

我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020)

石学法^{1,2}, 符亚洲³, 李兵^{1,2}, 黄牧^{1,2}, 任向文^{1,2}, 刘季花^{1,2}, 于淼^{1,2}, 李传顺^{1,2}

1. 自然资源部 第一海洋研究所, 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266037;
3. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘要: 深海矿产是地球上尚未被人类充分认识和利用的最大潜在战略矿产资源, 近十年我国在该领域的研究取得了重要进展。在太平洋国际海底区域申请到 2 块多金属结核勘探区、1 块富钴结壳勘探区, 在西南印度洋中脊申请到 1 块多金属硫化物勘探区。研究阐明了我国多金属结核和富钴结壳勘探区小尺度成矿规律, 揭示了其成矿作用过程及古海洋古气候记录, 探讨了关键金属元素富集机制。在西南印度洋、西北印度洋和南大西洋中脊发现了多处热液区, 阐述了其成矿作用及控制因素, 建立了超慢速扩洋中脊热液循环模型, 探讨了拆离断层型热液成矿系统的成矿机制。在太平洋和印度洋划分了 4 个深海稀土成矿带, 在中印度洋海盆、东南太平洋和西太平洋深海盆地发现了大面积富稀土沉积区, 初步揭示了深海稀土的富集特征、分布规律、赋存状态和成矿机理。今后在继续加大深海矿产资源调查研究的同时, 应聚焦深海关键金属成矿作用研究。

关键词: 深海矿产; 勘探合同区; 成矿作用; 研究进展

中图分类号: P736 文章编号: 1007-2802(2021)02-0305-14 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.022

Research on Deep-sea Minerals in China: Progress and Discovery (2011–2020)

SHI Xue-fa^{1,2}, FU Ya-zhou³, LI Bing^{1,2}, HUANG Mu^{1,2}, REN Xiang-wen^{1,2}, LIU Ji-hua^{1,2},
YU Miao^{1,2}, LI Chuan-Shun^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao Shandong 266061, China;
2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao Shandong 266037, China;
3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Deep-sea minerals belong to potential strategic mineral resources which have been less recognized and not been utilized yet. In the last decade, China made abundant important progresses in deep sea mineral exploration and research. Two exploration areas on polymetallic nodules, one exploration area on Co-rich ferromanganese crusts in the Pacific, and one exploration area on polymetallic sulfides in the Southwest Indian Ridge were allocated by China sponsored contractors. The distribution patterns of polymetallic nodules and Co-rich ferromanganese crusts in exploration areas of small-scale were clarified. The ore-forming processes and palaeoceanographic and palaeoclimatic records were illustrated. The enrichment mechanisms of critical metals were investigated. A number of hydrothermal fields were discovered in the Southwest Indian Ridge, the Northwest Indian Ridge, and South Atlantic Ridge. In those hydrothermal fields, ore-forming conditions and mineralization mechanisms were revealed, hydrothermal recycling models for ultra-slow spreading ridge were built up, and a diversity of detachment fault-related hydrothermal systems were studied. Four metallogenetic belts of REY-rich deep-sea sediments in global deep oceans were discriminated. A few large areas covered by REY-rich deep-sea sediments were discovered respectively in the Central Indian Basin, the Southeast Pacific, and the West Pacific. The preliminarily researches on enrichment feature, distribution pattern, occurrence state, and ore-forming process of the REY-rich deep-sea sediments had been carried out. The future researches on the ore-forming dynamic of critical metals in deep-sea will be pros-

收稿编号: 2020-106, 2020-07-09 收到, 2020-09-02 改回

基金项目: 中国大洋矿产资源研究项目(DY135-R2-1-01); 国家自然科学基金项目(91858209)

第一作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学与海底成矿作用. E-mail: xfshi@fio.org.cn.

perous.

Key words: deep-sea minerals; exploration area allocated to contractors; mineralization; research progress

0 引言

深海发育有丰富的矿产、能源和生物资源,是地球上尚未被人类充分认识和利用的最大的潜在战略资源基地。迄今已经发现的深海金属矿产主要有多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和深海稀土,这四类矿产资源潜力巨大,其中的 Mn、Cu、Ni、Co、Pb、Zn、REY、PGE 等经济价值尤高。

20 世纪 60 年代,深海矿产资源研究进入快速发展期,世界发达国家开始进行大规模调查研究,兴起了深海“蓝色圈地运动”(许东禹,2013)。我国的深海矿产资源调查研究始于上世纪 70 年代末,经过四十多年的努力,迄今已遍及太平洋、印度洋和大西洋,涵盖了上述四类资源。我国作为第一批国际海底区域矿产资源勘探的“先驱投资者”,先后与国际海底管理局签订了五个勘探区合同,成为世界上第一个在国际海底区域拥有三种资源五个勘探区的国家,同时还获得了勘探区内相应矿产的专属勘探权。除 2001 年中国大洋协会在东太平洋 CC 区(Claron-Clipperton Zone,简称 CCZ)获得了 75 000 km² 多金属结核勘探区外,其余四个勘探区都是近十年来申请获得的:2011 年中国大洋协会在西南印度洋中脊获取了 10 000 km² 多金属硫化物勘探区,2014 年中国大洋协会在西北太平洋海山区获得了 3 000 km² 富钴结壳勘探区,2017 年中国五矿集团在东太平洋获得了 72 740 km² 多金属结核勘探区,2019 年北京先驱高技术开发公司在西太平洋获得了 74 052 km² 多金属结核勘探区。与此同时,我国对海底多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物分布规律和成矿作用进行了深入研究,也是国际上率先开展深海稀土调查研究的国家之一。本文简要回顾了 2011~2020 十年间我国在深海矿资源调查与研究领域取得的主要进展和重要发现,并对今后的研究提出了若干建议。

1 多金属结核和富钴结壳

多金属结核又称铁锰结核、锰结核(简称“结核”),是人类最早发现的深海矿产,它广布于全球水深 4 000~6 500 m 的深海盆地中,主要分布在太平洋,其次是印度洋。位于东北太平洋海盆的克拉里昂、克里帕顿断裂带之间的地区(CCZ)是多金属结核经济价值最高的地区,世界上大多数国家的多

金属结核专属勘探区都位于该区(许东禹,2013)。多金属结核富含多种元素,其中 Mn、Co、Ni、Cu 等元素含量高,具有潜在经济价值。多金属结核成因有水成成因、成岩成因和水成-成岩作用混合成因(许东禹,2013; Hein and Koschinsky, 2014)。

富钴结壳,也称铁锰结壳、锰结壳或钴结壳(简称“结壳”),主要产在 800~3 000 m 的海山、海台、岛屿斜坡等海底高地顶部和斜坡上的坚硬岩石表面,主要是水成成因(Hein and Koschinsky, 2014)。富钴结壳主要分布在太平洋,西太平洋海山区是最有经济价值的区域(称为 prime Fe-Mn crust zone,简称 PCZ)。富钴结壳富含 Co、Ni、Te、Pt、REE 等元素,其中 Co 的含量为 0.4%~1.2%,可媲美刚果(金)成矿带内高品位钴矿床(Co 含量为 0.4%~0.5%)(杜菊民和赵学章,2010)。

多金属结核和富钴结壳金属资源潜力巨大,其中 Mn、Co、Cu、Ni、Mo、Te 可比肩陆地相应金属储量(Hein et al., 2013)。不仅如此,它们还能提供跨越数千万年的海洋和气候演变记录,在古海洋、古气候研究中有重要作用,同时对认识海洋中主要金属元素的源-汇、通量及地球化学循环过程都十分重要(Frank, 2002; Hein and Koschinsky, 2014; Fu, 2020)。

1.1 大洋多金属结核和富钴结壳小尺度成矿规律研究及资源评价

近十年来,我国学者对大洋多金属结核和富钴结壳的调查研究主要集中在太平洋 CCZ 和 PCZ 区。在我国结核勘探区,从结核覆盖率分布角度查明了多金属结核小尺度分布特征,发现地形坡度对结核分布有明显影响(梁东红等,2014)。刘永刚等(2013)对多金属结核 CC 区已有调查站位进行了模型训练,分别建立了 Mn、Co、Ni、Cu 金属品位与洋壳年龄均值、沉积物厚度、地形起伏度、沉积类型等区域控矿要素之间的关系模型,得到了该区多金属结核资源定量评价有效模型。

在结壳小尺度成矿规律方面,发现尖顶海山体积小,但地形变化连续,底流及环境氧化性较强,有利于结壳的生长,结壳厚度较大,富含成矿元素和生物组分;而平顶海山体巨大,顶部和斜坡陡崖不利于结壳生长,底流活动只发育在山顶边缘和山脊地带,后期构造活动相对频繁,结壳厚度较小(马维林等,2013,2014; 杨胜雄等,2016)。

张富元等(2011, 2015)建立了一种可以分别计算资源量的方法,并据此计算出太平洋海山干结壳资源量为 $5.071 \times 10^{10} \sim 1.014 \times 10^{10}$ t, 结壳分布面积为 2.16×10^6 km², 全球三大洋海山干结壳资源量为 $1.08 \times 10^{10} \sim 2.16 \times 10^{11}$ t, 结壳分布总面积为 3.034×10^6 km²。He 等(2011)通过建模研究确定,在勘探区面积为 4 856 km², 开发区域面积为 1 214 km² 条件下可满足 20 年开采, 每年 100 万 t 湿结壳的年产量。

Yang 等(2020)对西太平洋深海盆地至海山的结核和结壳进行了声学定量分析,成功建立了背散射与结核、结壳和不同沉积物之间的定性和定量关系,发现高背散射强度指示海山的峰顶和侧脊上发育富钴结壳,深海盆地中发育高丰度的结核。

1.2 中国南海多金属结核和富钴结壳研究

近十年来,我国学者除了重点对 CCZ 的多金属结核和 PCZ 的富钴结壳进行研究外,还对中国南海多金属结核和结壳进行了元素富集机制、成矿物质来源和形成机制等方面的研究(张振国等, 2013; Guan et al., 2017, 2018, 2019; Zhong et al., 2017, 2019; 刘兴健等, 2018; 殷征欣等, 2019)。

南海结核和结壳主要分为三类:①南海东北坡发育以针铁矿为主的富铁结核,其 Mn/Fe 值低,微量和稀土元素含量低;②沿南海西北缘分布的表面光滑的铁锰结核和结壳,主要由钴土矿、钡镁锰矿和碳氟磷灰石(CFA)组成,铁锰含量相当,微量金属富集程度中等,Ce 呈正异常;③产于南海中部盆地,由钴土矿、钡镁锰矿和水钠锰矿组成的结核和结壳,Mn/Fe 值较高(Zhong et al., 2017)。

