

于起, 何高文, 杨永. 声学探测技术在富钴结壳勘探中的应用及展望[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 83-92.

YU Qi, HE Gaowen, YANG Yong. Status quo and prospect in acoustic detection technology for submarine cobalt-rich crust exploration[J].

Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 83-92.

声学探测技术在富钴结壳勘探中的应用及展望

于起^{1,2,3}, 何高文^{2,3*}, 杨永^{2,3}

(1 中国地质科学院, 北京 100037; 2 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 511458;

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 511458)

摘要:富钴结壳是深海固体矿产之一, 其资源潜力巨大, 已成为世界各国竞相调查的重要对象。声学探测技术作为一种海洋地球物理探测技术, 因其在大面积调查和局部连续精细勘探方面的独特优势, 在富钴结壳资源调查中得到了广泛应用。在搜集整理国内外相关文献的基础上, 概述了富钴结壳的分布特征, 分析传统勘探方法的不足, 系统介绍多波束、侧扫声呐、浅地层剖面、原位高频测厚等声学探测技术在富钴结壳勘探中的应用现状。通过比较分析国内外声学探测技术发展现状以及未来富钴结壳勘探需求, 提出 3 点未来发展趋势: 开发一体化声学探测技术以实现海底特性的综合性测量; 综合利用深海潜水器以实现近底高精度探测; 深度融合大数据和人工智能技术以实现海量声学数据的智能化处理。

关键词:富钴结壳; 分布特征; 深海勘探; 声学探测技术

中图分类号: P736; P744

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.031

0 引言

富钴结壳又称铁锰结壳、钴结壳(通常简称“结壳”), 是继多金属结核之后发现的又一重要的深海固体沉积矿产资源, 其元素种类丰富、形态多样, 常赋存于水深范围为 400~4 000 m 的海山表面硬质基岩之上^[1-4]。富钴结壳在太平洋、印度洋和大西洋均有分布, 以中、西太平洋海域最为富集, 同时, 三大洋富钴结壳元素的含量特征具有显著差异^[5-8]。富钴结壳的空间分布与厚度变化受多种因素的共同影响, 在不同海域或者同一海域的不同海山, 其空间分布和厚度变化差异较大^[2,3,6,9-16]。

富钴结壳的大规模调查始于 20 世纪 80 年代^[17], 在勘探初期, 主要采用地质拖网取样的方式采集结壳样品, 但是这种方法通常难以获得采样点

的准确位置信息, 且作业效率较低、调查精度较差。随着科技的进步, 电视抓斗、深海浅钻、海底摄像等更为先进的调查设备结合水下定位技术逐渐应用到结壳调查中, 大大提高了调查精度。以上方法多为直接调查方法, 是结壳资源探测评价的重要手段, 但这些方法受作业条件、天气海况和海底地形等因素影响较大^[18-23]。

近二十年来, 声学探测技术因其独特优势在海洋调查研究等领域倍受关注^[24-28]。特别是多波束、侧扫声呐、浅地层剖面、原位高频测厚等海底声学探测技术发展迅速, 在富钴结壳资源勘探中应用广泛。多波束系统不仅可以用来全覆盖测深^[29-30], 还可以利用回波强度数据进行海底底质类型的研究^[10,19,21,31]。侧扫声呐常用来对海底区域的大规模扫测, 获取海底地貌等信息^[32-33]。另外, 还可以结合地质取样和海底摄像资料, 对声回波强度变化下的不同底质类型进行初步判读^[34-35]。浅地层剖面探测技术不仅可以用来划分海山的沉积类型, 区分沉积物和基岩/结壳, 还可以结合地质取样和海底摄像资料确定沉积成岩时代和结壳与沉积物的分布界限, 推断一定范围内富钴结壳的厚度^[12,36-39]。原位高频测厚技术基于 ROV、AUV 等深海潜水器,

收稿日期: 2023-02-19

资助项目: 国家自然科学基金(91958202, 42072324); 地质联合基金(U2244222)

第一作者: 于起(1996—), 男, 在读硕士, 主要从事深海矿产勘查方面的研究工作. E-mail: 1615661823@qq.com

* 通讯作者: 何高文(1968—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事深海矿产资源勘查方面的研究工作. E-mail: hegaowen@163.com

主要用于富钴结壳的厚度测量。东京大学 BLAIR THORNTON 研究团队^[40-43]和中国科学院声学研究所冯海泓团队^[44-45]为此开展了大量的研究工作,并致力于不断提高富钴结壳的测厚与矿体分布估算精度。

声学探测技术在大面积调查和局部连续精细勘探方面均具有显著优势,在深海富钴结壳资源勘探中发挥着越来越重要的作用,持续加强技术研发和实际应用对提高我国深海富钴结壳资源勘探水平和能力具有重要意义。本文在分析富钴结壳分布特征的基础上,系统阐述了多波束、侧扫声呐、浅地层剖面和原位高频声学测厚技术在富钴结壳勘探中的应用,并提出了对声学探测技术未来发展的几点展望。

1 富钴结壳分布特征

富钴结壳是一种深海固体沉积矿物,富含 Co、Ni、Cu、Mn、稀有地质元素(REE)、铂族元素(PGE)等关键金属元素,尤其以 Co 最为富集,可为绿色新兴产业发展提供战略资源保障。富钴结壳常表现为 3 层构造,比表面积较大,最高可达 300 m²/g,通常呈板状、砾状或结核状赋存于海山表面的硬质基岩之上^[2-3,6]。主要分布水深为 400~4 000 m,在太平洋、大西洋和印度洋均有分布,其中以中、西太平洋海域的结壳最为富集。在 1 500~2 500 m 水深范围内,其矿点分布比例占已知矿点总数的 73.3%^[7]。另外,在极地海域也有所发现,但因常年冰封,富钴结壳矿产资源的调查研究程度较低,为揭示其分布特征还需进行更全面的调查和取样工作^[2,6-8,46]。通过对比中太平洋、大西洋和印度洋海域结壳矿床元素的平均组分,可以看出三大洋的结壳元素含量特征具有显著差异,中太平洋海域的结壳矿床中 Co、Ni 和 Mn 的含量相对较高,而在大西洋和印度洋海域的结壳矿床中 Fe 和 Cu 含量相对较高^[5-6]。

