

海底热液硫化物资源研究现状与展望

公衍芬¹, 刘志杰¹, 杨文斌², 姜 丽¹

(1 国家海洋信息中心, 天津 300171; 2 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘 要:现代海底热液活动分布广泛,介绍了海底热液硫化物开采情况,阐述了目前硫化物矿区的申请和资源评价状况。综合研究表明,认识海底矿产资源的时空分布规律,提高对海底多金属矿集区的预测能力,可为我国在“区域”内的资源勘探提供支撑。加强海底热水矿床的三维结构分析,开展圈矿与矿床储量综合评价技术研究,建立海底热液硫化物资源地质模型,是未来发展的主要方向。

关键词:海底热液;硫化物;多金属成矿

中图分类号:P744

文献标识码:A

海底热液硫化物(submarine hydrothermal sulphide),亦称多金属硫化物(polymetallic sulphide)、块状硫化物(seafloor massive sulfide, SMS),是由高温黑烟囱喷发的富含金属元素的硫化物、硫酸盐等构成的矿物集合体^[1]。它是 20 世纪 60 年代继大洋多金属结核和富钴结壳后发现的另一种海底金属矿产资源类型,主要元素为 Fe、Cu、Pb、Zn 及 Ag、Au、Co、Ni、Pt 等,在世界大洋水深数百米至 3 500 m 处均有分布,从地质构造上看,主要分布在 2 000 m 深处的大洋中脊、海隆和弧后盆地的扩张中心^[2],同时岛弧以及海山等也有少量分布。根据国际大洋中脊协会的统计,截止 2009 年底,全球已发现和由推断可确定的海底热液硫化物矿点有 588 个^[3](532 个为确定或推测活跃的,56 个为非活跃)(图 1)。主要分布在太平洋(约 67%),其次在大西洋(约 19%)、红海(约 5%)、印度洋(约 4%)和地中海(约

4%),北冰洋和南极洲等其他海区中海底热液活动分布地点的数量相对较少(约 1%)。此外,在深水湖泊(东非大裂谷、贝加尔湖)和近岸海底(希腊 Milos 岛附近海域)也发现了黑烟囱及热液硫化物的产出^[4]。

随着当前海底热液资源调查手段和采矿技术的不断提高,越来越多的热液硫化物矿床相继被发现,相关资源的研究和开采活动也日益受到关注。本文对近年来现代海底热液硫化物矿床的调查历史进行了回顾,阐述了目前硫化物矿区申请和资源评价状况,对我国现代海底热液矿床研究和参与开发进行了展望分析。

1 国内外调查历史

现代海底热液硫化物调查最早始于 20 世纪 40 年代。1948 年,瑞典科学家利用“信天翁号”(Albatross)考察船在红海中部 AtlantisI 深渊附近发现了热液多金属软泥,揭开了海底热液活动研究的序幕。20 世纪 60 年代中期,前苏联就在太平洋获得了多金属硫化物样品,并对大洋热液过程的成因进行研究。1979 年,美国“阿尔文号”在东太平洋海隆北部发现了第 1 个高温“黑烟囱”^[5]。20 世纪 80 年代,海底热液硫化物进入大

收稿日期:2014-03-10

基金项目:海洋公益性行业科研专项“国际海底资源开发与公海保护区选划技术支持系统及应用示范”(201005003);“外大陆架划界与国际海底资源关系评估辅助决策系统研制和示范应用”(201205003)

