基于 GERIS 准则的深海多金属结核采集方式比较评估研究①

任显豪[1]，刘莉红[2,3]，魏定邦[2,3]，夏建新[2,3]
（1.洛林大学 科学技术学院，法国 南锡 54500；2.中国地质大学（北京）海洋学院，北京 100083；3.极地地质与海洋矿产教育部重点实验室，北京 100083）

摘 要：为选择适宜的深海多金属结核采集方式，基于绿色、经济、可靠、智能、安全（GERIS）五维准则构建技术评价体系，采用层次分析法确定 22 项工程化指标权重，对旋转耙式、水力式与机械手式 3 种典型方案进行量化比较。结果表明，旋转耙式在采集效率、作业稳定性与安全性方面表现俱佳，综合评估得分 80.1 分；水力式结构简洁、效率高，但环境友好性与智能性不足，综合评估得分 76.3 分；机械手式具备智能化潜力，但受制于效率与机械复杂度，综合评估得分 70.2 分。总体而言，旋转耙式在现阶段具有工程可行性，水力式和机械手式在未来关键技术突破或政策优化后仍具发展潜力。

关键词：深海矿产资源；深海采矿；多金属结核；采集方式；层次分析法；旋转耙式；水力式；机械手式
中图分类号：TD857　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.005
文章编号：0253-6099(2025)06-0026-07

Comparative Evaluation of Deep-Sea Polymetallic Nodule Collection Technologies Based on GERIS Criteria

REN Xianhao[1], LIU Lihong[2,3], WEI Dingbang[2,3], XIA Jianxin[2,3]
(1. *Science & Technology College*, *University of Lorraine*, *Nancy* 54500, *France*; 2. *School of Ocean Sciences*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*; 3. *Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources* (*China University of Geosciences*, *Beijing*), *Ministry of Education*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to select an appropriate deep-sea polymetallic nodule collection method, a technical evaluation system was established based on five criteria, including green, economy, reliability, intelligence and safety (GERIS). Then, as for three kinds of collection methods, including collection with a rotary raking system, or a hydraulic collection system, and a robotic arm collection system, the weights of 22 engineering indicators were determined by adopting the Analytic Hierarchy Process (AHP), and also a quantitative comparison was made among those three typical methods. It is found that collection by a rotary raking system presents better performance in terms of collection efficiency, operation stability and safety, with a comprehensive score of 80.1, while the hydraulic collection system is characterized by simple structure and high efficiency, but is not environment-friendly and intelligent, with a score of 76.3. The robotic arm collection system shows some sort of potential in intelligent development, but is limited by its low efficiency and high mechanical complexity, with the lowest score of 70.2. Overall, the collection by a rotary raking system is more feasible in current engineering applications, and the hydraulic collection system may be banned to use due to strict environmental protection regulations, while the robotic arm collection system still has developmental potential for precise collection in high-value areas in the future.

Key words: deep-sea mineral resource; deep-sea mining; polymetallic nodule; collection method; analytic hierarchy process; rotary raking system; hydraulic collection system; robotic arm collection system

深海蕴藏着丰富的矿产资源，其中多金属结核分布广、储量大、金属品位高，是未来金属矿供应的重要补充来源，被认为极具商业化开发潜力[1-2]。开发深海矿产资源不仅有助于缓解资源短缺，也是保障低碳转

① **收稿日期**：2025-06-30
基金项目：国家自然科学基金（52394252）；国家重点研发计划（2021YFC2801500）
作者简介：任显豪（1999—），男，北京人，硕士研究生，主要研究方向为深海技术与资源开发。E-mail:renxianhaofr@163.com
通信作者：夏建新（1969—），男，湖北黄冈人，博士，教授，主要研究方向为深海技术与资源开发。Email:jxxia@vip.sina.com

