

东太平洋 CC 区多金属结核矿物学特征及物源

李国胜^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 通过对东太平洋 CC 区洋底地质取样及实验测试分析, 运用洋底照相、多频探测等多种地球物理方法手段, 进一步阐明了 CC 区多金属结核的形态、主要类型、化学成分及分布特征。通过对 CC 区沉积作用、生物作用、洋底火山作用、海水化学成分、南极底流等因素的综合研究分析, 进一步揭示了多金属结核形成的物质来源。通过对 CC 区区域地质背景及地形地貌的综合研究分析, 进一步探讨了多金属结核的形成环境, 并建立了成矿模式。

关键词: 多金属结核; 矿物学特征; 物源; 东太平洋 CC 区

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2009)06-0613-07

东太平洋 CC 区位于夏威夷群岛东南海域, 中心距希洛港约 1 140 km, 距火奴鲁鲁港约 1 390 km, 其地理坐标大致为 $8^{\circ}52.5' \sim 11^{\circ}22.5'N$, $151^{\circ}7.5' \sim 153^{\circ}22.5'W$ (图 1), 区内面积约 35 150 km²。长期以来, 国内外很多学者都在该区进行了大量调查研究, 并取得了诸多研究成果, 但这些成果主要集中在

对多金属结核形态与类型的描述及丰度品位与资源量大小的评估上, 而对多金属结核的物源及形成环境研究较少, 尤其物源方面颇具争议。因此, 笔者试图从东太平洋 CC 区多金属结核的外部形态、主要类型、化学成分及沉积物的类型、矿物成分、地球化学元素、生物作用、洋底火山作用、海水化学成分、

