

钴结壳矿区圈定和资源评价的参数指标

张富元¹, 章伟艳¹, 朱克超², 胡光道³, 殷汝广⁴, 程永寿⁴

1. 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

4. 国家海洋信息中心, 天津 300171

摘要: 大洋海山钴结壳集海洋资源和环境双重信息, 各国对它的调查研究方兴未艾. 钴结壳资源勘查的最终目的是圈定钴结壳矿区和开发钴结壳资源. 迄今为止, 国内外尚未就钴结壳矿区圈定和资源评价给出具体的参数指标, 基于我国近十年对西太平洋 26 座海山钴结壳资源调查, 结合太平洋环境资料, 在深入分析钴结壳厚度、丰度、品位、覆盖率、资源量、面积、海山坡度和水深资料的基础上, 对 13 座重点海山进行了钴结壳矿区圈定、资源评价和钴结壳分布规律的系统研究, 进而提出圈定钴结壳矿区的八项重要参数指标: 钴结壳矿区的结壳厚度为 ≥ 3 cm 或 ≥ 4 cm, 取决于海山具体地理位置; 水深为 ≤ 2500 m 或 ≤ 3000 m; Co 含量为 $\geq 0.50\%$ 或 $\geq 0.60\%$; 丰度为 ≥ 60 kg/m² 或 ≥ 70 kg/m²; 坡度为 $\leq 15^\circ$; 结壳覆盖率为 $\geq 30\%$; 钴结壳矿区的申请面积为 17000 ~ 20000 km², 矿区最终保留面积为 5000 ~ 6000 km². 钴结壳矿区 8 项参数指标的提出, 将有力地促进大洋钴结壳矿区圈定、资源量计算和资源评价工作, 为我国积极参与联合国海底管理局制定钴结壳资源开发利用规章制度提供量化参考指标.

关键词: 西太平洋; 钴结壳; 资源评价; 参数指标.

中图分类号: P628; P744

文章编号: 1000-2383(2008)02-0251-08

收稿日期: 2007-05-25

Parameter and Index for Delineation and Evaluation of Co-Rich Crust Resources

ZHANG Fu-yuan¹, ZHANG Wei-yan¹, ZHU Ke-chao², HU Guang-dao³, YIN Ru-guang⁴, CHENG Yong-shou⁴

1. Key Lab of Submarine Geoscience, The Second Ocean Institute, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey of MLR, Guangzhou 510760, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. National Marine Information Center, Tianjin 300171, China

Abstract: Marine Co-riched crusts are important as potential mineral resources for Co, Ni, Pt, Mn, and other metals, as well as for the paleoenvironment signals stored in their stratigraphic layers. The higher Co, Ni and Pt content of crusts relative to abyssal polymetallic nodules and hydrothermal deposits have made seamount crusts a potential target for commercial exploitation and has thus led to a surge of interest in their genesis and geochemistry. Twenty-six seamounts and guyots in the Western Pacific (Magellan Seamounts, Marcus-Wake Mountains, Marshall Islands, Mid-Pacific Mountains, Line Islands) were sampled in detail, environmentally surveyed, and photographed by bottom cameras in order to better understand the distribution, origin, and evolution of marine Co-enriched crusts by Second Institute of Oceanography of SOA and Guangzhou Marine Geological Survey of MLR in the last decade. The major purpose of exploiting Co-riched crusts is to delineate and mine the deposits. Unfortunately, the parameter and index for delineating and evaluating the crust resources are not available so far. Based on the various data collected from the twenty-six seamounts and guyots, together with marine environment information of the Pacific, we have analyzed the changes of crust thickness, abundance, grade, coverage, resource amount, seamount slope and water depth by the quantitative method. We determined the mine area, studied the

基金项目: 国家科技部项目(Nos. 2004DIB3J086, 2006FY220400); 国家自然科学基金项目(No. 40676061); 中国大洋协会(No. DY105-01-01-05).

作者简介: 张富元(1952-), 男, 研究员, 主要从事海洋地质研究和海洋矿产资源评价. E-mail: fzyzhang2003@163.com

distribution characteristics of crust resources, delineated and evaluated the crust resources of thirteen typical seamounts and guyots. Accordingly proposed eight important parameters and indexes for delineating and evaluating Co-enriched crust deposits: (1) crust thickness ≥ 3 cm or ≥ 4 cm, depending on the different seamount locations; (2) water depth $\leq 2\ 500$ m or $\leq 3\ 000$ m; (3) Co content $\geq 0.50\%$ or $\geq 0.60\%$; (4) abundance ≥ 60 kg/m² or ≥ 70 kg/m²; (5) seamount slope $\leq 15^\circ$; (6) crust coverage $\geq 30\%$; (7) application area 17 000–20 000 km²; (8) reservation area 5 000–6 000 km². The parameters and indexes we present here will promote the deposit delineation, resource estimation and evaluation, and will also provide the quantitative parameter index for our country's active participation into the establishment of regulations on exploiting Co-enriched crust resources by the International Sea-bed Authority of United Nations.

