

doi: 10.12029/gc20170305

韦振权, 何高文, 邓希光, 姚会强, 刘永刚, 杨永, 任江波. 2017. 大洋富钴结壳资源调查与研究进展[J]. 中国地质, 44(3): 460–472.

Wei Zhenquan, He Gao wen, Deng Xiguang, Yao Huiqiang, Liu Yonggang, Yang Yong, Ren Jiangbo. 2017. The progress in the study and survey of oceanic cobalt-rich crust resources[J]. Geology in China, 44(3): 460–472(in Chinese with English abstract).

大洋富钴结壳资源调查与研究进展

韦振权 何高文 邓希光 姚会强 刘永刚 杨永 任江波

(国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:富钴结壳是继多金属结核资源之后被发现的又一深海沉积固体矿产资源,在太平洋、大西洋和印度洋的海底均有分布。据估算,全球三大洋海山富钴结壳干结壳资源量为 $(1081.1661\sim 2162.3322)\times 10^8$ t。世界各国对富钴结壳的调查始于 20 世纪 80 年代初,截至目前,已有日本、中国、俄罗斯和巴西等 4 个国家与国际海底管理局签订了富钴结壳勘探合同,而韩国的矿区申请也于 2016 年获得核准。富钴结壳按形态可分为板状结壳、砾状结壳和钴结核 3 种类型。富钴结壳内部结构构造在宏观上通常表现为三层构造,即底部亮煤层、中部疏松层和顶部较致密层;在微观下主要表现为柱状构造、叠层构造、斑块状构造、纹层状构造等多种类型。富钴结壳的矿物成分主要为自生的铁锰矿物,包括水羟锰矿、钼镁锰矿、羟铁矿、四方纤铁矿、六方纤铁矿、针铁矿等。富钴结壳富含 Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Pb、Zn 等金属元素以及稀土元素和铂族元素,其中 Co 含量尤为显著。三大洋中,以太平洋富钴结壳的 Co 平均含量最高。富钴结壳的生长过程极其缓慢,平均仅几毫米每百万年。研究表明,西太平洋富钴结壳最早于始新世—早中新世开始生长。目前通常认为富钴结壳为水成成因,即 Co、Fe、Mn 等金属元素来源于海水。此外,有研究表明微生物在富钴结壳的形成过程中也起着非常重要的作用。富钴结壳的分布及特征受地形、水深、基岩类型、海水水文化学特征、经纬度等多种因素的影响,其主要分布于碳酸盐补偿深度以上、最低含氧带以下、水深 800~2500 m 的海山、岛屿斜坡和海底高地上,西、中太平洋海山区被认为是全球富钴结壳的最主要产出区。

关键词:调查现状;研究进展;富钴结壳;大洋

中图分类号:P744;P618.6 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)03-0460-13

The progress in the study and survey of oceanic cobalt-rich crust resources

WEI Zhenquan, HE Gao wen, DENG Xiguang, YAO Huiqiang,
LIU Yonggang, YANG Yong, REN Jiangbo

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: Cobalt-rich crusts constitute another deep-sea sedimentary solid mineral resource discovered after oceanic polymetallic nodule. Cobalt-rich crusts are distributed on the seafloor of the Pacific Ocean, the Atlantic Ocean and the Indian Ocean. It is

收稿日期:2017-06-03;改回日期:2017-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41606071);国际海域资源调查与开发“十二五”课题(DY125-13-R-01, DY125-13-R-05, DY125-13-R-08);广州市科技计划项目(201707010417);广东省科技计划项目(2013B030700005)。

作者简介:韦振权,男,1978 生,高级工程师,博士,主要从事大洋矿产资源与南海油气资源的调查与研究;E-mail:wei_zhenquan@163.com。

estimated that the amount of dry crust resources in the three oceans is $(1081.1661\sim 2162.3322)\times 10^8$ t. Survey of the cobalt-rich crust by various countries in the world began in the early 1980s. So far, 4 countries, i.e., Japan, China, Russia and Brazil, have signed a cobalt-rich crust exploration contract with the International Seabed Authority. The application of cobalt-rich crusts mining area submitted by South Korea was also approved by International Seabed Authority in 2016. Cobalt-rich crusts can be divided into plate crust, gravel-like crust and nodule-like crust according to their shapes. Cobalt-rich crusts are usually three-layer structure in the macro. Upper layer is called bright coal seam layer, intermediate layer is called loose layer, and bottom layer is called relatively loose layer. Microscopically, cobalt-rich crusts are mainly characterized by such structures as columnar structure, callenia structure, plaque structure, and laminar structure. The minerals of cobalt-rich crusts are mainly authigenic iron and manganese minerals, which include vemadite, todorokite, amakinite, akaganeite, ferrosiderite, goethite, and so on. Cobalt-rich crusts are rich in Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Pb, Zn as well as REEs and PGEs. The content of Co of cobalt-rich crusts is particularly significant. The average content of Co in cobalt-rich crusts from the Pacific Ocean is the highest in the three large oceans in the world. Formation process of cobalt-rich crusts is extremely slow. Only several millimeters of crust can be formed in one million years. Studies show that cobalt-rich crusts from the West Pacific Ocean were formed as early as Eocene to early Miocene. It's generally accepted that the cobalt-rich crust is hydrothermal. Co, Fe, Mn and other metal elements in crusts originate from sea water. In addition, studies have shown that microorganisms play a very important role in the formation of cobalt-rich crusts. The distribution and characteristics of cobalt-rich crust are affected by such factors as topography, water depth, substrate rocks type, hydrochemical characteristics of seawater, latitude and longitude. Cobalt-rich crusts are formed on the slope of seamount and island and submarine highland above the depth of carbonate compensation and below oxygen minimum zone, with the water depth of 800~2500m. West and Central Pacific seamounts are considered to be the main production area of cobalt-rich crusts in the world.

Key words: survey situation; research progress; cobalt-rich crust; ocean

About the first author: WEI Zhenquan, male, born in 1978, senior engineer, engages in the survey and study of oceanic mineral resources and oil & gas resources; E-mail: wei_zhenquan@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science foundation of China (No. 41606071); 12th Five-Year Plan Pproject of International Submarine Resources Survey and Development (No. DY125-13-R-01, DY125-13-R-05, DY125-13-R-08); Science and Technology Planning Project of Guangzhou City (No. 201707010417); Science and Technology Planning Pproject of Guangdong Province (No. 2013B030700005).

1 引言

富钴结壳(又称铁锰结壳、富钴铁锰结壳或结壳)是继多金属结核资源之后被发现的又一深海沉积固体矿产资源,主要分布于海山、岛屿斜坡和海底高地上,水深范围一般为800~2500 m。富钴结壳在太平洋、大西洋和印度洋的海底均有分布(图1),其中以太平洋居多,而在太平洋的广大海域中,西、中太平洋海山区是富钴结壳的主要产出区,主要包括麦哲伦海山区、马尔库斯-威克海山区、马绍尔海山区、中太平洋海山区、夏威夷海岭、莱恩海山区等几座大型海山链(刘永刚等,2013)。富钴结壳富含Co、Ni、Cu、Pb、Zn等金属元素以及稀土元素(REE)和铂族元素(PGE),其中Co含量尤为显著,最高可达2%(Halbach, 1985),是陆地原生矿钴含量的20倍以上(栾锡武,2006),是多金属结核矿中钴

含量的2.5倍以上(沈裕军等,1999)。最新研究表明,全球三大洋海山钴结壳分布面积为3039452.14 km²,干结壳资源量为 $(1081.1661\sim 2162.3322)\times 10^8$ t,三大洋的富钴结壳资源量详见表1(张富元等,2015)。由于富钴结壳具有巨大潜在经济价值和战略意义,自20世纪80年代初以来许多国家在上述结壳主要分布区及周边的海域开展了大量的调查研究工作,对富钴结壳的分布、类型、成矿特征、成矿环境和形成模式等进行了深入调查和研究,积累了大量调查研究成果,为今后富钴结壳矿产资源的勘探、开发、利用以及相关的科学研究奠定了良好基础。

