_2)$ 为 α_1 和 α_2 的距离测度,见式(20)。

$$d_{\mathrm{PFD}}(\alpha_1,\alpha_2)=\frac{1}{2}[|(\mu_1)^2-(\mu_2)^2|+|(\nu_1)^2-(\nu_2)^2|+|(\pi_1)^2-(\pi_2)^2|] \quad (20)$$

假设 $\boldsymbol{E}=(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n)$ 和 $\boldsymbol{F}=(\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_n)$ 为毕达哥拉斯模糊集,PFHWD($\boldsymbol{E},\boldsymbol{F}$) 为毕达哥拉斯模糊集 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{F}$ 的混合加权距离,具体计算见式(21)。

$$\mathrm{PFHWD}(\boldsymbol{E},\boldsymbol{F})=\left[\sum_{j=1}^{t}\varepsilon_j\times\frac{1}{t}\sum_{j=1}^{t}d_{\mathrm{PFD}}(\alpha_j,\beta_j)\right]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (21)$$

式中,λ 为二级指标权重 ε_2 的总和除以一级指标权重 ε_1 的总和的值。

2.2.5 计算贴近度 ζ

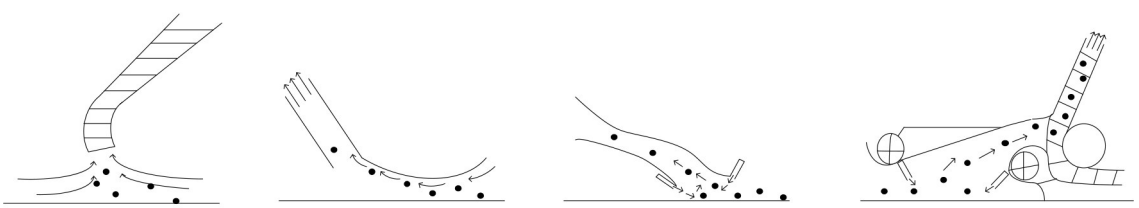
计算出方案正理想解 $\boldsymbol{A}^+$ 与负理想解 $\boldsymbol{A}^-$ 对应的毕达哥拉斯模糊集的混合加权距离后,从中识别出正理想解 $\boldsymbol{A}^+$ 混合加权距离的最小值 $\mathrm{PFHWD}_{\min}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^+)$ 和负理想解 $\boldsymbol{A}^-$ 混合加权距离的最大值 $\mathrm{PFHWD}_{\max}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^-)$,从而代入到式(22)中计算不同方案的贴近度并进行排序,$\zeta(\alpha_i)$ 越大,相应的方案则越优。

$$\zeta(\alpha_i)=\frac{\mathrm{PFHWD}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^-)}{\mathrm{PFHWD}_{\max}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^-)}-\frac{\mathrm{PFHWD}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^+)}{\mathrm{PFHWD}_{\min}(\alpha_i,\boldsymbol{A}^+)} \quad (22)$$

3 实证研究与结果分析

3.1 实证背景

在全球深海矿产开发的战略需求下,深海水力集矿技术的发展面临海底地形、沉积物特性及海流环境等多重复杂挑战。本研究以我国某个典型勘探区为对象,该区域水深 4 500～5 500 m,表层覆盖硅质黏土与钙质软泥,夹杂多金属结核富集区,底层海流受中尺度涡旋影响呈现出显著的脉动特征。针对此复杂环境,本研究共选取 4 种水力集矿技术方案,如图 3 所示。C_1 吸扬式,机构简单、工作可靠、对海底环境扰动小,但能耗较高、易受到垂直受力影响;C_2 附壁射流式,利用康达效应优化流场,可降低细颗粒扰动、能耗低、流场扰动小;C_3 射流冲采式,采集率高,但对海底环境扰动大[20];C_4 机械-水力复合式,集合了机械式集矿和水力式集矿的优点,但对参数控制要求高,且集矿头离地高度受限,限制了大颗粒结核的开采[4]。现利用本研究的指标体系和评价模型来进行方案优选。



