

文章编号: 0258-7106(2013)06-1275-10

世界海底富钴结壳资源分布特征*

刘永刚¹, 何高文¹, 姚会强¹, 杨永¹, 任江波¹, 郭丽华¹, 梅燕雄²

(1 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;

2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 大洋富钴结壳资源是潜在的海底金属资源。文章对富钴结壳资源在太平洋、大西洋和印度洋分布的数据进行收集、整理、筛选、建库, 从全球角度出发, 对富钴结壳的分布特征进行了分析和对比。研究发现, 海山、洋脊、海盆和陆坡 4 种地貌的 Co 品位分别为 0.70%、0.46%、0.50% 和 0.43%, 海山地貌更有利于高 Co 品位结壳的产出。三大洋中, 太平洋海山富钴结壳矿点的分布比例占到了已知总数的 73.3%, 说明太平洋海山区是世界海底富钴结壳资源主要的产出区。根据入库数据的分布特点, 在全球划分出 10 个富钴结壳成矿区, 结合结壳的厚度和分布水深, 从各成矿区中划分出富集区, 并按照 2 cm 厚度和 4 cm 厚度的标准分别对富集区的富钴结壳资源量进行了估算。计算结果显示, 太平洋富矿区的富钴结壳质量最好, $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Cu})$ 平均分别为 23.00%、0.66%、0.44%、0.09%, 干结壳资源量分别为 2426.33 Mt、70.30 Mt、48.75 Mt、10.30 Mt; 按 4 cm 厚度指标, $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Cu})$ 平均分别为 23.70%、0.58%、0.48%、0.11%, 干结壳资源量分别为 1184.53 Mt、29.76 Mt、24.53 Mt、5.01 Mt。

关键词 地质学; 富钴结壳; 海底金属资源; 成矿区

中图分类号: P67; P628

文献标识码: A

Global distribution characteristics of seafloor cobalt-rich encrustation resources

LIU YongGang¹, HE GaoWen¹, YAO HuiQiang¹, YANG Yong¹, REN JiangBo¹,
GUO LiHua¹ and MEI YanXiong²

(1 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Oceanic cobalt-rich encrustation resources are potential seafloor metal resources. In this paper, the authors collected encrustation data from Pacific, Atlantic and Indian Ocean, sorted them and built a database. From the global perspective, the authors summarized and compared the mineral characteristics and distribution of the cobalt-rich encrustation. The results show that co-rich encrustation resources on the Pacific seafloor are richer than those in other oceans, accounting for about 81%. Besides, the content of Co on seamounts, ocean ridges, basin and continental slope is respectively 0.70%, 0.46%, 0.50% and 0.43%, which indicates that seamounts geomorphology is more conducive to production of encrustations with high Co content. Among three oceans, the cobalt-rich encrustations that occur on the Pacific seamounts account for 73.3% of all encrustations, which im-

* 本文得到中国地质调查局地质调查工作项目“1:2500 万世界海洋矿产资源图(1212010811049)”和“大洋”十二五项目(DY125-13-R-03; DY125-13-R-09; DY125-13-R-01; DY125-13-R-08)的联合资助

第一作者简介 刘永刚, 男, 1980 年生, 博士, 工程师, 主要从事大洋矿产资源调查和评价工作。Email: llt-2002@163.com

收稿日期 2012-11-05; 改回日期 2013-11-11。秦思婷编辑。

plies that Pacific seamounts are the main output areas of the world's seabed cobalt-rich encrustation resources. According to the distribution of storage data, the authors divided the world into 10 ore-forming zones of cobalt-rich encrustations, which were further divided into ore concentration regions according to the encrustation thickness and water depth. And then, the authors estimated the cobalt-rich resources quantity from ore concentration regions in accordance with 2 cm thickness and 4 cm thickness standard. The calculation shows that the quality of Co-rich encrustations in Pacific ore concentration region is better than that in other oceans. According to the index of 2 cm thickness, the mean content of Mn, C, Ni, Cu is respectively 23.00%, 0.66%, 0.44%, 0.09%, and the amount of dry encrustation resources is 2426.33 Mt, 70.30 Mt, 48.75 Mt, 10.30 Mt. According to the index of 4 cm thickness, the mean content of Mn, Co, Ni, Cu is respectively 23.70%, 0.58%, 0.48%, 0.11%, and the amount of dry encrustation resources is 1184.53 Mt, 29.76 Mt, 24.53 Mt, 5.01 Mt.

Keywords: geology, cobalt-rich encrustations, seafloor metal resources, ore-forming zones

大洋富钴结壳(又称“铁锰结壳”)是继大洋多金属结核资源之后发现的又一深海固体矿产资源,它产出于海山、海脊、台地和海丘的顶部和侧翼,或在岩石露头上形成厚结壳,或在碎石堆上形成结皮。富钴结壳主要由铁锰氧化物和氢氧化物组成,与岩石圈和海水浓度相比,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),其中的 Co 含量尤为显著,最高可达 2%,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)。而最近的研究(张富元等,2011)表明,仅太平洋海山的富钴结壳中锰、钴、镍、铜的金属量与全球陆地资源量和多金属结核量(Manheim,1986)相比都是非常可观的,分别是陆地资源量的 11.11 倍、71.58 倍、8.26 倍、0.29 倍。另外,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;Hugh et al.,1999;McMurtry et al.,1994)。正是考虑到富钴结壳具有资源和环境的双重价值,自 20 世纪 80 年代初,继大洋多金属结核资源调查之后,德国、美国、俄罗斯、中国等国纷纷投入大量的人力、物力,积极开展富钴结壳资源的研究,国际上为争夺深海矿产资源已经展开了新一轮的竞争和角逐。

本文拟从全球角度出发,对太平洋、大西洋和印度洋富钴结壳资源的分布数据进行收集、整理,对富钴结壳资源分布特征和形成规律进行分析和对比,划分富钴结壳资源富集带,总结其时空分布规律,并对其潜在资源量进行估算,这对于中国开发海洋矿