作者简介:公衍芬(1982—),女,硕士,助理研究员,主要从事海洋地质矿产研究工作。E-mail:gongyanfen@gmail.com

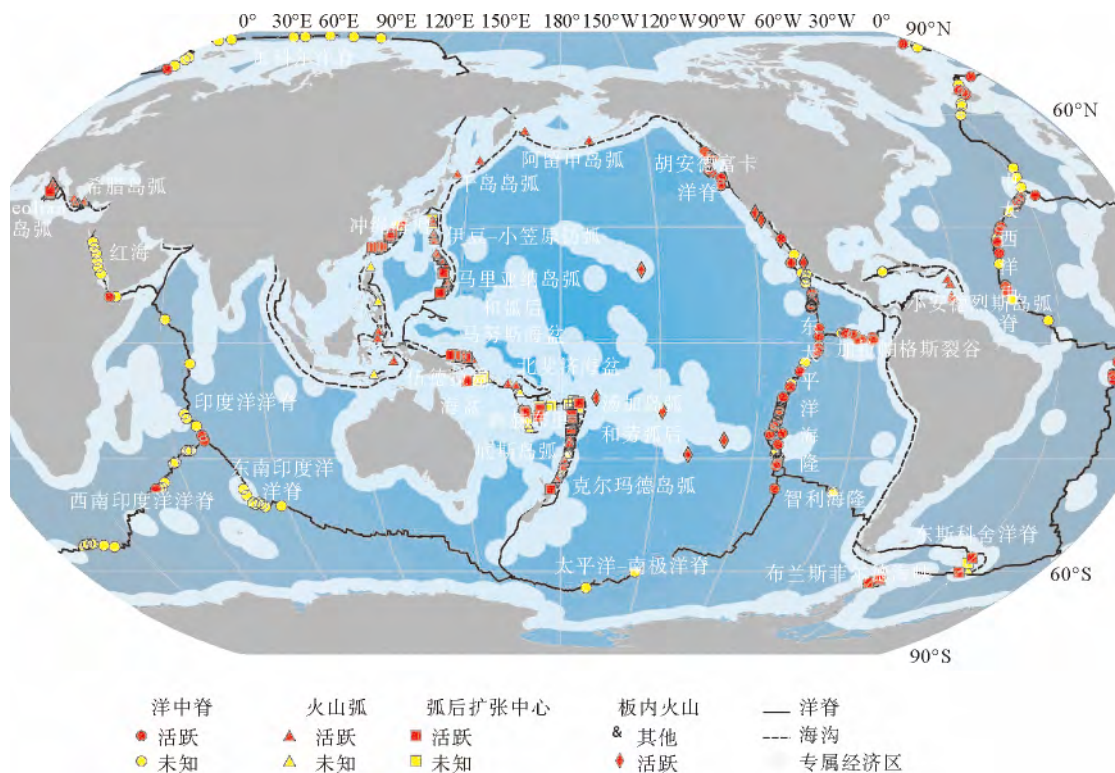


图1 全球热液喷口位置分布(据文献[3])

Fig.1 Distribution of main seafloor hydrothermal areas in the world ocean (from reference [3])

规模调查和研究,在弧后扩张中心环境中首先发现的热液硫化物矿床位于中 Manus 海盆^[6]和马里亚纳海槽^[7]。世界上几个主要工业国家先后制定了勘探和开发海底多金属硫化物的国家计划,并把海底热液矿床看作是未来战略性金属的潜在来源。美国国家海洋大气局制订了 1983—1988 年的 5 年计划,把处在美国 200 海里专属经济区内的胡安德富卡洋脊作为海底热液矿床的重点研究和开发对象。20 世纪 90 年代,日本利用多种技术手段开展了海底热液硫化物调查与研究,同时也对其成矿机理、资源评价,采矿环境影响等方面开展了研究。2008 年,韩国获得在汤加专属经济区的勘探专属权利后,开始开发海底热液矿床,并于 2011 年在西南太平洋汤加专属经济区内指定的 5 个韩国专属矿区进行矿物资源勘探^[8]。除俄、美、加、日、韩外,大力进行海底多金属硫化物调查勘探和研究工作的还有德、法、英、澳。

我国海底多金属硫化物研究起步较晚,1988 年中德合作 So-57 航次对马里亚纳海槽区热液多

金属硫化物的分布情况和形成机理进行调查和研究,获得非活动性的热液多金属硫化物和硅质“烟囱”^[9];1992 年,中国科学院海洋研究所赵一阳教授组织对冲绳海槽中部热液活动调查,这是我国首次独立组队进行热液活动的调查;2003 年,大洋科学考察先后在东太平洋海隆和大西洋获取了大量热液硫化物样品^[10],并于 2007 年在水深 2 800 m 西南印度洋中脊超慢速扩张区成功发现了新的海底热水活动区,实现了中国人在该领域调查发现“零”的突破。目前大洋科考调查已在三大洋不同深海区域发现热液硫化物喷口十几处。这标志着我国已进入了现代海底热水矿床勘探强国的行列。

2 海底热液硫化物的开采

目前,已有或正在进行的海底热液硫化物开采活动主要有:西德普罗伊萨格公司(Preussag)在红海的硫化物试采;鸚鵡螺和海王星公司的海底热液硫化物商业开发;澳大利亚 Blue Water

