

深海多金属硫化物采矿研究进展及其前景探讨

李江海^{1,2,3}, 宋珏琛^{1,2,3}, 洛怡^{1,2,3}

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京 100871; 2. 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871;

3. 北京大学石油与天然气研究中心 北京 100871)

摘要:随着陆地金属矿产资源的日渐枯竭,深海多金属硫化物逐渐成为海洋矿产资源勘探的新趋势。文章介绍了全球主要海底多金属硫化物矿床的成因及分布特点,阐述了多个国际矿业公司和国际海洋组织对西南太平洋、大西洋和印度洋海底块状多金属硫化物勘探活动的最新进展。从海底多金属硫化物的金属品质、深海采矿的法律政策和环境保护等方面对海底多金属硫化物的开发前景进行探讨,并提出积极投身国际海底资源开发规章制度,进一步细化国内法律制度,为深海采矿提供良好的法律制度环境;提升深海治理能力,增强我国在深海领域的话语权;完善深海技术装备体系,提高深海开发创新能力等建议。

关键词:多金属硫化物;深海采矿;西南太平洋;西南印度洋;洋中脊

中图分类号: P744

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2019)11-0029-09

Research Progress and Prospect of Deep Sea Polymetallic Sulfide Mining

LI Jianghai^{1,2,3}, SONG Juechen^{1,2,3}, LUO Yi^{1,2,3}

(1. Key laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, school of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of oil and gas, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With the exhaustion of terrestrial metallic mineral resources, deep-sea polymetallic sulfide has gradually become a new trend in marine mineral resources exploration. This paper introduced the major global origin and distribution characteristics of ocean polymetallic sulfide deposits, and expounded the latest development of exploration activities of massive polymetallic sulfide deposits in the southwest Pacific Ocean, Atlantic Ocean and Indian Ocean by several international mining companies and ocean organizations. The development prospect of polymetallic sulfides on the seabed was discussed from the aspects of the metal quality of polymetallic sulfides on

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 中国大洋十三五印度洋靶区断裂系统及其控矿作用研究课题(DY135-S2-1-01); 科技部重大专项(2016ZX05033002)和超慢速扩张洋中脊岩浆迁移及其动力学机制研究(gzck2018001)联合资助。

作者简介: 李江海, 博士生导师、教授, 博士, 研究方向为全球构造地质学

the seabed, the law and policy of deep-sea mining and environmental protection. It is also important for government to participate actively in the formulation of regulations for the development of international seabed resources, further refine the domestic legal system, and provide a good legal system environment for deep-sea mining. Additionally, increasing deep-sea governance capacity, and improving the deep-sea technical equipment system as well as innovation capability are the top priority to enhance China's voice in the deep-sea field.

Key words: Polymetallic sulfide, Deep-sea mining, Southwest Pacific, South-west Indian Ocean, Mid-ocean ridge

0 引言

海洋约占地球表面积的 71%,存在着巨大的、尚未被人类充分认识和利用的各种矿产资源。20 世纪 70 年代中期,随着海底热液喷口及块状硫化物的发现,人们开始关注这些富含金、银、铜、锌等金属矿物的块状硫化物矿床的潜在经济价值^[1]。由于初期深海勘探和开采技术的落后和预期的高昂成本,以及 70 年代诸多陆上矿床的发现,这些矿床在金属含量方面完全可以替代海底块状硫化物矿床,深海块状硫化物的勘探工作逐渐淡出公众视线^[2]。

自 20 世纪末,随着陆上资源的大量消耗和海底资源勘探事业的发展,深海开采进入一个新的阶段^[3-4]。除海洋油气资源和海滨矿砂外,海底目前已知有商业开采价值的还有多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等金属矿产资源。海底多金属硫化物矿床赋存水深一般在数十米至 3 700 m,大量出现在 2 500 m 水深附近,相比于陆上矿床而具有更高纯度金属含量的特点,并且这些矿物中富含铅、锌、铜、金、银等金属^[5],总储量分别高出陆上相应储量的几十倍到几千倍,单个硫化物矿床矿体的资源量高达 1 000 万 t,资源潜力十分可观,吸引了各国开展勘探活动^[6]。中国大洋矿产资源研究开发协会在 2011 年便与国际海底管理局就西南印度洋区域多金属硫化物勘探签署合同;日本于 2017 年在冲绳县附近海域成功进行了世界上第一次海底多金属硫化物开采和提矿的中试。国际上一些深海采矿公司也开始筹备海底多金属硫化物的商业开采,如鹦鹉螺矿业公司(Nautilus Minerals Inc.)、海王星矿业公司(Neptune Minerals)、多拉多海洋资源官方管理公司(Dorado Ocean Resources)等,海

