

文章编号:0258-7106(2005)01-0081-04

# 海底金属矿产资源的开发——回顾与未来展望\*

刘玉山,吴必豪

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

**摘要** 占地球面积 70% 的海洋蕴藏着巨量的矿产资源。文章简要回顾了铁锰结核、富钴结壳及热液硫化物等海底金属矿产资源开发研究的进展、经验和挫折,并通过综合分析指出,海洋矿产资源的开发是新世纪的必然趋势,而新近在西南太平洋发现的浅成低温热液金矿可能成为海洋金属矿产开发研究的热点。

**关键词** 海底矿产;海底采矿;综述

**中图分类号**:P744

**文献标识码**:A

随着现代社会和工业对各种矿产资源需求的增长以及陆上矿产资源的逐渐枯竭,研究和开发大洋海底矿产资源的问题就变得越来越迫切了。

据专家估算,现代社会对矿物原料的需求量,每 15 年就要翻一番,现在一年的开采量就达 250 亿吨之多(Авдонин, 2000)。不少金属已出现短缺,例如印度等国家已短缺 Pb、Ni、Cu、Zn 亦仅可维持不到 50 年。这些资源均属不可再生资源,一旦枯竭,便会产生严重后果。而占地球表面面积 70.2% 的浩瀚海洋则蕴藏着几乎取之不尽的生物、能源和矿产资源。据 Авдонин(2000)粗略推算,仅海底的 Cu、Ni、Co、Mn 金属资源的蕴藏量就可供全球使用千年以上。只是,目前人类对海洋资源的开发利用程度还很低,除石油、天然气的海上开采约占 1/4 份额外,对海底金属矿产的开发几乎为零。这种形势迫使人类重视和加快了对海洋资源的研究和开发。

近 30 年来,各国不但相继发现和调查研究了铁锰结核、富钴结壳、海底热液硫化物、海底金属沉积和气体水合物等重要的海洋矿产资源,而且进行了海底工业采矿试验,初步形成了铁锰结核和富钴结壳的工业开采冶炼工艺。可以说,开发海洋金属矿产的社会和科技条件已基本具备。因此,专家预言(Авдонин, 2000),在第三个千年里,海洋资源的开发利用将超过陆上资源,“21 世纪将是人类开发利用海洋的世纪”。

## 1 海底矿产资源研究和开发的回顾

### 1.1 海洋矿产资源的潜力巨大

由于海洋矿产资源对人类和现代社会的发展意义十分重大,近几十年来世界各国纷纷抢滩于这一资源领域的调查和研究。有鉴于此,联合国海洋公约大会于 1994 年曾将世界海洋划分为 200 海里专属经济区(EEZ)(这里的资源属主权国)和 200 海里以外的国际公海。广阔的国际公海中蕴藏的所有资源是属于“人类的共同财富”,各国可依法进行调查研究和申请开采。

大洋中和大洋底蕴藏的资源十分丰富和多样,有生物矿产,也有非生物矿产。非生物矿产中又包括了流体矿产(石油、天然气、气体水合物)和固体矿产。表 1 列举了几种常见且重要的海洋矿产资源。

虽然海洋矿产资源的海上调查研究已有百年以上的历史,但是,真正开发开采性的调查研究则始于上世纪中叶对东太平洋海底铁锰结核的勘查。当时,对百余个站位的结核矿石进行了取样分析。根据这些资料,Меро(1965)在其专著《海洋的矿物资源》中曾估算太平洋中蕴藏有万亿( $10^{12}$ )吨的铁锰结核资源,而且这些结核以超过人类开采的速度生长着。他的估算后来被证明确有夸大,但其结论则极大地鼓舞和推动了工业大国对海底矿产资源的开

\* 第一作者简介 刘玉山,1935 年生,研究员,长期从事高温高压成矿作用实验研究,近十年来转向大洋铁锰结核和富钴结壳的地球化学研究。

收稿日期 2004-06-25;改回日期 2004-09-28。

表 1 几种重要的海洋矿产资源(据 Rona, 2002)

Table 1 Some important kinds of marine mineral resources (after Rona, 2002)