南海多金属结核的主要矿物组成与大洋结核相似,但南海结核中的 Mn、Cu、Co、Ni 和 Zn 含量较低,而 Fe、Ti、P、Nb、Pb、Rb、Sc、Ta、Sr、Th 和 REY 等含量较高(张振国等, 2013; 殷征欣等, 2019);南海结核具有较快的生长速率及较高的 δCe 正异常,表明其生长在更为氧化的环境,大量陆源碎屑为其提供了丰富的成矿物质(殷征欣等, 2019)。然而,南海铁锰结壳与之不同,与大洋结壳相比,南海东部海山铁锰结壳 Mn 含量较高,可能与马尼拉海沟附近的火山喷发物有关,但 Cu、Co 和 Ni 等含量较低,可能与边缘海沉积速率高或有机络合物造成水体中微量元素减少有关(刘兴健等, 2018)。根据结构构造和化学成分可将南海结核中两组微层分为富 Mn-Ni-Zn-Cu-Li-Ba-Mg 微层和富 Fe-Co-Ti-Sr-Pb-REY 微层,在结核形成过程中,水成作用和成岩作用可能分别促进了两组金属元素的富集(Guan et

al., 2019)。南海结壳/结核的 Fe 同位素特征表明,Fe 元素可能主要为河流输入;Os 同位素组成指示主要的成矿元素可能直接来自周围海水,而周围海水受到陆源物质输入的强烈影响,也可能有少量幔源物质的贡献(Guan et al., 2017)。结核碎屑相的 Pb、Nd 和 Sr 同位素组成特征表明,在 1.06~3.2 Ma,华南、吕宋和台湾三个陆源区向南海北部输入物质;1.06 Ma 之后,陆源组分主要是台湾岛河流和中国黄土风尘两端元的混合。南海底层水循环分别在 3.2、2.1 和 1.06 Ma 发生变化,可能是受全球变冷和吕宋弧-弧前隆起的影响(Zhong et al., 2019)。

1.3 多金属结核和富钴结壳关键金属富集机制

“关键金属”大致包括“三稀金属”及稀贵金属(铂族金属)和 W、Sn、Co、Ti、Sb、V、Ni、Cr、Mn、U 等(毛景文等, 2019; 王登红, 2019)。多金属结核和富钴结壳主要的关键金属有 Co、Ni、Ti、Te、Pt 及 REY 等。Co 是深海铁锰矿床中最重要的关键金属元素,在结壳中影响 Co 富集的主要因素是磷酸盐化作用以及与 Fe 相矿物和碎屑矿物稀释有关的作用(任向文等, 2011a);而在水成结核中,Co 的富集主要与 Mn^{3+} 有关,而受沉积后作用影响较小(Li et al., 2020)。

1.3.1 稀土元素 稀土元素(REY)是富钴结壳和多金属结核重要的伴生有用元素(何高文等, 2011; 许东禹, 2013)。在富钴结壳未磷酸盐化壳层中,REY 主要赋存在 $\delta\text{-MnO}_2$ 相中;在磷酸盐化壳层中,REY 除了赋存在 Fe、Mn 氧化物相外,还赋存在 CFA 相中(任向文等, 2011a)。海水是 P 和 REY 的主要来源,当它们沉淀为 CFA 时,以高稀土元素含量和重稀土富集为特征(Jiang et al., 2020)。选择性化学提取试验显示富钴结壳新壳层中稀土元素主要赋存于铁氢氧化物相中,老壳层(磷酸盐化壳层)中稀土元素主要赋存于残渣态中,表明磷酸盐化作用对老壳层稀土元素的富集具有显著影响(高晶晶等, 2015)。在水成结核中,铁氢氧化物对 REY 具有明显的清扫作用,早期形成的似叠层石构造纹层中 REY 相对亏损,表明沉积成岩过程会影响 REY 的积聚(Li et al., 2020)。

1.3.2 贵金属元素 水成结壳和结核中富集铂族元素(PGE),特别是 Pt(可达 ppm 级),具有十分重要的潜在经济价值。通过对西太平洋海山富钴结壳的铂族元素研究发现,结壳对海水中的 PGE 有选择性的吸收导致结壳的 Pt/Pd 值高且具有独特的结壳模式(任江波等, 2016)。通过化学分级提取实验,发现太平洋采薇海山富钴结壳中的 PGE 富集主

要是受到铁氢氧化物相和残渣态的影响,结壳中PGE的富集机理为铁氢氧化物胶体粒子的吸附作用(高晶晶等,2019)。

1.3.3 分散元素 与地壳和深海黏土相比,多金属结核和富钴结壳富集分散元素Te、Tl、Se和Cd,而Re、Ga、Ge和In不富集;在结核圈层和结壳剖面中,Cd、Se、Te和Tl的变化主要与Mn矿物和Fe矿物相对含量的变化有关,磷酸盐化壳层中分散元素的含量会受到磷酸盐化作用的影响;不同成因类型的铁锰矿床中Cd、Se、Te和Tl的含量存在显著差异,可能是由物质来源、沉积速率和矿物组成的差异所导致。在水成作用和水成-成岩混合作用下,Cd、Se、Te和Tl主要通过吸附在锰氧化物或/和铁氢氧化物进入铁锰矿床;耦合的氧化还原和共沉淀过程可以解释Te的高度富集(Fu and Wen, 2020)。

1.4 多金属结核和富钴结壳成矿作用

1.4.1 物质来源 中太平洋海山水化学和金属元素地球化学研究表明,结壳的金属元素主要来源于海山当地的水岩反应和/或低温热液活动,南极底层流起着输运部分成矿物质的作用(武光海和刘捷红,2012)。太平洋海山富钴结壳中生物标志物、有机碳及其稳定同位素特征表明,结壳中有机质主要来源于海洋表层水体中的低等菌藻浮游生物,以及一定量的陆源高等植物组分(Zhao et al., 2014, 李雪富等,2012)。

目前对于富钴结壳稀有气体元素的来源还存在争议。李江山等(2012)认为,中太平洋富钴结壳非磷酸盐化壳层中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与深海沉积物类似,为宇宙尘的加入引起;而Bu等(2014)则认为太平洋海山富钴结壳中,高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 型结壳的稀有气体主要来源于EM型富集地幔,低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 型结壳的稀有气体则主要来源于HIMU型富集地幔。

1.4.2 微生物成矿作用 微生物能够参与到结核和结壳中金属元素的迁移、转化、富集与成矿作用中。结核中的*Pseudoalteromonas*和*Alteromonas*可能对结核成矿起到诱导或控制作用(Wu et al., 2013),在深海海水-沉积物界面,微生物生态系统和结核生长之间存在着相互依赖的关系(Jiang et al., 2020)。与氧化还原反应有关的微生物能够驱动结核和结壳与海水或孔隙水之间的Mn、Fe及其它成矿元素的循环(Jiang et al., 2017)。

结核中自由生活和形成生物膜的细菌为锰沉积提供了基质,而结壳中颗石藻代表了作为初始锰沉积的生物种子的优势生物体(Wang et al., 2012)。盐场海芽孢杆菌能够促进释放结核中的

Fe、Mn等元素,同时对释放出的金属离子又有富集作用,并能够诱导新矿物的形成(吕靖等,2020)。

1.4.3 富钴结壳年代学 无论是剖析富钴结壳成矿作用过程,还是利用其重建古海洋和古气候演化历史,都需要立足于准确可靠的年代学基础上。目前结壳的定年方法主要有放射性同位素测年(^{10}Be 、U系)、同位素地层学(Sr、Os)、磁性地层学、生物地层学、Co含量经验公式和基岩年龄外推法等。近十年,我国学者主要通过以下几种方法对生长周期相对较长的结壳进行了年龄测定,获得了较为可靠的定年结果。

(1) 生物地层年代学:我国学者对中、西太平洋结壳内部不同纹层的钙质超微化石进行了研究,成功确定了结壳的生长速率和生长时代。中太平洋富钴结壳的主要生长期都在晚古新世、中始新世至晚始新世、中中新世至上新世、上新世至更新世,主要的生长间断在渐新世和早始新世(武光海等,2011);西太平洋麦哲伦海山富钴结壳中钙质超微化石可追溯的生长年龄最早可达晚白垩世(陈荣华等,2015;任向文等,2017)。

(2) 宇宙成因核素 ^{129}I 年代学: ^{129}I 是一种宇宙放射性同位素,其半衰期为15.7 Ma,测年时间尺度可达80 Ma(Fabryka-Martin et al., 1985)。新开发的 ^{129}I 年代学方法在结壳定年研究中取得成功,Dong等(2015)应用加速器质谱(AMS)对中太平洋海山富钴结壳CXD08-I中 ^{129}I 进行了测试,发现 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 值随着结壳深度的增加呈指数级下降;Ji等(2015)测得中太平洋两个结壳MP5D44和CXD08-I的 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 值为 $7\times 10^{-14}\sim 1.27\times 10^{-12}$,两个结壳的底层生长年龄分别为54.77 Ma和69.69 Ma。

(3) 磁性地层年代学:生长速率极其缓慢的富钴结壳能够记录地球磁极的倒转,据此可以建立高精度的磁极时间序列,获得可靠的磁性地层年代学结果(Joshima and Usui, 1998)。太平洋(PO-01)、中国南海(SCS-01, SCS-02)和印度洋(IO-01)四个水成结壳的详细磁性地层学和岩石磁学研究显示,它们的生长速率分别为4.82、4.95、4.48和11.28 mm/Ma(Yuan et al., 2017)。结壳中的纳米磁铁矿记录了结壳生长时期的地球磁场信息(Yuan et al., 2020)。

1.4.4 多金属结核和富钴结壳成矿模式 多金属结核和富钴结壳作为深海自生铁锰沉积矿产,是深海沉积动力作用的产物,其成矿作用受控于海水/孔隙水的氧逸度和pH、底流流速、碳酸盐补偿深度、

沉积物来源和沉积通量、水深、地形、滑坡等多种因素,这些因素空间分布的不均一性造成了铁锰沉积矿床成因类型的多样性。本文在总结上述因素的基础上,提出了多金属结核和富钴结壳成矿模式(图1):海山斜坡上发育水成成因的富钴结壳,相对深海铁锰沉积矿床的平均化学成分,以富Co、Ce、Mn和贫Ni、Cu为特征;在深海盆地富氧底层水活跃的区域,发育水成成因的多金属结核,具有与富钴结壳类似的成分特征;在富氧底层水活动较弱的深海盆地,发育水成-氧化成岩混合成因的多金属结核,以富Ni、Cu、Mn为特征;在富氧底层水不活跃但海表生物初级生产力高的区域,发育准厌氧成岩成因的多金属结核,以富Mn、Ni,贫Co为特征。