产资源的全球战略是非常有意义的。

1 富钴结壳数据库建设及相关统计特征

国际海底管理局(International Seabed Authority,简称 ISA)建立了海洋矿产资源的中枢数据库(Central Data Repository),将分散在全球不同机构和公司并以不同标准和格式的数据信息加以整理和改进,并在其官方网站(www.isa.org.jm)上公布,包括海底热液喷口数据库、多金属结核数据库、铁锰结壳数据库。本研究以国际海底管理局公布的结壳数据为基础,同时结合已公开发表的文献资料(Akira et al.,2010;Alvarez et al.,1990;Andrew,1984;Nath et al.,1992;Banakar et al.,1997;2000;Michael et al.,2009;Bolton et al.,1986;1988;Carles et al.,2008;De Carlo et al.,1987;Chu et al.,2006;Goddard et al.,1987;Exon et al.,2010;Frank et al.,2006;Gibbs et al.,1993;Halbach et al.,1984;1989;Smith et al.,1972;Hein et al.,1999;Jeong et al.,2000;Jonguk et al.,2006;Kuhn et al.,1996;Mitchell et al.,1977;Murphy et al.,1991;Szefer et al.,1998;Samantha et al.,2007;Claude et al.,1987;Prasad,1994;Rajani et al.,2005;Rehkamper et al.,2002;Suave et al.,1989;Takahashi et al.,2007;Takashi et al.,1998;Klemm et al.,2008;Wen et al.,1997;Xavier,1982),共收集结壳矿点数据 1494 组。经过重复点均值化处理,并删除缺测点,保留有效数据 1386 组。由于达到 Co 工业品位(质量分数,下同)0.5%的矿点数据较少,本文选取 Co 边界品位 0.3% 作为富钴

表 1 海底结壳矿点数据统计表

Table 1 Statistics of seafloor encrustation ore data			
大洋名称	收集数据/组	有效数据/组	富钴结壳数据/组
太平洋	1076	989	673
大西洋	280	278	119
印度洋	138	119	41
合计	1494	1386	833

结壳的判定指标,即当结壳中的 Co 品位不小于 0.3%时,则认为是富钴结壳;反之,则不是富钴结壳,予以删除。通过筛选,符合指标的富钴结壳矿点数据为 833 组,录入富钴结壳数据库(表 1,图 1)。

由表 1 和图 1 可知,根据已有富钴结壳矿点的统计结果,富钴结壳在太平洋、大西洋和印度洋的海底均有分布。其中,以太平洋居多,约占已知矿点总数的 80.8%,其次是大西洋和印度洋,所占比例分别为 14.3%和 4.9%。

根据已有资料 and 实际统计结果,将地貌类型划分为 4 类,分别为:① 海山(区),包括海山、海底高原、海隆和海脊;② 海盆,包括深海海盆和弧后盆地;③ 洋脊,包括大洋中脊和相关裂谷;④ 大陆坡。将富钴结壳数据在海底不同地貌类型上的分布特征进行统计,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,富钴结壳在海山、洋脊、海盆

和大陆坡 4 种地貌类型上均有分布,但是富钴结壳在海山的分布数量要远远多于洋脊、海盆和大陆坡,约占总数量的 84.0%,而后 3 种地貌类型产出的富钴结壳分别只占到总数量的 7.5%、6.2%和 2.3%。通过对各种地貌类型富钴结壳中 Co 品位的统计,发现海山地貌对应的平均 $w(\text{Co})$ 高达 0.70%,而洋脊、海盆和大陆坡的结壳平均 $w(\text{Co})$ 相对较低,分别为 0.46%、0.50%和 0.43%,说明根据现有的统计数据,海山是产出高钴品位结壳的有利地貌类型。

2 世界海底富钴结壳资源分布

将富钴结壳资源在不同海洋和不同地貌类型的分布特征进行联合统计,得到表 3。

由统计分析可知,富钴结壳资源大部分分布于

表 2 富钴结壳矿点在不同地貌类型的分布统计表
Table 2 Statistics of distributions of Co-rich encrustations in different types of topography

地貌类型	数据/组	所占比例/%	$w(\text{Co})$ /%
海山	700	84.0	0.70
洋脊	63	7.5	0.46
海盆	51	6.2	0.50
大陆坡	19	2.3	0.43

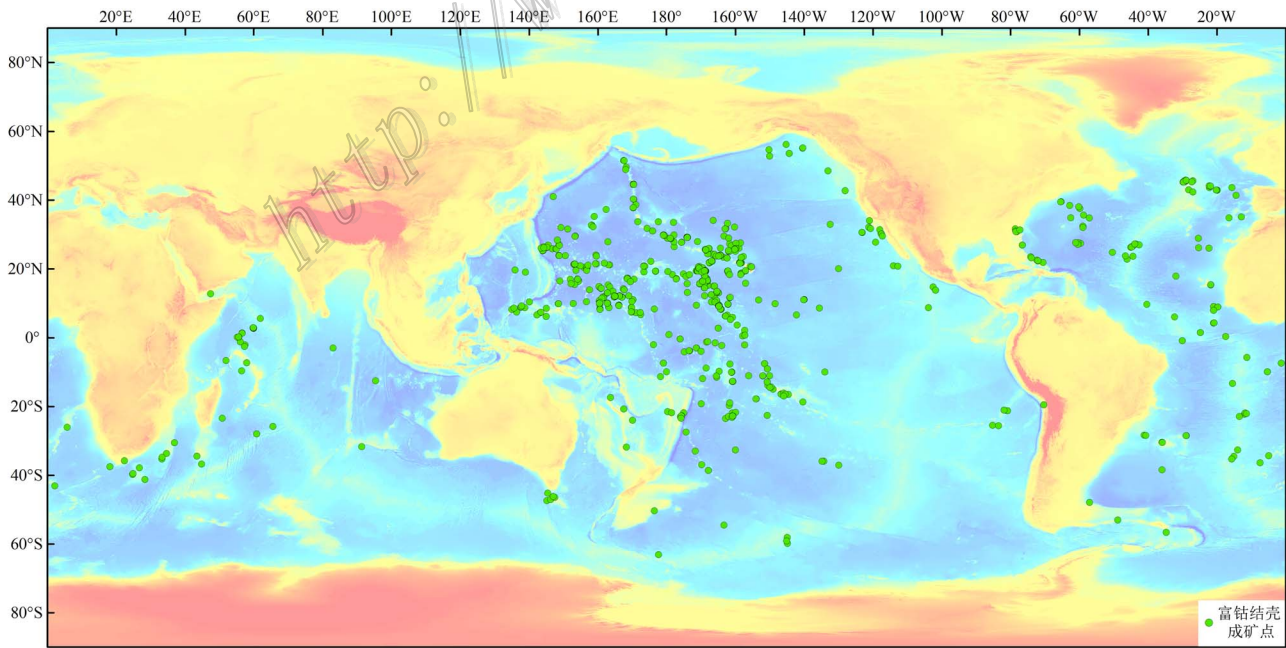


图 1 富钴结壳矿点在世界海底的分布(来自国际海底管理局和各公开发表的文献)
Fig. 1 The distribution of world seabed Co-rich encrustation ores(after ISA and published literature)