Metals 公司也准备投身于西太平洋海底热液硫化物采矿活动;美国 Deep Sea Minerals 公司联合美国一家大型采矿公司开始在全球范围内着手海底热液硫化物研究。较大的采矿公司如英美资源集团(Anglo American and Teck),拥有品位较高的资源和很难获得的技术^[11]。澳大利亚、俄罗斯、美国和加拿大的 5 家国际矿业公司(Nautilus、Epion、Anglo American、Teck Cominco 和 Barrick Gold)已经联合开展了西太平洋热液硫化物的开发工作,这为实现海底热液硫化物矿产的商业开发迈出了实质性的一步。

(1) 西德普罗伊萨格公司

20 世纪 80 年代,西德普罗伊萨格(Preussag)公司利用德国的“太阳号”科考船执行了 Galapagos Rift Massive sulfides(简称 GARIMAS)项目,对 Galapagos 扩张中心 86°W 的硫化物矿床进行了 3 个航次的勘查,但结果显示,Galapagos 的硫化物储量并不适合于进行大规模和连续的商业开采^[12]。1976 年,普罗伊萨格公司与阿拉伯苏丹红海委员会合作,对 Atlantic II Deep 的硫化物进行环境友好型采矿方法研究及采矿经济性评估工作,并于 1979 年 5 月成功进行了硫化物软泥的商业试采^[13]。此次试采活动证明了深海采矿的可能以及水力采掘硫化物软泥和船载浮选分离锌、铜、银的可行性,但当时的研究发现商业开采时机尚不成熟^[14,15]。

(2) 鹦鹉螺公司

鹦鹉螺公司(Nautilus Mineral)获得授权勘探的海底热液硫化物区域从巴布亚新几内亚扩展至斐济和汤加的专属经济区,总面积超过 27.6 万 km²。鹦鹉螺的勘探区域存在着较多的高品位大型硫化物矿床,部分矿点的样品含 Zn 高达 26%,Cu 高达 15%,Ag 200 g/t, Au 30 g/t。早在 1998 年鹦鹉螺公司就开展了海底热液硫化物的选冶试验,自 2004 年以来在巴布亚新几内亚块状硫化物勘探执照区开展了一系列以商业开采为目的的勘探取样活动。近年来,鹦鹉螺的工作主要围绕巴布亚新几内亚的授权区展开,2007 年主要进行了矿区的勘探取样及矿体资源储量调查和品位评价,同时开始了采矿工程设计以及重大装备的订购事宜;2008 年主要是设计和制造采矿及其地面冶炼处理设备,同时寻求海底采矿拓展机会;2009

年开展更多的勘探工作,完成所有必要的手续,取得各项执照及采矿许可权,同时全面完成采矿系统及地面处理工厂的建设。鹦鹉螺公司计划 2013 年底在 Solwara I 热液喷口提炼铜和金,将 Solwara I 推向工业化采矿,实现海底热液硫化物的商业开采。

(3) 海王星公司

2000 年,海王星公司(Neptune Minerals)首次获得覆盖北爱尔兰和新西兰北部 Havre Trough 区域的海底热液硫化物勘探权,到目前为止已在新西兰、巴布亚新几内亚、密克罗尼西亚和瓦努阿图联邦专属经济区等地累计获得超过 27.8 万 km² 的海底热液硫化物勘探许可区,同时该公司正在申请包括新西兰、日本、南马里亚纳群岛联盟、帕劳群岛、意大利等专属经济区海域的约 43.6 万 km² 的海底热液硫化物新勘探区。

海王星公司已完成第 2 和第 3 批次的海底热液硫化物勘查项目,并在新西兰专属经济区水域克马德群岛附近发现了两处海底热液硫化物成矿带,考虑到新西兰稳定的政治环境和完善的法规,并且大力支持海洋采矿事业,海王星公司积极实施“Trident”工程^[16],拟将新西兰专属经济区海底热液硫化物成矿带作为优先开采目标。2007 年 Neptune 公司委托在海洋油气开采领域实力雄厚的法国 Tecnip 公司对申请矿区的多金属硫化物从经济、环境影响和开采技术的角度作了全面的研究,提出了适合商业开采的概念系统^[17],实现商业试采活动。