富钴结壳的空间分布受沉积覆盖、海底地形、海水深度、最低含氧带(OMZ)、碳酸盐补偿深度(CCD)等多种因素的共同影响^[2-3,6,11,13]。其中,由钙质远洋沉积、碳酸盐岩沉积及重力作用引起的滑塌沉积等形成的沉积物空间分布特征,是影响海山结壳宏观分布的重要地质因素^[10]。除此之外,海底地形对结壳的空间分布也影响显著。虽然富钴结壳在海山、洋脊、海盆和大陆坡上均有分布,但是结壳在海山分布数量远远多于其他地形,约占总数量的 84.0%^[2,7]。其中,板状结壳是海山结壳的主要类型,

主要分布在海山斜坡及平顶山边缘,周围少见碎屑沉积物;砾状结壳与钴结核则主要分布在海山山顶、斜坡坡脚等周围有沉积物覆盖且地形较为平坦的区域^[3,13]。张富元等^[9]认为在一定范围内富钴结壳金属元素的富集与海水深度具有明显的相关性,由海山平台到斜坡上部,结壳覆盖率具有随水深增大而增大并呈现分段变化的特征。然而,由海山斜坡上部往下,结壳覆盖率则呈现随水深增大而减小的特点,富钴结壳通常在 800~2 500 m 水深范围内最为富集^[6,11]。一般情况下认为,富钴结壳产出于最低含氧带以下、碳酸盐补偿深度以上。最低含氧带作为结壳成矿物质来源的重要影响因素,直接控制成矿元素的供给与扩散;碳酸盐补偿深度是重要的海洋化学界面和相界限,不仅控制着沉积类型的分布,还影响着沉积速率与结壳的形成和富集^[2,12,16]。

富钴结壳按铁锰壳层厚度(简称壳层厚度)可以划分为结膜、结皮和结壳 3 种类型^[47]。据调查,不同海域或者同一海域的不同海山富钴结壳厚度变化范围较大,小到几毫米,大到几百毫米^[14]。富钴结壳的厚度变化与沉积速率、海山地形、最低含氧带、下伏基岩等因素密切相关^[2,3,9,13-16]。调查研究表明,结壳等自生矿物在无沉积或沉积速率低的环境下形成的结壳厚度大、品位高、更为富集,揭示了沉积速率低的环境更有利于结壳生长^[2,15]。板状结壳在海山斜坡破折处往往更为发育,生成的结壳更厚;海山坡折处往下,由于海山侧翼的块体运动与沉积物的再加工作用,结壳厚度随着海水深度的增加而逐渐变薄;在地形平坦处,由于沉积物覆盖,不利于结壳生长,因此结壳往往不发育或以埋藏型结壳存在^[2,13,48]。最低含氧带对结壳厚度也有较大影响,通过海山成矿作用时间间接影响结壳成矿厚度。海山高,受最低含氧带成矿作用时间长,结壳生长时间长,结壳厚度大;海山低,受最低含氧带成矿作用时间短,结壳生长时间短,结壳厚度小^[2,9,21]。富钴结壳厚度与下伏基岩的关系较为复杂,基岩的岩石类型、形成时代、风化程度、稳定性等都会对结壳的生长发育造成不同程度的影响^[3,15-16,48]。

2 声学探测技术在富钴结壳勘探中的应用现状

声波、电磁波都是常见的信息载体,是传递信息的媒介。然而,声波不同于电磁波,是一种弹性波,具有良好的指向性和传播性。在海水中传播时,声能量衰减速度更慢、传播距离更远,接触到海底

还会发生反射、折射和散射现象。同时, 在入射波方向上还会接收到由声散射引起的回波, 也称为后向散射、背散射^[10,24]。因此, 声波常被作为信息传播的载体, 广泛应用于海洋工程、开发、资源勘探等各个领域^[27]。

近几十年来, 随着科学技术水平的不断提高, 多波束、侧扫声呐、浅地层剖面等海底声学探测技术得到快速发展^[26,28]。多波束和侧扫声呐基于声回波原理, 利用声学换能器向海底发射和接收声波, 获取采样点的位置和深度信息, 从而实现对海底形貌的测量。在测量的同时, 还可以获得海底底质的回波强度数据。由于声回波强度的大小主要依赖于海底底质的硬度和粗糙度, 所以在相同入射角下, 回波强度会随着底质硬度、粒度的增大而不断增大。因此, 可以通过海底底质的声回波强度数据及其底质信息, 实现对海底底质的分类^[19,27,35,49]。浅地层剖面探测是一种基于声波反射原理的海底声学探测方法, 利用低频声信号在不同物质分界面处传播时, 由于物性差异所引起的波速差异、振幅强弱和返回时间等信息, 实现对海底浅部地层结构及其分布的测量^[36-37]。但对于富钴结壳厚度的测量, 以上声学探测方法均难以适用。近年来, 一种基于深海潜水器的原位高频声学测厚技术得到快速发展。该系统利用高频声学探头发射声信号, 根据原频、差频信号反射波的时延差, 并结合富钴结壳的声速值估算结壳厚度, 实现了对富钴结壳厚度的近底原位测量^[40,44]。表 1 所示为常用声学探测技术在富钴结壳探测中的应用。

2.1 多波束探测技术

不同于传统的单波束探测, 多波束系统具有覆盖面广、测点密度大、工作效率高等特点, 在富钴结

壳勘探中应用广泛^[29,50]。KODAMA 和 MAEDA^[51]首次利用多波束回波强度数据对海山基岩出露、沉积覆盖以及富钴结壳的分布情况进行了简要分析。USUI 和 OKAMOTO^[21]在对密克罗尼西亚专属经济区海山富钴结壳调查工作中, 尝试性地利用多波束回波强度数据对该海山区的底质类型进行研究, 首先将声回波强度与海底摄像图像进行了详细对比分析, 再结合现有的地质取样资料对该海山区的底质类型进行分类, 最终得到了富钴结壳、未固结沉积物、海山滑塌沉积、碳酸盐岩等 4 种底质类型的空间分布范围, 证明了海山侧翼的高后向散射现象与覆盖的硬基质富钴结壳之间存在一定的相关性。YEO 等^[30]在对大西洋某热带地区海山富钴结壳的分布和水文控制研究中, 利用 EM120 多波束测深仪采集了整个海山的水深和回波强度数据, 并使用 MB-System 处理采集的水深数据, 利用 MB-System 内的特征映射模块“mbnavadjust”调整导航。JOO 等^[52]研究认为, 可以利用多波束回波强度变化与富钴结壳空间分布之间呈现的正相关关系来表征覆盖于海山山顶和斜坡外缘的富钴结壳空间分布特征。为证明这一想法, JOO 等^[53]利用多波束回波强度数据和海底摄像图像绘制出了西太平洋海山山顶和斜坡外缘的富钴结壳沉积空间分布图, 并成功验证了声回波强度变化与富钴结壳空间分布之间存在的正相关关系。

