

富钴结壳资源评价方法研究

卜文瑞, 石学法, 刘季花, 杨耀民, 任向文, 崔迎春

(国家海洋局第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛, 266061)

摘要: 提出以“单位面积”为基本评价单元, 分“矿块”评价结壳资源的思路, 认为各“矿块”和“单位面积”资源的评价是结壳勘探区圈定的核心基础。选择结壳丰度、金属品位、开采回收率、选矿回收率和金属冶炼回收率等作为主要评价指标, 确定壳层厚度、矿石覆盖率、结壳含水率、结壳湿密度、海底坡度、开采成本、运输成本、选矿成本和冶炼成本等作为主要评价参数, 并据此设计一套完整的结壳资源量计算与评价方法。认为结壳资源勘查应以结壳资源评价方法为指导, 根据资源评价的需要选择适当的技术路线, 采用资源评价所需的指标和参数。

关键词: 富钴结壳; 资源评价; 单位面积; 矿块

中图分类号: P624.6; P744.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2011)S2-0075-08

Method on resource assessment of cobalt-rich crusts

BU Wen-rui, SHI Xue-fa, LIU Ji-hua, YANG Yao-min, REN Xiang-wen, CUI Ying-chun

(Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, First Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: A cobalt-rich crust resource assessment frame was established using unit area as the basic resource assessment unit to assess ore block of cobalt-rich crust. The unit area resource assessment of each block is the foundation of ore area delineation. Crust abundance, metallic grade, recovery ratio of mining, recovery ratio of ore-dressing and recovery ratio of metallurgy were chosen as the main assessment indexes, and crust thickness, coverage rate, water ratio, wet density of crusts, seafloor gradient, cost of mining, cost of transportation, cost of ore-dressing and cost of metallurgy were chosen as the main assessment parameters, and a whole resource calculation method and resource assessment method were established. It is suggested that the cobalt-rich crust survey should be guided by the resource assessment to choose the proper technical route and adopt the assessment indexes and assessment parameters.

Key words: cobalt-rich crusts; resource assessment; unit area; ore block

富钴结壳, 又称“铁锰结壳”或“富钴(铂)铁锰结壳”, 简称“结壳”, 是 1 种生长在水深 500~3 000 m 的海山斜坡固结基岩上的“壳状”沉积物, 因其富含 Co 元素而得名。因结壳富含 Co, Pt 和 REE 等战略金属和贵金属, 潜在经济价值大, 加之具有产出水深浅、易于开采等优势, 有望先于深海多金属结核开发。我国是一个贫 Co 的国家, 开发大洋富钴结壳资源就显得尤为迫切, 这不仅可以解决 Co 大量依赖进口的被

动局面, 而且可望带来巨大的经济利益, 具有极为重要的社会和经济意义。

作为国际海底区域(简称“区域”)产出的资源, 富钴结壳具有不同于陆地资源的特殊法律地位, 其由国际海底管理局代表全人类管理, 是人类共同继承财产^[1]。尽管《“区域”内富钴铁锰结壳探矿和勘探规章》尚未正式出台, 但单个勘探许可仅可获得一定面积的勘探区则是确定无疑的。由于勘探区面积一定, 从地

收稿日期: 2011-06-15; 修回日期: 2011-07-15

基金项目: 国际海底区域研究开发“十一五”项目(DYXM115-01-2-01)

通信作者: 卜文瑞(1972-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 研究员, 从事海底成矿作用研究; 电话: 13589223796; E-mail: buwenrui@fio.org.cn

质角度来说,要求勘探区内矿石量或金属量最大;就经济意义而言,就要求勘探区内矿石开采能带来最大的经济利益。富钴结壳法律地位与产状的特殊性,决定了其资源评价方法的特殊性。富钴结壳资源评价不仅要以国际海底管理局有关政策为导向,而且要以富钴结壳产出与分布特征的最新研究成果为指导。而结壳资源评价方法的特殊性,也对其勘查技术路线有着特殊的要求。为此,以国际海底管理局有关立法精神为指导,选择适宜的评价指标与评价参数,设计与结壳资源分布规律和其特殊法律地位相适应的评价模型,对指导结壳调查勘查和勘探区圈定尤为重要。

我国富钴结壳调查始于1997年执行的DY95-7航次,1999年执行的DY95-10航次拉开了系统调查富钴结壳资源的帷幕,至今已获取了大量资料和样品。伴随结壳调查的开展,有学者开始重视其资源评价问题,初步确定了评价参数,提出了算术平均法、加权平均法、地质块段法、克里格法、网格剖分积分法等资源量计算方法^[1-7],探讨了结壳资源评价与圈矿方法^[8-12],并对结壳资源勘查网度进行了初步分析^[13]。结壳资源评价的核心是资源量计算,已有资源量计算方法多要求矿石在空间分布上相对连续,但由于富钴结壳空间变化的复杂性和不连续性,已有方法计算结壳资源量的依据略显不足,从而使其可靠性大打折扣。随着结壳资源勘探规章出台的日益临近,有必要建立以结壳产出特征和分布规律为指导,适应国际海底管理局有关圈矿政策,可指导富钴结壳资源勘查工作的资源评价方法体系。