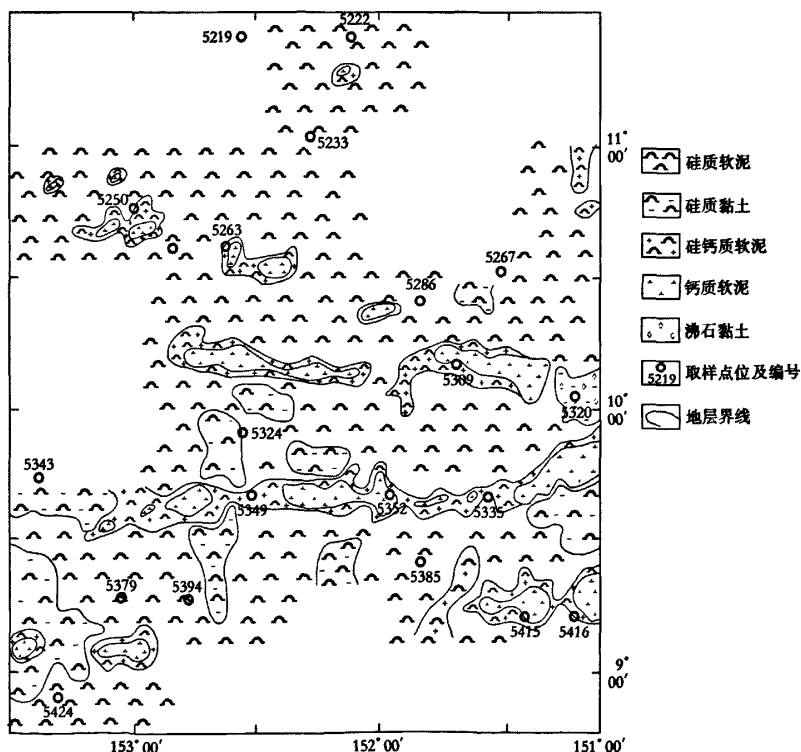


图 1 沉积物类型分布示意

区域地质背景及地形地貌等方面研究入手,进一步探讨多金属结核的物源及形成环境。

1 洋底沉积物样品的采集与测试方法

东太平洋 CC 区洋底表层沉积物的样品主要由广州海洋地质调查局海洋四号船使用无缆抓斗、大洋 50 型有缆抓斗、MYZ 型箱式取样器、拖网等多种采样方式获得,多金属结核样品是利用美国 Benthos 公司生产的 4201 型自返式抓斗及拖网采集的。沉积物样品的岩性、矿物成分、古生物化石、地球化学元素由广州海洋地质调查局实验测试中心进行了鉴定分析。多金属结核的生物地层学研究方法是将结核用钢锯沿中心锯开,一半保存,另一半取样。先用肉眼对结核的外形及内部结构进行描述,然后自核心向外逐层取样。选取其中部分样品进行测试分析,如显微镜下观测、X 荧光光谱分析、化学成分分析、光谱分析、X 射线衍射分析、透射电镜分析及穆斯堡尔谱分析等。多金属结核的元素分析采用我国大洋规范及国家标准 GSDN 进行监控,合格率为 100%,各项元素的标准偏差均小于 0.121%。仪器

测量精度由多次测量国家标准物质样品(GSD9、GSD10、GSS1 和 GSS8)控制,其中常量元素的测试精度低于 1.16%,微量元素的测量精度低于 2.96%。沉积物中 CaCO_3 含量使用体积法测量,多次重复测量的精度低于 2%。同时采用 GBW-07313、GBW-07314 海洋沉积物标样作为样品分析的质量监控样。

2 多金属结核的矿物学特征

2.1 外表形态

CC 区多金属结核主要为黑褐色、黑色。外形有连生体、椭球状、球状、盘状、板状、菜花状、碎屑状、杨梅状等,以连生体为主。连生体结核个体的形态多样,以椭球状、球状及不规则状居多,个体数从两三个到七八个不等。CC 区的菜花状结核,其顶面瘤状凸起不甚发育,外形酷似菜花。杨梅状结核在本区很少见,主要见于低丘地区。结核的大小从数厘米到十几厘米不等,最小的结核不到 1 cm,个别结核可达 50 cm,以 3~6 cm 的中小型结核最为多见(表 1)。

表 1 多金属结核矿物的主要特征

形态	大小	类型	化学元素	矿物成分	核心物质
球状	中一小型	光滑—粗糙	$w(\text{Fe})$ 为 12.90%; $w(\text{Mn})$ 为 22.70%; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 1.56%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	沸石、磷灰石、蒙脱石、蚀变火山岩
椭球状	中型为主	光滑—粗糙 粗糙—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 22.87%~29.07%; $w(\text{Fe})$ 为 5.21%~8.96%; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 2.2%~2.92%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	沸石化硅质黏土及硅质软泥、老核碎块、沸石黏土等
连生体状	大一中型	光滑—粗糙 粗糙—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 17.99%~27.10%; $w(\text{Fe})$ 为 8.69%~15.82%; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 1.46%~2.24%	水羟锰矿为主, 次为矿锰矿	火山岩碎块、沸石化沉积物团块、老核碎块
碎屑状	大一小型	光滑 光滑—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 15.49%~23.70%; $w(\text{Fe})$ 为 8.08%~15.33%; $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})$ 为 1.49~1.92; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 1.41%~1.622%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	火山岩碎块、沸石团块、沸石化沉积物团块、磷酸盐
板状	大一小型	光滑—粗糙 粗糙—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 11.29%; $w(\text{Fe})$ 为 7.18%; $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})$ 为 1.57; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 1.14%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	沉积物、鱼牙
盘状	大一中型为主, 小型次之	光滑—光滑 光滑—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 23.75%~27.56%; $w(\text{Fe})$ 为 6.60%~12.19%; $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})$ 为 1.99~4.18; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 1.94%~2.88%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	火山岩碎块、沉积物、老核碎块
菜花状	大一小型	光滑—粗糙 粗糙—粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 24.28%~28.67%; $w(\text{Fe})$ 为 5.31%~7.10%; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 2.37%~3.20%	水羟锰矿为主, 次为钙锰矿	老核核心居多,次为铁锰物质、沸石化沉积物、沸石团块、磷酸盐团块
杨梅状	小型	粗糙	$w(\text{Mn})$ 为 24.51%~28.96%; $w(\text{Fe})$ 为 4.03%~5.91%; $w(\text{Cu}) + w(\text{Co}) + w(\text{Ni})$ 为 2.67%~3.06%	钙锰矿多于水羟锰矿	火山岩碎块、沸石、沸石化沉积物