1994 年, 中国引进 2 套 SeaBeam2100 多波束测深系统, 分别安装在“海洋四号”(现更名为“海洋地质四号”)和“大洋一号”科考船。由此, 多波束探测技术在中国逐渐得到广泛应用。1997 年, “海洋四号”船首次在西太平洋麦哲伦海山区重点靶区利用多波束技术开展富钴结壳资源勘探^[29]。但受限于当时的技术水平, 多波束主要用于地形地

表 1 常用声学探测技术在富钴结壳探测中的应用

Table 1 The applications of common acoustic detection technologies in cobalt-rich crusts detection

技术名称	工作方式	获得声学参数	空间/地层分辨率/m	富钴结壳探测目标	优势与不足	参考文献
多波束系统	利用声学换能器向海底发射宽扇区覆盖声波, 并进行窄波束接收, 通过发射、接收形成的照射脚印, 对所测区域进行条带式测量	声回波强度	0.10~0.40	海山地形、地貌特征; 底质类型; 空间分布	可实现全覆盖, 工作效率; 船载方式、分辨率较低	文献[10, 21, 30-31, 49-54]
侧扫声呐	利用声学换能器向航迹两侧海底发射宽角度声波, 对所测区域进行大规模扫测	声回波强度	0.05	海山地形、地貌特征; 底质类型	深拖方式, 分辨率较高; 粗略空间定向	文献[34-35, 55]
浅地层剖面	利用声学换能器垂直向海底发射低频声波, 对所测区域进行连续走航式探测	反射波的波速、振幅和返回时间	0.10	沉积类型、特征; 结壳-沉积物分布界限; 结壳厚度	获取浅地层内部结构信息; 分辨率较低	文献[12, 36-39, 56]
原位高频测厚	基于深海潜水器利用高频声学探头, 对富钴结壳进行原位自动连续测厚	反射波的时延差; 富钴结壳的声速	0.01	结壳厚度; 矿体分布	近底原位, 分辨率高; 工作效率较低	文献[40-45, 57-62]

貌调查,未能开展海山底质类型的研究工作。程永寿^[63]基于以往航次采集的多波束、地质取样、海底摄像等资料,以太平洋3个海山为例,研究发现海山山顶的地质取样及海底摄像解释结果与声回波强度灰度分布有极高的吻合度,可以通过灰度分布图上的阴影区来圈定无结壳或少结壳的区域,为富钴结壳资源评价和结壳富集区圈定提供了新途径。杨永等^[10]基于大洋23、27航次科学考察中“海洋六号”(现更名为“海洋地质六号”)获得的多波束回波强度数据,首次对中太平洋潜鱼海山的底质类型进行尝试性研究。该研究把回波强度数据进行处理和统计分类,并将处理结果与该区的浅地层剖面和地质取样结果进行对比分析,得到了4种具有不同声回波强度特征的底质类型,分别为富钴结壳、钙质远洋沉积、碳酸盐岩基底及碎屑流沉积。同时,还分析了4种底质类型在该海山区的空间分布规律。YAO等^[54]基于大洋36航次中利用EM122多波束系统采集的测深、回波强度数据,和大洋37航次中利用载人潜水器“蛟龙号”采集的近底高精度水下定位数据,对西太平洋维嘉海山进行海山沉积物空间分布研究,确定了3种底质类型,分别为沉积物、富钴结壳、沉积物覆盖的富钴结壳,验证了声回波强度和高精度水下定位数据在富钴结壳资源描述和评价中的可行性。最近,YANG等^[31]基于2015年和2016年利用EM122多波束测深仪在嘉偕海山获得的高分辨率水深参数数据构建了数字水深模型(DBMs),并从DBM中提取BPI指数用于多尺度地形单元的定量分类。他们不仅成功将嘉偕海山的地形划分为4个不同的一阶地形单元和11个不同的二阶地形单元,还详细分析了各地形单元与沉积物分布之间的空间关系。

2.2 侧扫声呐技术

侧扫声呐作为一种声学遥测方法,最早应用于探测鱼雷等军事目的,后来由于海洋调查的需要,民用侧扫声呐逐渐发展起来。现在常用来获取海底地貌等信息,是海洋调查的重要工具之一^[32,64]。多波束和侧扫声呐的工作原理大致相同,都能实现海底全海深、全覆盖扫测。但是,由于两者接收波束的形式和处理方式的不同,多波束系统往往能够实现空间的精确定向,可以根据回波信号的特征参数进行回波时延检测以确定回波往返时间,从而获得更加准确的水深数据。然而,侧扫声呐一般只是实现了空间的粗略定向,依据回波信号在海底反向

散射时间的自然顺序检测并记录回波强度信息。相比于多波束,侧扫声呐适用水深和波束角的范围更广,获得的海底声像图质量更好、分辨率更高,能得到更为直观的海底声形态特征^[65-66]。在富钴结壳资源调查中,利用侧扫声呐能够实现对接壳海山区的大规模扫测,根据声回波强度变化辨别不同的地形地貌特征,并以此绘制出该结壳海山区的海底声像图。另外,还可以结合地质取样和海底摄像资料对所测海域海底底质类型进行研究^[33,35]。大洋DY115-21航次,中国“大洋一号”科学考察船利用搭载的SIS-3000XL型侧扫声呐对西太平洋马尔库斯-威克海岭一带的海山进行声学调查。徐建等^[34]利用同步获取的侧扫声呐灰度图对探测区的地形地貌特征进行了初步解释,对于那些地形相对平缓的区域,由于海底底质声回波强度变化较大,仅通过侧扫声呐灰度图无法准确辨别其海底底质类型,因此,他们结合地质取样和海底摄像资料对地形平缓区进行了综合讨论分析。大洋29航次,“海洋六号”船搭载中国第一套具有自主知识产权的深海拖曳观测系统——DTA-6000声学深拖系统,在采薇海山区进行了2条总长为54.6 km的测线探测任务。通过该侧扫结果可以有效区分沉积物分布区域和沉积物与基岩或结壳的混合区域^[55]。