成因类型	矿 产 资 源	
	陆缘浅海	深海海盆
陆源成因	海滨砂矿(钻石, Au, Sn, W, Ti, Zr.)	
生物成因	石油, 天然气, 气体水合物	石油, 天然气, (气体水合物)
成岩作用成因	磷块岩	
水成(自生)成因	磷块岩, 富钴结壳	富钴结壳, 铁锰结核
火山成因	热液硫化物	热液硫化物, 金属沉积

发性勘查和研究。在基本查明了 CC 区铁锰结核的资源量及开发前景后, 在 20 世纪 80 ~ 90 年代, 各国又开始了另一个更具开发远景的太平洋、印度洋富钴结壳的矿产资源调查, 在中太平洋确定了近 10 个具开发远景的富钴结壳产区。在此期间, 不少国家对海底热液硫化物矿床也进行了深入的研究。在过去的 30 年间, 包括中国在内的各国完成了千余次航次的海上地质调查、取样和海底钻探, 对铁锰结核和富钴结壳的分布、物质成分、资源量和采冶工艺进行了全面而深入的研究, 使人们对海底矿床的分布、资源量和开发前景有了一个较全面和较准确的了解。

已取得的调研结果显示, 海洋中蕴藏的金属矿产资源量十分巨大, Mn、Ni、Co、Cu 等金属矿产的资源量均超过其陆上资源的预测值。按现在的开采水平, 这些金属资源足够使用上千年(表 2)。

### 1.2 海洋金属矿产的开采尚待时日

面对如此巨大的资源, 当然不乏先驱者研究其工业开采和利用问题。远在 20 世纪 60 年代, 就有人预言太平洋铁锰结核会在 5 ~ 10 年内进入工业开

采。在随后的 20 年间, 虽然开采结核的工艺技术已基本成熟, 但由于世界 Ni、Cu 的价格下跌, 海洋铁锰结核的工业开采被预测为不盈利的, 工业大国和国际财团无意继续投资, 因而, 铁锰结核的开采被冷却了下来(Glasby, 2000; 2002)。在 20 世纪 80 年代, 另一种海底矿产——富钴结壳的前景呈现了出来。这种矿产由于富含 Co、Pt 等高附加值的金属元素以及产出水深浅、距海岛和大陆近, 而被认为开发前景优于铁锰结核(Ghosh, 2000)。特别是在中太平洋夏威夷、约翰斯顿岛 200 海里美国专属经济区内, 富钴结壳的钴含量特别高(含 Co 高达 2%, 平均 0.7% ~ 0.8%), 矿石储量可达  $300 \times 10^6$  t, 被认为是目前最有工业开采远景的矿区。但是, 1990 年美国夏威夷州 DOI-MMS 和 DPED 机构提出了一个富钴结壳的开采和冶炼设计, 结果认为, 无论用火法或湿法冶炼, 目前都不可能盈利(Hein et al, 2000)。另据一份未发表的有关马绍尔群岛海区富钴结壳开发经济问题的报告, 开采和冶炼的投资约为 7.5 亿美元, 它要求最低年收益必须达到 1 亿美元。这在现今年处理

表 2 海洋金属矿产——计算和预测的资源量

Table 2 Marine ore deposits: calculated and estimated resource volumes

矿产及海区	资 源 量/ $10^6$ t								资料来源
	干矿石	Mn	Ni	Co	Cu	Zn	Pb	Au	
多金属结核									
俄罗斯开辟区	700	205	9.7	1.6	7.7				Авдонин, 2000
CC 区	34000	7500	340	78	270				Morgan, 2000
太平洋	90000	20000	900	200	700				Morgan, 2000
富钴结壳									
麦哲伦海山	473.5		-	2.4					Andreev and Gramburg, 1998
中大海山	360		-	3.0					Andreev and Gramburg, 1998
太平洋	72000	380	8.8	12	3.2				Andreev and Gramburg, 1998
海底热液硫化物									
世界大洋	1400	-	-	-	52.7	126.3	31.9	0.002	Андреев, 1995
大陆年开采量	-	13.3	0.93	0.04	-				Ватулин, 1993
大陆资源预测		15500	87.7	6.1	619	303	124	0.061	Андреев, 1995