2 富钴结壳资源调查现状

2.1 国外调查现状

1948年美国斯普里普斯海洋研究所在太平洋

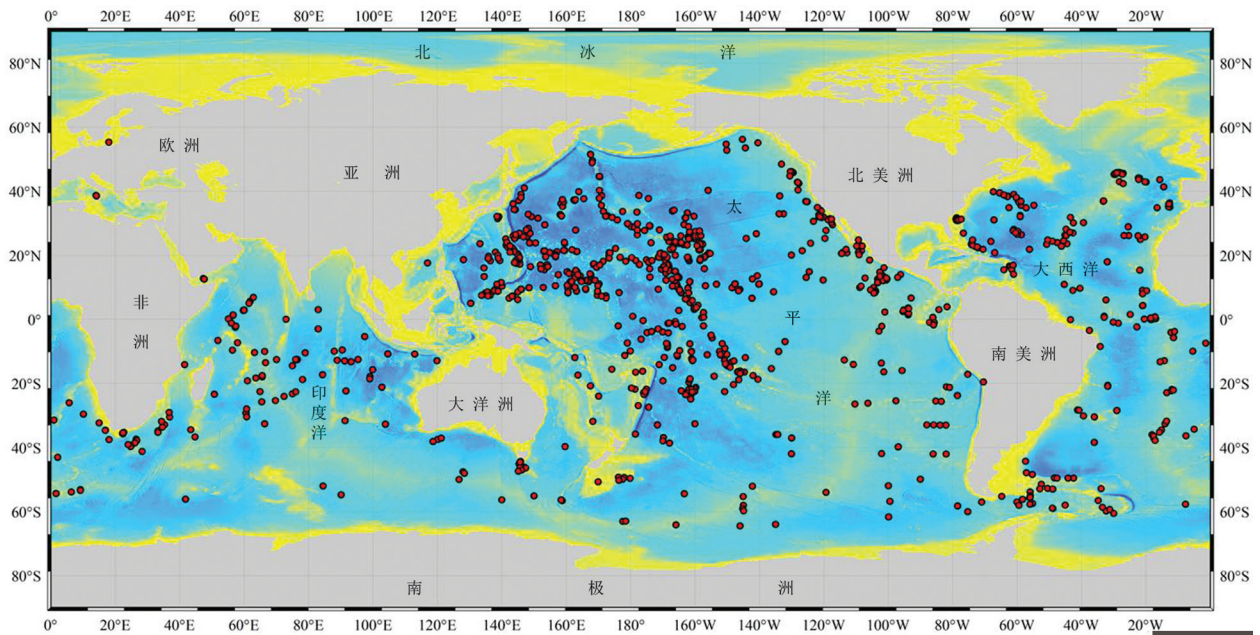


图1 富钴结壳矿点在国际海底的分布(据刘永刚等,2014)

Fig. 1 The distribution of Co-rich crust ore spots in international seabed(after Liu Yonggang et al.,2014)

表1 全球三大洋海山钴结壳资源量(据张富元等,2015)

Table 1 Averaged content and resource amount of cobalt crust resource on the seamounts in the three oceans (after Zhang Fuyuan et al., 2015)

	干结壳资源量/ 10^8 t	Mn/ 10^8 t	Co/ 10^8 t	Ni/ 10^8 t	Cu/ 10^8 t	Mo/ 10^8 t	Pt/ 10^8 t
太平洋	513.2440~1 026.4880	109.1670~218.3340	3.3053~6.6106	2.2172~4.4344	0.6364~1.2728	0.2207~0.4414	17707~35414
大西洋	116.5032~233.0064	17.7434~35.4868	0.4252~0.8504	0.3262~0.6524	0.099~0.198	0.0303~0.0606	
印度洋	81.4849~162.9698	11.9375~23.875	0.2371~0.4742	0.2502~0.5004	0.0896~0.1792	0.0326~0.0652	2648~5296
南大洋	1 081.1661~2 162.3322	138.8480~277.6960	3.9676~7.9352	2.7936~5.5872	0.8751~1.6502	0.2836~0.5672	20355~40710

进行海底山脉地质调查时,在水深不到1000 m的海底上发现了大量的结核和铁锰氧化物壳(王成厚,1982),这个发现使富钴结壳首次进入人们的视野。但把富钴结壳作为一种资源投入系统调查研究则是始于20世纪80年代。1981年德国科学家利用“太阳”号科考船在太平洋中部的调查工作开始掀起对富钴结壳研究的热潮。随后,其他主要发达国家纷纷开展调查,美国、日本、俄罗斯、韩国和法国等国都投入大量人力、物力、财力进行富钴结壳资源调查研究。各国调查区域主要位于太平洋的各国专属经济区内,少部分为国际海域,并对富钴结壳的分布、类型、成矿特征、成矿环境、形成模式等问题,在宏观和微观上进行了深入研究,对其进行商业化开采的关键技术也进行了研究。美国、日本等国还进行了富钴结壳试采。美国、德国、英国

和法国在20世纪80年代即已经基本完成了海上调查,俄罗斯、日本、韩国等是目前仍在开展富钴结壳调查的国家。截至目前,中国、日本、俄罗斯和巴西等四个国家已成功和国际海底管理局签订了富钴结壳勘探合同,而韩国的矿区申请也于2016年获得核准(图2,表2)。总体上,美国等发达国家利用已经形成的技术优势,积极探索和研究大洋富钴结壳资源的勘查、开发及冶炼加工技术,目前在深海勘探领域保持领先地位。

2.2 中国调查现状

中国从1997年开始进行富钴结壳资源调查,至2013年,已经在在中太平洋海山区、西太平洋海山区广大海域进行了19个航次(40个航段)的调查工作,其中“海洋四号”船执行4个航次、“大洋一号”船执行11个航次,“海洋六号”船执行3航次,“向阳