型中关键金属供应的战略途径[3-4]。

深海采矿环境复杂,对采集系统可靠性、安全性与环境友好性要求极高。联合国国际海底管理局(ISA)正制订环境阈值与采矿规章,中国海洋工程咨询协会提出了“绿色、经济、可靠、智能、安全”(GERIS)的五维准则[5]。在商业化开采与生态监管并行的双重背景下,采集系统既要实现高产能与稳定运行,又需兼顾采矿扰动控制与排放约束。单一技术或经济指标难以反映系统整体适用性,因此需采用多准则决策方法以综合平衡效率、风险与合规性[6]。目前,多准则决策方法已在海洋工程领域得到应用[7],但在深海多金属结核采集技术方面的应用研究仍不足[8]。层次分析法能在复杂工程决策中兼顾定性判断与定量分析,既体现专家经验,又保持数学严谨性,比纯数据驱动或纯经验型方法更适合深海采矿这类多因素耦合系统的综合评估。本文在 GERIS 准则下引入层次分析法,构建技术评价体系,对旋转耙式、水力式与机械手式 3 种典型的深海多金属结核采集方式进行量化比较,为深海矿产资源采集系统选型与评估提供科学依据。

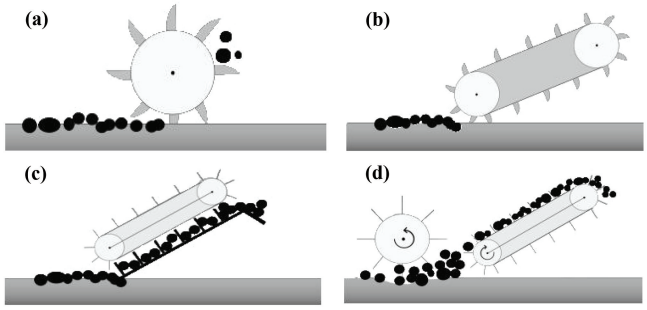
1　深海多金属结核采集方式

深海矿产资源采集技术要求高,需在高压、低温、强腐蚀环境下实现高效率、低扰动、低能耗作业,这些要求是采集系统的关键瓶颈之一。多金属结核采集方式主要有机械式、水力式及水力-机械复合式 3 类[9-11]。

1.1　机械式采集

机械式采集通过滚筒、耙齿或机械手实现多金属结核分离与输送,主要有滚筒式、旋转耙式和机械手式。

滚筒式通过前端切削与链带输送结合,结构成熟、能效较高,但部件磨损快、维护复杂[12]。滚筒式采集常见结构如图 1 所示。



(a) 轮斗式; (b) 链斗式;
(c) 链带耙齿式; (d) 滚筒耙齿-齿链输送式

图 1　滚筒式采集常见结构

Fig. 1　Schematic diagram of roller collection system

旋转耙式[13]通过扰动和刮取动作完成多金属结核采集,并通过链带结构输送至料仓(见图 2),并采用多自由度支撑与链带输送结构,可兼顾高效率与低扰动,在试验中表现出较好的稳定性与环境友好性。

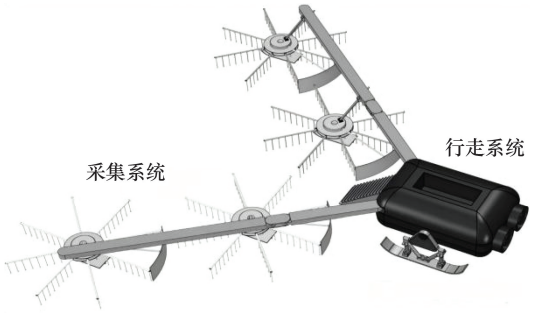


图 2　旋转耙式采集结构

Fig. 2　Schematic diagram of rotary raking collection mechanism

机械手式[14]利用水下机械臂与视觉识别进行精准抓取(如图 3 所示),减少对沉积层的破坏,但采集能力较低,受续航与通信限制。

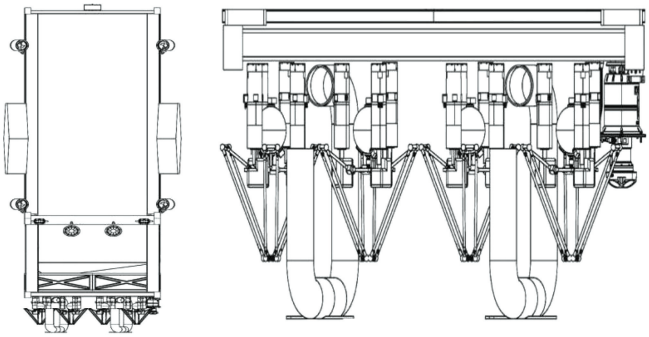
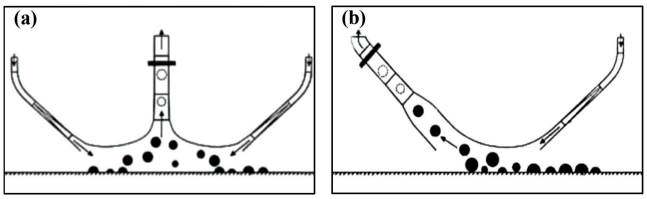