1.5 结核、结壳的古海洋古气候记录

Pb、Nd、Hf、Os等放射性同位素和新兴的非传统稳定同位素是结核和结壳古海洋古气候研究的有力工具,它们能够提供风化机制和海洋环流等信息(Frank, 2002; Hein and Koschinsky, 2014; Fu, 2020)。

1.5.1 古大洋环流 富钴结壳的Nd同位素已被证明是古大洋环流变化的良好指标(Chen et al., 2011)。中北太平洋不同深度结壳表层的Nd同位素揭示了中北太平洋深水富放射成因Nd的来源:北太平洋中层水在日本岛附近形成并以平流形式将Nd传输到整个中北太平洋中层,中北太平洋深水Nd同位素在较短时间尺度上的演化并不是稳定不变的(Chen et al., 2011)。北太平洋西部马里亚纳海沟附近两块结壳Nd同位素的时间序列揭示了早中新世以来北太平洋西部深水环流的变化,发现印尼海道的关闭使太平洋和印度洋的表层和中层

水交换逐渐停止(Hu et al., 2012)。另外,有研究发现,金属稳定同位素如V、Cr同位素等在重建古海洋演化方面具有潜在的应用价值(Wei et al., 2018; Wu et al., 2019),值得进一步研究。

1.5.2 古气候变化 莱恩海山链M海山结壳不完整地记录了70 Ma以来南、北半球风尘演化过程:自晚白垩世开始南半球总体风尘通量逐渐降低,至晚中新世,其Al沉积通量峰值对应着环太平洋区域的火山/热液活动期幕;晚中新世以后,其Al沉积通量变化记录了北半球构造、环境变化所引起的亚洲风尘活动变化(崔迎春等, 2012)。中北太平洋两块结壳的Fe/Mn值演化曲线与~1Ma以来的深海底栖有孔虫 $\delta^{18}O$ 变化曲线能够较好地对应,表明至少1Ma以来结壳中Fe和Mn的含量变化与全球气候变化密切相关(胡镭等, 2012)。西太平洋结壳的生长对全球冷事件具有明显响应,表明结壳生长与全球气候变化紧密相关(张海生等, 2015)。

2 洋中脊热液多金属硫化物

多金属硫化物是海底高温热液活动的产物,富含Cu、Zn、Pb、Au和Ag等金属元素,据估算全球海底多金属硫化物中金属资源量约 6×10^8 t(Hannington et al., 2011)。海底硫化物主要分布于大洋中脊和弧后扩张中心,至今已在世界洋底发现约700多处热液区(InterRidge Vents Database Ver. 3.4. <http://vents-data.interridge.org/>),其中约65%分布在洋中脊,约22%分布在弧后盆地,约12%分布在火山弧,另外约1%分布在板内火山上。

2.1 调查新发现

近十年来,我国对海底硫化物调查研究主要集

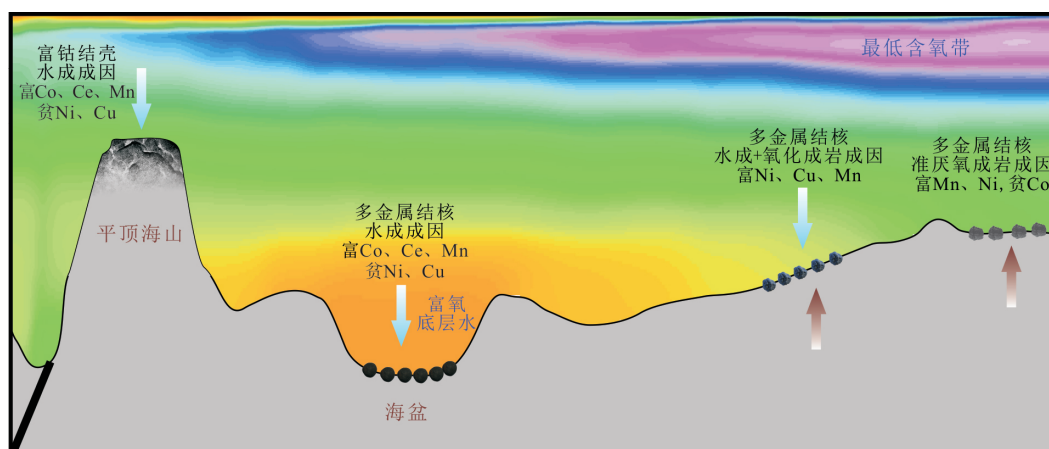


图1 多金属结核和富钴结壳成矿模式图

Fig. 1 The metallogenic model of polymetallic nodules and cobalt-rich crusts

中在西南印度洋、西北印度洋和南大西洋洋中脊三个区域,发现了多个热液区,并对其分布规律、成矿环境、成矿作用及热液循环模型开展了研究。

我国自2005年开始对西南印度洋中脊进行调查,近十年来先后发现了龙旂、玉皇、断桥、龙角、天作、天成等热液区(表1),目前已成为国际上对西南印度洋中脊热液研究程度最高的国家(Tao et al., 2012, 2020; 陶春辉等, 2014)。西南印度洋中脊属于超慢速扩张洋中脊,岩浆作用弱,洋中脊构造尤其是长期活动的低角度拆离断层对热液成矿作用起着控制作用(Zhao et al., 2013; Chen et al., 2018; Tao et al., 2020)。

我国自2009年首次对南大西洋中脊热液活动开展调查研究,发现了洵美、驹虞、太极、采蘩、德音、彤管、清扬、允臧、赤狐、凯风等热液区(表1),是目前国际上对该区调查研究程度最高的国家。南大西洋中脊属于慢速扩张洋中脊,相比于超慢速洋中脊,岩浆作用较强,构造环境表现出多样性(唐鑫等, 2016; Li et al., 2018; 王国芝等, 2019)。

我国对西北印度洋卡尔斯伯格脊的热液活动调查始于2012年。卡尔斯伯格脊为慢速扩张洋中脊,与南大西洋中脊在构造和岩浆活动上表现诸多相似性,目前已在该洋中脊发现了天休、卧蚕1号、卧蚕2号和大糈等热液区(表1)(Wang et al., 2015, 2017; 蒋紫靖等, 2017)。

2.2 成矿物质来源

热液成矿物质来源主要包括围岩、沉积物、海水及岩浆组分等,目前主流观点仍然认为热液成矿主要是高温演化的海水对基底岩石进行淋滤,成矿物质主要来自于围岩。我国学者对在各个大洋中脊采集的大量样品的研究也支持这一观点(王琰等, 2012; Li et al., 2016; Zeng et al., 2017; Liao et al., 2018a)。

大部分洋中脊热液活动发育在基性岩之上,不同洋中脊热液循环体系的三维尺度差别显著。相比快速扩张脊,慢速扩张脊上热液循环系统下渗的深度更广,影响到热液循环系统对成矿物质的获取,硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成一定程度上可反映热液循环规模的相对大小(Zeng et al., 2017)。部分慢速-超慢速扩张洋中脊上发育一定量超基性岩控制的热液区,表现出较高的Cu、Zn和Au含量(Wang et al., 2014; Zhang et al., 2018)。基性岩控制的硫化物与超基性岩控制的硫化物在Cu/Zn-(Cu+Zn)值、Au含量等化学元素指标存在显著差异,可作为判别成矿物质来源的辅助手段(Wang et al., 2014)。

岩浆脱气作用是否可以作为洋中脊海底热液成矿物的来源目前尚有争议,但证据在不断增加。如对南大西洋中脊德音和洵美两处热液区赋矿围岩中熔体包裹体的研究发现,在气泡部分的气泡壁上存在磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿等金属矿物,认为岩

表1 近十年来我国在全球三大洋中脊上新发现的海底热液区及其成矿环境

Table 1 The newly discovered hydrothermal fields and their development environments on three mid-ocean ridges in the past decade

洋中脊	构造环境	热液区	基岩	控制因素	代表文献	
超慢速扩张洋中脊	西南印度洋中脊	裂谷壁	龙旂、玉皇、天作、龙角	玄武岩、超基性岩及其蚀变岩类	发展期拆离断层	Tao等(2012); 陶春辉等(2014); Liao(2018a); Chen(2018); Tao(2020)
		新生火山区	天成、断桥	玄武岩为主	岩浆作用为主	Yang等(2017); Chen等(2018)
	新生火山区	驹虞、德音、彤管、允臧	玄武岩为主	岩浆作用为主	Wang等(2016); 叶俊等(2017); Li等(2018)	
		洵美	玄武岩为主	岩浆与构造双重作用	王国芝等(2019)	
慢速扩张洋中脊	南大西洋中脊	裂谷壁	赤狐	玄武岩、构造角砾岩	成熟拆离断层	李兵等(2019)
	内角高地	采蘩	玄武岩、辉长岩及其蚀变岩类	拆离断层后期岩浆作用	Li等(2014, 2016)	
		非转换不连续带	太极	玄武岩、辉长岩及其蚀变岩类	构造作用为主	Li等(2018)
		卧蚕1号、2号	玄武岩为主	岩浆作用为主	Wang等(2017)	
西北印度洋卡尔斯伯格脊	新生火山区	大糈	玄武岩为主	岩浆与构造双重作用	Lou等(2020)	
	裂谷壁	天休	玄武岩、超基性岩及其蚀变岩类	早期拆离断层	Han等(2015); 周鹏等(2019)	

浆脱气作用可能提供了潜在的成矿物质来源(唐鑫等, 2016; 王国芝等, 2019)。除了岩浆脱气过程, 硫化物岩浆熔离后分异也可能是潜在的成矿物质来源(Yang et al., 2014)。

2.3 成矿流体与热液羽状流

2.3.1 成矿流体 海水被认为是成矿流体最主要的组分来源, 但海水是否是唯一的流体来源今尚存争论。近年来, 随着调查技术的进步, 我国学者对海底热液系统成矿流体的研究, 逐渐由单一的流体包裹体研究转向结合海底原位喷口流体测试与分析(王晓媛等, 2013; 雷吉江等, 2015; Ji et al., 2017; Tao et al., 2020)。

西南印度洋龙旗热液区是我国目前少有的直接采取到喷口流体的热液区。Ji等(2017)根据喷口流体的 H_2 、 CH_4 等资料, 推测龙旗热液区基底岩石以镁铁质为主, 扩张速率不是控制流体化学组成的关键因素, 而基底岩石、水-岩相互作用和相分离才是主要因素。Tao等(2020)认为龙旗热液区热液循环系统具有较长的水-岩反应区。