3 海底热液硫化物的矿区申请与资源评价

3.1 矿区申请情况

根据《联合国海洋法公约》的规定,国际海底区域属国际海底管理局管理,因此,深海矿产资源开采应遵循国际海底管理局相关章程。2010 年 5 月 7 日,国际海底管理局通过了《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》,该规章是继《“区域”内多金属结核探矿和勘探规章》后管理局制定的第 2 个深海“采矿法典”,对于规范和促进国际海底区域资源的勘探及开采具有重要意义。

《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》通过后,大洋协会率先向管理局提交了位于西南印度洋的硫化物矿区申请,这是国际上首例对多金属硫化物矿区的矿区申请。2011 年 7 月 19 日,国际海底管理局理事会核准了大洋协会提出的多金属硫化物矿区申请,同批次通过审核的还有俄罗斯自然资源与环境部。2011 年 11 月 18 日,中国大洋矿产资源研究开发协会与国际海底管理局在北京签订了国际海底多金属硫化物矿区勘探合同^[18],这标志着我国正式获得了第 2 块具有专属勘探权和商业开采优先权的国际海底合同矿区。合同区面积 1 万 km²,限定在长度 990 km、宽度 290 km 的长方形。

海底热液硫化物矿区申请的形势错综复杂,存在很多不确定因素,韩国政府于 2012 年 5 月 21 日提交其位于中印度洋的多金属硫化物勘探工作计划,法国政府资助的法国海洋开发研究院 2012 年 5 月 23 日提交位于中大西洋洋脊的多金属硫化物矿区^[19]。2012 年管理局第 18 届会议已核准法国海洋开发研究所和韩国政府多金属硫化物勘探矿区申请。2013 年 3 月 26 日,印度政府提交了其中印度洋的多金属硫化物矿区申请;2013 年 12 月 17 日,德国联邦地质科学和自然资源研究院代表德国联邦政府提交其多金属硫化物勘探工作计划申请,对该申请的审核将纳入 2014 年 2 月 3 日的法技委会议议程。加拿大、日本、英国、挪威等也积极进行硫化物的调查和研究工作,为矿区申请做准备。

3.2 资源评价

深海硫化物资源开发价值极高,对其进行准确的评价能够为将来的勘探开采提供非常重要的数据支持。对海底热液硫化物经济价值的评价,主要考察其中 Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等有用元素的含量及分布情况。为了指导勘探并最终圈定富矿区,需在勘查研究的各阶段及时进行硫化物资源量评估,其目的是为了依据资源量大小及其分布情况尽早选出最合适的区域。

目前深海硫化物资源行之有效的评价方法正在探索中,主要是利用实际调查得到的大量硫化物资源、地质地球物理、生物化学、水文气象和沉积环境等数据资料,结合经济、政治、法律、技术等

客观条件,彼此联系起来进行资源评价和转化成矿产资源量^[20]。

硫化物资源评价有以下步骤:①涉及地质图的检查,确定可以发现新的沉积的区域;②以探测很好的管理区域沉积密度的测量为基础的,估计未被发现的沉积数量;③用从探测很好的样品获得的数据(假设为总数量的代表)评估未发现矿物沉积的规模^[21]。

鸚鵡螺公司对索尔瓦拉 1 远景矿区进行地质勘查,在数据验证结果显示所得数据符合资源评估的要求后,建立了相关地质模型并由戈尔德公司设计采用普通克里格法评估了索尔瓦拉 1 远景矿区的指示资源量和估测资源量。2008 年 1 月,公布了全球首个符合 NI 43-101 标准的海底热液硫化物资源评估报告,表明在 90 000 m² 烟卤区资源量为 2.1×10^6 t^[22,23]。2008 年 9 月 17 日,Teck Cominco 公司公布了对汤加附近海域热液硫化物的探测结果。2011 年 11 月 25 日鸚鵡螺公司公布了索尔瓦拉 1 新一轮资源评价结果,这是 Solwara 1 第 2 次资源评价。截止到 2011 年 1 月,Solwara 1 勘探符合 NI 43-101 标准指示和推测矿物资源评价分别为 870 kT 和 1 300 kT^[24]。

Mark H 的资源评价模型(The tonnage model)为新火山区海底块状硫化物沉积含量第 1 次评价提供了基础,有利于将更新的沉积作用信息转变成资源潜力更有意义的评估。预测的金属含量是重要的,与陆上新生代块状硫化物沉积的金属含量相似(1.9×10^7 t)。但是它仅仅是过去块状硫化物沉积过去总产量和目前地质资源的一部分($\sim 14 \times 10^9$ t 含有 8.5×10^8 t (Cu+Zn))^[25]。新火山地区评价的 3×10^7 t (Cu+Zn) 比所有陆地矿山每年的生产量稍多^[26]。