底多金属硫化物商业开采即将成为现实^[7]。因此,一些分析人士预测,到 2030 年深海采矿行业将占到采矿业总产量的 10%^[8]。

作为海洋勘探的一个新趋势,深海采矿依然存在潜在的环境影响^[9]。海洋资源巨大的商业价值和开采造成的生态环境破坏,让人们开始寻找海底矿产资源可持续利用的方法和途径^[10-11]。本研究从海底多金属硫化物的资源分布、开采现状、法律条例、环境影响和开采前景等方面对多金属硫化物的勘探与开发进行综述和讨论。

1 海底多金属硫化物成因与矿床分布

洋中脊热液活动是集中发生在洋中脊及离轴区内的海底热液活动,具有独特的热液系统。在洋中脊热液系统中,海水和洋壳岩石是热液系统形成的两大物源,而热液流体和热液产物代表了两大物源在热液系统不同区域和不同阶段相互作用后的产物。岩浆沿通道上涌,在海底形成了新的洋壳。冷海水从洋壳断裂或微裂隙中向下渗透,下渗过程中被岩浆等热源加热,从围岩中淋滤出铜、铁、锌等金属元素,随后又沿裂隙上升从海底喷出,形成烟囱体结构(即黑烟囱)和热液羽状流,冷却后在海底及其浅部通道内堆积了硫化物的颗粒,形成多种具有重要经济价值的金属矿产。

海底多金属硫化物形成于热液喷口地区,由海底热液产物堆积而成。前人对全球热液硫化物区的研究揭示了 3 种完全不同的矿化类型:①形成于高温集中喷溢热液流体的块状硫化物丘体(如大西洋 TAG 热液区);②来自低温弥散流的 Fe-Mn 羟基氧化物和硅酸盐的堆积体;③来自热液羽状流的细小颗粒沉淀物。其中,块状硫化物堆积体只占有

被搬运到海底的可溶性成矿物质的一小部分,而搬运来的大部分物质通过浮力和非浮力羽状流扩散到了洋脊的侧翼^[12]。

几乎所有已发现的海底多金属硫化物矿床都位于板块边界的大洋中脊和沟—弧—盆体系,这些地区的岩浆活动、地震活动、热液活动之间都有很强的时空关系^[13]。全球 57% 的海底多金属硫化物矿床发育在大洋中脊附近,另有 19% 发育在弧后盆地、21% 发育在火山弧^[1],主要分布在东太平洋海隆、东南太平洋海隆和东北太平洋海隆^[13-16],已知大西洋中脊也有一些矿床,但在印度洋洋中脊附近发现的热液硫化物矿点较少^[17]。大西洋中脊和印度洋中脊的已知硫化物矿床较少,主要原因是在这些地区内进行的勘探活动有限。根据国际大洋中脊协会 InterRidge 数据,截至 2018 年,全球发现热液喷口区共计 705 处,其中探明的活动性喷口区 297 处,推测的活动性喷口区 354 处,以及无活动性喷口区 54 处^[18]。

虽然发现了大量海底块状多金属硫化物矿床,但是这些矿床无论是分布位置、规模还是矿石的金属含量都存在较大差别,不同构造环境下发育的多金属硫化物矿床规模不一样^[19]。由于硫化物中金属含量的高度变化,并不是所有的硫化物区都具有经济价值。如沿东太平洋海隆及大西洋中脊分布的一些硫化物区,由于多为富铁硫化物而不具有经济价值。Petersen^[20]统计了不同构造背景下的多金属硫化物的 Au、Ag、Cu、Zn、Pb 等含量,发现洋中脊多金属硫化物的 Au 和 Ag 的平均含量明显低于弧后盆地及火山弧等构造环境,Cu 和 Zn 的含量与其他构造环境相当,而 Pb 的含量又明显较低。

2 全球海底多金属硫化物开采技术与开发现状

正是由于海底多金属硫化物具有巨大的潜在资源价值,尽管目前对于海底多金属硫化物的开采还存在技术可行性及经济性、环境影响和相关法律政策等诸多的未确定因素,一些国际大型矿业公司和国家已投入到海底多金属硫化物的商业化开发活动中^[11,21-22]。

