

张辉, 刘季花, 高晶晶, 等. 中、西太平洋海山富钴结壳碲元素地球化学特征及其资源潜力[J]. 海洋学报, 2023, 45(6): 109–121, doi:10.12284/hyxb2023079

Zhang Hui, Liu Jihua, Gao Jingjing, et al. Geochemical characteristics and resource potentiality evaluation of tellurium in Co-rich crusts from the Mid-West Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(6): 109–121, doi:10.12284/hyxb2023079

中、西太平洋海山富钴结壳碲元素地球化学特征及其资源潜力

张辉^{1,2}, 刘季花^{1,2*}, 高晶晶^{1,2}, 崔迎春^{1,2}, 张颖^{1,2}, 白亚之^{1,2}, 何莲花^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用自然资源部重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 崂山实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 根据太平洋海山群(中太平洋海山群、莱恩海山链)和西太平洋海山群(麦哲伦海山群、马尔库斯维克海山群、马绍尔海山群)5个海山群14座海山的185个富钴结壳样品的碲元素分析测试,研究了其组成特征、空间分布规律、赋存相态及资源潜力。结果表明,研究区富钴结壳中碲元素质量分数的变化范围为17.8~145.2 μg/g,平均值为47.4 μg/g;各海山群碲元素的含量范围及区域富集程度存在较大差异,富集程度由高到低依次为麦哲伦海山群、马绍尔海山群、马尔库斯维克海山群、中太平洋海山群和莱恩海山链,区域上呈现自西向东逐渐降低的趋势。碲元素含量与水深呈径向相同、纬向相反的趋势,说明碲元素的富集不仅与结壳在海水中的产出深度有关,还与经纬度、海山地形及区域成矿环境有关。淋滤结果显示碲元素主要富集在铁氧化物及残渣态中,富氧环境和生物作用磷酸盐化对碲的富集成矿起决定性作用。参照陆地伴生有用元素最低工业品位要求,中、西太平洋研究区域海山样品富钴结壳碲元素含量均达到了工业品位要求,具有潜在的开发价值。由富钴结壳储量估算,中、西太平洋富钴结壳中碲储量大于7.63万t,是海底碲资源的重要储备基地。

关键词: 富钴结壳; 碲元素; 分布规律; 富集机制; 资源潜力; 中、西太平洋

中图分类号: P575.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)06-0109-13

1 引言

碲(Tellurium, Te)位于元素周期表第五周期VI_A族,具有明显的金属性质,是良好的合金添加剂,可广泛用于冶金行业,尤其在太阳能电池等新兴行业的需求日益增强。近年来碲被应用于光电及热电等高新技术领域,是制造夜视镜、红外探测仪、激光和红外雷达的良好材料。同时碲也是制造半导体制冷的上乘材料,可做雷达、水地导弹冷却、潜艇空气调节与清除

CO₂的分子筛。另外,碲在温差发电方面也得到了有效应用,被称为国防工业与现代工业不可或缺的“维生素”。碲在地壳中的平均丰度值很低,仅为1.0 ng/g^[1],被称为“稀有元素”“分散元素”或“稀散金属”。近年来国内外一系列重要的碲伴生矿床被发现,已探明的全球碲储量为14.9万t,美国矿业局推算伴生在铜矿床中的碲储量大约为2.1万t^[2]。我国已探明的碲储量在世界上处于第三位,已发现的伴生碲矿区储量近1.4万t,还有未计入储量的碲矿资源约为1.0万t^[3]。

收稿日期: 2022-03-28; 修订日期: 2022-10-04。

基金项目: 国家自然科学基金(40976038); 自然资源部第一海洋研究所基本科研业务费专项资金(GY02-2013G06); 崂山实验室山东省专项(2021QNLM020003-2); 国际海域资源调查与开发“十二五”规划项目(DY125-13-R-07)。

作者简介: 张辉(1982—),女,山东省德州市人,工程师,主要从事元素地球化学和同位素地球化学研究。E-mail: zhanghui@fio.org.cn

* 通信作者: 刘季花,女,研究员,主要从事海洋沉积地球化学与海底成矿资源研究。E-mail: jihliu@fio.org.cn

由于碲的稀缺性和重要性,随着近年来需求量的大幅增加,目前的储量已经远远不能满足需求,因此开拓新的矿源地已经迫在眉睫,也成为世界各国能源战略的重要组成部分。

富钴结壳是一种重要的矿产资源,由铁和锰的氧化物和氢氧化物组成,广泛分布在海底平原、海山和海脊等地貌单元。除铁和锰外,富钴结壳还富含其他多种经济价值元素,其中碲元素的质量分数在 0.06~205 $\mu\text{g/g}$ 之间,最高可达 270 $\mu\text{g/g}$,平均值是地壳丰度的 55 000 倍。“原生结壳带”的富钴结壳富含碲,最高含量可达 200 $\mu\text{g/g}$,据估算该种类型的富钴结壳含碲 45 万 t^[4]。可见,富钴结壳区是碲的重要资源储备基地,也是其未来开采利用的重要场所。因此,近年来富钴结壳中碲元素逐渐受到重视,诸多学者对其时空分布和富集规律进行了相关的调查研究,但大多数研究区集中于东太平洋,或中、西太平洋局部区域内^[5-11],而对于中、西太平洋大范围海域缺乏系统性的调查研究。为此,本文选取了中、西太平洋 5 个海山群 14 座海山的富钴结壳样品开展碲元素的地球化学特征研究,旨在查明其组成特征、空间分布规律和赋存相态,在此基础上进行初步的资源潜力评价,为未来的矿产资源开发提供理论支撑。

2 样品与分析方法

2.1 样品采集

本研究区位于中、西太平洋的麦哲伦海山群、马尔库斯维克海山群、中太平洋海山群、马绍尔海山群及莱恩海山链 5 个海山群(图 1)。麦哲伦海山群位于西太平洋东马里亚纳海盆,西邻马里亚纳海沟,往东南逐渐延伸到马绍尔群岛,向北与马尔库斯维克海山群相邻,南为所罗门隆起。麦哲伦海山群研究区包

含 MG1、MG2、MG3、MG4、MG5 5 座海山,海山的展布受构造控制,主要呈 NW 向带状分布。海山由火山机体和火山岩体构成,海山多为孤立状、双顶状、多顶状平顶山,平顶水深 1 400~1 600 m,基座水深 5 000~6 000 m。马尔库斯维克海山群包含 MW1、MW2、MW3 3 座海山,MW2 海山顶部部分成大小不等的 4 个平顶,海山顶部水深范围在 1 700~2 000 m 之间。中太平洋海山群位于夏威夷群岛和马绍尔群岛之间,处于莱恩群岛的 NW 向延伸方向上,海山呈簇状排列且近 EW 向展布于太平洋海山密集区,是多热点成因的板内火山作用和板块构造运动的共同产物,包含 M1、M2 两座海山。M1 海山下界圈闭深 2 600 m,山顶水深 1 200~1 600 m;M2 海山水深在 1 400~3 800 m 之间,山顶水深 1 400~2 000 m。马绍尔群岛位于中太平洋海盆北部,自东向北沿 NW 方向延伸到马尔库斯维克海岭和麦哲伦海山,海山主要由玄武岩和火山碎屑岩构成,其上覆盖有孔虫软泥等碳酸盐沉积物,包含 MS1 海山,MS1 海山整体方向呈 SN 方向,以水深 1 400~1 500 m 作为山顶,最大水深达 5 000~6 000 m。莱恩海山链年龄较年轻,主要表现为海山顶水深较大以及均为尖顶海山。研究区包含 L1、L2 和 L3 3 座海山,它们都位于莱恩群岛海山链北端,L1 海山整体呈 EW 向分布,形状不规则,水深范围 1 700~4 500 m;L2 海山整体呈 NW-SE 向分布,形状不规则,水深范围 1 300~5 000 m;L3 海山整体呈 EW 向分布,形状不规则,由大约 10 个山顶组成,水深范围 1 400~5 000 m。