注:大于 6 cm 为大型结核;3~6 cm 为中型结核;小于 3 cm 为小型结核。

2.2 主要类型

研究表明,CC 区多金属结核共有 18 种类型,常

见有(顶面—底面)光滑—光滑型、粗糙—粗糙型及光滑—粗糙型,其中光滑—光滑型、光滑—粗糙型多

见于中小型连生体结核,是 CC 区内主要的表面结构类型;而大型菜花状、盘状及碎屑状结核多为光滑—粗糙型。

2.3 矿物组分

根据 CC 区结核样品的镜下观察,多金属结核的核心物质主要有:沸石团块、磷灰石、蒙脱石、蚀变玄武岩、老结核碎块(铁锰质)、鱼骨、铁锰矿物及黏土等。矿物组分通过 X 射线衍射分析、红外光谱分析、穆斯堡尔谱分析及透射电镜分析结果表明:结核内以水羟锰矿($\delta \sim \text{MnO}_2$)、钙锰矿(钡锰矿)为主,次为钙十字沸石、蒙脱石、水云母、石英、金红石、磷灰石等。

2.4 化学元素

用 X 荧光光谱分析测定了 208 个结核样品的化学成分,结果表明多金属结核的主要组成元素为 Mn、Fe、Si、Al、Mg、Na、K、Ca 等,其中 Mn、Fe 的含量约占多金属结核全部元素含量的 47% 以上,说明 Mn、Fe 是多金属结核的主要组成元素。Si、Al、Na、K、Ca、Mg 含量约占 33%,揭示其组成元素的多元化。微量元素主要为 Ba、Ce、As、Sr、Y 等,含量较小。研究表明^[1],Mn 与 Cu、Ni 为较好的正相关关系,说明三者之间的相关性好,元素之间的亲合力及吸附力强,对多金属结核的形成十分有利。

3 物质来源

3.1 沉积作用对多金属结核形成的影响

多金属结核主要赋存于洋底表层沉积物之中,

表 2 东太平洋 CC 区表层沉积物的物质成分 %

站号	沉积物名称	黏土矿物	硅质生物	钙质生物	鱼骨	石英	微结核
5219G	硅质软泥	35	65				+
5222G	硅质软泥	45	65		+	+	V
5233G	硅质软泥	35	65			+	+
5250G	硅质软泥	45	55	V	+	+	Δ
5263G	硅质软泥	5	95		+		V
5270G	硅质软泥	49	50		+	+	
5286G	硅质黏土	87	13			+	V
5309G	钙质软泥	2		98			
5324G	硅质软泥	50	50			V	+
5320G	硅质软泥	55	45			V	+
5343G	硅质软泥	30	70	+		+	+
5349G	硅质钙质软泥	10	15	75			+
5352BC	硅质钙质软泥	10	35	55			V
5355BC	硅质软泥	40	60	+		+	
5379BC	硅质软泥	25	75		+	+	+
5385BC	硅质软泥	30	70			V	
5394BC	硅质软泥	35	65		+		
5415BC	含钙硅质软泥	33	60	7			
5424BC	硅质软泥	25	75		+	Δ	
5452BC	硅质黏土	76	20	+	+	+	4
5267PC	硅质软泥	49	50		+	V	1

注:表中标出值为每百克样品的含量;+表示 1~10 颗,V 表示 11~100 颗,Δ表示 101 颗以上。

是特定地质条件下特殊的地质作用产物。因此研究本区沉积物的类型及物质成分,对恢复当时的古地理环境、研究大洋多金属结核的物源十分必要。

3.1.1 沉积物类型及物质成分

在选择 21 个站位样品中,硅质软泥占 15 个,达 70% 以上。分析研究表明:沉积物主要有五种类型,即硅质软泥、硅质黏土、硅钙质软泥、钙质软泥及沸石黏土,其中硅质软泥广泛分布在 CC 区的丘陵和平原地区,水深约在 5 km 以上(见图 1)。