图 3　机械手式采集结构

Fig. 3　Schematic diagram of robotic arm collection system

1.2　水力式与水力-机械复合式采集

水力式采集利用喷射或吸泵流体扰动沉积物,将结核卷吸进入采集系统。典型形式有双排水射流式与康达效应式[15],如图 4 所示。因结构简单、连续性强、可靠性高,水力式采集广泛应用于深海矿产资源采集项目中。然而,该方式能耗高,易卷吸 5~8 cm 表层沉积物并形成羽流,对环境影响较大,需回收羽流与优化流场设计,以减小扰动。



(a) 双排水射流式; (b) 康达效应式

图 4　水力式采集

Fig. 4　Schematic diagram of hydraulic collection system

为平衡效率与稳定性,水力-机械复合式采集结合高压喷流与齿链输送机制,兼具了水力式的连续性与机械式的可靠性,如图5所示。韩国海洋研究院研制的水力-机械复合式采集系统实现了结核高效剥离与输送,但在能效与防腐方面仍需优化[16]。

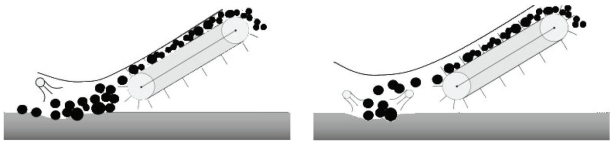


图5 水力-机械复合式采集

Fig.5 Hydraulic-mechanical hybrid collection method

1.3 各采集方式性能与适用性分析

不同采集方式在结构复杂度、采集效率、能耗与环境影响方面存在明显差异。机械式可控性强、精度高,其中旋转耙式在效率与环境友好性方面表现最均衡;水力式结构简洁,但扰动大、能效低;机械手式精准、智能,但产能有限;水力-机械复合式兼具两者优势,地形适应性较强。不同采集方式优缺点比较如表1所示。

表1 不同采集方式优缺点比较

Table 1 Comparison of different nodule collection methods

采集方式		优点	缺点
机械式	滚筒式	简单机械原理实现采集,采集率较高	运动部件较多,机械故障率较高,部件易磨损;挖斗卸载时易有结核黏附
	旋转耙式	采集面积大、效率高,轻微扰动清除表层沉积物即可完成采集	机械部件较大,设计较困难
	机械手式	采集精准,对海底沉积物扰动较小	整体产能有限;稳定性较差
水力式		原理机构简单,无易损运动件,可靠性和耐用性高;无需复杂机械驱动	能效偏低;底层环境影响范围大;对重载颗粒适应性差;流场稳定性要求高
水力-机械复合式		兼具水力式与机械式优势,阻力小,沉积易清除	参数优化难度大,依赖试验验证

根据现有研究,机械手式采集效率仅10~20 t/h;水力式采集效率波动大且维护成本高;旋转耙式在地形自适应与路径优化方面表现俱佳。总体来看,各方案需在效率、能耗与环境约束之间权衡,应结合国际法规与GERIS准则进行综合评估与合理选型。

2 基于GERIS准则的采集技术评价体系

2.1 指标体系构建

GERIS准则以多维指标体系整合环境、经济与工程要素,为深海多金属结核采集方式的综合评估建立了可量化框架。

其中,绿色(G)维度强调环境扰动最小化。随着“BBNJ协定”和“30×30”目标推进,国际社会对生态影响要求更加严格[17]。ISA已开展制订悬浮沉积物、噪声与光污染阈值,并推广环境影响评估(EIA)与区域环境管理计划(REMPs)[18]。多金属结核赋存于沉积物表层,不当采集易导致羽流扩散与底层破坏,故应采用浅接触设计,并监测悬浮颗粒浓度、扩散半径、再沉积厚度及光噪水平,以量化扰动并控制生态风险[19-20]。