2.3.2 热液羽状流 海底热液喷发过程中, 大约90%以上的金属物质会以羽状流形式扩散至海水, 一部分热液羽状流中具有高于海水的He同位素组成, 指示热液活动的存在(卢映钰等, 2014)。热液羽状流对海水化学组分的改变更多的体现在其物质组成上, 如在西北印度洋卡尔斯伯格脊大槽热液区附近采集的海水与颗粒物中发现了显著的Cl、Br、Mg负异常及Fe、Mn正异常(蒋紫靖等, 2017)。

2.3.3 热液沉积记录 受广泛热液羽状流颗粒物沉降的影响, 热液区周围沉积物中往往呈现Zn、Cu、Fe、Mn元素分带现象, 同时还有大量热液标型矿物如黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、针铁矿等生成, 这对识别热液活动及成矿环境具有指示意义(杨宝菊等, 2019; Yang et al., 2020)。Liao等(2018b)通过对西南印度洋典型热液区周围沉积物分析, 提出热液区附近沉积物的Cu-Cu/Fe值可作为判别热液区成因的标志。

热液沉积物成分取决于其形成机制。杨宝菊等(2019)对南大西洋中脊多个热液沉积物样品研究后提出, 热液沉积物有三种形成机制: ①热液柱含Fe羟基氧化物颗粒的沉降; ②非活动热液区烟囱体的风化; ③低温弥散流的沉淀。

2.4 硫化物成矿年代学

近年来, 我国学者建立了热液硫化物铀系同位素测年方法, 并开展了硫化物成矿年代学研究(王叶剑, 2012; 叶俊等, 2017; Yang et al., 2017;

Wang et al., 2019)。成矿年代学研究揭示了海底热液活动的幕式成矿特征。王叶剑(2012)应用 $^{230}Th/^{234}U$ 和 $^{210}Pb/Pb$ 法对中印度洋Kairei热液区的成矿年代学研究发现, 该热液区至少存在4次成矿事件; Yang等(2017)应用 $^{230}Th/^{238}U$ 测年方法对西南印度洋断桥热液区的成矿年龄分析发现, 该区发生4次主要的热液事件, 最早发生于 (84.3 ± 0.5) ka前, 终止于 (0.737 ± 0.023) ka前; 叶俊等(2017)应用 $^{230}Th/^{234}U$ 方法对南大西洋德音热液区硫化物测年发现, 该区至少可划分出5个成矿周期, 最老样品形成于45 ka前, 并探讨了热液喷发中心的动态迁移和成矿演变历史。

2.5 新技术在热液活动研究中的应用

近年来, 我国学者开始将高分辨透射电子显微镜(HRTEM)、原位显微XRD技术以及非传统稳定同位素(如Zn、Fe、Cu、Hg等)分析新技术应用到海底硫化物研究中。

HRTEM及原位显微XRD技术可帮助精细刻画海底热液硫化物微观纳米结构, 如Wu等(2016, 2018)借助此类方法对Edmond热液区硫化物开展研究, 揭示了胶状硫化物具有纤锌矿纳米片层的光学各向异性, 同时发现硫化物中“隐形”金和银的出现, 其分布与高密度晶格缺陷密切相关。

非传统稳定同位素可进一步揭示热液成矿作用过程。如Zn同位素组成的差异可指示热液成矿期次, 在西南印度洋中脊玉皇热液区SWS区和NES区硫化物的Zn同位素组成显著不同, 结合硫同位素特征和硫化物的Zn/Cd值, 认为二者可能是不同成矿期次的产物(Liao et al., 2019)。而Hg同位素特征则可指示硫化物中Hg的来源。Zhu等(2020)报导了西南印度洋中脊的断桥和玉皇两个热液区的硫化物Hg同位素组成, 玉皇热液区较断桥热液区具有较高的 $\delta^{22}Hg$ 和 $\Delta^{199}Hg$, 表明两个热液区具有不同的Hg来源: 玉皇热液区Hg来自于岩浆和海水混合, 断桥热液区仅来自于岩浆。

2.6 热液循环模型和热液成矿系统

2.6.1 超慢速扩张洋中脊热液循环模型 洋中脊热液循环系统是由热源驱动、受岩浆-构造控制、涉及水圈-岩石圈相互作用的循环体系。在对西南印度洋龙旗热液区进行地球物理、喷口流体化学、数值模拟等综合研究基础上, 提出了一种超慢速扩张洋中脊热液循环模型(Yu et al., 2018; Tao et al., 2020), 它具有两个特征: ①超慢速扩张洋脊热液循环起源深度比其他洋中脊热液区更深, 达到了Moho面以下; ②热源可以不是在洋壳中的岩浆房, 可以

存在于岩石圈下部的熔体聚集带。

2.6.2 拆离断层型热液成矿系统 拆离断层是广泛发育在慢速和超慢速洋中脊上的一类特殊构造,其发育时间长,规模大,易于成为长期稳定的热液导矿构造,而沿着拆离断层发生热液-超基性岩相互作用,可为热液成矿提供丰富的物质来源。近年来我国在三大洋中脊发现了大量的拆离断层型热液系统(Li et al., 2014, 2015; Chen et al., 2020)。

西南印度洋龙旗热液区为拆离断层型热液系统,发育在发展期拆离断层的上盘(Zhao et al., 2013; Tao et al., 2020);西北印度洋卡尔斯伯格脊天休热液区是以橄榄岩为围岩的热液系统,而天休邻区的拆离断层则处于初始发育期,此时无显著的洋底核杂岩(oceanic core complex,简称 OCC)构造地貌形态产出(Han et al., 2015; 周鹏等, 2019)。

南大西洋中脊已发现的拆离断层型热液系统主要与成熟拆离断层相关,如赤狐、采蘩和凯风(表1)。其中赤狐热液区是近期新发现的高温热液区,其所处位置为拆离断层上盘构造;按照拆离断层演化阶段来看,赤狐热液区属于成熟拆离断层上盘热液成矿系统,这与已发现的西南印度洋和西北印度洋拆离断层型热液系统明显不同(李兵等, 2019)。

3 深海富稀土沉积

深海富稀土沉积,也称深海稀土或富稀土泥,是指产于深海盆地中的富含稀土的沉积物,其稀土总量 ΣREY ($REE+Y$)一般大于 $700 \mu g/g$,最高含量接近 $8000 \mu g/g$,以富含重稀土为特征(石学法等, 2015a)。深海稀土由日本科学家于2011年首次发现于太平洋(Kato et al., 2011),一经报道即引起世界各国广泛关注。深海稀土是继多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后发现的第四种深海金属矿产,其资源潜力巨大。仅太平洋沉积物中,深海稀土的资源量就是已知陆地稀土资源量的1000多倍(Kato et al., 2011; 石学法等, 2015a),其成因不同于已经发现的陆地稀土矿床,属于一种新型稀土矿产。

3.1 深海稀土的调查与发现

比日本稍晚,我国于2011年开始了深海稀土研究,是国际上第二个开展深海稀土调查并取得重大发现的国家。在初步总结世界大洋地质特征和沉积物稀土元素特征的基础上,于2012年提出了多个深海稀土潜在发育区,初步划分出了4个深海稀土成矿带:西太平洋富稀土成矿带、中-东太平洋富稀土成矿带、东南太平洋富稀土成矿带和中印度洋海

盆-沃顿海盆富稀土成矿带(图2)(石学法等, 2015a)。2015年我国在中印度洋海盆发现了大面积富稀土沉积区,这是国际上首次在印度洋发现大面积富稀土沉积,其后又在东南太平洋和西太平洋发现了大面积富稀土沉积。

3.2 深海稀土特征及其分布规律

深海富稀土沉积物大都表现出Ce负异常和Eu正异常,以轻稀土亏损、重稀土富集、稀土配分模式与海水相似为特征(Kato et al., 2011; 黄牧等, 2014; 石学法等, 2015a; 张霄宇等, 2019a),其 ΣREY 大于 $700 \mu g/g$ (石学法等, 2015a, 2015b),Y元素富集程度较高,含量最高可占 ΣREY 的40%(黄牧, 2013)。从沉积环境来看,深海富稀土沉积一般发育在低沉积速率和富氧的深海盆地中,水深超过碳酸盐补偿深度(carbonate compensation depth,简称 CCD),表层生产力和陆源碎屑输入通量低、底层流发育(Kato et al., 2011; Sa et al., 2018)。

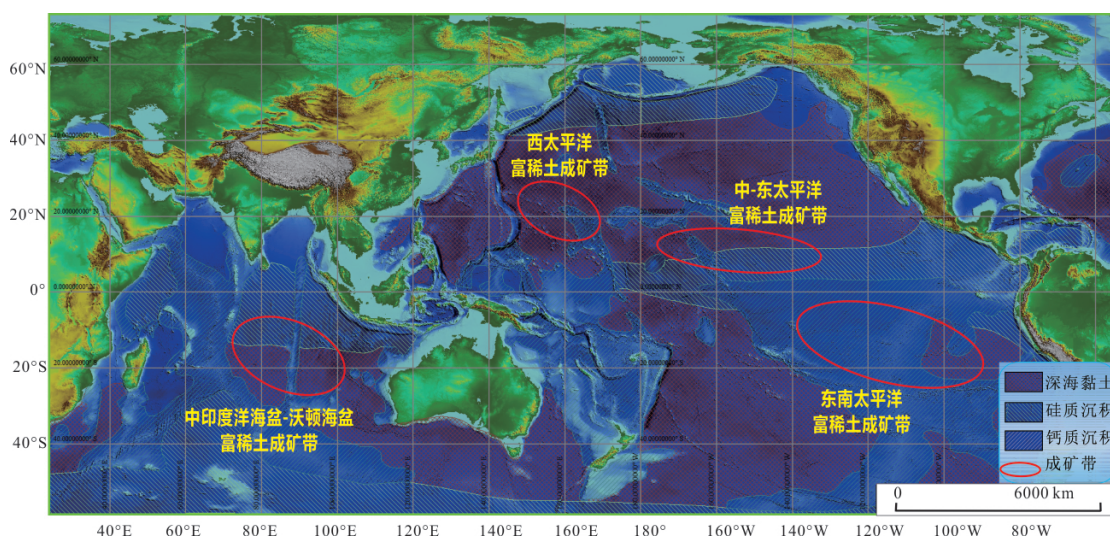
从沉积物类型来看,深海稀土元素主要发育于深海黏土沉积物中,并发育有少量沸石类矿物、铁锰氧化物、磷酸盐、碎屑矿物等,而钙质生物及硅质生物壳体中含量较低(刘季花, 1992, 2004; 刘季花等, 1998)。 ΣREY 在不同类型沉积物中呈规律性变化:从沸石黏土→远洋黏土→硅质黏土→硅质软泥,沉积物中LREE、HREY和 ΣREY 总体呈降低趋势,LREE与HREY分异程度增加,LREE相对更富集,Ce负异常程度降低,Eu正异常程度增加(黄牧等, 2014; 张霄宇等, 2019b)。

