

doi:10.3799/dqkx.2011.001

太平洋海山钴结壳资源量估算

张富元¹, 章伟艳¹, 朱克超², 张霄宇³, 倪建宇¹, 赵宏樵¹, 郑连福¹

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

2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

3. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310027

摘要: 为合理地估算出太平洋海山钴结壳资源量, 基于我国西太平洋海山钴结壳拖网采样调查资料以及对太平洋海山钴结壳资源分布规律和钴结壳矿区圈定参数指标的深入研究, 创造性地按海山不同高度、不同洋壳年龄赋予不同结壳厚度, 进而首次计算出太平洋海山钴结壳资源量为 $(507.06 \sim 1\,014.11) \times 10^8$ t, 锰为 $(111.15 \sim 222.29) \times 10^8$ t, 钴为 $(3.04 \sim 6.08) \times 10^8$ t, 镍为 $(2.23 \sim 4.46) \times 10^8$ t, 铜为 $(0.66 \sim 1.32) \times 10^8$ t, 结壳分布面积为 $2\,062\,862$ km². 通过 Co 通量与结壳 Co 沉积量、结壳厚度的相关分析表明, 赋予不同洋壳年龄段的结壳厚度是理论厚度的 6.10%~12.20%, 这与 Ku *et al.* 得出“结壳生长时间只占其整个生命史 4%”的认识非常相近, 说明所赋结壳厚度基本合理, 得出的结壳资源量基本正确. 为整个大洋海盆内海山钴结壳资源量的估算提供了新方法.

关键词: 太平洋海山; 钴结壳; 资源量; 海洋地质; 矿产资源.

中图分类号: P628; P744

文章编号: 1000-2383(2011)01-0001-11

收稿日期: 2010-08-31

Resource Estimation of Co-Rich Crusts of Seamounts in the Pacific

ZHANG Fu-yuan¹, ZHANG Wei-yan¹, ZHU Ke-chao², ZHANG Xiao-yu³,
NI Jian-yu¹, ZHAO Hong-qiao¹, ZHENG Lian-fu¹

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, The Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey of MLR, Guangzhou 510075, China

3. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: Marine Co-rich crusts are important as potential mineral resources for Co, Ni, Cu, Mn, and other metals, as well as for the paleoenvironment signals stored in their stratigraphic layers. The higher Co, Ni and Pt contents of crusts relative to pelagic polymetallic nodules and hydrothermal deposits have made seamount crusts a potential target for commercial exploitation. In order to obtain the amount of Co-rich crust resources on seamounts in the Pacific, based on the surveying data of Co-rich crust resources on seamounts in the western Pacific by means of dredge hauling, a series of detailed research on the distribution of Co-rich crust resources and parameter index for delineation of Co-rich crust resources on seamounts in the Pacific, each seamount is endowed with the crust thickness according to its height and age of ocean crust and consequent amount of dry crust resources is at first calculated to be $(507.06 \sim 1\,014.11) \times 10^8$ t, $(111.15 \sim 222.29) \times 10^8$ t manganese, $(3.04 \sim 6.08) \times 10^8$ t cobalt, $(2.23 \sim 4.46) \times 10^8$ t nickel, $(0.66 \sim 1.32) \times 10^8$ t copper, and distributed area of crusts on seamounts in Pacific is $2\,062\,862$ km². By means of analyzing relationships between Co-fluxes with amount of Co-deposited in the crust and crust thickness, the endowed crust thickness accounts for 6.10%–12.20% of the theoretical deductive thickness, which is close to Ku's conclusion of “the crusts were actually growing for 4% of their lifetime”. It is shows that the endowed number of crust thickness is reasonable and the obtained resource amount is reliable. This paper provides a new method for estimating the amount of Co-rich crust resources on seamounts in a whole deep-sea basin.

Key words: Pacific seamount; Co-rich crust; resources amount; marine geology; mineral resources.

基金项目: 国家科学技术部项目 (Nos. 2004DIB3J086, 2006FY220400); 中国大洋协会 (No. DYXM115-01-1-06); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放课题资助 (No. 200809).

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: fyzhang2003@163.com

0 引言

生长在洋底海山上的钴结壳是 Mn、Cu、Co、Ni、Pt 和其他金属的潜在矿产资源(Hein and Morgan, 1999; 徐脉直, 1999). 钴结壳也是储存大量海洋环境信息的重要载体(McMurtry *et al.*, 1994; Hugh and Paul, 1999). 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. 20 世纪 80 年代开始, 德国、俄罗斯、美国、法国、澳大利亚、韩国、日本、中国等国家投入大量经费进行钴结壳资源调查研究. 1981 年德国《太阳号》首次对太平洋莱恩群岛进行钴结壳资源调查, 获得惊人发现(Halbach *et al.*, 1982), 证实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(Yubko *et al.*, 2004). 1983—1984 年美国对中太平洋、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). 大洋钴结壳资源勘查目的之一就是要估算出钴结壳资源量. 然而迄今为止, 国内外尚未估算出太平洋海山钴结壳资源量. 究其原因, 一是因为太平洋幅员辽阔, 水深大, 海山分布浩瀚, 举国之力也难以调查清楚钴结壳资源分布真实情况; 二是对不同高度、不同年龄的每座海山如何赋予它们钴结壳厚度对这一问题缺乏行之有效的解决方法. 本文基于我国近十几年对西太平洋钴结壳资源调查和对太平洋海山钴结壳资源分布规律的深入研究(张海生等, 2001; 何高文等, 2005; Zhang *et al.*, 2007; 张富元等, 2008; Zhang *et al.*, 2008), 在此基础上结合对海山成因、最低含氧层和 Co 通量的深刻认识, 利用国际互联网公布的高精度卫星测高得出的海山数据, 创造性地对太平洋海山按不同高度、不同洋壳年龄分别赋予不同结壳厚度, 进而计算出太平洋海山钴结壳资源量. 同时将钴结壳生长的理论厚度与拖网获得的钴结壳厚度相比较, 得出钴结壳 Co 沉积量约占 Co 通量的 6%, 这与“钴结壳生长时间约占其整个生命史 4%”的认识很接近(Ku *et al.*, 1982), 表明按海山高度和洋壳年龄赋予结壳厚度进而估算海山钴结壳资源量的方法基本可行.