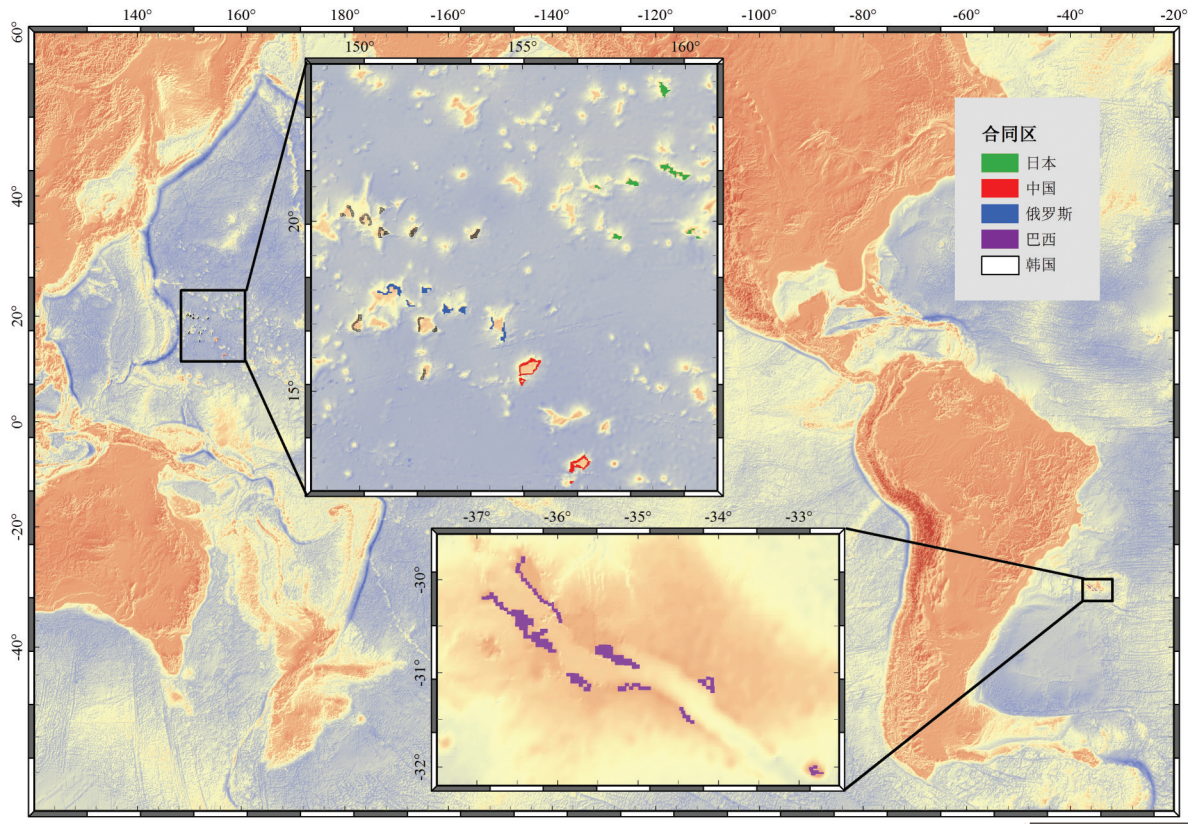


图2 富钴结壳勘探合同区位置
 Fig.2 Location map of contract area for cobalt-rich crusts

表2 富钴结壳勘探合同表
 Table 2 Exploration contract for cobalt-rich crusts

合同区	国家	面积 (km ²)	勘探期限
1	日本	1000	2012-2015
2	中国	1500	2012-2015
3	俄罗斯	2000	2012-2015
4	巴西	1200	2012-2015
5	韩国	800	2012-2015

红09”船执行1航次,调查范围主要包括麦哲伦海山区,马尔库斯—威克海山区、马绍尔海山区、中太平洋海山区、莱恩群岛海山链区,开展了拖网、抓斗、浅钻地质采样和海底照相、多波束测深、重力、磁力、浅地层剖面等海洋物探工作,在收集数据资料的同时积极开展资源评价工作,为向国际海底管理局提交矿区申请做准备。2013年7月,中国向国际海底管理局提交的富钴结壳矿区申请获得核准通过,从而在国际海底区域获得了3000 km²具有专属

勘探权的富钴结壳矿区(图3)。2014年4月,中国大洋协会与国际海底管理局在正式签订了国际海底富钴结壳矿区勘探合同。富钴结壳勘探合同的签订标志着中国富钴结壳资源调查工作重点将从探矿阶段转向一般勘探阶段,工作区域从大范围的海山区转向局部区域的矿块。在2014年至2016年,中国大洋协会利用“海洋六号”船和“向阳红09”船继续在合同区开展资源与环境调查及采矿试验工作,履行勘探合同义务。

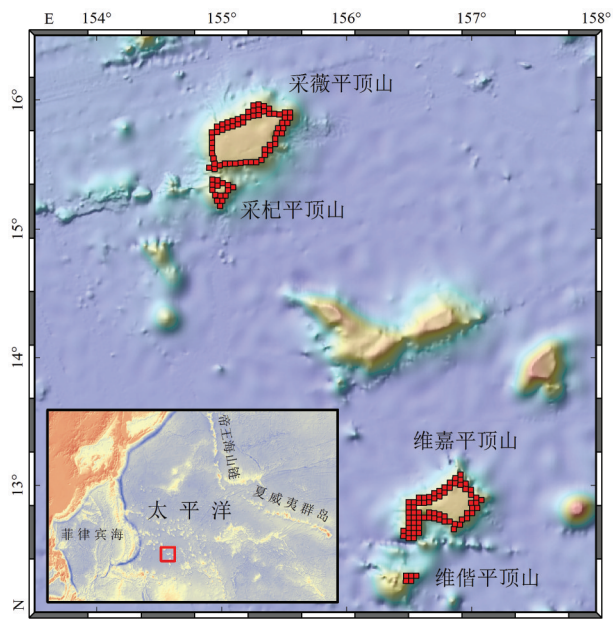


图3 中国富钴结壳勘探合同区位置

Fig.3 Location map of China's cobalt-rich crusts exploration contract area

3 富钴结壳特征

3.1 类型划分

富钴结壳按铁锰壳层厚度可分为结膜、结皮和结壳等3种类型,其中结膜的壳层厚度为0.1~0.5 cm;结皮的壳层厚度为0.5~1.0 cm;结壳的壳层厚度则大于1.0 cm (Manheim, 1986; 潘家华等, 2002)。富钴结壳按形态可分为板状结壳、砾状结壳和钴结核3种类型(表3,图4)。通常而言,板状结壳是海山富钴结壳的主要产出类型,在海山上分布范围最大,一般连片分布在坡度较大的地形斜坡区;砾状结壳呈结核状产出,核心物质主要为大的岩石碎块,其形态主要与核心岩石碎块大小和形态有关,一般产于核心岩石剥落处及其附近;钴结核多呈球状、椭圆状或不规则状,核心物质一般为小

的岩石碎屑、老结壳碎块和黏土类物质等,主要分布于海山坡脚及平顶海山顶部有沉积物覆盖的浅水区域。

3.2 结构构造

富钴结壳内部结构构造在宏观上通常表现为三层构造,代表了较为完整的结壳生长序列。下层为亮煤层,致密度高,亮黑色,块状,组成较纯净,杂质点少,呈贝壳状断口,强金属光泽,硬度较大,性脆;中层为疏松型,多孔洞,灰黑色,含大量灰白、褐黄色斑点或斑块沉积物,松散易碎,受沉积作用影响较强;上层为较致密层,褐黑色,块状,硬度也较大,较纯净,含杂质少,光泽亮。结壳的表面形态是多种多样的,常见的有光滑状、细砂或粗砂状、瘤状、蠕虫状突起凹沟、不规则突起及凹槽状、蜂巢状等。

富钴结壳是结晶程度很低的铁锰氧化物和氢氧化物沉积 (Friedrich et al., 1980; Murad and Schwertmann, 1988; Koschinsky and Halbach, 1995; Bau et al., 1996; Koschinsky and Hein, 2003),通常表现具胶状结构;但有时内部也会发现有部分晶态铁锰矿物,具微晶质结构特征(郭世勤等,1994;马维林等,2002)。富钴结壳在微观下具有类叠层石特点,表现为柱状构造、叠层构造、斑块状构造、致密块状构造、纹层状构造、掌状构造和树枝状构造等不同类型 (Frank et al., 1976; Alvarez et al., 1990; Wen et al., 1994; 潘家华等,1999)。从结壳壳层显微构造来看,致密层构造较为单一,含很少脉石矿物;疏松层构造杂乱,含有较多的脉石矿物;较致密层介于两者之间。

3.3 矿物组成

富钴结壳是开放环境的产物,组成物质来源复杂,种类繁多。矿物成分主要为自生的铁锰矿物,包括水羟锰矿、钡镁锰矿、羟铁矿、四方纤铁矿、六方纤铁矿、针铁矿等,另外还有少量的碎屑和深海自生矿物,如石英、长石、方解石、磷灰石、重晶石和

表3 不同形态类型结壳划分标准

Table 3 Criteria for classification of crusts of different morphological types

形态类型	壳层厚度 (cm)	主要特征
结膜	0.1~0.5	薄层状,致密,亮黑色
结皮	0.5~1.0	较厚层状,疏松,灰黑色
结壳	>1.0	厚层状,致密,褐黑色
板状结壳	>1.0	连片分布,坡度较大
砾状结壳	>1.0	呈结核状,核心物质大
钴结核	>1.0	球状、椭圆状或不规则状

