

麦哲伦海山区维嘉平顶海山群富钴结壳 伴生有用元素空间分布特征

王彦美^{1,2)}, 张伙带^{1,2)}, 刘季花³⁾, 高晶晶³⁾, 黄文星^{1,2)}, 朱本铎^{1,2)}

1) 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州, 510075;

2) 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州, 510075;

3) 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛, 266061

内容提要: 本文对麦哲伦海山区维嘉平顶海山群富钴结壳样品中的伴生有用元素(REE、PGE、W、Mo、Au、Te)的空间分布特征进行了研究。研究表明:富钴结壳伴生有用元素在平面上的分布极不均匀,但多以条带状平行水深等深线分布,也有少数区域表现为斑块状分布,且不同的伴生有用元素的富集区域有所差别;REE和PGE主要在南部和西南部斜坡发育,而W、Mo则主要富集于西北部和东部斜坡,Au集中发育在东南部的海斜坡上,Te的分布呈斑块状富集于各向斜坡。随着水深增加,REE和PGE呈现出由最高含量降低后逐渐升高的变化趋势,W、Mo、Au、Te则随着水深增加含量由低升高,后略有降低,再小幅升高的变化趋势。

关键词: 富钴结壳;维嘉平顶海山群;伴生有用元素;数值变化特征;空间分布特征

富钴结壳是一种主要赋存于水深1000~4000m之间的大洋海山、洋脊和大洋台地上的黑色层状铁锰矿床(Aplin et al., 1985; Hein et al., 1985; De Carlo et al., 1987; Hein et al., 2004),富含Co、Ni、Cu、Fe、Mn等主要成矿元素,其所含的Co在军事工业中应用广泛(Manheim, 1986),伴生元素REE、PGE、W、Mo、Au、Te均具有较高的经济价值。结壳中稀土元素的含量一般在1500 $\mu\text{g/g}$ ~2500 $\mu\text{g/g}$ 之间,远高于一般的深海沉积物中的相应含量(De Carlo et al., 1991, 1992; Bau et al., 1996; 赵宏樵, 2003; 陈守余等, 2006; Baturin et al., 2006; Astakhova, 2008; 崔迎春等, 2008);孙晓明等(2006)和刘季花^①对中、西太平洋结壳资源评价的结果显示,伴生有用金属铂族元素PGE总量分别为70.09 $\times 10^{-9}$ ~629.26 $\times 10^{-9}$ 和150.00 $\times 10^{-9}$ ~1271.00 $\times 10^{-9}$,其中Ru、Rh和Pt含量接近或超过伴生铂矿床的工业品位。王嘹亮对麦哲伦海山区维嘉(MC)海山富钴结壳的主要成矿元素有过报道(王嘹亮等, 1999),维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素方面鲜有报道。维嘉平顶海山群是位于我国富钴铁锰结壳勘探合同区内的重点海山,研究该海山富

钴结壳伴生有用元素的空间分布特征,对勘探合同区内资源勘探、圈定矿址均有非常重要的指导意义。

麦哲伦海山区位于西太平洋东马里亚纳海盆,西邻马里亚纳海沟,往东逐渐向中太平洋海盆过渡,向北与马尔库斯—威克海岭相邻,南为所罗门隆起(王春生^②;初凤友^③)。维嘉平顶海山群位于麦哲伦海山区的南部,为我国富钴结壳勘探合同区内的两座海山群(采薇、维嘉)之一,形状不规则,长轴NE向,长约150km,由维嘉和维偕两个独立的平顶型海山组成。维嘉海山位于东北部,平台边缘水深1600~2200m,维偕海山位于西南部,平台边缘水深2000~2300m,山麓水深为5500m,两个海山之间以一狭长东西向山间盆地所分隔。其中维嘉海山的山顶平台东北部宽阔、西南部狭窄,地形自东北向西南缓慢倾斜下降,海山平均坡度12.6°,维偕海山平台形状不规则,总体地形自中心向周边缓慢下降,平均坡度为4.2°,维嘉平顶海山群富钴结壳主要分布在海山平台边缘和海山斜坡上。

1 样品与方法

本文选用了“十一五”期间五个航次的维嘉平

注:本文为中国大洋协会国际海底区域资源研究开发“十二·五”课题(编号:DY125-13-R-07)和国家自然科学基金资助项目“南海海底铁锰结核/结壳的成因和历史记录”(编号:91428207)的成果。

收稿日期:2016-01-15;改回日期:2017-03-24;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.015

作者简介:王彦美,女,1979年生。高级工程师,主要从事海洋矿产资源地球化学方面的研究。Email:wangyanmei@163.com。

顶海山群富钴结壳样品, 采自 29 个站位, 59 个样品, 样品包括拖网和浅钻两种类型, 其中拖网包含 3 个站位, 8 个样品 (2 个混合样, 6 个分层样); 浅钻样品包含 26 个站位, 51 个样品 (13 个混合样, 38 个分层样); 结壳样品主要分布在水深 1500 ~ 2400m 之间的海山平台边缘和海山斜坡上; 29 个站位坡度分布在 2° ~ 32° 之间, 有 86. 21% 的站位坡度在 25° 以内; 类型以板状结壳为主, 结壳厚度在 2. 3 ~ 23. 5 cm 之间, 壳层厚度在 1. 0 ~ 14. 0 cm 之间, 一般厚层结壳具有典型的三层构造, 三层结构结壳一般由上部较致密层 (褐煤层)、中部疏松层、下部致密层 (亮煤层) 组成, 颜色也相应由亮黑色—褐色—亮黑色变化。

结壳样品用超纯水清除表面的异物, 经 80℃ 预烘 4h, 然后按照样品的主构造层进行分层取样后, 经 105℃ 烘干, 粉碎至 200 目备用。

1.1 稀土元素 REE、W 及 Mo 的测试方法

实验由广州海洋地质调查局实验测试所完成, 0. 050g 试样用盐酸、氢氟酸、高氯酸加热分解, 并赶尽高氯酸, 用 1: 1 盐酸溶解后, 移至聚乙烯试管中, 定容, 摇匀。分取部分澄清溶液, 用硝酸 (2 + 98) 稀释至 10000 倍 (指试样总稀释系数为 10000) 后, 用等离子体质谱仪 (ICP-MS) (美国热电公司 X Series 2) 进行测定, 相对标准偏差 (RSD%) 小于 3. 0%, 分析精度在 3. 5% 以内。监控标准物质: GBW07337、GBW07338、GBW07339, 标准物质测试结果误差在 5. 0% 以内。

1.2 铂族元素 (PGE) 的测试方法

铂族元素的测试是由国家海洋局第一海洋研究所使用同位素稀释法来完成, 1. 000g 试样经盐酸除去碳酸盐, 加入铂族元素稀释剂, 用逆王水加热分解, Os 经蒸馏后, 溶液进行 Te 共沉淀、离子交换树脂柱, 用等离子体质谱仪 (ICP-MS) (美国热电公司 X Series II) 进行测定, 相对标准偏差 (RSD%) 小于 5. 0%, 分析精度在 5. 0% 以内。监控标准物质: MCPt-1、MCPt-2、UMT-1、WPR-1, 标准物质测试结果相对偏差在 10% 以内。

1.3 Au 的测试方法

Au 的测试是由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所使用泡沫塑料吸附—石墨炉原子吸收光谱法来完成的, 10. 0g 试样经灼烧后用王水加热分解, 在王水介质中, 用聚氨酯泡沫塑料吸附, 以硫脲溶液解洗后, 溶液直接进行金的石墨炉原子吸收光谱法 (AAS) (德国耶拿公司 ZEEnt600) 测定,

相对标准偏差 (RSD%) 小于 5. 0%, 分析精度在 5. 0% 以内。监控标准物质: MCPt-1、GSR-3、GSR-15, 标准物质测试结果相对偏差在 10% 以内。

1.4 Te 的测试方法

Te 的测试是由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所来完成, 0. 500g 试样用氢氟酸、硝酸、高氯酸加热分解, 并赶尽高氯酸, 用王水溶解后, 移至聚乙烯试管中, 定容, 研究所摇匀。分取部分澄清溶液, 用乙醇溶液 (3. 5 + 96. 5) 稀释至 500 倍 (指试料总稀释系数为 500) 后, 用等离子体质谱仪 (ICP-MS) (美国热电公司 X Series II) 进行测定, 相对标准偏差 (RSD%) 小于 3%, 分析精度在 3. 5% 以内。监控标准物质: GBW07337、GBW07338、GBW07339, 标准物质测试结果相对偏差在 5. 0% 以内。

2 结果与讨论

2.1 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素含量变化特征

将均为分层样的 3 个浅钻样品取分层样的平均值作为该站位的含量, 对 29 个站位样品伴生有用元素的最大值、最小值、平均值和方差和变异系数数据进行了统计, 见表 1。