经济(E)维度反映系统的产出效率与能量利用,在深海采矿背景下主要体现在采集效率与能力上。其核心指标为采集能力、采集率、回采率与能效。采集能力衡量单位时间处理量,决定年产300万t(干)结核目标的规模化产能;采集率反映资源覆盖与拾取效率,通常要求不低于90%;回采率指可采储量中被有效带离的比例,宜高于85%;能效衡量单位为能耗与产出比,能效高可显著降低成本。四项指标共同展示系统的经济可行性与资源利用水平。

可靠(R)维度关注系统在高压、强腐蚀与长周期条件下的稳定性,反映系统在极端工况下的可用性与维护经济性。其中,结构简洁性决定故障概率,控制逻辑应具备容错与可维护性;作业稳定性体现在连续运行与低停机率两个方面,要求2 000 h连续作业且1 200 h内不减产;工程验证度需经建模、仿真与极限工况试验验证,设计寿命不少于20年。

智能(I)维度衡量系统的感知、决策与自适应能力。相较传统机械系统,智能化采矿强调通过人工智能算法、机器学习与传感融合实现环境感知、智能决策、路径规划与故障预测。部分系统已引入数字孪生,将物理采矿系统与虚拟模型联通,实现作业过程可视化与持续优化,显著提升智能化水平与作业效率。

安全(S)维度旨在防止系统失控与事故扩散。应具备防倾覆、防卡滞与防误动作能力;通过模块隔离与限位装置控制故障传播;在异常时能自动停机或切换安全模式,实现被动防护与功能缓冲;且应具有抗冲击性结构,在发生刮擦或沉积物滚落时维持功能可恢复性。

在GERIS五维准则框架下,建立覆盖深海多金属

结核采集系统的技术指标评价体系,如图 6 所示。

采用层次分析法进一步确定各指标的重要性并构建权重体系。首先依据专家问卷结果,对同级指标进行两两比较,构建判断矩阵。问卷采用 1~9 标度法并附设开放性问题,以获取成对比较数据。问卷专家样本覆盖深海工程、环境科学与海洋资源开发等领域,包含教授、博士后、博士等不同层级。为兼顾经验与创新视角,对不同群体赋予差异化权重,使总体结果既具工程实践基础,又反映多学科综合判断。经过归一化和行平均计算获得权重向量,并通过一致性检验验证结果可靠性。