从富稀土沉积分布区域来看,目前已发现西太平洋、东南太平洋、中-东太平洋、中印度洋和沃顿海盆尤为发育(图2),而边缘海或浅海沉积物中稀土含量较低,不会形成富稀土沉积(黄牧等, 2013)。

3.3 深海稀土来源和赋存状态

3.3.1 稀土元素来源 富稀土沉积物中稀土元素的来源主要涉及两个问题:一是沉积物中的稀土元素来源(直接来源),二是海水和孔隙水中稀土元素的来源(间接来源)。

(1) 深海沉积物中稀土元素的来源由于深海沉积物稀土元素配分型式与海水非常类似,因而长期以来认为其主要来源于海水(刘季花, 1992; 黄牧, 2013; 张霄宇等, 2019a),但可能受到海水、陆源碎屑或火山源物质释放至孔隙水中稀土元素的影响(Zhao et al., 2013a; 于淼等, 2017; Liao et al., 2019a)。近年来的研究认为沉积物-海水界面中孔隙水中的REY可能是富稀土沉积物中REY的重要来源(Deng et al., 2017)。Zhao等(2013a)认为,在



据石学法等(2015a)修改

图2 太平洋和印度洋深海稀土成矿带

Fig. 2 The metallogenic belts of deep-sea REY in the Pacific and the Indian ocean

沉积时间较短或者钙质生物沉积环境中,生物磷灰石的稀土元素主要来自海水;而对于沉积时间较长,以及具有陆源碎屑沉积或者火山源沉积区域,其中的稀土元素则更多地具有后期孔隙水叠加信息,反映了沉积物的物源信息。可见孔隙水也是稀土元素的重要来源。

(2) 关于海水和孔隙水中稀土元素的来源。理论上进入海洋的物质都有可能为海水和孔隙水提供稀土元素。火山蚀变物质、热液喷发物质乃至进入深海的陆源碎屑物质都是深海稀土的“源”。就热液活动对富稀土沉积物的影响程度来看,在邻近洋中脊热液区的沉积物中,稀土元素的富集主要与热液活动中 Fe-Mn 水合(氢)氧化物的吸附作用有关(Kato et al., 2011; 周天成和石学法, 2019),在东南太平洋富稀土沉积区热液来源物质起到了重要的作用(周天成和石学法, 2019)。

3.3.2 稀土元素赋存状态 深海沉积物稀土元素的赋存状态有两种:赋存在矿物内部发生晶格替代和被矿物表面吸附。Kato 等(2011)认为,深海稀土中稀土元素的主要载体为铁锰氧化物或氢氧化物和钙十字沸石。铁锰氧化物或氢氧化物则是通过经典的元素“清扫”机制富集稀土元素,钙十字沸石则是通过特有的晶体结构吸附稀土元素等,表面吸附是深海稀土一种重要的赋存状态。

近年来,越来越多的研究者认为,生物成因磷灰石可能是富稀土沉积中稀土元素的主要赋存矿物(方明山等, 2016; 王汾连等, 2016; 任江波等, 2017; 于淼等, 2017; Zhang et al., 2017; Sa et al.,

2018; Liao et al., 2019a)。对于稀土元素在生物磷灰石中的赋存状态也有两种看法:一种认为主要是以吸附态赋存(刘志强等, 2015; 周天成和石学法, 2019);另一种则认为是在其早期成岩阶段就已经进入到晶格中,在向磷灰石等矿物中富集之前,稀土元素可能与铁锰氧化物等其他物质结合,在成岩过程中再次分配进入磷灰石等矿物中(Liao et al., 2019a; 刘明等, 2019)。

3.4 深海稀土大规模成矿作用的控制因素

虽然深海稀土的发现至今还不到十年,调查研究程度还较低,但研究者一般都认为深海稀土在深海中广泛发育,发生了大规模成矿作用,资源潜力巨大(Kato et al., 2011; 石学法等, 2015a)。现在要阐明深海稀土大规模成矿作用机制为时尚早,在此仅根据一些初步研究结果总结一下深海稀土成矿的主要控制因素。

控制深海稀土富集的主要因素有:构造环境、物质来源、水深、沉积速率、氧化还原环境、沉积物类型等。有利于形成大型深海稀土矿集区的条件是:构造稳定的深海盆地,水深在碳酸盐补偿深度(CCD)之下;碎屑物质输入量少,沉积速率低;南极底流(AABW)发育,水体呈氧化环境;沉积物类型主要为深海黏土。即大水深、低沉积速率和氧化环境是深海稀土大规模成矿的三大控制要素。沉积物类型实际上受水深、物质来源和沉积速率控制;低沉积速率为沉积物中磷灰石的富集和与海水的长时间接触提供了有力条件(于淼等, 2017),沉积速率越低,越有利于沉积物中稀土元素的富集;富氧

底流则为富稀土沉积的发育提供了氧化环境,有利于重稀土微粒的封闭,以及磷酸盐、铁锰质氧化物等物质对稀土元素的吸附(邓义楠等,2018),使稀土成矿作用在海底大范围内发生。深海稀土中生物磷灰石中 ΣREY 可达到 $n \times 10^4 \mu\text{g/g}$,磷酸盐组分可贡献全岩 ΣREY 的70%(王汾连等,2016;任江波等,2017;Liao et al.,2019a,2019b),是富稀土沉积中稀土元素可能的主要赋存矿物。

4 展望

近十年来,我国在深海矿产资源领域的研究取得了很大进展,目前在国际海底区域申请矿区数量位居世界第一。但总体看来,我国对深海矿产成矿规律的认知程度仍然较低,调查程度远远不够,成矿理论研究明显不足,勘查技术设备更是主要依赖进口,与西方发达国家相比还存在较大差距。我国今后特别需要重视深海勘查设备技术研发,在继续加大深海矿产调查研究力度的同时,加强深海成矿规律和成矿作用研究。

(1) 加强多圈层相互作用对深海金属元素成矿的控制研究。金属元素在地球多圈层相互作用过程中的循环(壳幔相互作用与元素循环、海底-海水相互作用与元素循环、海水内部相互作用与元素循环、海底-生物圈相互作用与元素循环)从宏观和本质上控制着深海成矿作用和资源分布,通过对其研究可揭示深海金属元素超常富集的成矿背景和条件,建立深海金属富集成矿理论,实现海底成矿理论创新和指导找矿突破。

(2) 聚焦深海关键金属成矿作用和分布规律研究。深海矿产最主要的特征和优势是发育战略关键金属,今后的工作中要瞄准深海关键矿产资源开展研究,揭示关键金属成矿规律,阐明深海关键金属元素赋存状态,确定深海关键金属矿床新类型,为海底关键金属矿产资源开发利用奠定科学基础。

(3) 开展深海成矿作用模拟实验研究。深海成矿是海底中高压条件下,水圈、岩石圈和生物圈共同作用的结果,目前发现的深海矿产主要包括热液型矿床(多金属硫化物)和沉积型矿床(结核、结壳和稀土等)两大类。在对地质背景和地质样品开展研究的同时,需要同时进行深海成矿作用模拟实验研究,确定深海中高压条件下成矿的地球化学热力学和动力学条件,以揭示复杂的深海成矿作用过程。

(4) 开展海陆成矿作用对比研究。陆地成矿作用研究已经发展了比较成熟的方法学体系和理论

体系,可以为现在海底成矿作用研究提供指导和借鉴。与陆地矿产研究相比,深海矿产研究属于新领域,属于当采学科。海陆对比和海陆结合必将促进深海成矿作用研究的大发展。

致谢:在本文写作过程中,叶俊、张海桃、杨宝菊等提供了有关材料;论文评审专家提出了宝贵的意见,使本文得以完善提高。在此谨致谢忱。

参考文献 (References):

- Bu W R, Shi X F, Li L, Zhang M J, Glasby G P, Liu J H. 2014. Kr and Xe isotopic compositions of Fe-Mn crusts from the western and central Pacific Ocean and implications for their genesis. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(8): 26-33
- Chen J, Tao C H, Liang J, Liao S L, Dong C W, Li H M, Li W, Wang Y, Yue X H, He Y H. 2018. Newly discovered hydrothermal fields along the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge around 63°E. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(11): 61-67
- Chen T Y, Ling H F, Hu R. 2011. Neodymium isotopes distribution and transport in the central North Pacific deep water. *Chinese Science Bulletin*, 56(21): 2243-2250
- Chen Y, Han X Q, Wang Y J, Lu J G. 2020. Precipitation of calcite veins in serpentinized harzburgite at Tianxiu hydrothermal field on carlsberg ridge (3.67°N), northwest Indian Ocean: Implications for fluid circulation. *Journal of Earth Science*, 31(1): 91-101
- Deng Y N, Ren J B, Guo Q J, Cao J, Wang H F, Liu C H. 2017. Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in western Pacific. *Scientific Reports*, 7(1): 16539
- Dong K J, Jiang S, He M, Lin M, Ouyang Y G, Wu S Y, Xie L B, Liu G S, Ji L H, Li Q, Wang S L. 2015. The measurement of ^{129}I in ferromanganese crusts and aerosol samples with AMS at CIAE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 353: 16-20
- Fabryka-Martin J, Bentley H, Elmore D, Airey P L. 1985. Natural iodine-129 as an environmental tracer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(2): 337-347
- Frank M. 2002. Radiogenic isotopes: Tracers of past ocean circulation and erosional input. *Reviews of Geophysics*, 40(1): 1-38
- Fu Y Z, Wen H J. 2020. Variabilities and enrichment mechanisms of the dispersed elements in marine Fe-Mn deposits from the Pacific Ocean. *Ore Geology Reviews*, 121: 103470
- Fu Y Z. 2020. Non-traditional stable isotope geochemistry of marine ferromanganese crusts and nodules. *Journal of Oceanography*, 76(2): 71-89
- Guan Y, Sun X M, Ren Y Z, Jiang X D. 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of the polymetallic crusts and nodules from the South China Sea. *Ore Geology Reviews*, 89: 206-227
- Guan Y, Ren Y Z, Sun X M, Xiao Z L, Guo Z X. 2018. Helium and argon isotopes in the Fe-Mn polymetallic crusts and nodules from the South China Sea: Constraints on their genetic sources and origins. *Minerals*, 8(10): 471