需要指出的是,在海山富钴结壳勘探中,侧扫声呐和多波束探测技术虽然能够通过海底底质的声回波强度变化,对海山底质类型进行分类研究。但是由于发育有结壳的海山易受到复杂地形、地质特征以及钙质远洋沉积覆盖等多种因素的共同影响,仅通过声回波强度变化往往难以辨别。因此,还应结合地质取样、海底摄像等资料进行综合讨论分析。另外,对声回波强度数据的精细化处理也是回波探测应用的关键。

2.3 浅地层剖面探测技术

浅地层剖面探测是一种基于水声学原理进行连续走航式测量的地球物理学方法,是海底矿产资源勘探的重要方式之一^[37,67-68]。但区别于多波束和侧扫声呐,其发射频率较低,实际工作频率一般在几千赫兹到几万赫兹,具体数值与海底探测要求和海底沉积物类型等密切相关。浅地层剖面探测技术在富钴结壳资源勘探方面应用广泛,国内外专家学者已使用该方法对富钴结壳成矿区开展了大量的调查研究。LEE等^[36]对西太平洋Ogasawara断裂带(OFZ)附近的海山区进行海底浅剖测量,根据

声波反射原理与性质,结合海底结构和形态特征,得到了该海山区的清晰反射、模糊反射、双曲线反射 3 组共 9 种声学反射类型,并以此划分出了该海山区存在的多种沉积类型——远洋沉积、浊流沉积、碎屑沉积、滑塌沉积等。MEL'NIKOV 等^[38]利用浅剖探测技术对维嘉平顶山东部进行了详细的调查研究,通过分析获得的浅地层剖面数据推测该平顶山边缘和斜坡之上大面积出露的基底是由不同成因的灰岩(礁灰岩、浮游生物成因灰岩、微晶灰岩等)所组成,形成时代为阿普第阶—土伦阶—始新世。MEREDYK 等^[56]基于多波束、侧扫声呐和浅地层剖面数据,结合 ROV 海底摄像和 DSDP111 站点资料对纽芬兰东北部的 Orphan 海丘进行调查,研究发现该海丘表面发育有许多厚结壳,掩盖了地质取样中可能出现的露头。

2004 年,在 DY105-16A 航次中,何高文等^[39]首次联合利用浅剖探测和海底摄像对西太平洋某平顶海山进行系统调查,研究发现浅剖测量结果所揭示的海山浅部地层结构与结壳分布之间具有明显的相关性,沉积物分布的上界与结壳分布的下界往往相互对应。然后,他们将浅剖测量结果和海底摄像资料进行对比分析,确定了该平顶海山富钴结壳与沉积物的分布界限,为结壳分布区面积的确定提供了更加准确的依据。另外,通过结合探测目标的浅钻取样结果可以进一步推断一定范围内的结壳厚度,从而能够对富钴结壳资源量进行合理评估,并在一定程度上提高了结壳资源量的估算精度。在 2003 年和 2004 年 2 个航次的太平洋富钴结壳调查中,李守军等^[37]利用“大洋一号”船载的 TOPAS PS18 型浅地层剖面仪在马尔库斯-威克海岭的 N 海山完成了 6 条浅地层剖面测线,同时在海底摄像、深海浅钻等设备作业期间也同步进行浅剖探测,共计完成浅剖测线逾 3300 km,为该富钴结壳资源调查区海底浅部地层剖面特征、底质分布特征、海底表层介质地球物理反射特征的研究积累了大量数据。赵斌等^[12]基于大洋 36 和 41 航次的浅地层剖面数据,并结合 DSDP 钻井资料和前人的研究成果,对西太平洋维嘉平顶山山顶的沉积物浅部地层剖面特征、沉积环境、沉积时代、沉积物厚度分布特征等方面进行了详细的分析研究。除此之外,还根据维嘉平顶山沉积物特征及其厚度分布规律,划分出 4 个富钴结壳资源潜力区,对富钴结壳成矿区的筛选具有重要意义。

通过对比分析富钴结壳海山区的浅剖数据与

海底摄像、地质取样等资料,能够有效识别海山区基岩、富钴结壳、沉积物等不同底质类型,区分结壳与不同底质类型的分布界限。对富钴结壳海山区的调查研究具有重要意义,显著加快了富钴结壳资源勘探进程。

2.4 原位高频声学测厚技术

富钴结壳的厚度测量是开展富钴结壳矿产资源勘探的重要组成部分,是富钴结壳资源评价的关键环节^[25]。在以往的勘探过程中,富钴结壳的厚度测量主要是通过浅钻取样的方法来实现的。这种方法虽然准确性高、测量结果可靠,但是只能对目标采样区进行定点采样。在实际作业中常常存在工作量大、效率低、成本高等缺点,难以实现富钴结壳采样区的大规模连续测量。在很大程度上限制了富钴结壳资源勘探的工作效率,同时也在一定程度上阻碍了富钴结壳资源评价的工作进程^[40,44,57]。

自 21 世纪初以来,日本科学家一直尝试利用声学探测的方法来实现对深海富钴结壳厚度的连续测量,其中最具代表性的是东京大学 BLAIR THORNTON 教授及其团队。2009 年,该团队成功研制出一种可用于富钴结壳原位测厚的 3000 米级高频声学探头。另外,为实现对目标区域的自动连续测厚,他们开发了一种基于软件的峰值检测算法来自动处理并记录测厚数据。2010 年 6—7 月,他们基于 ROV(Hyper-Dolphin 号)搭载该设备在南鸟岛附近的海山进行了海试,并在此次试验中获得了预期的富钴结壳测厚结果,验证了该设备对富钴结壳进行广域测量的可行性^[40]。一直以来,精确估算富钴结壳的矿体分布对国内外科研团队来说都是一项极具挑战的科研难题。BLAIR THORNTON 研究团队为此也开展了大量的研究工作,尝试将一种可进行海底三维重建的视觉映射系统和高频声学测厚设备相结合,利用该声视系统具有的三维重建方法自动识别暴露的富钴结壳区域,然后再通过所得的富钴结壳测厚数据推测目标区域富钴结壳的矿体分布^[58]。在 NT10-11 航次期间,利用该声视系统对 Takuyo 海山的富钴结壳及其基岩进行声速和声衰减测量,成功得到了不同环境下的声衰减特征,验证了定量分析富钴结壳矿体分布的可行性^[41]。该团队的 NEETTIYATH 等^[42-43,59-60]基于 AUV(BOSS-A 号)搭载的高频声学探头在富钴结壳海山区开展了多次试验研究,创新性地利用图像处理、多模态传感器、信号处理等技术对获得的声