Key words: Western Pacific; Co-rich crust; resource evaluation; parameter index.

洋底海山钴结壳是 Mn、Cu、Co、Ni、Pt 和其他金属的潜在矿产资源(Hein and Morgan, 1999; 徐脉直等, 1999). 钴结壳也是储存大量海洋环境信息的重要载体(Hugh and Paul, 1999; McMurtry *et al.*, 1994), 它记录了过去 60~100 Ma 海洋和气候历史, 一个近 10 cm 厚的钴结壳蕴藏着古海洋信息与几千米沉积岩心相当(James *et al.*, 2001). 由于钴结壳集海洋资源和环境双重信息, 各国对它的调查研究方兴未艾. 1981 年德国《太阳号》首次对太平洋莱恩群岛进行了钴结壳资源调查, 获得了惊人发现(Halbach *et al.*, 1982), 证实了太平洋较大范围内存在具有经济潜力的钴结壳矿床. 1982 年前苏联在大西洋、太平洋相继开展钴结壳资源调查. 美国 1983–1984 年对中太平洋海山、马绍尔群岛、经济专属区进行详细的钴结壳资源调查(Manheim, 1986; Hein *et al.*, 1988). 钴结壳资源勘查的最终目的是圈定钴结壳矿区和开发资源, 然而迄今为止,

国内外尚未给出钴结壳矿区圈定的具体参数指标, 制约着钴结壳资源评价工作进展. 本文基于我国近十年对西太平洋马尔库斯—威克海山区、麦哲伦海山区、马绍尔群岛、中太平洋海山区和莱恩群岛的钴结壳资源调查(图 1, 张海生等, 2001; 何高文等, 2005), 对钴结壳厚度、丰度、Co 含量、覆盖率、资源量、海山坡度、水深、矿区面积进行了全面分析, 并对重点海山进行钴结壳矿区圈定、资源评价和钴结壳分布规律研究后(Zhang *et al.*, 2007), 提出了钴结壳矿区圈定和资源评价的 8 项重要参数指标.

1 钴结壳矿区圈定和资源评价的主要参数

钴结壳矿区圈定是一项极其复杂的工作, 为圈出优质矿区, 必须充分利用调查资料和有关基础研

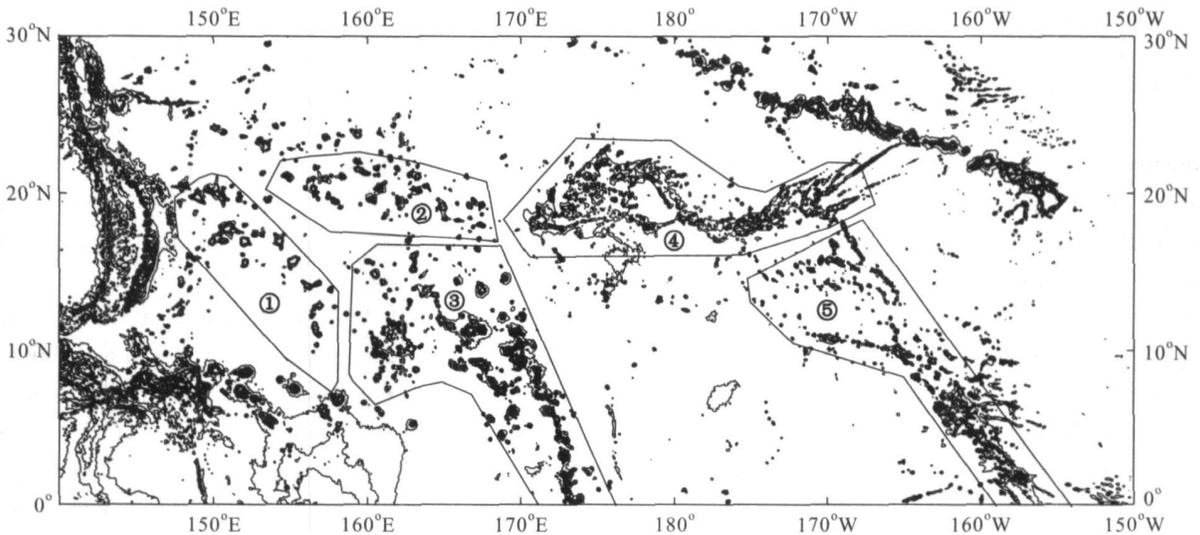


图 1 西太平洋钴结壳资源研究区示意图

Fig. 1 Sketch of study area of cobalt crust resources in the Western Pacific

1. 麦哲伦海山区; 2. 马尔库斯—威克海山区; 3. 马绍尔群岛; 4. 中太平洋海山区; 5. 莱恩群岛

究成果, 认真分析海山地形、钴结壳的厚度、丰度和品位、矿物等各种资料, 反复论证和综合分析, 在此基础上确定合理的圈定矿区的主要参数指标。钴结壳矿区圈定和资源评价所涉及的主要参数包括, 钴结壳的厚度、丰度、覆盖率、密度、含水率, Mn、Cu、Co、Ni 含量, 水深、面积、坡度、基岩等很多参数。但是, 厚度、丰度、Co 含量、覆盖率、坡度、水深、面积是钴结壳矿区圈定和资源评价的最重要参数, 这些参数直接影响到钴结壳矿区面积、资源量和资源质量。