本文研究样品为近 20 年中国大洋矿产资源协会对中、西太平洋进行地质和资源调查时获取,多数样品以海底岩石拖网采集,少数样品以浅钻的方式采集。站位分布如图 1 所示,覆盖麦哲伦海山群、马尔库斯维克海山群、中太平洋海山群、马绍尔海山群及

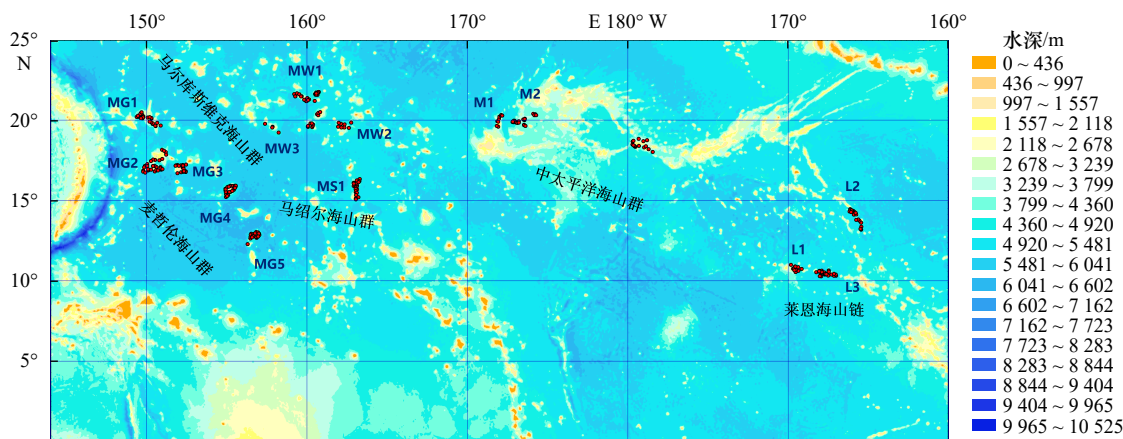


图 1 研究区域和取样站位分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of sample in this study

莱恩海山链 5 个海山群, 在 14 座海山 (MG1、MG2、MG3、MG4、MG5、MW1、MW2、MW3、MS1、M1、M2、L1、L2、L3) 共采集到 185 个富钴结壳样品, 测试样品为结壳层全岩混合样品。

2.2 样品分析测试方法

用四分法缩分取得 20 g 左右的结壳样品, 80℃ 恒温烘干后于玛瑙研钵中粉碎至 200 目, 准确称取 0.5 g 样品放入聚四氟乙烯溶样罐中, 加入 1:1 的氢氟酸、硝酸于钢套中高压 190℃ 加热分解 48 h, 150℃ 赶尽 HF 后用王水溶解, 移至聚乙烯试管中, 定容, 摇匀。分取部分澄清溶液, 用体积比为 3% 的乙醇溶液稀释至 500 倍后, 用等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行测试, 测试过程同时做流程空白, 使用 Mcpt-1 为质控样, 同时选取 10% 样品做平行样, 确保碲元素的测试相对偏差小于 5%。

在 MG3、MG1、M2 和 MW1 4 个海山分别选取一个结壳样品采用分级淋滤法测定碲元素的赋存相态。用 1 mol/L 醋酸铵溶液浸取吸附态, 2 mol/L 醋酸溶液浸取碳酸盐态, 0.1 mol/L 盐酸羟氨溶液 (90℃ 加热) 浸取锰氧化物相, 20% 醋酸和 1 mol/L 盐酸羟氨溶液浸取铁氧化物相, 相态提取样品同时测定碲元素含量。样品预处理和测试分析工作在海洋地质与成矿作用自然资源部重点实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 碲元素数值分布特征

研究区域结壳中碲元素的质量分数变化范围为 17.8~145.2 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 47.4 $\mu\text{g/g}$ (表 1)。麦哲伦海山群 99 个样品中碲元素的质量分数的变化范围为 18.5~108.9 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 53.4 $\mu\text{g/g}$, 离散系数为 0.33; 马尔库斯维克海山群 17 个样品中碲元素的质量分数的变化范围为 27.2~96.9 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 47.1 $\mu\text{g/g}$, 离散系数为 0.45; 马绍尔海山群 13 个样品中碲元素的质量分数的变化范围为 31.2~145.2 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 48.9 $\mu\text{g/g}$, 离散系数为 0.62; 中太平洋海山群 19 个样品中碲元素的质量分数的变化范围为 24.2~93.9 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 46.0 $\mu\text{g/g}$, 离散系数为 0.40; 莱恩海山群 37 个样品中碲元素的质量分数的变化范围为 17.8~65.6 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 31.8 $\mu\text{g/g}$, 离散系数为 0.35。14 座海山结壳中主要常量、微量元素的含量范围及平均值见表 2。

3.2 碲元素分布规律

3.2.1 碲元素数值分布

碲元素在 5 座海山群富钴结壳中的富集程度由

表 1 研究区富钴结壳碲元素含量统计表

Table 1 Statistics of tellurium content in crust in the study area

名称	样品数	最大值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	最小值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	标准 偏差	离散 系数
结壳调查区	185	145.2	17.8	47.4	19.6	0.41
麦哲伦海山群	99	108.9	18.5	53.4	17.4	0.33
MG4	39	95.0	37.4	64.0	14.3	0.22
MG5	29	73.9	42.8	53.5	7.2	0.13
MG3	13	108.9	27.5	43.9	21.5	0.49
MG2	8	70.0	27.7	41.6	13.0	0.31
MG1	10	44.2	18.5	27.8	6.8	0.25
马尔库斯维克海山群	17	96.9	27.2	47.1	21.4	0.45
MW3	1	27.2	27.2	27.2	-	-
MW1	10	87.1	27.6	47.9	19.5	0.41
MW2	6	96.9	30.3	49.1	26.4	0.54
马绍尔海山群	13	145.2	31.2	48.9	30.2	0.62
MS1	13	145.2	31.2	48.9	30.2	0.62
中太平洋海山群	19	93.9	24.2	46.0	18.3	0.40
M1	4	45.5	24.2	32.6	9.4	0.29
M2	15	93.9	24.4	49.6	18.6	0.37
莱恩海山链	37	65.6	17.8	31.8	11.0	0.35
L1	8	46.5	19.4	29.8	9.7	0.32
L2	14	65.6	18.4	36.2	10.4	0.29
L3	15	51.4	17.8	28.5	11.5	0.40

注:“-”代表只包含一个站位数据, 未计算标准偏差和离散系数。

高到低依次是: 麦哲伦海山群、马绍尔海山群、马尔库斯海山群、中太平洋海山群和莱恩海山链, 在空间上大致呈现东高西低的趋势 (图 2)。不同的海山群也表现出明显的区域性特征, 麦哲伦海山群碲元素含量平均值由高到低依次为: MG4、MG5、MG3、MG2 和 MG1, 呈现沿 ES-WN 方向逐渐降低的分布趋势。马尔库斯维克海山群碲元素含量平均值由高到低依次为: MW2、MW1 和 MW3, 位于海山群南北两端的 MW2、MW1 海山高且平均含量接近, 中间位置 MW3 海山低。中太平洋海山群碲元素含量平均值 M2 大于 M1, 两座海山呈 EW 向分布, 东高西低。马绍尔海山群与处于同一经度范围内 MW2 海山碲元素含量平均值相当。莱恩海山链碲元素含量平均值由高到低依次为: L2、L1 和 L3, 呈逆时针方向依次降低, 碲元素在区域上呈由西向东逐渐降低的趋势。