1 太平洋海山分布特征

大洋底海山是钴结壳资源生长的载体, 也是热

点研究的主要对象(Morgan, 1981; Wessel, 1997). 研究洋底海山分布始于 20 世纪 60 年代, Menard (1964)估计太平洋有 30 000 多座海山; Craig and Sandwell(1988)、Smith and Jordan(1988)和 Smith and Sandwell(1997)认为高度大于 1 000 m 的太平洋海山有 50 000 座, 目前只对小于 15% 的海山进行过详细的海底地形勘测、绘图和地质采样, 海山的覆盖面积约占太平洋洋底面积的 6%(Flood, 2001). Wessel and Kroenke(1997)及 Wessel(2001)利用高精度的卫星测高及相关技术得到了全球 14 675 座海山的精确位置及描述海山的一些物理参数, 其中太平洋海山 8 000 多座, 占全球海山总数的 60%(图 1), 这些大规模海山可以追踪出其所处的海山链, 还有一些海山呈簇状或零星状分布. 太平洋海山通常被认为是热点成因. Morgan(1972)、Heezen *et al.* (1973)、Winterer and Metzler(1984)、Clouard and Bonneville(2001)、Koppers *et al.* (2001)和 Koppers and Staudigel(2005)等对海山研究后认为海山链上海山年龄的线性变化是地幔柱活动痕迹的反映. 但也有资料表明海山年龄分布是无序的, 海山链上的海山年龄不遵循线性递减的规律(Smoot, 1999), 这表明海山的形成还受到热点以外因素的影响. 从整个太平洋来看, 高度大于 1 000 m 的大规模海山基本上可以追逐出海山链, 表明热点活动对海山形成起着突出作用. 本文基本采用 Wessel(1997, 2001)提供的海山数据并倾向于海山热点成因.

2 西太平洋海山钴结壳资源量计算和最低含氧层深度

钴结壳资源量计算和资源评价中涉及到的重要参数包括结壳厚度、丰度、金属含量以及最低含氧层深度. 钴结壳厚度是指生长在基岩上的结壳厚度, 通常用 cm 表示. 钴结壳丰度是指海山表面单位面积内湿结壳重量, 用 kg/m^2 表示. 钴结壳丰度计算公式 $F = 10 \times \rho \times D$, 式中 F 为结壳丰度(kg/m^2), ρ 为结壳湿密度(g/cm^3), D 为结壳厚度(cm). Mn、Cu、Co、Ni 是结壳中最有经济价值的金属元素. 近十几年我国对西太平洋($150^\circ\text{E} \sim 165^\circ\text{W}$, $5^\circ\text{N} \sim 25^\circ\text{N}$)海山钴结壳资源调查结果表明(张海生等, 2001; 何高文等, 2005; Zhang *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008), 拖网采样结壳厚度为 0 ~ 22 cm, 平均为 3.08 cm; 丰度为 0 ~ 431.2 kg/m^2 , 平均为

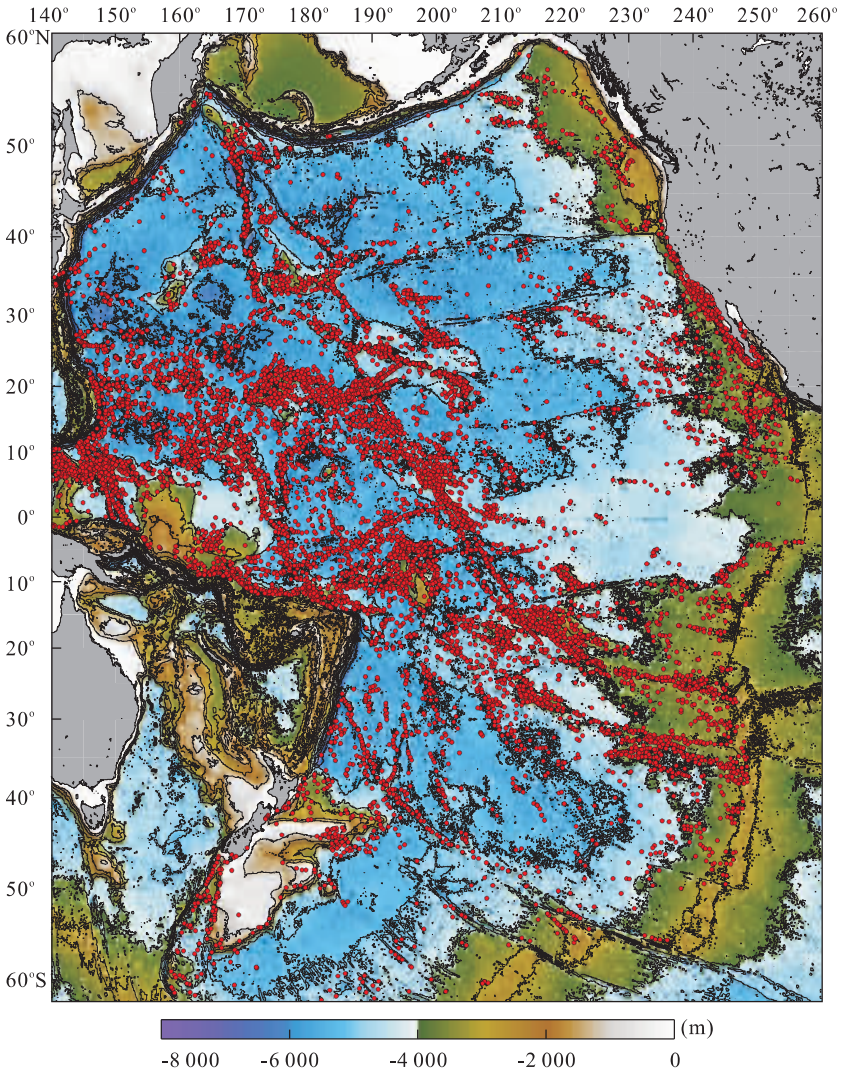


图 1 太平洋海山分布示意(据 Muller *et al.* ,1997 修改)

Fig. 1 Sketch of seamount distribution in the Pacific

颜色表示洋壳年龄;黑点表示海山;数据来自 <http://www.mantleplumes.org>

65.39 kg/m²;Mn 含量为 9.71%~33.32%,平均为 21.92%;Cu 含量为 0.01%~0.31%,平均为 0.13%;Co 含量为 0.14%~1.49%,平均为 0.60%;Ni 含量为 0.18%~1.05%,平均为 0.44%. 含水率为 14.40%~47.13%,平均 28.13%. 西太平洋海山钴结壳主要分布在水深<2 800 m,中太平洋海山钴结壳主要分布在水深<2 500 m(Zhang *et al.* ,2008),东太平洋(夏威夷海山链)海山钴结壳主要分布在水深 800~2 400 m(Craig *et al.* ,1982). 由东向西,结壳分布水深总趋势是随海底水深的变深而变深. 调查表明西太平洋最低含氧层(oxygen minimum zone)深度为 500~1 100 m(图 2),太平洋其他海区的最低含氧层深度大致也是如此(Halbach and Puteanus,1984; Koschinsky and Halbach-

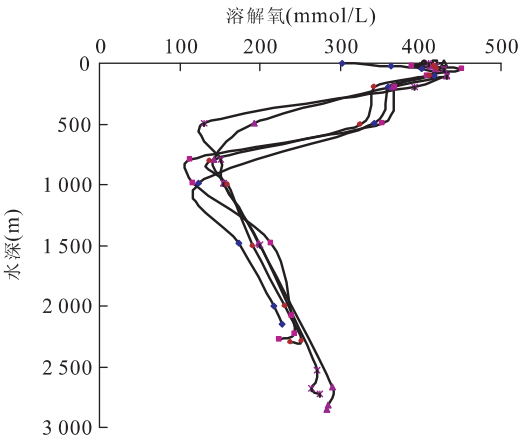


图 2 西太平洋最低含氧层水深分布(5 个测站)

