

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

东太平洋 CC 区多金属结核物质来源和分布规律

张富元¹⁾ 杨群慧²⁾ 殷汝广³⁾ 何高文⁴⁾ 章伟艳¹⁾ 王 英¹⁾

1) 国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州, 310012; 2) 青岛海洋大学地球科学系, 266003

3) 国家海洋信息中心, 天津, 300171; 4) 国土资源部广州海洋地质调查局, 510760

内容提要 对东太平洋 CC 区 (Clarion-Clipperton Zone) 多金属结核丰度、品位、多波束地形测量、深拖光学覆盖率探测、地震勘探等一系列调查资料综合研究表明: ①东区和西区结核在其化学成分和形态上有差异, 但是聚类分析结果表明不能按区域断然分开; ②因子分析得出东、西两区结核 4 种主因子是 Mn 组元素 Mn、Cu、Ni、Zn, Fe 组元素 Fe、Co、Ti、Sr, 岩源组元素 Si、Al、K, 生物元素 Ca、P; ③西区结核成矿物质主要来源于上覆海水中金属元素的化学沉淀, 火山成矿作用使结核富集和丰度增加, 趋势面和人工神经网络分析表明结核主要分布在海底坡度 $\leq 5^\circ$ 地区, 该地区的结核量占总结核量的 89.62%, 坡度 $> 5^\circ$ 地区结核量占 10.38%; ④东区结核丰度、覆盖率、地形三者变化一致, 重大相变距离为 10~15km, 来自地幔成矿物质通过玄武质洋壳裂隙和断层, 为多金属结核的形成和生长提供了丰富的物质来源, 地球深部地质作用过程如基底岩浆房活动可能对结核分布产生重要影响; ⑤东太平洋 CC 区多金属结核矿带的形成应归于海底板块扩张活动的一种资源效应和经后期表生地质作用改造的结果。

关键词 东太平洋 多金属结核 物质来源 分布规律

大洋多金属结核物质来源和分布规律研究, 由于其科学意义和资源价值所在, 自 60 年代全球开展大规模多金属结核资源调查以来从未中断过 (萧绪琦等, 1992; 阎葆瑞等, 1992; 阎葆瑞等, 1998; 陈建林等, 2001; 李志昌等, 2001), 早期利用为数不多的定点采样推测结核分布, 以为洋底到处布满高丰度结核。70 年代随着测量资料的积累使人们认识到早期乐观估算的结核资源量显然与实际不符, 结核主要富集在面积有限的东太平洋 CC 区 (Clarion-Clipperton Zone, 北纬 $5^\circ \sim 20^\circ$ 、西经 $110^\circ \sim 158^\circ$)。随着“深海采矿先驱投资者”国家和财团对各自拥有的多金属结核矿区 (金建才, 1989) 的详细调查研究, 才正确认识到结核分布十分复杂, 定性描述已难以说明其变化规律。本文采用多种数学方法对结核丰度、品位变化定量分析, 并结合高精度多波束地形测量和深拖勘探资料, 研究多金属结核物质来源和分布规律。

1 采样区基本地质特征

研究区位于东太平洋 CC 区西部, 分东区和西区两部分 (图 1)。CC 区的北界是克拉里昂转换断

层, 南界是克立伯顿转换断层, 东部以东太平洋洋脊的山麓为界, 西界则是莱恩山脉, 面积约 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。研究区西区平均水深 5000m, 沉积物以硅质粘土为主, 沉积层从几米到 170 m, 火山碎屑发育, 海山链规模宏大和孤立海山林立。东区主要是深海丘陵区, 平均水深 4900 m, 沉积物类型为硅质粘土, 沉积层 0~150 m, 基底起伏大, 海山少, 断裂和沟槽地形发育。大洋多金属结核形态千变万化, 种类繁多。国内外学者主要根据结核形态、大小、表面结构等参数, 将结核划分为光滑型和粗糙型两种。光滑型结核为沉积成因, 结核由底层水中 Fe、Mn 胶状氧化物的直接沉淀生成, 以葡萄状、多核和连生体状为主, 具有表面光滑特征, 主要由 $\delta\text{-MnO}_2$ 组成, 结核中富含 Fe、Co, 与非晶质的氢氧化铁紧密共生, 结核丰度高 ($5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$), 品位较低 ($\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni}$ 1.5%~2.5%)。西区以光滑型结核为主, 结核粒径为 1~20 cm, 平均粒径 4.22 cm; 粗糙型结核为成岩成因, 整个结核被表层沉积物埋没, 是早期成岩作用产物, 具有粗糙球粒状表面, 通常为单核、椭球状、盘状和球状等形状, 结核丰度低 ($3 \sim 7 \text{ kg/m}^2$), 但富含 Mn、Ni、Cu 等金属, 因此品位较高 ($\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni}$ 2.0%~

注: 本文为中国大洋矿产资源研究开发协会“九五”重大项目 (编号 DY95-02-07) 的研究成果。

收稿日期: 2000-09-02; 改回日期: 2001-07-16; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 张富元, 男, 1952 年生。现任国家海洋局海底科学重点实验室、国家海洋局第二海洋研究所研究员。从事海洋地质研究和海洋矿产资源评价。通讯地址: 310012, 杭州西溪河下 9 号, 国家海洋局第二海洋研究所; 电话: 0571-88076924-2556; Email: LDzhang@mail.hz.zj.cn。