- Guan Y, Ren Y Z, Sun X M, Xiao Z L, Wu Z W, Liao J L, Guo Z X, Wang Y, Huang Y. 2019. Fine scale study of major and trace elements in the Fe-Mn nodules from the South China Sea and their metallogenetic constraints. *Marine Geology*, 416: 105978
- Hannington M, Jamieson J, Monecke T, Petersen S, Beaulieu S. 2011. The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology*, 39(12): 1155-1158
- He G W, Ma W L, Song C B, Yang S X, Zhu B D, Yao H Q, Jiang X X, Cheng Y S. 2011. Distribution characteristics of seamount cobalt-rich ferromanganese crusts and the determination of the size of areas for exploration and exploitation. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(3): 63-65
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, Conrad T A. 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51: 1-14
- Hein J R, Koschinsky A. 2014. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. *Treatise on Geochemistry*, 13: 273-291
- Hu R, Chen T Y, Ling H F. 2012. Late Cenozoic history of deep water circulation in the western North Pacific: Evidence from Nd isotopes of ferromanganese crusts. *Chinese Science Bulletin*, 57(31): 4077-4086
- Ji F W, Zhou H Y, Yang Q H, Gao H, Wang H, Lilley M D. 2017. Geochemistry of hydrothermal vent fluids and its implications for subsurface processes at the active Longqi hydrothermal field, southwest Indian ridge. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 122: 41-47
- Ji L H, Liu G S, Chen Z G, Huang Y P, Xing N, Jiang S, He M. 2015. Measurement of ^{129}I in ferromanganese crust with AMS. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(10): 31-35
- Jiang X D, Sun X M, Guan Y, Gong J L, Lu Y, Lu R F, Wang C. 2017. Biomineralisation of the ferromanganese crusts in the Western Pacific Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 136: 58-67
- Jiang X D, Sun X M, Chou Y M, Hein J R, He G W, Fu Y, Li D F, Liao J L, Ren J B. 2020. Geochemistry and origins of carbonate fluorapatite in seamount Fe-Mn crusts from the Pacific Ocean. *Marine Geology*, 423: 106135
- Joshima M, Usui A. 1998. Magnetostratigraphy of hydrogenetic manganese crusts from Northwestern Pacific seamounts. *Marine Geology*, 146(1-4): 53-62
- Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, Takaya Y, Kitamura K, Ohta J, Toda R, Nakashima T, Iwamori H. 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 4(8): 535-539
- Li B, Yang Y M, Shi X F, Ye J, Gao J J, Zhu A M, Shao M J. 2014. Characteristics of a ridge-transform inside corner intersection and associated mafic-hosted seafloor hydrothermal field (14.0°S, Mid-Atlantic ridge). *Marine Geophysical Research*, 35: 55-68
- Li B, Shi X F, Li C S, Wang J X, Pei Y L, Ye J. 2016. Lead, sulfur, and oxygen isotope systematics in hydrothermal precipitates from the 14°S hydrothermal field, south Mid-Atlantic ridge. *Resource Geology*, 66(3): 274-285
- Li B, Shi X F, Wang J X, Yan Q S, Liu C G. 2018. Tectonic environments and local geologic controls of potential hydrothermal fields along the Southern Mid-Atlantic Ridge (12-14°S). *Journal of Marine Systems*, 181: 1-13
- Li D F, Fu Y, Sun X M, Wei Z Q. 2020. Critical metal enrichment mechanism of deep-sea hydrogenetic nodules: Insights from mineralogy and element mobility. *Ore Geology Reviews*, 118: 103371
- Li J B, Jian H C, Chen Y J, Singh S C, Ruan A G, Qiu X L, Zhao M H, Wang X G, Niu X W, Ni J Y, Zhang J Z. 2015. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading southwest Indian Ridge. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2656-2663
- Liao J L, Sun X M, Li D F, Sa R N, Lu Y, Lin Z Y, Xu L, Zhan R Z, Pan Y G, Xu H F. 2019a. New insights into nanostructure and geochemistry of bioapatite in REE-rich deep-sea sediments: LA-ICP-MS, TEM, and Z-contrast imaging studies. *Chemical Geology*, 512: 58-68
- Liao J L, Sun X M, Wu Z, Sa R N, Guan Y, Lu Y, Li D F, Liu Y, Deng Y N, Pan Y. 2019b. Fe-Mn (oxyhydr) oxides as an indicator of REY enrichment in deep-sea sediments from the central north Pacific. *Ore Geology Reviews*, 112: 103044
- Liao S L, Tao C H, Li H M, Barriga F J A S, Liang J, Yang W F, Yu J Y, Zhu C W. 2018a. Bulk geochemistry, sulfur isotope characteristics of the Yuhuang-1 hydrothermal field on the ultraslow-spreading southwest Indian ridge. *Ore Geology Reviews*, 96: 13-27
- Liao S L, Tao C H, Li H M, Zhang G Y, Liang J, Yang W F, Wang Y. 2018b. Surface sediment geochemistry and hydrothermal activity indicators in the Dragon Horn area on the southwest Indian Ridge. *Marine Geology*, 398: 22-34
- Liao S L, Tao C H, Zhu C W, Li H M, Li X H, Liang J, Yang W F, Wang Y J. 2019c. Two episodes of sulfide mineralization at the Yuhuang-1 hydrothermal field on the southwest Indian ridge: Insight from Zn isotopes. *Chemical Geology*, 507: 54-63
- Lou Y Z, Han X Q, He Z G, Wang Y J, Qiu Z Y. 2020. Numerical modeling of hydrodynamic processes of deep-sea hydrothermal plumes: A case study on Daxi hydrothermal field, Carlsberg Ridge. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 50(2): 194-208
- Tao C H, Lin J, Guo S Q, Chen Y J, Wu G H, Han X Q, German C R, Yoerger D R, Zhou N, Li H M, Su X, Zhu J. 2012. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge. *Geology*, 40(1): 47-50
- Tao C H, Seyfried Jr W E, Lowell R P, Liu Y L, Liang J, Guo Z K, Ding K, Zhang H T, Liu J, Qiu L, Egorov I, Liao S L, Zhao M H, Zhou J P, Deng X M, Li H M, Wang H C, Cai W, Zhang G Y, Zhou H W, Lin J, Li W. 2020. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge. *Nature Communications*, 11(1): 1300
- Wang L S, Wang X F, Ye J, Ma Z B, Yang W F, Xiao J L. 2019. Separation of uranium and thorium for ^{230}Th -U dating of submarine hydrothermal sulfides. *Journal of Visualized Experiments*, (147): e59098, doi: 10.3791/59098
- Wang S J, Li H M, Zhai S K, Yu Z H, Shao Z Z, Cai Z W. 2016. Mineralogical characteristics of polymetallic sulfides from the deyin-1 hydrothermal field near 15°S, southern mid-atlantic ridge. *Acta*

- Oceanologica Sinica, 36: 22–34
- Wang X H, Gan L, Wiens M, Schloßmacher U, Schröder H C, Müller W E G. 2012. Distribution of microfossils within polymetallic nodules: Biogenic clusters within manganese layers. *Marine Biotechnology*, 14: 96–105
- Wang Y J, Han X Q, Petersen S, Jin X L, Qiu Z Y, Zhu J H. 2014. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal precipitates from Kairei hydrothermal field, central Indian Ridge. *Marine Geology*, 354: 69–80
- Wang Y J, Han X Q, Petersen S, Frische M, Qiu Z Y, Li H M, Li H L, Wu Z C, Cui R Y. 2017. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews*, 84: 1–19
- Wei W, Frei R, Chen T Y, Klæbe R, Liu H, Li D, Wei G Y, Ling H F. 2018. Marine ferromanganese oxide: A potentially important sink of light chromium isotopes? *Chemical Geology*, 495: 90–103
- Wu F, Owens J D, Tang L M, Dong Y H, Huang F. 2019. Vanadium isotopic fractionation during the formation of marine ferromanganese crusts and nodules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 265: 371–385
- Wu Y H, Liao L, Wang C S, Ma W L, Meng F X, Wu M, Xu X W. 2013. A comparison of microbial communities in deep-sea polymetallic nodules and the surrounding sediments in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 79: 40–49
- Wu Z W, Sun X M, Xu H F, Konishi H, Wang Y, Wang C, Dai Y Z, Deng X G, Yu M. 2016. Occurrences and distribution of "invisible" precious metals in sulfide deposits from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Ore Geology Reviews*, 79: 105–132
- Wu Z W, Sun X M, Xu H F, Konishi H, Wang Y, Lu Y, Cao K J, Wang C, Zhou H Y. 2018. Microstructural characterization and *in-situ* sulfur isotopic analysis of silver-bearing sphalerite from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Ore Geology Reviews*, 92: 318–347
- Yang A Y, Zhou M F, Zhao T P, Deng X G, Qi L, Xu J F. 2014. Chalcophile elemental compositions of morbs from the ultraslow-spreading southwest Indian ridge and controls of lithospheric structure on S-saturated differentiation. *Chemical Geology*, 382: 1–13.
- Yang B, Liu J, Shi X, Zhang H, Fang X. 2020. Mineralogy and sulfur isotope characteristics of metalliferous sediments from the tangyin hydrothermal field in the southern Okinawa trough. *Ore Geology Reviews*, 120: 1–14
- Yang W F, Tao C H, Li H M, Liang J, Liao S L, Long J P, Ma Z B, Wang L S. 2017. $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ dating of hydrothermal sulfides from Duanqiao hydrothermal field, southwest Indian Ridge. *Marine Geophysical Research*, 38(1–2): 71–83
- Yang Y, He G W, Ma J F, Yu Z Z, Yao H Q, Deng X G, Liu F L, Wei Z Q. 2020. Acoustic quantitative analysis of ferromanganese nodules and cobalt-rich crusts distribution areas using EM122 multibeam backscatter data from deep-sea basin to seamount in Western Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 161: 103281
- Yu Z T, Li J B, Niu X W, Rawlinson N, Ruan A G, Wang W, Hu H, Wei X D, Zhang J, Liang Y Y. 2018. Lithospheric structure and tectonic processes constrained by microearthquake activity at the central ultraslow-spreading southwest Indian ridge (49.2° to 50.8° E). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8): 6247–6262
- Yuan W, Zhou H Y, Yang Z Y, Hein J R, Yang Q H. 2020. Magnetite magnetofossils record biogeochemical remanent magnetization in hydrogenetic ferromanganese crusts. *Geology*, 48(3): 298–302
- Yuan W, Zhou H Y, Zhao X X, Yang Z Y, Yang Q H, Zhu B D. 2017. Magnetic stratigraphic dating of marine hydrogenetic ferromanganese crusts. *Scientific Reports*, 7(1): 16748
- Zeng Z G, Ma Y, Chen S, Selby D, Wang X Y, Yin X B. 2017. Sulfur and lead isotopic compositions of massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems: Implications for ore genesis and fluid circulation. *Ore Geology Reviews*, 87: 155–171
- Zhang B S, Li Z Q, Hou Z Q, Zhang W Y, Xu B. 2018. Mineralogy and chemistry of sulfides from the Longqi and Duanqiao hydrothermal fields in the southwest Indian ridge. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1798–1822
- Zhang X Y, Tao C H, Shi X F, Li H M, Huang M, Huang D S. 2017. Geochemical characteristics of REY-rich pelagic sediments from the GC02 in central Indian Ocean Basin. *Journal of Rare Earths*, 35(10): 1047–1058
- Zhao J, Zhang H S, Wu G H, Lu B, Pulyaeva I A, Zhang H F, Pang X H. 2014. Biomineralization of organic matter in cobalt-rich crusts from the Marcus-Wake Seamounts of the western Pacific Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(12): 67–74
- Zhao L S, Chen Z Q, Algeo T J, Chen J B, Chen Y L, Tong J N, Gao S, Zhou L, Hu Z C, Liu Y S. 2013a. Rare-earth element patterns in conodont albid crowns: Evidence for massive inputs of volcanic ash during the latest Permian biocrisis. *Global and Planetary Change*, 105: 135–151
- Zhao M H, Qiu X L, Li J B, Sauter D, Ruan A G, Chen J, Cannat M, Singh S, Zhang J Z, Wu Z L, Niu X W. 2013b. Three-dimensional seismic structure of the dragon flag oceanic core complex at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (49°39'E). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10): 4544–4563
- Zhong Y, Chen Z, González F J, Hein J R, Zheng X F, Li G, Luo Y, Mo A B, Tian Y H, Wang S H. 2017. Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138: 110–128
- Zhong Y, Liu Q S, Chen Z, González F J, Hein J R, Zhang J, Zhong L F. 2019. Tectonic and paleoceanographic conditions during the formation of ferromanganese nodules from the northern South China Sea based on the high-resolution geochemistry, mineralogy and isotopes. *Marine Geology*, 410: 146–163
- Zhu C W, Tao C H, Yin R S, Liao S L, Yang W F, Liu J, Barriga F J A S. 2020. Seawater versus mantle sources of mercury in sulfide-rich seafloor hydrothermal systems, southwest Indian ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 281: 91–101
- 陈荣华, 赵庆英, 张海生, 卢冰, Pulyaeva I A. 2015. 西太平洋富钴