(a) C_1 吸扬式　(b) C_2 附壁射流式　(c) C_3 射流冲采式　(d) C_4 机械-水力复合式

图 3 水力集矿方案示意

Fig.3 Schematic of hydraulic mining schemes

3.2 博弈论组合赋权法权重计算

3.2.1 主观权重确定

采用模糊语义表(见表 1),邀请 7 名专家(其中高校 3 人,企业 4 人)进行匿名评分,构建二级指标直接影响矩阵。通过以下步骤处理模糊数据。

表 1 模糊语义

Table 1 Fuzzy semantics

语言变量	评分	对应的三角模糊数
没有影响	0	(0,0,0.25)
很弱影响	1	(0,0.25,0.5)
弱影响	2	(0.25,0.5,0.75)
强影响	3	(0.5,0.75,1.0)
极强影响	4	(0.75,1.0,1.0)

(1)去模糊化与标准化。首先,通过模糊语义表,并根据式(1)至式(3),将专家的评分转化为清晰值。以指标 F_{11}(沉积物悬浮强度)对 F_{12}(底栖生物密度变化率)的评分(0.5,0.75,1.0)为例,经标准化计算后其清晰值为 0.715。将所有专家的评分按此方法处理,并将所得的全部清晰值汇总,即可建立直接影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$,见表 2。

(2) 综合影响矩阵分析。按照式(4)至式(6)计算得到综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$,见表 3。

计算影响度和被影响度,进而计算中心度和原因度并进行排序。根据式(7)计算出不同指标对应的权重值,结果见表 4。

表 2 直接影响矩阵

Table 2 Direct influence matrix

指标	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{21}	…	F_{44}	F_{51}	F_{52}	F_{53}	F_{54}
F_{11}	0.000	0.715	0.593	0.593	0.827	…	0.487	0.733	0.267	0.733	0.713
F_{12}	0.383	0.000	0.500	0.500	0.500	…	0.262	0.500	0.267	0.267	0.487
F_{13}	0.617	0.830	0.000	0.733	0.733	…	0.262	0.733	0.360	0.733	0.713
F_{14}	0.593	0.263	0.733	0.000	0.733	…	0.487	0.733	0.267	0.733	0.713
F_{21}	0.617	0.489	0.500	0.500	0.000	…	0.487	0.733	0.267	0.500	0.713
					……						
F_{44}	0.267	0.285	0.267	0.267	0.267	…	0.000	0.267	0.267	0.500	0.262
F_{51}	0.500	0.263	0.570	0.267	0.500	…	0.713	0.000	0.733	0.733	0.713
F_{52}	0.267	0.308	0.477	0.267	0.267	…	0.713	0.570	0.000	0.500	0.713
F_{53}	0.337	0.466	0.383	0.290	0.733	…	0.914	0.733	0.267	0.000	0.713
F_{54}	0.267	0.285	0.383	0.267	0.267	…	0.262	0.500	0.267	0.500	0.000

表 3 综合影响矩阵

Table 3 Comprehensive influence matrix

指标	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{21}	…	F_{44}	F_{51}	F_{52}	F_{53}	F_{54}
F_{11}	0.147	0.175	0.186	0.168	0.240	…	0.038	0.057	0.021	0.057	0.056
F_{12}	0.122	0.077	0.127	0.116	0.150	…	0.021	0.039	0.021	0.021	0.038
F_{13}	0.188	0.179	0.137	0.174	0.226	…	0.021	0.057	0.028	0.057	0.056
F_{14}	0.192	0.144	0.196	0.124	0.233	…	0.038	0.057	0.021	0.057	0.056
F_{21}	0.184	0.150	0.170	0.154	0.168	…	0.038	0.057	0.021	0.039	0.056
					……						
F_{44}	0.100	0.088	0.097	0.088	0.118	…	0.08	0.122	0.083	0.138	0.128
F_{51}	0.175	0.135	0.175	0.136	0.204	…	0.191	0.178	0.163	0.229	0.240
F_{52}	0.116	0.103	0.127	0.101	0.136	…	0.149	0.165	0.076	0.159	0.182
F_{53}	0.171	0.155	0.168	0.144	0.230	…	0.212	0.24	0.135	0.183	0.249
F_{54}	0.101	0.088	0.106	0.088	0.118	…	0.101	0.141	0.084	0.139	0.108