3.0%)。东区以粗糙型结核为主,结核粒径 1~16 cm,平均粒径 6.02 cm。

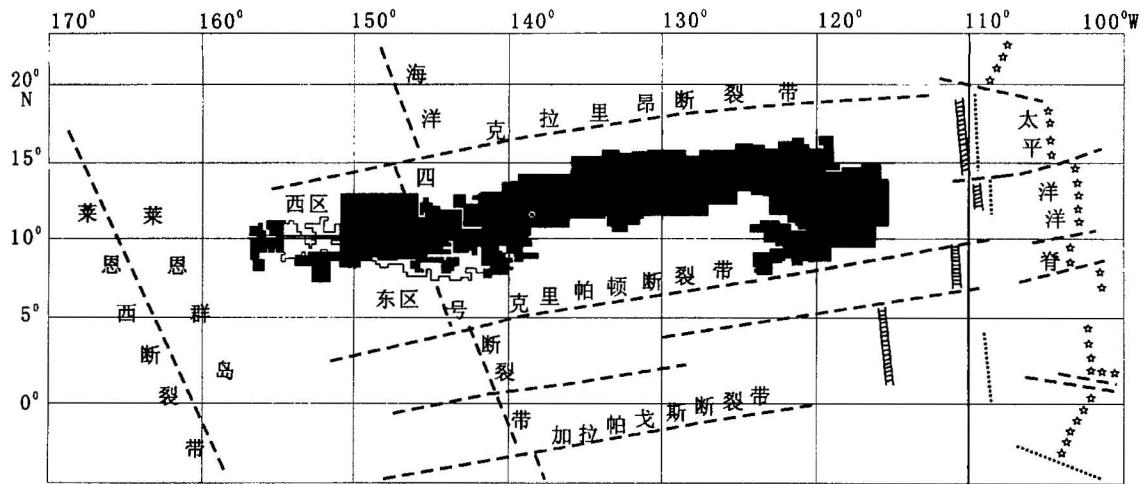


图 1 东太平洋多金属结核矿带-构造略图

Fig. 1 Polymetallic nodule distribution zone in the eastern Pacific Ocean

表 1 东区多金属结核化学成分

Table 1 Chemical components of polymetallic nodules from the eastern study area

样号	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Ba	Sr	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅
	(%)					(×10 ⁻⁶)			(%)						
1	4.43	32.81	0.17	1.48	1.08	2197	502	1649	11.83	4.23	1.12	1.90	3.23	0.61	0.32
2	4.54	30.63	0.18	1.50	1.19	3674	551	1601	14.70	4.78	1.11	2.11	3.37	0.60	0.31
3	4.38	30.98	0.17	1.57	1.14	2885	528	1592	15.02	4.97	1.11	2.05	3.24	0.59	0.31
4	4.99	31.52	0.23	1.30	1.12	3247	508	1317	13.41	4.48	1.14	1.70	3.29	0.68	0.31
5	4.14	31.91	0.17	1.55	1.24	2407	532	1820	13.31	4.49	1.07	2.14	3.27	0.52	0.29
6	4.14	31.94	0.17	1.58	1.21	2030	519	1806	12.81	4.44	1.09	2.14	3.37	0.53	0.30
7	4.59	31.72	0.19	1.58	1.21	2447	501	1539	13.02	4.68	1.10	1.91	3.50	0.58	0.29
8	4.36	31.63	0.18	1.64	1.23	1826	497	1456	13.48	4.87	1.07	1.99	3.39	0.60	0.34
9	4.38	30.80	0.17	1.57	1.32	3352	553	1611	13.93	4.69	1.06	2.29	3.30	0.57	0.36
10	4.48	30.69	0.21	1.60	1.37	2903	518	1398	13.72	4.92	1.07	1.98	3.76	0.57	0.28
11	4.27	31.24	0.19	1.53	1.39	2794	484	1545	14.20	4.80	1.07	1.99	3.35	0.51	0.26
12	4.05	31.73	0.19	1.47	1.35	4509	523	1423	13.68	4.63	1.13	1.89	3.60	0.55	0.25
13	6.01	24.39	0.21	1.30	1.02	735	479	1094	22.92	7.06	1.54	2.23	3.67	0.64	0.34
14	4.33	31.50	0.16	1.61	1.33	2453	513	1592	13.12	4.84	1.09	2.01	3.61	0.55	0.26
15	6.50	17.88	0.19	0.88	0.62	329	519	796	24.38	7.62	1.53	8.02	3.37	0.73	3.52
16	3.99	32.33	0.16	1.64	1.43	3052	511	1693	11.95	4.51	1.07	2.03	3.65	0.52	0.27
17	4.15	31.70	0.14	1.59	1.46	2586	481	1638	12.90	4.62	1.06	1.97	3.60	0.51	0.27
18	4.38	29.50	0.17	1.45	1.34	2359	472	1453	17.09	5.64	1.24	1.95	3.79	0.51	0.30
19	3.87	30.66	0.18	1.48	1.38	2141	519	1720	14.78	5.06	1.04	2.37	3.53	0.49	0.30
20	3.92	32.18	0.14	1.68	1.48	2251	475	1648	12.83	4.45	1.07	2.00	3.68	0.46	0.24
21	4.69	30.33	0.18	1.52	1.40	3869	542	1311	14.83	4.89	1.09	2.14	3.57	0.57	0.38
22	4.20	33.32	0.17	1.53	1.41	2380	506	1905	10.46	4.05	1.09	2.01	3.66	0.52	0.26
23	4.12	32.53	0.14	1.59	1.46	2879	487	1676	12.11	4.38	1.09	2.02	3.61	0.51	0.29
24	4.50	31.94	0.16	1.65	1.41	2754	504	1562	12.13	4.41	1.10	1.95	3.72	0.55	0.24
25	3.63	33.89	0.14	1.48	1.47	2913	474	1762	10.73	3.97	1.11	1.90	3.54	0.48	0.26
26	3.09	33.35	0.14	1.54	1.58	3523	447	1647	12.55	4.82	1.19	1.80	3.87	0.50	0.23
27	3.56	32.30	0.17	1.47	1.51	4384	427	1391	12.56	4.76	1.21	1.48	3.89	0.56	0.21
28	3.68	33.38	0.15	1.59	1.53	2484	481	1802	11.45	4.03	1.11	2.04	3.62	0.46	0.25
29	4.34	32.21	0.15	1.58	1.45	2334	490	1649	11.76	4.28	1.06	2.04	3.61	0.52	0.27
30	4.04	32.84	0.13	1.63	1.60	2196	523	1723	13.06	4.38	1.07	2.27	3.50	0.49	0.27
最小	3.09	17.88	0.13	0.88	0.62	329	427	796	10.46	3.97	1.04	1.48	3.23	0.46	0.21
最大	6.50	33.89	0.23	1.68	1.60	4509	553	1905	24.38	7.62	1.54	8.02	3.89	0.73	3.52
平均	4.33	31.13	0.17	1.52	1.32	2663	502	1561	13.82	4.79	1.13	2.21	3.54	0.55	0.39

2 多金属结核化学成分及其特点

为分析多金属结核化学成分及其特点,东、西区各取30个测站的多金属结核样品,东区结核样品编号为1~30(表1),西区编号为31~60(表2)。结核中Fe、Mn、Cu、Co、Ni、Ba、Sr、Zn元素和SiO₂、Al₂O₃、K₂O、CaO、MgO、TiO₂、P₂O₅氧化物含量用X衍射-荧光分析法测定(表1,2)。东区结核Fe含量为3.09%~6.50%,平均4.33%;Mn含量为17.88%

~33.89%,平均31.13%;Cu+Ni含量为1.50%~3.28%,平均2.84%;Co含量为0.13%~0.23%,平均0.17%。东区结核中化学成分特点是富Mn、Cu、Ni,贫Fe和Co。西区结核Fe含量为4.36%~14.80%,平均9.28%;Mn含量为21.31%~28.64%,平均25.61%;Cu+Ni含量为0.81%~3.05%,平均2.00%;Co含量为0.13%~0.38%,平均0.25%。与东区相比,西区结核化学成分总体特征是富Fe、Co,贫Mn、Cu、Ni。