表 2 研究区富钴结壳主要常量、微量元素含量统计表
Table 2 Statistics of major and trace elements in Co-rich at crusts of the study area

海山群	海山	参数	常量元素含量/%														微量元素含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)										
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	Sr	Mo	Ce	ΣREE	W	Mo	Te	Pt	
马尔库斯维克 海山群	MW1	最大值	18.32	1.90	3.17	26.82	33.48	2.42	4.49	4.17	0.79	1.67	0.80	0.70	0.30	908	2 746	2 131	1 722	909	1 683	3 212	103	477	87.07	1 183.00	
		最小值	6.31	1.23	1.17	19.91	24.92	1.66	2.98	2.27	0.56	0.92	0.53	0.33	0.06	498	1 000	1 455	1 289	360	695	1 538	66	252	27.58	118.00	
		平均值	11.62	1.54	2.06	24.55	29.63	1.95	3.54	2.63	0.69	1.15	0.65	0.47	0.13	624	1 448	1 753	1 424	556	1 108	2 113	77	312	47.88	344.86	
		样品数	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	26	26	26	26	26	26	26	26	10	10	10	14
		最大值	18.29	2.58	3.08	27.96	38.76	2.32	7.74	3.21	0.83	2.83	0.99	0.72	0.15	756	1 600	1 993	1 550	715	1 113	1 943	155	589	96.87	617.74	
	最小值	2.08	1.29	0.50	16.36	24.09	1.59	2.97	2.08	0.58	0.51	0.41	0.29	0.05	390	1 075	1 492	1 283	464	739	1 610	63	258	30.33	141.00		
	平均值	11.21	1.72	2.02	23.60	29.87	1.92	3.84	2.48	0.69	1.08	0.65	0.48	0.08	499	1 255	1 840	1 436	579	861	1 771	92	366	49.07	267.50		
	样品数	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	11	11	11	11	11	11	11	11	6	6	6	8	
	最大值	19.52	1.51	2.86	26.68	24.65	1.65	2.90	2.51	0.72	0.99	0.52	0.31	0.07	514	1 200	1 587	1 441	491	815	1 689	62	238	27.16	164.00		
	最小值	15.75	1.37	2.32	25.32	23.19	1.63	2.82	2.28	0.68	0.93	0.48	0.29	0.07	479	1 000	1 543	1 317	453	712	1 437	62	238	27.16	150.00		
中太平洋 海山群	M1	平均值	17.64	1.44	2.59	26.00	23.92	1.64	2.86	2.40	0.70	0.96	0.50	0.30	0.07	497	1 100	1 565	1 379	472	764	1 563	62	238	27.16	157.00	
		样品数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2
		最大值	14.22	2.10	2.70	26.52	35.57	2.34	9.14	2.95	1.02	4.09	0.84	0.81	0.28	913	2 423	1 719	1 755	633	1 461	2 486	76	315	45.47	408.76	
		最小值	5.86	1.54	1.42	18.96	26.76	1.39	3.07	2.24	0.53	0.49	0.46	0.33	0.08	495	1 270	1 379	1 159	371	920	1 704	54	249	24.18	131.00	
		平均值	9.64	1.81	1.88	22.95	29.59	1.82	4.04	2.53	0.70	1.12	0.69	0.46	0.13	617	1 650	1 592	1 402	464	1 161	2 180	64	279	32.58	238.48	
	样品数	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	4	4	4	3	
	最大值	14.19	5.62	2.86	29.57	36.24	2.43	19.39	2.78	0.84	9.58	1.13	0.81	0.22	774	1 950	2 145	1 600	764	1 342	2 665	505	616	93.94	784.00		
	最小值	2.18	1.08	0.50	11.95	26.82	1.70	2.96	2.09	0.53	0.64	0.51	0.28	0.06	500	1 300	0	1 200	348	693	1 596	48	201	24.43	131.85		

续表 2

海山群	海山	参数	常量元素含量/%														微量元素含量($\mu\text{g g}^{-1}$)									
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	Sr	Mo	Ce	ΣREE	W	Mo	Te	Pt
中太平洋 海山群	M2	平均值	8.78	2.08	1.70	22.49	31.81	1.95	5.08	2.38	0.68	1.86	0.74	0.55	0.13	619	1599	1708	1426	548	1052	2043	129	320	49.56	411.93
		样品数	25	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	16	16	15	13
	MG3	最大值	19.08	2.95	4.86	38.99	39.35	2.64	12.33	3.21	1.42	6.36	0.95	0.73	0.26	915	2800	2428	1988	628	1630	2989	1294	355	108.88	502.00
		最小值	5.22	1.64	1.11	19.27	23.54	1.49	2.81	1.88	0.55	0.79	0.34	0.26	0.08	515	628	1284	628	361	762	1523	40	179	27.46	94.60
麦哲伦 海山群	MG4	平均值	11.41	1.99	2.68	24.94	27.95	1.82	4.57	2.27	0.78	1.64	0.56	0.41	0.15	670	1676	1613	1384	467	1135	2226	160	268	43.88	296.06
		样品数	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	13	13	13	14
	MG5	最大值	22.38	2.11	4.52	31.13	38.92	2.29	30.05	3.20	1.67	19.22	0.62	0.75	0.22	860	7970	1905	2402	768	1744	2739	144	768	95.00	1115.49
		最小值	0.63	0.39	0.74	9.97	18.14	0.87	2.99	0.86	0.34	0.94	0.20	0.30	0.06	506	934	0	1173	235	591	1415	35	235	37.44	276.75
MG1	MG5	平均值	8.61	1.55	2.10	20.47	30.29	1.76	10.21	2.35	0.70	5.19	0.46	0.45	0.12	668	1953	1469	1549	505	1028	2039	73	505	64.00	601.59
		样品数	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	39	40	40	40	39
	MG2	最大值	12.28	2.22	3.12	26.88	36.03	2.26	22.32	2.83	0.84	13.53	0.83	0.58	0.24	803	4206	1948	1903	662	1423	2670	109	662	73.90	985.20
		最小值	2.22	1.11	0.93	14.75	24.69	1.13	3.74	1.50	0.46	0.93	0.28	0.28	0.07	563	1453	1266	1285	332	707	1496	24	332	42.79	330.34
MG2	MG1	平均值	8.23	2.50	2.76	21.25	28.58	2.57	10.93	3.12	1.57	6.13	1.42	1.38	1.10	637	1963	1395	1509	487	947	1856	70	487	53.50	542.17
		样品数	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
	MG2	最大值	18.74	1.97	4.05	29.10	30.08	2.29	8.20	3.30	0.85	4.21	0.72	0.63	0.17	767	1800	1798	1515	572	1176	2364	84	314	44.15	360.00
		最小值	7.94	1.36	1.20	20.87	20.20	1.73	2.87	2.06	0.52	0.77	0.35	0.23	0.07	486	1000	1258	1250	225	653	1397	43	187	18.47	91.75
MG2	平均值	13.85	1.67	3.20	25.29	25.05	1.94	3.74	2.43	0.72	1.30	0.47	0.39	0.11	617	1415	1581	1377	429	864	1784	64	256	27.81	206.93	
	样品数	17	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	10	10	10	8	
	MG2	最大值	20.76	2.26	6.23	30.51	32.39	2.06	13.12	3.14	1.81	6.28	0.64	0.53	0.24	778	2000	1855	1712	654	1344	2580	132	496	69.97	525.00