结壳伴生有用元素中, Σ REE (包含 Y 在内的 15 项稀土元素) 的含量范围为 $1496. 02 \times 10^{-6} \sim 2669. 95 \times 10^{-6}$, 平均值为 $2006. 59 \times 10^{-6}$; 铂族元素 PGE (Ru、Pd、Ir、Pt、Rh、Os 共 6 项铂族元素的总和) 总量在 $398. 92 \times 10^{-9} \sim 1066. 19 \times 10^{-9}$ 之间, 平均值为 $639. 42 \times 10^{-9}$; 其中 Ru 的含量范围为 $9. 32 \times 10^{-9} \sim 26. 85 \times 10^{-9}$, 平均值为 $17. 09 \times 10^{-9}$, Pd 的含量范围为 $5. 41 \times 10^{-9} \sim 39. 16 \times 10^{-9}$, 平均值为 $17. 75 \times 10^{-9}$, Ir 的含量范围为 $5. 38 \times 10^{-9} \sim 8. 74 \times 10^{-9}$, 平均值为 $6. 62 \times 10^{-9}$, Pt 的含量范围为 $330. 34 \times 10^{-9} \sim 985. 20 \times 10^{-9}$, 平均值为 $578. 41 \times 10^{-9}$, Rh 的含量范围为 $9. 32 \times 10^{-9} \sim 31. 33 \times 10^{-9}$, 平均值为 $18. 73 \times 10^{-9}$, Os 的含量范围为 $0. 23 \times 10^{-9} \sim 1. 42 \times 10^{-9}$, 平均值为 $0. 82 \times 10^{-9}$ 。W 的含量变化范围为 $24. 24 \times 10^{-6} \sim 108. 54 \times 10^{-6}$, 平均值为 $71. 62 \times 10^{-6}$; Mo 的含量变化范围为 $332. 16 \times 10^{-6} \sim 662. 00 \times 10^{-6}$, 平均值为 $523. 41 \times 10^{-6}$; Au 含量变化范围为 $0. 28 \times 10^{-9} \sim 1. 04 \times 10^{-9}$, 平均值为 $0. 50 \times 10^{-9}$; Te 的含量变化范围为 $42. 79 \times 10^{-6} \sim 73. 90 \times 10^{-6}$, 平均值为 $55. 49 \times 10^{-6}$ 。

表 1 中列出的各元素的方差反映了各元素样本

表 1 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素含量变化特征

Table 1 The abundance of associated useful elements in Co – rich crusts from Weijia Guyots

特征值	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE
	(× 10 ⁻⁶)															
最小值	207.16	706.88	35.39	144.86	29.21	7.41	36.05	5.25	33.57	7.45	20.85	3.04	20.61	3.14	156.34	1496.02
最大值	382.56	1423.20	60.36	250.80	50.35	12.38	61.56	8.84	60.00	14.43	42.23	5.80	38.52	6.01	615.96	2669.95
平均值	285.11	1012.36	46.17	191.04	37.52	9.38	47.10	6.63	42.35	9.47	27.03	3.83	26.18	4.02	258.42	2006.59
标准偏差	44.95	201.64	6.59	28.26	5.81	1.38	6.04	0.95	6.20	1.48	4.38	0.57	3.70	0.58	100.84	300.46
变异系数	0.16	0.20	0.14	0.15	0.15	0.15	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.39	0.15
站位数	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29

特征值	Ru	Pd	Ir	Pt	Rh	Os	PGE	W	Mo	Au	Te
	(× 10 ⁻⁹)							(× 10 ⁻⁶)		(× 10 ⁻⁹)	(× 10 ⁻⁶)
最小值	9.32	5.41	5.38	330.34	9.32	0.23	398.92	24.24	332.16	0.28	42.79
最大值	26.85	39.16	8.74	985.20	31.33	1.42	1066.19	108.54	662.00	1.04	73.90
平均值	17.09	17.75	6.62	578.41	18.73	0.82	639.42	71.624	523.41	0.50	55.49
标准偏差	4.37	11.37	0.93	152.58	5.51	0.35	158.20	22.40	75.76	0.19	7.32
变异系数	0.26	0.64	0.14	0.26	0.29	0.43	0.25	0.31	0.14	0.38	0.13
站位数	29	29	29	29	29	29	29	29	29	19	29

注：Σ REE 为含 Y 在内的 15 项稀土元素总和；PGE 为 Ru、Pd、Ir、Pt、Rh、Os 共 6 项铂族元素的总和。

间的含量的差值,而变异系数(采用方差与平均值之比)可以判断样本间元素含量的相对差异。根据变异系数的大小,变异系数值越大,元素含量分布越不均匀。伴生有用元素的变异系数在 0.031~0.64 之间,平均值为 0.20,可以看出,稀土元素中除 Y 以外的其他元素变异系数均小于平均值,说明其元素含量分布较为均匀,而稀土元素 Y 和铂族元素中 Ru、Pd、Pt、Rh、Os 以及 W、Au 的变异系数大于平均值,其中 Au 的变异系数更是达到最大值 0.38, Pd 的变异系数更是达到最大值 0.64,说明该部分元素在海山结壳中的分布不均匀。

2.2 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素空间分布特征

2.2.1 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素一维分布

在维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素的一维分布时采用了纬度剖面法。海山富钴结壳主要分布在海山平台边缘和海山斜坡,维嘉选在海山东北部切过山顶平台和东、北部斜坡的纵向剖面 I—I (图 1)。

图 2 展示了维嘉平顶海山群纵向剖面(I—I)上富钴结壳伴生有用元素的变化,同时,为了直观地显示水深地形在剖面上的变化,根据站位水深数值绘制了剖面地形地貌。维嘉平顶海山群北部的纵向剖面(I—I),西起海山西北角海山斜坡—北部斜

坡—至东北角的海山斜坡,经过 11 个站位:MSD07~MSD02~MSD29-1~MSD16~MSD17~MSD42~MSD30~MSD34~MSD20~MSD45~MSD32,从图上可以看出:

REE 在该剖面上有轻微含量的起伏波动,但是与地形和水深的相关性未能很好体现。

PGE 在海山纵向剖面(I—I)位于海山北部海山斜坡的剖面上,在西北角的海山陡坡—海山平台段,随着水深变浅,PGE 含量快速降低;该剖面的东端,海山平台—海山斜坡段,随着水深增加,PGE 含量又出现急剧下降;但整体上呈现东部海山斜坡含量明显高于西部海山斜坡,水深和地形对 PGE 含量的影响未呈现明显规律。

W 和 Mo 元素在该剖面呈现大体一致的变化,在西北角的海山斜坡元素含量最高,随着水深变浅呈现缓慢降低的趋势,在中间段的海山平台段,元素含量并未发生明显的变化,剖面右端从海山平台到海山斜坡的地形多变段,两元素含量均受到地形起伏的影响,呈现急剧升高后又骤降的变化特征。

Au 元素在该剖面上的中段海山平台部分出现了高含量区域,在剖面的右端海山平台到海山斜坡的地形多变段,Au 元素含量呈现逐渐升高的趋势,Au 元素含量与水深和地形的变化未呈现明显的相关性。

Te 元素在该剖面上的含量变化与 W 和 Mo 元

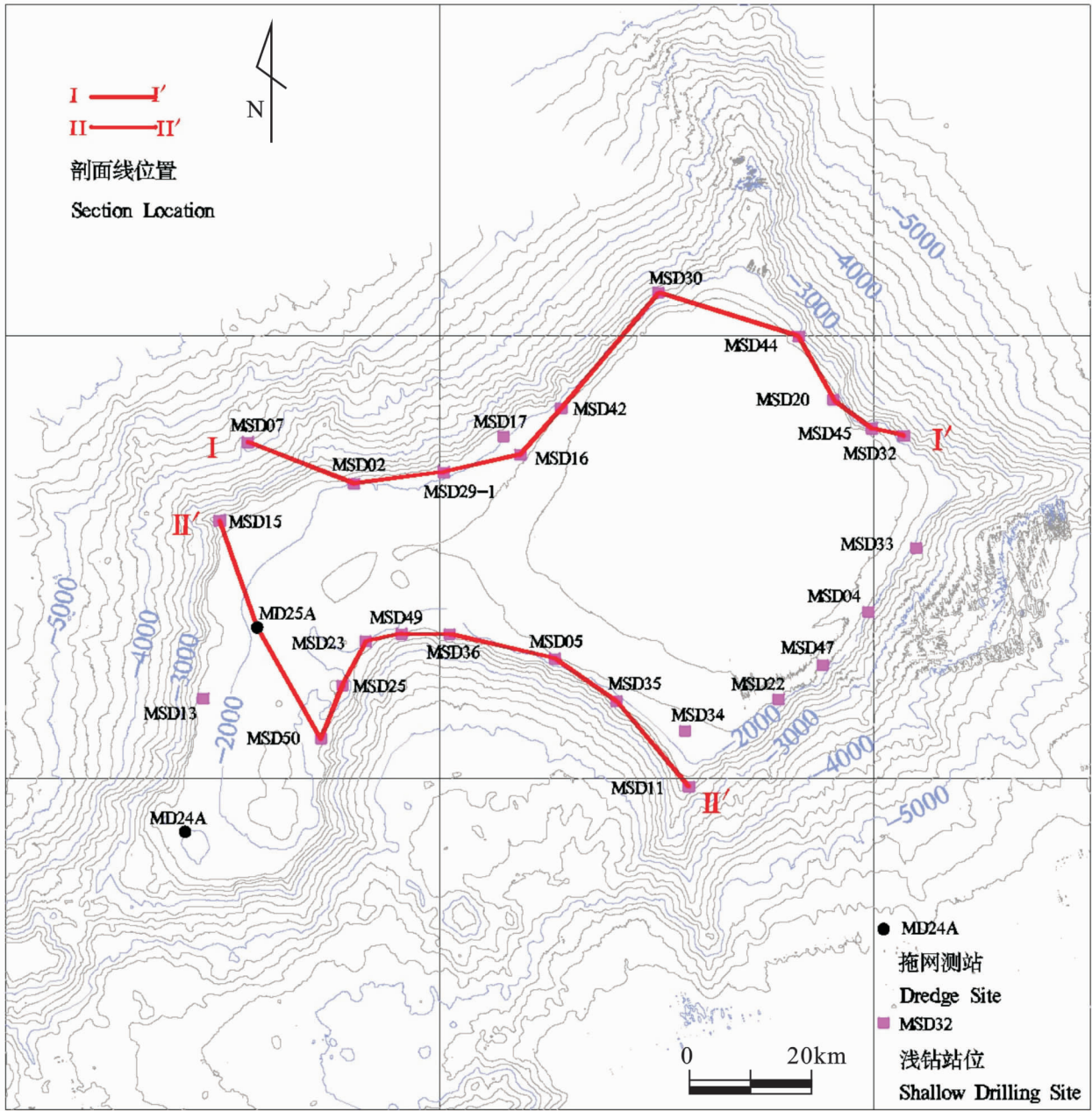


图 1 维嘉平顶海山群富钴结壳取样站位及一维分布剖面
(I—I ,II—II)位置图

Fig. 1 The location map of Co-rich crusts and the the distribution profile(I—I ,II—II)in Weijia Guyots