本文作者在充分考虑“区域”资源特殊法律地位的前提下,以结壳产出特征和分布规律的最新研究成果为指导,建立包含结壳地质评价和技术经济评价在内,与结壳区域分布特性相适应的资源评价方法体系。

1 富钴结壳资源评价

1.1 “区域”资源法律地位的特殊性及矿区圈定有关规定

位于国家管辖范围以外的国际海底区域(简称“区域”)是地球上最大的政治地理单元。根据《联合国海洋法公约》规定,“区域”内的一切资源均是人类共同继承的财产,由国际海底管理局代表全人类进行管理。“区域”资源具有完全不同于陆地资源的特殊法律地位,申请者可获得“区域”资源以一定面积为限。对多金属结核而言,分配给承包者的开辟区总面积不应超过15万km²,且应按规定时间表放弃所获分配区域的

若干部分,承包者最终可获得不超过7.5万km²的多金属结核合同区。根据最新修订的富钴结壳勘探规章草案,每份请求核准勘探富钴结壳的申请区域由面积不超过20km²的正方形或长方形区块组成,且总数不超过100个,这些区块可在550km乘550km的地理区域内排列成非毗连的组群。多金属硫化物勘探规章对申请区域的限制更为严格,申请区域由不超过100个多金属硫化物区块组成,每个区块面积约10km乘10km,但不超过100km²,且这些区块应排列为至少5个组群,每个区块组群须至少包含5个毗连区块,多金属硫化物区块组群不一定毗连但须邻近,应局限于不超过30万km²的长方形区域内,且最长一边的边长不超过1000km。

1.2 微地貌对富钴结壳区域分布的制约

根据壳层厚度,可将富钴结壳分为结膜(壳层厚度<0.5cm)、结皮(壳层厚度为0.5~1.0cm)和结壳(壳层厚度>1.0cm)。就壳层厚度大于1.0cm的结壳而言,根据其产出形态可进一步分为板状结壳、砾状结壳和钴结核(海山结核)。研究表明,海山微地貌特征制约了底质类型,从而控制了富钴结壳的产出类型^[14]。在地貌上较高的无沉积物覆盖的裸露基岩上产出板状结壳,而在海山斜坡的沉积物表面,产出海山结核^[15],砾状结壳则多见于陡峭海山顶部的坡脚处,围绕砾石生长,从而在不同地貌单元产出不同类型的富钴结壳^[16]。因沉积物的早期成岩作用会引起海山结核组分的变化^[17],而基岩不会对富钴结壳的组分产生影响^[18],海山结核与典型水成富钴结壳在成分上略有差异,具有向成岩型深海结核过渡的特征^[19]。可见微地貌特征的差异不仅制约了结壳的区域分布特征和各地貌单元可能产出的结壳类型,而且对各类结壳的元素富集特征也有一定的影响。

结壳产出类型与微地貌单元关系密切,不同微地貌单元产出不同类型的结壳,这就使得以微地貌单元初步划定不同类型结壳分布的“地质界线”成为可能。微地貌调查是结壳评价矿块划分的基础,也是结壳资源勘查与评价的重要前提。

1.3 结壳类型决定采、选、冶工艺的差异

从产状来看,板状结壳附着固结基岩生长,沿基岩表面在空间上呈二维展开,分布连续性好,覆盖率高,壳层相对平整,厚度较为稳定,其单位面积资源量(丰度)主要取决于壳层厚度。砾状结壳多见于海山陡坎下的低洼处,围绕基岩风化滚落的砾石生长,核心(岩石)相对较大,其半径一般远大于壳层厚度,壳层厚度围绕核心变化明显,一般上部壳层最厚,向侧面变薄,下部壳层最薄。砾状结壳资源量取决于壳层