1.1 钴结壳厚度

钴结壳厚度是指生长在基岩上的钴结壳厚度, 通常用 cm 表示。钴结壳厚度是钴结壳矿区圈定、资源量计算和资源评价的最重要参数之一。目前, 多数国家获得钴结壳厚度的主要采样工具是拖网, 我国也不例外。拖网采样因在海底拖网距离长(一般为几公里, 我国拖网采样距离为 55 ~ 9 737 m, 平均 1 400 m), 钴结壳样品的地理位置的准确性和代表性较差。Segl *et al.* (1984) 认为根据目前调查资料不可能精确地测定海山钴结壳厚度, 多数情况下没有能力建立起统计学上有效的平均值, 因为采集的结壳厚度变化很大(Frank *et al.*, 1976; Craig *et al.*, 1982)。尽管如此, 钴结壳矿区圈定还是需要确定厚度指标。

研究区用拖网采样获得板状结壳、砾状结壳、钴结核, 一个测站有时出现 3 种结壳, 有时只有一种或两种, 这就造成计算测站的钴结壳厚度非常困难。板状结壳、砾状结壳、钴结核这 3 种结壳在海底不是重叠分布的, 不能采用 3 种结壳厚度累加的方法, 否则会高估钴结壳厚度。但若只考虑板状结壳厚度, 不计算砾状结壳和钴结核厚度, 那样做又会低估钴结壳厚度和资源量(Hein *et al.*, 1987)。我们对钴结壳厚度建议采用“有板状结壳站采用板状结壳厚度; 没有板状结壳、有砾状结壳和钴结核站, 采用砾状结壳厚度; 只有钴结核站采用钴结核厚度。各测站厚度只能是板状结壳、砾状结壳、钴结核之一种厚度”。照此方法计算, 研究区 662 个测站的钴结壳平均厚度为 3.56 cm, 而 3 种结壳累加的算术平均厚度为 5.02 cm, 两种计算方法的平均厚度相差达 29.08%。研究区板状结壳、砾状结壳、钴结核的出现率分别为 85.5%、9.89%、4.48%; 中太平洋 Horizon 海山(Hein *et al.*, 1985)板状结壳、砾状结壳、钴结核出现率分别为 78.85%、17.31%、3.85%, 两区 3 种结壳出现率基本上具有可比性, 由此可见海山上主要

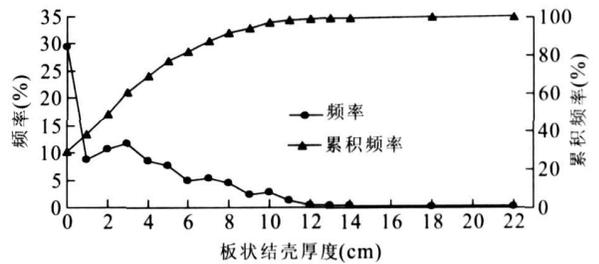


图2 研究区板状结壳厚度频率分布

Fig.2 Frequency distribution of the laminated crust thickness in study area

分布板状结壳。研究区板状结壳厚度为零的测站 195 个, 占测站总数(662 站)的 29.46%, ≥ 3 cm 的测站为 286 个, 占测站总数的 43.20%, ≥ 4 cm 的测站为 225 个, 占测站总数的 33.99%(图 2)。研究区板状结壳平均厚度 ≥ 4 cm 的海山 2 座, 只占海山总数(25 座)的 8%, 平均厚度 ≥ 3 cm 的海山 10 座, 占海山总数的 40%, 平均厚度 < 3 cm 的海山 15 座, 占海山总数的 60%。据上述情况, 钴结壳矿区厚度指标确定为 ≥ 3 cm 或 ≥ 4 cm 是比较合适的。

1.2 钴结壳丰度

钴结壳丰度是指海山表面单位面积内湿钴结壳重量, 用 kg/m^2 表示。钴结壳丰度计算公式是: $F = 10 \times \rho \times D$, 式中 F 为钴结壳丰度 (kg/m^2), ρ 为钴结壳湿密度 (g/cm^3), D 为钴结壳厚度 (cm), 钴结壳丰度是导出参数, 丰度与厚度成正比。钴结壳有板状结壳、砾状结壳、钴结核 3 种类型, 根据中华人民共和国大洋地质矿产行业标准《大洋富钴结壳资源勘测规程(试行稿)》, 钴结壳丰度是 3 种结壳丰度之和, 即:

钴结壳丰度 = 板状结壳丰度 + 砾状结壳丰度 + 钴结核丰度。其中, 板状结壳丰度 = $10 \times \rho \times D$; 砾状结壳丰度 = $10 \times \rho \times D$; 钴结核丰度 = $10 \times \rho \times 0.52d_i$; d_i 为钴结核直径 (cm)。

钴结壳资源量计算表明, 把 3 种结壳丰度累加, 导致钴结壳资源量大大增加。若只考虑板状结壳丰度, 一是否定了海底确实存在砾状结壳和钴结核, 二是低估了钴结壳资源量。合理的办法是既不能忽视砾状结壳和钴结核的存在, 又尽可能地正确计算出钴结壳资源量。由于钴结壳厚度计算时已采用了 3 种结壳厚度不累加的计算方法, 钴结壳丰度计算实际上已被确定为 3 种结壳丰度不累加的计算方法。研究区结壳丰度为 $0.00 \sim 431.20 \text{kg}/\text{m}^2$, 平均

表 1 研究区海山水深与钴结壳丰度、Co 含量关系

Table 1 Relationship between seamount water depths and abundances, Co contents of crusts in study area

水深(m)	测站数(个)	丰度(kg/m ²)	Co(%)
1 000~1 500	43	103.55	0.65
1 500~2 000	176	80.87	0.60
2 000~2 500	218	57.50	0.60
2 500~3 000	166	52.92	0.59
3 000~3 500	54	52.86	0.55

65.29 kg/m². 结壳丰度与水深相关分析表明, 从水深 1 000 ~ 1 500 m 丰度为约 100 kg/m² 下降到 2 000 ~ 2 500 m 的约 60 kg/m², 然后出现丰度持续稳定的平台, 因此可考虑这个平台所对应的丰度 60 kg/m² 作为钴结壳矿区丰度指标(表 1).

1.3 钴结壳覆盖率

钴结壳覆盖率是指海山表面单位面积内被钴结壳覆盖的面积, 用百分数(%)表示. 钴结壳覆盖率一般根据海底照相、海底摄像、地质取样资料进行估计. 钴结壳覆盖率也是钴结壳资源评价中重要参数之一. 同钴结壳厚度参数一样, 获得钴结壳真实覆盖率非常困难. 由于水下拍摄时形成的阴影区以及颜色较深的沉积物、基岩影像与钴结壳难以区分, 因此利用海底电视和海底照片的影像资料估算结壳覆盖率有一定的误差. 尽管如此, 利用钴结壳覆盖率资料分析钴结壳分布规律还是非常有用的.

一般来说, 结壳覆盖率具有随水深增大而增大、分段变化的特征. 具有代表性的钴结壳海底照相站

如麦哲伦 ASHX 站和 CSHX 站. ASHX 站海底照相有效拍摄距离 5 960 m, 水深 1 625 ~ 3 275 m, 结壳覆盖率 0% ~ 50%, 平均为 21%, 最高覆盖率出现在 2 000 ~ 2 400 m 水深段, 水深 2 951 m 处有大型陡坎; CSHX 站海底照相有效拍摄距离 4 830 m, 水深 1 618 ~ 3 084 m, 结壳覆盖率 0% ~ 90%, 平均为 35%. 最高覆盖率出现在 1 881 ~ 2 809 m, 水深 2 759 m 有大型陡坎和陡坡(表 2).

钴结壳矿区覆盖率一般采用 25% ~ 60%, Hein *et al.* (1990) 认为覆盖率采用 25% ~ 45% 比较可行. 中太平洋 Horizon 海山钴结壳覆盖率为 52%, 莱恩群岛 SP Lee 海山为 24% (Richey, 1987), 夏威夷群岛经济专属区为 22% (Craig *et al.*, 1982), 我国 13 座海山水深 < 3 500 m 区域的覆盖率为 36.88%. 与 Horizon 海山、SP Lee 海山、夏威夷群岛经济专属区覆盖率相比, 研究区处于中等水平. 根据不同学者提出的覆盖率指标和我国调查资料, 再考虑到目前钴结壳资源调查精度, 钴结壳矿区覆盖率采用 30% 是比较合适的.

1.4 钴结壳 Co 含量

1.4.1 钴结壳 Co 含量频率分布特征 Co 是钴结壳中最有经济价值的金属元素, 也是钴结壳资源评价中重要参数之一, 由于钴结壳分析样品不同、取样层位不同, Co 含量也就不同. 文献中钴结壳 Co 含量数据非常多, 但是数值相差非常大. 中太平洋约翰斯顿岛钴结壳分层样 Co 含量 0.22% ~ 1.61%, 平均 0.88%, Co 含量呈双峰态频率分布特征(姚德等,

表 2 麦哲伦海山区海底照相得出不同水深段的钴结壳覆盖率

Table 2 Crust coverages photographed by bottom camera from different water depths in Magellan Seamounts