表 4 中心度和原因度

Table 4 Centrality and cause degree

指标	影响度	被影响度	中心度	排序	原因度	排序	指标类型	主观权重
F_{11}	4.009	3.238	7.247	9	0.771	5	原因因素	0.052
F_{12}	2.522	2.682	5.204	19	−0.160	11	结果因素	0.037
F_{13}	3.858	3.108	6.966	10	0.750	6	原因因素	0.050
F_{14}	4.017	2.722	6.739	12	1.295	1	原因因素	0.048
F_{21}	3.756	3.932	7.688	7	−0.176	12	结果因素	0.055
F_{22}	4.051	4.059	8.110	1	−0.008	9	结果因素	0.058
F_{23}	2.983	3.524	6.507	15	−0.541	17	结果因素	0.047
F_{24}	3.104	3.427	6.531	14	−0.323	15	结果因素	0.047
F_{31}	3.923	4.117	8.040	3	−0.194	13	结果因素	0.058
F_{32}	4.253	3.618	7.871	6	0.635	7	原因因素	0.057
F_{33}	4.090	3.238	7.328	8	0.852	4	原因因素	0.053
F_{34}	2.688	3.547	6.235	17	−0.859	18	结果因素	0.045
F_{41}	3.359	3.593	6.952	11	−0.234	14	结果因素	0.050
F_{42}	4.434	3.560	7.994	4	0.874	3	原因因素	0.058
F_{43}	3.688	2.791	6.479	16	0.897	2	原因因素	0.047
F_{44}	2.177	3.206	5.383	18	−1.029	19	结果因素	0.039
F_{51}	3.785	4.150	7.935	5	−0.365	16	结果因素	0.057
F_{52}	2.628	2.533	5.161	20	0.095	8	原因因素	0.037
F_{53}	3.975	4.085	8.060	2	−0.110	10	结果因素	0.058
F_{54}	2.198	4.368	6.566	13	−2.170	20	结果因素	0.047

(3) 绘制因果关系图。为清晰呈现深海水力集矿各影响因素间的复杂因果关系,本文依据上述综合影响矩阵分析计算得到的中心度和原因度,绘制了因果关系图,如图 4 所示。

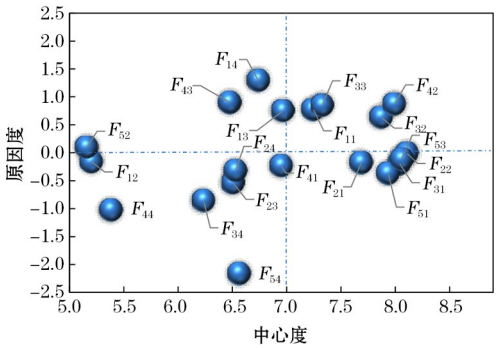


图 4 因果关系

Fig.4 Causality

3.2.2 客观权重确定

基于表 5 所列的 4 种深海水力集矿方案在各二级指标上的实测数据,本研究采用 CRITIC 法确定各指标的客观权重。首先,根据式(9)对表 5 中的原始数据进行标准化处理,以消除不同量纲和数量级的影响,为后续的精确计算奠定基础。

表 5 深海水力集矿方案优选综合评判指标体系

Table 5 Comprehensive evaluation index system of deep-sea hydraulic mining scheme optimization