续表 2

海山群	海山	参数	常量元素含量/%														微量元素含量($\mu\text{g g}^{-1}$)									
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	Sr	Mo	Ce	Σ REE	W	Mo	Te	Pt
麦哲伦 海山群	MG2	最小值	5.01	1.49	1.04	20.10	16.92	1.68	2.82	2.17	0.59	0.55	0.34	0.17	0.05	449	1 100	1 136	1 000	288	547	1 187	42	135	27.74	94.10
		平均值	13.27	1.88	3.38	25.41	25.25	1.84	4.36	2.41	0.84	1.40	0.48	0.37	0.14	623	1 537	1 541	1 388	445	947	1 842	75	280	41.59	268.12
		样品数	21	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	8	8	8	8
马绍尔 海山群	MS1	最大值	15.61	2.44	3.54	26.23	37.56	2.21	11.97	2.60	0.97	6.65	1.13	0.80	0.34	899	2 500	4 375	1 800	747	1 657	3 104	111	454	145.15	615.00
		最小值	3.76	1.49	0.66	18.33	25.91	1.53	3.16	1.91	0.49	0.68	0.47	0.35	0.06	543	1 200	1 159	1 311	406	744	1 263	65	228	31.16	42.70
		平均值	10.43	1.96	2.07	23.82	29.42	1.85	4.00	2.32	0.71	1.21	0.69	0.47	0.16	670	1 606	1 665	1 455	515	1 035	1 947	85	315	48.89	298.11
		样品数	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	13	13	13	13	13
莱恩 海山链	L1	最大值	19.52	2.32	2.86	27.06	33.22	2.08	10.63	2.60	0.96	6.04	1.01	0.70	0.23	869	4 918	1 953	1 992	705	1 615	2 649	96	377	46.48	452.00
		最小值	4.44	1.37	0.66	20.67	23.19	1.63	2.82	2.04	0.49	0.76	0.48	0.29	0.07	479	1 000	1 066	1 317	427	654	1 201	59	229	19.41	125.00
		平均值	9.41	1.84	1.73	24.43	29.19	1.81	3.98	2.32	0.68	1.33	0.64	0.49	0.12	698	2 009	1 374	1 522	558	868	1 625	79	313	29.82	244.31
		样品数	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	9	9	9	8	12
L2	最大值	15.56	2.08	3.85	29.99	36.77	2.62	12.18	2.64	1.06	5.40	1.07	0.95	0.23	906	3 400	2 022	1 800	799	1 671	2 751	3 071	551	65.60	520.00	
	最小值	2.86	1.23	0.91	13.61	24.78	1.57	2.91	1.88	0.50	0.62	0.29	0.33	0.06	516	1 300	831	1 300	348	729	1 388	62	252	18.35	79.80	
	平均值	8.70	1.87	1.72	24.73	29.92	1.87	4.14	2.28	0.67	1.32	0.71	0.49	0.13	688	1 921	1 417	1 514	588	1 016	1 975	321	374	36.21	269.33	
		样品数	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	14	14	14	14	15
L3	最大值	13.34	2.22	2.98	30.45	33.68	2.08	19.16	2.99	0.99	7.64	0.91	0.68	0.26	886	9 100	2 224	2 209	715	1 430	2 343	87	391	51.43	612.00	
	最小值	5.64	1.54	0.66	20.76	23.48	1.30	2.68	1.66	0.48	0.61	0.23	0.31	0.07	516	1 300	698	1 208	425	583	1 106	35	240	17.82	105.00	
	平均值	9.18	1.85	1.70	25.97	29.14	1.77	4.37	2.22	0.67	1.33	0.58	0.45	0.14	671	2 333	1 184	1 523	538	840	1 675	69	303	28.54	268.87	
		样品数	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	15	15	15	15	15

3.2.2 碲元素平面分布规律

由于碲无独立矿床工业要求^[12],参照伴生碲含量较高的伴生矿一般工业要求:自然硫矿床中含碲0.001%~0.02%,含铜黄铁矿中含碲0.001%~0.016%,铜钼硫化物矿床中含碲0.0008%~0.005%,各类型低温碲金矿床中含碲0.001%~0.01%,硫铁矿中含碲为0.005%,铜钼矿石中含碲为0.03%。本研究区域锰结壳中含碲为0.0017%~0.015%,与自然硫矿床、含铜黄铁矿和低温碲金矿床含量相当。为更直观阐明碲元素空间分布规律,按碲元素4个含量范围:小于30 $\mu\text{g/g}$ 、30~50 $\mu\text{g/g}$ 、50~70 $\mu\text{g/g}$ 、大于70 $\mu\text{g/g}$ 进行碲元素二维空间分布特征研究,根据结壳碲元素的区域空间分布特征在1'×1'水深地形图上就各个海山、海山群结壳的碲元素含量范围进行投点,绘制了碲元素平面分布图(图3)。

麦哲伦海山群位于西太平洋东马里亚纳海盆,主要呈NW向带状分布。海山多为孤立状、双顶状、多顶状平顶山,平顶水深1400~1600 m,基座水深5000~6000 m,麦哲伦海山群碲元素分布趋势见图3a和图3b,碲元素在MG1海山样品中除3个样品含量介于30~50 $\mu\text{g/g}$ 之间外,其余站位均小于30 $\mu\text{g/g}$;MG2海山样品碲元素含量以30~50 $\mu\text{g/g}$ 为主,仅1个样品含量高于50 $\mu\text{g/g}$,位于MG2海山东南端;MG3海山样品碲元素含量亦以30~50 $\mu\text{g/g}$ 为主;MG4海山样品碲元素含量基本高于50 $\mu\text{g/g}$,近半数样品碲元素含量高于70 $\mu\text{g/g}$;MG5海山除少数样品外,碲元素含量亦高于50 $\mu\text{g/g}$,仅有1个样品高于70 $\mu\text{g/g}$ 。碲元素在麦哲伦海山群富集程度由高到低的顺序是:MG4、MG5、MG3、MG2和MG1。

马绍尔海山群MS1海山几乎所有样品都集中在2000~3000 m水深等深线内,样品地形以海山上斜

坡和海山斜坡为主,碲元素含量范围主要为30~50 $\mu\text{g/g}$ (图3c),在海山北部斜坡1个采样站位碲元素含量高于70 $\mu\text{g/g}$ 。

马尔库斯维克海山群MW2海山的样品主要集中于2000 m之内的海山山顶和上斜坡,MW1海山的样品分布的水深范围稍大。MW1海山碲元素分布趋势较明显,MW1N海山样品碲元素含量高于MW1S海山(图3d),即MW2海山碲元素含量南部高于北部。从以上特征可以推断出马尔库斯维克海山群海山碲元素富集的程度是MW1高于MW2。

中太平洋海山群包含了M1和M2海山,调查的大部分样品集中于海山顶和海山上斜坡,个别样品位于海山下斜坡。在南北向延伸的M1海山,样品主要分布于海山顶和上斜坡,M2海山样品主要分布于5个小海山顶和边缘,M1海山样品的碲元素含量低,均小于50 $\mu\text{g/g}$ (图3e),M2海山样品碲元素富集程度相对较高,大部分站位高于50 $\mu\text{g/g}$ 。碲元素在中太平洋海山群富集的程度是M2高于M1。

莱恩海山链中的3个海山——L1、L3和L2海山多呈尖顶或近乎尖顶,仅L1海山发育了不甚宽广和平坦的海山顶,因此几乎所有的样品都位于海山斜坡,样品水深也多在2000~4000 m之间。莱恩海山链碲元素含量的分布具有较明显的区域性(图3f),总体上,位于东北部的L2海山样品碲元素含量范围为30~50 $\mu\text{g/g}$ 。L1海山碲元素含量西部高于东部;L3海山样品东部高于西部,西部站位碲元素含量基本低于30 $\mu\text{g/g}$,海山东部两个站位碲元素含量为50~70 $\mu\text{g/g}$ 。碲元素在莱恩海山链富集的程度由高到低是:L2、L1和L3。