表 3 富钴结壳矿点在不同地貌类型的分布特征
Table 3 Distribution of co-rich encrustation ores in different types of topography

地貌类型及所在大洋	数量/个	地貌特征
海山(700)		
太平洋	611	主要包括 Michelson 海脊、Marcus-Wake 海山、Magellan 海山区、Marshall 海山、Caroline 海山、Shatsky 海脊、Emperor 海岭、Hawaiian 海岭、Mid-Pacific 海山、Line 海山、Musician 海山、Gulf of Alaska 海山区、Manihiki 海底高原、Tuamotu 海山区、Nazca 海岭、Tasman 海隆等
大西洋	56	主要包括 New England 海山、Santos 海底高原、Rio Grande 海底高原、Falkland 海底高原等
印度洋	33	主要包括 Mozambique 海底高原、Agulhas 海底高原、Madagascar 海山
洋脊(63)		
太平洋	13	主要为东太平洋海隆
大西洋	43	主要为大西洋中脊
印度洋	7	主要包括中印度洋中脊、西南印度洋中脊以及 Carlsberg 洋脊等
海盆(51)		
太平洋	40	主要包括西北太平洋海盆、中太平洋海盆、西南太平洋海盆、东太平洋海盆以及 Penrhyn 海盆等
大西洋	10	主要包括 Nares 深海平原
印度洋	1	Madagascar 海盆
大陆坡(19)		
太平洋	9	主要包括北美西部大陆坡以及南美西部大陆坡
大西洋	10	主要包括北美东南部大陆坡以及非洲大陆坡
印度洋	0	—

太平洋海底 ,比例约为总数的 80.8%。由表 3 可以看出 ,在太平洋广大的海域中 ,又以太平洋海山上富钴结壳资源的分布优势最为明显 ,约占总数量的 73.3% ,是世界海底富钴结壳资源主要的产出区。其他海洋地貌区的富钴结壳资源分布较少 ,比例都不超过总数的 10%。为了更好地认识海底富钴结壳资源分布情况 ,依据已有的富钴结壳分布特征 ,对世界海底富钴结壳资源进行成矿区和富矿区的划分。

2.1 富钴结壳成矿区和富矿区的划分依据

根据已有富钴结壳资源在不同大洋及不同构造背景和地貌形态上的分布情况 ,对富钴结壳主要的成矿区进行划分。成矿区是大量富钴结壳矿点相对集中分布的大区域成矿单元 ,对应着区域性的海山区、洋脊、海盆和大陆坡。富矿区则是在成矿区的基础上 ,按照一定的圈定指标进一步划分出的富集区 ,对应着具体的海山、洋脊段等。

2.2 富钴结壳成矿区划分

根据合同经济特征类别属性的划分 ,结合世界海底富钴结壳的分布特征 ,对富钴结壳成矿区进行初步划分(图 2)。如图 2 所示 ,划分出 10 个成矿区 :西太平洋成矿区(P1)、中太平洋成矿区(P2)、南太平洋成矿区(P3)、东太平洋成矿区(P4)、西南太平洋成矿区(P5)、西北大西洋成矿区(A1)、东北大西洋成矿区(A2)、南大西洋成矿区(A3)、西南印度洋成矿

区(I1)、中印度洋成矿区(I2)。

2.3 富钴结壳富矿区的圈定

对于富钴结壳富矿区的圈定主要考虑了 2 个因素 :富钴结壳厚度和分布水深。

根据分析 ,富钴结壳在 450~7000 m 的水深范围内都有分布 ,而且在各大洋中富钴结壳的分布水深也不相同(图 3)。结合各大洋富钴结壳矿点对应不同水深段的分布频数 ,选取频数分布较高的水深段作为主体水深 ,即太平洋的主体分布水深为 1000~3500 m ,大西洋的主体分布水深为 2000~4000 m ,印度洋的主体分布水深为 1500~5500 m。

由于数据库内富钴结壳厚度值普遍较低(不超过 4 cm) ,因此在进行富矿区圈定时主要采用 2 个指标 :① 富钴结壳厚度不小于 2 cm ;② 富钴结壳厚度不小于 4 cm。按照 2 个厚度指标并结合主体分布水深来圈定富矿区 ,运用 ArcGIS 空间分析模块计算圈定的各富矿区结壳在海山表面展布的面积 ,由于比例尺(1:10 000 000)较小 ,因此采用算术平均法计算资源量。

按照富钴结壳厚度不小于 2 cm 的指标在水深 1000~3500 m 的范围内对太平洋富钴结壳富矿区进行圈定 ,共圈出富矿区 8 个 ,分别为 :Michelson 海脊富矿区(SM1)、Marcus-Wake 海山富矿区(SM2)、