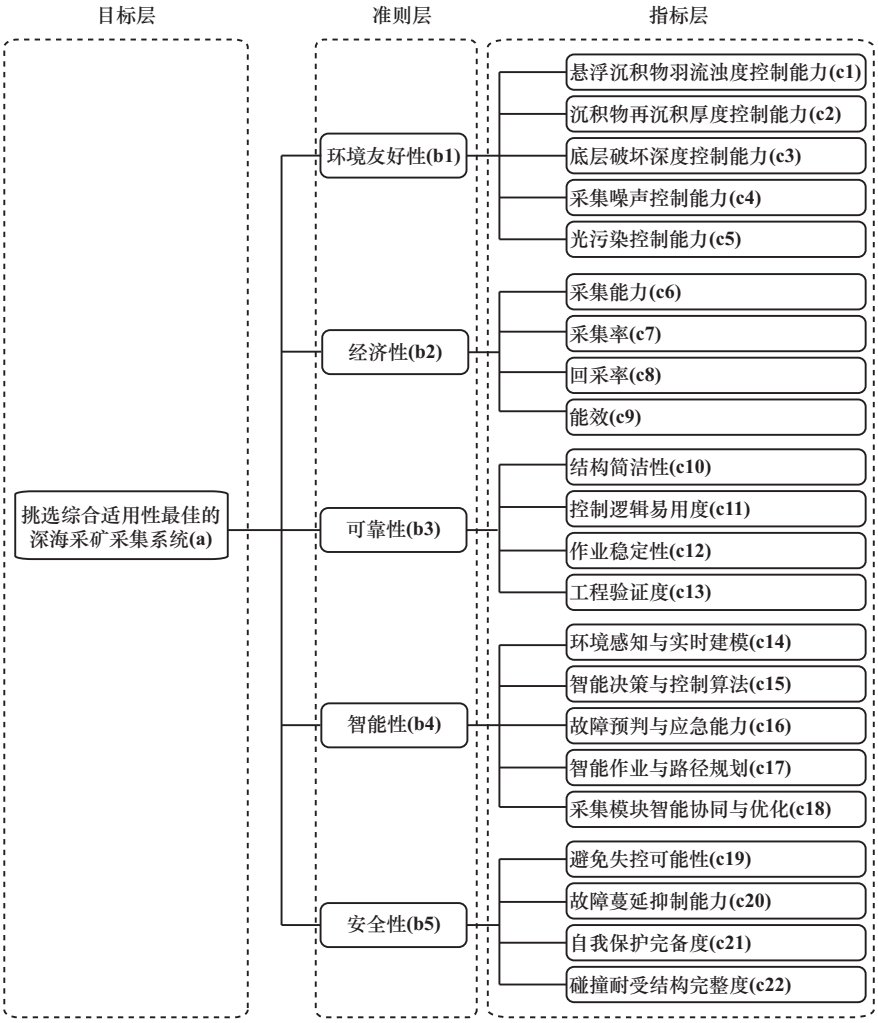


图 6　基于 GERIS 准则的深海多金属结核采集系统技术指标评价体系

Fig.6　Evaluation system of polymetallic nodule collection technologies based on GERIS criteria

2.2　指标权重确定

以可靠性准则为例,专家调查问卷结果经整理后取算术平均值计算出判断矩阵中各元素的 α_{ij}。α_{ij} 表示指标 i 相对指标 j 的重要性,满足 $\alpha_{ij}=\dfrac{1}{\alpha_{ji}}$、$\alpha_{ii}=1$,得到可靠性准则判断矩阵为:

$$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix}1 & 1.29 & 0.51 & 1.01\\ 0.78 & 1 & 0.40 & 0.79\\ 1.96 & 2.50 & 1 & 1.98\\ 0.99 & 1.27 & 0.51 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

采用列向量归一化法计算权重[21],首先对判断矩阵各列求和:

$$S_j=\sum_{i=1}^{n}a_{ij} \tag{2}$$

得到 $S_1=4.73$,$S_2=6.06$,$S_3=2.42$,$S_4=4.78$。再将每个元素分别除以其所在列的和,得到新的归一化判断矩阵:

$$\boldsymbol{B}=(b_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix}0.212 & 0.213 & 0.211 & 0.212\\ 0.165 & 0.165 & 0.165 & 0.165\\ 0.414 & 0.413 & 0.414 & 0.414\\ 0.209 & 0.209 & 0.210 & 0.209\end{bmatrix} \tag{3}$$

判断矩阵经过归一化处理后,每列的数值和均为1,矩阵元素反映了各指标在同一比较维度下的相对占比。对归一化判断矩阵按行求平均值,即对每行元素求和并除以指标个数 n,得到各列指标的近似权重值 $\boldsymbol{\omega}_i$,表示第 i 个指标的相对权重。

$$\boldsymbol{\omega}_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_{ij} \tag{4}$$

为验证判断矩阵的一致性,根据初始判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和权重向量 $\boldsymbol{\omega}$ 的乘积计算各矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及一致性指标 CI 与一致性比率 CR:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A\omega})_i}{\boldsymbol{\omega}_i};\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max}-n}{n-1};\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}$$

式中 RI 为随机一致性指标,可根据表2查询。

表2 随机一致性指标

Table 2 Random consistency index

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 CR≤0.1 时,认为判断矩阵通过一致性检验,否则需重新调整矩阵。