厚度和覆盖率。钴结核产出于低洼处的沉积物表面, 多无岩石核心。钴结核的资源量制约取决于结核平均直径和覆盖率, 一般丰度较小。

因其产状的差异, 各类富钴结壳对采、选、冶工艺有不同的要求。从理论上讲, 只有可从基岩上有效剥离, 并能精选利用的结壳壳层才有资源意义, 而不同产出类型的富钴结壳壳层剥离和选矿的难易程度不同。具体而言, 板状结壳与基岩接触面相对平整, 厚度相对稳定, 易于剥离, 采矿回收率高, 基岩混入少, 选矿和冶炼也较容易。砾状结壳一般呈不规则状或椭球状, 壳层围绕核心生长, 且在不同方向厚度变化很大, 壳层与核心接触面不平整, 壳层剥离难度大, 加之产出区地形相对复杂, 采矿时岩石混入多, 增加了选矿和冶炼的难度, 采选成本和运输成本也相应增加, 在与板状结壳资源量(丰度)相同的情况下, 开发成本高, 经济效益差。钴结核产出于海山沉积物表面, 一般圆度和球度高, 仅有很小的岩石核心, 或无岩石核心, 采矿技术手段与深海多金属结核类似, 技术相对成熟, 采矿效率和矿石回收率高, 在海底单位面积矿石量(丰度)相同的条件下, 是最有经济价值、应优先圈占的区域。可见结壳的产出类型不仅决定了其矿石的丰度和金属品位, 而且决定了矿石开采、选矿和金属冶炼等工艺, 是影响单位质量矿石开采成本、运输成本、选矿成本和冶炼成本的重要因素。

1.4 富钴结壳资源评价指导思想

由于富钴结壳法律地位的特殊性和空间分布的规律性, 以及各类结壳采、选、冶工艺的差异性, 富钴结壳资源勘查与评价的指导思想不同于陆地矿床。陆地矿床资源评价以划分矿体边界品位、确定矿体规模和资源量为目的, 而富钴结壳资源评价则以划定各矿块边界(规模), 并分矿块对单位面积资源状况进行地质评价和技术经济评价。为此, 本研究将“矿块”定义为结壳产出类型相同, 壳层厚度、丰度和品位均一, 从而单位面积内矿石量和金属量相等, 开采回收率和选矿回收率, 以及单位质量矿石开采、选矿和冶炼成本接近的一定规模的区域。从理论上讲, 同一矿块内, 任意 2 个相同面积的区域矿石资源量和金属量均相等, 开采条件类似, 对其开发能获得相同数量的矿石或金属, 并能带来相同的经济效益。

2 结壳资源评价指标与评价参数

单位面积资源量及其开发可能带来的经济收益受结壳丰度、金属品位、开采回收率、选矿回收率和金

属冶炼回收率等制约。其中, 结壳丰度与矿石类型、壳层厚度(钴结核粒径)、矿石覆盖率、结壳湿密度、含水率参数等直接相关, 开采回收率和选矿回收率则与矿石类型及结壳壳层厚度、海底坡度等参数等有关, 金属冶炼回收率可能在各类矿石之间变化不大。矿石开采、运输、选矿和冶炼成本则是技术经济评价的重要参数。作为战略资源, 若不考虑开发成本, 应选择单位面积资源量最大, 或可采资源量最大的矿块, 若考虑开发成本, 应选择单位面积矿石开发利润最大的矿块。

2.1 评价指标

2.1.1 结壳丰度(A)

根据《大洋富钴结壳矿产资源勘查规程(修改稿)》, 结壳丰度是指结壳分布在海底单位面积上的质量, 单位为 kg/m^2 。

对厚度为 T 的板状结壳与砾状结壳而言, 结壳丰度可表示为:

$$A = P_C \cdot T \cdot \rho_D = P_C \cdot T \cdot \rho_W \cdot (1 - \eta) \quad (1)$$

其中: P_C 为结壳覆盖率; ρ_D 为结壳干密度; ρ_W 为结壳湿密度; η 为结壳含水率。

对钴结核而言, 若单位面积内分布有 n 个平均直径为 d 的钴结核, 那么, 结壳丰度 A 可表示为:

$$A = n \cdot ((4/3) \cdot \pi (d/2)^3) \cdot \rho_D \quad (2)$$

据其丰度定义, 钴结核在海底的覆盖率 P_C 可表示为:

$$P_C = n \cdot \pi (d/2)^2 \quad (3)$$

由式(2)和式(3), 可将钴结核的结壳丰度计算公式简化为:

$$A = (2/3) \cdot P_C \cdot d \cdot \rho_D \quad (4)$$

2.1.2 金属品位

品位是指矿石中所含有用组分的质量分数。当前, 结壳中有用金属主要有 Mn, Cu, Co, Ni 和 Pt 等, 因各种金属价格差异颇大, 为便于评价, 一般以 Co 当量品位(G_{CE})表示金属品位。结壳中 m 种金属的 Co 当量品位也可表示为:

$$G_{CE} = \frac{1}{P_{Co}} \sum_{j=1}^m C_i \cdot p_i \quad (5)$$

其中: C_i 为矿石中金属 i 的含量; p_{Co} 为金属 Co 的国际市场价格; p_i 为金属 i 的国际市场价格。

2.1.3 开采回收率(r_M)