影响因素	评判指标	C_1	C_2	C_3	C_4
环境扰动 F_1	沉积物悬浮强度 F_{11}/(mg/m³)	25	20	40	30
	底栖生物密度变化率 F_{12}/%	15	12	30	20
	水质扰动持续时间 F_{13}/h	2	1.5	3	3
	底质扰动深度 F_{14}/m	0.2	0.15	0.3	0.3
采集效率 F_2	目标矿粒采集率 F_{21}/%	85	90	80	88
	临界起动流速 F_{22}/(m/s)	1.8	1.6	2.0	1.7
	多粒径适应性 F_{23}	70	75	65	75
	横向捕获宽度 F_{24}/m	2.0	2.2	1.8	2.2
能耗特性 F_3	单位采集能耗 F_{31}/((kW·h)/t)	0.7	0.6	0.8	0.75
	功率密度 F_{32}/(kW/m²)	12	10	14	13
	能量回收率 F_{33}/%	30	35	28	32
	待机耗能占比 F_{34}/%	7	6	8	7
结构可靠性 F_4	抗腐蚀寿命 F_{41}/a	8	10	7	9
	流场稳定性指数 F_{42}	80	85	75	82
	抗堵塞因子 F_{43}	70	75	68	72
	地形适应性指数 F_{44}	65	70	60	68
采集经济性 F_5	单位矿量采集成本 F_{51}/(元/t)	110	100	130	115
	市场价格波动率 F_{52}/%	5	2	4	3
	设备维护成本 F_{53}/(元/h)	75	70	85	78
	投资回收期 F_{54}/a	4.5	4	5	4.8

接着,利用式(10)计算各指标之间的相关系数,构建相关系数矩阵。该矩阵能够反映出不同指标之间的线性关联程度,为后续计算指标的冲突性提供依据。在此基础上,结合各指标的变异性和冲突性,根据式(11)计算每个指标的信息量值。信息量值综合考虑了指标的变异性和冲突性,能够体现指标在方案区分中的有效信息含量。

最后,依据式(12)计算各二级指标的客观权重,并进行归一化处理,使得所有权重之和为 1。通过上述步骤,完成了客观权重的确定过程,计算得出的各指标的客观权重及其排序详见表 6。

表 6 各指标的客观权重及其排序

Table 6 The objective weight of each index and its ranking

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	客观权重	排序
F_{11}	0.427	2.559	1.093	0.039	12
F_{12}	0.438	2.994	1.312	0.046	7
F_{13}	0.500	5.452	2.726	0.096	2
F_{14}	0.500	5.452	2.726	0.096	3
F_{21}	0.435	2.536	1.103	0.039	11
F_{22}	0.427	2.253	0.962	0.034	16
F_{23}	0.479	3.978	1.905	0.067	5
F_{24}	0.479	3.978	1.905	0.067	4
F_{31}	0.427	2.687	1.147	0.041	9
F_{32}	0.427	2.687	1.147	0.041	8

续表

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	客观权重	排序
F_{33}	0.427	2.316	0.988	0.035	14
F_{34}	0.408	1.667	0.680	0.024	20
F_{41}	0.430	2.405	1.035	0.037	13
F_{42}	0.420	2.017	0.848	0.030	19
F_{43}	0.427	2.316	0.988	0.035	15
F_{44}	0.435	2.536	1.103	0.039	10
F_{51}	0.417	2.098	0.874	0.031	18
F_{52}	0.430	8.169	3.515	0.124	1
F_{53}	0.418	2.189	0.915	0.032	17
F_{54}	0.435	3.047	1.325	0.047	6