经过一致性检验,可得 GERIS 指标体系准则层及指标层权重结果,见表3。

表3 准则层及指标层权重与一致性结果

Table 3 Weights and consistency of criterion and indicator levels

准则层指标及权重	指标层指标及权重	$\lambda_{\max}$	CR
环境友好性 0.230	悬浮沉积物羽流浊度控制能力0.300;沉积物再沉积厚度控制能力0.235;底层破坏深度控制能力0.283;采集噪声控制能力0.096;光污染控制能力 0.086	5.014	0.006
经济性 0.290	采集能力 0.310;采集率 0.330;回采率 0.198;能效 0.162	4.006	0.003
可靠性 0.218	结构简洁性 0.212;控制逻辑易用度 0.165;作业稳定性 0.414;工程验证度 0.209	4.020	0.008
智能性 0.076	环境感知与实时建模 0.199;智能决策与控制算法 0.226;故障预判与应急能力 0.224;智能作业与路径规划 0.189;采集模块智能协同与优化0.162	5.011	0.004
安全性 0.184	避免失控可能性 0.441;故障蔓延抑制能力0.233;自我保护完备度0.178;碰撞耐受结构完整度 0.148	4.009	0.005

由表3可知,各判断矩阵一致性良好,权重结果比较可靠。从准则层指标看,经济性(0.290)与环境友好性(0.230)权重较高,表明当前深海多金属结核采集技术仍以提升作业效率和控制环境扰动为主要目标;可靠性(0.218)与安全性(0.184)次之,体现了工程系统稳定性与风险防护的重要性;智能性(0.076)权重最低,但其技术潜力仍值得关注。

在各指标层中,羽流浊度与底层破坏深度控制能力权重较高,是绿色维度的关键指标;采集率与采集能力权重较大,体现经济性主要集中在对产能和效率的关注;作业稳定性为可靠性的主要影响因素;智能性以智能决策和故障预判能力为核心;失控防范能力在安全性中的权重最高,凸显结构与控制安全的重要性。

总体而言,权重分布显示当前采集系统的设计优化应在经济效益、可靠运行与生态约束间取得平衡,并逐步强化安全与智能能力。

3 采集方式的综合评价

基于前述技术评价体系,对旋转耙式、水力式与机械手式3种典型采集方式进行了综合评价,分别代表机械低扰动型、水力输运型与智能操控型3种主流技术路线,对比不同采集原理在工程应用中的性能差异。方案若未达到关键性能阈值,记为0分,以确保结果兼顾性能与合规性。首先,基于层次分析法中的权重体系确定各二级指标的全局权重:

$$\boldsymbol{W}_i = \boldsymbol{\omega}_p \times \boldsymbol{\omega}_{i|p} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{\omega}_p$ 为第 p 个准则层的指标权重;$\boldsymbol{\omega}_{i|p}$ 为准则层对应的第 i 个二级指标的局部权重。

其次,根据专家对旋转耙式、水力式与机械手式3种采集方式在各二级指标下的评分结果(以0~100为量纲),计算各采集方式在每个准则下的加权得分:

$$S_p = \sum_{i=1}^{n_p} \boldsymbol{W}_{i|p} \times S_i \tag{6}$$

式中:S_i 为该方案在第 i 个二级指标下的评分值;n_p 为该准则下的指标个数。

综上,3种采集方式在 GERIS 框架下各指标全局权重及各采集方式综合得分结果见表4。从表4可知,旋转耙式整体表现稳定且分布均衡,安全性表现极优,可靠性与经济性较优,无明显短板;水力式在经济性和可靠性表现突出,但在智能性与环境友好性方面存在不足,极易受环境法规的限制以致被弃用;机械手式在智能性与环境友好性指标上略微突出,显示其智能绿色作业潜力,但整体分数较低,受限于作业性价比和结构载荷,目前仍有很大进步空间。

最后,在所有准则层加权得分的基础上计算各方案的综合得分:

$$S = \sum_{p=1}^{5} \omega_p \times S_p \tag{7}$$

对结果进行线性插值处理,将其映射至百分制区间,得到旋转耙式、水力式和机械手式的最终综合得分分别为 80.1、76.3 和 70.2。

表 4　GERIS 框架下各指标全局权重及各采集方式综合得分

Table 4　Weights and scores of different collection methods based on GERIS criteria