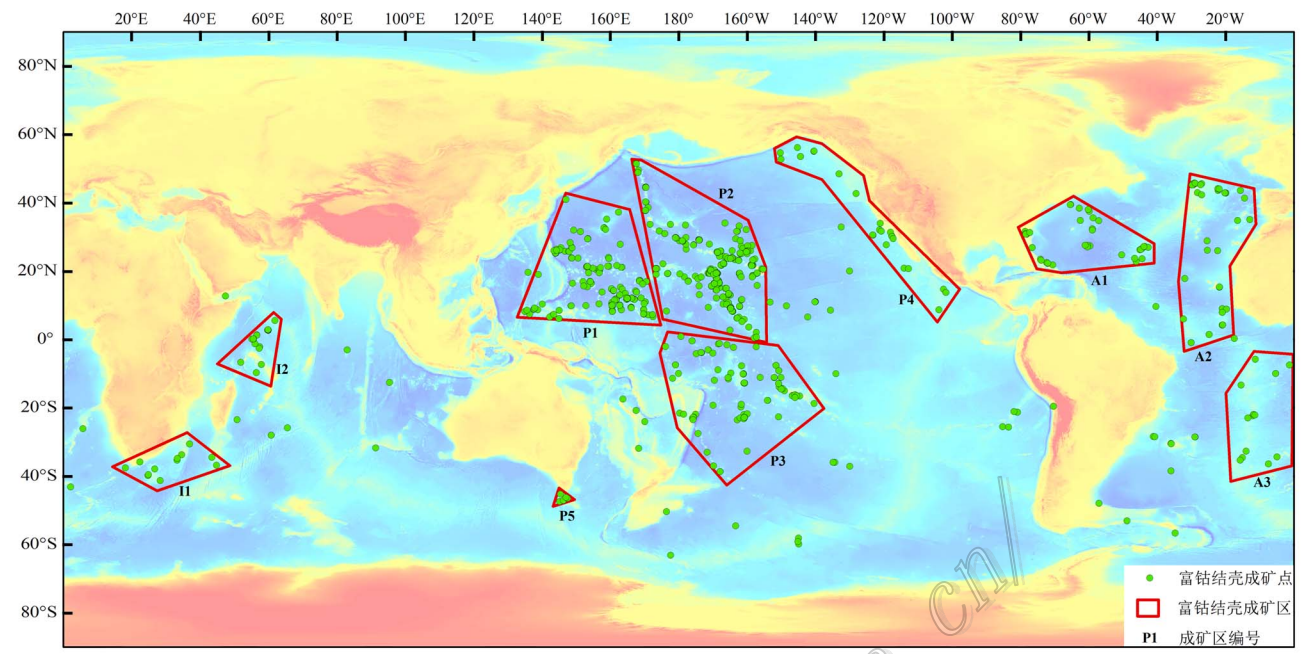


图 2 世界海底富钴结壳成矿区划分示意图

Fig. 2 The partition of world seabed Co-rich encrustation metallogenic zones

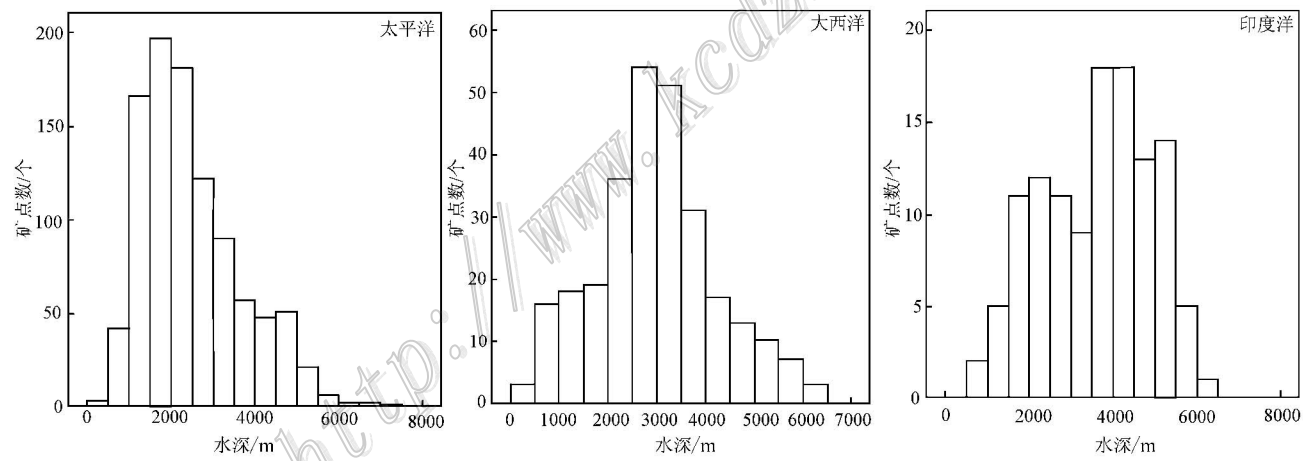


图 3 富钴结壳水深频数直方图

Fig. 3 Histogram of Co-rich encrustation ore frequency

表 4 太平洋结壳富矿区(2 cm 厚度指标)

Table 4 Ore concentration regions of the Pacific Ocean (2 cm thickness index)									
编号	富矿区	结壳面积*/ km ²	富钴结壳厚度/cm			$w(B)/\%$			
			最小	最大	平均	Mn	Co	Ni	Cu
SM1	Michelson 海脊区	30343.24	2.4	6.9	4.3	21.9	0.56	0.52	0.07
SM2	Marcus-Wake 海山区	45623.06	2.0	7.9	4.4	23.4	0.56	0.45	0.12
SM3	Magellan 海山区	44327.08	2.0	6.5	3.7	22.1	0.54	0.39	0.12
SM4	Marshall 海山区	153327.31	2.0	14	5.2	23.3	0.64	0.50	0.10
SM5	Hawaii 海岭北部	27349.95	2.0	10	3.0	23.6	0.86	0.43	0.05
SM6	Hawaii 海岭南部	114784.86	2.0	5.0	3.0	21.1	0.67	0.34	0.10
SM7	Mid-Pacific 海山区	34494.09	2.0	3.4	2.5	23.2	0.68	0.35	0.09
SM8	Line 海山区	178870.02	2.0	7.3	3.7	25.4	0.80	0.54	0.10