学测厚数据进行处理,进一步提高了富钴结壳矿体分布的估算精度。

2017年,中科院声学所东海站通过借鉴国内外相关技术的理论基础与成功经验,研制出中国第一代结壳矿层声学测厚仪——可编程相控参数阵列声学探测器 2017(PPAAP17)。该设备不仅采用多脉冲叠加技术抑制噪声提高了信噪比,还同时采用双频时延估计技术避开干扰信号的影响,提高了结壳厚度的测量精度^[44]。大洋 41B 航次,该设备首次搭载“海马”号 ROV 随“海洋六号”船对某海山山顶的富钴结壳成矿区进行试验性定点测厚。通过比较岩性样品厚度的真实值和测量值,所得结果符合资源评估要求^[61]。大洋 51 航次,中国利用 PPPAAP17 对深海富钴结壳厚度进行了现场测量,得到了精度更高、误差更小、结果更稳定的测厚数据,同时,还估算了所测目标海域富钴结壳的矿体分布,验证了该算法的可行性^[45]。2019年,中科院声学所东海站通过分析比较试验获得的富钴结壳测厚数据,对 PPPAAP17 进行了优化,成功研制出第二代结壳矿层声学测厚仪——可编程相控参数阵列声学探测器 2019 (PPAAP19)。为进一步提高富钴结壳测厚精度,王斌贤等^[57]利用水池试验分析比较了 3 种传统回波信号包络提取算法(希尔伯特变换、复小波变换、自相关)的性能特点,验证得出,使用希尔伯特变换和自相关算法分别提取原频信号和差频信号的包络会使计算性能更好。最近,HONG 等^[62]基于一种深度学习网络算法,利用 PPPAAP19 测得的声学数据,实现了对结壳厚度信息的精确解释和底质分类。另外,通过评估数据集上几种基线方法的性能,他们初步验证了仅以声学方法识别富钴结壳的二元分类方法的可行性。该方法的成功演示为未来声学探测技术的研发提供了良好的技术支撑,有利于提高富钴结壳勘探的工作效率。

原位高频声学测厚是近年发展起来的一种用于富钴结壳测厚的新兴声学探测技术,相关技术水平还不成熟。为快速确定富钴结壳开采区,提升探测工作效率,提高富钴结壳厚度和矿体分布的估算精度,设备测厚精度及其算法还有待进一步提高。另外,为更好地获得富钴结壳矿床的连续局部变化,提高测量分辨率,应加快水下下载技术的发展和应^[43,57,62]用。

3 未来声学探测技术的发展趋势

随着科学技术的不断进步,多波束、侧扫声呐、

浅地层剖面、原位高频测厚等声学探测技术发展迅速,在富钴结壳资源勘探中的应用也愈加广泛。目前,富钴结壳资源勘探正逐步进入一个全新的发展阶段,为满足精细化探测的需要,对探测精度、工作效率、数据分辨率等方面有着更加严格的要求。

3.1 开发一体化声学探测技术

在海底声学调查中,人们往往需要根据不同的研究目的和环境条件来选择合适的声学探测设备,从而可以更有效地获取各种海底特性信息。目前,声学探测异步测量方式仍然占据主导地位。虽然各种海底特性信息均可以利用与之相对应的声学探测设备测量得到,但是在海底特性的综合性测量中却显露出较多的问题。多类型、多数量的声学探测设备安装过程复杂而又繁琐,必须要经过反复校准和匹配。尤其是在深海近底探测中,深海潜水器受到体积、负载等方面的限制,难以搭载大量的声学设备。另一方面,由于不同类型声学探测系统的工作原理和探头安装方式不同,使得各类声学探测设备的定位、声呐姿态等信息即使同时进行测量也无法完全保持一致,从而无法实现对同一测量点的综合性测量。特别是遇到潮汐、波浪、海流等海洋环境时,声学探测异步测量结果的精细化融合就会变得异常困难,甚至处于无法融合的局面^[69-71]。相较于上述声学探测异步测量方式的弊端,一体化声学探测技术则体现出独特的优势^[71]:①降低水下平台搭载负荷,在保证探测功能的基础上,一体化声学探测技术可以有效精简声呐设备的数量,从而降低水下平台搭载负荷;②实现单航次多方位测量,一体化声学探测技术可以通过单次航行完成对海底目标的多方位测量,大大降低了海上作业的风险;③多数据精细化融合,由于一体化声学探测设备的定位、声呐姿态等信息具有天然的一致性,因此,获得的海底数据等信息基本上不存在数据融合难的问题。

目前,多波束与侧扫声呐系统均已具备了对海底地形、地貌特征进行同步测量的能力,同时在探测精度上体现出相互替代的发展趋势,并在一定程度上实现了二者的融合。即采用一种设备便可获得高精度、高密度、高分辨率的海底地形地貌的测点位置和图像信息,进而可以对海底探测目标进行全方位的定性、定量分析^[65,72]。但是由于在设备研发等方面还存在一些亟待解决的难点,到目前为止国内外还未出现可同时测量海底地形地貌及浅地

层剖面信息的声学探测设备。待解决难点主要存在于2个方面:①浅地层剖面探测与多波束和侧扫声呐的工作原理相互矛盾,前者是利用具有较强地层穿透能力的高指向性低频信号来获取浅地层剖面信息,而后者则是通过发射宽波束的高频声信号对海底表层信息进行探测,这给一体化声学探测设备的发射/接收阵列设计带来巨大困难^[26,64,73];②在海底综合性探测过程中,由于声波频率的差异,浅地层剖面的超高声源级与地形地貌回波信号的采集之间会造成干扰^[74]。未来一体化声学探测技术将有望广泛应用于富钴结壳资源勘探之中,实现对海山地形地貌、底质类型和浅部地层剖面的一体化高效测量,从而大大提高富钴结壳资源勘探效率。