开采回收率是指单位面积可采矿石量占单位面积矿石量的百分比。可表示为:

$$r_M = O_M / O \times 100\% \quad (6)$$

其中: O_M 为单位面积可开采矿石量; O 为单位面积矿

石量。

就当前技术储备看来,多金属结核开采工艺有一定积累,钴结核开采工艺应与多金属结核类似,加之其产出水深、较多金属结核浅,应比多金属结核更易开采,开采回收率也应在各类结壳中最高,接近 100%。板状结壳壳层平整,易于整体自基岩剥离,开采回收率尤以壳层较厚者高。砾状结壳壳层围绕岩石质核心生长,且岩石质核心相对较大,加之砾状结壳产出区地形复杂,也增加了开采难度,矿石开采回收率低,基岩混入多,增加了选矿难度和选矿成本。各类结壳矿石的实际开采回收率需经采矿实验研究确定。

2.1.4 选矿回收率(r_s)

选矿回收率是指单位面积可采矿石经选矿获得的精矿石量(可选矿石量)占单位面积可采矿石量的百分比。可表示为:

$$r_s = O_s / O_M \times 100\% = O_s / (O - r_M) \times 100\% \quad (7)$$

其中: O_s 为单位面积可选矿石量。

板状结壳与钴结核采矿混入废石少,矿石纯度较高,选矿回收率高,砾状结壳开采时混入基岩比例大,选矿成本高,回收率低。各类结壳矿石的实际选矿回收率需经选矿实验研究确定。

2.1.5 金属冶炼回收率(r_{Me})

金属冶炼回收率是指单位面积矿石冶炼所得的金属量(可冶金金属量)占单位面积精矿石所含有用金属量(可选金属量)的百分比。计算公式为:

$$r_{Me} = M_{Me} / M_s \times 100\% \quad (8)$$

其中: M_{Me} 为单位面积可冶金金属量; M_s 为单位面积可选金属量。

因各类结壳成分类似,各类矿石金属冶炼回收率应变化不大。结壳矿石中各种有用金属的冶炼回收率需经冶金实验研究确定。

2.2 评价参数

2.2.1 壳层厚度(T)

板状结壳和砾状结壳的结壳丰度与壳层厚度密切相关,壳层厚度是资源评价的重要参数。对板状结壳而言,壳层厚度是指垂直壳层延展方向的 Fe-Mn 壳层总厚度;砾状结壳壳层厚度为上、下壳层厚度之和。板状结壳和砾状结壳的壳层厚度可通过现场统计获得。钴结核的丰度与其平均直径(d)和覆盖率有关,钴结核平均直径可通过现场统计获得,覆盖率可通过海底照相/摄像资料获得。

2.2.2 结壳覆盖率(P_c)

结壳覆盖率是指结壳在海山一定范围内所覆盖面积的百分比,一般根据海底摄像/照相或地质取样进行总体估算。

2.2.3 结壳含水率(η)

结壳含水率是指湿结壳所含水的质量分数,其计算公式为:

$$\eta = ((W_w - W_D) / W_w) \times 100\% \quad (9)$$

其中: W_w 为结壳湿质量; W_D 为结壳干质量。

结壳含水率可在船上现场测定。

2.2.4 结壳湿密度(ρ_w)

为矿块内结壳平均湿密度,可由船上现场调查测定。

2.2.5 海底坡度(θ)

为矿块内海底的平均坡度。对于相同大小的矿块,海底坡度愈大,矿块投影的海底面积愈大。

2.2.6 开采成本(C_M)

开采成本是指开采单位质量结壳矿石所消耗的人力劳动和货币资本。

矿石的开采成本与结壳产出状态、地形特征,以及结壳丰度直接相关,矿块地形愈简单、结壳丰度愈大,开采效率愈高,单位质量矿石的开采成本愈低。

2.2.7 运输成本(C_T)

运输成本是指单位质量矿石由矿区运至冶炼地所消耗的人力劳动和货币资本。

矿石运输成本与矿区距离选冶基地的远近和矿石中基岩的混入比例相关,矿区距离选冶基地愈远,混入基岩愈多,运输成本愈高。

2.2.8 选矿成本(C_S)

选矿成本是指单位质量矿石选矿所消耗的人力劳动和货币资本。

板状结壳与钴结核采矿基岩混入少,矿石纯度较高,选矿成本低,而砾状结壳开采时基岩混入比例大,选冶成本高。

2.2.9 冶炼成本(C_{Me})

冶炼成本是指冶炼单位质量精矿石所消耗的人力劳动和货币资本。

因各类结壳成分类似,各类结壳的冶炼成本可能相差不大。

3 结壳资源评价

根据国际海底管理局“区域”资源探矿与勘探规章精神,单个勘探许可可获得各类“区域”资源量以面积计算。因此,单位面积资源状况的好坏就成为决定申请者实际获得“区域”资源量或“区域”资源开发利润的关键因素。根据勘查程度和评价目的,富钴结壳资源评价分地质评价和技术经济评价 2 个阶段。地质评价