3.2.3 碲元素纵向分布规律

本文选取了两个沿经、纬度方向的水深剖面来研

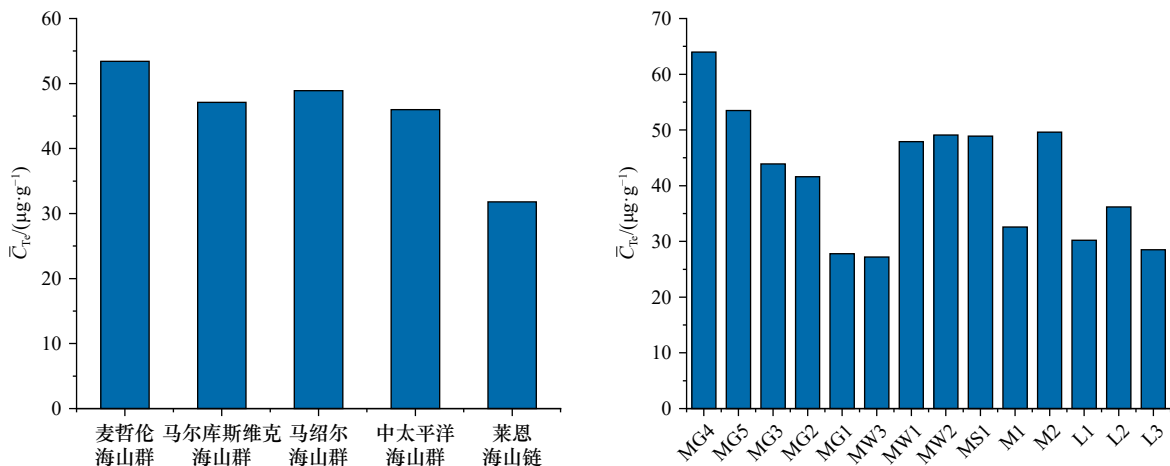


图2 碲元素平均值 \bar{C}_{Te} 对比分析图

Fig. 2 Comparison of average values \bar{C}_{Te} of tellurium

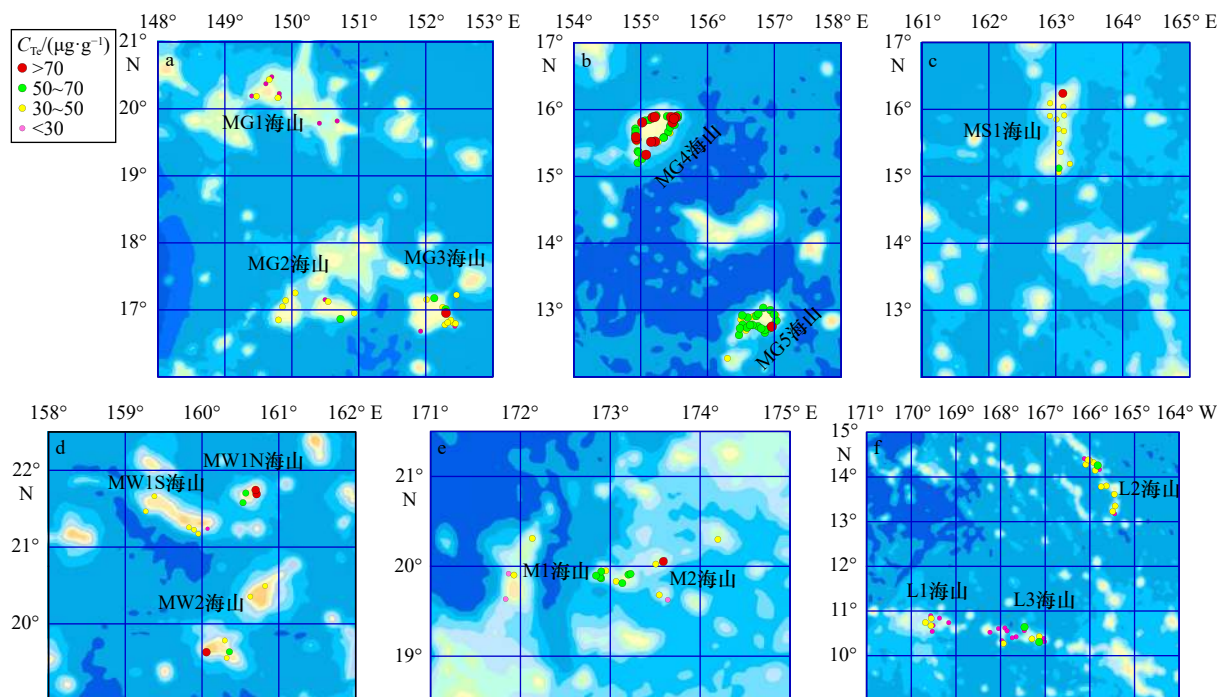


图3 碲元素含量平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of tellurium content

a, b. 麦哲伦海山群; c. 马绍尔海山群; d. 马尔库斯维克海山群; e. 中太平洋海山群; f. 莱恩海山链

a, b. Magellanic seamounts; c. Marshall seamounts; d. Markus-Wake seamounts; e. Central Pacific seamounts; f. Lane seamount Chain

究结壳样品碲元素的纵向变化规律(图4)。A-A'为穿过莱恩海山链L3海山的经向剖面,水深在2573~3100m之间,剖面主要穿过两个平顶海山顶,地形主要以海山顶以及山顶上微地形和海山上斜坡为主,剖面线上采集了13个样品,整个水深剖面起伏较为频繁。碲元素含量与水深成近似相同变化趋势(图5a)。B-B'为马绍尔海山群穿过MS海山的纬向剖面,水深范围为1534~2810m,剖面线采集了9个样品,地形为山顶和海山斜坡,碲元素含量在纬向上表现出与水深相反的趋势(图5b)。以上趋势在调查区域是一个非常典型的变化趋势,说明碲元素的富集不仅与结壳在海水中的产出深度有关,还与所处的经纬度、海山地形及区域成矿环境有关,这值得进一步研究。

3.3 碲元素赋存相态

淋滤实验结果(图6)显示,在吸附态和锰氧化物相中均未检出碲元素,碳酸盐态中所占比例也均低于2%。碲元素在铁氧化物相中所占比例分别为44%、41%、26%和38%,残渣相中所占比例为55%、58%、73%和60%。由此可见,碲元素主要赋存于铁氧化物相及残渣态中。

3.4 碲元素的富集机制

为研究碲元素富集机制,对研究样品中的主要元素进行了聚类分析,结果表明18种元素组合可以分

为以下几类:磷酸盐相-生物作用组分(Ca、P、Te、Pt、 \sum REE、Ba、Sr、Cu、Zn)、锰矿物相-水成成因(Mg、Ni、Mn、Co、Na)、铝硅酸盐相-风尘或岩石水解或其他-火山作用陆源组分(Si、Al、Fe、Ti)(图7)。以累积方差贡献达到80%为标准(表3),选取5个因子代表结壳中18种组分参与的地质过程,主因子F1方差贡献率为33.128%,载荷较大的元素:Ca、P、Fe、Si、Sr、Pt、Ba、Ti、Te、Al、Zn、 \sum REE;因子F2方差贡献率为21.949%,载荷较大的元素:Mn、Ni、Co、Mg、Na、Al、Si;因子F3方差贡献率为9.632%,载荷较大的元素:Cu、Zn;因子F4方差贡献率为9.183%,载荷较大的元素:Pt、Te、Al、Sr;因子F5方差贡献率为6.405%,载荷较大的元素:Ti、Te、 \sum REE。