对洋底表层沉积样品的鉴定测试结果表明(表 2);其物质组分主要为黏土矿物、碎屑矿物、自生矿物、硅钙质生物、微结核等。

3.1.2 沉积物对多金属结核形成的影响

通过不同沉积物类型与地质取样的资料统计分析(表 3)可知:多金属结核的形成与沉积物类型有很大关系,其中硅钙质软泥及含钙硅质软泥中多金属结核的平均丰度最高(8.4 kg/m²),其次是硅质黏土与钙质软泥(7.3 kg/m²)。硅质软泥与沸石黏土中丰度为最低,平均丰度分别是 4.5 kg/m² 或 4.8 kg/m²,说明不同的沉积物类型,结核丰度差异很大,多金属结核丰度与表层沉积物类型关系密切,揭示沉积物的不同类型是构成多金属结核的重要物源之一,硅钙软泥及含钙硅质泥、硅质黏土、钙质软泥对多金属结核形成十分有利,而硅质软泥及沸石黏土对多金属结核的形成欠佳。深海沉积物中 Fe、Mn 的含量很高,其中 Fe 的含量为 58 000 × 10⁻⁶,说明深海沉积物中富含形成多金属结核的主要元素。

表 3 不同沉积物类型多金属结核的平均丰度

沉积物类型	平均丰度/(kg/m ²)
硅质软泥	4.5(138)
钙质软泥	7.3(27)
硅质黏土	7.3(30)
沸石黏土	4.8(4)
硅钙软泥及含钙硅质泥	8.4(20)

注:括号中为地质取样站位统计数。

3.2 洋底火山作用对多金属结核形成的影响

本地区受火山活动的影响较大,频繁的火山活动不仅给洋底沉积提供了丰富的物源,为多金属结核的形成提供了金属组分和核心物质,而且也多为金属结核的形成创造了极为适宜的地形地貌环境。

3.2.1 火山物质的形态及化学成分

由样品的分析测试结果可知,在所取样品中各种火山物质及其蚀变后的产物出现的频率较高,主要产出形态有沸石、玄武岩块、基性斜长石、蒙脱石、橙玄玻璃、浮岩块及火山碎屑。对玄武岩样品的常量、微量元素化学分析(表 4)表明:玄武岩中的主要

表 4 玄武岩常量元素含量

%

元素氧化物	取样站位								
	5312	5289	5359-1	5359-2	5352	5450	5336	5435	5307
SiO ₂	45.32	45.39	44.74	45.78	43.79	44.33	48.40	63.59	44.17
TiO ₂	1.13	1.14	0.87	0.98	1.04	1.28	0.75	0.39	1.17
Al ₂ O ₃	19.40	19.34	17.09	19.49	18.40	19.30	12.12	12.06	19.06
FeO	0.08	0.07	0.53	0.90	0.13	0.13	-	1.02	0.08
MnO	12.64	12.76	10.88	11.44	12.44	13.80	4.64	2.53	13.04
CaO	0.93	1.26	1.35	0.70	0.93	0.48	4.71	0.54	2.09
MgO	8.38	8.15	10.47	10.17	9.89	7.65	1.72	3.30	7.82
K ₂ O	1.68	1.53	5.03	2.22	2.41	1.44	1.90	1.20	1.46
Na ₂ O	1.29	1.42	0.51	1.22	0.77	1.65	4.38	1.08	1.34
P ₂ O ₅	3.35	3.30	3.06	3.06	3.22	3.19	3.06	5.88	3.06

元素氧化物为 SiO₂、Al₂O₃、MnO、MgO、P₂O₅ 等,微量元素主要为 Cr、Co、Ni、Zn、Pb。玄武岩中的主要常量元素氧化物与前述多金属结核中的元素组成基本相同,说明玄武岩的喷溢与海解是多金属结核形成的重要物质来源。在多金属结核核心物质中^[1],火山物质核心包括玄武岩、火山岩风化蚀变产物和浮岩,约占 31.5%,揭示火山物质与多金属结核的形

成关系密切。

3.2.2 洋底火山作用对多金属结核形成的影响

通过对东太平洋海盆沉积物中火山物质、洋底海山玄武岩和浮岩与多金属结核中组成物质的对比研究,可以发现火山活动对多金属结核的形成有很大的影响,对其分布起着重要的控制作用。