2.1 加拿大

加拿大鸚鵡螺矿业公司作为深海采矿的先驱,较早地进行了深海矿产资源开发战略布局。在 1997 年鸚鵡螺矿业公司便获得了在巴布亚新几内

亚(PNG)专属经济区内开展多金属硫化物矿床勘探的执照,在该国以北约 50 km 的俾斯麦海 1.6 km 深处进行开采,成为世界上深海底矿产资源商业开发的“第一人”^[3,23]。经过将近 10 年的勘探筹备工作,鸚鵡螺公司在 2007 年 3 月启动了世界上最大的高品位多金属硫化物系统商业勘探计划——Solwara 项目,该项目位于巴布亚新几内亚专属经济区俾斯麦海和所罗门海内,所涉及的勘探开发项目包括海洋环境研究、矿床资源评估钻探、多金属硫化物矿石取样等,其中最具经济价值的矿床位于俾斯麦海的一处海底喷溢口附近,该矿床被命名为“Solwara 1”。根据鸚鵡螺矿业公司勘探数据显示,Solwara 1 矿床位于水下约 1 600 m,为一大块状硫化物矿床,大约可生产 130 万 t 铜和金的混合金属,铜品位为 7.5%,金品位远远超过 20 g/t^[24]。到目前为止,Solwara 项目开展近 20 年,涵盖设计、船运和制造、冶金,但迄今为止仍未能进行海试。此外,在 2008 年鸚鵡螺矿业汤加公司在汤加海域开展了首个深海商业海底矿产资源勘探项目,已查明了 19 个富有远景的多金属硫化物矿点,其中 8 处位于西南太平洋劳盆地(Lau Basin)东北部,另外 11 处位于汤加塔普附近的 Valu Fa 脊附近。

根据对大量样品的力学性能测试,多金属硫化物的断裂性能类似于煤,韧性和塑性类似于盐和碳酸钾,鸚鵡螺矿业公司根据陆上采煤技术提出了管道提升式海底多金属硫化物采矿系统,该系统由采矿支撑船、海底采矿车和管道提升系统组成(图 1),并制造了海底采矿设备,如水下辅助切割车(Auxiliary Cutter)、散装切割车(Bulk Cutter)和集矿车(Collecting Machine)等。开采技术原理是首先通过采矿船下放主采矿车、辅助切割车和集矿车到海底,由采矿车负责破碎海底矿物,然后集矿车对破碎后的海底矿物进行收集,收集到的矿物从集矿车顶部出口通过泵送系统经过提升管道泵送至采矿船。在采矿船上的后处理装置中对矿物进行提纯,提纯后的废物由排入海底回填。

2.2 日本

日本一直致力于深海矿产资源的研究,尤其是海底多金属硫化物的开采。在过去的几年

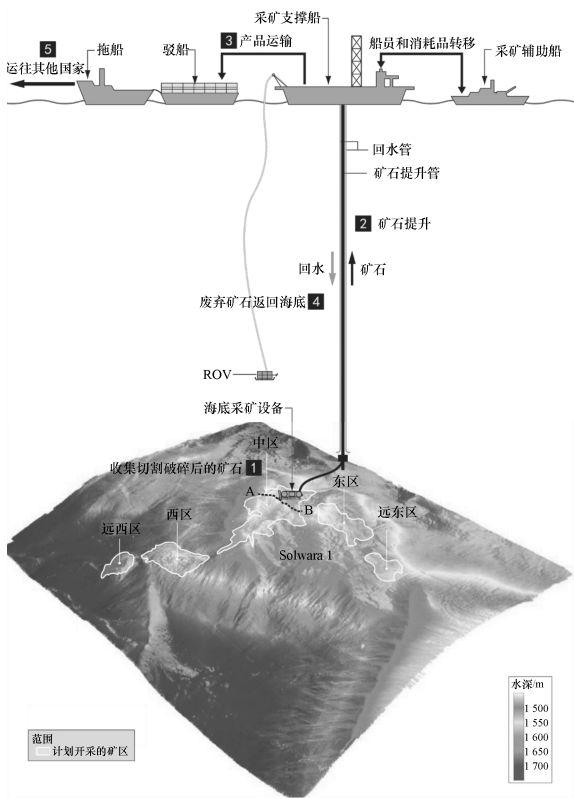


图1 鸚鵡螺矿业公司深海采矿系统及采矿流程图(根据文献[25]修改)
AB剖面见图6

里,日本在岛县周围海域发现了6处矿藏,均位于日本专属经济区内。2017年9月,日本经济产业省(METI)和日本金属国家公司(JOGMEC)在冲绳县附近海域进行了世界上第一次海底多金属硫化物开采和提矿的中试,并取得了成功。在这次试验中,METI和JOGMEC使用其自主研发的三菱挖掘与集矿试验机成功地挖掘出位于海平面以下约1600m的海底多金属硫化物,并通过潜水泵将其与海水一起收集和提升到集矿支撑船上。目前,日本主要采用由日本学者Tetsuo Yamazaki提出水深700~1600m,可在海底半径250m范围内采集多金属硫化物的采矿方案^[25],该方案由半潜式平台、垂直管道、水力旋流器、软管和集矿机等组成。日本还在研制流体挖掘式采矿实验系统,水深可达5250m,采矿能力可达日产1万t。