注：结壳面积*为富矿区海山表面积，下同。

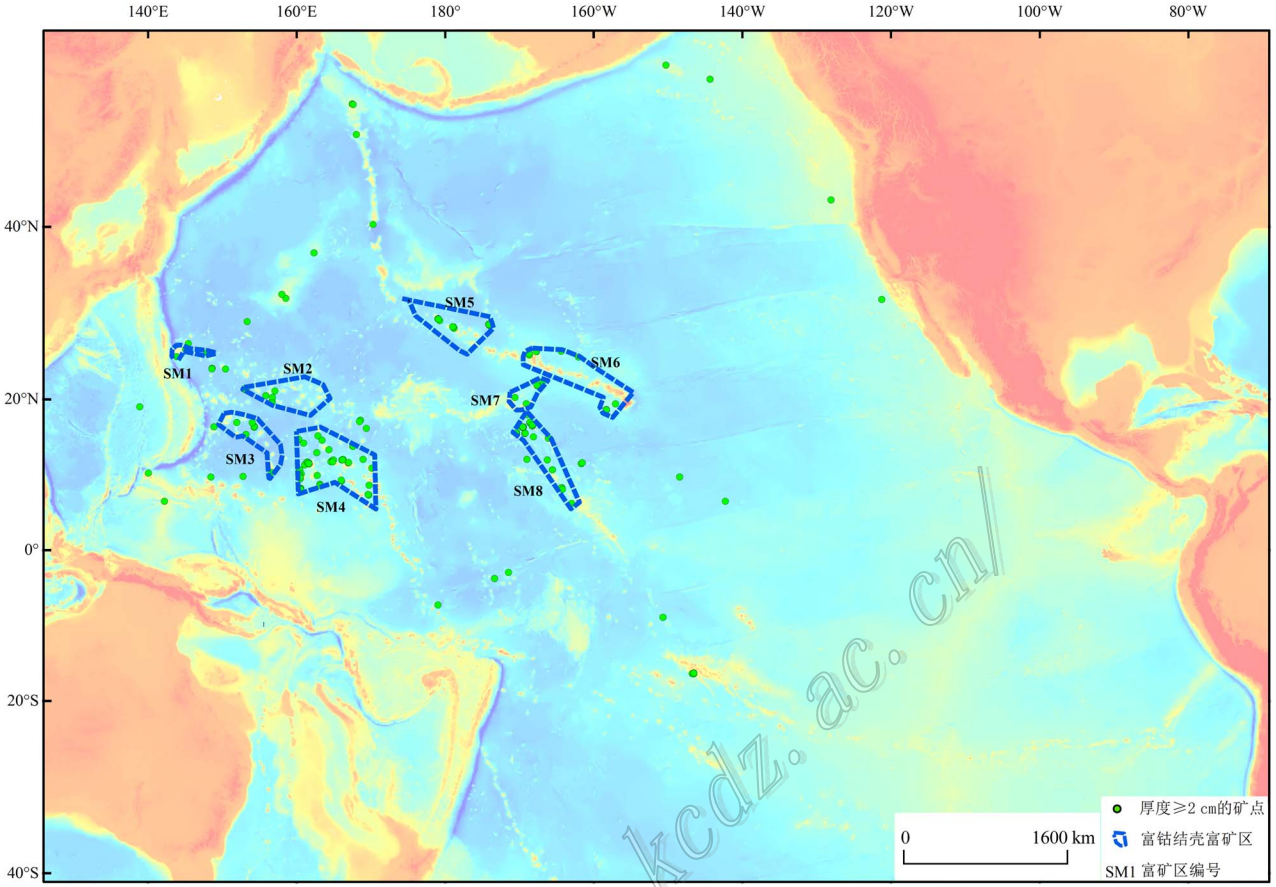


图 4 太平洋结壳富矿区(2 cm 厚度指标)
Fig. 4 Ore concentration regions of Pacific Ocean (2 cm thickness index)

Magellan 海山富矿区 (SM3)、Marshall 海山富矿区 (SM4)、Hawaii 海岭北部富矿区 (SM5)、Hawaii 海岭南部富矿区 (SM6)、Mid-Pacific 海山富矿区 (SM7)、Line 海山富矿区 (SM8) (表 4, 图 4)。在大西洋和印度洋未圈出富矿区。

由表 4 和图 4 可知,按 2 cm 厚度指标,共圈出 8 个富矿区。其中 Marshall 海山区的富钴结壳平均厚度最大,为 5.2 cm;其次为 Marcus-Wake 海山区和 Michelson 海脊区,平均厚度都超过了 4 cm;其余富矿区的结壳平均厚度都在 3~4 cm。另外,除了 Michelson 海脊区、Magellan 海山区和 Marcus-Wake 海山区的 $w(\text{Co})$ 低于 0.6% 外,其余富矿区的 $w(\text{Co})$ 都超过了 0.6%,Line 海山和 Hawaii 海岭北部的 $w(\text{Co})$ 甚至达到了 0.8% 以上。

按照富钴结壳厚度不小于 4 cm 的指标,在水深 1000~3500 m 的范围内对太平洋富钴结壳富矿区进行圈定,共圈出富矿区 3 个,分别为:Marcus-wake 海山富矿区 (SM1)、Marshall 海山富矿区 (SM2) 和

Line 海山富矿区 (SM3) (图 5, 表 5)。在大西洋和印度洋未圈出富矿区。

由表 5 和图 5 可知,按 4 cm 厚度指标,共圈出 3 个富矿区。其中,Marshall 海山区的富钴结壳平均厚度最大,为 7.1 cm;其次为 Marcus-Wake 海山区和 Line 海山区,厚度分别为 5.7 cm 和 5.5 cm。另外,Line 海山结壳的 $w(\text{Co})$ 最高,达到 0.64%,Marshall 海山区和 Marcus-Wake 海山区的 $w(\text{Co})$ 接近,分别为 0.54% 和 0.56%。

2.4 富钴结壳富矿区资源量估算

对于富矿区富钴结壳资源量的计算,主要采用算术平均法。计算方法如下:

(1) 湿结壳资源量计算

$$MM = \bar{F} \times S \times Cov, \text{ 式中:}$$

MM—富矿区湿结壳量;

$\bar{F}$ —富矿区平均丰度,计算公式为 $\bar{F} = 10 \times \rho \times D$, ρ 为富钴结壳湿密度 (g/cm^3),通常取 $2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, D 为富钴结壳厚度 (cm);

表 5 太平洋结壳富矿区(4 cm 厚度指标)
Table 5 Ore concentration regions of the Pacific Ocean (4 cm thickness index)

编号	富矿区	结壳面积*/km ²	富钴结壳厚度/cm			w(B)/%			
			最小	最大	平均	Mn	Co	Ni	Cu
SM1	Marcus-Wake 海山区	16385.8	5.0	7.9	5.7	24.5	0.54	0.47	0.12
SM2	Marshall 海山区	112668.5	4.0	14	7.1	22.5	0.56	0.47	0.09
SM3	Line 海山区	59721.37	4.0	7.3	5.5	24.1	0.64	0.50	0.11