3.2.3 博弈论组合赋权优化

在获得主观权重和客观权重的基础上,利用式(13)和式(14),运用博弈论组合赋权法来优化二级指标的综合权重,计算结果见表7。

表7 博弈论综合权重的计算结果

Table 7 The calculation results of comprehensive weights of game theory

指标	主观权重	客观权重	综合权重	一级指标权重
F_{11}	0.052	0.039	0.041	0.262
F_{12}	0.037	0.046	0.045	
F_{13}	0.050	0.096	0.088	
F_{14}	0.048	0.096	0.088	
F_{21}	0.055	0.039	0.042	0.208
F_{22}	0.058	0.034	0.038	
F_{23}	0.047	0.067	0.064	
F_{24}	0.047	0.067	0.064	
F_{31}	0.058	0.041	0.044	0.153
F_{32}	0.057	0.041	0.043	
F_{33}	0.053	0.035	0.038	
F_{34}	0.045	0.024	0.028	
F_{41}	0.050	0.037	0.039	0.150
F_{42}	0.058	0.030	0.035	
F_{43}	0.047	0.035	0.037	
F_{44}	0.039	0.039	0.039	
F_{51}	0.057	0.031	0.035	0.228
F_{52}	0.037	0.124	0.109	
F_{53}	0.058	0.032	0.037	
F_{54}	0.047	0.047	0.047	

3.3 PFHWD-TOPSIS的方案决策分析

采用PFHWD-TOPSIS法对4种深海水力集矿方案进行决策分析,以确定最优方案。该方法结合专家的主观评价与客观数据,通过计算各方案与理想解的接近程度来进行排序,具体步骤如下。

3.3.1 计算一级指标权重和λ

在获得二级指标综合权重的基础上,将各二级指标的综合权重对应汇总至相应的一级指标,从而得出各一级指标的综合权重。例如,将环境扰动维度下各二级指标F_{11}、F_{12}、F_{13}、F_{14}的综合权重相加,得到该一级指标的权重为0.262。同理,依次计算出其他一级指标的权重,结果分别为采集效率为0.208、能耗特性为0.153、结构可靠性为0.150、采集经济性为0.228。随后进行一致性检验,计算得出$\lambda=1$。

3.3.2 专家评估隶属度与非隶属度

邀请5名专家对4种深海水力集矿方案进行评价,专家们依据七级语义量表对各方案在各一级指标上的表现进行评估,随后根据式(15)至式(17)将专家们的评价结果建立为毕达哥拉斯模糊评价矩阵,见表8。例如,对于方案C_2,在环境扰动(F_1)这一指标上专家评价为"优",对应的毕达哥拉斯模糊数为(0.9,0.1),以此类推。

表8 毕达哥拉斯模糊评价矩阵

Table 8 Pythagoras fuzzy evaluation matrix

方案	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
C_1	(0.7,0.5)	(0.5,0.8)	(0.4,0.9)	(0.4,0.8)	(0.9,0.2)
C_2	(0.9,0.1)	(0.8,0.1)	(0.4,0.8)	(0.2,0.9)	(0.9,0.1)
C_3	(0.7,0.3)	(0.7,0.3)	(0.5,0.7)	(0.5,0.7)	(0.8,0.3)
C_4	(0.8,0.3)	(0.8,0.3)	(0.3,0.9)	(0.3,0.8)	(0.7,0.5)

3.3.3 理想解确定与距离测算

通过判断正理想解和负理想解,分析专家对各方案的评价数据。正理想解由各指标的最优毕达哥拉斯模糊数组成,即(0.9,0.1),(0.8,0.3),(0.5,0.7),(0.5,0.7),(0.9,0.2);负理想解则由各指标的最差毕达哥拉斯模糊数组成,分别为(0.7,0.5),(0.5,0.8),(0.3,0.9),(0.2,0.9),(0.7,0.5)。随后,根据式(20)和式(21)计算各方案与正理想解和负理想解之间的混合加权距离。