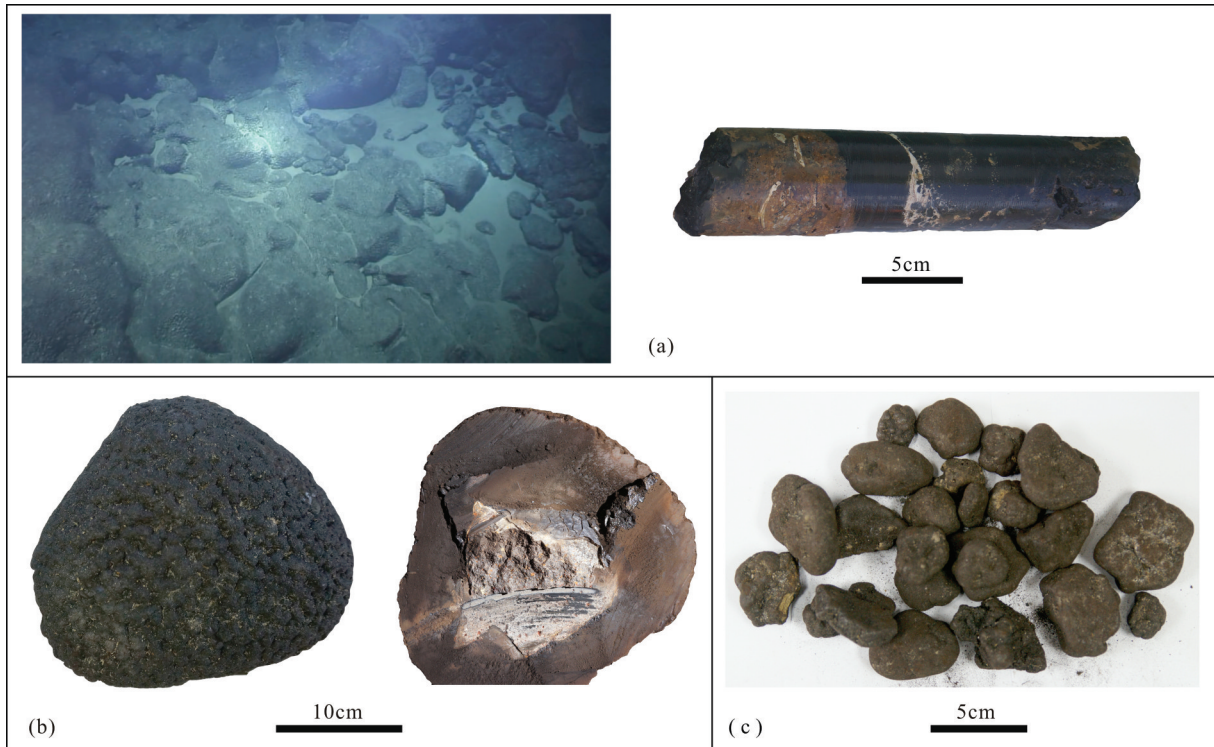


图4 太平洋不同形态类型的富钴结壳

a—左图为海马号 ROV 观测到的海山斜坡区连片分布的板状结壳和斜坡低洼处分布的砾状结壳,右图为深海浅钻采集的富钴结壳及其下覆基岩样品;b—海马号 ROV 采集的砾状结壳样品,结壳表面见有典型瘤状凸起,核心物质为蚀变玄武岩角砾;c—拖网采集的钴结核

Fig. 4 Different types of cobalt-rich crusts in Pacific Ocean

a—Left: Underwater photograph of plate crust and gravel-like crust; Right: Core of plate crust and substrate rock; b—Gravel-like crust; c—Nodule-like crust

沸石类矿物。锰矿物以水羟锰矿为主(Chukhrov et al., 1977; Friedrich and Wiechowski, 1980; Craig et al., 1982; Aplin and Cronan, 1985; Kang et al., 1987; Hein et al., 1988; 许东禹等, 1994; Hein et al., 1997; Jeong et al., 2000; 马维林等, 2002), 有时可见钡镁锰矿。结壳中的主矿物通常结晶程度很低, 呈隐晶质或非晶质状态。利用 X 射线衍射对马尔库斯—威克海山区富钴结壳样品的测试分析结果表明, 该富钴结壳样品主要由水羟锰矿、碳氟磷灰石、少量石英及钙十字沸石组成。其中钙十字沸石含量极少, 介于 0.1%~0.3%。

3.4 化学组成

富钴结壳中含有 30 多种化学元素, 主要成矿元素包括 Mn、Fe、Co、Ni、Cu 等元素, 伴生元素有 Au、Ag、Pt、Pd、Rh、Os、Y、稀土、Mo、V、Bi、Sn、Pb、Zn、Be、Rb、Ce、Sr、Ba、Nb、Sc、Ti、Zr、Hf、U、Th 等(金庆焕, 2001)。结壳 Co 含量是除厚度外另一个决

定结壳成矿质量的关键因素, 国际上通用的结壳成矿品位为 0.6%(马维林, 2006)。由世界各大洋区富钴结壳化学分析结果(表 4)可以看出, 富钴结壳中 Co 含量最高的洋区为太平洋, 其次是印度洋和大西洋, 中国南海富钴结壳 Co 含量最低。在太平洋中, 又以夏威夷群岛海域、中太平洋海山区和马绍尔群岛海域的富钴结壳的 Co 含量最高。对富钴结壳化学分析结果的研究表明, 富钴结壳的新壳层 Co 含量通常比老壳层含量高(Friedrich and Schmitz, 1980; Puteanus and Halbach, 1988; Wiltshire et al., 1999); 此外结壳 Co 含量通常也会随水深增加而逐渐降低(Craig et al., 1982; Hein et al., 1988; 赵宏樵和姚龙奎, 2003)。相对于形成于大洋深海盆地的多金属结核, 富钴结壳在化学成分上与之具有明显区别, 表现为高的 Co、Fe 含量和相对低的 Mn、Ni、Cu 含量的特征, 这种差异由这两种矿产资源成矿环境不同所致。

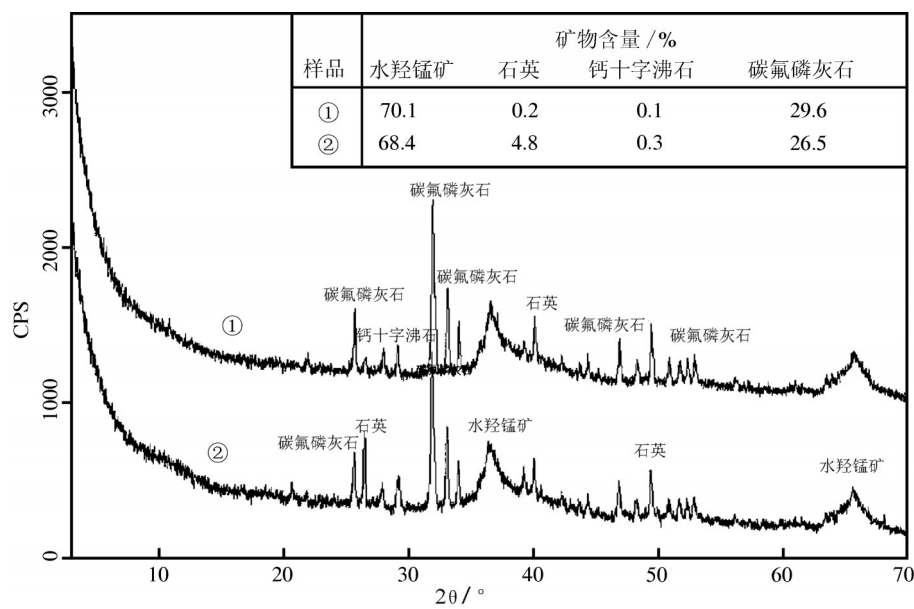


图5 马尔库斯—威克海山区富钴结壳样品X射线衍射图谱及分析结果

Fig.5 XRD analysis result of Co-rich crust from Marcus-Wake Seamounts in the Pacific Ocean