Fig. 2 The water depth distribution of oxygen minimum zone in the western Pacific

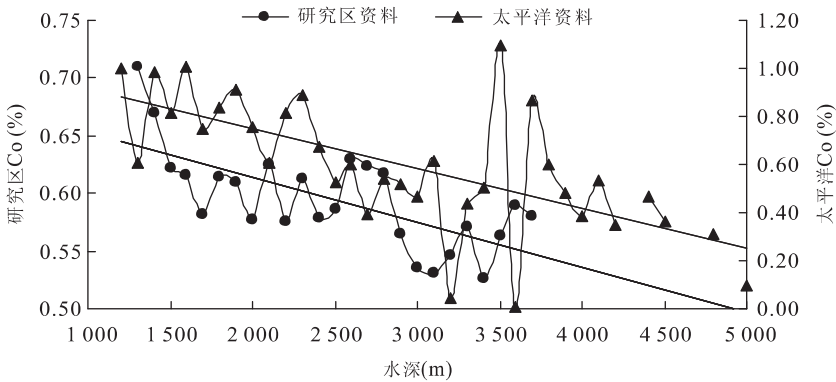


图 3 钴结壳 Co 含量与水深关系(研究区指西太平洋,太平洋资料来自 <http://www.ngdc.noaa.gov>)
Fig. 3 Relationship between Co contents of cobalt crusts and the water depth

表 1 钴结壳厚度与洋壳(海山)沉降深度关系

Table 1 Relationship between cobalt crust thickness and depressed depth of the ocean crust (seamount)

洋壳(海山)沉降深度(m)	结壳生长间隔深度(m)	结壳生长年龄(Ma)	结壳生长速率(mm/Ma)	结壳厚度(mm)
500~1 000	500	2. 04	1. 1	2. 24
500~1 500	1 000	8. 16	1. 1	8. 98
500~2 000	1 500	18. 36	1. 1	20. 20
500~2 500	2 000	32. 65	1. 1	35. 92
500~3 000	2 500	51. 02	1. 1	56. 12
500~3 500	3 000	73. 46	1. 1	80. 81
500~4 000	3 500	100. 00	1. 1	110. 00

h,1995; Koschinsky *et al.* , 1997). 太平洋钴结壳主要为水成成因(Zhang *et al.* , 2008), 钴结壳成矿作用主要发生在最低含氧层深度附近(Martin and Knauer,1985), 钴结壳生长与水深、最低含氧层和洋壳(海山)年龄密切相关, 钴结壳主要分布在具有一定高度、年龄较老以及最低含氧层发育的海山上. Co 是钴结壳中最有经济价值的金属元素, 西太平洋和整个太平洋的结壳 Co 含量与水深相关分析表明(图 3): (1) 结壳 Co 含量与水深密切相关(研究区相关系数 $r=0.68$, 太平洋 $r=0.65$); (2) 2 500 m 为水深分界点, $<2 500$ m 的 Co 含量高而稳定(研究区为 0.61%, 太平洋为 0.81%); (3) 2 500~3 000 m 过渡区 Co 含量降到 0.59% (研究区) 和 0.67% (太平洋)(但西北部海山 2 500~2 800 m 仍是 Co 含量高值区); (4) 3 000~4 000 m 的 Co 含量出现大幅波动(0.01%~1.10%, 平均为 0.51%), 其原因可能是浅水区($<2 500$ m) 结壳滚落到本段; (5) 4 000~5 000 m, 地形平缓, Co 含量受浅水区结壳影响小, Co 含量为 0.10%~0.53%, 平均为 0.35%. 笔者在太平洋近赤道带($144^{\circ}\sim145^{\circ}\text{W}$ 、 $8^{\circ}\sim9^{\circ}\text{N}$) 至少观测到 5 个站多金属结核 Co 含量达 0.30%~0.35% (张富元, 2001), 这说明水深

4 000~5 000 m 的沉积环境已不利于钴结壳而有利于多金属结核生长发育, 海山浅水区的高度氧化条件导致结壳 Co 含量是多金属结核的 4~5 倍(Craig *et al.* ,1982).

3 钴结壳厚度与洋壳(海山)沉降深度及水深关系

洋壳(海山)岩石的冷却收缩作用导致洋壳(海山)发生沉降, Sclater *et al.* (1971) 建立海底水深 $d(\text{m})$ 与洋壳年龄 $t(\text{Ma})$ 的关系式(朱而勤,1991) 为 $d=2 500+350t^{0.5}$. 据此关系式, 洋壳或海山沉降(Δd)500 m, 需要时间(Δt)2.04 Ma; 沉降 2 000 m, 需要时间 32.65 Ma; 沉降 3 000 m, 需要时间 73.46 Ma; 沉降 3 500 m, 需要时间 110 Ma. 同时, 笔者采用的结壳平均生长速率为 1.1 mm/Ma (Segl *et al.* ,1989; McMurtry *et al.* , 1994), 如果生长结壳的海山下沉 3 500 m(500~4 000 m), 对应的下沉时间为 100 Ma, 相应的结壳厚度从水深 500 m 的 2.24 mm 生长到水深 4 000 m 的 110 mm(表 1). 海山高受到最低含氧层成矿作用时间长, 结壳生长时

间长,结壳厚度大;海山低受最低含氧层成矿作用时间短,结壳生长时间短,结壳厚度小.因此,需要对不同高度的海山赋予不同结壳厚度.

4 钴结壳厚度与洋壳(海山)年龄关系

Segl *et al.* (1984)认为根据目前拖网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(Graig *et al.* ,1982).因此,很多学者(Glasby,1972; Cronan,1977)研究了钴结壳厚度与基岩年龄之间的关系.美国夏威夷东西方研究中心利用海山基底年龄赋予钴结壳厚度,对美国经济专属区及太平洋有关岛屿、海山区的钴结壳资源潜力进行了估算,他们对年龄大于 40 Ma 的海山赋予 2 cm 的钴结壳厚度,年龄小于 40 Ma 的海山赋予 1.5 cm 的结壳厚度,年龄小于 2~5 Ma 的海山不进行资源量估算(徐脉直,1999).由于夏威夷海岭火山年龄建立得非常好,含有结壳的拖网样品又沿海岭采集,所以结壳厚度随夏威夷海岭基底年龄增加而线性增加,钴结壳厚度与年龄基本呈正相关(图 4).