碲元素主要参与到F1、F4和F5因子中,在F1中载荷最大,且具有最大的特征值,方差贡献大于其他因子,因此生物磷酸盐化过程在碲元素的富集成矿过程中起决定性的作用。淋滤结果表明碲元素主要赋存于铁氧化物相及残渣相中(图6)。目前,已有研究表明在大洋水成结壳中发现了以吸附和独立矿物两种赋存状态存在的碲元素,其中吸附型的主要赋存于铁氧化物相中^[6,13-14],独立矿物为碲元素的氧化物^[15],且水成铁锰矿中85%~100%的碲元素以+6价形式出现,表明碲元素为氧化富集过程^[16]。铈异常系数(δ Ce)

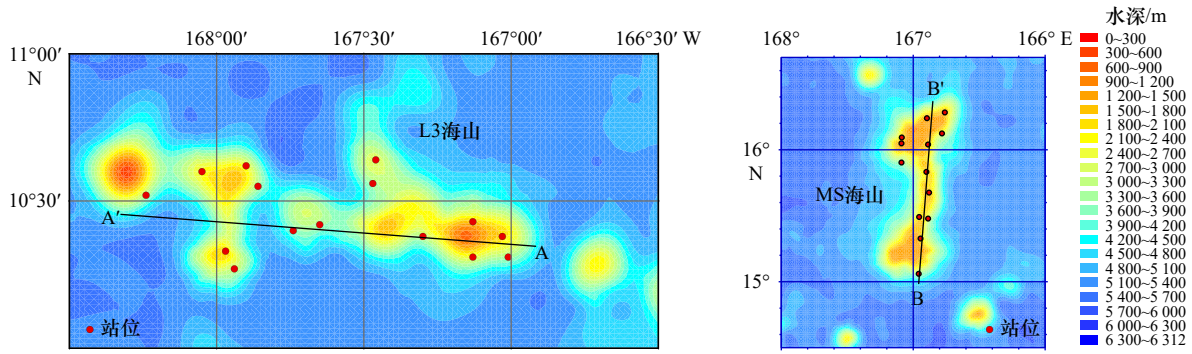


图4 径向剖面A-A'和纬向剖面B-B'站位分布

Fig. 4 Station distribution of radial profile A-A' and latitudinal profile B-B'

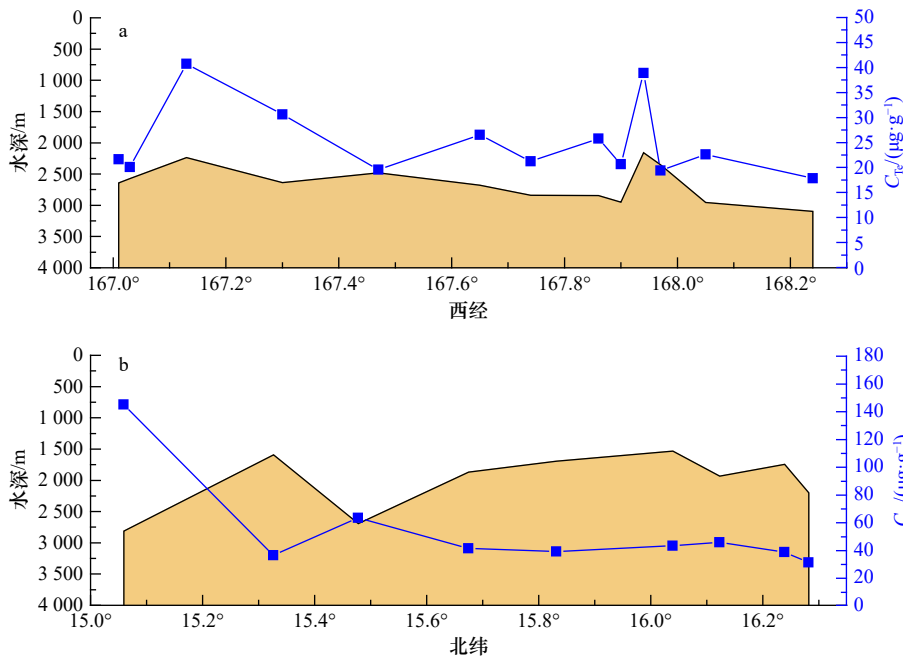


图5 A-A'剖面(a)及B-B'剖面(b)碲元素含量随水深的分布

Fig. 5 Distribution of tellurium content in A-A' (a) and B-B' (b) profiles with water depth

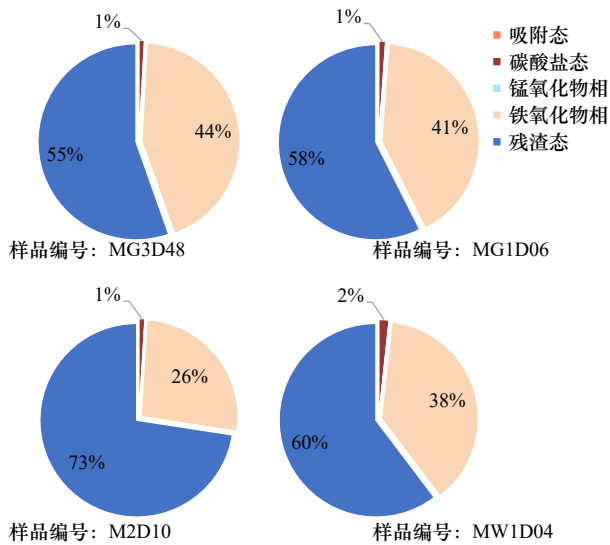


图6 碲元素在富钴结壳中的赋存状态分布

Fig. 6 Occurrence state and distribution of tellurium in Co-rich crusts

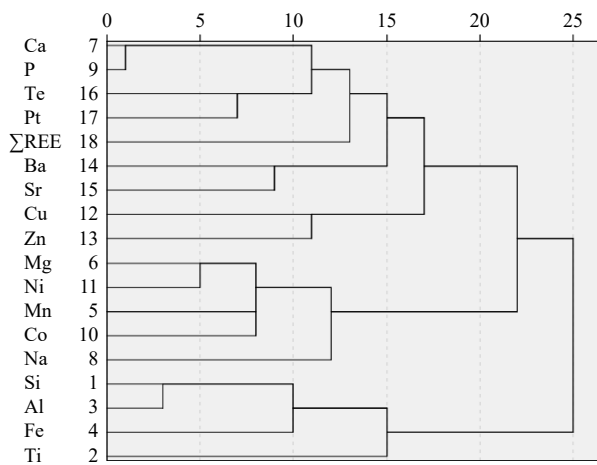


图7 元素聚类分析树形图

Fig. 7 Tree diagram of element cluster analysis

代表海底氧化还原环境, 碲元素与 δCe 相关系数大于 0.70, 且碲元素在研究区域内区域变化趋势与南极

表 3 碲元素与主要常量、微量元素载荷矩阵

Table 3 Tellurium element and main element load matrix

	成分				
	F1	F2	F3	F4	F5
初始特征值	5.963	3.951	1.734	1.653	1.153
方差/%	33.128	21.949	9.632	9.183	6.405
累积方差/%	33.128	55.077	64.710	73.893	80.297
Ca	0.921	-0.257	-0.098	0.131	-0.071
P	0.915	-0.276	-0.124	0.147	-0.060
Fe	-0.835	-0.176	0.084	-0.282	0.159
Si	-0.753	-0.497	0.130	0.251	0.023
Sr	0.671	0.058	-0.012	-0.485	-0.059
Pt	0.637	0.088	0.166	0.527	0.218
Ba	0.580	-0.180	0.389	-0.386	-0.141
Ti	-0.579	0.245	0.369	-0.207	0.481
Te	0.523	0.294	-0.005	0.481	0.416
Mn	0.143	0.900	-0.101	-0.073	0.111
Ni	0.042	0.893	0.133	0.116	-0.303
Co	-0.421	0.736	-0.230	-0.200	0.095
Mg	-0.448	0.670	0.159	0.341	-0.213
Na	-0.149	0.535	-0.202	0.276	0.018
Al	-0.500	-0.525	0.316	0.517	-0.090
Cu	0.015	0.081	0.902	-0.032	-0.038
Zn	0.501	0.417	0.523	-0.041	-0.259
∑REE	0.539	0.031	0.188	-0.119	0.638