旨在划定矿块边界, 查明各矿块单位面积内的矿石量(丰度)、可采矿石量、可选矿石量, 以及单位面积内的金属量、可采金属量、可选金属量和可冶金属量, 确定矿块规模及各矿块资源量, 为结壳申请区块布设和勘探区圈定提供地质依据。技术经济评价是在地质评价的基础上, 根据既有技术经济条件, 选取合理的技术经济参数, 预测既有技术经济条件下各矿块单位面积内矿石、可采矿石、可选矿石、可冶矿石的价值, 以及各矿块单位面积矿石的开采成本、运输成本、选矿成本和冶炼成本(随技术水平和人力成本等动态变化), 确定特定技术经济条件下各矿块单位面积资源开发可能带来的利润, 从而为结壳申请区块布设和勘探区圈定提供技术经济依据。

3.1 结壳地质评价

3.1.1 单位面积矿石量(O)

单位面积矿石量是指单位面积海面在海底投影区内干结壳的质量。单位面积矿石量(O)与结壳丰度(A)的关系如下:

$$O = A \cdot \cos\theta \quad (10)$$

在海底坡度平缓($\theta \rightarrow 0$)的情况下, $\cos\theta \rightarrow 1$, 结壳丰度(A)即可视为单位面积矿石量(O)。

3.1.2 单位面积金属量(M)

单位面积金属量是指单位面积矿石所含有用金属的总量。

由于结壳与深海多金属结核中主要成矿金属的丰度和价格差异颇大, 通常以一种金属的含量和价格难以准确表征矿石的总体价值。一般引入 Ni 当量品位^[20]和 Co 当量品位^[3]来表征矿石中有用金属的量以评价单位质量矿石的价值。但无论是 Ni 当量品位还是 Co 当量品位, 都只能评价矿石的金属品位, 即可评价矿石的质量, 而不能评价单位面积矿石所含有用金属量, 即不能评价矿区的质量。为此, 有学者^[21]针对多金属结核评价提出了 Ni 等量丰度的概念, 用以评价单位面积多金属结核所含有用金属量。

由于 Co 含量高低对结壳质量的优劣起着决定性的作用, 比照 Ni 等量丰度, 可由 Co 等量丰度(A_{CE})代替单位面积金属量(M), 评价结壳矿区质量。单位面积结壳中 m 种金属的 Co 等量丰度可表示为:

$$A_{CE} = O \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = O \cdot G_{CE} \quad (11)$$

3.1.3 单位面积可采矿石量(O_M)

单位面积可采矿石量是指在特定技术条件下, 开采单位面积矿石所获得的干结壳质量。根据定义, 单位面积可采矿石量(O_M)可表示为:

$$O_M = O \cdot r_M \quad (12)$$

3.1.4 单位面积可采金属量(M_M)

单位面积可采金属量是指单位面积可采矿石中所含有用金属的质量。

与以 Co 等量丰度(A_{CE})表示单位面积金属质量(M)相对应, 单位面积可采金属质量(M_M)可以单位面积可采 Co 等量丰度(A_{CEM})表示:

$$A_{CEM} = A_{CE} \cdot r_M = O_M \cdot G_{CE} = O \cdot r_M \cdot G_{CE} \quad (13)$$

在国际金属价格波动的情况下, 单位面积结壳中 m 种金属的可采 Co 等量丰度可表示为:

$$A_{CEM} = O_M \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = O \cdot r_M \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j \quad (14)$$

3.1.5 单位面积可选矿石量(O_S)

单位面积可选矿石量是指在特定技术条件下, 单位面积可采矿石经选矿可获得的精矿石量。单位面积可选矿石量(O_S)可表示为:

$$O_S = O_M \cdot r_S = O \cdot r_M \cdot r_S \quad (15)$$

3.1.6 单位面积可选金属量(M_S)

单位面积可选金属量是指单位面积可选矿石中所含有用金属的量。

与以单位面积可采 Co 等量丰度(A_{CEM})表示单位面积可采金属量(M_M)相对应, 单位面积可选金属量(M_S)也可以单位面积可选 Co 等量丰度(A_{CES})表示:

$$A_{CES} = A_{CEM} \cdot r_S = A_{CE} \cdot r_M \cdot r_S = O_M \cdot G_{CE} \cdot r_S = O \cdot r_M \cdot G_{CE} \cdot r_S \quad (16)$$

在国际金属价格波动的情况下, 单位面积结壳中 m 种金属的可选 Co 等量丰度可表示为:

$$\begin{aligned} A_{CES} &= O_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = O_M \cdot r_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j \\ &= O \cdot r_M \cdot r_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j \end{aligned} \quad (17)$$