2.3 其他国家

澳大利亚公司海王星矿业也在西南太平洋区域申请并获得了约17.5万km²的多金属硫化物矿

区的勘探执照,涉及日本、巴布亚新几内亚、所罗门群岛、瓦努阿图、斐济、汤加和新西兰等国家的专属经济区。美国伍兹霍尔海洋研究所研制成功大深度自治潜水器ABE,该潜水机器人在2007年为我国科学家首次在西南印度洋中脊发现海底热液活动区,并对喷口进行了精确定位。

3 海底多金属硫化物开采前景

在过去的几年里,深海采矿技术取得了巨大的进步^[26-28]。就勘探和开采方式而言,深海采矿业与近岸采矿业相似,随着动力定位、海底地形成图、摄像技术,遥控潜水器的运用,多金属硫化物的开采可以在非常深的水域进行作业^[29-33]。

根据《联合国海洋法公约》,全球大部分的海底块状硫化物矿床都位于国际海底管理局直接管理的国际海底区域内,不属于任何国家经济专属区。因此,在慢速和超慢速扩张洋中脊上发现的大型硫化物矿床引起了许多国家的兴趣。例如,位于10°N—20°N的慢速扩张大西洋中脊,经由俄罗斯科学家系统地调查,发现了多个活动和非活动热液区,其中部分热液矿床与长期存在的大洋核杂岩有关,与极具经济前景的西南太平洋硫化物矿床相比,这些矿床也具有较高的Au和Cu等金属含量^[34]。目前发现海底热液区和异常区700余个,其中具有硫化物资源效应的热液区达100余个。按照热通量平衡理论^[35],预测全球热液区数量应达到1000个左右。如果按上述比例估算,全球具有硫化物资源意义的热液区的总量应在330个左右,目前资源量在百万吨以上的热液区有13处(表1)。鉴于洋中脊的调查程度约为10%,而现在已调查区域被认为是成矿相对有利的地段,因此余下90%洋脊的找矿前景应更低一些,在保守估算(50%)的情况下,初步预测全球洋脊热液区为1500处,其中有资源效应的多金属硫化物产地500余处,超过100万t资源量的产地约40处。

海底多金属硫化物矿床相比于陆上硫化物矿床有较高品位的金属含量而具有较大的开采价值。表2是Slowara矿区内部分工区的金属品位与陆地上的日本黑矿(Kuroko-type)和加拿大Noranda地区两个典型硫化矿的矿藏价值比较,可以看出总体上尽管海底硫化物矿床规模较小、开采流程较为复

杂,但是它所蕴含的高品位铜、锌、银和金含量使其具有更高的商业开采价值^[23,36]。

表 1 全球洋脊部分已发现主要多金属硫化物区成矿元素平均含量及估算资源量^[34]