素的变化呈现大体上一致的趋势,在剖面左端随着水深变浅,元素含量逐渐降低,在剖面右端,Te 元素含量呈现急剧升高后又骤降的变化趋势;区别之处是在中间的海山平台段,Te 元素含量呈现相对高值,而 W、Mo 元素在该区域呈现相对低值。

在维嘉平顶海山群纵向剖面(I—I)上,PGE、W、Mo、Te 元素呈现相近的变化趋势,呈现一定的相关性;而 REE 和 Au 的变化趋势则较为相近。

图 3 纵向剖面(II—II),海山西北角海山斜坡—西部山顶平台—南部山顶平台—东南角海山斜坡,也经过 10 个站位:MSD15 ~ MSD25A ~ MSD50 ~ MSD25 ~ MSD23 ~ MSD49 ~ MSD36 ~ MSD05 ~ MSD35 ~ MSD11,从图上可以看出:

维嘉平顶海山群剖面(II—II)相较于剖面(I—I),水深和地形的变化更为多样性,REE 含量在该剖面上仅在剖面中段的海山小斜坡—海山平台段出

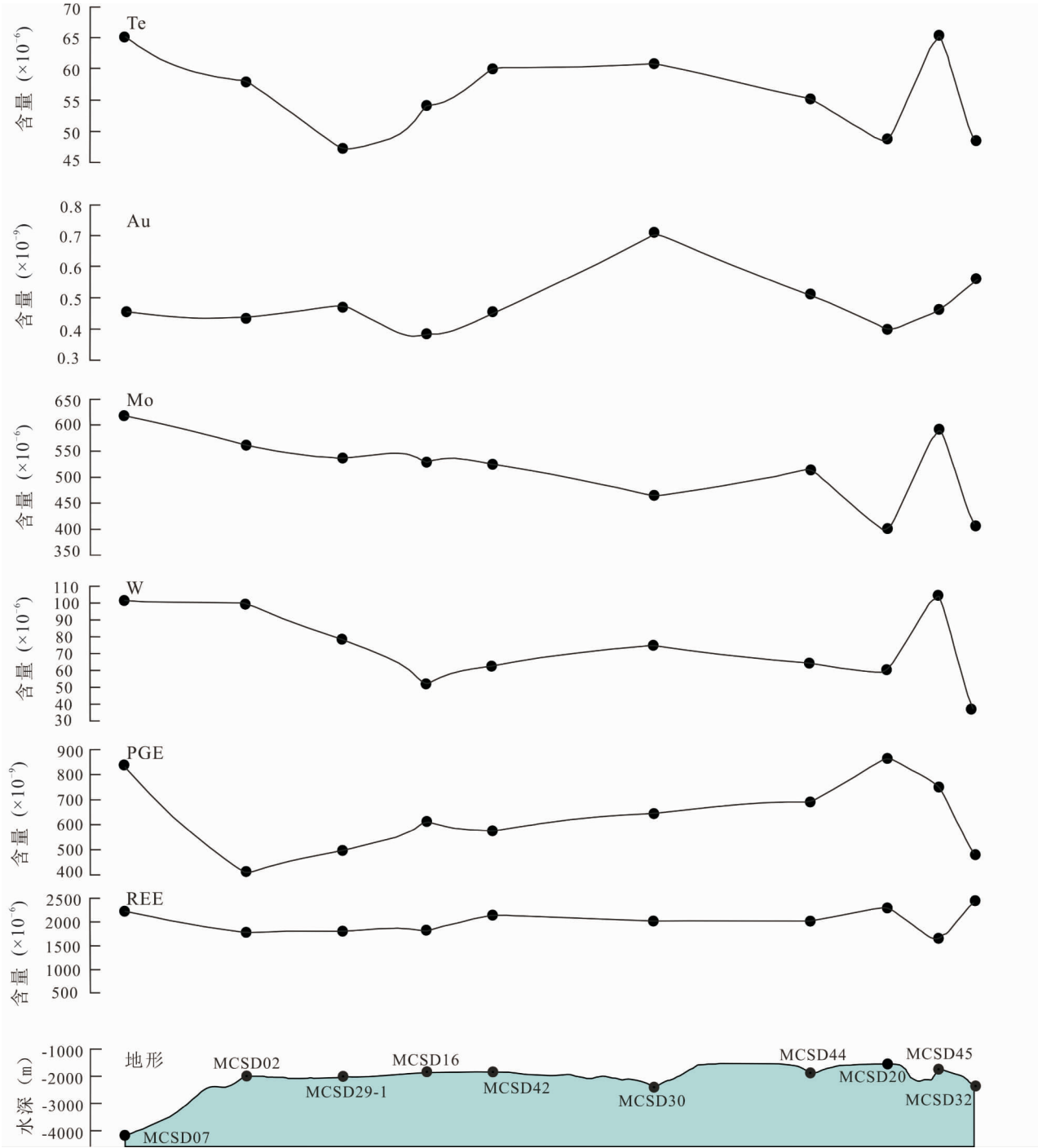


图 2 维嘉平顶海山群纵向剖面(I—I)富钴结壳伴生有用元素分布
Fig. 2 The microtopographic distribution profile(I—I) of associated useful elements in Weijia Guyots

现含量的波动,与地形和水深之间未发现明显的相关性。

PGE 含量在海山西部斜坡呈现了随着水深变浅含量变化略有浮动,自剖面中部的山峰、山谷交替出现位置至剖面东端,自西向东含量缓慢升高,在东段的山峰、山谷交替呈现,且水深逐渐加深的剖面

上,PGE 含量呈现降低的趋势。

W、Mo 在剖面的东西两端上呈现高值,中部山峰、山谷交替出现的剖面部分,较该剖面(II—II)两端的含量略有降低,与水深及地形均未发现明显的相关性。

Au 含量在该剖面上的变化整体上与 PGE 含量

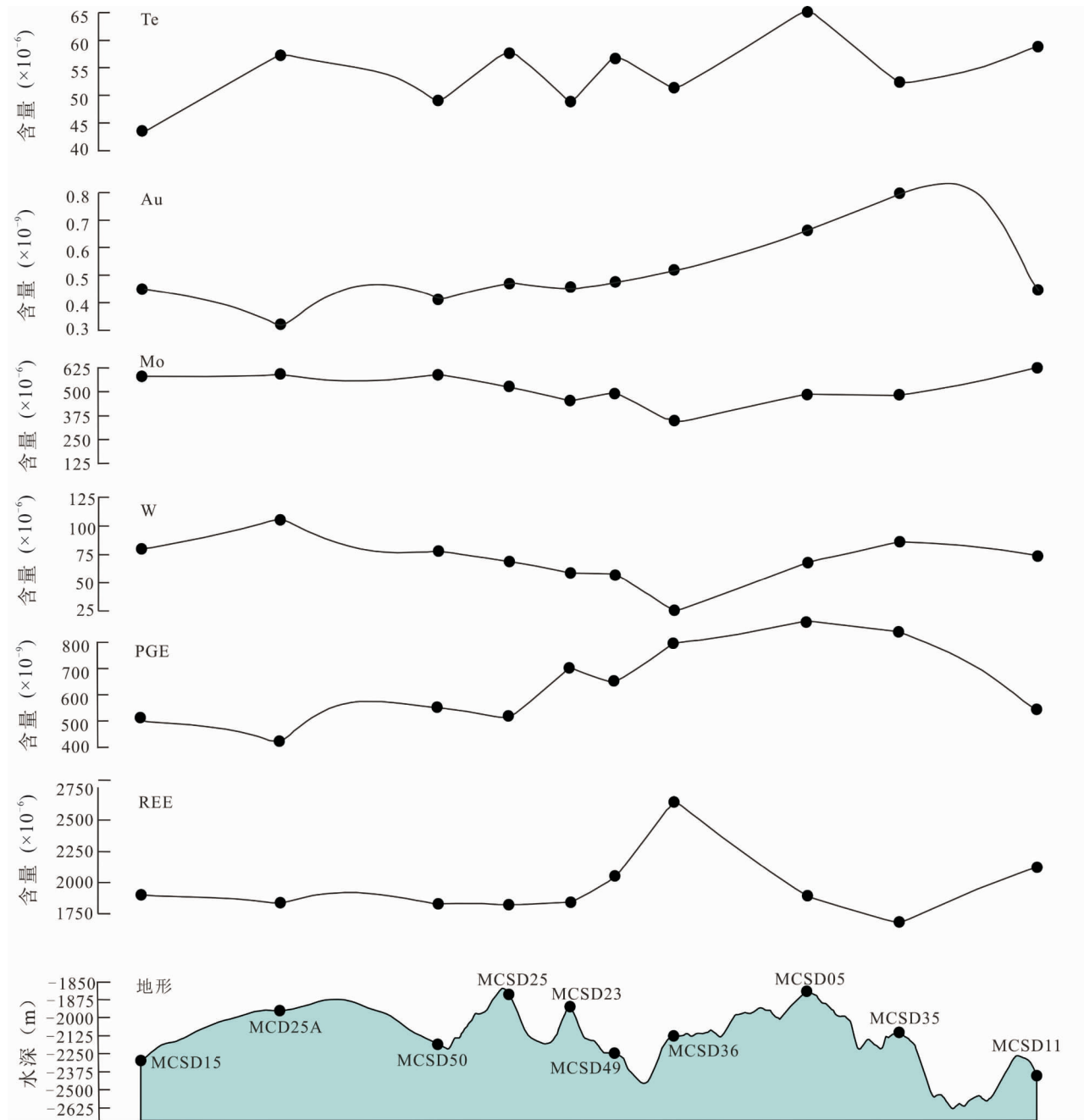


图 3 维嘉平顶海山群纵向剖面(Ⅱ—Ⅱ)富钴结壳伴生有用元素分布
Fig. 3 The microtopographic distribution profile(Ⅱ—Ⅱ) of associated useful elements in Weijia Guyots