3.5 形成时代与生长速率

目前,用于富钴结壳定年的方法主要有同位素年代学方法、生物地层法以及经验公式法等,包括Be同位素、U系放射性同位素、基岩年龄推算、古生物地层学、Co经验公式计算、Sr同位素地层学、Os同位素地层学和磁性地层学等方法(何高文等,2001),但由于各种因素的影响,各种方法都存在其优缺点(龙晓军等,2015)。对西太平洋麦哲伦海山区海山富钴结壳的研究结果表明,其底部年龄19.26~24.38 Ma(王晓红等,2008;龙晓军等,2015),表层平均生长速率为3.99 mm/Ma(王晓红等,2008),平均生长速率为2.44 mm/Ma(龙晓军等,2015)。而孙晓明等(2006)研究认为,麦哲伦海山区结壳距今42.5 Ma左右开始生长,生长过程中分别在8.0 Ma和21.8 Ma处出现间断,相应形成外层、疏松层和亮煤层,其各自沉积速率为2.64 mm/Ma、1.45 mm/Ma和1.06 mm/Ma。莱恩群岛海山链区海山富钴结壳表层平均生长速率为1.99 mm/Ma,其底部年龄23.36~37.67 Ma(王晓红等,2008)。夏威夷群岛附近的舒曼海山的结壳样品在27 mm厚度区间的最小年龄为始新世,生长速率为0.1~2 mm/Ma(Cowen et al., 1993)。而Joshima et al.(1996)的研究结果表明,取自西北太平洋的富钴结壳样品自从上新世以来以14~17 mm/Ma速率生长。总体而

言,富钴结壳生长过程极其缓慢,平均仅几毫米每百万年(Cowen et al.,1993;Puteanus. et al.,1988),最常见的速率是1~6 mm/Ma(白志民等,2002)。

4 富钴结壳成矿机制

4.1 成矿物质来源

结壳的初始物源来自多种渠道(Cronan, 1980),大致可分为地内来源和地外来源两类。地内洋区的物源主要来自下地壳和地幔,成分以基性硅镁质为主,通过火山作用产生的岩石海解风化或以热液流体性质进入海水;地内陆区的物源主要来自于上地壳,成分以偏酸性的硅铝质为主,在大气、水等推运的物理和化学风化等作用下经过河流和风运方式进入海洋水体。地外来源的物质主要是一些穿过地球大气层降落的陨石,成分主要为铁镍类物质,直接降落或经由陆地风化作用间接到达海洋。各来源进入海洋水体的物质,还会被海洋生物的生命活动所利用。在不细究具体初始来源的前提下,对结壳形成提供物质组成的最直接来源应该是底层水体、海山岩石碎屑和风化物质、来自海山内部的热液物质,水柱中的生物(马维林,2006)。

4.2 成矿机制

目前通常认为富钴结壳为水成成因(Halbach, 1886;马维林,2006)。海洋中的最低含氧带(OMZ)

表4 世界各大洋区富钴结壳化学分析结果(%)
Table 4 Chemical analysis results of cobalt-rich crusts in various oceanic regions of the world

太平洋平均 西北太平洋 西(中)太平洋 中太平洋(BEZ) MA MAG	23.06	16.09	0.73	0.47	0.16														Manheim, 1986
	22.10	15.10	0.64	0.54	0.11	1.00	1.20	4.10	0.17	0.18	0.07								Cronan, 2000
	22.02	13.02	0.66	0.44	0.09														潘家华等, 1999
	22.00	15.00	0.78	0.44	0.08														Hein et al., 1987
	22.05	17.22	0.58	0.45	0.14														于赫楠等, 2013
	21.28	15.15	0.47	0.43	0.12	1.16	4.33	1.78	5.95	0.24	0.15	0.07	0.16	0.07	0.05	0.23			本文
	20.20	15.31	0.47	0.40	0.10	0.94	3.45	2.66	3.63	0.10	0.14	0.06	0.15	0.06	0.07	0.17			

含有大量溶解态的锰和铁,在OMZ之下,由于海水中的氧饱和度提高,促使水中的溶解态锰和铁逐渐转化为水合氧化锰或水合氧化铁胶体,这些胶体带有不同的电荷,相反极性的胶体颗粒互相吸引,形成结壳的原始单元—铁锰氧化物和氢氧化物胶团,带电的胶团在海山基岩表面沉淀,并慢慢累积形成最初的铁锰膜。这些由微小铁锰胶团形成的铁锰薄膜具有惊人的比表面积,可以大量吸收由海水源源不断供给的锰铁物质,从而形成类似普通海洋沉积物一样的层序型沉淀。结壳中除Mn、Fe为主要组分外,还有Co、Ni、Cu、Pt等其他一些重要的金属组分,这些组分基本上都是从海水中经由化学吸附、界面催化氧化、离子置换或还原反应等系列作用间接结合进入结壳中的。

此外,Chukhrov et al.(1996)和Lunemann et al.(1999)研究还发现,富钴结壳中的Mn、Fe、Ce、Co等元素的氧化物是在微生物做为媒介的情况下快速氧化生成的;边立曾(1996)、林承毅(1996)、陈建林(1999)、胡文宣(1999)等研究相继也发现了与结壳有着相似成因的深海多金属结核是微生物直接建造体。这些研究结果说明,微生物在富钴结壳的形成过程中也起着非常重要的作用。

5 富钴结壳分布规律

富钴结壳广泛分布在世界大洋的水下海山上,其分布和特征受多种因素影响,地形、水深、基岩类型、海水水文化学特征、经纬度等是影响结壳空间分布及其特征变化的最主要因素。

富钴结壳一般产于海山斜坡或海山平顶边缘,坡度范围 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (赵俐红,2005),尤其在斜坡上的小山脊,结壳的丰度和厚度较大;结壳大多分布于800~2500 m水深范围内(Hein et al.,2000)。富钴结壳厚度与其下覆基岩存在一定的联系(矫东风等,2007),基岩形成时代、风化程度及稳定性直接影响着结壳的厚度。通常基岩时代越老、风化程度愈高、越稳定则上覆富钴结壳愈厚;基岩为玄武岩和火山碎屑岩时更利于结壳的生长(赵俐红,2005)。研究还发现,平顶海山和尖顶海山的富钴结壳具有较明显差异(Chu et al.,2006)。平顶海山主要以薄层和砾状结壳为主,结壳厚度变化较大,平顶和陆坡地带结壳不发育;尖顶海山则由山顶向

斜坡区,结壳连续分布而且厚度较大,结壳的丰度、覆盖率和见矿率均优于平顶海山(马维林,2006)。海水水文化学特征也是影响富钴结壳分布的重要因素。富钴结壳主要分布于碳酸盐补偿深度(CCD)以上、最低含氧层(OMZ)中或最低含氧层以下水深500~3500 m的平顶海山、海台顶部和斜坡的裸露基岩上(Loper and Stacey,1983;Halbach and Manheim,1984;Halbach,1985;Glasby et al.,1987);此外,南极底层流的发育及强度也是控制结壳生长的重要因素之一,它决定了结壳内部的微观构造类型(张丽洁等,1998)。而在地理上,富钴结壳主要集中在 $35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{S}$ 之间的Fe-Mn建造带内,由北往南依次为北近赤道带、赤道带和南近赤道带这3个亚带。调查表明,西太平洋北近赤道带的夏威夷海岭、约翰斯顿岛、马绍尔群岛、麦哲伦海山、中太平洋海山群等海岭及南近赤道带的萨摩亚岛、库克岛、菲尼克斯岛、土阿默土岛等的富钴结壳最为发育(赵俐红,2005)。