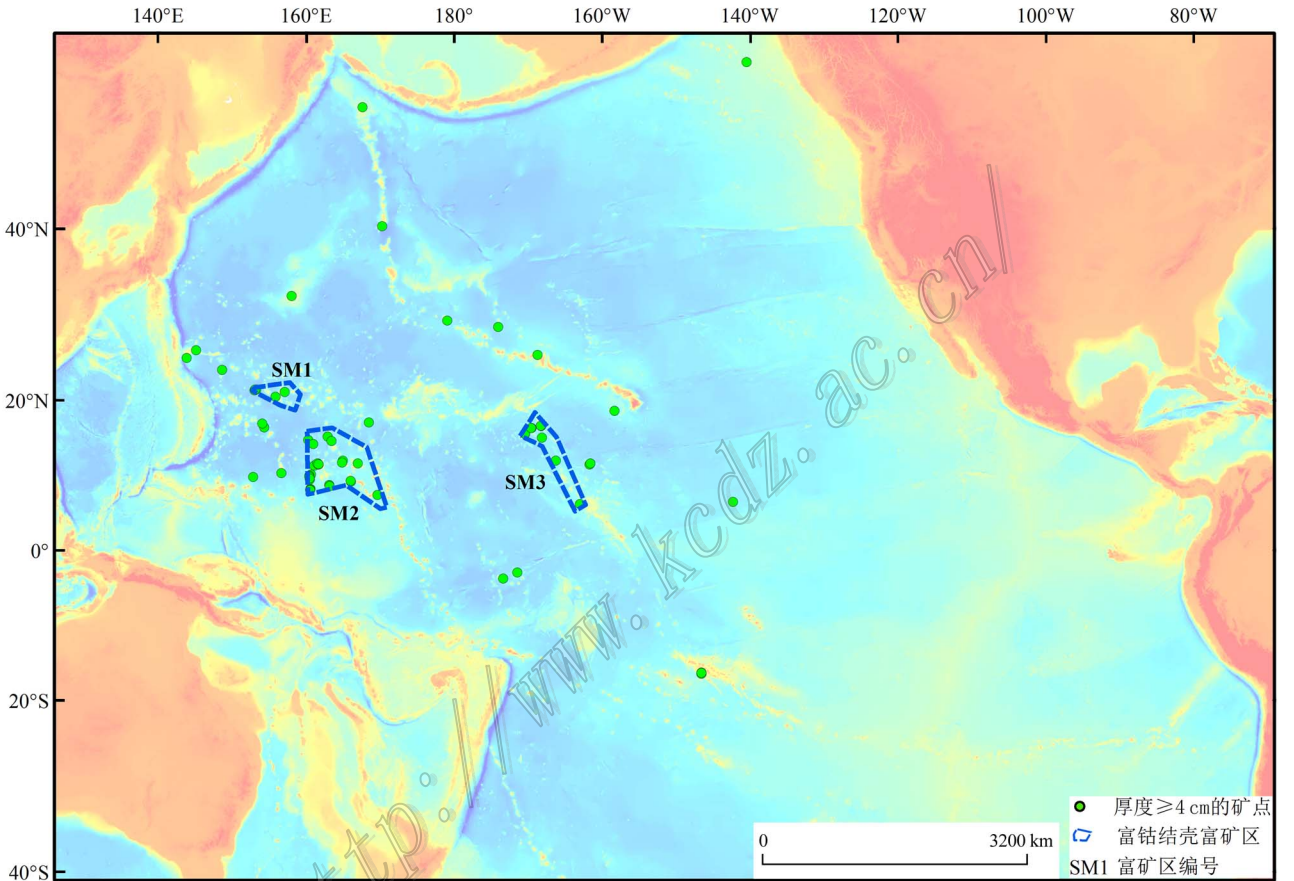


图 5 太平洋结壳富矿区(4 cm 指标)
Fig. 5 Ore concentration regions of the Pacific Ocean (4 cm thickness index)

S—富矿区海底表面积;
Cov—含矿区结壳的覆盖率(这里按 30% 计算);
(2) 干结壳资源量计算
 $DM = MM \times (1 - W)$, 式中:
DM—富矿区干结壳量;
MM—富矿区湿结壳量;
W—富矿区结壳含水率, 一般取 30%。
(3) 金属资源量计算
 $ME = DM \times C$, 式中:
ME—富矿区某金属资源量;

DM—富矿区干结壳量;
C—富矿区某金属平均质量分数;
这里, 富矿区结壳资源量按照 2 cm 和 4 cm 两种不同的厚度指标分别进行计算, 初步得到估算结果(表 6, 表 7)。
按 2 cm 厚度指标, $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Cu})$ 平均分别为 23.00%、0.66%、0.44%、0.09%, 计算出的干结壳资源量分别为 2426.33 Mt、70.30 Mt、48.75 Mt、10.30 Mt。
按 4 cm 厚度指标, $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Cu})$ 平均分别为 23.70%、0.58%、0.48%、

表 6 太平洋富钴结壳富矿区资源量(按 2 cm 厚度指标)
Table 6 The amount of Co-rich crust resources in Pacific Ocean (2 cm thickness index)

序号	富矿区	结壳面积/ km ²	平均厚度/ cm	丰度/ (kg/m ²)	w(B)/%				m(B)/Mt					
					Mn	Co	Ni	Cu	湿结壳	干结壳	锰金属	钴金属	镍金属	铜金属
1	Michelson 海脊区	30343.24	4.3	46	21.9	0.56	0.52	0.07	782.86	548.00	120.01	3.07	2.85	0.38
2	Magellan 海山区	44327.08	3.7	70	22.1	0.54	0.39	0.12	984.06	688.84	152.24	3.72	2.69	0.83
3	Marcus-Wake 海山区	45623.06	4.4	56	23.4	0.56	0.45	0.12	1204.45	843.11	197.29	4.72	3.80	1.01
4	Marshall 海山区	153327.31	5.2	76	23.3	0.64	0.5	0.1	4783.81	3348.67	780.24	21.43	16.74	3.35
5	Mid-Pacific 海山区	34494.09	2.5	44	23.2	0.68	0.35	0.09	517.41	362.19	84.03	2.46	1.27	0.33
6	Line 海山区	178870.02	3.7	72	25.4	0.8	0.54	0.1	3970.91	2779.64	706.03	22.24	15.01	2.78
7	Hawaii 海岭区北部	27349.95	3.0	58	23.6	0.86	0.43	0.05	492.30	344.61	81.33	2.96	1.48	0.17
8	Hawaii 海岭区南部	114784.86	3.0	70	21.1	0.67	0.34	0.1	2066.13	1446.29	305.17	9.69	4.92	1.45
合计/平均		629119.61	3.7	61.50	23.00	0.66	0.44	0.09	14801.93	10361.35	2426.33	70.30	48.75	10.30