由表 5 显见,洋底热液矿石中的 Fe、Mn 的含量

表 5 海洋沉积物中 Fe、Mn、Co、Ni、Cu、Zn 含量对比

10⁻⁶

元素	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	w(Fe)/w(Mn)
深海沉积物	58000	7600	78	100	240	130	7.64
多金属结核	125000	186000	2700	8000	6600	1100	0.67
多金属结核壳	165000	216000	6300	4500	1200	660	0.76
洋底热液	78	48	0.0078	-	-	-	1.62
洋底热液矿石	116000	273000	23	-	-	-	0.45
海水—玄武岩反应之热液(400℃,100MPa)	20.83	10.51	-	-	0.92	5.92	1.98
海山玄武岩		4858	59.5	55	242	209	-
多金属结核玄武岩核心		15830	120.6	1250	702	201	-

注:据文献[1]修改。

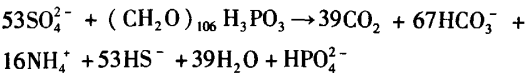
很高,说明洋底热液矿石能为多金属结核的形成提供充足的物源。数量众多的玄武岩核心物质主要来自区内的海山、海丘,以玄武岩为核心的多金属结核也主要分布在这些地方,说明二者之间有非常相近的亲缘关系。尤其是区内构成海山海丘的玄武岩与多金属结核核心(见表 1)的玄武岩在矿物组成、化学成分诸方面极为相似,推断应为同宗同源。可见 CC 区洋底如果没有大量玄武岩的存在与供给,就很难形成海山区高丰度的多金属结核。同时,正因为玄武岩本身在外力作用下剥蚀、风化,直接参与多金属结核的形成,所以玄武岩类核心也影响了结核的形态特征,比如海山区风化破碎玄武岩,多呈棱角状或次棱角状,没有经过长距离搬运,未曾磨圆,由此形成的结核也以碎屑状为主,少数为椭球状、球状、板状、连生体状等,个体一般都较小。

此外,据康长生等^[1]的实验研究,玄武岩在高温下海解亦可以为多金属结核提供重要的物源。在海水—玄武岩反应试验(400~500℃、100 MPa)中,玄武岩中 Fe 被淋滤出 1%~2%,Mn 为 70%,Cu、

Zn、Pb 为 100%,由此粗略推算,1 km³ 范围内 500℃热液可含铁 30 万吨,锰为 2 万吨,锌为 1 万吨,铜为数千吨,海水、玄武岩作用析出的金属量很大。由此看来,火山活动不仅能为多金属结核的形成创造环境因素(如地形地貌及加速底流流动),亦能为多金属结核的生长提供主要的物源。

3.3 生物作用对多金属结核形成的影响

CC 区沉积物中含丰富的生物化石,主要种类有放射虫、硅藻及有孔虫等。生物作用对多金属结核的形成有相当大的影响。生物死亡后,随着生物碎屑下沉,在深层水中受分解而重新进入海水,未分解部分则加入洋底沉积物。研究表明^[2],海洋生物软组织中,C、N、P 的存在形式为(CH₂O)₁₀₆H₃PO₃。在深层水中,由于受 SO₄²⁻ 的细菌还原作用,磷酸根离子从有机质中被分离出来,反应式为:



经过氧化沉淀—还原活化—再氧化沉淀—再还原活

化,……,逐步搬运到远洋沉积,从而为多金属结核的形成提供大量成矿物质,多金属结核中 P、Ca、Mn、Mg 等元素的获取,主要是生物作用的结果。

3.4 南极底流对多金属结核形成的影响

CC 区南极底流比较活跃,据黄永祥^[3]研究,第四纪南极底流溶解能力相当强,在其流经通道上形成强氧化环境,CO₂ 含量高,CCD 界面上升,大量生物溶解,促使生物中吸附的大量成矿金属组分释放,为多金属结核的形成提供了充足的物源。同时,底流作用造成沉积间断和沉积速率变缓,对多金属结核的形成十分有利。底流有强烈冲蚀作用,可使结核免遭埋藏,有利于结核生长与富集。