指标	全局权重	得分		
		旋转耙式	水力式	机械手式
环境友好性	0.230	72	60	81
悬浮沉积物羽流浊度控制能力	0.069	16	13	17
沉积物再沉积厚度控制能力	0.054	15	12	17
底层破坏深度控制能力	0.065	17	13	18
采集噪声控制能力	0.022	12	10	13
光污染控制能力	0.020	12	12	16
经济性	0.290	83	85	63
采集能力	0.090	15	27	10
采集率	0.096	22	22	16
回采率	0.057	21	18	18
能效	0.047	25	18	19
可靠性	0.218	81	83	63
结构简洁性	0.046	18.5	19	13.5
控制逻辑易用度	0.036	16	16.5	12.5
作业稳定性	0.090	29.5	28.5	21
工程验证度	0.046	17	19	16
智能性	0.076	72.5	65	79
环境感知与实时建模	0.015	14.5	11	14.5
智能决策与控制算法	0.017	13	15	13
故障预判与应急能力	0.017	14	11	15.5
智能作业与路径规划	0.015	15	11	19
采集模块智能协同与优化	0.012	16	17	17
安全性	0.184	88	80	70
避免失控可能性	0.081	30.5	25	10
故障蔓延抑制能力	0.043	23	21	24.5
自我保护完备度	0.033	17.5	17	18
碰撞耐受结构完整度	0.027	17	17	17.5

从当前技术成熟度与环境适应性综合评价来看,旋转耙式采集在经济性、环境友好性与安全性方面表现均衡,综合得分最高,具备商业化采集的良好基础。需要指出的是,以上结果仅反映当前技术条件下的阶段性结论,并不代表各采集方式的最终潜力。随着深海感知、自主控制、浮力调节与能源管理等关键技术的突破,水力式采集与机械手式采集的短板有望得到改善,尤其机械手式采集在精细化与智能化作业方面优势明显,未来将在高价值区具备竞争优势。因此,在确定当前优选方案的同时,应持续关注各采集方式的技术演进与应用升级,以保障系统的长期适应性与可持续性。

4　结论

1) 以 GERIS(绿色、经济、可靠、智能、安全)准则为总体框架,构建了深海多金属结核采集方式的技术评价体系。通过层次分析法结合专家评估,建立了包含 22 个二级指标的多层决策模型,实现了从定性判断到定量分析的转化,为不同典型采集方式的综合比较提供了统一且可量化的依据。

2) 层次分析法计算结果表明,经济性(权重 0.290)与环境友好性(权重 0.230)是影响采集方式优选的主要因素,可靠性(权重0.218)与安全性(权重 0.184)其次,同样需要慎重考虑。该权重分布揭示出当前采集系统设计应在保证经济效益的前提下,满足环境法规约束,并且尽可能使得作业运行可靠安全。而智能性(权重 0.076)虽权重较低,但代表了未来系统优化与智能化升级的潜力方向。

3) 基于权重体系与专家评分结果,旋转耙式、水力式与机械手式 3 种典型采集方式的综合得分分别为 80.1、76.3 和 70.2。旋转耙式在安全性、可靠性与经济性方面表现优秀,作业稳定、效率高且环境扰动小,具备较高的工程化与商业化可行性;水力式结构简洁、效率突出,但能耗偏高、环境友好性不足;机械手式经济性较弱、结构复杂,且目前安全性未知,整体成熟度有限,但在智能化与精细化采集方向具有潜在发展空间。总体而言,旋转耙式是当前阶段的优选方案,而水力式与机械手式在未来关键技术突破或政策优化后仍具发展潜力。

参考文献(References):

[1] 刘成军,李满红,郑皓,等. 国际海底矿区竞争格局与应对策略[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):8-13.
LIU Chengjun, LI Manhong, ZHENG Hao, et al. Competitive landscape and coping strategies for international seabed exploration areas[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):8-13.

[2] 张明,郑皓,双志,等. 新型深海多金属结核非连续采矿作业系统研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):6-12.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, SHUANG Zhi,et al. A new type of discontinuous mining system for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):6-12.

[3] 费龙,郑成荣,金强,等. 深海多金属结核开采装备技术发展综述[J]. 船舶, 2024,35(6):1-14.
FEI Long, ZHENG Chengrong, JIN Qiang, et al. Overview of the development of equipment and technology for deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Ship & Boat, 2024,35(6):1-14.