表 7 太平洋富钴结壳富矿区资源量(按 4 cm 厚度指标)
Table 7 The amount of Co-rich crust resources in Pacific Ocean (4 cm thickness index)

序号	富矿区	结壳面积/ km ²	平均厚度/ cm	丰度/ (kg/m ²)	w(B)/%				m(B)/Mt					
					Mn	Co	Ni	Cu	湿结壳	干结壳	锰金属	钴金属	镍金属	铜金属
1	Marcus-Wake 海山区	16385.8	5.7	114	24.5	0.54	0.47	0.12	560.39	392.28	96.11	2.12	1.85	0.47
2	Marshall 海山区	112668.5	7.1	142	22.5	0.56	0.47	0.09	4799.68	3359.78	755.95	18.82	15.79	3.02
3	Line 海山区	59721.37	5.5	110	24.1	0.64	0.5	0.11	1970.81	1379.57	332.48	8.83	6.90	1.52
合计/平均		188775.67	6.10	122.00	23.70	0.58	0.48	0.11	7330.88	5131.62	1184.53	29.76	24.53	5.01

0.11% ,计算出的干结壳资源量分别为 1184.53 Mt、29.76 Mt、24.53 Mt、5.01 Mt。

3 结 论

(1) 富钴结壳资源在世界海底分布广泛 ,从已掌握的矿点数据统计结果来看 ,太平洋海底分布最多 ,约占 80.8% ;大西洋海底次之 ,占 14.3% ;印度洋海底分布最少 ,只占 4.9%。

(2) 在海山、洋脊、海盆和大陆坡 4 种地貌类型中 ,海山区调查程度最高 ,最有利于高钴品位结壳的产出 ,其中太平洋海山区是世界海底富钴结壳资源主要的产出区 ,其矿点分布占全部已知总数的 73.3%。

(3) 在各大洋划分出的成矿区中 ,太平洋富矿区的富钴结壳质量最好。按 2 cm 厚度标准 ,其平均厚度为 2.5~5.2 cm ,Co 品位为 0.54%~0.86% ;按 4 cm 厚度标准 ,其平均厚度为 5.5~7.1 cm ,Co 品位为 0.54%~0.64%。

(4) 本文对太平洋、大西洋、印度洋海底的富钴结壳资源空间分布进行了对比研究 ,构建了世界海底富钴结壳资源数据库 ,为中国从全球角度开发利用海洋矿产资源、维护海洋权益提供了基础资料和科学指导。

参考文献/References

- 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.
- 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.
- 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 [J]. 地球科学——中国地质大学学报 , 36(1) : 1-11.
- Akira U and Nobuyuki O . 2010. Geophysical and Geological exploration of Cobalt-rich ferromanganese crusts : An attempt of small-scale mapping on a Micronesian seamount [J]. Marine Georesources and Geotechnology , 28 : 192-206.
- Alvarez R , DeCarlo E H , Cowen J and Andermann G . 1990. Micromorphological characteristics of a marine ferromanganese crust [J]. Marine Geology , 94 : 239-249.
- Andrew C A . 1984. Rare earth element geochemistry of Central Pacific ferromanganese encrustations [J]. Earth and Planetary Science Letters , 71 : 13-22.
- Banakar V K , Pattan J N and Mudholkar A V . 1997. Palaeo-oceanographic conditions during the formation of a ferromanganese

- crust from the Afanasiy-Nikitin seamount , North Central Indian Ocean : Geochemical evidence [J]. Marine Geology , 136 : 299-315.
- Banakar V K and Hein J R . 2000. Growth response of a deep-water ferromanganese crust to evolution of the Neogene Indian Ocean [J]. Marine Geology , 162 : 529-540.
- Bolton B R , Ostwald J and Monzier M . 1986. Precious metals in ferromanganese crusts from the south-west Pacific [J]. Nature , 320 : 518-520.
- Bolton B R , Exon N F , Ostwald J and Kudrass H R . 1988. Geochemistry of ferromanganese crusts and nodules from the south Tasman Rise , southeast of Australia [J]. Marine Geology , 84 : 53-80.
- Carles C , Rosa M P , William L B , Peter S , Carlos L , Antoni C , Esperanza T and Carlos M . 2008. Mineralogical and geochemical constraints on the origin of ferromanganese crusts from the Rivera Plate (western margin of Mexico) [J]. Marine Geology , 251 : 47-59.
- Chu F , Sun G , Ma W , Li S , Qian X and Zhao H . 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.
- Claude P and Michel H . 1987. Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts sampled in French Polynesia [J]. Marine Geology , 77 : 109-119.
- De Carlo E H , McMurtry G M and Kim K H . 1987. Geochemistry of ferromanganese crusts from the Hawaiian Archipelago-I. Northern survey area [J]. Deep-Sea Research , 34(3) : 441-467.
- Exon N F , Raven M D and De Carlo E H . 2010. Ferromanganese Nodules and Crusts from the Christmas Island Region , Indian Ocean [J]. Marine Georesources and Geotechnology , 20 : 275-297.
- Frank M , Marbler H , Koschinsky A , Flierdt T , Klemm V , Gutjahr M , Halliday A N , Kubik P W and Halbach P . 2006. Submarine hydrothermal venting related to volcanism in the Lesser Antilles : Evidence from ferromanganese precipitates [J]. Geochim. Geophys. Geosyst. , 7(4) : 1-24.
- Gibbs A E , Hein J R , Lewis S D and McCulloch D S . 1993. Hydrothermal palygoskite and ferromanganese mineralization at a central California margin fracture zone [J]. Marine Geology , 115 : 47-65.
- Goddard D A , Thompson G , Jones E J W and Okada H . 1987. The chemistry and mineralogy of ferromanganese encrustations on rocks from the Sierra Lion Rise , equatorial mid-Atlantic ridge and New England seamount chain [J]. Marine Geology , 77 : 87-98.
- Halbach P and Puteanus D . 1984. The influence of the carbonate dissolution rate on the growth and composition of Co-rich ferromanganese crusts from Central Pacific seamount areas [J]. Earth and Planetary Science Letters , 68 : 73-87.
- Halbach P . 1986. Processes controlling the heavy metal distribution in Pacific ferromanganese nodules and crusts [J]. Geologische Rundschau , 75(1) : 235-247.
- Halbach P , Kriete C , Prause B and Puteanus D . 1989. Mechanisms to explain the platinum concentration in ferromanganese seamount crusts [J]. Chemical Geology , 76 : 95-106.
- Hein J R , Schwab W C and Dacis A S . 1988. Cobalt and platinum rich