的变化相近,均呈现出剖面东段含量高于剖面西段的特征。

Te 含量在西部海山斜坡上呈现低值,随着水深变浅,含量呈现升高的趋势,自剖面中部的山峰、山谷交替出现位置起至剖面右端,Te 含量呈现锯齿状的变化特征,与水深和地形均未能发现潜在的相关性。

在维嘉平顶海山群纵向剖面(Ⅱ—Ⅱ)上,W、Mo

元素呈现相近的变化趋势,二者之间具有一定的相关性;PGE 和 Au 的含量变化有着相近的特征,呈现剖面东半段含量明显高于剖面西半段含量;REE 和 Te 未发现明显的规律性。

综上,从维嘉平顶海山群选取的两个剖面的伴生有用元素含量变化特征,发现 W、Mo 元素呈现相近的变化趋势,二者之间具有一定的相关性;REE、PGE、Au、Te 元素含量变化之间并未发现规律,且与

水深和地形没有明显的相关性;若选取到沿斜坡垂直于水深等深线且横切过海山平台的剖面,则能更好的反映伴生有用元素与水深、海山斜坡方位之间的关系,迫于结壳分布、取样站位分布及样品量等因素的限制,未能实现。

2.2.2 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素二维分布

维嘉平顶海山群富钴结壳稀土元素 REE 含量主要集中于 $1496.00 \times 10^{-6} \sim 2670.00 \times 10^{-6}$ 之间,以 90.00×10^{-6} 为间隔进行等值线绘制。REE 的含

量最高值大于 2570.00×10^{-6} 的值仅出现于维嘉平顶海山群西部和海山南部的山顶平台,为点状的零星分布;REE 的含量在 $2120.00 \times 10^{-6} \sim 2570.00 \times 10^{-6}$ 的站位分布于维嘉平顶海山群的西部、南部、东部的山顶平台和海山斜坡上,以斑块状出现;REE 的含量在 $1760.00 \times 10^{-6} \sim 2120.00 \times 10^{-6}$ 的站位分布最广,在整个维嘉平顶海山群的北部、西部、西南部、南部的山顶平台和海山斜坡上,以大面积的条带状出现,在海山东部山顶平台山也有小面积的带状分布;REE 含量在 $1760.00 \times 10^{-6} \sim 1580.00 \times 10^{-6}$

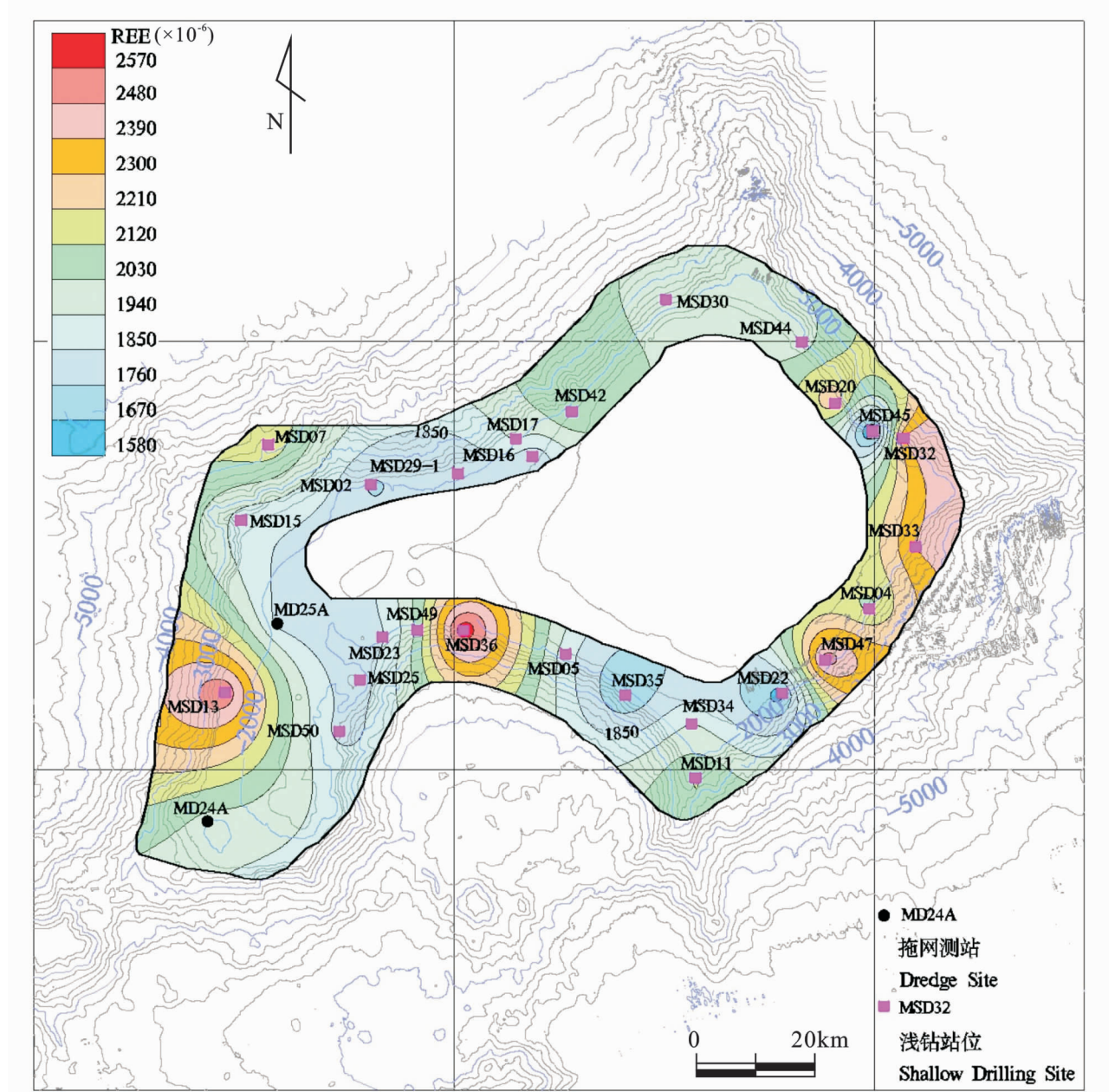


图 4 维嘉平顶海山群富钴结壳 REE 含量分布图
Fig. 4 The contour map of REE in Co-rich crusts from Weijia Guyots

的站位以斑块状和条带状分布在维嘉的南部的西部的山顶平台和海山斜坡上(图 4)。

维嘉平顶海山群富钴结壳铂族元素 PGE 含量主要集中于 $399.00 \times 10^{-9} \sim 1066.00 \times 10^{-9}$ 之间,以 50.00×10^{-9} 为间隔进行等值线绘制。PGE 的高含量大于 1000.00×10^{-9} 的值仅出现在维嘉平顶海山群西部的海山斜坡上,为点状零星分布;PGE 含量在 $800.00 \times 10^{-9} \sim 1000.00 \times 10^{-9}$ 之间的站位主要分布在维嘉平顶海山群西部、南部的山顶平台和海

山斜坡上,呈斑块状出现,另在海山西北角的海山斜坡和东北部的山顶平台上有斑点状的零星分布;PGE 含量在 $650.00 \times 10^{-9} \sim 800.00 \times 10^{-9}$ 之间的站位主要呈现条带状分布在上述的高值区域的外围;PGE 含量在 $500.00 \times 10^{-9} \sim 650.00 \times 10^{-9}$ 之间的站位主要呈现条带状大范围分布在维嘉平顶海山群的北部、西南部、东部的海山斜坡上;PGE 含量低于 500.00×10^{-9} 的站位主要条带状分布在海山西部、东北部的山顶平台和西北部的海山斜坡上(图