底层流的流路相吻合^[17],由此推断碲元素在海山铁锰结壳中的富集与南极底层流有着密切的关系,低温富氧的南极底层流携带丰富的成矿物质为碲元素的富集提供了富氧环境。

碲元素与 Pt 具有相近的载荷系数,研究区域结壳样品内碲元素与铂族元素总含量(PGE)及 Pt 含量呈明显的正相关,相关系数分别为 0.67、0.60。其中,麦哲伦海山群为 0.60、0.58,中太平洋海山群为 0.75、0.77,马尔库斯维克海山群为 0.64、0.60,马绍尔海山群为 0.76、0.75,莱恩海山链为 0.72、0.63,碲元素和 Pt 与主要常量、微量元素的相关性系数相近,由此推断碲元素与铂族元素在海底特殊环境中可能具有相同的富集机制^[18],在磷酸盐化-生物作用下于氧化环境中形成共沉淀在铁氧化物表面富集。

3.5 中、西太平洋富钴结壳碲资源潜力评价

本研究中太平洋铁锰结壳样品中碲元素含量变化介于 17.82~145.15 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均值为 47.4 $\mu\text{g/g}$,与游国庆等^[19]在太平洋海区对富钴结壳的测定结果相近似。前人在太平洋开展过相关的调查与研究,结果指示太平洋地区结壳 103 个样品的碲元素含量变化介于 29~191 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均值为 65 $\mu\text{g/g}$ ^[6];中太平洋北赤道带 7 个样品的平均碲元素含量为 53 $\mu\text{g/g}$,西太平洋麦哲伦海山区 6 个样品的碲元素平均含量为 62 $\mu\text{g/g}$ ^[6]。由此可见,太平洋地区富钴结壳样品中碲元素分布相对均匀,其值高出北美大陆边缘结壳及热液锰氧化物样品数 10 倍之多^[20]。另外,不同矿物类型或载体中的碲元素含量差异很大(表 4),若与海水相比,调查区结壳中平均碲元素含量相当于海水的 10^9 倍^[1],约为地壳中碲元素含量最高值的 5 000 倍,比 CI 球粒陨石高 20 倍^[21]、比深海沉积物高约 50 倍^[22],这种差异性指示了成矿过程对碲元素的决定性控制作用,也进一步表明了富钴结壳的资源价值,14 座海山富钴结壳中的碲与自然硫矿床、含铜黄铁矿及陆地低温碲金矿床中工业品位相当^[22],大于最低工业品位,具有开采价值(表 5)及重要的资源潜力。

表 4 不同矿物类型碲元素含量比较

Table 4 Content comparison of Te elements in different mineral types

物质	碲元素含量/($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	来源
中、西太平洋富钴结壳	17 820~145 150	本文
太平洋富钴结壳	13 410~115 800	文献[19]
铁锰结壳	6 000~52 000	文献[6]
海底热液硫化物	1~10 000	文献[20]
铁锰结核	5 000	文献[22]
CI 球粒陨石	2 320	文献[21]
深海沉积物	1 000	文献[22]
硅酸盐	12	文献[23]
火山弧	2.3~6.2	文献[24]
洋中脊玄武岩	0.8~7.5	文献[24]
地壳	0.36~10.00	文献[25]
海水	$2\times 10^{-14}\sim 5\times 10^{-14}$	文献[1]

根据研究区所选样品的碲元素平均含量数据,将 5 个海山群 14 座海山的 185 个铁锰结壳样品资源量进行计算,计算方法如下,结果见表 5。

表5 海山富钴结壳碲元素资源量估算

Table 5 Statistical table of Te element resources in seamount Co-rich crusts

海山	碲元素含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	富集系数	平均值/工业品位	大于最低工业品位频率	干结壳量/ 10^4t	碲金属量/t
富钴结壳调查区	47.40	47 395	23.70	100%	156 630	76 330
麦哲伦海山群	53.35	53 354	26.68	100%	79 835	42 595
马尔库斯维克海山群	47.08	47 083	23.54	100%	36 780	17 318
中太平洋海山群	45.99	45 985	22.99	100%	18 606	8 556
马绍尔海山群	48.89	48 887	24.44	100%	6 171	3 017
莱恩海山链	31.79	31 794	15.90	100%	15 236	4 844

注: *碲的工业品位为0.000 2%~0.03%^[26], 碲的地壳丰度为0.001 $\mu\text{g}/\text{g}$ ^[1]。

$$ME = DM \times \bar{C}, \quad (1)$$

$$\bar{C} = \left(\sum_{i=1}^n C_i \right) / n, \quad (2)$$

式中, ME 为金属资源量; DM 为干结壳量; \bar{C} 为碲元素平均含量; C_i 为研究区内测站碲元素的含量; n 为含矿区内站位数。

根据航次资料预估本文所选海山范围内干结壳量约为 15.66×10^4 万 t^[27-31], 采用海山碲元素平均含量计算, 研究区域碲元素资源量约为 7.63 万 t。本文样品仅分布于中、西太平洋部分海山, 因此预计碲元素在中、西太平洋的资源量远大于 7.63 万 t, 与已探明的全球碲储量 14.9 万 t 相比^[2], 不容忽视。由此推断, 未来广泛分布于洋底的富钴结壳或将成为重要的碲资源储库。

4 结论

通过对中、西太平洋富钴结壳碲元素含量开展系统的分布特征研究、赋存相态及资源潜力评价, 得到以下主要结论:

(1) 中、西太平洋碲元素含量的变化范围为 17.8~

145.2 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 47.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。碲元素在 5 座海山群中的富集程度由高到低依次为: 麦哲伦海山群、马绍尔海山群、马尔库斯维克海山群、中太平洋海山群和莱恩海山链, 碲元素含量在所研究海山中的平均值区域上呈现东高西低的趋势。

(2) 碲元素含量与水深剖面呈径向相同、纬向相反的趋势, 说明碲元素的富集不仅与结壳在海水中的产出深度有关, 还与所处的经纬度、海山地形及区域成矿环境密切相关。

(3) 碲元素赋存于铁氧化物相和残渣态, 富氧环境、生物作用磷酸盐化对碲的富集起决定性作用, 碲元素或与铂族元素具有相近的载荷系数且成正相关关系, 因此在海底特殊环境中可能具有相同的富集机制。

(4) 中、西太平洋调查海山富钴结壳样品主要伴生碲元素的含量均达到工业品位要求, 根据干结壳量估算西、中太平洋碲元素的资源量远大于 7.63 万 t, 未来广泛分布于洋底的富钴结壳将成为碲元素的重要资源储库。

参考文献:

- [1] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, 5(3): 167-174.
Li Tong. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochimica*, 1976, 5(3): 167-174.
- [2] Bureau of Mines United States Department of the Interior. Mineral commodity summaries[R]. Washington: 1990.
- [3] 中国地质矿产信息研究院. 中国矿产[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1993.
China Academy of Geology and Mineral Information. Mineral Resources of China[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 1993.
- [4] National Minerals Information Center. Mineral Commodity Summaries 2018[M]. Reston, Virginia: National Minerals Information Center, 2018: 1-200.
- [5] Naumov A V. Selenium and tellurium: state of the markets, the crisis, and its consequences[J]. *Metallurgist*, 2010, 54(3/4): 197-200.
- [6] Hein J R, Koschinsky A, Halliday A N. Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(6): 1117-1127.
- [7] Baturin G N. Tellurium and thallium in ferromanganese crusts and phosphates on oceanic seamounts[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2007, 413(2): 331-335.