3.3.4 方案贴近度计算与排序决策

依据式(22)计算各方案的贴近度,并据此进行排序,结果见表9。排序结果显示,方案C_2的贴近度最高,表明其综合性能最优;其次是方案C_3、C_4;方案C_1的贴近度为-1.109,排名最末,表明其综合性能相对较差。通过这一系列PFHWD-TOPSIS法的计算与分析,最终确定了4种常见的深海水力集矿方案的优劣次序,为方案的优选提供了科学、系统的决策依据。

表9 方案贴近度排序

Table 9 The ranking of closeness degree of schemes

方案	PFHWD(α_i,$\boldsymbol{A}^+$)	PFHWD(α_i,$\boldsymbol{A}^-$)	$\xi(\alpha_i)$	排名
C_1	0.557	0.330	-1.109	4
C_2	0.328	0.560	0.000	1
C_3	0.392	0.556	-0.203	2
C_4	0.459	0.426	-0.638	3

3.4 结果分析

在基于博弈论的组合赋权分析中,Fuzzy-DEMATEL法所构建的因果关系矩阵表明,底质扰动深度(F_{14})、流场稳定性指数(F_{42})等中心度与原因度的指标均较高,对4种深海水力集矿方案的系统运行具有显著驱动作用。其中,C_1方案因其结构设计特点,在处理粒径分布复杂的矿石时,对F_{14}指标的依赖程度更高。该指标中心度为6.739、原因度为1.295,其制约了C_1方案的采集效率。相比之下,C_2方案凭借独特的流体设计,在F_{42}指标的适配性上表现出色,保障了流体运动稳定性。反观投资回收期(F_{54})、多粒径适应性(F_{23})等原因度为负的指标,在评估各方案生态风险时,C_3方案因设备能耗高,对F_{54}指标变化更为敏感;而C_4方案在浅海作业场景中,F_{23}指标受海底地形影响显著,进而影响其系统性能表现。

CRITIC法基于实测数据的分析,赋予水质扰动持续时间(F_{13})、底质扰动深度(F_{14})等指标较高权重。在具体方案中,C_1方案作业过程中,由F_{13}产生的水质扰动对周边海洋生态影响较大;而C_2方案在控制F_{14}指标方面表现优异,能有效降低对海底底质的扰动。

基于PFHWD-TOPSIS的毕达哥拉斯模糊多属性决策结果进一步证实C_2方案的综合优势。在环境扰动方面,C_2方案相较于C_1方案和C_3方案,对海洋生态系统的影响有所降低;在经济效益维度,C_2方案单位矿量采集成本较C_4方案更具经济性,其投资回收期比C_1方案更短,而C_4方案在硬质沉积物破碎能力和大粒径矿石采集效率方面存在短板,难以适应深海多地形、多矿质的复杂环境。综上,C_2方案在生态保护、作业效能和经济成本三者之间实现了最优平衡,有效协同提升了深海水力集矿系统的可持续性与高效性,因此在本研究中被推荐为深海水力集矿的优选技术方案。

4 结论

本文构建了一种混合评价体系框架,用于识别深海水力集矿系统的关键影响因素并实现方案优选,为深海水力集矿系统的方案决策提供了可量化的理论依据和方法支持,主要研究结论如下。

(1) 基于扎根理论,从技术、环境、经济等多维度出发,系统识别了深海水力集矿的关键影响因素,并构建了涵盖环境扰动、采集效率、能耗特性、结构可靠性、采集经济性5个一级指标及其对应20个二级指标的综合评价体系。扎根理论的引入确保了指标体系的系统性和科学性,能够有效反映深海水力集矿作业的复杂性和多维性,为后续的定量分析和方案优选研究奠定了基础。

(2) 针对深海水力集矿系统多维度复杂、数据稀缺及指标间强耦合性等特点,本研究将Fuzzy-DEMATEL和CRITIC相结合,构建了基于博弈论的组合赋权模型。案例结果显示,主客观权重差异通过博弈优化得到有效协调,关键二级指标如水质扰动持续时间(F_{13})与底质扰动深度(F_{14})的综合权重均达0.088,显著高于平均水平;而经济维度下的市场价格波动率(F_{52})权重为0.109,为所有指标中最高值。这表明环境扰动与经济稳定性是深海水力集矿方案决策中的关键约束因素。