热液区		主要成矿元素含量					资源量/Mt
		Cu/ %	Zn/ %	Pb/ %	Ag/10 ⁻⁶	Au/10 ⁻⁶	
北大西洋洋中脊 (10°N—40°N)	Menes Gwen (37°50′N,31°35′W)	0.39	1.17	0.09	41.6		0.2
	Lucky Strike (37°18′N,32°17′W)	9.03	8.59	0.09	85.99	0.75	0.75
	Rainbow (36°18′N,33°14′W)	7.88	23.64		361.9	3.1	0.75
	Broken Spur (29°10′N,43°10′W)	4.82	6.02	0.04	39.8	0.68	0.4
	TAG (26°08′N,44°50′W)	0.88	10	0.05	102.4	5.6	3.89
	MIR zone (26°08′N,44°48.5′W)	8.4	5.52	0.02	118.6	4.1	9.98
	Ore show (24°30′N,46°08′W)	16.25	4	0.03	42.7	10.4	0.25
	Snake pit (23°22′N,44°57′W)	2.8	1.8	0.03	45.3	1.36	1
	Puy de Folles (20°30′N,45°40′W)	13.07	2.41	31.02	27.5	0.23	10
	Krasnov (16°38′N,46°28.4′W)	0.46	0.15	0.05	8.34	0.76	17.8
	Logatchev—1 (14°45′N,44°59′W)	37.75	1.84	0.01	44.5	32.3	1.75
	Logatchev—2 (14°43′N,44°57′W)	22.37	16.03	0.07	4.2	43.02	0.25
	Ashadze (12°59.5′N,44°54.5′W)	10.47	16.34	0.05	89.9	8.53	2
	Ore mount (13°21′N,44°59′W)	15.7	16.3	0.03	319.7	21.7	
西南印度洋 洋中脊	龙旗 (37°45′S,49°30′S)	2.83	3.82	0.01	70.2	2	
	断桥 (37°66′S,50°47′S)	2.5	3.1	0.15	83.5		
	Mt. Jourdanne (27°51′S,63°56′S)	0.1~4.5	15.9~35.1	0.1~4.5	43~3 259	0.7~11.9	
东北太平洋 洋中脊	Middle Valley (48°20′—48°30′N,128°41′W)	0.43	1.41	0.015	3.54	0.7	17.6
	Endeavour (47°57′N,29°04′W)	0.42	3.56	0.06	4.6	0.14	1
	胡安·德富卡(44°42′N,44°W)	0.43	22.7	0.35	1 860	4.9	0.25
	探险家(49°46′N,129°42′W)	8.1	9	0.1	112	0.8	12
加利福尼亚湾	Guanymas Basin (27°18′N,111°32′W)	0.2	1	0.4	69	0.2	2.5
加拉帕戈斯洋 洋中脊	0°45′N,85°50′—85°55′W	4.98	0.14	0.07	10	0.2	10
东北太平海隆	12°—13°N,104°W	9.07	11.2	0.24	57	0.26	2
	18°30′N,112°24′W	7	12	0.03	120	0.36	0.04

表 2 海底多金属硫化物与陆地典型
硫化矿金属品位比较^[22,24,36—37]

勘探区	Cu/ %	Zn/ %	Au/ (g·t ⁻¹)	Ag/ (g·t ⁻¹)
Solwara 6	11.7	18.4	16.1	203
Solwara 7	5.1	21.5	15.0	359
Solwara 9	6.3	10.6	19.9	296
Solwara 10	7.7	15.2	2.5	165
Solwara 12	9.1	30.8	13.7	425
Solwara 13	9.1	30.7	4.7	546
Solwara 14	1.4	19.2	3.3	97
Kuroko(日本)	1.6	3.0	0.8	93
Noranda(加拿大)	2.5	1.4	8.0	21

海底多金属硫化物矿床往往上覆松散的沉积物或直接暴露于海底,并且受海底断裂控制,与陆上硫化物矿床相比,具有矿床结构简单,垂向厚度小,高品位矿石集中的特点。除去开采环境限制,海底多金属硫化物矿床是进行 Cu、Zn、Au、Ag 等金属商业开发的最佳选择。值得注意的是,几年来铜、锌、金、银等金属价格已经上涨了数倍^[38],并且这样的上涨形势还将持续很长一段时间,这大大刺激了深海采矿事业的发展,使得越来越多的矿业公司开始介入海底多金属硫化物的勘探与商业开发^[39]。

4 海底多金属硫化物开发的可行性

深海矿产资源的开发涉及对海洋权益的争夺和海洋大国间的政治博弈。国际海底区域(简称《区域》)的制度核心是资源开发制度,《联合国海洋法公约》(简称“公约”)确立的国际海底制度是基于当时的世界政治形势以及对国际金属市场前景的预测,是世界各国经过长期谈判达成的协议。

目前国际上对于海底多金属硫化物的试采工作局限在沿海国领海外的专属经济区内。根据《公约》确立的法律制度,沿海国在其专属经济区有勘探和开发、养护和管理海床和底土以及上覆水域的自然资源的主权权利。而对于“区域”内的多金属硫化物矿床的勘探与开发,各国必须按照与国际海底管理局签订的合同来实施,并且服从海管局的规章和程序。截至 2018 年 9 月,共有 7 份多金属硫化物勘探合同已经签署,勘探区位置包括大西洋中脊和印度洋中脊,涉及的国家有中国、俄罗斯、韩国等^[39-40]。我国大洋矿产资源研究开发协会自 2011 年与国际海底管理局签订了面积 1 万 km²,为期 15 年的西南印度洋中脊海底多金属硫化物矿区勘探合同以来,已进行了 6 个航次的勘探考察^[41]。作为第一个与国际海底管理局在全球国际海域签订多金属硫化物勘探合同的国家,我国依靠自主研发的 4 500 米级深海资源自主勘查系统“潜龙二号”、中深孔岩心钻机和电法探测仪等设备,现已跻身全球多金属硫化物勘探前列^[42-45]。