- 结壳中钙质超微化石和分子化石研究. 海洋学报, 37(7): 132-141
- 崔迎春, 石学法, 刘季花, 马立杰. 2012. 70Ma 以来风尘活动在太平洋铁锰结壳中的记录. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 393-399
- 邓义楠, 任江波, 郭庆军, 曹珺, 王海峰, 刘晨晖. 2018. 太平洋西部富稀土深海沉积物的地球化学特征及其指示意义. 岩石学报, 34(003): 733-747
- 杜菊民, 赵学章. 2010. 刚果(金)铜-钴矿床地质特征及分布规律. 地质与勘探, 46(1): 165-174
- 方明山, 石学法, 肖仪武, 李传顺. 2016. 太平洋深海沉积物中稀土矿物的分布特征研究. 矿冶, 25(5): 81-84
- 高晶晶, 刘季花, 李先国, 张辉, 何莲花. 2015. 富钴结壳中稀土元素化学相态分析方法及其应用. 分析化学, 43(12): 1895-1900
- 高晶晶, 刘季花, 张辉, 闫仕娟, 何莲花, 王小静, 汪虹敏. 2019. 太平洋海山富钴结壳中铂族元素赋存状态与富集机理. 海洋学报, 41(8): 115-124
- 何高文, 孙晓明, 杨胜雄, 朱克超, 宋成兵. 2011. 太平洋多金属结核和富钴结壳稀土元素地球化学对比及其地质意义. 中国地质, 38(2): 462-472
- 胡铭, 陈天宇, 凌洪飞. 2012. 晚第四纪中北太平洋铁锰结壳 Fe/Mn 变化: 对古气候变化的响应. 高校地质学报, 18(4): 751-758
- 黄牧. 2013. 太平洋深海沉积物稀土元素地球化学特征及资源潜力初步研究. 硕士学位论文. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所
- 黄牧, 刘季花, 石学法, 朱爱美, 吕华华, 胡利民. 2014. 东太平洋 CC 区沉积物稀土元素特征及物源. 海洋科学进展, 32(2): 175-187
- 蒋紫靖, 韩喜球, 王叶剑, 邱中炎. 2017. 印度洋卡尔斯伯格脊 6°48'N 附近热液羽状流水化学参数异常和颗粒物成分特征. 海洋学研究, 35(4): 34-43
- 雷吉江, 初凤友, 于晓果, 李小虎, 陶春辉, 葛倩. 2015. 西南印度洋中脊热液区烃类有机质组成及其成因意义. 地学前缘, 01: 281-290
- 李兵, 李传顺, 石学法. 2019. 南大西洋中脊拆离断层型热液系统的调查与发现. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文集摘要集(杭州): 591
- 李江山, 方念乔, 石学法, 任向文, 刘季花, 崔迎春. 2012. 中太平洋富钴结壳不同壳层 He, Ar 同位素组成. 地球科学, 37(S1): 93-100
- 李雪富, 武光海, 刘捷红, 张宏. 2012. 中太平洋富钴结壳中生物标志物、有机碳同位素地球化学及其古海洋环境意义. 海洋学研究, 30(4): 29-36
- 梁东红, 何高文, 朱克超. 2014. 中国多金属结核西示范区的结核小尺度分布特征. 海洋学报, 36(4): 33-39
- 刘季花. 1992. 太平洋东部深海沉积物稀土元素地球化学. 海洋地质与第四纪地质, 12(2): 33-42
- 刘季花, 梁宏锋, 夏宁, 宋苏顷. 1998. 东太平洋深海沉积物小于 2 μ m 组分的稀土元素地球化学特征. 地球化学, 27(1): 49-58
- 刘季花. 2004. 东太平洋沉积物稀土元素和 Nd 同位素地球化学特征及其环境指示意义. 博士学位论文. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)
- 刘明, 孙晓霞, 石学法, 张文强, 范德江, 杨作升. 2019. 印度洋钙质软泥和硅质软泥稀土元素组成和富集机制. 海洋学报, 41(1): 58-71
- 刘兴健, 唐得昊, 阎贫, 葛晨东. 2018. 南海东部管事海山铁锰结壳的矿物组成和地球化学特征. 海洋地质与第四纪地质, 39(3): 94-103
- 刘永刚, 杜德文, 曲镜如, 闫仕娟, 王春娟, 石学法. 2013. 基于 Fuzzy ARTMAP 的 CC 区多金属结核资源定量评价. 海洋地质与第四纪地质, 33(2): 169-179
- 刘志强, 吴宇坤, 朱克超, 李伟, 朱薇, 邱显扬. 2015. 太平洋中部深海黏土中稀土的赋存状态及浸出研究. 中国稀土学报, 33(4): 506-512
- 卢映钰, 韩喜球, 王叶剑, 邱中炎. 2014. 西南印度洋 49°~56°E 洋脊段的热液羽状流: 来自深水中的氦同位素异常证据. 海洋学报, 36(6): 42-49
- 吕靖, 蓝鑫, 姜明玉, 曹文瑞, 萨仁高娃, 于心科, 常凤鸣. 2020. 盐场海芽孢杆菌与大洋铁锰结核相互作用. 海洋科学, 44(1): 36-45
- 马维林, 金翔龙, 初凤友, 李守军, 杨克红. 2013. 中太平洋海山区尖顶和平顶海山结壳成矿与分布的对比研究. 海洋学报, 35(2): 90-112
- 马维林, 杨克红, 包更生, 张恺, 董如洲, 初凤友. 2014. 中太平洋海山富钴结壳成矿的空间分布规律研究. 海洋学报, 36(7): 77-89
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 袁顺达, 周振华. 2019. 关键矿产-国际动向与思考. 矿床地质, 38(4): 689-698
- 任江波, 何高文, 姚会强, 张伙带, 杨胜雄, 邓希光, 朱克超. 2016. 西太平洋海山富钴结壳的稀土和铂族元素特征及其意义. 地球科学: 中国地质大学学报, 41(10): 1745-1757
- 任江波, 何高文, 朱克超, 邓希光, 刘纪勇, 傅飘儿, 姚会强, 杨胜雄, 孙卫东. 2017. 富稀土磷酸盐及其在深海成矿作用中的贡献. 地质学报, 91(6): 1312-1325
- 任向文, 刘季花, 崔迎春, 石学法, 尹京武. 2011a. 磷酸盐化对莱恩海山链 MP2 海山结壳 Co 富集的影响. 海洋科学进展, 29(3): 323-329
- 任向文, 石学法, 朱爱美, 刘季花, 方习生. 2011b. 麦哲伦海山群 MK 海山富钴结壳稀土元素的赋存相态. 吉林大学学报(地球科学版), 41(3): 707-714
- 任向文, Pulyaeva I, 吕华华, 石学法, 曹德凯. 2017. 麦哲伦海山群 MK 海山富钴结壳钙质超微化石生物地层学研究. 地学前缘, 24(1): 276-296
- 石学法, 李传顺, 黄牧, 于森, 杨宝菊, 吕华华, 等. 2015a. 国际海域资源调查与开发“十二五”课题“世界大洋海底稀土资源潜力评估”报告
- 石学法, 杨刚, 黄牧, 陶春辉, 等. 2015b. 中国大洋 34 航次第五航段调查现场报告
- 唐鑫, 杨耀民, 王国芝, 张海桃, 范蕾, 许鹏, 朱志伟. 2016. 南大西洋 15°S 热液区玄武岩中熔融包裹体组成及意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(3): 362-371
- 陶春辉, 李怀明, 金肖兵, 周建平, 吴涛, 何拥华, 邓显明, 顾春华, 张国垭. 2014. 西南印度洋脊的海底热液活动和硫化物勘探. 科学通报, 59(19): 1812-1822
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报, 93(6): 1189-1209