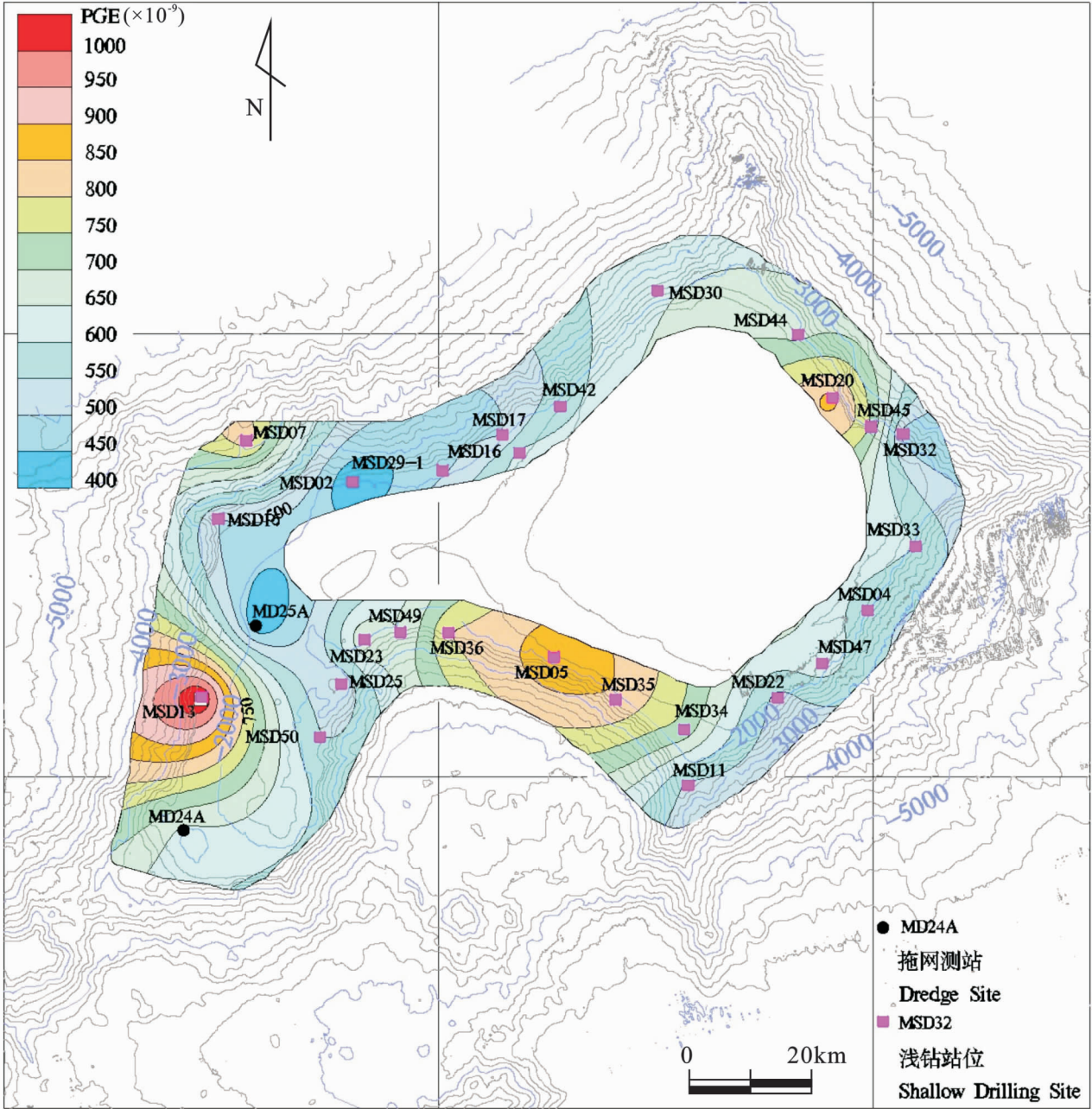


图 5 维嘉平顶海山群富钴结壳 PGE 含量分布图

Fig. 5 The contour map of PGE in Co-rich crusts from Weijia Guyots

5)。

维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素 W 含量变化范围为 $24.2 \times 10^{-6} \sim 109.00 \times 10^{-6}$, 以 10×10^{-6} 为间隔进行等值线图绘制。结果显示, W 含量大于 90.00×10^{-6} 的站位以带状分布于维嘉平顶海山群西北角的山顶平台和海山斜坡上; W 含量值在 $70.00 \times 10^{-6} \sim 90.00 \times 10^{-6}$ 的分布最广, 主要有 4 个区域, 以条带状分布维嘉平顶海山群的西部、西南部和东南部和北部的山顶平台和海山斜坡上, 另在

东北角的海山平台和斜坡上有斑块状的小片分布; W 含量值在 $50.00 \times 10^{-6} \sim 70.00 \times 10^{-6}$ 的站位主要成斑点状、条带状分布于海山西部、南部、东部的山顶平台和海山斜坡, 以及条带状分布于维嘉平顶海山群的北部的山顶平台、东北部的山顶平台和海山斜坡上(图 6)。

维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素 Mo 含量变化范围为 $332.00 \times 10^{-6} \sim 662.00 \times 10^{-6}$, 以 30.00×10^{-6} 为间隔进行等值线图绘制。结果显示,

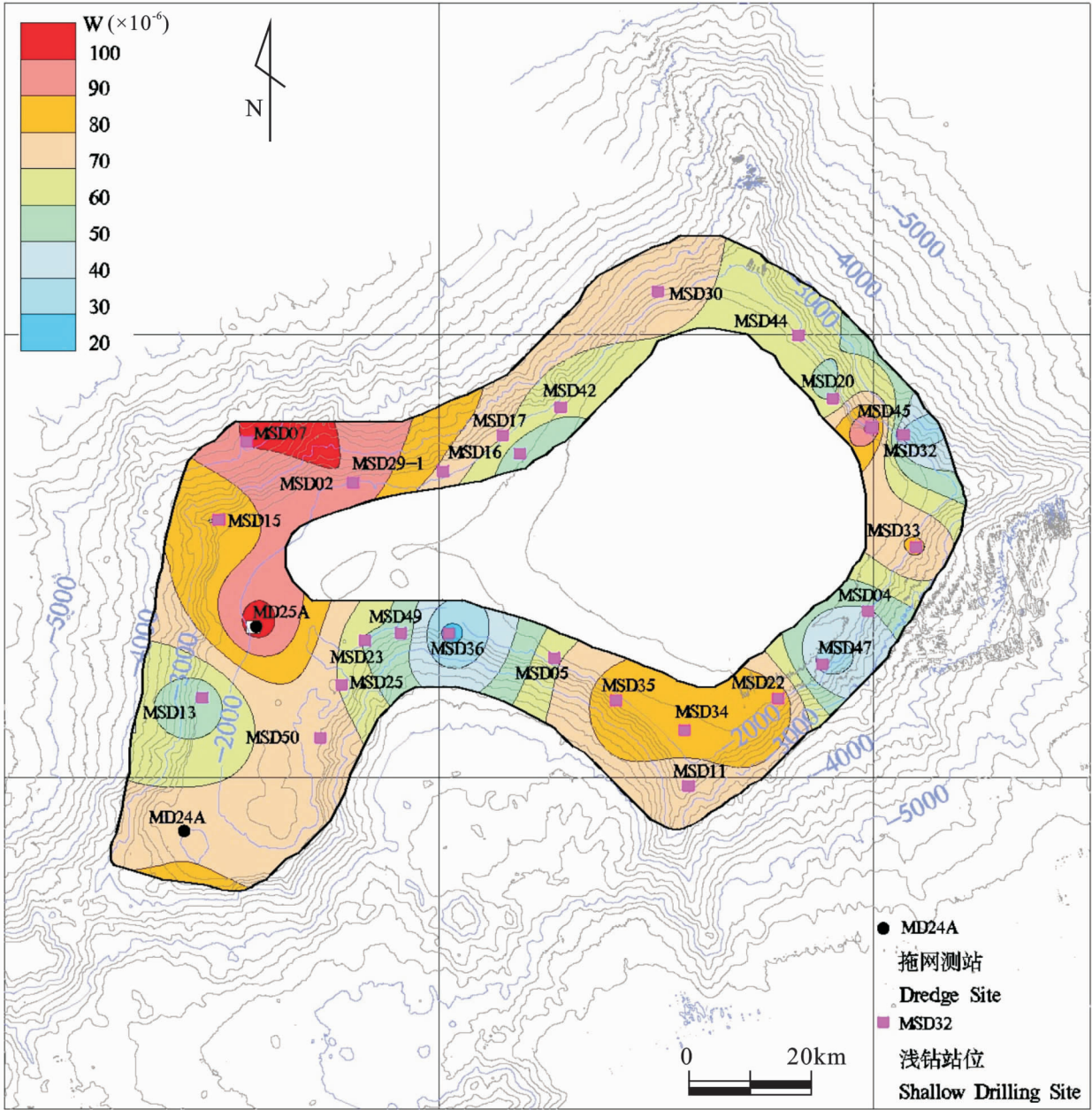


图 6 维嘉平顶海山群富钴结壳 W 含量分布图

Fig. 6 The contour map of W in Co-rich crusts from Weijia Guyots

Mo 含量大于 610.00×10^{-6} 的站位以零星的斑点状分布于维嘉平顶海山群东南角、东部、西北角的海山斜坡上;Mo 含量在 $520.00 \times 10^{-6} \sim 610.00 \times 10^{-6}$ 的分布范围较广,有两个大的区域分别分布于海山的西部及北部、东南部的山顶平台和海山斜坡上,呈现大面积的条带状,水深分布在 1800 ~ 2300m 之间;Mo 含量为 $430.00 \times 10^{-6} \sim 520.00 \times 10^{-6}$ 的值分布也比较广泛,主要以带状、环状分布于维嘉平顶海山群北部、南部、西南角的山顶平台及海山斜坡上,水深分布较广;Mo 含量低于 430.00×10^{-6} 的站位主

要呈斑点状分布于维嘉平顶海山群的南部山顶平台和海山斜坡、以及东北角的海山斜坡上(图 7)。

维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素 Au 含量分布范围为 $0.28 \times 10^{-9} \sim 1.04 \times 10^{-9}$,以 0.10×10^{-9} 为间隔进行等值线图绘制。结果显示,Au 最高含量大于 0.90×10^{-9} 的站位以零星的斑点状分布于维嘉平顶海山群东南角海山平台边缘;Au 较高含量在 $0.60 \times 10^{-9} \sim 0.90 \times 10^{-9}$ 的分布主要有三个大的区域,分别分布于海山东南部、北部、西部的山顶平台和海山斜坡上,呈块状的较大面积;Au 含量小