表2 西区多金属结核化学成分

Table 2 Chemical components of polymetallic nodules from the western study area

样号	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Ba	Sr	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅
	(%)					(×10 ⁻⁶)			(%)						
31	6.75	28.42	0.22	1.34	1.04	1897	572	1280	14.67	5.51	1.11	2.20	3.69	0.77	0.39
32	6.97	27.02	0.22	1.28	0.96	2233	655	1225	15.01	5.45	1.11	2.35	3.54	0.80	0.47
33	6.38	28.23	0.21	1.39	1.15	1732	586	1356	15.28	5.75	1.10	2.23	3.85	0.71	0.38
34	12.19	24.08	0.27	0.85	0.56	2019	946	873	14.37	4.67	1.02	2.57	2.62	1.47	0.56
35	10.14	21.91	0.27	0.95	0.53	1537	795	817	15.92	5.31	1.02	5.49	2.93	1.25	2.29
36	9.64	25.14	0.25	1.08	0.77	1300	711	1006	15.40	5.85	1.07	2.44	3.22	1.09	0.48
37	10.34	25.82	0.29	1.18	0.78	1970	858	995	13.90	4.94	0.99	2.40	3.16	1.23	0.49
38	11.45	22.41	0.34	0.92	0.49	2102	946	799	17.40	5.72	1.34	2.39	2.86	1.64	0.56
39	7.68	27.32	0.25	1.38	1.06	1306	671	1239	14.84	5.72	1.08	2.22	3.86	0.86	0.43
40	7.06	26.76	0.23	1.36	1.06	2194	670	1243	16.63	6.13	1.22	2.23	3.76	0.83	0.40
41	5.95	28.05	0.20	1.40	1.34	2034	560	1239	16.93	6.04	1.16	2.23	3.85	0.64	0.42
42	7.63	27.11	0.23	1.35	0.99	1772	697	1218	14.92	5.68	1.11	2.37	3.66	0.89	0.45
43	13.67	21.46	0.32	0.70	0.43	2388	988	729	15.83	5.21	1.04	2.52	2.49	1.91	0.61
44	13.59	23.47	0.35	0.76	0.44	2149	1028	739	13.08	3.76	0.90	2.65	2.37	1.71	0.59
45	5.89	28.64	0.20	1.41	1.26	1683	547	1395	16.53	5.79	1.14	2.13	3.79	0.67	0.36
46	14.09	21.31	0.27	0.68	0.43	1675	905	705	17.70	4.80	1.04	2.44	2.30	1.47	0.56
47	14.09	22.72	0.26	0.77	0.52	1809	994	782	15.06	4.37	0.96	2.52	2.31	1.43	0.56
48	9.33	25.16	0.24	1.19	0.84	1327	790	1017	16.01	6.06	1.10	2.56	3.36	1.04	0.58
49	7.78	27.16	0.23	1.35	1.05	1202	695	1191	15.21	5.84	1.10	2.31	3.67	0.89	0.43
50	8.63	26.66	0.25	1.15	0.91	2512	757	1113	15.57	5.28	1.27	2.11	3.20	1.06	0.42
51	14.76	22.43	0.27	0.50	0.36	2282	1109	675	14.28	3.73	0.99	2.84	1.97	1.62	0.51
52	9.86	24.87	0.27	1.10	0.76	1861	809	957	16.05	5.84	1.14	2.29	3.19	1.19	0.46
53	10.85	24.02	0.26	0.91	0.64	1979	910	852	16.32	4.15	1.04	2.48	2.57	1.35	0.46
54	14.80	22.04	0.38	0.60	0.31	2315	1131	675	13.43	3.39	1.04	2.90	2.04	1.98	0.63
55	6.81	27.45	0.22	1.40	1.17	1296	597	1266	16.07	6.02	1.13	2.20	3.74	0.78	0.40
56	5.56	28.23	0.15	1.49	1.49	815	514	1322	17.22	5.90	1.08	2.15	3.56	0.60	0.30
57	8.34	26.32	0.22	1.20	0.98	1389	696	1113	15.85	5.85	1.09	2.45	3.29	0.95	0.47
58	7.81	27.43	0.23	1.34	1.10	917	641	1190	14.58	5.47	1.03	2.24	3.57	0.83	0.40
59	4.36	28.64	0.13	1.56	1.49	290	470	1459	17.47	6.17	1.12	2.25	3.68	0.51	0.32
60	6.13	27.97	0.18	1.39	1.32	1461	565	1320	16.80	5.86	1.12	2.32	3.54	0.68	0.42
最小	4.36	21.31	0.13	0.50	0.31	290	470	675	13.08	3.39	0.90	2.11	1.97	0.51	0.30
最大	14.80	28.64	0.38	1.56	1.49	2512	1131	1459	17.70	6.17	1.34	5.49	3.86	1.98	2.29
平均	9.28	25.61	0.25	1.13	0.87	1715	760	1060	15.61	5.34	1.09	2.48	3.19	1.10	0.53

2.1 多金属结核化学成分聚类分析

聚类分析的主要目的是分析样品或变量的离散或聚集程度,进而探讨样品的空间分布特征。多金属结核化学成分的Q型聚类分析结果见表3和图2。

聚类分析得出I、II、III组。第I组由18个样品

组成,7个位于东区,11个位于西区。第II组由22个样品组成,13个位于东区,9个位于西区。第III组20个样品,东、西区各10个样品。总的来看,聚类分析不能清晰地60个样品分为东、西区两群,只是I组样品西区的偏多,II组样品位于东区的多些,这说

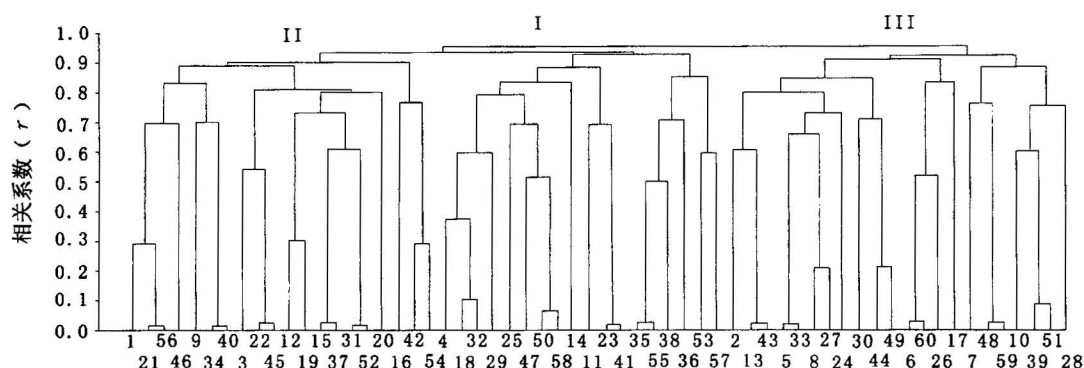


图2 多金属结核聚类谱系图(1~30号为东区;31~60号为西区)

Fig. 2 Cluster analysis of polymetallic nodules(No. 1~30 in the east area;No. 31~60 in the west area)

表3 东、西区多金属结核聚类分析得出的各组元素平均含量

Table 3 Group average of chemical components in polymetallic nodules from cluster analysis

分 组	样 品 数	经 度 (°W)	纬 度 (°N)	水 深 (m)	丰 度 (kg/m ²)	平均含量(%)						
						Mn	Fe	Co	Ni	Cu	SiO ₂	Al ₂ O ₃
I 组	18	149.70	9.14	5092	8.42	27.86	7.26	0.22	1.27	1.05	14.81	5.11
II 组	20	148.19	9.19	5070	7.80	28.02	6.93	0.21	1.31	1.06	14.96	5.09
III 组	22	147.51	8.88	5088	7.56	29.10	6.32	0.20	1.38	1.17	14.43	5.02
分 组	样 品 数	经 度 (°W)	纬 度 (°N)	平均(%)					平均(×10 ⁻⁶)			
				CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Zn	Ba	Sr	
I 组	18	149.70	9.14	2.36	3.33	1.11	0.87	0.49	1244	2116	649	
II 组	20	148.19	9.19	2.52	3.33	1.11	0.84	0.54	1301	2258	641	
III 组	22	147.51	8.88	2.18	3.42	1.10	0.77	0.36	1373	2186	607	

明两区样品有区域性差异,但不明显。东区结核主要特点是品位高而丰度低,西区结核则相反。但西区(尤其在南部地区)也有类似于东区粗糙型高品位结核。西区结核品位频率分布表明有两种结核,光滑型结核主频对应于品位(Cu+Co+Ni)1.80%和粗糙型结核对应于品位(Cu+Co+Ni)2.60%。I、II、III组样品元素含量的空间变化特点是:Mn、Cu、Ni、Zn、Ba、Mg、K含量由西向东逐渐增加,而水深、丰度、Fe、Co、Si、Al、Ca、Ti、P和Sr含量反之。按照结核资源动态评价研究,西区测站平均经度152.0°W,东区144.5°W,两区相距约847 km,按海底扩张速率5.29 cm/a和结核平均生长速率0.24 cm/Ma计算,东区海底扩张移动到西区约需16 Ma,在此期间结核如不被沉积物埋没,理论上可长成直径3.84 cm的结核。因此,目前西区直径>3.84 cm的部分结核可能在16 Ma前生长于目前东区位置,它们是被海底驮着从东区来到西区的,所以现在西区有与东区相似的高品位粗糙型结核并不奇怪。