- 王汾连,何高文,孙晓明,杨阳,赵太平. 2016. 太平洋富稀土深海沉积物中稀土元素赋载体研究. 岩石学报, 32(7): 2057-2068
- 王国芝,石学法,雷庆,李传顺,赵甫峰,范蕾. 2019. 大西洋中脊淘美热液区赋矿围岩斑晶中熔融包裹体特征. 见:第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 382
- 王晓媛,曾志刚,陈帅,殷学博,陈镇东. 2013. 我国台湾东北部龟山岛附近海域热液流体中的稀土元素组成及其对浅海热液活动的指示. 科学通报, 58(19): 1874-1883
- 王琰,孙晓明,戴瑛知,吴仲玮. 2012. 西南印度洋中脊及东太平洋海隆海底热液硫化物硫同位素特征及其对比研究. 矿床地质, 31(S1): 439-440
- 王叶剑. 2012. 中印度洋脊 Kairei 和 Edmond 热液活动区成矿作用对比研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学
- 武光海, Pulyaeva I A, 刘捷红, 李雪富. 2011. 中太平洋海山铁锰结壳生物地层学研究. 海洋学报, 33(4): 129-139
- 武光海, 刘捷红. 2012. 海山当地物源和南极底层水对富钴结壳成矿作用的影响: 来自海山周围水柱化学分析的证据. 海洋学报, 34(3): 92-98
- 许东禹. 2013. 大洋矿产地质学. 北京: 海洋出版社
- 杨宝菊, 刘季花, 李传顺, 叶俊, 李兵, 石学法. 2019. 南大西洋中脊含金属沉积物稀土元素特征. 见:第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集(南京): p387
- 杨胜雄, 龙晓军, 祁奇, 冷传旭, 崔尚公, 郝娅楠, 赵广涛. 2016. 西太平洋富钴结壳矿物学和地球化学特征: 以麦哲伦海山和马尔库斯-威克海山富钴结壳为例. 中国海洋大学学报, 46(2): 105-116
- 叶俊, 石学法, 李兵, 闫仕娟, 朱志伟. 2017. 南大西洋中脊 15°S 热液区成矿年代特征研究. 中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第 16 届学术年会文集(西安): 1031
- 殷征欣, 王海峰, 韩金生, 吕修亚, 沈泽中, 陈静, 贺惠忠, 谢安远, 关瑶, 董超. 2019. 南海边缘海多金属结核与大洋多金属结核对比. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1): 261-277
- 于淼, 石学法, 李传顺, 黄牧, 杨宝菊, 周天成, 张颖. 2017. 中印度洋海盆富稀土沉积物物质来源. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会(杭州): 584
- 张富元, 章伟艳, 朱克超, 张霄宇, 倪建宇, 赵宏樵, 郑连福. 2011. 太平洋海山钴结壳资源量估算. 地球科学, 36(1): 1-11
- 张富元, 章伟艳, 任向文, 张霄宇, 朱克超. 2015. 全球三大洋海山钴结壳资源量估算. 海洋学报, 37(1): 88-105
- 张海生, 胡信, 赵军, 韩正兵, 于培松, 武光海, 雷吉江, 卢冰, Pulyaeva I A. 2015. 西太平洋海山富钴结壳钙质超微化石变化与 E/O 界限的地质记录. 中国科学: 地球科学, 45(4): 508-519
- 张霄宇, 黄牧, 石学法, 黄大松. 2019a. 中印度洋洋盆 GC11 岩心富稀土深海沉积的元素地球化学特征. 海洋学报, 41(12): 51-61
- 张霄宇, 石学法, 黄牧, 滕国超, 麻书畅, 黄大松. 2019b. 深海富稀土沉积研究的若干问题. 中国稀土学报, 5: 517-529
- 张振国, 杜远生, 吴长航, 方念乔, 杨胜雄, 刘坚, 宋成兵. 2013. 南海西北陆缘大型多金属结核的生长过程及其对晚新生代古海洋环境变化的响应. 中国科学: 地球科学, 43(7): 1168-1178
- 周鹏, 韩喜球, 王叶剑, 李洪林, 刘吉强, 董传奇, 蔡翌旸. 2019. 拆离断层对海底热液硫化物形成的制约: 来自岩石学和近底观测的证据. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集(杭州): 593-595
- 周天成, 石学法. 2019. 东南太平洋尤潘基海盆富稀土沉积研究进展. 见:第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集(南京): 390

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)

• 亮点速读 •

利用地幔的 Nb 和 Ta 含量制约地球原始岩浆洋的成分

硅酸盐地球和陨石相比,具有更低的 Nb/Ta 比值。前人的高温高压实验工作(<25 GPa)表明,在氧逸度非常低的条件下(岩浆洋的 FeO<1% mol), Nb 更倾向于进入地核,从而可以解释硅酸盐地球的低 Nb/Ta 比值。但是,地球早期岩浆洋在成核过程中是否一直保持极端还原状态还存在疑问。

为了增加对早期地球演化的了解,巴黎地球物理研究所的科学家们

利用金刚石压砧开展了 43~75 GPa、3000~4400 K 条件下的实验。经过聚焦离子束处理样品后,他们通过电子探针分析了金属熔体和硅酸盐熔体淬火后的产物。结果表明,随着温度的增高,金属中的氧含量增加。通过热力学模拟发现,氧对金属中 Nb 和 Ta 的相互作用的影响,超过了氧对金属中 C、Si 和 S 的相互作用的影响。综合前人在低于 25 GPa 的大压机实验结果

和本研究(43~75 GPa)的金刚石压砧数据,巴黎地球物理研究所的科学家们建立了金属核-硅酸盐熔体平衡的热力学模型,并以 1 GPa 的压强间隔,进行了 0~135 GPa 的多期次成核过程的模拟计算。结果表明,要达到现今硅酸盐地球的 Nb/Ta 比值以及 Nb、Ta 的含量,岩浆洋的 FeO 的摩尔含量是 2%~18% (mol),即早期地球岩浆洋成分既不是非常还原,也不是非常氧化。

[以上成果发表在国际著名地学期刊 *Proceedings to the National Academy of Sciences* 上: Dongyang Huang, James Badro and Julien Siebert (2020) The niobium and tantalum concentration in the mantle constrains the composition of Earth's primordial magma ocean. *Proceedings to the National Academy of Sciences* 117, 27893-27898]

(夏群科 编译)

III
和技术路径,创新性设计提出的“风险管控”三步曲(①稻改旱;②单季种植改多季轮种低汞积累高经济作物;③休耕期无土栽培菌类),理论结合实际指导土壤污染防治攻坚战取得重大突破。该成果发展了汞生物地球化学研究方法和理论,为我国汞污染防控和水俣公约履约提供了重要科技支撑。



董发勤,1963年生,西南科技大学校长,教授,博导。国际应用矿物学委员会副主席、主席(10th、11th ICAM),中国非金属矿工业协会副理事长,中国矿物岩石地球化学学会非金属矿物资源高效利用

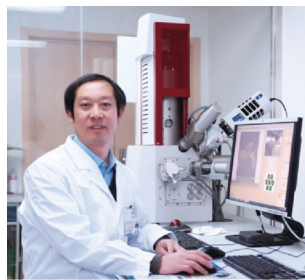
专业委员会主任,国家环境科学与工程教指委委员。多次发起矿物资源与循环利用等国内外学术会议并担任主席和副主席。负责完成国家重点基金项目近20项。入选国家“百千万人才工程”和四川省领军人物;曾获全国建材系统先进教育工作者、四川省劳动模范和学术与技术带头人等荣誉称号。获国家优秀教学二等奖,省部级一、二、三等成果奖近20项,授权发明专利40余项,发表论文200余篇(SCI等检索80余篇),主编专著、教材7部,中外论文集6部。在国内最先提出矿物材料学科思想和矿物超细效应概念,建立了应用矿物学教材体系。对生态功能基元材料与复合研发进行了跨学科的实践并产生了较大的社会效益和经济效益。率先在国内开展纤维水镁石材料、核废物环境安全研究并得到应用;填补了矿物粉尘、微生物-矿物-核素相互作用研究的空白。从矿物-材料-生态环境-健康合一的新理念开创环境协调、矿物资源循环利用的新方向。



石学法,1965年生,博士、研究员,自然资源部第一海洋研究所海洋地质室主任、自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室主任、

青岛海洋试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室主任、中国大洋样品馆馆长;中国矿物岩石地球化学学会常务理事、海洋地球化学专业委员会主任,中国海洋学会、中国海洋湖沼学会、中国第四纪

研究会理事。主要从事海洋沉积和海底成矿作用研究。发表论文400余篇、专著3部,主持完成国家级项目30余项,担任多个航次首席科学家。先后获省部级科技奖励10余项,获全国优秀科技工作者、国家百千万人才工程、泰山学者攀登计划等荣誉称号10余项。主要学术成果包括:(1)对中国海及亚洲大陆边缘沉积地质学开展了系统研究,发起实施了“亚洲大陆边缘源-汇过程与陆海相互作用”国际合作项目,主编了多种比例尺沉积物类型图,初步阐述了亚洲大陆边缘沉积物“源-汇”过程和机制;(2)在国内率先开展了深海稀土资源调查研究,在全球划分出4个深海富稀土成矿带,首次在中印度洋海盆和东南太平洋发现大面积富稀土沉积,评估了全球深海稀土资源潜力;(3)领导团队在南大西洋开展了热液硫化物调查研究,预测发现了南大西洋中脊大范围热液成矿区,阐述了南大西洋中脊热液硫化物分布规律和成矿机理。



李国武,1964年生,教授,博士生导师,中国地质大学(北京)科学研究所X射线衍射晶体结构实验室主任。长期从事矿物X射线衍射实验及矿物晶体结构与

晶体化学研究,在新矿物发现及矿物晶体结构与晶体化学研究领域做出了卓越贡献,获得了一系列的重大原创性科学新发现,目前作为主要发现人已发现23种新矿物并被国际矿物学协会新矿物命名及分类委员会批准,是我国现今发现新矿物最多的学者之一。其中作为第一发现人发现的新矿物——碲钨矿被国际矿物学协会评为“2019年度矿物”。首次在世界上发现钨青铜型结构的天然矿物,同时发现了多种罕见矿物新结构及晶体化学新现象,首次发现了层状硅酸盐矿物中的结构新类型,首次发现碲钨矿中的钨青铜型含碲衍生新结构。主持或主研国家级科研项目十余项,主持完成的国家自然科学基金项目成果“我国烧绿石超族新矿物研究”被选为我国“2013年十大地质科技进展”,参与发现的新矿物汉江石被选为我国“2010年十大地质科技进展”。曾获省部级科技成果奖多次,发表论文130余篇。