3.1.7 单位面积可冶金属量(M_{Me})

单位面积可冶金属量是指在既定技术条件下, 单位面积可选矿石经冶炼可获得的有用金属量。

与以单位面积可采 Co 等量丰度(A_{CEM})表示单位面积可采金属量(M_M)和以单位面积可选 Co 等量丰度(A_{CES})表示单位面积可选金属量(M_S)一样, 单位面积可冶金属量(M_{Me})也可以单位面积可冶 Co 等量丰度(A_{CEMe})表示:

$$\begin{aligned} A_{CEMe} &= O_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot r_{Mej} \cdot p_j = \\ &= O_M \cdot r_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot r_{Mej} \cdot p_j = \\ &= O \cdot r_M \cdot r_S \cdot \frac{1}{p_{Co}} \sum_{j=1}^m C_j \cdot r_{Mej} \cdot p_j \end{aligned} \quad (18)$$

在各类金属冶炼回收率(r_{Me})接近的情况下, 单位面积可冶 Co 等量丰度($A_{CE_{Me}}$)可简化为:

$$\begin{aligned} A_{CE_{Me}} &= A_{CE_S} \cdot r_{Me} = A_{CE_M} \cdot r_S \cdot r_{Me} = \\ A_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot r_{Me} &= O_S \cdot G_{CE} \cdot r_{Me} = O_M \cdot G_{CE} \cdot r_S \cdot r_{Me} = \\ &O \cdot G_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot r_{Me} \end{aligned} \quad (19)$$

对紧缺的战略资源,在不考虑开发成本的前提下, 仅需对各矿块进行地质评价即可。圈定勘探区时自单位面积可冶金属量(M_{Me} , 以单位面积可冶 Co 等量丰度 $A_{CE_{Me}}$ 表示)最大的矿块依次选取。在各类矿石采矿回收率、选矿回收率, 以及金属冶炼回收率大致相同或一时难以确定时, 选取单位面积矿石量或单位面积金属量最大的矿块。但在考虑矿石开发成本的情况下, 应对矿区开展技术经济评价。

3.2 结壳技术经济评价

3.2.1 单位面积矿石的经济价值

(1) 单位面积矿石的价值(V)。单位面积矿石的价值是指在既定国际金属价格条件下, 单位面积矿石中 m 种金属的潜在总价值。单位面积矿石的价值可表示为:

$$V = O \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = A_{CE} \cdot p_{Co} = O \cdot G_{CE} \cdot p_{Co} \quad (20)$$

(2) 单位面积可采矿石的价值(V_M)。单位面积可采矿石的价值是指在既定国际金属价格和采矿条件下, 单位面积可采矿石中 m 种金属的潜在总价值。单位面积可采矿石的价值可表示为:

$$\begin{aligned} V_M &= O_M \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = O \cdot r_M \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = \\ V \cdot r_M &= A_{CE} \cdot r_M \cdot p_{Co} = O \cdot G_{CE} \cdot r_M \cdot p_{Co} \end{aligned} \quad (21)$$

(3) 单位面积可选矿石的价值(V_S)。单位面积可选矿石的价值是指在既定国际金属价格和采、选条件下, 单位面积可选矿石中 m 种金属的潜在总价值。单位面积可选矿石的价值可以表示为:

$$\begin{aligned} V_S &= O_S \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = O_M \cdot r_S \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j = \\ O \cdot r_M \cdot r_S \cdot \sum_{j=1}^m C_j \cdot p_j &= V_M \cdot r_S = V \cdot r_M \cdot r_S = \\ A_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot p_{Co} &= O \cdot G_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot p_{Co} \end{aligned} \quad (22)$$

(4) 单位面积可冶矿石的价值(V_{Me})。单位面积可冶矿石的价值是指在既定国际金属价格和采、选、冶条件下, 单位面积可选矿石中 m 种可冶金属的总价值。单位面积可冶矿石的价值可表示为:

$$V_{Me} = O_S \cdot \sum_{j=1}^m r_{Mej} \cdot C_j \cdot p_j = O_M \cdot r_S \cdot \sum_{j=1}^m r_{Mej} \cdot C_j \cdot p_j =$$

$$O \cdot r_M \cdot r_S \cdot \sum_{j=1}^m r_{Mej} \cdot C_j \cdot p_j \quad (23)$$

在各种金属冶炼回收率接近的情况下, 上式可简化为:

$$\begin{aligned} V_{Me} &= V_S \cdot r_{Me} = V_M \cdot r_S \cdot r_{Me} = V \cdot r_M \cdot r_S \cdot r_{Me} = \\ A_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot r_{Me} \cdot p_{Co} &= O \cdot G_{CE} \cdot r_M \cdot r_S \cdot r_{Me} \cdot p_{Co} \end{aligned} \quad (24)$$