能力为 70 万吨干矿石的生产能力下是不可能实现的<sup>①</sup>。因此,它的工业开采也尚待时日。

这只是从经济方面考虑。海洋矿产的开发取决于诸多因素。钴是重要战略物资,目前 86% 钴的产量来自扎伊尔和津巴布韦。未来形势的变化和技术的进步,都会降低海底矿产资源开发的成本和提高其应用价值。例如找到更富的矿区,海底采冶工艺的改进(比如软管原地采矿,矿石及尾矿的综合利用,等等)或者因供需失调引起的世界镍、钴价格上扬,使得海底矿产的开发比陆上矿石的开采更为合算。只有到那时,海底铁锰结核和富钴结壳的工业开采才能变为现实。有关专家根据当今社会对金属矿产的消耗与全球资源储量形势的推测,认为世界镍、钴矿产资源尚可供应 20~30 年(Sen et al, 1999)。因此,铁锰结核和富钴结壳的工业开采可能要等待 30~50 年。

另外,近几年来海底热液硫化物矿床调查的发现也可能影响和改变海底金属矿产资源开发的进程。产于西南太平洋火山岛弧和弧后盆地的浅成低温热液金矿因其价值高,产出浅以及距海岛近等优势而可能首先被开发。

## 2 未来展望

回顾并不算长久的海洋矿产资源的开发性研究历程,有成就也有挫折。由于实际资料不足,过于乐观的设想,以及客观上镍价的跌落,首次铁锰结核开采开发的努力未能成功;富钴结壳的开采开发的经济和技术条件看来也未成熟。因此,目前海底的铁、锰、钴、镍矿产还只能被看成为一种潜在的金属矿产资源。尽管如此,海底铁、锰、钴、镍矿产毕竟是一种重要的战略矿产资源,而且是无比巨大的“人类共同的财富”。为解决全球的人口、资源和环境问题,推进现代社会的可持续发展,开发海洋矿产资源是必然的趋势。21 世纪可能就是人类全面开发海洋的世纪。此外,深海采矿还能带动冶金、机械、电子、造船等高科技的发展。因此,各工业大国对海底采矿的调查和科研都十分重视,并投入了足够的力量。

近几年的海底热液硫化物矿床调查所取得的重大进展和发现更是令人鼓舞。在西南太平洋板块会聚带上发现了富含金和银的海底热液硫化物矿床。

Herzig 等(2000)报道了在巴布亚新几内亚东南之 Lihir 岛附近水域的一个水下火山锥中硫化物矿石富含金,其 40 个矿石样品中,金的平均含量为  $26 \times 10^{-6}$ ,最高达  $230 \times 10^{-6}$ 。此前,人们早已注意到在西南太平洋的俯冲带火山岛弧和弧后盆地中,广泛发育的浅成低温热液硫化物矿石富含 Ag 和 Au。1997 年,巴布亚新几内亚政府还批准了中马努斯盆地和东马努斯盆地两个矿区(Vienna Woods 和 Pac Manus)的开发租赁申请,该矿床的金品位分别为  $30 \times 10^{-6}$  和  $50 \times 10^{-6}$ 。由于 Lihir 金矿产出水深浅(仅 1050 m),距海岛近,因此极具开发价值。专家预言,该金矿的储量如能被证实,它可能成为第一个被开采的海底金属矿床。

作为一个海洋大国,中国非常重视海洋矿产资源的研究和开发,近 20 年来已完成了 10 多个航次的海上调查,对太平洋多金属结核、富钴结壳和海底硫化物矿产的分布、品位、资源量进行了初步的研究。现在,中国已在 CC 区获得 75000 km<sup>2</sup> 的多金属结核开辟区,并在中国大洋协会的统一领导下对开辟区内多金属结核、中西太平洋富钴结壳进行着系统的地质调查和采冶工艺等方面的研究,同时也开始了对海底热液硫化物矿产以及气体水合物的调研。由于中国的海洋调查和科研开始得比较晚,因此尚有大量的工作要做。根据对海底矿产资源开发的大趋势的分析,笔者认为,应暂缓对铁锰结核的勘查,而加强对富钴结壳的调研,通过进一步的详查和勘探,希望能在中太平洋或麦哲伦海山区寻找和圈定一处有开发远景的富钴结壳富矿区(比如,钴的平均品位为 0.7%~0.8%,结壳的平均厚度大于 60 mm)。