2.2 多金属结核化学成分因子分析

因子分析除具有聚类分析功能(於崇文等,

1980)外,主要目的是分析造成样品或变量离散和聚类的控制因素,因子载荷和因子得分隐含着这些控制因素。因子分析样品及其变量与聚类分析相同,东、西区R型因子分析结果见表4和表5。

表4 方差极大主因子特征值比例

Table 4 Eigenvalues percentage of varimax principal factor analysis

因 子	多金属结核			表层沉积物		
	特征 值 比例	累计 比例	变 量	特征 值 比例	累计 比例	变 量
1	61.70	61.70	Mn、Ni、Cu、Zn、Mg Fe、Co、Ti、Sr	34.52	34.52	Mn、Fe Ca、Ni
2	20.57	82.27	Si、Al、K	20.78	55.30	Ti、P、Ba、Sr
3	6.03	88.30	Ca、P	12.96	68.26	Si、Al、Mg
4	4.07	95.37	Ba	8.76	77.02	Cu、Co、Zn

由表4、5可知前3个因子特征值累计百分数已达88.30%,因子1主要由正载荷Mn、Ni、Cu、Zn、Mg和负载荷Fe、Co、Ti、Sr构成,因子2由Si、Al、K组成,因子3由Ca、P组成。Mn、Fe组元素聚集与聚类分析结果颇为相似,两组元素互相制约并呈负相

关,Mn 与 Cu、Ni、Zn 相关系数分别为 0.90、0.90、0.95 而 Mn 与 Co、Fe、Ti、Sr 的相关系数分别为-0.79、-0.87、-0.83、-0.79。结核因子分析结果与表层沉积物的相比有三个显著差别:一是结核因子比沉积物因子集中,前者前三个因子累计比例达 88.30%,后者只占 68.26%。二是结核中 Cu、Co、Ni 等金属比沉积物的富集。三是结核中 Mn 是正载荷、Fe 为负载荷,铁锰分离,而沉积物 Mn、Fe 都是负载荷,铁和锰不分离。

表 5 方差极大因子载荷矩阵
Table 5 Factor loads of varimax principal factor analysis

变 量	多金属结核				表层沉积物			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Mn	0.8278	-0.3518	-0.3410	0.2734	-0.9914	0.0343	-0.0348	0.1177
Fe	-0.9837	-0.0312	0.0709	-0.1622	-0.8249	-0.2540	-0.4183	0.1472
Co	-0.9960	0.0862	-0.0037	-0.0248	-0.6903	0.0568	-0.1241	0.6933
Ni	0.9608	-0.0836	-0.2623	0.0312	-0.7331	0.0245	-0.2534	0.6076
Cu	0.9574	-0.0706	-0.2653	0.0892	-0.5155	-0.1232	-0.2863	0.7805
SiO ₂	-0.2463	0.8476	0.3078	-0.3552	0.1578	0.6475	0.7225	-0.0253
Al ₂ O ₃	0.0891	0.8587	0.1315	-0.4872	-0.0369	0.1471	-0.9771	0.0809
CaO	-0.2130	0.2419	0.9338	-0.1555	-0.9250	-0.3639	-0.0681	-0.0000
MgO	0.9200	0.3192	-0.2090	-0.0903	-0.0905	-0.5507	-0.6049	-0.1679
K ₂ O	0.2435	0.9319	0.1983	0.1818	0.0961	-0.0241	-0.0791	-0.1083
TiO ₂	-0.9969	-0.0316	0.0606	-0.0390	-0.6715	0.7041	0.0174	-0.2034
P ₂ O ₅	-0.2048	0.2765	0.9334	-0.1021	-0.4114	-0.8643	-0.2652	0.0477
Zn	0.9271	-0.2818	-0.1972	0.1488	-0.1695	-0.2076	-0.1592	0.9150
Sr	-0.9887	-0.1250	0.0352	-0.0751	-0.2188	-0.9615	0.0341	0.1517
Ba	0.1870	-0.2731	-0.2107	0.9198	0.1698	-0.9786	-0.0048	0.0512

2.3 趋势面分析

地质体受多种地质因素长期作用,大多数地质观测值包含规律性变化因素和局部偶然因素制约。趋势面分析(朱裕生,1984)就是要对区域性和局部性变化规律进行研究,把数据分为趋势值和剩余值两部分,趋势值相当于区域性变化,即规律性变化,一般受区域性的系统因素制约;剩余值包括局部变化和随机变化两部分,局部变化受局部空间系统因素所制约,随机变化则是随机因素引起的偶然误差所致,因此需要获得局部空间上的异常,可对剩余值

作进一步的趋势面分析,把局部规律性变化和随机变化区分开。研究区多金属结核的丰度、Mn、Cu、Co、Ni 变量趋势面分析,采用多项式函数拟合,了解各变量的规律性变化及局部性变化。根据多金属结核矿床特点,采用二维趋势面分析,西区 469 个地质采样趋势面分析得出丰度、Mn、Cu、Co、Ni 变量的趋势值、剩余值、拟合度及 F 统计量值(表 6)及典型变量(丰度)趋势等值线图(图 3)。西区地质采样丰度和克立格法 4 次趋势面分析,拟合度 32.29%,统计量 F 值 15.47,显著水平 $\alpha=0.05$,变异性是显著的。

表 6 西区各变量趋势面拟合度及代表性检验

Table 6 Trend analysis goodness-of-fit and F test on the variables in the western area

变量 名称	数据 来源	趋势面 次数	样品数 (n)	原数据 均值	趋势值 均值	剩余值 均值	自由度 (P)	拟合度 ($C, \%$)	F 统计 量值	$F_{0.05}(P, n-p-1)$	显著 性
丰 度	地质采样	4	469	7.98	7.991	-0.008	14	32.29	15.47	1.71	显著
	克立格法	5	662	7.22	7.217	0.000	20	58.37	44.94	1.59	显著
Mn	地质采样	3	469	24.85	24.843	0.003	9	5.29	2.85	1.90	显著
Cu	地质采样	5	469	0.82	0.824	0.001	20	10.98	2.76	1.59	显著
Co	地质采样	6	469	0.26	0.263	0.000	27	9.25	1.66	1.51	显著
Ni	地质采样	6	469	1.10	1.103	0.000	27	10.71	1.96	1.51	显著

由图 3 可知,高丰度集中在 9.2°~10.2°N 之间,西部略高于东部,与地质采样丰度等值线分布态势相似。从等值线形态看,等值线 4~8 呈北西向直线形展布,等值线 9~14 由西向东呈楔形插入到

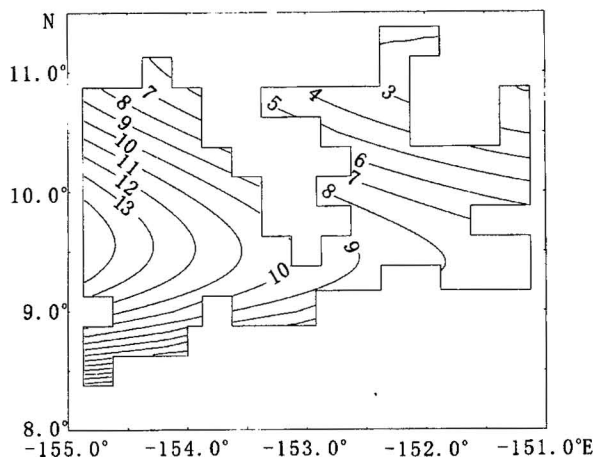


图3 丰度趋势面等值线图

Fig. 3 Abundance distribution based on trend analysis

152.5°W处,表明有西北方向的物质注入西区。西区海山链、海山发育,火山作用对多金属结核形成非常有利,在已有粗糙型结核基础上又叠加了光滑型结核,使结核种类丰富、形成机制复杂化和丰度增加。西区地质采样丰度、Mn、Cu、Co、Ni 剩余值统计分析表明,剩余值呈随机、正态分布、均值为零,说明剩余值仅是观测误差,剩余值大小仅反映误差项的大小,不反映局部异常,说明西区火山作用和对结核影响普遍存在。