海底照相站	水深(m)	结壳类型和分布	结壳覆盖率(%)	地质描述
ASHX	1 625 ~ 1 945	沉积物	0	
	1 945 ~ 2 000	少量板状、砾状和钴结核	15	
	2 000 ~ 2 200	板状和砾状为主, 少量钴结核	50	沉积物丰富, 结壳露头常上覆沉积物.
	2 200 ~ 2 400	板状为主, 砾状次之, 少量钴结核	40	结壳形态不清, 结壳发育一般, 板状为主
	2 400 ~ 2 557	少量板状和砾状, 零星钴结核	15	砾状次之, 钴结核很少; 地形较陡.
	2 557 ~ 2 868	板状为主, 砾状次之, 少量钴结核	30	水深约 2 951 m 处有大型陡坎.
	2 868 ~ 2 987	板状	15	
	3 043 ~ 3 275	少量板状和砾状	5	
CSHX	1 618 ~ 1 783	沉积物	0	
	1 783 ~ 1 881	板状为主, 砾状次之	30	结壳发育, 板状为主, 砾状和钴结核很少.
	1 881 ~ 2 098	板状为主, 少量砾状和钴结核	70	2 098 ~ 2 633 m 板状结壳连续出露.
	2 098 ~ 2 633	板状	90	地形较陡峭, 水深 2 759 m 有大型陡坎和陡坡.
	2 633 ~ 2 809	板状为主, 少量砾状	40	
	2 809 ~ 3 000	板状为主, 砾状次之	15	
	3 000 ~ 3 084	沉积物为主, 并有大量基岩出露	0	

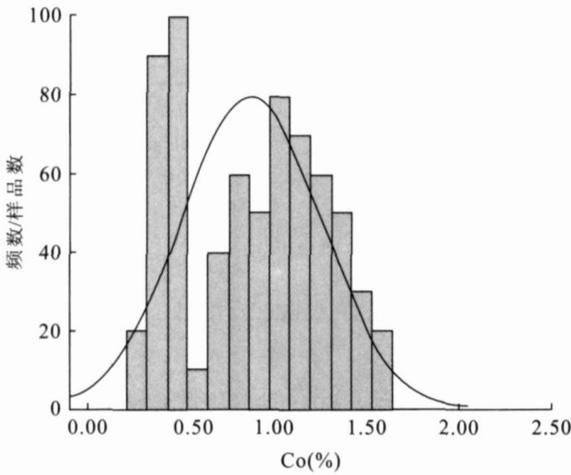


图 3 约翰斯顿岛钴结壳 Co 含量频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of Co contents of Johnston Island

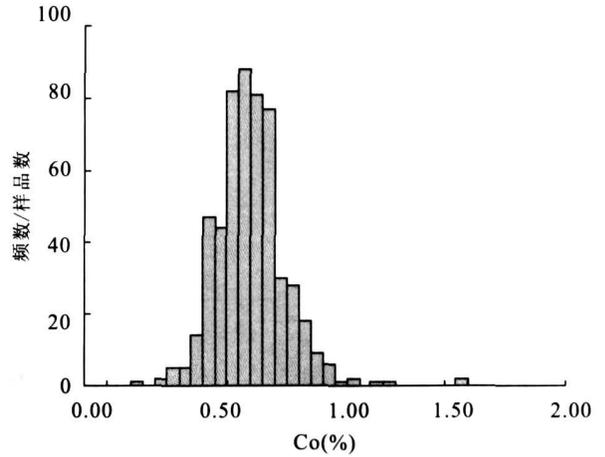


图 4 研究区钴结壳 Co 含量频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of Co contents in study area

1996), 主峰 Co 含量为 1.0%, 次峰为 0.5%(图 3), 呈双峰的原因是钴结壳顶部 0.5 cm 的 Co 含量特别高, 下部 Co 含量低, Co 含量与钴结壳厚度成反比. 图 4 是钴结壳全样 Co 含量频率分布, 呈单峰态, 分布曲线形态明显不同于约翰斯顿岛, 原因是研究区为全样, 而后者为分层样. 研究区没出现 Co 为 1.0% 的主频率, 是因为没有分上、下层. 如果对钴结壳分层取样, Co 含量就呈明显的贫富差异, 如麦哲伦海山区 CHA06 钴结壳样品 (潘家华等, 2002) 的 Co 含量 0.14%~1.09%, 平均 0.46%. 该结壳具有明显的两层构造, 上层平均 Co 0.66%; 下层平均 Co 含量 0.26%(图 5), 磷酸盐交代作用造成下层主要成矿元素 (Co、Ni、Mn) 贫化、非矿元素 (P、Ca) 富集.

1.4.2 钴结壳 Co 含量与水深关系 研究区不同水深段钴结壳 Co 含量随水深垂直分布见表 1, 研究区 1000~1500 m、1500~2000 m、2000~2500 m、2500~3000 m 水深段的 Co 含量分别为 0.65%、0.60%、0.60%、0.59%, Co 含量处于较高而稳定的状态; 3000~3500 m 水深段的 Co 含量为 0.55%, Co 含量开始下降. 钴结壳矿区水深可确定为 1000~2500 m, 平均 Co 含量为 0.60%, 前提是钴结壳分析样品为全样, 而不是分层样.