我国关于海底热液硫化物资源评价方面的工作,李军^[27]分析了现代海底热液硫化物矿床的资源潜力认为,已往的海底热液硫化物调查可用于资源评价的大多只是一些极为有限的二维数据,很难对具有三维特征结构的热液硫化物进行客观资源量评价;温竹青等^[20]介绍了深海硫化物资源评价的方法。

4 前景与展望

海底热液矿床是极有开发价值的海底矿床,

在我国专属经济区内,南海有可能存在,但品味可能较低;冲绳海槽区则情况复杂。考虑到许多海底热液矿点都在某些沿海国家的专属经济区内,《联合国海洋法公约》生效后,对这些矿区的勘探研究也许在深化人类对海底热液矿床上有积极意义,但对我国的资源储备来讲意义不大,我们应立足于寻找国际海底的热液矿床^[28]。

现代海底金属硫化物成矿作用与陆地上的块状硫化物矿床具有极强的相似性,是古老矿床的现代等同物,因此,现代热液活动区是研究块状硫化物成矿理想的天然实验室^[29]。为了在新一轮国际海底“圈地”运动中获得主动权,在硫化物矿床圈定中不失先机,尽快找到高品位、易开采的硫化物矿床,抢占有利资源,是当务之急。我国近期要加强圈矿技术、深海资源评价技术的研发,为我国申请品味高、储量大、开采储运成本低的有价值的海底热液矿区提供基础资料。

4.1 海底多金属成矿系统的结构和模型

综合运用现代成矿系统研究方法和思路,开展海底多金属矿床的成矿环境、背景、要素、过程、产物和演变研究,阐述成矿元素的活化、迁移、富集和改造的地球化学动力过程,建立海底多金属成矿系统的结构和模型,建立深海多金属成矿理论体系,阐明海底多金属矿床成矿背景对多金属成矿作用的制约,洋底成矿场的结构、形成和演化。

4.2 海底多金属矿产资源的分布规律和矿集区预测

研究热液硫化物在时间和空间上的分布规律,建立海底矿产资源地质模型,阐明制约多金属矿床形成及保存条件,建立深海多金属成矿区预测的理论方法体系,发展海底矿床探测新方法和新技术,提高对海底多金属矿集区的预测能力,依据资源量大小及其分布情况尽早选出最合适的区域,以便向国际海底管理局申请矿区,为我国在“区域”内的资源勘探提供支撑。

将海底热液硫化物矿床的科学研究与找矿生产相结合,形成有特色的海底硫化物矿床找矿、圈矿方法。在进行海底热水成矿机理研究、海底热水矿床勘探技术开发研究的同时,应把重点放到

利用地球化学勘探技术与地球物理勘探技术、深海钻探相结合,加强海底热水矿床的三维结构分析,开展圈矿与矿床储量评价技术,以求较大的投入回报^[28]。

参考文献:

- [1] Rona P A, Scott S P. A special issue on seafloor hydrothermal mineralization: New perspectives-Preface[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society*, 1993, 88: 1 933-1 976.
- [2] German C R, Baker E T, Mevel C, et al. Hydrothermal activity along the southwest Indian Ridge [J]. *Nature*, 1998, 395: 490-493.
- [3] Beaulieu S E. Inter Ridge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields, Version 2. 0, 2010 [EB/OL]. <http://www.interridge.org/IRvents>.
- [4] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 35.
- [5] 陈新明, 高宇清, 吴鸿云, 等. 海底热液硫化物的开发现状[J]. *矿业研究与开发*, 2008, 28(5): 1-5.
- [6] Both R A, Crook K, Taylor B, et al. Hydrothermal chimneys and associated fauna in the Manus back-arc basin, Papua New Guinea[J]. *American Geophysical Union Transactions*, 1986, 67: 489-490.
- [7] Craig H, Horibe Y, Farley K A, et al. Hydrothermal vents in the Mariana Trough: Results of the first Alvin dive [J]. *American Geophysical Union Transactions*, 1987, 68: 1 531.
- [8] Korea Develops Deposits Worth Five Trillion KRW at Thermal Vents in the Pacific [EB/OL]. (2011-03-30). http://eng.kordi.re.kr/kordi_eng/?sub_num=336&state=view&idx=122&ord=0
- [9] 吴世迎, 陈穗田, 张德玉, 等. 马里亚纳海槽海底热液活动和热液硫化物研究[J]. *中国科学*, 1991, 2: 198-199.
- [10] 公衍芬. 胡安德富卡海脊玄武岩地球化学及其热液硫化物成矿作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [11] Porter H, Stace B, Maurice A, et al. Deep-sea mining of seafloor massive sulfides[J]. *Marine Policy*, 2010, 34: 728-732.
- [12] Herzig P M, Petersen S, Friberg. Polymetallic Massive Sulphide Deposits at the Modern Seafloor and their Resource Potential[J]. *ISA Technical Study*, 2000(2): 8-35.
- [13] Amann H. The Atlantis II Deep Project in the Red Sea as a source of technology for the development of marine polymetallic sulphides[J]. *Oceans*, 1983, 15: 802-810.
- [14] 丁六怀, 陈新明, 高宇清. 海底热液硫化物——深海采矿前沿探索[J]. *海洋技术*, 2009, 28(1): 126-132.
- [15] Amann H. Development of ocean mining in the Red Sea

- [J]. *Marine Mining*, 1989, 5: 163-172.
- [16] Neptune Minerals. Oceans of Opportunity in Minerals Exploration: Neptune Minerals Annual Report[R]. Neptune Minerals, 2008.
- [17] 阳 宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状与发展趋势[J]. *凿岩机械气动工具*, 2010(1): 12-18.
- [18] 中国大洋协会与国际海底管理局签订国际海底多金属硫化物矿区勘探合同[N]. *中国海洋报*, 2011-11-22(A1).
- [19] IAS Council Approves Five New Applications for Exploration[EB/OL]. (2012-7-24)[2012-8-1]. <http://www.isa.org.jm/en/node/770>.
- [20] 温竹青, 夏建新. 深海硫化物资源评价方法及案例分析[J]. *海洋地质前沿*, 2010, 26(4): 46-54.
- [21] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1 155-1 158.
- [22] Lipton I T. Mineral Resource Estimate Solwara 1 Project Bismarck Sea Papua New Guinea For Nautilus Minerals Inc [EB/OL]. [2008-02-01]. <http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/-Solwara 1-43-101>.
- [23] Lipton I T. Mineral resource estimate, Solwara 1 project, Bismarck Sea, Papua New Guinea: NI43-101 Technical Report for Nautilus Minerals Inc [EB/OL]. [2008-02-01]. http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/_Solwara1_43-101.
- [24] Lipton I T. Mineral Resource Estimate Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report compiled under N143-101[R]. 2011.
- [25] Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, et al. Volcanogenic massive sulfide deposits, in Hedenquist[C]// *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, 2005: 523-560.
- [26] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2010 [EB/OL]. [2011]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010>.
- [27] 李 军. 现代海底热液块状硫化物矿床的资源潜力评价[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(6): 23-30.
- [28] 高爱国, 赵冬梅. 我国海底热水矿床研究回顾与展望[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(1): 47-53.
- [29] 戴宝章, 赵葵东, 蒋少涌. 现代海底热液活动与块状硫化物矿床成因研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(3): 246-254.

CURRENT STATUS AND PERSPECTIVE ON RESEARCH OF SEAFLOOR HYDROTHERMAL SULFIDE DEPOSITS

GONG Yanfen¹, LIU Zhijie¹, YANG Wenbin², JIANG Li¹

(1 National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China;

2 CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Modern seafloor hydrothermal activities are widely distributed in world oceans. This paper is to make an introduction to the mining status of seafloor hydrothermal sulfide and a summarization of the application procedure for mining privilege and the status of sulfide resource evaluation. Understanding the spatial and temporal distribution of seabed mineral resources and improving the predictive ability of seabed polymetallic ore district can provide support for the exploitation of the resources in the “area”. It is the main developing direction in the future to further reveal the three-dimensional pattern of hydrothermal deposits, make delineation of the ore deposits, improve the evaluation technology for resource potential, and set up the geological model for better understanding of seafloor hydrothermal sulfide deposits.

Key words: submarine hydrothermal; sulfide; polymetallic minerals