2.4 人工神经网络分析

人工神经网络模拟人脑的感知和学习能力,具有高度的联想和容错功能,在认知和识别领域得到非常广泛的应用。多金属结核在海底的分布是多种因素共同作用的结果,研究表明控制结核分布的主要因素有构造、地形、生物、沉积作用、底流等。根据多金属结核矿床特征,我们采用BP网络(王英等,1998)建立控矿因素与结核分布之间的非线性映射,然后利用多金属结核、多波束测深数据,预测结核分布。所选输入因子是经度、纬度、水深、坡度,输出因子是丰度和品位(Mn、Cu、Co、Ni)。坡度计算方法是测区内水深数据网格化,以每个网格结点为中心,计算各个方向的坡度,以最大坡度作为该点的真坡度。网络学习和验证结果表明,以转折点坐标(154°54'W, 9°30'N)、(154°10'W, 9°30'N)、(154°10'W, 9°50'N)、(15°24'W, 9°50'N)为界将西区分为南、北两部分,就得到稳定网络,学习和验证效果最好。界线以北区域地形以平原为主,孤立海山、海丘散布,坡度>5°的区域不多;界线以南主要地形是海山链,坡度

>5°的区域沿海山链分布,此外也有零星海山、海丘分布,水深变化大。人工神经网络分析得出的结核丰度和Mn、Cu、Co、Ni含量、结核资源量和金属量见表7。坡度0°~8°地区的平均丰度差别不大,坡度>8°地区的平均丰度明显降低,Mn、Cu、Ni含量在坡度0°~3°地区最高,Co含量则在坡度3°~7°地区最高;坡度0°~5°地区结核量占总结核量的89.62%,坡度5°~10°地区结核量只占总结核量的10.38%,说明结核主要分布在坡度0°~5°的地区。坡度0°~5°地区结核量和Mn、Cu、Co、Ni金属量是坡度5°~10°地区的7.34~14.15倍,结核资源量主要集中在平缓地形区。

3 多金属结核物质来源和分布规律

3.1 板块构造与成矿作用

大洋裂谷岩石年龄一般不超过0.2 Ma,就是接受大量沉积的中央洋盆,沉积层厚度也只有几十到几百米,有的洋盆底甚至直接出露基岩,因此多金属结核成矿物质来源和结核分布规律研究,必然要涉及板块构造和地球内部动力学。据已在联合国登记为“深海采矿先驱投资者”申请矿区和有关财团矿区面积(约200多万平方千米),按平均丰度5~10 kg/m²估算,CC区有100~200亿吨结核资源量。图1表明多金属结核矿区正好位于东太平洋海隆、莱恩西断裂带、克拉里昂断裂带、克立伯顿断裂带所围成的框架内,这些板块构造单元是CC区多金属结核矿带成矿作用的主导控制因素。

3.1.1 东太平洋海隆与成矿作用

熔融的上地幔物质沿着大洋裂谷带不断上涌,梅纳德估计每年从洋中脊喷出的火山物质约为4 km³(朱而勤,1991),大洋盆地是热和金属的来源(Bonatti, 1983; 1986)。1978年Ballard在离东太平洋海隆(21°N)轴部发现了热液硫化物矿床,1979年发现那里的矿床沿着几千米长的脊峰断续分布,主要是由Fe、Cu和Zn组成的硫化物,同时在洋中脊上成群耸立着由高达10 m、直径宽约40 cm由硫化物构成的黑烟囱,它们正在喷发出温度高达300℃的云雾状黑色液态硫化矿物。东太平洋海隆喷出的多金属物质通过近赤道环流等各种作用过程向西输送,为沿途多金属结核形成提供源源不断的物质供给;前苏联对海底玄武岩成分和蚀变程度分析得出,离东太平洋现代扩张中心最远的DSDP 164孔(160°W)的岩石已经碳酸盐化,斜长石局部蚀变,根据岩石成分属于大洋裂谷带的拉斑玄武岩。DSDP

表 7 西区结核丰度和平均品位(人工神经网络估算)

Table 7 Nodule abundance, grade and resources amount from artificial neural network estimation

海底地形坡度 (°)	平均丰度 (kg/m ²)	平均品位(%)				干结核量和金属量(×10 ³ t)				
		Mn	Cu	Co	Ni	干结核量	锰	铜	钴	镍
0~1	9.22	26.62	1.04	0.21	1.14	5645.01	1522.37	61.88	11.07	64.08
1~2	9.36	26.16	0.96	0.23	1.18	6325.32	1684.27	66.41	13.48	76.12
2~3	9.79	25.59	0.91	0.24	1.15	3248.58	839.73	32.72	7.73	39.06
3~4	9.11	24.99	0.77	0.26	1.05	1658.94	415.26	13.83	4.25	17.65
4~5	9.75	24.71	0.62	0.27	1.04	1463.51	362.25	9.31	3.86	15.47
5~6	9.37	24.91	0.55	0.27	1.11	1066.83	265.29	6.10	2.83	11.81
6~7	8.51	24.89	0.54	0.27	1.15	711.76	178.44	4.09	1.93	8.25
7~8	9.35	24.79	0.80	0.21	1.29	173.53	42.97	1.50	0.37	2.17
8~9	6.49	24.98	0.65	0.21	1.36	92.34	22.38	0.75	0.19	1.19
9~10	7.81	22.83	0.77	0.22	1.35	80.81	19.01	0.58	0.18	1.07
加权平均(0~10)	9.33	25.86	0.90	0.23	1.41	20466.59	5351.98	197.15	45.89	236.85
加权平均(0~5)	9.40	25.99	0.94	0.23	1.14	18341.36	4823.88	184.14	40.39	212.37
加权平均(5~10)	8.83	24.80	0.58	0.26	1.15	2125.24	528.09	13.01	5.50	24.48
(0~5)/(5~10)	1.06	1.05	1.62	0.88	0.99	8.63	9.13	14.15	7.34	8.67

163 孔(151°W)拉斑玄武岩原始性特点和成分接近于戈拉帕斯扩张中心的拉斑玄武岩。从东区基底起伏、构造活动、岩石成分和蚀变程度分析,东区在地质时期属于洋中脊,因此其多金属结核成矿物质应与东太平洋海隆成矿作用有关。根据 1997 年对东、西区表层和柱状沉积物中矿物扫描电镜和 XRD 分析研究(金建才,1989)沉积物中普遍含有钠长石和斜长石(两者含量 5%~10%)、重晶石(含量<5%)等自生矿物。钠长石和斜长石均呈完整自形晶产出,属自生矿物;重晶石呈板条状(长度<10μm)完整自形晶,不属于生物成因,与同为自形的石英及钠长石共生,不同于成岩及冷泉作用形成的菱形及片状集合体。综合这些矿物结晶形态及地质背景,认为与加里福尼亚湾 Guaymas 盆地相似,属热水成因,这意味着在东、西区可能存在过或存在着类似于现代板块扩张中心的热水活动。

3.1.2 克拉里昂—克立伯顿断裂与成矿作用

威尔逊(Wilson, 1965)提出了 6 种类型的转换断层,CC 区转换断层属于最常见和最重要的中脊—中脊型的转换断层。研究区自北而南有莫洛凯断裂带、克拉里昂断裂带、克立伯顿断裂带、加拉帕戈斯断裂带。转换断层对岩浆熔融体和热液的迁移无疑有很大的作用,是输送矿质和分配矿质的通道。孟宪伟等(1997)对东、西区多金属结核 Ce 同位素特征研究(表 8)表明,东、西区 4 个多金属结核的 ϵ_{Ce} 为 -1.2~-0.5,平均为 -0.88,而大西洋 12 个多金