(3) 利用PFHWD-TOPSIS法对4种深海水力集矿方案进行了决策分析,消除了专家主观评价与客观数据间的不确定性,实现了对方案的科学排序。案例结果表明,方案优劣顺序为$C_2>C_3>C_4>C_1$,即附壁射流式方案(C_2)综合性能最优,在环境扰动、能耗特性和经济性方面均表现突出。该结果验证了基于PFHWD测度的多属性决策模型可应用于深海水力集矿方案优选,其在应对模糊信息和不确定性决策情境下的科学性与适用性优势突出。

参考文献(References):

[1] 康娅娟,刘少军.深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述[J].机械工程学报,2023,59(20):325-337.
Kang Yajuan, Liu Shaojun. Review on the technology and equipment progress and the system scheme of deep-sea mining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20):325-337.

[2] 贺义雄,陈珂炜,李小虎.竞争态视角下我国海洋经济高质量发展的格局演化与趋势预测[J/OL].海洋科学:1-18[2025-06-09]. https://link.cnki.net/urlid/37.1151.P.20250513.1705.004.
He Yixiong, Chen Kewei, Li Xiaohu. Evolution and trend prediction of high-quality development in China's marine economy from a competitive perspective[J/OL]. Marine Sciences:1-18[2025-06-09]. https://link.cnki.net/urlid/37.1151.P.20250513.1705.004.

[3] 严加豪,刘茜茜,高兴政,等.深海水力射流对深海沉积物底质的冲蚀特性研究[J].海洋工程,2024,42(5):191-206.
Yan Jiahao, Liu Xixi, Gao Xingzheng, et al. Investigation of erosion characteristics of deep-sea hydraulic jets on deep-sea sediment substrates[J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(5):191-206.

[4] 金永平,董向阳,万步炎,等.深海金属采矿装备与技术发展现状及分析[J].煤炭学报,2024,49(8):3316-3334.
Jin Yongping, Dong Xiangyang, Wan Buyan, et al. Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and technologies[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(8):3316-3334.

[5] 刘杰,许栋,及春宁,等.深海多金属结核水力集矿头流场结构数值模拟研究[J].海洋工程,2023,41(3):123-136.
Liu Jie, Xu Dong, Ji Chunning, et al. Numerical investigations on the flow structures around the hydraulic mining header of deep-sea polymetallic nodule collectors[J]. The Ocean Engineering,2023,41(3):123-136.

[6] 陈旭光,栾鲁宝,张宁,等.深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1173-1190.
Chen Xuguang, Luan Lubao, Zhang Ning, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its environmental effects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1173-1190.

[7] 李征启,陈旭光,魏佳康,等.康达效应式水力集矿对深海土的冲蚀特性研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(1):106-115+131.
Li Zhengqi, Chen Xuguang, Wei Jiakang, et al. Research on erosion characteristics of deep-sea sediment: Coanda-effect-based hydraulic collector[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(1):106-115+131.

[8] 李雨瑶,赵国成,肖龙飞.不同水力集矿模型的矿粒采集及环境扰动特性数值研究[J].上海交通大学学报,2024,58(7):1036-1046.
Li Yuyao, Zhao Guocheng, Xiao Longfei. Numerical study on collection and environmental disturbance characteristics of different nodule collecting models[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2024,58(7):1036-1046.

[9] 丁聪,陈旭光,刘学麟,等.水牛蹄型深海集矿机履齿设计及牵引性能研究[J].海洋工程,2024,42(2):26-41.
Ding Cong, Chen Xuguang, Liu Xuelin, et al. Design and traction performance analysis of buffalo hoof-shaped deep-sea mining machine tracks[J]. The Ocean Engineering, 2024,42(2):26-41.