今后中国海洋矿产资源的开发研究重点是否要转向西南太平洋,这是个值得考虑的问题。该区内,在太平洋板块会聚带的岛弧及弧后盆地,发育有包括浅成低温热液金矿在内的各种海底硫化物矿床 30 余处。由于这类矿床富含金和银,产出水深浅、距海岛和陆地近,因此,它们的开发前景十分看好,目前已经成为研究的热点。此外,这些矿床都是近些年来新发现的,研究程度相对较低,又邻近中国,这些都是有利因素。目前中国科学家已在南海海域发现了气体水合物的矿化标志。相信在这一海域,经过

① Callies D L and Johnson C J. 1989. Legal, business and economic aspects of cobalt-rich manganese crust mining and processing in Republic of the Marshall Islands. Unpublished report.

若干年的工作,中国科学家一定会在海洋矿产资源的研究和开发方面取得重大进展。

### Reference

- Andreev S I and Gramburg I S. 1998. The explanatory note to the metallogenic map of the world ocean [ M ]. St. Petersburg: VNIIOceanologia and Inter Ocean Metall.
- Glasby G P. 2000. Lesson learned from deep-sea mining [ J ]. Science, 289: 551 ~ 553.
- Glasby G P. 2002. Deep seabed mining: past failures and future prospects [ J ]. Marine georecources and geotechnology, 20: 161 ~ 176.
- Ghosh E F and Mukhopadhyay R. 2000. Mineral wealth of the ocean [ M ]. Rotterdam: A. A. Balke ma. 1 ~ 249.
- Hein J R, Koschinsky A, Bau M, et al. 2000. Cobalt-rich ferromanganese crust in the Pacific [ A ]. In: Cronan D S, ed. Handbook of marine mineral deposits [ C ]. Boca Raton: CRC Press. 239 ~ 279.
- Herzig P M and Hannington M D. 2000. Poly metallic massive sulfides and gold mineralization at mid-ocean ridges and in subduction-related environments [ A ]. In: Cronan D S, ed. Handbook of marine mineral deposits [ C ]. Boca Raton: CRC Press. 347 ~ 368.
- Mero J L. 1965. Mineral resources of the sea [ M ]. Amsterdam: Elsevier.
- Morgan C L. 2000. Resource estimates of the Clarion-Clipperton manganese deposits [ A ]. In: Cronan D S, ed. Handbook of marine mineral deposits [ C ]. Boca Raton: CPC Press. 145 ~ 170.
- Rona P A. 2002. Marine minerals for 21st century [ J ]. Episodes, 25 (1): 2 ~ 12.
- Sen P K and Singh T R P. 1999. Design of flexible configuration nodule pilot plants in the context of evolving metal markets [ A ]. Proceedings of the Third Ocean Mining Symposium [ C ], Nov. 8 ~ 10, 1999. Goa India. 254 ~ 259.
- Авдони В В и др. 2000. Полезные ископаемые Мирового океана [ М ]. Москва: Изд МГУ. 1 ~ 27.
- Андреев С И и др. 1995. Минеральные ресурсы мирового океана их потенциал и перспективы освоения [ А ]. In: Пущаровский Ю М, ed. Геология и минеральные ресурсы мирового океана [ С ]. Санкт Петербург: ВНИИОкеангеология. 147 ~ 151.
- Ватурин Г Н. 1993. Руды океана [ М ]. Москва: Наука. 75 ~ 125.

## Exploitation of marine mineral resources: review and prospects

LIU Yu-shan and WU Bi-hao

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

### Abstract

Though huge in amounts, marine mineral resources haven't been exploited yet. In this paper, the exploitation and research history of the ferromanganese nodules, the Co-rich crusts and the marine sulfide deposits is briefly reviewed. The first attempt to exploit ferromanganese nodules ended in failure. The perspective of Co-rich manganese crust mining seems uncertain. Nevertheless, in the new century, the industrial exploitation of marine mineral resources is an inexorable trend. The new Au-rich hydrothermal deposits in the subduction zone of the Southwest Pacific appear as a more promising prospect for mining.

**Key words:** marine mineral deposits, mineral resources, marine mining