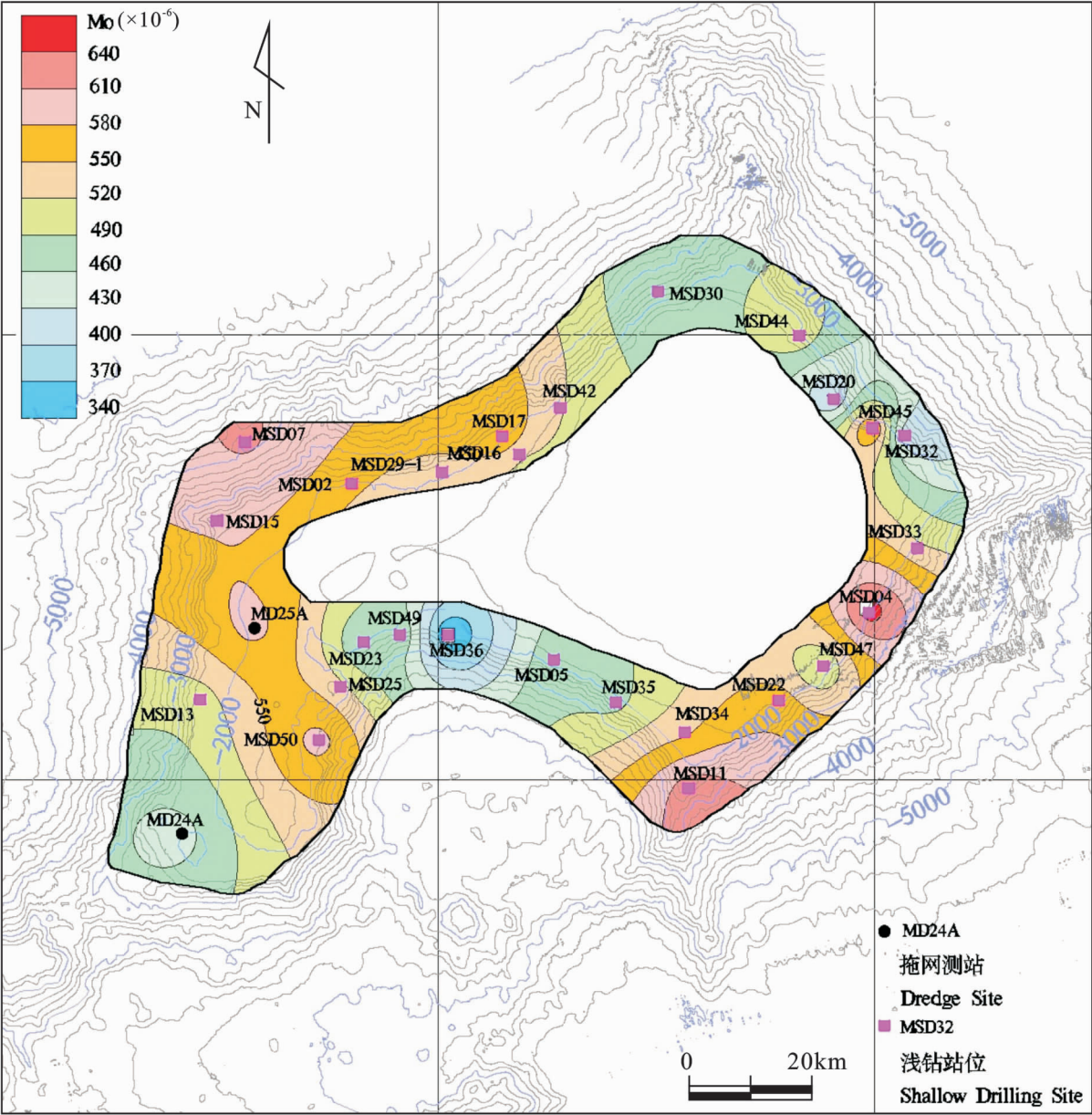


图 7 维嘉平顶海山群富钴结壳 Mo 含量分布图
Fig. 7 The contour map of Mo in Co-rich crusts from Weijia Guyots

于 0.60×10^{-9} 的值分布比较广泛,主要以条带状、环状分布于维嘉平顶海山群北部、南部、西南角的山顶平台及海山斜坡上;水深分布较广(图 8)。

维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素 Te 含量变化范围为 $42.80 \times 10^{-6} \sim 73.90 \times 10^{-6}$,以 3.00×10^{-6} 为间隔进行等值线图绘制。结果显示,高含量 Te 大于 72.00×10^{-6} 的站位以零星的斑点状分布于东部的山顶平台上;Te 含量在 $60.00 \times 10^{-6} \sim 72.00 \times 10^{-6}$ 之间的站位以小面积的斑块状分布于

维嘉平顶海山群东部、南部、西南角、西北角、北部的山顶平台和海山斜坡上;Te 含量在 $51.00 \times 10^{-6} \sim 60.00 \times 10^{-6}$ 之间的站位分布最广,以大面积的条带状分布于维嘉平顶海山群南部、东北部、北部和西部的山顶平台和海山斜坡上,水深分布在 1800 ~ 2400m 之间;Te 含量小于 50.00×10^{-6} 的站位以斑点状零星分布于维嘉平顶海山群的西北部、北部、东北部及南部的山顶平台和海山斜坡上(图 9)。