属结核的 ϵ_{Ce} 为 0.8~4.8,平均为 2.7(Amakawa et al., 1991),东、西区多金属结核 ϵ_{Ce} 值与洋中脊玄武岩(ϵ_{Ce} 为 -1.4)、太平洋上层海水(0~500 m, ϵ_{Ce} 为 -1.21)的 ϵ_{Ce} 值相近(Shimizu et al., 1994),而大西洋多金属结核中 ϵ_{Ce} 值与中国黄土的 ϵ_{Ce} 值相近(1.8),这表明东、西区多金属结核中 Ce 有幔源可能^{①②}。

表 8 东、西区多金属结核中 Ce 同位素分析

Table 8 Ce isotope analysis of nodules from the study areas

样品号	经度 (°W)	纬度 (°N)	水深 (m)	结核类型	¹³⁸ Ce/ ¹⁴² Ce	ϵ_{Ce}
1725(东区)	143.3701	9.1267	5153	粗糙型	0.0225706	-0.7
2430(西区)	154.8802	9.1225	5309	光滑+粗糙型	0.0225698	-1.1
2436(西区)	154.1277	9.1267	4950	光滑型	0.0225695	-1.2
2442(西区)	153.3745	9.1268	4873	光滑型	0.0225715	-0.5

3.2 火山成矿作用

莱恩群岛与火山成矿作用紧密相关。太平洋有三列著名海岭,即天皇—夏威夷海岭、莱恩—土阿莫土海岭、吉尔伯特—土布艾海岭,莱恩群岛是莱恩海岭—土阿莫土海岭的一部分。火山成矿作用对结核的影响显而易见,西区丰度趋势面分析和神经网络

- ① 周怀阳等. 2001. 太平洋中国开辟区沉积物中热水活动迹象的发现. 中国大洋矿产资源研究开发学术研讨会论文集.
- ② 孟宪伟等. 2001. 太平洋 CC 区多金属结核 Ce 同位素组成—幔源 Ce 证据. 中国大洋矿产资源研究开发学术研讨会论文集.

分析表明高丰度与海山分布相一致。梁德华(1992)研究认为 31.5% 结核核心物质是火山物质,火山作用是促进结核生成的重要条件之一,研究区自东向西火山作用逐渐增强,结核丰度也逐渐增高,高丰度结核多分布于海山及其周边,可以看出火山作用不但对结核的生长提供核心物质,还提供金属物质来源。

3.3 沉积成矿作用

海底表层均匀地接受水体中金属物质沉淀,结核上半部主要从上覆海水中吸收金属(Arrhenius et al., 1964, 1965; Bonatti et al., 1965)。海底沉积物和结核吸附吸收上覆水、间隙水中金属元素的模拟试验表明,结核和沉积物都是有效的吸附剂,但结核吸附吸收效果比沉积物好。结核上表面对底层水中 Mn、Co、Ni 的吸附比其下表面强,结核上表面除了主动吸收上覆水和间隙水中金属外,还被动地接受上覆水中金属物质的沉淀吸附,下表面绝大部分靠吸附间隙水中的金属,因此单位面积内接受的金属通量在上表面要明显的高于下表面。在化学和矿物成分上,上半部分结核主要是铁矿物相,下半部分主要是锰矿物相。

西区结核大多数裸露于表层沉积物,上半部极为发育。表 9 表明无论是上覆水、间隙水、还是沉积物中,西区 Mn、Fe 含量均高于东区,但在结核中东区结核 Mn 含量高于西区。东区结核主要埋藏于沉积物,下半部发育,沉积物和间隙水是结核生长发育的土壤,结核吸附吸收金属能力比沉积物强,在争夺

间隙水中金属时沉积物处于不利地位,导致沉积物中金属贫化。东区柱状沉积物中铁锰微粒或微结核数量随沉积柱深度增加而减少、泥团增加,这些现象说明东区结核形成机制不同于西区,东区是成岩型结核,西区以沉积型结核为主。西区结核中有明显的铝硅酸盐泥质充填物,因子分析得出 I 组样品的 Fe 组元素和 Al、Si 元素含量高应与此有关。东区以埋藏或半埋藏型结核为主,形成结核物质主要来自下伏沉积物,上覆水中元素很少进入被沉积物埋藏的结核中,因此结核以 Mn 组元素(Mn、Cu、Ni、Zn)富集为主。东区结核中泥质充填物极少而 Al、Si 含量低。东海陆架沉积物(王成厚,1986)中 Mn 和 Fe 为正相关,南海沉积物(张富元,1991,1993)中 Mn、Fe 相关系数 $R=0.85$,研究区沉积物中 Mn、Fe 相关系数 $R=0.64$,而结核中 Mn、Fe 相关系数为 $R=-0.87$ 。从东海陆架浅海到南海半深海到太平洋深海,沉积物中 Mn 与 Fe 均为正相关,但从沉积物过渡到多金属结核,Mn 和 Fe 变为负相关,这说明结核中 Mn、Fe 关系与沉积物中 Mn、Fe 关系有质的差异。大量分析数据表明,沉积物中 Mn、Fe 含量主要由粘土和有机质所控制,吸附作用把 Mn 和 Fe 结合到沉积物中,影响沉积物中 Mn、Fe 的因素也就显得相对简单,粘土与 Mn、Fe 往往呈正相关,其相关程度随着离岸距离增加而减弱,近岸发生的沉积作用已完全不同于深海。研究区海底扩张、火山喷发和玄武岩析离使沉积物中 Mn、Fe 含量同粘土相关程度降低,而与板块构造、火山作用和成岩作用相关紧密。

表 9 东、西区结核、沉积物、间隙水和上覆水的 Mn、Fe 含量及其比值

Table 9 Mn, Fe contents in nodules, sediments, pore water and overlaying water

项目	表层沉积物平均值(%)				结核平均值(%)			间隙水($\times 10^{-6}$)		上覆水($\times 10^{-6}$)	
地区	东海	中太平洋	西区	东区	中太平洋	西区	东区	西区	东区	西区	东区
Mn	0.09	0.57	0.53	0.29	18.34	25.61	31.13	67	42	0.75	0.40
Fe	3.54	3.50	4.66	4.37	12.30	9.28	4.33	175	101	11.00	6.73
Mn/Fe	0.025	0.16	0.11	0.07	1.53	2.76	7.19	0.38	0.42	0.068	0.059
样本数	26	27	18	18	35	30	30	7	6	5	6

3.4 结核丰度、覆盖率与(基底)地形对应分析

3.4.1 陡峭地形和平缓地形相隔距离分析

东区典型地段多波束海底地形测量(图 4)表明,该地段等深线走向为近南北向,陡峭和平缓地形相隔 5~6 km 交替出现。以陡峭地形和紧邻的平缓地形为 1 个地形基本单元,其宽度为 10~12 km。

3.4.2 结核高、低覆盖率相隔距离分析

深拖光学系统(照相和摄像系统)勘探得出的东

区结核覆盖率表明,从 $143^{\circ}14' \sim 143^{\circ}11'W$ 相距约 5.5 km,对应的结核覆盖率为 10%~35%,这样的覆盖率在东区属高覆盖率; $143^{\circ}11' \sim 143^{\circ}09'W$ 相距 9.9 km,结核覆盖率为 0~10%,为低覆盖率; $143^{\circ}09' \sim 143^{\circ}03'W$ 相距 6.6 km,结核覆盖率又上升到 10%~35%,为高覆盖率。从 $143^{\circ}14' \sim 143^{\circ}02'W$,相距 22.0 km,结核覆盖率经历了“高一低一高”变化。结核覆盖率由高到低 1 个旋回的距离为约 15 km。