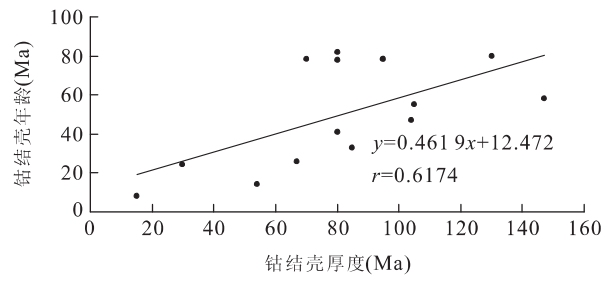


图 4 钴结壳厚度与年龄关系(数据见表 4)

Fig. 4 Relationship between crust thickness and age

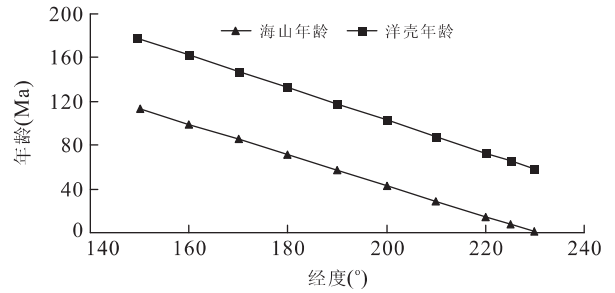


图 5 西太平洋洋壳年龄、海山年龄与经度关系(数据来自 Clouard and Bonneville, 2001; Wessel, 2001)

Fig. 5 Relationship between ocean crust (seamount) age and longitude

Мамвеев and Седов(1996)划分出太平洋板块内火山作用的 4 个活动期.第 1 期岩浆活动年龄为 100~120 Ma,中太平洋海山区、马尔库斯—威克海山区和麦哲伦海山区的大多数海山是在这一时期形成的.第 2 期为 90~75 Ma,中太平洋海山区、马尔库斯—威克海山区和马绍尔群岛在这一时期形成.第 3 期为 40~50 Ma,马绍尔群岛和莱恩群岛一部分海山形成于这一时期.第 4 期为 20~30 Ma,产生南太平洋部分岛屿.

太平洋 8 000 多个海山的洋壳年龄为 0~170.32 Ma,平均为 87.26 Ma.东太平洋壳年龄小,西北太平洋壳年龄大.洋壳年龄大的海山年龄一般也较大,海山年龄与洋壳年龄密切相关,洋壳年龄和海山年龄都显示出由东向西变老的趋势(图 5).洋壳老、海山年龄相对较大,结壳生长时间长,结壳厚度大.这样可以对海山的洋壳年龄分级,并对不同洋壳年龄的海山赋予不同的结壳厚度,然后计算钴结壳资源量.

5 太平洋海山面积和钴结壳资源量估算

5.1 太平洋海山面积

Wessel and Lyons(1997)和 Wessel(2001)提供的太平洋 8 000 多座海山(表 2)的经度为 131.2833°~256.9833°,纬度为 64.9222°~58.7655°;海山半径(r)为 3.22~100.00 km,平均为 13.94 km;海山高度为 1 000~8 000 m,平均为 2 436 m;海山所在位置的洋壳年龄为 0.00~170.32 Ma,平均为 87.26 Ma.太平洋 8 000 多座海山中,高度小于 1 500 m 的海山占总数的 1.91%,1 500~4 500 m 海山占总数的 95.25%,4 500~8 000 m 海山占总数的 2.84%.笔者以海山为单位并根据投影面积计算公式 πr^2 (r 为海山半径)计算出单个海山投影面积为 32.57~31 416.00 km²,平均为 857.17 km²,太平洋 8 000 多座海山总面积为 6 876 208 km².

前苏联在 1968 年和 1970 年利用“Vityaz”调查船对太平洋马尔库斯—内克尔海脊及中太平洋海山区进行钴结壳资源调查,西北太平洋 3 个钴结壳成矿省(夏威夷—皇帝海岭、莱恩群岛、马尔库斯)面积(Yubko *et al.* ,2004)为 3 290 300 km²,资源量为 4 627.7 × 10⁹ kg.美国对夏威夷群岛、马绍尔群岛、中太平洋海山区海山分布面积计算得出为 491 520 km²(Manheim,1986).前苏联对太平洋钴

表 2 太平洋海山钴结壳资源量计算(按海山高度)

Table 2 Estimation of cobalt crust resource amount on the seamount in the Pacific (based on seamount height)

海山高度(m)	海山个数	洋壳平均年龄(Ma)	最小经度	最大经度	平均经度	最小纬度	最大纬度	平均纬度
0~2 000	3 333	74. 50	131. 42	256. 25	198. 29	—64. 92	58. 70	—0. 97
2 000~3 000	3 334	89. 04	131. 52	256. 98	192. 98	—63. 62	58. 77	1. 77
3 000~4 000	924	112. 55	131. 28	252. 48	186. 50	—63. 56	56. 24	4. 89
4 000~5 000	281	111. 46	140. 98	252. 87	186. 17	—61. 36	55. 10	7. 43
5 000~6 000	75	111. 18	140. 22	248. 88	187. 56	—63. 49	50. 85	6. 09
6 000~8 000	75	107. 63	147. 02	244. 42	190. 07	—48. 19	56. 47	6. 36
海山高度 (m)	海山平均 高度(m)	海山平均 半径(km)	海山面积 (km ²)	结壳平均 厚度(cm)	结壳平均 丰度(kg/m ²)	结壳资源量 (10 ⁸ t)	结壳资源量* (10 ⁸ t)	
0~2 000	1 831	10. 13	1 243 043. 37	1. 00	18. 00	223. 75	447. 50	
2 000~3 000	2 415	13. 59	2 756 136. 45	1. 50	27. 00	744. 16	1 488. 31	
3 000~4 000	3 477	18. 07	1 881 715. 03	2. 00	36. 00	677. 42	1 354. 83	
4 000~5 000	4 409	19. 98	786 981. 60	2. 50	45. 00	354. 14	708. 28	
5 000~6 000	5 528	18. 12	131 235. 13	3. 00	54. 00	70. 87	141. 73	
6 000~8 000	6 941	16. 75	77 096. 82	3. 50	63. 00	48. 57	97. 14	
平均/累计	2 436	12. 96	6 876 208. 00	1. 71	30. 78	2 118. 90	4 237. 80	

注：* 钴结壳资源量按 2 倍丰度计算。

结壳资源分布面积计算是比较粗略的,他们把生长钴结壳的海山区看作是一个整体,实际上太平洋大多数海山是热点成因而呈离散状孤立分布,海山之间为水深大、不长结壳的洋壳,钴结壳分布面积计算应排除海山之间的洋壳面积,这样才能得出较准确的结壳分布面积。

5.2 按海山高度赋予不同结壳厚度及资源量计算

根据太平洋海山高度、结合钴结壳厚度变化规律资料,笔者把海山分为 0~2 000 m、2 000~3 000 m、3 000~4 000 m、4 000~5 000 m、5 000~6 000 m和 6 000~8 000 m 共 6 个等级,分别赋予结壳厚度为 1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm、2.5 cm、3.0 cm、3.5 cm,平均厚度为 1.71 cm,相应的结壳丰度为 18 kg/m²、27 kg/m²、36 kg/m²、45 kg/m²、54 kg/m²和 63 kg/m²,平均丰度为 30.78 kg/m²。根据海山总面积6 876 208 km²计算,太平洋海山结壳总资源量为2 118.90×10⁸ t(表 2)。