[4] 刘泽霖,陈时平,郑皓,等. 深海采矿沉积物羽流静水扩散特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):63-68.
LIU Zelin, CHEN Shiping, ZHENG Hao,et al. Experimental study on

diffusion characteristics of sediment plumes in still water during deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):63-68.

[5] 中国海洋工程咨询协会. 海底多金属结核采矿系统技术指南:T/CAOE 40-2021[S].
China Association of Oceanic Engineering. Technical guidelines for subsea polymetallic nodules mining system: T/CAOE 40-2021[S].

[6] 武尚荣,陈帮洪,费志文. 基于改进 AHP-TOPSIS 评价模型的缓倾斜中厚磷矿采矿方法优选[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):52-57.
WU Shangrong, CHEN Banghong, FEI Zhiwen. Optimization of mining methods for gently inclined phosphate ore body based on improved AHP-TOPSIS model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):52-57.

[7] LI Y H, HU Z Q. A review of multi-attributes decision-making models for offshore oil and gas facilities decommissioning[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2022,7(1):58-74.

[8] ZHANG X Z, ZUO Y H, WEI J K, et al. A review on underwater collection and transportation equipment of polymetallic nodules in deep-sea mining[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(5):788.

[9] KIM S, CHO S G, LEE M, et al. Reliability-based design optimization of a pick-up device of a manganese nodule pilot mining robot using the Coandă effect[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019,33(8):3665-3672.

[10] JIA H, YANG J, SU X H, et al. Theoretical prediction on hydraulic lift of a Coandă effect-based mining collector for manganese nodule[J]. Energies, 2022,15(17):6345.

[11] 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.

[12] SUDARVELAZHAGAN K, SRINIVAS K, PRADEEP KUMAR M, et al. Experimental investigation and optimization of polymetallic nodule mining by mechanical pick-up device on deep-sea using RSM[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023,41(3):254-268.

[13] WEI D B, YANG Q, SHU X, et al. Impact of hydraulic collection of deep-sea polymetallic nodules on sediment erosion and benthic organisms[J]. Journal of Soils and Sediments, 2025,25(4):1437-1452.

[14] Impossible Metals. Eureka III pilot collector plume modeling study-final report[EB/OL]. (2024-10-04)[2025-04-08]. https://drive.google.com/file/d/11S6Vsi0VfMNKdjNrujWStleoEK1XAmzd/view.

[15] LIU Z H, LIU K, CHEN X G, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(9):1083-1115.

[16] SHA F, XI M S, CHEN X G, et al. A recent review on multi-physics coupling between deep-sea mining equipment and marine sediment[J]. Ocean Engineering, 2023,276:114229.

[17] HITCHIN B, SMITH S, KRÖGER K, et al. Thresholds in deep-seabed mining: A primer for their development[J]. Marine Policy, 2023,149:105505.

[18] ISA. ISA hosts the first in-person meeting of international experts selected to develop environmental threshold values for deep-seabed mining[EB/OL]. (2024-06-28)[2025-04-25]. https://www.isa.org.jm/news/isa-hosts-the-first-in-person-meeting-of-international-experts-selected-to-develop-environmental-threshold-values-for-deep-seabed-mining-2.

[19] 陈泽坤,王雪明,夏建新. 深海采矿羽流分析及其环境影响评估研究进展[J]. 船舶, 2024,35(6)110-120.
CHEN Zekun, WANG Xueming, XIA Jianxin. Research progress on deep-sea mining plume analysis and environmental impact assessment[J]. Ship & Boat, 2024,35(6):110-120.

[20] STENVERS V I, HAUSS H, BAYER T, et al. Experimental mining plumes and ocean warming trigger stress in a deep pelagic jellyfish[J]. Nature Communications, 2023,14:7352.

[21] MA W B, SCHOTT D, RHEE C V. Numerical calculations of environmental impacts for deep sea mining activities[J]. Science of the Total Environment, 2019,652:996-1012.

引用本文:任显豪,刘莉红,魏定邦,等. 基于 GERIS 准则的深海多金属结核采集方式比较评估研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):26-32.
REN Xianhao, LIU Lihong, WEI Dingbang, et al. Comparative evaluation of deep-sea polymetallic nodule collection technologies based on GERIS criteria[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):26-32.