3.4.3 结核高、低丰度相隔距离分析

东区结核的最主要特点是品位高,丰度低而变化大,结核分布趋势为近南北向和近东西向。以东区南部区块为例,丰度 $0.00 \sim 12.45 \text{ kg/m}^2$,平均丰度

5 kg/m^2 ,平均品位 $(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni}) 2.92\%$ 。若确定丰度 $\geq 5 \text{ kg/m}^2$ 为高丰度, $< 5 \text{ kg/m}^2$ 为低丰度。那么在东西方向上高、低丰度每隔 6 km 或 13 km 交替出现(表 10)。

表 10 东区典型地段高、低丰度分布的相隔距离分析

Table 10 Interval distance analysis with nodule abundance variation

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
平均丰度	5.15	4.34	7.02	6.01	4.47	2.69	5.92	6.59	2.71	2.16	8.11	4.57	4.85
丰度级别	高	低	高	高	低	低	高	高	低	低	高	低	低
相隔距离(km)	起点	6.60	7.26	6.54	7.13	6.64	7.21	6.71	6.97	6.65	7.30	6.85	7.10
累计(km)	0.00	6.60	13.86	20.40	27.53	34.17	41.38	48.09	55.06	61.71	69.01	75.86	82.96

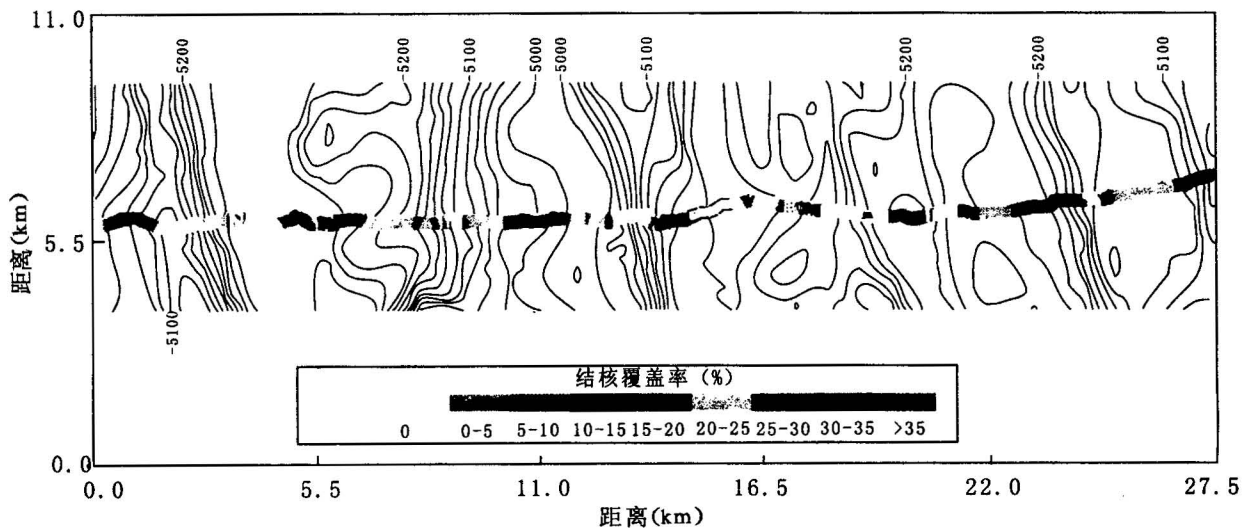


图 4 东区典型地段地形、结核覆盖率分布图

Fig. 4 Nodule coverage distribution with topography variation in typical district

东区结核丰度、覆盖率、地形对应分析表明,这三者变化非常一致,重大相变距离为 $10 \sim 15 \text{ km}$,地形是引起这三者变化的主导因素,结核丰度和覆盖率受地形控制,而地形变化是基底情况的直接反映,基底自形成以来一直影响着地表结核形成和分布,地球深部地质作用过程对结核成矿作用的影响可能涉及基底岩浆房性质及其大小(Macdonald et al., 1983; 1988)。

4 结论

根据东太平洋 CC 区多金属结核丰度和品位的聚类分析,因子分析,趋势面分析和人工神经网络分析,结合海底地形、深拖探测,运用板块构造和动力沉积学理论,对形成多金属结核的物质来源、控矿因素和分布规律认识如下:

(1) 聚类分析表明东、西区结核化学成分和形态

上有差异,但不能按区域断然区分;因子分析得出 Mn 组元素 Mn、Cu、Ni、Zn, Fe 组元素 Fe、Co、Ti、Sr, 岩源组元素 Si、Al、K, 生物组元素 Ca、P 4 种因子;丰度趋势面分析显示火山成矿作用导致西区结核丰度增加;人工神经网络分析表明坡度 $\leq 5^\circ$ 的结核量占研究区总结核量的 89.62% , 坡度 $> 5^\circ$ 的结核量占 10.38% 。

(2) 上覆海水的化学沉淀使海底普遍存在多金属结核,但没有其他成矿作用就不足以形成高品位的多金属结核矿床。

(3) 莱恩群岛火山成矿作用和玄武岩海解作用使上覆水体中 Fe、Mn、Cu、Co、Ni 金属浓度增加,加速结核生长发育,导致西区结核丰度增加,但品位没有大的改观。

(4) 东太平洋海隆的海底扩张活动、克拉里昂—克立伯顿断裂活动导致深部岩浆上涌,大量高品质

成矿物质为结核形成生长和发育提供物质保证,板块构造活动是 CC 区多金属结核优质矿区形成的最重要因素。

(5) 东区典型地段结核丰度、覆盖率与地形变化一致,重大相变距离为 10~15 km,(基底)地形是变化的主导因素,丰度和覆盖率受地形控制,地球深部地质作用过程对结核成矿作用的影响可能涉及基底岩浆房性质及其大小等复杂问题,CC 区多金属结核矿床应归于板块构造和海底扩张活动的一种资源效应并经后期表生地质作用改造,地球内部动力作用过程与多金属结核资源效应的确切关系有待深入调查研究。