1.5 坡度和水深

钴结壳资源评价中, 除了钴结壳厚度、丰度、Co 含量、覆盖率这些重要参数外, 从经济及技术方面考虑, 地形和水深也是非常重要的因素. 深海采矿不仅要考虑采矿成本而且还要顾及采矿技术能否胜任. 研究区坡度为 0.06°~33.85°, 平均坡度为 11.38°.

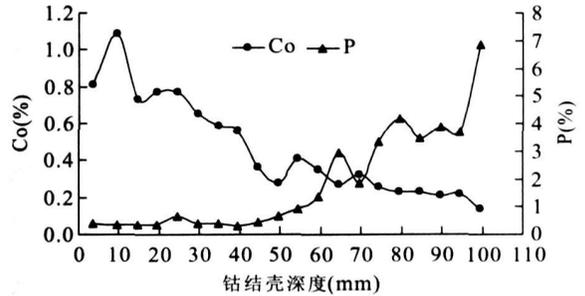


图 5 麦哲伦海山区 CHA06 钴结壳 Co、P 含量垂直变化
Fig. 5 Vertical changes of Co and P contents of CHA06 sample from Magellan Seamounts

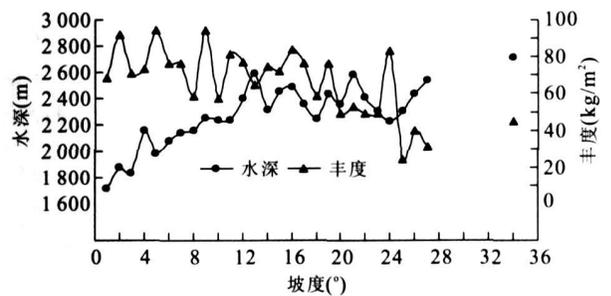


图 6 研究区海山坡度与水深、丰度关系
Fig. 6 Relationship between seamount slopes and water depths, abundances in study area

研究区坡度可分为 0°~10°、10°~15°、15°~34° 3 段 (图 6). 坡度 0°~10° 的特点是坡度小、水深浅 (2061 m)、丰度大 (77.97 kg/m²); 坡度 10°~15° 的特点是坡度和水深 (2408 m) 中等、丰度较高 (73.67 kg/m²) 而变化小; 坡度 15°~34° 的特点是坡度和水深 (2392 m) 大而不稳定、丰度低 (24.33~

表 3 钴结壳矿区和多金属结核矿区对比

Table 3 Comparison between cobalt crust deposit and polymetallic nodule deposit

钴结壳矿区				多金属结核矿区			
最终矿区面积(km ²)	6 250	最终矿区面积(km ²)	5 132	最终矿区面积(km ²)	5 337	最终矿区面积(km ²)	75 000
水深(m)	2 500	水深(m)	2 500	水深(m)	3 000	丰度(kg/m ²)	5
丰度(kg/m ²)	60.00	丰度(kg/m ²)	73.07	丰度(kg/m ²)	70.27	Mn(%)	20.00
覆盖率(%)	30	覆盖率(%)	30	覆盖率(%)	30	Cu(%)	0.80
申请矿区面积(km ²)	20 833	申请矿区面积(km ²)	17 107	申请矿区面积(km ²)	17 790	Co(%)	0.20
海山(座)	11.88	海山(座)	9.76	海山(座)	6.68	Ni(%)	1.00

83.70 kg/m², 平均丰度 60.35 kg/m²). 钴结壳矿区坡度指标确定为 15°, 那么 0° ~ 15° 的丰度为 76.44 kg/m², 而 15° ~ 34° 的丰度下降到 60.35 kg/m². 有些学者认为海山体坡度稳定性的临界坡度为 27°. 但是也有人认为钴结壳矿址的坡度要 < 10°, 只有这样, 才能保证采矿作业的可靠性和可观的经济效益. 海山微地貌对钴结壳的分布和厚度也有影响. 研究区海山坡度与丰度、水深相关分析表明, 钴结壳矿区坡度边界指标可考虑确定为 15°, 钴结壳矿区水深边界指标可考虑确定为 2 500 m, 水深 > 2 500 m 区域坡度大和资源量下降.