表 6 东太平洋 CC 区表层沉积物常量元素的相关系数 %

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
SiO ₂	1.000									
Al ₂ O ₃	0.897	1.000								
Fe ₂ O ₃	0.910	0.981	1.000							
CaO	-0.986	-0.947	-0.957	1.000						
MgO	0.934	0.907	0.941	-0.955	1.000					
K ₂ O	0.863	0.975	0.958	-0.923	0.882	1.000				
Na ₂ O	0.781	0.772	0.751	-0.836	0.769	0.787	1.000			
MnO	0.436	0.392	0.510	-0.465	0.547	0.332	0.330	1.000		
P ₂ O ₅	0.465	0.388	0.506	-0.484	0.553	0.331	0.395	0.894	1.000	
TiO ₂	0.189	0.243	0.184	-0.223	0.194	0.214	0.484	-0.068	-0.078	1.000

Al₂O₃、TiO₂、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、P₂O₅、MnO,微量元素为 B、Cr、Mo、Ni、Co、V、Sr、Ba、Pb、Zr、Cu、Zn、Li、Rb 等。由比较可知,东太平洋洋底表层沉积物中的常量元素成分与多金属结核的化学元素组成极为相近,微量元素亦大致相同,说明沉积物是多金属结核形成的主要物源之一。

4.2 元素的相关性

由表 6 可知,MnO 与 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O 常量元素氧化物之间存在明显的正相关关系,说明这些元素氧化物的内在关系较为密切,相关性好,亲和力强,并在适宜条件下极易相互结合。MnO 与 CaO 为明显的负相关关系,说明与二者内在关系比较疏远。TiO₂、P₂O₅ 为正相关关系,但相关系数较小,说明其相关性不大。表层沉积物中的地球化学元素与多金属结核的组成元素、化学成分基本相同,说明沉积物对多金属结核的形成有很大影响及控制作用。

4.3 元素的组合特征

为了更好地揭示表层沉积物中元素的组合特征及成因背景,笔者对 21 个站位沉积物的常微量元素进行了 R 型因子分析。提取大于 1 的特征值,按最大方差法进行了因子旋转,并剔除有缺值的观测量,最后得到 4 个主因子,其方差贡献占总方差贡献率

4 讨论

综上所述,东太平洋洋底多金属结核是 Mn、Fe、Si、Al、Cu、Ni、Co 等多种元素的集合体。研究这些元素的来源,对揭开多金属结核形成的神秘面纱十分必要。由于洋底沉积物是多金属结核形成发育的温床,笔者从洋底表层沉积物的地球化学成分、元素组合特征研究作为切入点,进而探讨沉积物及元素的物源情况。

4.1 主要组成元素

对洋底表层沉积物的化学成分分析表明,东太平洋表层沉积物常量元素氧化物主要有 SiO₂、Fe₂O₃、

的 85.97%,说明该因子分析能说明整个样品的数据变化情况,比较客观地表明了沉积物的来源及成

表 7 东太平洋 CC 区表层沉积物元素因子分析

公因子	F1	F2	F3	F4
SiO ₂	0.935	0.185	0.087	0.018
Al ₂ O ₃	0.961	0.162	0.064	-0.035
Fe ₂ O ₃	0.943	0.283	0.025	0.013
CaO	-0.951	-0.228	-0.115	0.036
CaCO ₃	-0.948	-0.223	-0.115	0.040
MgO	0.907	0.300	0.080	0.026
K ₂ O	0.947	0.106	0.092	-0.068
Na ₂ O	0.733	0.226	0.398	-0.416
MnO	0.281	0.908	-0.009	0.188
P ₂ O ₅	0.276	0.861	0.206	0.165
TiO ₂	0.243	-0.040	0.005	-0.823
Cu	0.042	0.785	0.033	-0.093
Co	0.717	0.514	-0.133	0.362
Ni	0.162	0.945	0.088	0.112
Pb	0.373	0.298	0.174	0.561
Cr	0.772	-0.122	-0.348	0.103
Sr	-0.915	-0.215	-0.080	0.011
Zn	0.495	0.581	0.373	-0.175
Zr	0.703	0.440	0.256	-0.074
Ba	0.071	0.139	0.924	0.093
特征值	9.816	4.436	1.497	1.445
特征值/%	49.080	22.179	7.487	7.225
累计特征值/%	49.080	71.259	78.746	85.971