笔者对西太平洋 5 个海山区拖网采样得出 662 个测站的钴结壳厚度为 0~22 cm、平均厚度为 3.08 cm,上述结壳赋值厚度(1~3.5 cm,平均 1.71 cm)总体偏低。因此,对 0~2 000 m、2 000~3 000 m、3 000~4 000 m、4 000~5 000 m、5 000~6 000 m和 6 000~8 000 m 海山分别赋予结壳厚度为 2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、6 cm 和 7 cm,平均厚度为 3.42 cm,相应的结壳丰度为 36 kg/m²、54 kg/m²、72 kg/m²、90 kg/m²、108 kg/m² 和 126 kg/m²,平均丰度为 61.56 kg/m²。得出太平洋海山钴结壳资源量为 4 237.80×10⁸ t(表 2)。

5.3 按海山洋壳年龄赋予不同结壳厚度及资源量计算

根据太平洋海山的洋壳年龄、结合钴结壳厚度资料,笔者把不同洋壳年龄分为 0~30 Ma、30~60 Ma、60~90 Ma、90~120 Ma、120~150 Ma、150~180 Ma 共 6 个等级(无洋壳年龄按平均值 87.22 Ma 计算),结壳厚度分别赋值为 0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm、2.5 cm、3.0 cm(无洋壳年龄按平均值 2.08 cm 计算),相应的结壳丰度为 9 kg/m²、18 kg/m²、27 kg/m²、36 kg/m²、45 kg/m²和 54 kg/m²,平均丰度为 37.44 kg/m²。根据海山总面积 6 876 208 km² 计算,太平洋海山结壳资源量为 2 576.07×10⁸ t(表 3)。

McMurtry *et al.* (1994) 认为太平洋海山钴结壳生长速率为 1 mm/Ma,西太平洋海山钴结壳年龄为 70~80 Ma(Ling *et al.*, 2005),钴结壳厚度应是 7~8 cm,而拖网得到的结壳平均厚度仅为 3.07 cm。两种厚度巨大差异的原因有 3 个,一是因为拖网采样方法难以获得实际的钴结壳厚度;二是钴结壳水平分布不连续,有些地方被沉积物覆盖而中断;三是钴结壳生长时间不连续,结壳在生长过程中遇到沉积间断,或因构造运动使钴结壳厚度遭到破坏。地质稳定性对厚结壳生长也是必要的,因为海山上重力流和块体崩塌过程会破坏和刮掉结壳,因此限制了结壳的最终厚度,马绍尔群岛钴结壳资源调查结果支持这些结论(Hein *et al.*, 1988)。另一方面,世界各大洋海山也确实存在厚结壳(表 4),如马尔库斯—威克海山区CLD01和中太平洋CB12、CJ01 钴

表 3 太平洋海山钴结壳资源量计算(按洋壳年龄)

Table 3 Estimation of cobalt crust resource amount on the seamount in the Pacific (based on ocean crust age)								
洋壳年龄(Ma)	海山个数	洋壳平均年龄(Ma)	最小经度	最大经度	平均经度	最小纬度	最大纬度	平均纬度
0~30	1 355	13. 83	136. 08	256. 98	236. 94	—64. 92	56. 24	—6. 19
30~60	864	42. 62	133. 00	236. 42	203. 22	—62. 99	58. 19	—4. 17
60~90	695	77. 11	167. 92	222. 78	206. 00	—58. 69	50. 68	—11. 63
90~120	1 527	107. 38	148. 35	215. 25	195. 69	—50. 86	46. 70	10. 40
120~150	922	132. 97	143. 75	193. 08	175. 26	—6. 18	43. 79	15. 75
150~180	968	161. 88	145. 88	176. 75	159. 83	0. 12	31. 38	13. 89
无年龄	1 691	87. 22	131. 28	250. 55	178. 77	—63. 62	58. 77	—8. 02
洋壳年龄(Ma)	海山平均高度(m)	海山平均半径(km)	海山面积(km ²)	结壳平均厚度(cm)	结壳平均丰度(kg/m ²)	结壳资源量(10 ⁸ t)	结壳资源量*(10 ⁸ t)	
0~30	2 203	10. 48	560 671	0. 50	9. 00	50. 46	100. 92	
30~60	2 258	11. 43	429 638	1. 00	18. 00	77. 33	154. 67	
60~90	2 400	13. 25	544 225	1. 50	27. 00	146. 94	293. 88	
90~120	2 538	15. 65	1 681 634	2. 00	36. 00	605. 39	1 210. 78	
120~150	2 576	14. 75	853 284	2. 50	45. 00	383. 98	767. 96	
150~180	2 843	19. 48	1 576 789	3. 00	54. 00	851. 47	1 702. 93	
无年龄	2 327	13. 13	1 229 966	2. 08	37. 44	460. 50	921. 00	
平均/累计	2 436	13. 94	6 876 208	2. 08	37. 44	2 576. 07	5 152. 13	

注: * 钴结壳资源量按 2 倍丰度计算.

表 4 世界大洋钴结壳厚度分布(拖网采样)

Table 4 Distribution of cobalt crust thickness on seamounts in the world-wide oceans (dredge haul samples)								
样品	位置	纬度	经度	水深(m)	厚度(cm)	年龄(Ma)	生长速率(mm/Ma)	文献
OSM3	麦哲伦	10°50'N	157°40'E	1 772~1 950	19. 0			Kim <i>et al.</i> ,2005,2006
OSM4	麦哲伦	12°50'N	157°50'E	1 555~2 015	11. 5			Kim <i>et al.</i> ,2005,2006
OSM5	马绍尔	15°20'N	158°45'E	1 421~1 564	14. 0			Kim <i>et al.</i> ,2005,2006
OSM6	马绍尔	15°40'N	160°05'E	1 385~1 631	13. 0			Kim <i>et al.</i> ,2005,2006
KK84-RD50	Schumann 海山	25°42'N	159°48'W	2 250~2 600	9. 5	78. 5	1. 10	McMurtry <i>et al.</i> ,1994
CLD01	威克	21°45'00"N	160°44'24"E	2 210	8. 0	81. 8	0. 98	Ling <i>et al.</i> ,2005;Pan <i>et al.</i> ,2002
CB12	中太平洋	17°59'52"N	178°39'36"E	2 381	7. 0	78. 1	0. 90	Ling <i>et al.</i> ,2005;Pan <i>et al.</i> ,2002
CJ01	中太平洋	17°59'18"N	177°42'34"W	3 082	8. 0	77. 7	1. 03	Ling <i>et al.</i> ,2005;Pan <i>et al.</i> ,2002
CD29-2	太平洋	16°42'N	168°14'W	2 390~1 970	10. 5	55. 0	2. 10	Ling <i>et al.</i> ,2005;Pan <i>et al.</i> ,2002
D11-1	太平洋	11°39'N	161°41'E	1 870~1 690	14. 7	58. 0	2. 53	Ling <i>et al.</i> ,2005;Pan <i>et al.</i> ,2002
BM1969. 05	大西洋	39°00'N	60°57'W	1 800	13. 0	80. 0	1. 62	Frank <i>et al.</i> ,1999
ALV539	大西洋	35°00'N	59°00'W	2 700	8. 0	41. 0	2. 37	Frank <i>et al.</i> ,1999
SS663	印度洋	12°57'S	76°06'E	5 250	6. 7	26. 0	2. 80	Frank <i>et al.</i> ,1999
109D-C	印度洋	27°58'S	60°48'E	5 434	3. 0	24. 0	1. 60	Frank <i>et al.</i> ,1999
89-D09	马绍尔群岛	11°45. 10'N	161°33. 60'W	2 530	5. 4	14. 0	2. 00	Jeong <i>et al.</i> ,2000
89-D11	马绍尔群岛	11°37'N	161°40'W	1 870	10. 4	47. 0	3. 00	Jeong <i>et al.</i> ,2000
90-D01	马绍尔群岛	10°27. 29'N	156°41. 80'W	2 180	8. 5	33. 0	3. 00	Jeong <i>et al.</i> ,2000
91-D16	帕老群岛	8°33. 49'N	135°36. 79'W	3 400	1. 5	8. 0	2. 00	Jeong <i>et al.</i> ,2000