1.6 钴结壳矿区面积

根据地质块段法, 研究区 13 座海山水深 < 3 500 m 的投影面积为 52 162.80 km², 每座海山平均面积 4 012.52 km², 平均丰度 69.54 kg/m²; 水深 < 3 000 m 投影面积为 34 635.12 km², 平均面积 2 664.24 km², 平均丰度为 70.27 kg/m²; 水深 < 2 500 m 投影面积为 22 791.62 km², 平均面积 1 753.20 km², 平均丰度 73.07 kg/m². 如考虑 2 500 m 作为钴结壳矿区水深边界指标, 以各国向联合国海底管理局申请多金属结核矿区 150 000 km²、最终拥有矿区面积 75 000 km² (年产 200 × 10⁴ t 结核量, 连续开采 20 年) 作参考 (联合国海洋经济与技术处, 1989), 面积为 5 132 km² 钴结壳资源量相当于面积为 75 000 km² 多金属结核资源量 (Rao, 1987; 张富元等, 2001), 按钴结壳覆盖率 30%, 需要钴结壳申请矿区面积为 17 107 km², 按海山平均投影面积 1 753.20 km² 计算, 需要海山 9.76 座 (表 3). 如以 3 000 m 作为钴结壳矿区水深边界指标, 同样以 75 000 km² 多金属结核合同区作参考, 面积 5 337 km² 的钴结壳资源量相当于面积 75 000 km² 的多金属结核资源量, 覆盖率 30%, 需要钴结壳申请矿区面积为 17 790 m²、海山 6.68 座. 如以 2 500 m 作为钴结壳矿区水深边界指标, 丰度

60 kg/m², 面积 6 250 km² 的钴结壳资源量相当于面积 75 000 km² 的多金属结核资源量, 覆盖率 30%, 需要钴结壳申请矿区面积 20 833 km²、海山 11.88 座. 如申请者只要求年产 100 × 10⁴ t 结核量, 连续开采 20 年, 则申请矿区面积为 8 500 ~ 10 000 km², 最终矿区面积为 2 500 ~ 3 000 km², 海山数量也相应减半.

2 钴结壳矿区参数指标

各国对钴结壳资源勘查的最终目的是圈定钴结壳矿区和开发钴结壳资源. 然而, 迄今为止, 国内外尚未就钴结壳矿区圈定和资源评价给出具体的参数指标, 严重地制约着钴结壳矿区圈定和资源评价工作进展. 本文基于我国近十年对西太平洋 26 座海山钴结壳资源调查, 结合太平洋环境资料, 在深入分析钴结壳厚度、丰度、品位、覆盖率、资源量、面积, 海山坡度和水深资料的基础上, 对 13 座重点海山进行了钴结壳矿区圈定、资源评价和钴结壳分布规律的系统研究, 进而提出钴结壳矿区圈定和资源评价的以下 8 项重要参数指标:

(1) 钴结壳矿区的结壳厚度为 ≥ 3 cm 或 ≥ 4 cm; (2) 钴结壳矿区的水深为 ≤ 2 500 m 或 ≤ 3 000 m; (3) 钴结壳矿区的 Co 含量 ≥ 0.50% 或 ≥ 0.60%; (4) 钴结壳矿区的结壳丰度为 ≥ 60 kg/m² 或 ≥ 70 kg/m²; (5) 钴结壳矿区的坡度为 ≤ 15°; (6) 钴结壳矿区的结壳覆盖率为 ≥ 30%; (7) 钴结壳矿区申请面积为 17 000 ~ 20 000 km²; (8) 钴结壳矿区最终保留面积为 5 000 ~ 6 000 km².

钴结壳矿区的参数指标 (如结壳厚度、丰度、Co 含量、水深) 应当是统一的, 而不是变化的. 但是, 根据对不同海山区钴结壳资源分布规律的研究表明, 研究区西北部的马尔库斯—威克海山区、麦哲伦海山区的钴结壳厚度较大、水深较深、Co 含量较低; 而

研究区中南部的中太平洋海山区、莱恩群岛、马绍尔群岛的钴结壳厚度较小、水深较浅、Co 含量较高。因此,在钴结壳矿区圈定和资源评价时,应根据不同海山钴结壳资源分布的实际情况确定参数指标。

钴结壳矿区圈定指标的确定需考虑技术和经济因素,但目前没能开采太平洋海底矿产资源,讨论技术经济因素指标不太现实。在几千米深的海底调查采样既费时又费力、费财,我国钴结壳资源调查区内每个测站的控制面积约 50~100 km²,调查精度较低。因此,针对实际调查资料,进行钴结壳分布规律研究和资源评价,然后提出钴结壳矿区圈定和资源评价的参数指标,这是国内外目前采用的基本做法(Hein *et al.*, 1988),随着钴结壳资源调查精度的不断提高和研究深入,将会给出传统意义上钴结壳资源评价参数指标。