因上的专属性。

由表 7 分析可见: F_1 因子主要代表了陆源碎屑沉积组合, 并受到了生物作用和火山热液活动的较大影响; F_2 、 F_3 因子则主要与生物作用和火山热液活动密切相关; F_4 因子主要代表了火山活动的成因。R 型因子分析表明, 表层沉积物的化学成分主要以火山热液活动及火山玄武岩海解提供的物源为主, 并有大量的陆源碎屑沉积及生物参与共同作用的结果。

5 形成机理与研究意义

5.1 形成机理

太平洋新生代板块构造运动和后期火山活动, 使东太平洋洋壳增生, 形成了 CC 区地形地貌轮廓, 确立了区域构造格局。CC 区一带南北为克拉里昂断裂带和克里帕断裂带, 中间为广阔的深海海山丘陵, 这种特定的地形、水深为多金属结核的形成提供了有利于成矿的地质场所。由于区域地质背景的影响, 断裂构造发育, 火山活动比较频繁、强烈, 导致大量玄武岩浆的多次喷溢与海解, 洋底扩张, 使洋中脊不断释放金属元素, 玄武岩和火山岩蚀变产物经

侵蚀淋滤不断释放出金属组分, 火山活动也使洋底岩石沉积并发生破碎, 产生岩石碎块和泥团, 所有这些都为结核的形成提供了丰富的成矿金属组分和大量核心物质。CC 区第四纪时洋底海水的 pH 值为 7.72~8.18, E_h 为 366~535 mV, 底层水温为 2℃, 说明当时主要为低温、碱性—弱碱性的氧化环境, 该区位于太平洋赤道高生物生产力带的北侧, 极适宜放射虫、硅藻等生物种群繁育, 大量生物死亡、沉积和溶解, 亦为多金属结核的形成提供了重要物源。

CC 区由于沉积作用、生物作用、洋底火山作用、海水化学成分、南极底流等多种方式和渠道为多金属结核的形成提供了充足的物源, 这些物源中的 Fe、Mn 离子由于氧化作用在海水中的一低含氧带首先形成水合氧化物胶体, 这些水合氧化物胶体在下沉过程中, 由于 Mn 与 Cu、Ni 等金属元素为较好的正相关关系, 元素之间的相关性好, 亲合力强, 在吸附作用下不断吸附达到饱和状态的 Co、Ni、Cu、Zn、Pb 等离子到其表面, 逐步形成多金属结核的雏形。在生物、洋流等诸多因素的作用与影响下, 多金属结核的雏形在平缓的海山斜坡及粗糙的玄武岩基底开始生长发育, 并逐步形成矿藏(图 2)。

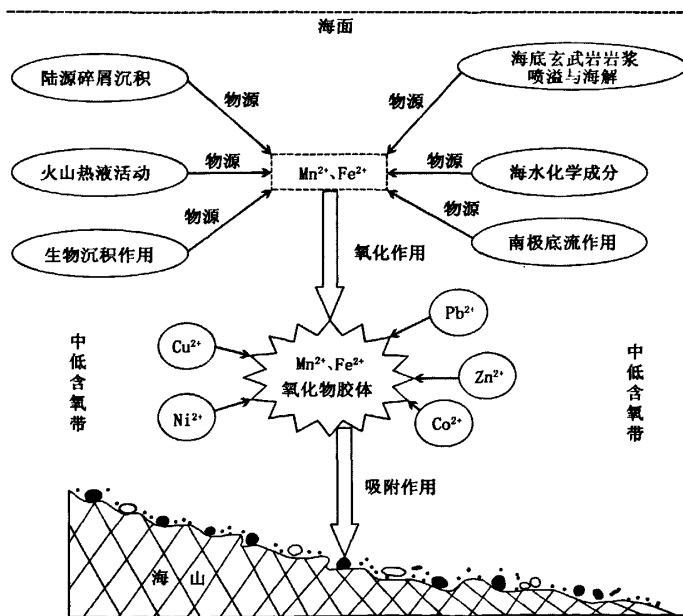


图 2 CC 区多金属结核形成模式示意

5.2 研究意义

太平洋多金属结核富含 Mn、Cu、Co、Ni、Zn 等多种有用金属元素, 是潜在的深海矿产资源。据 Mero^[4] 计算, 全世界大洋底多金属结核的资源量约在 2~3 万亿吨, 仅太平洋就有 1.7 万亿吨, 其中约