结壳样品的厚度分别为 8 cm、7 cm 和 8 cm, 钴结壳年龄分别为 81. 8 Ma、78. 1 Ma 和 77. 7 Ma, 对应的生长速率分别为 0. 98 mm/Ma、0. 90 mm/Ma 和 1. 03 mm/Ma(Ling *et al.* , 2005). 韩国学者 Kim *et al.* (2005,2006)研究表明西太平洋麦哲伦海山区、马绍尔群岛的拖网钴结壳厚度达 11. 5~19. 0 cm. 我国在西太平洋拖网采样中也获得过厚度达 22 cm 钴结壳, 厚度 7~8 cm 的结壳屡见不鲜.

鉴于太平洋海山普遍存在厚结壳之事实, 上述赋予不同洋壳年龄的结壳厚度总体偏低(0. 5~3. 0 cm, 平均为 2. 08 cm), 因此对不同洋壳年龄海山赋予 2 倍结壳厚度. 不同洋壳年龄段海山的结壳厚度赋值为 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm 和 6 cm, 平均厚度为 4. 16 cm, 相应的结壳丰度为 18 kg/m²、36 kg/m²、54 kg/m²、72 kg/m²、90 kg/m² 和 108 kg/m², 平均丰度为 74. 88 kg/m², 计算出太平洋海山结壳

资源量为 $5\,152.13\times10^8\text{ t}$ (表 3).

6 Co 通量与钴结壳 Co 沉积量和厚度的相关分析

上述按不同高度海山赋予结壳厚度 1~7 cm (平均厚度为 1.71~3.42 cm),按不同洋壳年龄赋予结壳厚度 0.5~6.0 cm(平均为 2.08~4.16 cm).那么按海山高度、洋壳年龄所赋予结壳厚度是否合理和有据可依,可通过 Co 通量与钴结壳 Co 沉积量和厚度的相关分析给予说明. Halbach *et al.* (1983) 对中太平洋海山钴结壳 Co 通量及其生长速率研究表明,钴结壳平均 Co 通量为 $2.95\pm0.45\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ka}$,多金属结核 Co 通量为 $2.94\pm0.43\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ka}$,两者大体相当.大洋水柱中单位时间单位面积内 Co 供给量基本为常数,Co 不是局部来源.根据洋壳年龄及其赋予的结壳厚度,并采用结壳 Co 含量 0.60%、结壳 Co 通量 $2.95\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ka}$,结壳湿密度 $1.8\text{ g}/\text{cm}^3$,计算出不同年龄段的结壳 Co 沉积量(表 5).由表 5 可知 1Ma 结壳 Co 通量为 $0.029\,5\text{ kg}/\text{m}^2$,180 Ma 结壳 Co 通量为 $5.31\text{ kg}/\text{m}^2$.如果 Co 通量没有任何丢失,结壳 Co 沉积量等于 Co 通量,这意味着沉到海底的 Co 全被结合到结壳中.但是,笔者对不同洋壳年龄所赋予结壳厚度中的 Co 沉积量只占 Co 通量的 6.10%(如赋予两倍厚度,占理论厚度的 12.20%).例如,30 Ma 的 Co 通量为 $0.885\text{ kg}/\text{m}^2$,赋予结壳厚度为 0.5 cm,30 Ma 的结壳 Co 沉积量为 $0.054\text{ kg}/\text{m}^2$,结壳 Co 沉积量占 Co 通量的 6.10%,如果占 100%,理论推测结壳厚度应为 8.2 cm.

Ku *et al.* (1982)对采于赤道大西洋和北太平洋两个拖网结壳样品的研究表明,两个结壳生长速率为 $1.5\text{ mm}/\text{Ma}$,两个结壳 ^{10}Be 沉积速率为 2×10^4

个 ^{10}Be 原子/ $\text{cm}^2\cdot\text{a}$,约为全球 ^{10}Be 平均生产速率的 4%.结壳 Mn 沉积速率为 $0.05\text{ mg}/\text{cm}^2\cdot\text{ka}$,也只占(38 个深海沉积岩芯)平均 Mn 通量($1.30\text{ mg}/\text{cm}^2\cdot\text{ka}$)的 4%,这些数据与笔者得出结壳 Co 沉积量占 Co 通量 6.10%非常接近. Ku *et al.* (1982)认为大多数 ^{10}Be 和 Mn 被结合到沉积物中,或者是结壳生长不连续,钴结壳整个生命史的大约 4%时间在生长.以上不同数据资料对比表明按海山高度、洋壳年龄赋予结壳厚度的做法基本可行,得出的钴结壳资源量基本正确.

7 太平洋海山钴结壳资源量

计算太平洋海山钴结壳资源量和金属量之前,还要提到钴结壳覆盖率这个参数指标.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(海山表面不是全长结壳),用百分数(%)表示.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,如中太平洋 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),我国西太平洋海山调查资料为 36.88%.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,钴结壳覆盖率采用 30%是比较合适的.结壳含水率采用 28%,结壳中 Mn、Co、Ni、Cu 含量分别为 21.92%、0.60%、0.44%和 0.13%(表 6).