[10] 薛景天,夏秋,贾浩,等.深海多金属结核抽吸式集矿运动特性研究[J/OL].应用数学和力学:1-18[2025-06-09]. https://link.cnki.net/urlid/50.1060.O3.20250425.1319.002.
Xue Jingtian, Xia Qiu, Jia Hao, et al. Study on the motion characteristics of suction-based deep-sea polymetallic nodule mining[J/OL]. Applied Mathematics and Mechanics: 1-18 [2025-06-09]. https://link.cnki.net/urlid/50.1060.O3.20250425.1319.002.

[11] 张栢源,赵国成,肖龙飞.附壁射流式多金属结核采集装置几何参数优化[J].上海交通大学学报,2025,59(8):1059-1066.
Zhang Baiyuan, Zhao Guocheng, Xiao Longfei. Optimization of geometrical parameters of coandă-effect-based polymetallic nodule collection device[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2025,59(8):1059-1066.

[12] 李俊,程阳锐,曾轩,等.基于CFD-DEM的多金属结核小型水力式集矿机构设计[J].矿业研究与开发,2024,44(11):1-8.
Li Jun, Cheng Yangrui, Zeng Xuan, et al. Design of small hydraulic mining mechanism for polymetallic nodules based on CFD-DEM[J]. Mining Research and Development,2024, 44(11):1-8.

[13] 李淑丽,谭佳璐,谭圣元.数字阅读用户持续使用意愿的影响因素与路径研究:基于QCA的组态路径分析[J].情报科学,2024,42(9):66-71.
Li Shuli, Tan Jialu, Tan Shengyuan. Influencing factors and path on continuous use intention of digital reading users: configuration path analysis based on QCA[J]. Information Science,2024,42(9):66-71.

[14] 刘翔,黄敦杰,王伟,等.基于博弈论和云物元模型的矿山塌陷土地复垦适宜性评估研究[J].矿业安全与环保,2024,51(2):133-140.
Liu Xiang, Huang Dunjie, Wang Wei, et al. Study on reclamation suitability evaluation of mine subsidence land based on game theory and cloud matter element model[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2): 133-140.

[15] Hu X, Xie J, Yan A H, et al. Evaluating the potential of depleted gas reservoirs for carbon storage: a comprehensive fuzzy DEMATEL assessment of influential factors[J]. Fuel, 2025,393:134986.

[16] Yuan W Y, Zhao H, Yang X J, et al. Toward dynamic rehabilitation management: a novel smart product-service system development approach based on fine-tuned large vision model and Fuzzy-Demate[J]. Advanced Engineering Informatics,2024,62:102616.

[17] Niu C, Jia X Q, Xiao L L, et al. Evaluation of water richness in sandstone aquifers based on the CRITIC-TOPSIS method: a case study of the Guojiawan coal mine in Fugu mining area, Shaanxi Province, China[J]. Water, 2025, 17(10):1424.

[18] 楚明辉,许开立,徐晓虎,等.基于博弈论组合赋权云模型的地下黄金矿山安全风险评价[J].中国矿业,2024,33(11):212-220.
Chu Minghui, Xu Kaili, Xu Xiaohu, et al. Safety risk assessment of underground gold mine based on cloud model with combination weighting of game theory[J]. China Mining Magazine,2024,33(11):212-220.

[19] 曾守桢,穆志民.基于混合加权距离的毕达哥拉斯模糊TOPSIS多属性决策方法研究[J].中国管理科学,2019,27(3):198-205.
Zeng Shouzhen, Mu Zhimin. Amethod based on hybrid weighted distance for pythagorean fuzzy TOPSIS multiple-attribute decision making[J]. Chinese Journal of Management Science,2019,27(3):198-205.

[20] Yue Z Y, Zhao G C, Xiao L F, et al. Comparative study on collection performance of three nodule collection methods in seawater and sediment-seawater mixture[J]. Applied Ocean Research,2021,110:102606.