综上,在维嘉平顶海山群富钴结壳分布范围内,

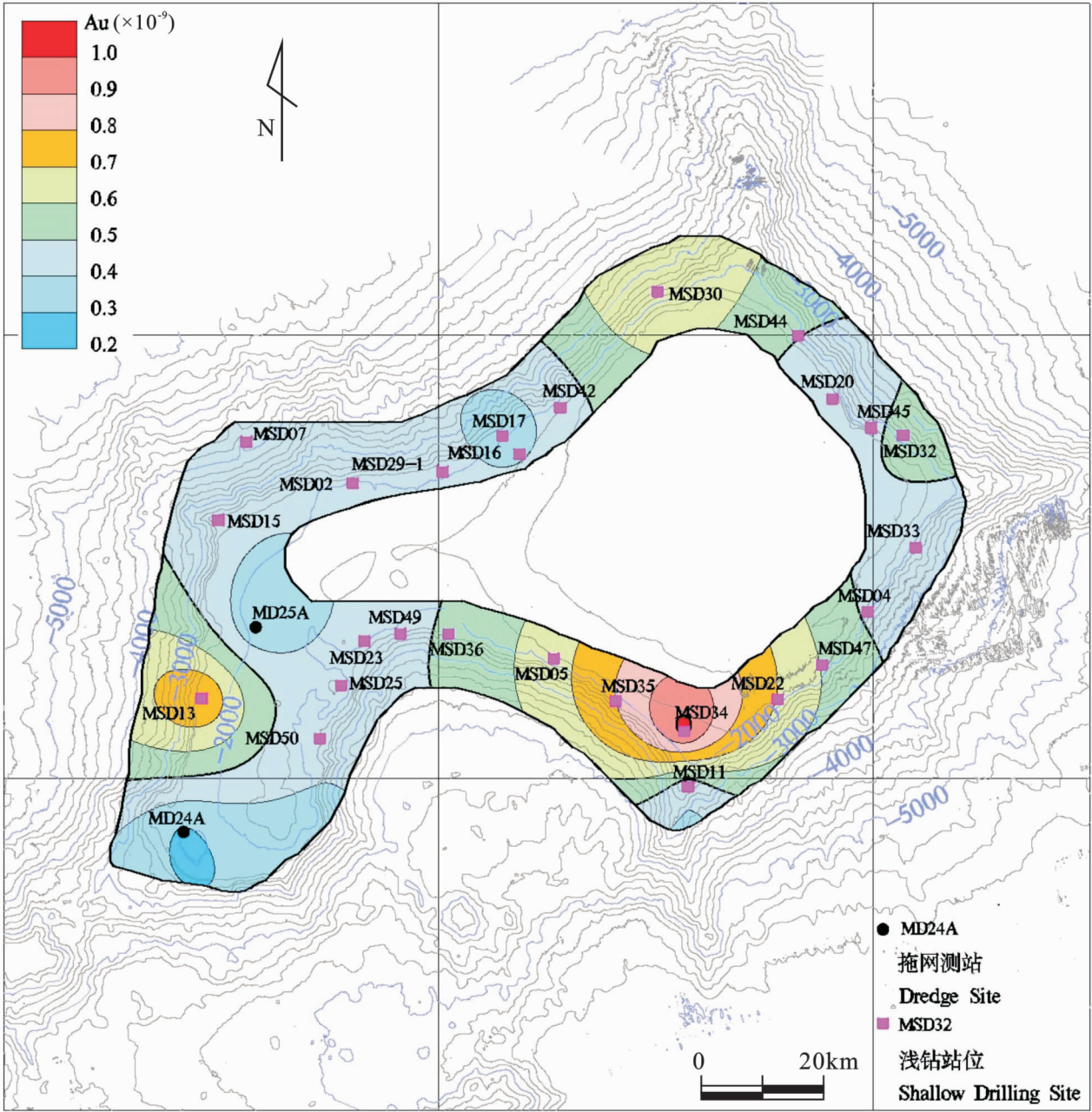


图 8 维嘉平顶海山群富钴结壳 Au 含量分布图

Fig. 8 The contour map of Au in Co-rich crusts from Weijia Guyots

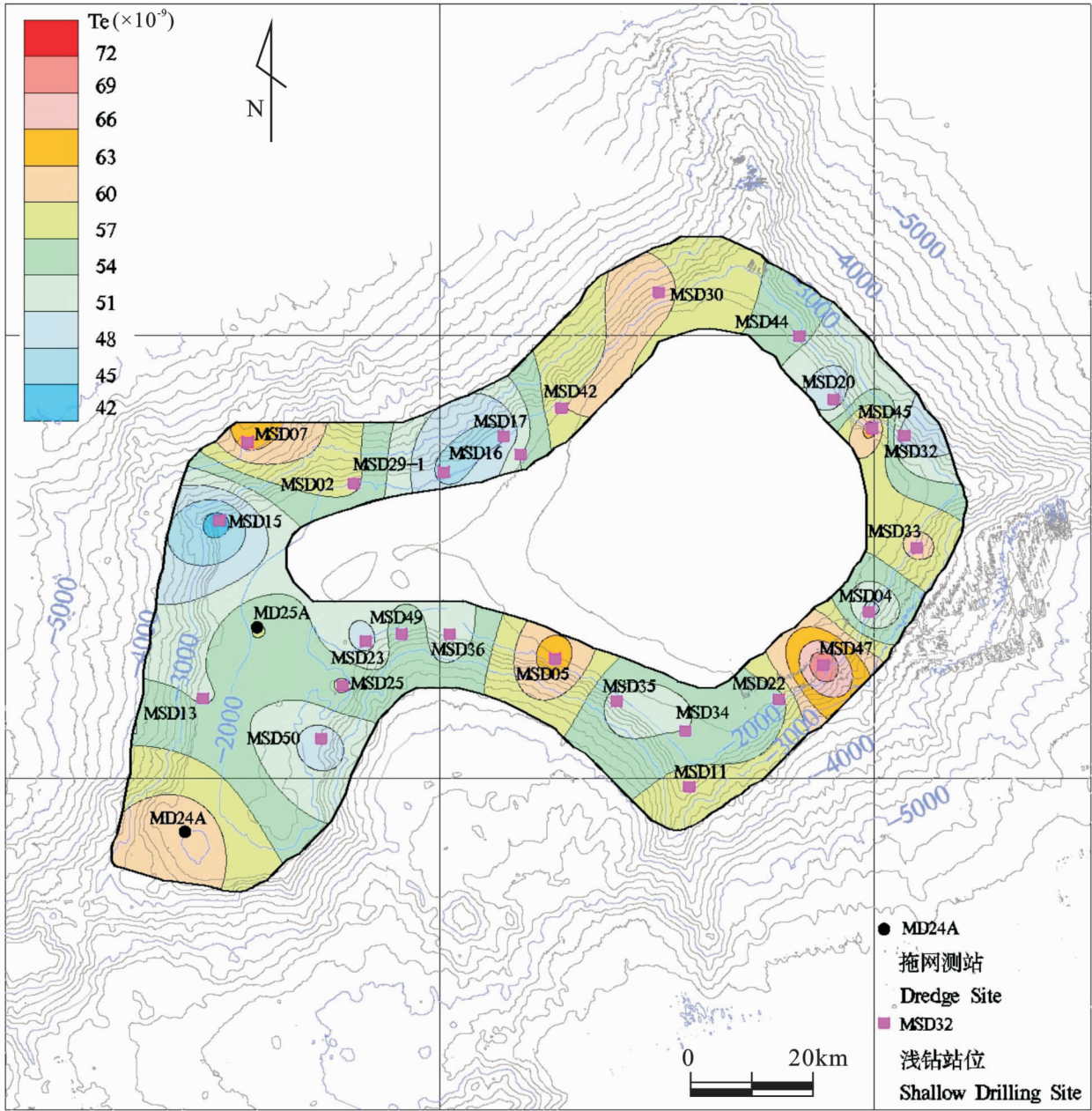


图 9 维嘉平顶海山群富钴结壳 Te 含量分布
Fig. 9 The contour map of Te in Co-rich crusts from Weijia Guyots

伴生有用元素的分布极不均匀,但多以条带状平行水深等深线分布,同时,也少数区域表现为斑块状分布;其次,在平面上不同的伴生有用元素的富集区域有所差别,例如 REE 主要在海山东部、南部、西南部的斜坡富集,PGE 主要在南部和西南部斜坡发育,而 W、Mo 则主要富集于西北部 and 东部斜坡,Au 主要集中在东南部的海上平台和斜坡发育,Te 的分布呈斑块状富集于各向斜坡。

2.2.3 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素三维分布

维嘉平顶海山群富钴结壳样品主要分布在 1550 ~ 2400m 水深,以 200m 水深间隔,分为 5 个水深段,计算不同水深段的伴生有用元素含量平均值,使用不同的色彩填图完成了维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素含量三维分布图(图 10)。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 REE 含量随着水深增加,呈现由最高值降至最低

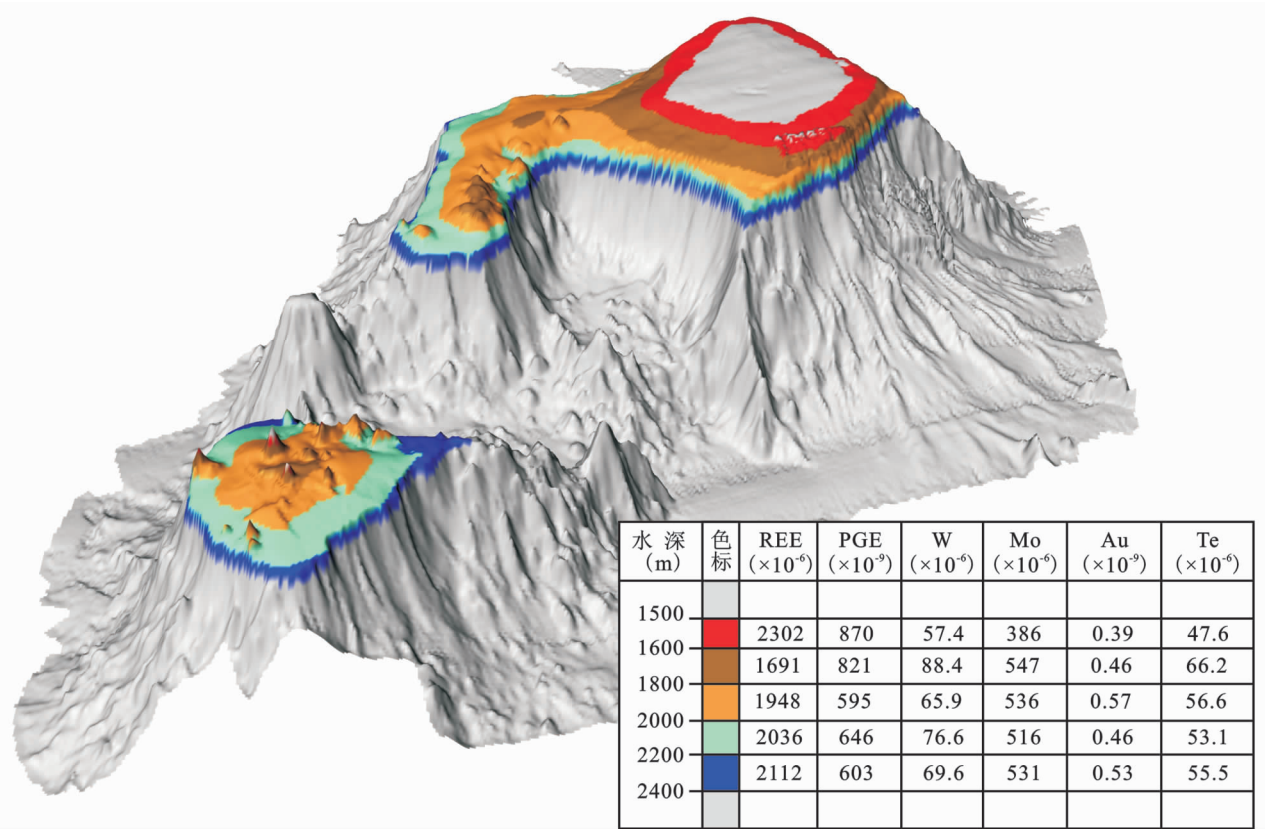


图 10 维嘉平顶海山群富钴结壳伴生有用元素含量三维分布
Fig. 10 3-dimensional map of associated useful elements in Co-rich crusts from Weijia Guyots

值,后逐渐升高的变化趋势,在 1500 ~ 1600m 的浅水段元素 REE 出现最高平均值 2302.00×10^{-6} ,在 1600 ~ 1800m 的水深段元素 REE 的最低平均值为 1691.00×10^{-6} ,整体来看,REE 与元素 W、Mo、Au、Te 在不同水深段平均含量呈现完全相反变化趋势。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 PGE 含量随着水深增加,呈现由最高值降至最低值,后又小幅升高再降低的变化趋势,在 1500 ~ 1600m 的浅水段 PGE 出现最高平均值 870.00×10^{-9} ,在 1800 ~ 2000m 的水深段 PGE 的最低平均值为 595.00×10^{-9} 。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 W 含量随着水深增加,呈现由低升高,后又降低,再升高后小幅降低的锯齿状变化趋势,与元素 Mo 的变化相似;在 1500 ~ 1600m 的浅水段元素 W 出现最低平均值 57.40×10^{-6} ,在 1600 ~ 1800m 的水深段元素 W 的最高平均值为 88.40×10^{-6} ,整体来看,在水深大于 1600m 的水深段 W 含量平均值均高于 65.00×10^{-6} 。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 Mo

含量随着水深增加,呈现由低升高,后缓慢降低,再又小幅升高的变化趋势,与元素 W 的变化相似;在 1500 ~ 1600m 的浅水段元素 Mo 出现最低平均值 386.00×10^{-6} ,在 1600 ~ 1800m 的水深段元素 Mo 的最高平均值为 547.00×10^{-6} ,整体来看,在水深大于 1600m 的水深段 Mo 含量平均值均高于 515.00×10^{-6} 。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 Au 含量随着水深增加,呈现由低—高,后降低,再升高的变化趋势,在 1800 ~ 2000m 和 2200 ~ 2400m 水深段出现高含量值分别为 0.57×10^{-9} , 0.53×10^{-9} 。