上述计算出太平洋海山面积为 $6\,876\,208\text{ km}^2$,采用结壳覆盖率为 30%,太平洋海山结壳面积为 $2\,062\,862\text{ km}^2$ ($0.3\times6\,876\,208\text{ km}^2$);按海山高度得到湿结壳资源量为($2\,118.90\sim4\,237.80$) $\times10^8\text{ t}$ 、按洋壳年龄得到湿结壳资源量为($2\,576.07\sim$

表 5 Co 通量与钴结壳 Co 沉积量和厚度的相关分析

Table 5 Relationship between Co flux and Co deposited amount and thickness of cobalt crust

海山洋壳年龄 (Ma)	Co 通量 (kg/m ²)	赋予结壳厚度 (cm)	丰度 (kg/m ²)	Co 沉积量 (kg/m ²)	Co 沉积量占 Co 通量百分数 (Co 沉积量/Co 通量) $\times100$	理论推测厚度 (cm)
1	0.0295	0.016 653		0.029 5	100.00	0.273
30	0.885	0.5	9	0.054	6.10	8.2
60	1.770	1.0	18	0.108	6.10	16.3
90	2.655	1.5	27	0.162	6.10	24.5
120	3.540	2.0	36	0.216	6.10	33.0
150	4.425	2.5	45	0.270	6.10	41.0
180	5.310	3.0	54	0.324	6.10	49.0

表 6 太平洋海山钴结壳资源量

Table 6 Amount of cobalt crust resource on the seamount in the Pacific

金属元素	结壳金属元素含量(%)	结壳金属量(10 ⁸ t)	太平洋 CC 区结核金属量*(10 ⁸ t)	陆地资源量*(10 ⁸ t)	美国年需求量*(10 ³ t)
锰(Mn)	21. 92	111. 15~222. 29	7. 06~26. 00	20. 00	580
钴(Co)	0. 60	3. 04~6. 08	0. 064~0. 24	0. 085	5. 2
镍(Ni)	0. 44	2. 23~4. 46	0. 35~1. 31	0. 540	132
铜(Cu)	0. 13	0. 66~1. 32	0. 29~1. 08	4. 600	1 490
太平洋海山面积	6 876 208 km ²	结壳分布面积	2 062 862 km ²	干结壳资源量	(507. 05~1014. 11)×10 ⁸ t

注: * Manheim,1986. Marine Cobalt Resources. Science,232:600~608.

5 152. 13)×10⁸ t,取两者平均值得到湿结壳资源量为(2 347. 49~4 694. 97)×10⁸ t,再按 30%覆盖率和 28%含水率计算出太平洋海山干结壳资源量为(507. 06~1 014. 11)×10⁸ t,然后根据结壳金属含量,分别得到结壳锰金属量为(111. 15~222. 29)×10⁸ t,钴金属量为(3. 04~6. 08)×10⁸ t,镍金属量为(2. 23~4. 46)×10⁸ t,铜金属量为(0. 66~1. 32)×10⁸ t. 钴结壳中锰、钴、镍、铜的金属量与全球陆地资源量和多金属结核量(Manheim,1986)相比都是非常可观的(表 6).

8 结论

(1) 太平洋 8 000 多个海山平均半径为 13. 94 km,平均高度为 2 436 m,平均洋壳年龄为 87. 26 Ma,海山平均面积为 857. 17 km²,太平洋海山面积为6 876 208 km². 太平洋海山呈离散状孤立分布,钴结壳分布面积计算应以海山为单位,同时考虑到海山表面不是全都能长结壳和目前钴结壳资源调查精度偏低之事实,采用结壳覆盖率 30%,由此计算出太平洋海山钴结壳分布面积为2 062 862 km².

(2) 根据钴结壳覆盖率 30%和含水率 28%,Mn、Co、Ni、Cu 含量分别为 21. 92%、0. 60%、0. 44%、0. 13%,计算出太平洋海山干结壳资源量为(507. 06~1014. 11)×10⁸ t,锰金属量为(111. 15~222. 29)×10⁸ t,钴金属量为(3. 04~6. 08)×10⁸ t,镍金属量为(2. 23~4. 46)×10⁸ t,铜金属量为(0. 66~1. 32)×10⁸ t.

(3)Co 通量与结壳 Co 沉积量、厚度的相关分析表明,所赋予的结壳厚度占理论厚度的 6. 10%~12. 20%,这与 Ku *et al.* (1982)得出“结壳¹⁰Be 和 Mn 的沉积速率约为¹⁰Be、Mn 生产速率的 4%,结壳生长时间只占其整个生命时间 4%”的认识非常相近,表明按海山高度、洋壳年龄所赋予的结壳厚度基本合理,得出的结壳资源量基本正确.

致谢:衷心感谢太平洋钴结壳资源调查人员的辛勤工作,感谢国家科学技术部的经费资助.

References

Clouard, V. , Bonneville, A. , 2001. Ages of seamounts, islands and plateaus on the Pacific plate (version 2. 0). <http://www.mantleplumes.org>,<http://www.upf.pf/geos>.

Craig, C. H. , Sandwell, D. T. , 1988. Global distribution of seamounts from seasat profiles. *J. Geophys. Res.* , 93 (B9):10408—10420.

Craig, J. D. , Andrews, J. E. , Meylan, M. A. , 1982. Ferromanganese deposits of the Hawaiian archipelago. *Marine Geology* ,45(1—2): 127—157. doi:10. 1016/0025—3227(82)90183—9

Cronan, D. S. , 1977. Deep-sea nodules: distribution and geochemistry. In: Glasby, G. P. , ed. , *Marine Manganese deposits*. Elsevier, Amsterdam, 11—44.

Glasby, G. P. , 1972. The mineralogy of manganese nodules from a range of marine environments. *Marine Geology* , 13(1):57—72. doi:10. 1016/0025—3227(72)90071—0

Flood, P. G. , 2001. The ‘Darwin Point’ of Pacific Ocean atolls and guyots: a reappraisal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* ,175(1—4): 147—152. doi:10. 1016/S0031—0182(01)00390—X

Frank, M. , O’Nions, R. K. , Hein, J. R. , et al. , 1999. 60 Myr records of major elements and Pb-Nd isotopes from hydrogenous ferromanganese crusts: reconstruction of seawater paleochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 63(11—12), 1689—1708.

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.