本课题得到《中国大洋矿产资源研究开发协会》的重点资助,课题立项论证和完成过程中得到李廷栋院士、金翔龙院士、林振宏教授、兰玉琦教授、郭世勤总工、李裕伟研究员、吕文正研究员等指导帮助和大洋多金属资源调查全体人员的辛勤工作,在此一并对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 陈建林,张富生,林承毅,史君贤,沈华梯,王基庆,马维林. 2001. 太平洋中国开辟区锰结核生物成因研究. 地质学报, 75(2): 228~233.
- 金建才译. 1989. 锰结核矿址的圈定与评价. 联合国海洋经济技术处编. 北京: 海洋出版社.
- 李志昌,崔汝勇,刘文贵. 2001. 太平洋中国开辟区铁锰结核稀土元素和钕钐同位素特征. 地质论评, 47(3): 309~316.
- 梁德华. 1992. 太平洋中部多金属结核研究文集. 北京: 地质出版社.
- 王成厚. 1986. 锰铁的分选、聚集和锰结核的形成. 中国科学, 10: 1100~1108.
- 王英,金翔龙. 1998. 人工神经网络在多金属结核研究中的应用. 海洋学报, 20(5): 83~89.
- 萧绪琦,郭世勤. 1992. 太平洋中部多金属结核中锰矿物的电镜研究. 地质学报, 66(3): 219~226.
- 阎葆瑞,张胜,胡大春. 1992. 太平洋中部微生物与多金属结核的生成关系. 地质学报, 66(2): 122~134.
- 阎葆瑞,张锡根,梁德华,许东禹,刘怡芬,张伟. 1998. 海底多金属结核微生物成矿的机制和模式. 地质学报(英文版), 72(3): 282~290.
- 於崇文等. 1980. 数学地质的方法与应用. 北京: 冶金工业出版社. 149~199.
- 张富元. 1991. 南海中部表层沉积物的元素地球化学. 海洋与湖泊, 22(3): 253~263.
- 张富元. 1993. 南海表层沉积物中 Ba/Cu 比值与海底扩张关系. 海洋学报, 15(5): 98~103.
- 朱而勤. 1991. 近代海洋地质学. 青岛: 青岛海洋大学出版社. 127~135.
- 朱裕生. 1984. 矿产资源评价方法学导论. 北京: 地质出版社. 185~238.
- ### References
- Amakawa H, Ingri J, Masuda A, et al. 1991. Isotopic compositions of Ce, Nd and Sr in ferromanganese nodules from the Pacific and Atlantic Oceans, the Baltic and Barents Seas, and the gulf of Bothnia. Earth and Planetary Science Letters, 105: 554~565.
- Arrhenius G, Mero J, Korkisch J. 1964. Origin of oceanic manganese minerals. Science, 144(3615): 170~171.
- Arrhenius G, Bonatti E. 1965. Neptunism and volcanism in the ocean, 7~22. In: Mary Sears ed., Progress in Oceanography, Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, London.
- Ballard R D, et al. 1981. East Pacific Rise at 21°N: The volcanic and hydrothermal process of the central axis, Earth and Planet Science Letters, 55(1): 1~10.
- Bonatti E, Nayudu Y R. 1965. The origin of manganese nodules on the ocean floor. Amer. J. Sci. 263, 17~39.
- Bonatti E. 1983. Hydrothermal metal deposits from the oceanic rifts: A classification. In: Hydrothermal processes of seafloor spreading centers. ed. by Rona P A. New York.
- Bonatti E. 1986. Metal deposits in the oceanic lithosphere. In: The Oceanic Lithosphere. The Sea Vol. 7. ed by Emiliam C. 639~686.
- Cao Ruiji, Xue Yaoshong. 1985. Biological and lithological features of modern stromatolites in Bahamas. Acta Geologica Sinica, 3, 203~212.
- Chen Jianlin. 2001. Biogenesis Study of Manganese Nodules from the Chinese Pioneer Area in the Pacific Ocean. Acta Geologica Sinica. 75(2): 228~233. (in Chinese)
- Li Zhichang, Cui Ruyong, Liu Wengui. 2001. REE and Ce, Nd Isotopic Characteristics of the Ferromanganese Nodules from the Chinese Pioneer Area in Eastern Pacific Ocean. Geological Review. 47(3): 309~316. (in Chinese)
- Macdonald K C et al. 1983. Overlapping Spreading Centres; New Accretion Geometry on the East Pacific Rise. Nature, 302 (5903): 55~58.
- Macdonald K C et al. 1988. A New of the Mid-ocean Ridge from the Behaviour of Ridge-Axis Discontinuities. Nature, 335 (6187): 17~223.
- Shimizu H, Tachikawa K, Masuda A, et al. 1994. Cerum and neodymium isotopes ratios and REE patterns in seawater from the North Pacific Ocean. Geochimica Cosmochimica Acta. 58: 323~333.
- Wilson J T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. Nature, 207: 343~347.
- Jin J C. 1989. Delineation of Mine Sites and Potential in Different Sea Areas. Beijing: Ocean Press China. Translated from Seabed Mineral Series Volume 4, United Nations Ocean Economics and Technology Branch. 1987. Published in co-operation with the United Nations by Graham & Trotmam Limited.
- Liang D H (Chief Editor). 1995. Collected papers on polymetallic nodules in the central Pacific ocean. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

- Tian Youping, He Fusheng. 2000. Present freshwater stromatolites and algal mats in surface calcareous Tufa in the Sichuan and Guizhou areas. *Geological Review*, 46(5):549~555.
- Wang C H. 1982. Ocean Manganese Nodules. Beijing: Ocean Press China. (in Chinese)
- Wang Y, Jin X L. 1998. Application of artificial neural network in study of polymetallic nodules. *Acta Oceanologia Sinica*, 20(5): 83~89.
- Xiao Xuqi, Guo Shiqin. 1992. Electron microscopic investigation on mangaease minerals in the multi-metallic nodules from the middle pacific ocean. *Acta Geologica Sinica*, 66(3):219~226.
- Yan Baorui, Zhang Sheng, Hu Dachun. 1992. Genetic relation between microbial activity and the formation of polymetallic concretions in the central Pacific Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 66(2): 122~134. (in Chinese)
- Yu C W. 1980. Methods and applications of Geomathematics. Beijing: Publishing House of Metallurgical industry. 149~199. (in Chinese)
- Zhang F Y. 1991. Geochemistry of elements in surface sediments from the central South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 22(3):253~263. (in Chinese)
- Zhang F Y. 1993. Relationship between Ba/Cu ratio of surface sediments and seafloor spreading in the South China Sea. *Acta Oceanologia Sinica*, 15(5):98~103. (in Chinese)
- Zhu E Q. 1991. An introduction to marine geology. Qingdao: Publishing House of Qingdao Ocean University. 127~135. (in Chinese)
- Zhu Y S. 1984. An introduction to methodology of mineral resource evaluation. Beijing: Geological Publishing House. 185~238. (in Chinese)

Material Sources and Distribution Characteristics of Polymetallic Nodules in the Eastern Pacific

ZHANG Fuyuan¹⁾, YANG Qunhui²⁾, YIN Ruguang³⁾, HE Gaowen⁴⁾, ZHANG Weiyan¹⁾, WANG Ying¹⁾

1) Key Lab of Submarine Geoscience, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012

2) Department of Marine Geology, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003

3) National Marine Information Center, Tianjin, 300171

4) Guangzhou Marine Geological Survey of MLR, Guangzhou, 510760

Abstract

The study areas are located in the western part of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ) in the eastern Pacific. A series of geological and geophysical investigations, including measurement of abundance and grade of Polymetallic nodules and Seabeam topography, photography and coverage by the deep-tow television camera as well as seismic reflection, have been carried out during the past years. The integrated study revealed the following points. (1) There is a difference between the east district and the west district in chemical components and shapes of nodules, but the difference is not obvious based on the cluster analysis. (2) The factor analysis shows that the four element assemblages of polymetallic nodules are Mn, Cu, Ni; Zn, Fe, Co, Ti and Sr; Si, Al and K; and Ca and P. (3) In the west district, the material sources of nodules are mainly from chemical deposits of metal elements in the overlying water. Submarine volcanism increase the enrichment and abundance of the nodules. The nodules are mainly distributed in areas with slopes $\leq 5^\circ$ (about 89.62% of the total) and sesondarily in the areas with slopes $> 5^\circ$ (about 10.38%) according to the results of the trend analysis and artificial neural network analysis. (4) In the east district, the abundance, coverage and seafloor feature of the nodules are varied similarly with the significant distance of faicies change being 10~15 km. Metallic materials of the nodules are mainly derived from deep-seated mantle through openings of the basaltic oceanic crust and faults, which provide abundant materials for the formation and growth of the nodules. Geological processes such as activities of magma chambers should affect the distribution of nodules. (5) The formation of the polymetallic nodule belt in the CCZ is attributed to the effect of resources of plate tectonics and seafloor spreading, and the reworking of the late-stage supergene geological processes.

Key words: the eastern Pacific; polymetallic nodule; material source; distribution characteristics