维嘉平顶海山群富钴结壳中伴生有用元素 Te 含量随着水深增加,呈现由低—高,后降低,再升高变化趋势,与元素 Mo、W 的变化相似;在 1500 ~ 1600m 的浅水段元素 Mo 出现最低平均值 47.60×10^{-6} ,在 1600 ~ 1800m 的水深段元素 Mo 的最高平均值为 66.20×10^{-6} ;整体来看,在水深大于 1600m 的水深段 Mo 含量平均值均高于 53.00×10^{-6} 。

综上,维嘉平顶海山群的伴生有用元素的三维分布图表现为,稀土元素 REE 和铂族元素 PGE 具

有相近的变化规律,其他几个伴生有用元素则呈现出有别于 REE 和 PGE 的大致相近的锯齿状变化趋势。稀土元素 REE 和铂族元素 PGE 分别在 1500 ~ 1600m、1500 ~ 1800m 相对较浅水深段的区域出现高含量值,在 2000 ~ 2400m 的深水层出现次高值,REE 随着水深加深呈现出由高降低后逐渐升高的变化趋势,PGE 随着水深加深呈现出由高逐渐降低后升高再降低的变化趋势;W、Mo、Au、Te 则在 1500 ~ 1600m 浅水层出现各自的最低含量值,其中 W、Mo、Te 三元素均在 1600 ~ 1800m 出现最高含量值,元素 Au 含量最高值则出现在 1800 ~ 2000m 的水深段,其中元素 W 呈现出随着水深增加含量由低升高,后降低,小幅升高后略微降低的变化趋势。伴生元素 Mo、Au、Te 则大致呈现出随着水深增加含量由低升高,后略有降低,再小幅升高的变化趋势。

3 结论

(1)从维嘉平顶海山群的两个剖面的伴生有用元素含量变化特征,发现 W、Mo 元素呈现相近的变化趋势,但伴生元素含量变化与水深和地形没有明显的相关性。

(2)在维嘉平顶海山群富钴结壳分布范围内,伴生有用元素的分布极不均匀,但多以条带状平行水深等深线分布,同时,也少数区域表现为斑块状分布;其次,在平面上不同的伴生有用元素的富集区域有所差别,例如 REE 和 PGE 主要在南部和西南部斜坡发育,而 W、Mo 则主要富集于西北部 and 东部斜坡,Au 主要集中在东南部的海上平台和斜坡发育,Te 的分布呈斑块状富集于各向斜坡。

(3)从维嘉平顶海山群富钴结壳三维分布看出,稀土元素 REE 和铂族元素 PGE 具有相近的变化规律,二者随着水深增加呈现出由最高含量降低后逐渐升高的变化趋势;W、Mo、Au、Te 则随着水深增加含量由低升高,后略有降低,再小幅升高的变化趋势。

注 释 / Notes

① 刘季花. 2011. 中国调查区富钴结壳小尺度分布规律研究 (DY115-01-1-03). 中国大洋协会.
① LIU Jihua. . Research for small scale distributions of Co-rich Crusts in China survey area. China Ocean Mineral Resources Research and Development Association (COMRA).
② 王春生. 2008. 我国首次环球大洋科学考察 DY115-17B 航次报告. 中国大洋协会.
② WANG Chunsheng. 2008. Voyage Reports of DY115-17B for the first global ocean expedition in China. China Ocean Mineral Resources

Research and Development Association (COMRA).

③ 初凤友. 2008. “十一·五”大洋富钴结壳资源与环境调查 DY115-18 航次报告. 中国大洋协会.
③ CHU Fengyou. 2008. Voyage Reports of DY115-18 for the resources and environmental Surveys of the cobalt-rich ferromanganese crusts in Ocean. China Ocean Mineral Resources Research and Development Association (COMRA).]

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
陈守余, 张海生, 赵鹏大. 2006. 中太平洋和中国南海富钴结壳稀土元素地球化学. 海洋地质与第四纪地质, 26(4): 45 ~ 50.
崔迎春, 刘季花, 任向文, 石学法. 2008. 中太平洋 M 海山富钴结壳稀土元素地球化学. 中国稀土学报, 2008, 26(6): 760 ~ 768.
孙晓明, 薛婷, 何高文, 张美, 石贵勇, 王生伟, 陆红峰. 2006. 太平洋海山富钴结壳铂族元素 (PGE) 和 Os 同位素地球化学及其成因意义, 岩石学报, 022(12): 3014 ~ 3026.
王嘹亮, 钟和贤, 曾繁彩, 李扬, 朱克超. 1999. 麦哲伦海山区 MA、MC 海山富钴结壳元素间关系及成因意义. 南海地质研究, 00: 26 ~ 46.
赵宏樵. 2003. 中太平洋富钴结壳稀土元素的地球化学特征. 东海海洋, 21(1): 19 ~ 26.
Aplin A C and Cronan D S. 1985. Ferromanganese oxide deposits from the Central Pacific Ocean, I. Encrustations from the Line Island Archipelago. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49(2): 427 ~ 436.
Astakhova N V. 2008. Noble, rare-earth, and nonferrous metals in ferromanganese crusts from submarine volcanoes of the Sea of Japan. Doklady Earth Science, 422(1): 1161 ~ 1166.
Baturin G N, Dubinchuk V T, Azarnova L A, Mel'nikov M E. 2006. Minerals of rare earth elements in the phosphate fraction of ferromanganese crusts on seamounts. Doklady Earth Science, 411(2): 1362 ~ 1365.
Bau M, Koschinsky A, Stachelit A, Hein J R. 1996. Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(10): 1709 ~ 1725.
CHEN Shouyu, ZHANG Haisheng, ZHAO Pengda. 2006&. Rare Earth Element Geochemistry of Co-rich Crust in the Mid-Pacific and South China Sea. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(4): 45 ~ 50.
CUI Yingchun, LIU Jihua, REN Xiangwen, SHI Xuefa. 2008&. Geochemistry of rare earth elements in cobalt-rich crusts from the Mid-Pacific M seamounts. Journal of Rare Earths, 26(6): 760 ~ 768.
De Carlo E H, Pennywell P A, Fraley C M. 1987. Geochemistry of ferromanganese deposits from the Kiribati and Tuvalu Region of the west central Pacific Ocean. Mar. Min. 6: 301 ~ 321.
De Carlo E H. 1991. Paleooceanographic implications of rare earth element variability within a Fe—Mn crust from the central Pacific Ocean. Marine Geology, 98(91): 449 ~ 467.
De Carlo E H, McMurtry G M. 1992. Rare-earth element geochemistry of ferromanganese crusts from the Hawaiian Archipelago, Central Pacific. Chemical Geology, 95(3 ~ 4): 235 ~ 250.
Hein J R, Manheim F T, Schwab W C, Davis A S. 1985. Ferromanganese crusts from Necker Ridge, Horizon Guyot and S. P.

- Lee Guyot: geological considerations. *Marine Geology*, 69(1~2): 25~54.
- Hein J R. 2004. Cobalt-rich ferromanganese crusts: Global distribution, composition, origin and research activities. In: International Seabed Authority eds. *Minerals Other than Polymetallic Nodules of the International Seabed Area. Proceedings of a Workshop held on 26 ~ 30 June 2000. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority*, 188~256.
- Manheim F T. 1986. Marine cobalt resources. *Science*, 232(4750): 600~608.
- SUN Xiaoming, XUE Ting, HE Gaowen, ZHANG Mei, SHI Guiyong, WANG Shengwei, LU Hongfeng. 2006. Platinum group elements (PGE) and Os isotopic geochemistry of ferromanganese crusts from Pacific Ocean seamounts and their constraints on genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 3014~3026.
- WANG Liaoliang, ZHONG Hexian, ZENG Fancui, LI Yang, ZHU Kechao. 1999. Interelement relationships and their implications for crust genesis in cobalt-rich ferromanganese crusts from the MA and MC seamounts of the Magellan seamounts. *Geological Research of South China Sea*, 00: 26~46.
- ZHAO Hongqiao. 2003. Rare earth elements geochemistry in Co-rich crust. *Donghai Marine Science*, 21(1): 19~26.

The Spatial Distributions of the Associated Useful Elements in Co-rich Crusts from Weijia Guyots in Magellan Seamounts

WANG Yanmei^{1, 2)}, ZHANG Huodai^{1, 2)}, LIU Jihua³⁾, GAO Jingjing³⁾, HUANG Wenxing^{1, 2)}, ZHU Benduo^{1, 2)}

1) *Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou*, 510075;

2) *Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou*, 510075;

3) *First Institute of Oceanography Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao*, 266061

Abstract: Spatial distribution of associated useful elements (REE, PGE, W, Mo, Au, Te) in Co-rich Crusts from Weijia guyots in Magellan Seamounts is studied in this paper. The study shows that the distribution of associated useful elements is highly uneven in Weijia Guyots. But generally, distribution is paralleled to the water depth, except that a few areas show patch distribution. Enrichment areas of different associated useful elements are different. REE and PGE are enriched on the southern and southwestern slope, while W and Mo are enriched on the northwestern and eastern slope. Au is enriched on the southeastern slope. But the content of Te element is the same on each side of slopes. As the water depth increases, the content of REE and PGE ascend to maximum and then descend gradually. The content of W, Mo, Au and Te ascend first, then descend a little, and ascend again as the water depth increases.

Key words: Co-rich Crusts; Weijia Guyots; associated useful element; numerical characteristic; spatial distributions.

First author: WANG Yanmei, female, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in geochemical analysis of marine mineral resources. Email: wangyanmei@163.com

Manuscript received on: 2016-01-15; Accepted on: 2017-03-24; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.015