3.2 综合利用深海潜水器

深海潜水器(DUV)是近些年快速发展起来的一种水下运载平台,不仅可以搭载各种电子、声学、光学、机械设备用于海底的近底探测和采样工作,还能够实现载人深潜。科学家能够被载人深潜器快速而精确地带到水下目标区域,进而对深海中的各种科学现象进行更为直观的观测和研究^[75-76]。深海潜水器主要包括载人潜水器(HOV)、无人潜水器(UUV)2大类,其中无人潜水器又被称为水下机器人,分为有缆遥控潜水器(ROV)、无缆自治潜水器(AUV)和混合型潜水器(HROV/ARV)。另外,ROV和AUV按其水下运动方式和智能化程度的不同有着更为详细的划分,深海潜水器正逐渐应用于深海研究的各个领域^[76-77]。随着富钴结壳资源勘探程度的不断提高,传统的船载、深拖等设备运载方式已无法满足现今结壳资源精细化探测的需要。富钴结壳资源勘探已逐渐向多形式、多类型、高精度的近底探测形式转变,深海潜水器在富钴结壳近底勘探中逐渐得到广泛应用。将声学探测技术与水下运载技术相结合,利用ROV、AUV、HOV等水下载体搭载多波束、侧扫声呐、浅地层剖面仪等声学探测设备,运行至靠近海底一定高度甚至贴近海底的区域,可以实现更加精细化的近底声学探测,大大提高了富钴结壳近底探测的工作效率^[40,49,78]。

在富钴结壳近底探测中,若要充分发挥深海潜水器的强大作用,需要依据不同的探测需求,来选择合适的深潜器进行深海作业。因此,若要充分发挥深海潜水器的最大勘探效力,需早日实现多类型水下深潜器的联合勘探。与此同时,还应提升水下勘探工具的研发力度,将深潜器与水下勘探工具完

美结合,对近底探测作业具有重要的现实意义。另外,还可以改善和提高相关辅助设备的工作性能,使其早日成为深海勘探的常规手段^[79]。目前,中国在深海潜水器的研发和应用等方面与国际先进水平相比仍有较大差距^[76-77],应继续广泛学习借鉴国内外先进的技术经验,加大对水下运载技术的研发投入,综合利用深海潜水器平台实现富钴结壳近底高效、高精度探测。

3.3 深度融合大数据和人工智能技术

近几十年,海洋声学探测技术得到快速发展,已广泛应用于海洋研究的各个领域,同时积累了大量的声学探测数据。但随着所积累数据的不断增多,传统的数据存储、管理、分析和应用手段却已无法满足当前发展的实际需要^[79-80]。大数据技术的出现为海量信息的处理带来了新的机遇与挑战,相较于传统数据模式,大数据技术在海量数据的采集、处理、集成、分析和解释等方面具有绝对优势^[81]。人工智能技术以数据为驱动,是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新兴技术科学。将大数据和人工智能技术与海洋声学探测技术进行深度融合,可实现海量声学数据的智能化、精细化处理,是当今信息时代海洋科学研究发展的必然趋势^[79,82]。若将其应用于富钴结壳资源声学探测中,可利用人工智能中的机器学习方法来处理海量的声学数据。通过不断提高学习效率来提取数据信息,并对所获得的声学数据进行更深层次的挖掘,剖析数据之间的关联,从而能够有效提高数据处理的效率和精度,实现海量声学数据的智能化处理。例如,在富钴结壳海山区底质类型研究中,可利用大数据和人工智能技术对富钴结壳、沉积物等底质类型进行智能化识别与分类。大数据和人工智能技术的深度融合,对富钴结壳资源勘探和评价以及未来富钴结壳资源成矿区的圈定具有巨大的实用价值和重要的现实意义。

4 结论

随着大洋富钴结壳资源勘探程度的不断加深,结壳拖网、抓斗等传统方式已无法满足富钴结壳大规模勘探的需要,探测精度更高、调查范围更广、工作效率更强的声学探测技术在富钴结壳资源勘探中的应用变得愈加广泛。目前,多波束、侧扫声呐、

浅地层剖面等声学探测技术及其设备发展已逐步趋于完善,在相关海底特性信息的获取上也越来越成熟。在未来,随着科学技术的不断发展与进步,一体化声学探测技术将会变为可能,海洋特性信息的综合性测量将会使富钴结壳资源勘探效率得到显著提高;愈加先进的水下运载技术将会有效提高近底声学探测的工作效率;大数据和人工智能技术与声学探测技术的深度融合将会使海量声学数据的处理变得更加准确高效。深海富钴结壳资源评价与开发的进程也将随着未来声学探测技术的发展得以不断加快和完善。

参考文献:

- [1] HALBACH P. Processes controlling the heavy metal distribution in Pacific ferromanganese nodules and crusts[J]. *Geologische Rundschau*, 1986, 75(1): 235-247.
- [2] HEIN J R, KOSCHINSKY A, BAU M, et al. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific[M]//Cronan D S. Handbook of Marine Mineral Deposits. Florida: CRC Press, 2000: 239-279.
- [3] OKAMOTO N, USUI A. Regional distribution of co-rich ferromanganese crusts and evolution of the seamounts in the Northwestern Pacific[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2014, 32(3): 187-206.
- [4] 韦振权,何高文,邓希光,等.大洋富钴结壳资源调查与研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 460-472.
- [5] HALBACH P, MARBLER H. Marine ferromanganese crusts: contents, distribution and enrichment of strategic minor and trace elements[M]//BGR-Report. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2009: 1-73.
- [6] HEIN J R, MIZELL K, KOSCHINSKY A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high and green technology applications: comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- [7] 刘永刚,何高文,姚会强,等.世界海底富钴结壳资源分布特征[J]. *矿床地质*, 2013, 32(6): 1275-1284.
- [8] HEIN J R, KOSCHINSKY A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 13: 273-291.
- [9] 张富元,章伟艳,朱克超,等.太平洋海山钴结壳资源评价[M].北京:海洋出版社,2011: 143-160.
- [10] 杨永,何高文,朱克超,等.利用多波束回波强度进行中太平洋潜鱼海山底质分类[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 718-728.
- [11] HALBACH P E, JAHN A, CHERKASHOV G. Marine co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated world-wide resources[M]//Deep-Sea Mining. Cham: Springer International Publishing, 2017: 65-141.
- [12] 赵斌,吕文超,张向宇,等.西太平洋维嘉平顶山沉积特征及富钴结壳资源意义[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 18-26.
- [13] 何高文,杨永,韦振权,等.西太平洋中国富钴结壳勘探合同区矿床地质[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2649-2664.
- [14] 张富元,章伟艳,任向文,等.全球三大洋海山钴结壳资源量估算[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 88-105.
- [15] 矫东风,金翔龙,初凤友,等.厚结壳的形成条件及控制因素分析[J]. *矿床地质*, 2007, 26(3): 296-306.
- [16] USUI A, NISHI K, SATO H, et al. Continuous growth of hydrogenetic ferromanganese crusts since 17 Myr ago on Takuyo-Daigo Seamount, NW Pacific, at water depths of 800-5 500 m[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87: 71-87.
- [17] 王淑玲,白凤龙,黄文星,等.世界大洋金属矿产资源勘查发现现状及问题[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 160-170.
- [18] YAMAZAKI T, TSURUSAKI K, CHUNG J S. A gravity coring technique applied to cobalt-rich manganese deposits in the Pacific Ocean[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 1996, 14(4): 315-334.
- [19] ANDERSON J T, HOLLIDAY V, KLOSER R, et al. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes[J]. *ICES Cooperative Research Report*, 2007, 286: 1-6.
- [20] 耿雪樵,徐行,刘方兰,等.我国海底取样设备的现状与发展趋势[J]. *地质装备*, 2009, 10(4): 11-16.
- [21] USUI A, OKAMOTO T. Geophysical and geological exploration of cobalt-rich ferromanganese crusts: an attempt of small-scale mapping on a Micronesian seamount[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2010, 28(3): 192-206.
- [22] 何水原,罗伟东,于彦江,等.动力定位系统在大洋富钴结壳调查中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(10): 57-64.
- [23] 罗伟东,何水原.岩石拖网在富钴结壳调查中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(9): 66-70.
- [24] 朱维庆.海洋声学技术和信息处理[J]. *世界科技研究与发展*, 2000, 22(4): 41-44.
- [25] 何清华,袁碧华.用声波检测大洋富钴结壳厚度的初步探讨[J]. *采矿技术*, 2003, 3(2): 93-95.
- [26] 金翔龙.海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1243-1249.
- [27] ANDERSON J T, VAN H D, KLOSER R, et al. Acoustic seabed classification: current practice and future directions[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(6): 1004-1011.
- [28] 杨永,朱克超,邓希光,等.声学勘探技术在大洋矿产资源勘查中的应用前景[J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 947-948.
- [29] 张国祯.富钴结壳矿区申请需要解决的两个重要问题[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(10): 19-22.
- [30] YEO I A, HOWARTH S A, SPEARMAN J, et al. Distribution of and hydrographic controls on ferromanganese crusts: Tropic Seamount, Atlantic[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 114: 103131.
- [31] YANG Y, HE G W, LIU Y G, et al. Automated multi-scale classification of the terrain units of the Jiaxie Guyots and their mineral resource characteristics[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(7): 129-139.
- [32] JOHNSON H P, HELFERTY M. The geological interpretation of side-scan sonar[J]. *Reviews of Geophysics*, 1990, 28(4): 357-380.

- [33] ATALLAH L, SMITH P P. Automatic seabed classification by the analysis of side-scan sonar and bathymetric imagery[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2004, 151(5): 327-336.
- [34] 徐建, 郑玉龙, 包更生, 等. 基于声学深拖调查的海山微地形地貌研究: 以马尔库斯-威克海岭一带的海山为例[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 17-24.
- [35] 冯强强, 温明明, 牟泽霖, 等. 侧扫声呐在富钴结壳探测中的应用前景[J]. *地质学刊*, 2016, 40(2): 320-325.
- [36] LEE T G, HEIN J R, LEE K, et al. Sub-seafloor acoustic characterization of seamounts near the Ogasawara Fracture Zone in the Western Pacific using chirp (3-7 kHz) sub-bottom profiles[J]. *Deep-Sea Research 1*, 2005, 52(10): 1932-1956.
- [37] 李守军, 陶春辉, 初凤友, 等. 浅地层剖面在富钴结壳调查研究中的应用[J]. *海洋技术*, 2007, 26(1): 54-57.
- [38] MEL' NIKOV M E, TUGOLESOV D D, PLETNEV S P. The structure of the incoherent sediments in the Ita Mai Tai Guyot (Pacific Ocean) based on geoacoustic profiling data[J]. *Oceanology*, 2010, 50(4): 582-590.
- [39] 何高文, 梁东红, 宋成兵, 等. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2005, 35(4): 509-512.
- [40] THORNTON B, ASADA A, URA T, et al. The development of an acoustic probe to measure the thickness of ferromanganese crusts[C]//Oceans 2010 IEEE, Sydney: IEEE, 2010: 1-9.
- [41] THORNTON B, ASADA A, BODENMANN A, et al. Instruments and methods for acoustic and visual survey of manganese crusts[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(1): 186-203.
- [42] NEETTIYATH U, THORNTON B, SANGEKAR M, et al. Automatic extraction of thickness information from sub-surface acoustic measurements of manganese crusts[C]//Oceans 2017 - Aberdeen, Aberdeen: IEEE, 2017: 1-7.
- [43] NEETTIYATH U, THORNTON B, SUGIMATSU H, et al. Automatic detection of buried Mn-crust layers using a sub-bottom acoustic probe from AUV based surveys[C]//Oceans 2022 - Chennai, Chennai: IEEE, 2022: 1-7.
- [44] 冯海泓, 任晓寰, 黄敏燕, 等. 探测深海富钴结壳厚度的参量阵声呐系统关键技术研究[J]. *声学技术*, 2020, 39(3): 267-271.
- [45] HONG F, FENG H H, HUANG M Y, et al. China's first demonstration of cobalt-rich manganese crust thickness measurement in the Western Pacific with a parametric acoustic probe[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4300.
- [46] 黄威, 路晶芳, 龚建明, 等. 北极海域铁锰结核和结壳的分布与成因[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(7): 11-16.
- [47] 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. GB/T 35572-2017, 大洋富钴结壳资源勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [48] HEIN J R. Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin and research activities[M]//Minerals Other than Polymetallic Nodules of the International Seabed Area. Jamaica: International Seabed Authority, 2004: 188-256.
- [49] 张同伟, 秦升杰, 唐嘉陵, 等. 深水多波束测深系统现状及展望[J]. *测绘通报*, 2018, 5: 82-85.
- [50] HUGHES CLARKE J E. *Multibeam echosounders*[M]//Submarine Geomorphology. Cham: Springer International Publishing, 2018: 25-41.
- [51] KODAMA T, MAEDA K. Interpretation of a backscattering image for the prospecting of cobalt-rich manganese crust[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 100(4): 2667.
- [52] JOO J, KIM J, KO Y, et al. Characterizing geomorphological properties of Western Pacific seamounts for cobalt-rich ferromanganese crust resource assessment[J]. *Economic and Environmental Geology*, 2016, 49(2): 121-134.
- [53] JOO J, KIM S S, CHOI J W, et al. Seabed mapping using shipboard multibeam acoustic data for assessing the spatial distribution of ferromanganese crusts on seamounts in the Western Pacific[J]. *Minerals*, 2020, 10(2): 155.
- [54] YAO H Q, LIU Y G, YANG Y, et al. Assessment of acoustic backscatter intensity surveying on deep-sea ferromanganese crust: constraints from Weijia Guyot, Western Pacific Ocean[J]. *China Geology*, 2021, 4(2): 288-298.
- [55] 曹金亮, 刘晓东, 张方生, 等. DTA-6000声学深拖系统在富钴结壳探测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 173-181.
- [56] MEREDYK S P, EDINGER E, PIPER D J W, et al. Enigmatic deep-water mounds on the Orphan Knoll, Labrador Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 6: 2296-7745.
- [57] 王斌贤, 冯海泓, 黄敏燕, 等. 基于参量阵双通道信息的富钴结壳高精度测厚算法[J]. *声学技术*, 2021, 40(4): 464-469.
- [58] THORNTON B, BODENMANN A, ASADA A, et al. Acoustic and visual instrumentation for survey of manganese crusts using an underwater vehicle[C]//2012 Oceans, Hampton Roads: IEEE, 2012: 1-10.
- [59] NEETTIYATH U, THORNTON B, SANGEKAR M, et al. An AUV based method for estimating hectare-scale distributions of deep sea cobalt-rich manganese crust deposits[C]//Oceans 2019-Marseille, Marseille: IEEE, 2019: 1-6.
- [60] NEETTIYATH U, THORNTON B, SANGEKAR M, et al. Deep-Sea robotic survey and data processing methods for regional-scale estimation of manganese crust distribution[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(1): 102-114.
- [61] 张旭. 结壳矿层声学测厚仪在大洋富钴结壳资源勘察中的应用[J]. *机电工程技术*, 2018, 47(5): 157-159.
- [62] HONG F, HUANG M Y, FENG H H, et al. First demonstration of recognition of manganese crust by deep-learning networks with a parametric acoustic probe[J]. *Minerals*, 2022, 12(2): 249.
- [63] 程永寿. 西北太平洋海山富钴结壳资源评价和矿区圈定[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [64] 吴自银, 郑玉龙, 初凤友, 等. 海底浅表层信息声探测技术研究现状及发展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 58-65.
- [65] 温志坚, 何志敏. 应用侧扫声呐的海底目标探测技术研究[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(22): 28-29.