- [8] 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等. 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, 2011, 36(1): 1-11.
Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Zhu Kechao, et al. Resource estimation of Co-rich crusts of seamounts in the Pacific[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 1-11.
- [9] Bogdanova O Y, Gorshkov A I, Novikov G V, et al. Mineralogy of morphogenetic types of ferromanganese deposits in the world ocean[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2008, 50(6): 462-469.
- [10] 赵广涛, 何雨暘, 陈淳, 等. 太平洋铁锰结核与富Co结壳的矿物地球化学比较研究[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(5): 85-93.
Zhao Guangtao, He Yuyang, Chen Chun, et al. Comparison of the mineral and geochemistry characteristics between Co-rich crusts and ferromanganese nodules from the Pacific Ocean[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(5): 85-93.
- [11] 赵建如, 初凤友, 杨克红, 等. 中太平洋C海山富钴结壳铁锰矿物的组成、成分特征及其成因意义[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 15-21.
Zhao Jianru, Chu Fengyou, Yang Kehong, et al. Manganese mineral components, compositional characteristics and their implication for genesis of cobalt-rich crust from C seamount in Central Pacific[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 15-21.
- [12] 《矿产资源工业要求参考手册》编委会. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社, 2022: 60.
Editorial Board of the *Reference Manual for Industrial Requirements for Mineral Resources*. Reference Manual for Industrial Requirements of Mineral Resources[M]. Beijing: Geology Press, 2022: 60.
- [13] Koschinsky A, Hein J R. Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: solid-phase associations and seawater speciation[J]. *Marine Geology*, 2003, 198(3/4): 331-351.
- [14] 崔迎春, 石学法, 刘季花, 等. 大洋铁锰结核壳中分散元素初步研究[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 689.
Cui Yingchun, Shi Xuefa, Liu Jihua, et al. Preliminary study on dispersed elements in oceanic ferromanganese crusts[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(S1): 689.
- [15] Baturin G N, Dubinchuk V T, Azarnova L A, et al. Species of molybdenum, thallium, and tellurium in ferromanganese crusts of oceanic seamounts[J]. *Oceanology*, 2007, 47(3): 415-422.
- [16] Hein J R, Bargar J, Koschinsky A, et al. Sequestration of tellurium from seawater by ferromanganese crusts: A XANES/EXAFS perspective[R]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2007.
- [17] 武光海, 刘捷红. 海山当地物源和南极底层水对富钴结壳成矿作用的影响——来自海山周围水柱化学分析的证据[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 92-98.
Wu Guanghai, Liu Jiehong. A local metal sources and the influence of the Antarctic Bottom Water on the cobalt-rich crust formatim—New evidence from the data of seawater column chemistry around a seamount[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(3): 92-98.
- [18] 高晶晶, 刘季花, 张辉, 等. 太平洋徐福海山富钴结壳稀土元素和铂族元素赋存状态研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 77-87.
Gao Jingjing, Liu Jihua, Zhang Hui, et al. Occurrence phases of rare earth elements and platinum group elements in cobalt-rich crusts from the Seamount Xufu in the Pacific[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(11): 77-87.
- [19] 游国庆, 刘淑琴, 潘家华. 太平洋富钴结壳中碲元素的地球化学特征及其富集机制探讨[J]. 矿床地质, 2014, 33(1): 223-232.
You Guoqing, Liu Shuqin, Pan Jiahua. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of tellurium in Co-rich crusts from Pacific Ocean[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(1): 223-232.
- [20] Butler I B, Nesbitt R W. Trace element distributions in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 167(3/4): 335-345.
- [21] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 197-214.
- [22] Baturin G N. The Geochemistry of Manganese and Manganese Nodules in the Ocean [M]. Dordrecht: Springer, 1988.
- [23] McDonough W F, Sun Shensu. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [24] Yi Wen, Halliday A N, Alt J C, et al. Cadmium, indium, tin, tellurium, and sulfur in oceanic basalts: implications for chalcophile element fractionation in the Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B8): 18927-18948.
- [25] Govett G J S. Rock geochemistry in mineral exploration[J]. *Earth Science Reviews*, 1983, 17(3): 298-299.
- [26] 全国矿产储量委员会办公室. 矿产工业要求参考手册[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1987: 208-209, 646.
National Commission of Mineral Reserves. Mineral Industry Requirements Reference Manual[M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press, 1987: 208-209, 646.
- [27] 中国大洋矿产资源研究开发协会. DY105-11航次现场报告[R]. 2003.
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. DY105-11 Voyage site report[R]. 2003.
- [28] 中国大洋矿产资源研究开发协会. DY105-13航次现场报告[R]. 2004.
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. DY105-13 Voyage site report[R]. 2004.
- [29] 中国大洋矿产资源研究开发协会. DY105-15航次现场报告[R]. 2003.
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. DY105-15 Voyage site report[R]. 2003.
- [30] 中国大洋矿产资源研究开发协会. DY105-17B航次现场报告[R]. 2005.
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. DY105-17B Voyage site report[R]. 2005.
- [31] 中国大洋矿产资源研究开发协会. DY105-19航次现场报告[R]. 2007.
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. DY105-19 Voyage site report[R]. 2007.

Geochemical characteristics and resource potentiality evaluation of tellurium in Co-rich crusts from the Mid-West Pacific Ocean

Zhang Hui^{1,2}, Liu Jihua^{1,2}, Gao Jingjing^{1,2}, Cui Yingchun^{1,2}, Zhang Ying^{1,2}, Bai Yazhi^{1,2}, He Lianhua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266061, China)

Abstract: In this paper, 185 iron manganese crustal samples of 14 seamounts in 5 seamount groups of the Pacific seamount group (Central Pacific seamounts, Line seamount Chain) and the Western Pacific seamount group (Magellanic seamounts, Markus–Wake seamounts, Marshall seamounts) have been analyzed for tellurium, and their spatial distribution, geochemical characteristics, chemical form and resource potential have been studied. The results show that the variation range of tellurium in cobalt-rich crusts is from 17.8 $\mu\text{g/g}$ to 145.2 $\mu\text{g/g}$, and the average value is 47.4 $\mu\text{g/g}$. The content range and regional enrichment degree of tellurium in each seamount are quite different. The enrichment degree in descending order is the Magellanic seamounts, Marshall seamounts, Marcus–Wake seamounts, Central Pacific seamounts and Line seamount Chain, showing a trend of gradually decreasing from west to east, and different seamount groups also show obvious regional distribution characteristics. Tellurium content and water depth profile show the same radial and opposite latitudinal trends, indicating that the enrichment of Te is not only related to the depth of crust in seawater, but also related to the longitude and latitude, seamount topography, and regional metallogenic environment. The leaching results show that tellurium is mainly enriched in iron oxides and residues, and the oxygen-rich environment and biological action of phosphorylation play a decisive role in the enrichment of tellurium. Concerning the minimum industrial grade requirements for terrestrial associated useful elements, the tellurium content in cobalt-rich crusts of seamount samples in the Mid-West Pacific Ocean study areas meets the industrial grade requirements, which has potential development value. According to the estimation of cobalt-rich crust reserves, the tellurium reserves in cobalt-rich crusts in the Mid-West Pacific Ocean are more than 76 300 tons, which is an important reserve base for seafloor tellurium resources.

Key words: Cobalt-rich crusts; tellurium element; spatial distribution; enrichment mechanism; resource potential; Mid-West Pacific Ocean