6 结 语

大洋富钴结壳结壳矿产资源经过30多年的勘探历史,目前对其在各大洋的分布情况有了详细了解,对其类型划分、成矿特征、成矿环境、成矿机制及分布规律等问题的研究都取得了重大研究成果。此外,富钴结壳作为一种水成成因的矿产(Hein et al.,1988;Koschinsky et al.,1995;Halbach,1986),形成于古海洋和古沉积环境中,记录了过去60~100 Ma海洋和气候的演化历史,是储存了大量海洋和气候环境信息的重要载体(Hein,2000;McMurtry et al.,1994)。因此,富钴结壳的出现也带动了古海洋环境变化和古生物地层学方面的研究,并取得一系列显著研究成果(史跃中等,2004;马维林等,2007;佟景贵,2007;龙晓军等,2015;任向文等,2017)。

目前在富钴结壳勘探方面,俄罗斯、日本、韩国和中国等目前仍在开展富钴结壳调查。在资源调查的同时,各国都注重调查设备的改进与研发及新调查技术的应用,同时开展采矿及冶炼加工技术的试验与研究。在理论研究方面,虽然目前在多个方面取得显著成果,但受当前技术影响,有些方面仍有待深入研究。例如,目前虽然有多种手段可

获取富钴结壳的年龄值,但由于富钴结壳自身复杂地质成因及测试分析技术原因,或是由于定年方法本身局限性,目前积累的准确可靠的富钴结壳年代学格架资料并不多,影响富钴结壳成矿作用过程的研究。未来富钴结壳理论研究的发展,很大程度上有赖于高精度的分析测试技术、高分辨的研究方法以及新技术新方法的应用。

References

- Alvarez R, De Carlo E H, Cowen J, Andermann G. 1990. Micromorphological characteristics of a marine ferromanganese crust[J]. *Marine Geology*, 94:239–249.
- Aplin A C, Cronan D S. 1985. Ferromanganese oxide deposits from the Central Pacific Ocean, I. Encrustations from the Line Island Archipelago[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49:427–436.
- Bai Zhimin, Yi Caiqiao, Jiang Xunxiong. 2002. Nanometer properties of oceanic polymetallic nodules and cobalt-rich crusts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47 (11): 869–872(in Chinese).
- Bau M, Koschinsky A, Dulski P, Hein J.R. 1996. Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1709–1725.
- Bian Lizeng, Lin Chengyi, Zhang Fusheng, Du De'an, Chen Jianlin, Shen Huati. 1996. Pelagic manganese nodules—a new type of oncolite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70 (3): 232–236(in Chinese with English abstract).
- Chen Jianlin, Shen Huati, Han Xiqiu, Ma Weilin, Wang Ying. 1999. Analysis for ferromanganese minerals of the Pacific Oceanic polymetallic nodules and the study for its origination[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(2):56–64.
- Chu Fengyou, Sun Guosheng, Ma Weilin, Li Shoujun, Qian X. 2006. Classification of seamount morphology and its evaluating significance of ferromanganese crust in the central Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 25 (2):63–70.
- Chu Fengyou, Hu Daqian, Yao Jie. 2006. Mineral composition and element geochemistry of Co-rich crust from the YJC sea mount in the Central Pacific Ocean[J]. *Global Geology*, 25(3): 245–253(in Chinese with English abstract).
- Chukhrov F V, Zvyagin B B, Gorshkov A I, Yermilova L P, Korovushkin V V, Rudnitskaya Y S, Yakubovskaya N Y. 1977. Ferroxhyte, a new modification of FeOOH[J]. *Int. Geol. Rev.*, 19 (8): 873–890.
- Chukhrov F V. 1996. Authigenic manganese phase mineralogy in marine manganese nodules [J]. translated by Xiao Xuqi. *Foreign Ore Deposit Geology*, 1(total 75): 64–73.
- Cowen J P, Decarlo E H, Mcgee D L. 1993. Calcareous nanofossil biostratigraphic dating of a ferromanganese crust from Schumann Seamount[J]. *Marine Geology*, 115: 289–306.
- Craig J D, Andrews J M, Meylan A M. 1982. Ferromanganese deposits in the Hawaiian Archipelago[J]. *Marine Geology*, 45: 127–157.
- Cronan D S. 1980. *Underwater Minerals*[M]. London, New York: Academic Press.
- Cronan D S. 2000. Handbook of Marine Mineral Deposits[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(36):411–413.
- Cui Yingchun, Ren Xiangwen, Liu Lihua, Shi Xuefa, Yin Jingwu, Hao Jinhua. 2008a. Texture and geochemical characteristics of Co-riched crust from the Mic-Pacific Seamounts and their implications[J]. *Advances in Marine Science*, 26(1): 35–43(in Chinese with English abstract).
- Cui yingchun, Liu Jihua, Ren Xiangwen, Shi Xuefa. 2008b. Geochemistry of rare earth elements in cobalt rich crusts from the Mid-Pacific M Seamount[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 26(6): 760–768(in Chinese with English abstract).
- Frank D J, Meylan M A, Craig J D, Glasby G P. 1976. Ferromanganese deposits of the Hawaiian archipelago[J]. *Hawaii Institute of Geophysics. Rep. HIG-76-14*: 1–69.
- Friedrich G, Schmitz-Wiechowski A. 1980. Mineralogy and chemistry of a ferromanganese crust from a deep-sea hill, Central Pacific, “VALDIVIA” cruise VA13/2[J]. *Marine Geology*, 37: 71–90.
- Glasby G P, Gwozdz R, Kunzendorf H, Friedrich G, Thijssen T. 1987. The distribution of rare earth and minor elements in manganese nodules and sediments from the equatorial and SW Pacific[J]. *Lithos*, 20 (2) :97–113.
- Guo Shiqin, Wu Bihao, Lu Hailong. 1994. Geochemistry of Polymetallic Nodules and Sediments in the Central Pacific[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Halbach P, Manheim F T. 1984. Potential of cobalt and other metals in ferromanganese crusts on seamounts of the Central Pacific Basin[J]. *Marine Mining*, 4: 319–336.
- Halbach P. 1985. Cobalt-rich and Platinum-bearing Manganese Crusts Nature, Occurrence, and Formation[Z]. Workshop on Marine Minerals of the Pacific. Honolulu: East-West Center.
- Halbach F. 1986. Processes controlling the heavy metal distribution in Pacific ferromanganese nodules and crusts[J]. *Geologische Rundschau*, 75(1):235–247.
- He Gaowen, Zhao Zubin, Zhu Kechao. 2001. Cobalt-rich crust resources in the Western Pacific[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Hein J R, Morgenson L A, Clague D A and Koski R A. 1987. Cobalt-rich ferromanganese crusts from the Exclusive Economic Zone of the United States and nodules from the oceanic Pacific[C]//Scholl D W, Grantz A, Vedder J G(eds.). *Geology and Resources Potential of the Continental Margin of Western North America and Adjacent Ocean Basins—Beaufort Sea to Baja California, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series Houston, TX, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral*