作者衷心感谢太平洋钴结壳资源调查人员的辛勤工作,感谢审稿人提出的宝贵修改意见。

References

- Craig, J. D., Andrews, J. M., Meylan, A. M., 1982. Ferromanganese deposits in the Hawaiian Archipelago. *Marine Geology*, 45: 127—157.
- Frank, D. J., Meylan, M. A., Craig, J. D., et al., 1976. Ferromanganese deposits of the Hawaiian Archipelago. *Hawaii Inst. Geophys. Rep.*, HIG—76—14 71.
- Halbach, P., Manheim, F. T., Otten, P., 1982. Co-rich ferromanganese deposits in the marginal seamount regions of the central Pacific basin—Results of the Midpac '81. *Erzmetall*, 35(9): 447—453.
- He, G. W., Liang, D. H., Song, C. B., et al., 2005. Determining the distribution boundary of cobalt-rich crusts of guyot by synchronous application of sub-bottom profiling and deep-sea video recording. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 509—512 (in Chinese with English abstract).
- Hein, J. R., Kirschenbaum, H., Schwab, W. C., et al., 1990. Mineralogy and geochemistry of Co-rich ferromanganese crusts and substrate rocks from Karin Ridge and Johnston Island, Farnella Cruise F7—86—HW. U. S. Geological Survey Open File Report, 90—298.
- Hein, J. R., Manheim, F. T., Schwab, W. C., 1985. Ferromanganese crusts from Necker Ridge, Horizon guyot and S. P. Lee guyot; Geological considerations. *Marine Geology*, 69: 25—54.
- Hein, J. R., Morgan, C. L., 1999. Influence of substrate rocks on Fe-Mn crust composition. *Deep-Sea Research J.*, 46: 855—875.
- Hein, J. R., Morgenson, L. A., Clague, D. A., et al., 1987. Cobalt-rich ferromanganese crusts from the exclusive economic zone of the United States and nodules from the oceanic Pacific. In: Scholl, D. W., Grantz, A., Vedder, J. G., eds., *Geology and resource potential of the continental margin of western North America and adjacent ocean basins—Beaufort Sea to Baja California*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Res. Earth Science Series V. 6 Houston, Texas.
- Hein, J. R., Schwab, W. C., Davis, A., 1988. Cobalt and platinum-rich ferromanganese crusts and associated substrate rocks from the Marshall Islands. *Marine Geology*, 78: 255—283.
- Hugh, C. J., Paul, A. W., 1999. Stratigraphy, paleoceanography, and evolution of Cretaceous Pacific guyots; Relics from a greenhouse earth. *American Journal of Science*, 299: 341—392.
- James, Z., Mark, P., Lisa, S., et al., 2001. Trend, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292: 686—693.
- Manheim, F. T., 1986. Marine cobalt resources. *Science*, 232: 600—608.
- McMurtry, G. M., VonderHaar, D. L., Eisenhauer, A., et al., 1994. Cenozoic accumulation history of a Pacific ferromanganese crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 125: 105—118.
- Pan, J. H., Liu, S. Q., Eric, D., 2002. The effects of marine phosphorization on element concentration of cobalt-rich crusts. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 403—407 (in Chinese with English abstract).
- Rao, V. P., 1987. Mineralogy of polymetallic nodules and associated sediments from the Central Indian Ocean basin. *Marine Geology*, 74(1—2): 151—157.
- Richey, J., 1987. Assessment of cobalt rich manganese crust resources on Horizon and S. P. Lee Guyots. *U. S. EEZ Marine Mining*, 6: 231—243.
- Segl, M., Mangini, A., Bonani, G., et al., 1984. ¹⁰Be dating of the inner structure of Mn-encrustations applying the Zurich tandem accelerator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B5: 359.
- United Nations Ocean Economics and Technology Office, 1989. Delineation and evaluation of manganese nodules deposits. Translated by Jin, J. C., China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, M. Z., et al., eds. 1999. Submarine mineral resources. O-

- cean University of Qingdao Press, Qingdao (in Chinese).
- Yao, D., Zhang, L. J., John, W., et al., 1996. Mineralogy and geochemistry of ferromanganese crusts from Johnston Island EEZ. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(1): 33–49 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., 2001. Evaluation principle and delineation method of polymetallic nodule resources. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, W. Y., Zhang, F. Y., Yang K. H., et al., 2007. Fractal characteristics of resources quantity of cobalt crusts and seamount topography, the West Pacific. *Front. Earth Sci. China*, 1(2): 233–240.
- Zhang, H. S., Zhao, P. D., Chen, S. Y., et al., 2001. Mineralizing characters of cobalt-rich ferromanganese nodule and crust in central Pacific ocean seamount. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 205–209 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 何高文, 梁东红, 宋成兵, 等, 2005. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(4): 509–512.
- 联合国海洋经济与技术处, 1989. 锰结核矿址的圈定与评价. 金建才译. 北京: 海洋出版社, 24–43.
- 潘家华, 刘淑琴, Eric D., 2002. 大洋磷酸盐化作用对富钴结壳元素富集的影响. *地球学报*, 23(5): 403–407.
- 徐脉直等编著, 1999. 海洋固体矿产. 青岛: 青岛海洋大学出版社.
- 姚德, 张丽洁, John, W., 等, 1996. 约翰斯顿岛附近海域铁锰结壳矿物学和地球化学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 16(1): 33–49.
- 张富元, 2001. 大洋多金属结核资源评价原理和矿区圈定方法. 北京: 海洋出版社.
- 张海生, 赵鹏大, 陈守余, 等, 2001. 中太平洋海山多金属结壳的成矿特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(2): 205–209.