- [66] 郑晖. 多波束与侧扫声呐在水下探测中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2020, 10: 34-36.
- [67] STEEPLES D W, GREEN A G, MCEVILLY T V, et al. A workshop examination of shallow seismic reflection surveying[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(11): 1641-1647.
- [68] 杨国明, 朱俊江, 赵冬冬, 等. 浅地层剖面探测技术及应用[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 147-162.
- [69] RIOBLANC M. High productivity multi-sensor seabed mapping sonar for marine mineral resources exploration[C]//2013 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium, Rio de Janeiro: IEEE, 2013: 1-6.
- [70] FEZZANI R, ZERR B, MANSOUR A, et al. Fusion of swath bathymetric data: application to AUV rapid environment assessment[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(1): 111-120.
- [71] 马晶鑫. 海底地形地貌与浅地层剖面一体化声学探测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [72] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.
- [73] SPIESS F N. Seafloor research and ocean technology[J]. *Marine Technology Society Journal*, 1987, 21(2): 5-17.
- [74] 何林帮. 基于多波束和浅剖的海底浅表层沉积物分类关键问题研究[J]. 测绘学报, 2016, 45(12): 1498-1512.
- [75] DEROOS B G, WILSON G, LYON F, et al. Technical survey and evaluation of underwater sensors and remotely operated vehicles[R]. Battelle Columbus: U.S. Coast Guard Research and Development Center, 1993.
- [76] 朱大奇, 胡震. 深海潜水器研究现状与展望[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 205-216.
- [77] 徐伟哲, 张庆勇. 全海深潜水器的技术现状和发展综述[J]. 中国造船, 2016, 57(2): 206-221.
- [78] 刘永刚, 姚会强, 邓希光. 蛟龙号HOV在海山结壳资源勘查中的应用[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 231-232.
- [79] 徐行. 我国海洋地球物理探测技术发展现状及展望[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 1-12.
- [80] LI S, CHEN J P, LIU C. Overview on the development of intelligent methods for mineral resource prediction under the background of geological big data[J]. *Minerals*, 2022, 12: 616.
- [81] 刘智慧, 张泉灵. 大数据技术研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 957-972.
- [82] 张雪薇, 韩震, 周玮辰, 等. 智慧海洋技术研究综述[J]. 遥感信息, 2020, 35(4): 1-7.

Status quo and prospect in acoustic detection technology for submarine cobalt-rich crust exploration

YU Qi^{1,2,3}, HE Gaowen^{2,3*}, YANG Yong^{2,3}

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 511458, China; 3 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Cobalt-rich crusts are one of the deep-sea mineral resources with great potential, and have become an important target of exploration in the world. Acoustic detection technology has been widely used to search for cobalt-rich crust resources due to its unique advantages in large-area survey and local continuous fine exploration. The distribution characteristics of cobalt-rich crusts are summarized, the traditional exploration methods are commented, the application status of acoustic detection technologies such as multi-beam system, side-scan sonar, sub-bottom profiler probe are reviewed, and in-situ high-frequency thickness measurement in the exploration of cobalt-rich crusts is introduced. In addition, the status quo in research and development in this regard in China and other countries of the world are compared, and three suggestions on future demand of cobalt-rich crusts exploration are proposed: to develop integrated acoustic detection technology to realize comprehensive measurement of seafloor characteristics, to make comprehensive use of deep-sea submersible to achieve high-precision near seabed exploration, and to deeply integrate the Big Data and artificial intelligence technology to obtain intelligent processing of massive acoustic data.

Key words: cobalt-rich crust; distribution characteristics; deep-sea exploration; acoustic detection technology