- ferromanganese crusts and associated substrate rocks from Marshall Islands [J]. *Mar. Geol.*, 78 : 255-283.
- Hein J R and Morgan C L. 1999. Influence of substrate rocks on Fe-Mn crust composition [J]. *Deep-Sea Research I*, 46 : 855-875.
- Hein J R. 2000. Cobalt-rich ferromanganese crusts : Global distribution, composition, origin, and research activities, Polymetallic massive sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts Status and prospects [J]. *ISA Technical study*, 2 : 1-44.
- Hugh C J and Paul A W. 1999. Stratigraphy, paleoceanography, and evolution of cretaceous Pacific guyots : Relics from a greenhouse earth [J]. *American Journal of Science*, 299 : 341-392.
- Jeong K S, Jung H S, Kang J K, Morgan C L and Hein J R. 2000. Formation of ferromanganese crusts on northwest intertropical Pacific seamounts : Electron photomicrography and microprobe chemistry [J]. *Marine Geology*, 162 : 541-559.
- Jonguk K, Kiseong H, Hoi-Soo J, Jai-Woon M, Ki-Hyune K and Insung L. 2006. Southward shift of the Intertropical Convergence Zone in the western Pacific during the late Tertiary : Evidence from ferromanganese crusts on seamounts west of the Marshall Islands [J]. *Paleoceanography*, 21 : 1-14.
- Klemm V, Frank M, Levasseur S, Halliday A N and Hein J R. 2008. Seawater osmium isotope evidence for a middle Miocene flood basalt event in ferromanganese crust records [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 273 : 175-183.
- Koschinsky A and Halbach P. 1995. Sequential leaching of ferromanganese precipitates Genetic : Implications [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 : 5113.
- Kuhn T, Halbach P and Maggiulli M. 1996. Formation of ferromanganese microcrusts in relation to glacial/interglacial stages in Pleistocene sediments from Ampere Seamount (Subtropical NE Atlantic) [J]. *Chemical Geology*, 130 : 217-232.
- Manheim F T. 1986. Marine cobalt resources [J]. *Science*, 233 (4750) : 600-608.
- McMurtry G M, VonderHaar D L, Eisenhauer A, Mahoney J J and Yeh H W. 1994. Cenozoic accumulation history of a Pacific ferromanganese crust [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 125 (1-4) : 105-118.
- Michael B and Andrea K. 2009. Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide : Evidence from the distribution of rare earth elements and yttrium between Fe oxide and Mn oxide in hydrogenetic ferromanganese crusts [J]. *Geochemical Journal*, 43 : 37-47.
- Mitchell L, Jack D and Heath G R. 1977. Copper-Nickel-Enriched ferromanganese nodules and associated crusts from the Bauer basin, northwest Nazca Plate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 35 : 55-64.
- Murphy E, McMurtry G M, Kim K H and DeCarlo E H. 1991. Geochemistry and geochronology of a hydrothermal ferromanganese deposit from the North Fiji Basin [J]. *Marine Geology*, 98 : 297-312.
- Nath B N, Balaram V, Sudhakar M and Plüger W L. 1992. Rare earth element geochemistry of ferromanganese deposits from the Indian Ocean [J]. *Marine Chemistry*, 38 : 185-208.
- Prasad M S. 1994. Australasian microtektites in a substrate : A new constraint on ferromanganese crust accumulation rates [J]. *Marine Geology*, 116 : 259-266.
- Rajani R P, Banakar V K, Parthiban G, Mudholkar A V and Chodankar A R. 2005. Compositional variation and genesis of ferromanganese crusts of the Afanasy-Nikitin Seamount, Equatorial Indian Ocean [J]. *J. Earth Syst. Sci.*, 114 (1) : 51-61.
- Rehkamper M, Frank M, Hein J R, Porcelli D, Halliday A, Ingri J and Liebetrau V. 2002. Thallium isotope variations in seawater and hydrogenetic, diagenetic, and hydrothermal ferromanganese deposits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 197 : 65-81.
- Samantha P and Mike K W. 2007. The effect of environmental controls on the metal content in ferromanganese crusts and nodules from the Mozambique Ridge and in the Mozambique Basin, southwestern Indian Ocean [J]. *South African Journal of Geology*, 110 : 295-310.
- Smith J D and Burton J D. 1972. The occurrence and distribution of tin with particular reference to marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36 : 621-629.
- Suave R L E, Pichocki C, Pautot G, Hoffert M, Morel Y, Voisset M, Monti S, Amosse J and Kosakevitch A. 1989. Geological and Mineralogical study of Co-rich ferromanganese crusts from a submerged atoll in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia) [J]. *Marine Geology*, 87 : 227-247.
- Szefer P, Glasby G P, Kunzendorf H, Gorlich E A, Latka K, Ikuta K and Ali A. 1998. The distribution of rare earth and other elements and the mineralogy of the iron oxyhydroxide phase in marine ferromanganese concretions from within Slupsk Furrow in the southern Baltic [J]. *Applied Geochemistry*, 13 : 305-312.
- Takahashi Y, Manceau A, Geoffroy N, Marcus M A and Akira U. 2007. Chemical and structural control of the partitioning of Co, Ce, and Pb in marine ferromanganese oxides [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 : 984-1008.
- Takashi I, Akira U, Yoshimichi K and Takanori N. 1998. Strontium isotopic compositions and paleoceanographic implication of fossil manganese nodules in DSDP/ODP cores, Leg 1-12 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (9) : 1545-1554.
- Wen X, De Carlo E H and Li Y H. 1997. Interelement relationships in ferromanganese crusts from the central Pacific ocean : Their implications for crust genesis [J]. *Marine Geology*, 136 : 277-297.
- Xavier A. 1982. Ferromanganese deposits off northeast Brazil (S. Atlantic) [J]. *Marine Geology*, 47 : 87-99.