- Reources, 6:753–771.
- Hein J R, Schwab W C, Davis A. 1988. Cobalt– and Platinum– rich ferromanganese crusts and associated substrate rocks from the Marshall Islands[J]. *Marine Geology*, 78, 255–283.
- Hein J R, Koschinsky A, Halbach P E, Manheim F T, Bau M, Kang J K, Lubick N. 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific[C]//Nicholson K, Hein J R, Bühn B, Dasgupta S (eds.). *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*. Geological Society Special Publication, 119: 123–138.
- Hein J R, Koschinsky A, Bau M, Manheim F T, Kang J K. 2000. Cobalt– rich ferromanganese crusts in the Pacific[C]//Cronan D S (eds). *Handbook of Marine Mineral Deposits*. Boca Raton, F L, CRC Press, 239–279.
- Hein J R. 2004. Cobalt– rich ferromanganese crusts: Global distribution, composition, origin and research activities[C]// International Seabed Authority ed. *Minerals Other than Polymetallic Nodules of the International Seabed Area*. Proceedings of a Workshop held on 26– 30 June 2000. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority, 188.
- Hu Wenxuan, Zhou Haiyang, GuLianxing, Zhang Wenlan, Lu Xiancai, Pan Jianming, Fu Qi, Zhang Haisheng. 1999. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from deep sea floor[J]. *Science in China(Series D)*: 29 (4): 362–366.
- Jeong K S, Jung H S, Kang J K, Morgan C L, Hein J R. 2000. Formation of ferromanganese crusts on northwest intertropical Pacific seamounts: Electron photomicrography and microprobe chemistry[J]. *Marine Geology*, 162: 541–549.
- Jiao Dongfeng, Jin Xianglong, Chu Fengyou, Hu Guangdao, Wang Yanxia. 2007. Formation conditions and control factors of thick Co– rich ferromanganese crusts[J]. *Mineral Deposits*, 26 (3): 296–306(in Chinese with English abstract).
- Jin Qinghuan. 2001. *Submarine Mineral Resources*[M]. Beijing: Tsinghua University Press; Guangzhou: Jinan University Press.
- Joshima M, Usui A. 1998. Magnetostratigraphy of hydrogenetic manganese crusts from Northwestern Pacific seamounts[J]. *Marine Geology*, 146: 53–62.
- Kang J K. 1987. Mineralogy and internal structures of a ferromanganese crusts from a seamount, Central Pacific[J]. *Journal Oceanological Society of Korea*, 22:168–178.
- Koschinsky A, Halbach P. 1995. Sequential leaching of ferromanganese precipitates: Genetic implications[J]. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 59: 5113–5132.
- Koschinsky A, Hein J R. 2003. Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: solid– phase associations and seawater speciation[J]. *Marine Geology*, 198: 331–351
- Li Chao. 2013. *Geochemical characteristics of basalt and research on Co– rich crust formation in the Mid– Pacific CH Seamount*[D]. Changchun: Master’s Thesis of Jilin University(in Chinese with English abstract)
- Lin Chengyi, Zhang Fusheng, Bian Lizeng, Zhou Lvfu, Chen Jianlin, Shen Huati. 1996. Classification of the microbes and study of the beaded ultra– microfossils in pelagic manganese nodules[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41 (16):1364–1368.
- Liu Yonggang, He Gaowen, Yao Huiqiang, Yang Yong, RenJiangbo, GuoLihua, Mei Yanxiong. 2013. Global distribution characteristics of seafloor cobalt– rich encrustation resources [J]. *Mineral Deposits*, 32(6): 1275–1284(in Chinese with English abstract).
- Liu Yonggang, Yao Huiqiang, Yu Miao, Ren Jiangbo, Yang Yong. 2014. The progress in research and exploration of international submarine mineral resources [J]. *Marine Information*, (3): 10– 16 (in Chinese).
- Long Xiaojun, Zhao Guangtao, Yang Shengxiong, Leng Chuanxu, Qi Qi, Cui Shangong, Hao Yanan. 2015. Chemical composition and paleoenvironmental record of the Co– rich crust from Magellan seamount in Western Pacific[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(5): 47–55(in Chinese with English abstract).
- Loper D E, Stacey F D. 1983. The dynamical and thermal structure of deep mantle plumes[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 33 (4) :304–317.
- Luan Xiwu. 2006. Cobalt– rich ferromanganese crusts formation—— Evidences of hydrogenous origin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 24 (2) :8–19(in Chinese with English abstract).
- Lunemann C P, Taillefert M, Perret D, Gaillard J F. 1997. Association of cobalt and manganese in aquatic system: Chemical and microscope evidence[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61(7):1437–1446.
- Ma Weilin, Jin Xianglong, Chen Jianlin, Su Xin, Zhang Weiyan. 2002. Geological characteristics of Co– rich crusts from the Mid– Pacific Seamounts Area[J]. *Donghai Marine Science*, 20 (3): 11– 23(in Chinese with English abstract).
- Ma Weilin. 2006. *Study on Relation between Seamounts Type and Crusts Mineralization*[D]. Doctoral Dissertation of Zhejiang University(in Chinese with English abstract).
- Ma Weilin, Jin Xianglong, ZhongShilan, Chu Fengyou. 2007. Calcareous nannofossil biostratigraphy study of cobalt– rich crust from Marcus Sea Ridge[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(5):174–180(in Chinese with English abstract).
- Manheim F T. 1986. Marine cobalt resources[J]. *Science*, 232 (4750) : 600 – 608.
- McMurtry G M, VonderHaar D L , Eisenhauer A, Mahoney J J, Yeh H W. 1994. Cenozoic accumulation history of a Pacific ferromanganese crust[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 125(1/4): 105–118 .
- Murad E, Schwertmann U. 1988. Iron oxide mineralogy of some deep– sea ferromanganese crusts[J]. *Am. Mineral*, 73: 1395–1400.
- Pan Jiahua, Liu Shuqin. 1999. Distribution, Composition and element geochemistry of Co– rich crusts in the Western Pacific[J]. *Acta*