随着海底多金属硫化物采矿事业的发展,采矿过程中所产生的环境问题也越来越尖锐^[46-47]。海底多金属硫化物开采对环境的破坏有多个方面,如采矿器械在海底进行矿物采集时,会严重破坏海地表面达数米,并产生巨大的漩涡,这将对热液喷口附近的生物群落造成灭顶之灾^[48];当将矿石从海底提升到水面装船时,不可避免地将大量的泥浆带入到海洋表面,使一些金属离子进入海洋中造成污染。近年来,包括中国在内的不少国家就深海采矿对环境的影响开展了大量的研究^[49-50],联合国海底管理局的有

关规章准则亦正在讨论制定中。一些观点认为,可以通过各种努力将深海采矿对环境的影响限制在可接受的程度,也有一些学者认为深海采矿对环境的影响实际上小于陆地采矿对环境的影响。绿色和平组织(Greenpeace)则对深海开采报以抵制的态度,正在寻求国际禁令,禁止海底采矿^[8]。作为管理者,国际海底管理局有责任保护海洋环境使之不受到采矿的有害影响,以及必须发展环境规章,确保在勘探与开发活动时对海底和水体采取必要的保护环境措施,并树立可持续发展的理念,让每一个开采者减少、缓和以及尽可能地防止对广阔生态系统和生境的有害影响和污染^[51]。

我国是目前在国际海底区域拥有最多具有资源专属勘探权和优先采矿权的国家,为下一步实质性开发深海矿产资源奠定了坚实的基础。综合分析结果,在未来 10 年内,我国进行商业化开发深海矿产资源的可行性较低,在国际上其他发达国家已具备开发能力的背景下,我国应加快深海矿产资源开发布局,利用空档期,做好相应的技术储备和保障准备工作,特提出以下建议。

(1)积极投身国际海底资源开发规章制定,进一步细化国内法律制度,为深海采矿提供良好法律制度环境。鉴于国际海底矿产资源开发规章仍在制定当中,我国应加强与国际海底管理局的密切联系,加大深海国际法规的研究,对开发规章草案提出建设性意见;针对《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》中的模糊性问题出台更为详细和具有操作性的实施办法及配套政策,为深海采矿提供良好制度环境。

(2)提升深海治理能力,增强我国在深海领域话语权。积极培育国内涉深海的社会组织,充分发挥研究机构、智库、公司等不同力量的优势,鼓励各方在不同的国际场合积极发声,阐明中国参与国际海底资源开发和保护的观念,各方相互配合形成合力,共同维护我国和广大发展中国家的深海权益。加强深海基础科学研究提升国家对深海的认知,利用科学数据支撑深海关键领域,如采矿环境保护等方面国际规则的制定。

(3)完善深海技术装备体系,提高深海开发创新能力。继续加强深海运载和勘查装备的配套技术研发,提高深海勘探产品的稳定性和适应性,加快开采和加工装备的技术创新,全面保障深海矿产资源勘探开发各个环节的稳定运行。构建以企业为主体的创新主体,避免深海科研机构“单兵作战”,出台相关政策形成创新合力;建立深海装备技术共管、共享平台,促进国内深海技术集成创新。通过大力发展深海勘探和开发技术,降低未来深海采矿的成本,密切关注国际矿产品市场动态,预研预判评估深海采矿的成本收益,做好未来深海矿产资源商业化开发的远景规划和实施方案。同时,大力发展深海采矿环保技术和生态修复技术,为环境友好型深海采矿产业奠定基础。

5 结论

(1)海底多金属硫化物形成于热液喷口地区,由海底热液产物堆积而成,赋存水深一般在数十米至 3 700 m,大量出现在 2 500 m 水深附近,与海底构造活动具有很强的时空关系。海底多金属硫化物以其较高的资源量和商业价值,成为目前海底金属矿产资源勘探与开发的新趋势。

(2)海底多金属硫化物以其高品位金属含量受到越来越多的国家关注。目前仅日本在冲绳县附近海域成功进行了世界上第一次海底多金属硫化物开采和提矿的中试,加拿大鹦鹉螺矿业公司正在巴布亚新几内亚专属经济区内进行商业勘探活动及开采准备。中国和韩国等国家在国际海域内多金属硫化物的勘探活动,主要集中在大西洋中脊和印度洋中脊附近。

(3)海底多金属硫化物矿床相对于陆上硫化物矿床开采环境相对恶劣,技术要求严格,开采成本高。国际上都在关注着鹦鹉螺矿业公司的 Solwara 1 项目是否能够成功投产,如果该项目成功,则会改变全球的海底多金属硫化物开采模式。