3.2.2 单位面积矿石的开发成本

单位面积矿石的开发成本由矿石的开采成本(C_M^A)、运输成本(C_T^A)、选矿成本(C_S^A)和冶炼成本(C_{Me}^A)构成。

(1) 单位面积矿石的开采成本(C_M^A)可表示为:

$$C_M^A = C_M^W \cdot O_M = C_M^W \cdot O \cdot r_M \quad (25)$$

(2) 单位面积矿石的运输成本(C_T^A)可表示为:

$$C_T^A = C_T^W \cdot O_M = C_T^W \cdot O \cdot r_M \quad (26)$$

(3) 单位面积矿石的选矿成本(C_S^A)可表示为:

$$C_S^A = C_S^W \cdot O_M = C_S^W \cdot O \cdot r_M \quad (27)$$

(4) 单位面积矿石的冶炼成本(C_{Me}^A)可表示为:

$$C_{Me}^A = C_{Me}^W \cdot O_S = C_{Me}^W \cdot O_M \cdot r_S = C_{Me}^W \cdot O \cdot r_M \cdot r_S \quad (28)$$

(5) 单位面积矿石开发总成本

单位面积矿石开发总成本(C)为单位面积矿石的开采成本(C_M^A)、运输成本(C_T^A)、选矿成本(C_S^A)和冶炼成本(C_{Me}^A)之和, 可表示为:

$$\begin{aligned} C &= C_M^A + C_T^A + C_S^A + C_{Me}^A = (C_M^W + C_T^W + C_S^W + C_{Me}^W \cdot r_S) \cdot \\ O_M &= (C_M^W + C_T^W + C_S^W + C_{Me}^W \cdot r_S) \cdot O \cdot r_M \end{aligned} \quad (29)$$

3.2.3 单位面积矿石开发利润(E)

单位面积矿石开发利润为单位面积可冶矿石的价值(V_{Me})与单位面积矿石开发总成本(C)之差, 可表示为:

$$E = V_{Me} - C \quad (30)$$

当 $E > 0$ 时, 表明结壳开发是赢利的; 当 $E = 0$ 时, 表明结壳开发利润与成本持平; 当 $E < 0$ 时, 表明结壳开发是亏损的。

4 结论

(1) 提出以“单位面积”为基本评价单元, 分“矿块”评价结壳资源的思路, 认为探明矿石分布规律和划分矿块, 摸清各矿块资源状况, 是结壳资源评价的核心所在, 也是勘探区圈定的基础。

(2) 定义开采回收率、选矿回收率和金属冶炼回收率等评价指标, 引入 Co 等量丰度(CEA)来表征单位面积金属量(M), 建立结壳资源地质评价方法, 以期更加准确地描述矿块的质量。在引入单位面积矿石的价值(V, Co 等量丰度与国际市场 Co 的价格)、开发成本、开发利润的基础上, 初步建立结壳资源技术经济评价框架模型。

(3) 由于各类结壳资源量计算方法不尽相同, 采、选、冶工艺也有差异, 而结壳产出类型及区域分布受微地形地貌制约, 以微地形地貌调查与精确定位取样和海底照相/摄像资料为基础, 依地貌单元和产出结壳特征划分矿块是结壳资源评价的基础。

(4) 结壳资源勘查应以结壳资源评价的需要为前提, 选用适当的技术方法, 获取资源评价所需的参数。

参考文献:

- [1] 何高文. 大洋多金属结核资源勘查 II 阶段资源量计算方法的选择[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 21-29.
HE Gao-wen. The method chosen for deep ocean polymetallic nodule resources calculation during exploration stage II[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 21-29.
- [2] 武光海, 周怀阳, 杨树峰. 最近区域法与地质矿块法在富钴结壳资源量评估中的综合应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 87-92.
WU Guang-hai, ZHOU Huai-yang, YANG Shu-feng. Combined application of the methods of the nearest domain and geological block to resource evaluation of cobalt-rich crust on a seamount in the Pacific[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(4): 87-92.
- [3] 周怀阳, 武光海, 杨树峰. 关于对我国大洋富钴结壳进行地质经济评价工作的讨论[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 1-5.
ZHOU Huai-yang, WU Guang-hai, YANG Shu-feng. On Chinese exploration about the cobalt-rich manganese crust by means of both geological and economical evaluation[J]. Geology and Prospection, 2001, 37(2): 1-5.
- [4] 杨克红, 胡光道, 章伟艳, 等. 富钴结壳资源量评估参数的分形特征研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 88-93.
YANG Ke-hong, HU Guang-dao, ZHANG Wei-yan, et al. Fractal characters of the evaluation parameters of resource quantity of cobalt-rich crust[J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 88-93.
- [5] 周林立, 胡光道. 富钴结壳资源量评估方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(6): 29-31.
ZHOU Lin-li, HU Guang-dao. Methods to evaluate cobalt-rich crust resources[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(6): 29-31.
- [6] 吴自银, 初凤友, 马维林, 等. 网格剖分积分法计算富钴结壳资源量[J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 81-87.
WU Zi-yin, CHU Feng-you, MA Wei-lin, et al. Calculation on the resource quantity of cobalt-rich crust using the grid subdivision and integral method[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(5): 81-87.
- [7] 程永寿, 冯志勇, 殷汝广, 等. 基于 GIS 的富钴结壳资源量计算系统开发[J]. 海洋通报, 2007, 26(6): 85-90.
CHENG Yong-shou, FENG Zhi-yong, YIN Ru-guang, et al. Development of the evaluation system for the resource quantity of the cobalt-rich crust based on gis[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(6): 85-90.
- [8] 张国祯. 富钴结壳矿区申请需要解决的两个重要问题[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(10): 19-22.
ZHANG Guo-zhen. Two important issues should be resolved before cobalt-rich crust ore area application[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(10): 19-22.
- [9] 武光海, 马维林, 刘捷红, 等. 海山富钴结壳的圈矿方法[J]. 海洋学研究, 2005, 23(4): 15-19.
WU Guang-hai, MA Wei-lin, LIU Jie-hong, et al. A method for finding the ore block of Co-rich crusts on seamounts[J]. Journal Ofmarine Sciences, 2005, 23(4): 15-19.
- [10] 杨克红, 初凤友, 马维林, 等. 富钴结壳资源远景区圈定方法[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 125-130.
YANG Ke-hong, CHU Feng-you, MA Wei-lin, et al. Methods for delineating the resource perspective area of cobalt-rich crusts[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(6): 125-130.
- [11] 杨克红, 初凤友, 马维林, 等. 富钴结壳多维数据模型及矿区圈定研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(6): 58-63.
YANG Ke-hong, CHU Feng-you, MA Wei-lin, et al. Research on multi-dimension data models and ore area delineation of cobalt-rich crust[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(6): 58-63.
- [12] 马维林, 初凤友, 金翔龙. 富钴结壳资源评价和圈矿方法探讨[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 67-73.
MA Wei-lin, CHU Feng-you, JIN Xiang-long. Method approach of resource assessment and ore delineation for cobalt-rich crust[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2): 67-73.
- [13] 章伟艳, 胡光道, 张富元, 等. 中太平洋 SA 海山钴结壳勘查网度分析[J]. 矿物学报, 2008, 28(3): 317-322.
ZHANG Wei-yan, HU Guang-dao, ZHANG Fu-yuan, et al. Analysis of exploratory grid for cobalt crust resources on SA seamount in the central pacific[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(3): 317-322.
- [14] Iyer S D, Sharma R. Correlation between occurrence of manganese nodules and rocks in a part of the central Indian Ocean Basin[J]. Mar Geol, 1990, 92: 127-138.

- [15] Pichocki C, Hoffert M. Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts sampled in French Polynesia[J]. *Mar Geol*, 1987, 77: 109–119.
- [16] von Stackelberg U, Beiersdorf H. The formation of manganese nodules between the Clarion and Clipperton fracture zones southeast of Hawaii[J]. *Mar Geol*, 1991, 98: 411–423.
- [17] Elderfield H, Hawkesworth C J, Greaves M J. Rare earth element zonation in Pacific ferromanganese nodules[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45: 1231–1234.
- [18] Hein J R, Morgan C L. Influence of substrate rocks on Fe-Mn crust composition [J]. *Deep-sea Res*, 1999, 46: 855–875.
- [19] 卜文瑞, 石学法, 彭建堂. 中太平洋海山铁锰结核形成环境的地球化学制约[J]. *科学通报*, 2001, 46(S1): 89–95.
Bu Wen-rui, Shi Xue-fa, Peng Jian-tang, et al. Geochemical characteristics of seamount ferromanganese nodules from mid-Pacific Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 48(S1): 89–95.
- [20] United Nations (Ocean Economics Technology Branch). Assessment of Manganese Nodule Resource (Seabed Minerals Series Volume I)[M]. London: Graham & Trotman Limited, 1982: 1–79.
- [21] 张富元. 用镍等量丰度和镍等量品位圈定和评价大洋多金属结核矿区[J]. *海洋学报*, 1996, 18(3): 58–65.
ZHANG Fu-yuan. Using nickel equal abundance and nickel equal grade to delineate and assess resource area of polymetallic nodules[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(3): 58–65.

(编辑 何运斌)