Halbach, P. , Puteanus, D. , 1984. The influence of the carbonate dissolution rate on the growth and composition of Co-rich ferromanganese crusts from Central Pacific seamount areas. *Earth and Planetary Science Letters* , 68(1):73—87. doi:10. 1016/0012—821X(84)90141—9

- Halbach, P., Segl, M., Puteanus, D., et al., 1983. Co-fluxes and growth rates in ferromanganese deposits from Central Pacific seamount areas. *Nature*, 304 (25): 716—719. doi:10.1038/304716a0
- 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).
- Heezen, B. C., Matthews, J. L., Catalano, R., et al., 1973. Western Pacific guyots. *Initial Reports, DSDP*, 20: 653—723.
- 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. Geological Survey Open File Report, U. S. A., 90—298.
- Hein, J. R., Morgan, C. L., 1999. Influence of substrate rocks on Fe-Mn crust composition. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(5): 855—875. doi:10.1016/S0967-0637(98)00097-1
- 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(3—4): 255—283. doi:10.1016/0025-3227(88)90113-2
- 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.
- Jeong, K. S., Jung, H. S., Kang, J. K., et al., 2000. Formation of ferromanganese crusts on northwest intertropical Pacific seamounts: electron photomicrography and microprobe chemistry. *Marine Geology*, 162, 541—559.
- Kim, J., Hyeong, K., Jung, H. S., et al., 2006. Southward shift of the intertropical convergence zone in the western Pacific during the Late Tertiary: evidence from ferromanganese crusts on seamounts west of the Marshall Islands. *Paleoceanography*, 21(PA4218): 14. doi:10.1029/2006PA001291
- Kim, J., Hyeong, K., Yoo, C. M., et al., 2005. Textural and geochemical characteristics of Fe-Mn crusts from four seamounts near the Marshall Islands, western Pacific. *Geosciences Journal*, 9(4): 331—338. doi:10.1007/BF02910321
- Koppers, A. A. P., Morgan, J. P., Morgan, J. W., et al., 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(3—4): 237—252. doi:10.1016/S0012-821X(00)00387-3
- Koppers, A. A. P., Staudigel, H., 2005. Asynchronous bends in Pacific Seamount trails: a case for extensional volcanism? *Science*, 307(5711): 904—907. doi:10.1126/science.1107260
- Koschinsky, A., Halbach, P., 1995. Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: genetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(24): 5113—5132. doi:10.1016/0016-7037(95)00358-4
- Koschinsky, A., Stascheit, A., Bau, M., et al., 1997. Effects of phosphatization on the geochemical and mineralogical composition of marine ferromanganese crusts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4079—4094. doi:10.1016/S0016-7037(97)00231-7
- Ku, T. L., Kusakabe, M., Nelson, D. E., et al., 1982. Constancy of oceanic deposition of ^{10}Be as recorded in manganese crusts. *Nature*, 299: 240—242. doi:10.1038/299240a0
- Ling, H. F., Jiang, S. Y., Martin, F., et al., 2005. Differing controls over the Cenozoic Pb and Nd isotope evolution of deepwater in the Central North Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 232(3—4): 345—361. doi:10.1016/j.epsl.2004.12.009
- Manheim, F. T., 1986. Marine cobalt resources. *Science*, 232(4750): 600—608. doi:10.1126/science.232.4750.600
- Martin, J. H., Knauer, G. A., 1985. Lateral transport of Mn in the North-East Pacific Gyre oxygen minimum. *Nature*, 314: 524—526. doi:10.1038/314524a0
- Мамвеевков, В. В., Седов, А. П., 1996. Периодичность внутриплитного вулканизма Тихого океана. *ОКЕАНОЛОГИЯ*, 36(4): 606—611.
- 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(1—4): 105—118. doi:10.1016/0012-821X(94)90209-7
- Menard, H. W., 1964. Marine geology of the Pacific. McGraw-Hill, New York.
- Morgan, W. J., 1972. Deep mantle convection plumes and plate motions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 56: 203—213. doi:10.1306/819A3E50-16C5-11D7-8645000102C1865D
- Morgan, W. J., 1981. Hotspots tracks and the opening of the Atlantic and Indian oceans. In: Emiliani, C., ed., The oceanic lithosphere. Wiley, New York, 443—487.
- Muller, R. D., Roest, W. R., Royer, J. Y., et al., 1997. Digital isochrones of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research*, 102(B2): 3211—3214.
- 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—408.

- Richey, J. L., 1987. Assessment of cobalt-rich manganese crust resources on Horizon and S. P. Lee Guyots, U. S. EEZ. *Marine Mining*, 6: 231—243.
- Slater, J. G., Anderson, R. N., Bell, M. L., 1971. Elevation of ridges and evolution of the central eastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(32): 7888—7915.
- Segl, M., Mangini, A., Beer, J., et al., 1989. Growth rate variations of manganese nodules and crusts induced by paleoceanographic events. *Paleoceanography*, 4(5): 511—530. doi:10.1029/PA004i005p00511
- Segl, M., Mangini, A., Bonani, G., et al., 1984.¹⁰ Be-dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean palaeocirculation. *Nature*, 309: 540—543. doi:10.1038/309540a0
- Smith, D. K., Jordan, T. H., 1988. Seamount statistics in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 93(B4): 2899—2918. doi:10.1029/JB093iB04p02899
- Smith, W. H. F., Sandwell, D., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry. *Science*, 277: 1956—1961.
- Smoot, N. C., 1999. Orthogonal intersections of megatrends in the western Pacific Ocean basin; a case study of the MPM. *Geomorphology*, 30(4): 323—356.
- Wessel, P., 1997. Sizes and ages of seamounts using remote sensing: implications for intraplate volcanism. *Science*, 277: 802—805.
- Wessel, P., 2001. Global distribution of seamounts inferred from grided Geosat/ERS-1 altimetry. *J. Geophys. Res.*, 106(B9): 19431—19441.
- Wessel, P., Kroenke, L., 1997. A geometric technique for re-locating hotspots and refining absolute plate motions. *Nature*, 387: 365—369. doi:10.1038/387365a0
- Wessel, P., Lyons, S., 1997. Distribution of large Pacific seamounts from Geosat/ERS-1: implications for the history of intraplate volcanism. *J. Geophys. Res.*, 102(B10): 22459—22475.
- Winterer, E. L., Metzler, C. V., 1984. Origin and subsidence of Guyots in Mid-Pacific Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 89(B12): 9969—9979. doi:10.1029/JB089iB12p09969
- Xu, M. Z., 1999. Submarine mineral resources. Ocean University of Qingdao Press, Qingdao (in Chinese).
- Yubko, V. M., Melnikov, M. E., Kazmin, Y. B., et al., 2004. Regional and local variability in the spatial distribution of cobalt-bearing ferromanganese crusts in the world's ocean. In: The International Seabed Authority, ed., Minerals other than polymetallic nodules of the International Seabed area. National Library of Jamaica Cataloguing-in-Publication Data, Jamaica, 62—174.
- Zhang, F. Y., 2001. Evaluation principle and delineation method of polymetallic nodule resources. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhu, K. C., et al., 2008. Parameter and index for delineation and evaluation of co-rich crust resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 251—258 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhu, K. C., et al., 2008. Distribution characteristics of cobalt-rich ferromanganese crust resources on submarine seamounts in the western Pacific. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 796—803.
- Zhang, H. S., Zhao, P. D., Chen, S. Y., et al., 2001. Mineralizing characteristics 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).
- 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. doi: 10.1007/s11707-007-0029-y
- Zhu, E. Q., 1991. An introduction to marine geology. Ocean University of Qingdao Press, Qingdao, 87—93 (in Chinese).

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.
- 徐脉直, 1999. 海洋固体矿产. 青岛: 青岛海洋大学出版社.
- 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.
- 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等, 2008. 钴结壳矿区圈定和资源评价的参数指标. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(2): 251—258.
- 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.
- 朱而勤, 1991. 近代海洋地质学. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 87—93.