(4)目前国际上对于海底多金属硫化物的试验开采,都位于国家近海的专属经济区,关于该区域的开发遵循《公约》确立的法律制度,但该法律条例并不是对所有国家起到约束力,多金属硫化物开采

的合法性仍存在着诸多不确定因素。我国作为第一个与国际海底管理局在全球国际海域签订多金属硫化物勘探合同的国家,在海底多金属硫化物的勘探和开发方面发挥着越来越重要的角色。

(5)海底多金属硫化物开采过程中产生的环境问题也越来越严重,环境保护严格限制着深海采矿的实施,对于海底多金属硫化物的开采可以先从不活动的热液喷口试采,努力将深海采矿对环境的影响限制在可接受的程度,减少因为开采所带来的环境污染。

参考文献

- [1] HANNINGTON M, JAMIESON J, MONECKE T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1155—1158.
- [2] 吴世迎. 海底热液硫化物资源研究现状与展望 [J]. *科学对社会的影响*, 2002 (1): 27—31.
- [3] CROWHURST P, LOWE J. Exploration and resource drilling of seafloor massive sulfide (SMS) deposits in the Bismarck Sea, Papua New Guinea [C]// Exploration and resource drilling of seafloor massive sulfide (SMS) deposits in the Bismarck Sea, Papua New Guinea. *Oceans*, 2011, 1—6.
- [4] LIU S, JIANHUA H U, ZHANG R, et al. Development of Mining Technology and Equipment for Seafloor Massive Sulfide Deposits [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(5): 863—870.
- [5] WEBBER A P, ROBERTS S, MURTON B J, et al. The formation of gold-rich seafloor sulfide deposits: Evidence from the Beebe Hydrothermal Vent Field, Cayman Trough [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(6): 2011—2027.
- [6] 刘永刚, 姚会强, 于森, 等. 国际海底矿产资源勘查与研究进展 [J]. *海洋信息*, 2014 (3): 10—16.
- [7] PIRAJNO F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 597—601.
- [8] COLES I R. Deep Sea Mining—Current Status and Future Potential [J]. *Mining World*, 2017(6): 1—4.
- [9] 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(2): 1—14.
- [10] 董冰洁. 我国海洋多金属矿产资源研究现状及战略性开发前景 [J]. *世界有色金属*, 2016 (12): 168—169.
- [11] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海采矿环境影响不容忽视 [J]. *船舶物资与市场*, 2017 (1): 57—59.