有 540 亿吨干结核含 6.5 亿吨镍、5.2 亿吨铜、1.15 亿吨钴和 100 亿吨锰。其储量之大, 令世人注目。

随着全球工业化进程的飞速发展和日新月异, 当今世界对矿产资源的需求也与日俱进。随着陆地金属矿产的大量消耗与枯竭, 世界各国不得不

把目光由陆地转向海洋。21 世纪是海洋的世纪,研究开发海洋矿产资源,造福全人类已成为全世界人民的强烈愿望和发展趋势。而要开发和利用海洋矿产资源,就必须了解和掌握洋底多金属结核的类型、丰度、品位、覆盖率及富集规律与分布特点,了解和掌握多金属结核形成的洋底地形地貌、沉积物特征、火山活动等情况。因此,深入研究 CC 区多金属结核的分布特征及物质来源,对于进一步探讨多金属结核的形成机制,为多金属结核资源评价和开发提供科学依据,大力开发与利用洋底多金属矿产资源,将造福全人类,功德无量,具有重要的科学意义和经济意义。

6 结论

综上所述,东太平洋 CC 区多金属结核的形成主要取决于两个关键因素,即充足的物源供给及适宜的成矿环境。由于受内外动力地质作用的影响,本区沉积物类型多样,放射虫、硅藻等生物种群繁荣,火山热液活动频繁,海水中 Fe、Mn、Cu、Al、Co 等金属元素丰富,南极底流发育,所有这些因素都为多

金属结核的形成提供了充足的物质来源。走向东西的克拉里昂断裂带和欧罗兹利断裂带奠定了本区的基本地质构造和地形地貌轮廓,平缓的海山链斜坡,粗糙的玄武岩基底,海水中发育稳定的中—低含氧带,沉积物缓慢的沉积速率为多金属结核的形成创造了非常适宜的成矿环境,因此,笔者认为东太平洋 CC 区多金属结核的形成是沉积作用、生物作用、洋底火山作用,海水化学成分、南极底流、地形地貌、区域地质构造等因素综合作用的结果。

参考文献:

- [1] 康长生,刘玉山,梁德华,等. 火山活动与多金属结核分布的关系[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [2] 韩建修,李学杰,崔建秋,等. 古海洋环境与多金属结核形成的关系[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [3] 黄永祥. 多金属结核的分布规律[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [4] Mero J L. The Mineral Resources of the Sea[M]. Amsterdam: Elsevier,1965.
- [5] 何高文,薛婷. 西太平洋富钴结壳元素组合特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2005,24(2).

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS AND MATERIAL SOURCE OF POLYMETALLIC NODULES IN CC AREA OF EAST PACIFIC

LI Guo-sheng^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on submarine geological sampling in CC area of East Pacific and using such geophysical methods as the experimental analysis of photographs and the multi-frequency detection, this paper deals with main types, abundance and coverage, taste, chemical composition and distribution of nodules in CC area. Based on studying such factors as sedimentation, biological function, submarine volcanoes, chemical composition and Antarctic waters, the authors revealed the material source of the nodules. According to an integrated analysis of the geological background and the landform, this paper further discusses the formation environment of the nodules. On such a basis, a metallogenic model has been established.

Key words: polymetallic nodules; mineralogical characteristics; material source; CC area in East Pacific

作者简介: 李国胜(1958-),男,高级工程师,河南省兰考县人,1982年毕业于原煤炭工业部焦作矿业学院,博士,专长地球化学、沉积学、古生物学,公开发表论文 20 余篇。