- Geoscientica Sinica, 20(1): 47–54(in Chinese with English abstract).
- Pan Jiahua, Liu Shuqing, Yang Yi, Liu Xueqing. 2002. Type, Distribution and occurrence of Co–Rich crusts in Western Pacific[J]. Mineral Deposits, 2002(S1): 44–47(in Chinese with English abstract).
- Puteanus D, Halbach P. 1988. Correlation of Co concentration and growth rate—A method for age determination of ferromanganese crusts[J]. Chemical Geology, 69: 73–85.
- Rajani R P, Chodakar A R, Banakar V K, Parthihan G, Mudholkar A V. 2005. Compositional variation and genesis of ferromanganese crusts of the Afanasy–Nikitin Seamount, Equatorial Indian Ocean [J]. Earth Syst. Sci., 114(1): 51.
- Ren Xiangwen, Pulyaeva I, LvHuahua, Shi Xuefa, Cao Dekai. 2017. Calcareous nannofossil biostratigraphy of a Co–rich ferromanganese crust from seamount MK of Magellan Seamount Cluster[J]. Earth Science Frontiers, 24(1):276–296(in Chinese with English abstract).
- ShenYujun, Zhong Xiang, He Zequan. 1999. Present status of investigation and development of ocean cobalt crust resources[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 19(2): 11–13(in Chinese with English abstract).
- Shi Yuezong, Hu Chaoyong, Fang Nianqiao, Huang Junhua. 2004. Carbon isotopic composition of organic matter in co–rich ferromanganese crust and its implication for paleoceanography[J]. Earth Science, 29(2):148–150(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Xue T, He Gaowen, Zhang M, Shi Guiyong, Wang Shengmei Lu Hongfeng. 2006. Platinum group elements(PGE) and Os isotopic geochemistry of ferromanganese crusts from Pacific Ocean seamounts and their constraints on genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(12):3014–3026(in Chinese with English abstract).
- Tong Jingui. 2007. Geochemical and Mineralogical Study on the Co–rich Ferromanganese Crust from the Pacific ocean and the Palaeocean and Palaeoenvironment Reconstruction[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Wang Chenghou. 1986. Separation and accumulation of Mn, Fe and the formation of Mn nodules[J]. Scientia Sinica(Series B), 10: 1100–1107.
- Wang Xiaohong, Zhou Liping, Wang Yimin, Zhang Xuehua, Liu Xiaoming, Fan Xingtao, Liu Kexin, Zhou Jianxiong. 2008. Interpretation of high density environmental records of Pacific cobalt rich crusts[J]. Science in China (Series D): 38(9): 1112–1121.
- Wen X, De Carlo E H. 1994. A comparative study of the geochemistry and internal structure of seamount ferromanganese crusts[J]. EOS Trans Am Geophys Union, 74: 78.
- Wiltshire J C, Wen X Y, Yao D. 1999. Ferromanganese crusts near Johnston islands: Geochemistry, stratigraphy and economic potential[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 17: 257–270.
- Xu Dongyu, Yao De, Liang Hongfeng, Zhang Lijie. Paleoceanographic Environment for Formation of Polymetallic Nodules[M]. Beijing: Geological Publishing House, 22–41.
- Yu Henan, Sun Guosheng, Chu Fengyou, Ma Weilin. 2013. Characteristics of main ore–forming elements of crusts from Pacific seamounts[J]. Global Geology, 32(1):63–68(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuyuan, Zhang Weiyuan, Ren Xiangwen, Zhang Xiaoyu, Zhu Kechao. 2015. Resource estimation of Co–rich crusts of seamounts in the three oceans[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1):88–105(in Chinese with English abstract).
- Zhang Haisheng, Zhao Pengda, Hu Guangdao. 2004. Geochemical features of multi–Metallic crust in the middle Pacific ocean[J]. Earth Science, 29(3): 340–346(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijie, Yao De, Cui Ruyong, Qi Changmou. 1998. A discussion on the formation mechanism of submarine sedimentary ferromanganese deposits[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 18(2): 75–80(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongjiao, Yao Longkui. 2003. Cobalt geochemistry features in Co–rich crust in the central Pacific Ocean [J]. Donghai Marine Science, 21(4):34–40(in Chinese with English abstract).
- Zhao Lihong. 2005. Study on the Formation of Seamounts Distributed by Cobalt–rich Crust in the Central–West Pacific [D]. Doctoral Dissertation of Graduate University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Chukhrov F V. 1996. 海洋锰结核中自生锰相矿物学[J]. 肖绪琦译. 国外矿床地质, 1(总75): 64–73.
- 白志民, 刘旭, 尹才研, 蒋训雄, 汪胜东. 2002. 大洋多金属结核与富钴结壳浸出渣的纳米属性[J]. 科学通报, 47(11): 869–872.
- 边立曾, 林承毅, 张富生, 杜德安, 陈建林, 沈华梯. 1996. 深海锰结核——核形石的新类型[J]. 地质学报, 70(3): 232–236.
- 陈建林, 沈华梯, 韩喜球, 马维林, 王英. 1999. 太平洋多金属结核中铁锰矿物分析及成因研究[J]. 海洋学报, 21(2): 56–64.
- 初凤友, 胡大千, 姚杰. 2006. 中太平洋YJC海山富钴结壳矿物组成与元素地球化学[J]. 世界地质, 25(3):245–253.
- 崔迎春, 任向文, 刘季花, 石学法, 尹京武, 郝金华. 2008a. 中太平洋海山区富钴结壳构造与地球化学特征及意义[J]. 海洋科学进展, 26(1): 35–43.
- 崔迎春, 刘季花, 任向文, 石学法. 2008b. 中太平洋M海山富钴结壳稀土元素地球化学[J]. 中国稀土学报, 26(6): 760–768.
- 郭世勤, 吴必豪, 卢海龙. 1994. 多金属结核和沉积物的地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 何高文, 赵祖斌, 朱克超. 2001. 西太平洋富钴结壳资源[M]. 北京: 地质出版社.

- 胡文宣,周怀阳,顾连兴,张文兰,陆现彩,潘建明,符琦,张海生. 1999. 深海(铁)锰结核微生物成因新证据[J]. 中国科学(D辑): 29(4):362-366.
- 矫东风,金翔龙,初凤友,胡光道,王艳霞. 2007. 厚结壳的形成条件及控制因素分析[J]. 矿床地质, 26(3): 296-306.
- 金庆煊. 2001. 海底矿产[M]. 北京: 清华大学出版社, 广州: 暨南大学出版社.
- 李超. 2013. 中太平洋CH海山玄武岩地球化学特征及富钴结壳成因[D]. 吉林大学硕士学位论文.
- 林承毅,张富生,边立曾,周旅复,陈建林,沈华梯. 1996. 深海锰结核中微生物的分类及串珠状超微生物化石的研究[J]. 科学通报, 33(9):821-824.
- 刘永刚,何高文,姚会强,杨永,任江波,郭丽华,梅燕雄. 2013. 世界海底富钴结壳资源分布特征[J]. 矿床地质, 32(6):1275-1284.
- 刘永刚,姚会强,于淼,任江波,杨永. 2014. 国际海底矿产资源勘查与研究进展[J]. 海洋信息, (3): 10-16.
- 龙晓军,赵广涛,杨胜雄,冷传旭,祁奇,崔尚公,郝娅楠. 2015. 西太平洋麦哲伦海山富钴结壳成分特征及古环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(5): 47-55.
- 栾锡武. 2006. 大洋富钴结壳成因机制的探讨—水成因证据[J]. 海洋学研究, 24(2):8-19.
- 马维林,金翔龙,陈建林,苏新,章伟艳. 2002. 中太平洋海山区富钴结壳地质特征研究[J]. 东海海洋, 20(3): 11-23.
- 马维林. 2006. 海山类型与结壳成矿的关系研究[D]. 浙江大学博士学位论文.
- 马维林,金翔龙,钟石兰,初凤友. 2007. 马尔库斯海脊富钴结壳的钙质超微化石生物地层学研究[J]. 海洋学报, 29(5):174-180.
- 潘家华,刘淑琴. 1999. 西太平洋富钴结壳的分布,组分及元素地球化学[J]. 地球学报, 20(1): 47-54.
- 潘家华,刘淑琴,杨忆,刘学清. 2002. 西太平洋富钴结壳的类型、分布与产状[J]. 矿床地质, 2002(S1): 44-47.
- 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[J]. 地学前缘, 24(1):276-296.
- 沈裕军,钟祥,贺泽全. 1999. 大洋钴结壳资源研究开发现状[J]. 矿冶工程, 19(2):11-13.
- 史跃中,胡超涌,方念乔,黄俊华. 2004. 富钴结壳中有机碳同位素组成特征及其古海洋意义[J]. 地球科学, 29(2):148-150.
- 孙晓明,薛婷,何高文,张美,石贵勇,王生伟,陆红锋. 2006. 太平洋海山富钴结壳铂族元素(PGE)和Os同位素地球化学及其成因意义[J]. 岩石学报, 22(12): 3014-3026.
- 佟景贵. 2007. 太平洋富钴结壳矿物地球化学及古海洋与古环境重建[J]. 中国地质大学(北京) 博士论文.
- 王成厚. 1986. 锰、铁的分选、聚集和锰结核的形成[J]. 中国科学(B辑), 10: 1100-1107.
- 王晓红,周力平,王毅民,张学华,柳小明,樊兴涛,刘克新,周剑雄. 2008. 太平洋富钴结壳高密度环境记录解读[J]. 中国科学(D辑): 38(9): 1112-1121.
- 许东禹,姚德,梁宏峰,张丽洁. 1994. 多金属结核形成的古海洋环境[M]. 北京: 地质出版社, 22-41.
- 于赫楠,孙国胜,初凤友,马维林,孙珍军,李超. 2013. 中太平洋海山富钴结壳主要成壳元素特征[J]. 世界地质, 32(1):63-68.
- 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[J]. 海洋学报, 2015, 37(1):88-105.
- 张海生,赵鹏大,胡光道. 2004. 中太平洋多金属结核的地球化学特征[J]. 地球科学, 29(3): 340-346.
- 张丽洁,姚德,崔汝勇,戚长谋. 1998. 海底沉积铁锰矿床形成机制讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 18(2): 75-80.
- 赵宏樵,姚龙奎. 2003. 中太平洋富钴结壳Co元素地球化学特征[J]. 东海海洋, 21(4):34-40.
- 赵俐红. 2005. 中西太平洋富钴结壳生长海山的构造成因研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士论文.