- [12] GERMAN C R, JR W E S. 8.7-Hydrothermal Processes[J]. Treatise on Geochemistry, 2004(6): 191—233.
- [13] BAKER E T, GERMAN C R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields[M]. Washington: American Geophysical Union, 2004.
- [14] BEAULIEU S E, BAKER E T, GERMAN C R. On the global distribution of hydrothermal vent fields: One decade later [C]// On the global distribution of hydrothermal vent fields: One decade later. AGU Fall Meeting, 2012.
- [15] SPRENGEL C, BAUMANN K H, HENDERIKS J, et al. Modern coccolithophore and carbonate sedimentation along a productivity gradient in the Canary Islands region: seasonal export production and surface accumulation rates[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(17): 3577—3598.
- [16] YAMASAKI T. The Role of Bimodal Magmatism in Seafloor Massive Sulfide (SMS) Ore-forming Systems at the Middle Okinawa Trough, Japan[J]. Ocean Science Journal, 2018, 53(2): 413—436.
- [17] 景春雷, 郑彦鹏, 刘保华, 等. 海底热液多金属硫化物分布及控矿因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013(1): 57—64.
- [18] BEAULIEU, S. E., SZAFRANSKI, K. InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields, Version 3.4. [EB/OL]. (2016—10—13) [2019—03—25] <http://vents-data.interridge.org>.
- [19] PURCELL M, GALLO D, SHERRELL A, et al. Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447 [C]// Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447. Oceans, 2011, 1—7.
- [20] PETERSEN S. Massive sulphides-resources from the deep sea. [J]. Geomar, 2016, (12): 1—14.
- [21] 戴瑜, 刘少军, 李流军, 等. Nautilus 矿业公司在海底块状硫化物勘探中采用的取样技术与装备[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 141—146.
- [22] 郭长斌, 刘少军, 戴瑜. 海底多金属硫化物开发动态与前景分析[J]. 海洋通报, 2008, 27(6): 101—109.
- [23] SIZER L. Nautilus Identifies Second Seabed Target[J]. Australia's Paydirt, 2011, 1(181): 1556—1570.
- [24] Nautilus Minerals Inc. SMS Information[EB/OL]. (2019—01—13) [2019—02—25]. <http://www.nautilusminerals.com/>.
- [25] ATKINSON A, CLARKE D R, WEBB S J. Mapping residual stress using optical microprobe in alumina films formed by thermal oxidation of NiAl[J]. Materials Science and Technology, 2013, 14(6): 531—534.
- [26] FAIRLEY P. Robot miners of the briny deep [J]. Spectrum IEEE, 2016, 53(1): 44—47.
- [27] LIU S, HU J, ZHANG R, et al. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(5): 863—870.
- [28] SPAGNOLI G, MIEDEMA S A, HERRMANN C, et al. Preliminary Design of a Trench Cutter System for Deep-Sea Mining Applications Under Hyperbaric Conditions[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(4): 930—943.
- [29] ASAKAWA E, MURAKAMI F, TSUKAHARA H, et al. Development of vertical cable seismic (VCS) system for seafloor massive sulfide (SMS) [C]// Development of vertical cable seismic (VCS) system for seafloor massive sulfide (SMS). Oceans, 2015: 1—7.
- [30] ASAKAWA E, MURAKAMI F, TSUKAHARA H, et al. New marine seismic survey techniques for seafloor massive sulphide (SMS) exploration [C]// New marine seismic survey techniques for seafloor massive sulphide (SMS) exploration. Techno-Ocean, 2016: 134—139.
- [31] 杜新光, 官良清, 周伟新. 深海采矿发展现状及我国深海采矿船需求分析[J]. 海峡科学, 2016(12): 62—67.
- [32] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8—18.
- [33] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海采矿系统现状及展望[J]. 船舶物资与市场, 2016(6): 39—41.
- [34] CHERKASHOV G, POROSHINA I, STEPANOVA T, et al. Seafloor Massive Sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: New Discoveries and Perspectives[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2010, 28(3): 222—239.
- [35] DAI B Z, ZHAO K D, JIANG S Y. Modern sea-floor hydrothermal activity and genesis of massive sulfide deposits: An overview[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry, 2004, 23(3): 246—254.
- [36] LIAGHAT S, MACLEAN H. Lithogeochemistry of altered rocks at the New Inco VMS deposit, Noranda, Quebec[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1995, 52(3): 333—350.
- [37] Nautilus Minerals Inc. Exploration Programs 2009[R]. 2018.
- [38] 童国庆. 深海采矿可能带来新的淘金热[J]. 海洋世界, 2016(8): 68—71.
- [39] 邵珂, 陈建平, 任梦依. 印度洋中脊多金属硫化物矿产资源定量预测与评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 125—133.
- [40] 方捷, 孙静雯, 徐宏庆, 等. 北大西洋中脊海底多金属硫化物资源预测[J]. 地球科学进展, 2015, 30(1): 60—68.
- [41] 陶春辉. 中国大洋中脊多金属硫化物资源调查现状与前景 [C]// 中国大洋中脊多金属硫化物资源调查现状与前景. 中国地球物理学会年会, 2011.

[42] 汪建军,陶春辉,王华军,等.海底多金属硫化物自然电位观测方式研究[J].海洋学报,2018(1):57—67.

[43] 王荣耀,高宇清,臧龙,等.海底钻机冲击回转钻进取芯方法研究与实践[J].矿业研究与开发,2016(11):99—102.

[44] 吴涛.西南印度洋脊热液硫化物区近底磁法研究[D].吉林:吉林大学,2017.

[45] 朱伟亚,万步炎,黄筱军,等.深海底中深孔岩芯取样钻机的研制[J].中国工程机械学报,2016,14(1):38—43.

[46] 王春生,周怀阳,倪建宇.深海采矿环境影响研究:进展、问题与展望[J].海洋学研究,2003,21(1):56—65.

[47] 徐慧.深海采矿将威胁海洋生态环境[J].资源环境与工程,2015(1):108.

[48] BOSCHEN R E,ROWDEN A A,CLARK M R,et al.Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies[J].Ocean & Coastal Management,2013,84(6):54—67.

[49] HOAGLAND P,BEAULIEU S,TIVEY M A,et al.Deep-sea mining of seafloor massive sulfides[J].Marine Policy,2010,34(3):728—732.

[50] SHARMA R.Deep—Sea Mining:Economic,Technical,Technological, and Environmental Considerations for Sustainable Development[J].Martecholsocj,2011,45(45):28—41.

[51] 朱永灵.关于中国国际海底区域矿区采矿的思考[J].海洋开发与管理,2017,34(8):109—112.