

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.051>



# 多金属结壳 Os 同位素组成区域性和阶段性偏高异常

王 洋, 方念乔\*, 刘景昱

中国地质大学海洋学院, 北京 100083

**摘 要:** Os 同位素地层法可以得到包含生长间断期的分辨率较高的结壳年代框架, 相对传统定年方法具有更优的发展前景. 在比对多金属结壳分层 Os 同位素组成曲线与大洋海水标准曲线从而为多金属结壳定年的同时, 研究标准曲线的区域性特征及其与壳源、幔源物质供应的关系. 依据比值和趋势贴合原则, 得到的多金属结壳生长期包括 80~75 Ma, 70~65 Ma, 60~50 Ma, 42~40 Ma, 35~28 Ma, 15~10 Ma, 8~0 Ma. 在中、西太平洋地区, 麦哲伦和马绍尔海山区结壳 Os 同位素组成测定值与标准曲线形态和取值贴合良好, 而马尔库斯威克和莱恩海山区结壳测定值虽与标准曲线趋势较为贴合, 但分别在 7 Ma 以来和 33 Ma 以前相对标准曲线取值异常偏高. 这种异常偏高现象的出现与 2 个海山区进、出盛行西风带和赤道信风带的过程有关, 结壳在处于风带时接收到风力输运的美洲和亚洲陆源风尘物质, 使得其记录的 Os 同位素组成相对标准曲线偏高.

**关键词:** 多金属结壳; 莱恩海山区; 马尔库斯威克海山区; 标准曲线; Os 同位素; 海洋地质.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2021)02-719-10

收稿日期: 2019-10-29

## Regional and Periodic Anomalies of Os Isotopic Composition in Polymetallic Crusts

Wang Yang, Fang Nianqiao\*, Liu Jingyu

School of Ocean Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Os isotopic stratigraphic dating method can be used to obtain the age frame of polymetallic crusts including growth discontinuities with high resolution, which has better development prospects than traditional dating methods. In comparison with the stratified Os isotopic composition curve of polymetallic crusts and the standard curve of sea water, we dated for the crusts and at the same time, the regional characteristics of the standard curve and its relationship with the material derived from earth crust and mantle were studied. Based on morphological fit, the growing stages of polymetallic crusts were 80–75 Ma, 70–65 Ma, 60–50 Ma, 42–40 Ma, 35–28 Ma, 15–10 Ma and 8–0 Ma. In central-western Pacific, the measured curve of Os isotopic composition of crusts in Magellan and Marshall seamounts fits well with the shapes and values of the standard curve, while that of crusts in Marcus-Wake and Line seamounts fits well in the trend but the values are respectively higher since 7 Ma and before 33 Ma. This phenomenon is related to the process during which the crust travelled in and out of the influence copes of prevailing westerlies and equatorial trade winds. The crust received the wind-transported dust materials from the Americas and Asia when it was in the wind belt, which makes the Os isotopic composition recorded by the crust go higher than the standard curve.

**Key words:** polymetallic crust; Line seamount; Marcus-Wake seamount; standard curve; osmium isotope; marine geology.

基金项目: 中国大洋矿产资源研究开发协会“十三五”资源环境项目(No. DY135-C1-1-06).

作者简介: 王洋(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事多金属结壳与古海洋学研究. ORCID: 0000-0002-8579-4959. E-mail: WangY\_SOS@cugb.edu.cn

\* 通讯作者: 方念乔, ORCID: 0000-0001-7546-5695. E-mail: Fangnq@cugb.edu.cn

引用格式: 王洋, 方念乔, 刘景昱, 2021. 多金属结壳 Os 同位素组成区域性和阶段性偏高异常. 地球科学, 46(2):719–728.

Re-Os 定年体系近年来多被用于测定辉钼矿等矿床的年龄(杨震等, 2017; 张志等, 2017; 赵冰爽等, 2018), 而其对厘定海底多金属结壳的年代框架也具有重要的应用前景(Klemm *et al.*, 2005). 在地幔部分熔融的过程中, 由于相容性差异, Re 元素倾向于进入熔体而富集于地壳, Os 元素则倾向于保留在残留相中, 从而在地幔富集(Walker *et al.*, 1997). 这种同位素的变化造成了壳-幔之间 Re、Os 同位素的分布差异, 表现为 Os 同位素组成 ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ) 的变化. Os 同位素的这种变化非常明显, 陆源物质如大陆风化物的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  平均值约为 1.54(Levasseur *et al.*, 1998), 幔源和宇宙源物质中  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  约为 0.12(Allègre and Luck, 1980; Walker and Morgan, 1989; Meisel *et al.*, 1996). 海洋中 Os 同位素组成的变化与地质历史时期的壳源、幔源物质供给关系有关, 如青藏高原隆升造成大量陆源剥蚀物入海可能导致海水 Os 同位素比值上升(Sharma *et al.*, 1999), 小行星撞击(Peucker-Ehrenbrink *et al.*, 1995; Pegram and Turkian, 1999) 或超基性岩风化(Ravizza and Peucker-Ehrenbrink, 2003; Klemm *et al.*, 2008) 造成的宇宙和幔源物质入海则可能使比值降低, 这种变化被广泛地记录在海洋水成成因矿物中. 20 世纪 90 年代以来, Pegram *et al.* (1992)、Ravizza (1993)、Peucker-Ehrenbrink *et al.* (1995) 和 Klemm *et al.* (2005) 先后对采自不同大洋不同地区的深海远洋粘土、富金属碳酸盐和富有机质沉积物中 Os 同位素的数据进行整合框定, 总结出过去 80 Ma 内海水的 Os 同位素演化曲线(即标准曲线), 并依据壳源、幔源供给关系对其变化规律进行了初步解释. 在对大西洋几内亚湾 ODP959 站位沉积物 Os 同位素的研究中, Ravizza *et al.* (1998) 得到的 Os 同位素比值与海水演化曲线吻合, 证实了 Os 同位素的演化曲线具有全球适用性.

多金属结壳是一种海底矿产, 主要成矿物质直接来源于海水, 属于水成成因矿物. 其大多直接生长在海底 1~2 km 的硬质基岩上, 以极低的生长速率成层生长, 在其几十百万年的生长过程中, 记录了古海洋环境的演化史. 地质历史时期多金属结壳及其所在海山附近的古海洋环境条件决定了其生长和间断的发生, 如高生产力条件使最低含氧带(OMZ) 扩展从而供应充足的溶解 Mn 并强化其下的氧化性水团等有利环境促进了结壳的生长(Banakar *et al.*, 1997), 而较弱的水动力(如上升流)条

件、陆地风化作用、开放大洋中较低的生物生产力则相对不利于结壳的生长(丁旋等, 2008). 多金属结壳的分层元素地球化学剖面变化特征一定程度上可以反映古海洋环境的演化, 如 P%、Ca% 可以指示磷酸盐化事件的发生(王晓红等, 2008), K%、Si%、Al% 则是大陆风化剥蚀产物的指示性元素(Wen *et al.*, 1997).

多金属结壳的分层 Os 同位素组成与 80 Ma 以来海水 Os 同位素标准曲线极为贴合, 不少学者(符亚洲等, 2005; Klemm *et al.*, 2005; 孙晓明等, 2006; 丁旋等, 2008; 李江山等, 2008; 孟宪伟等, 2008) 据此厘定其年代框架. 然而, 在实际对比过程中, 测量值与 Os 同位素标准曲线在某些样品的某些阶段并不能完全贴合(Klemm *et al.*, 2005; 李江山等, 2008; 孟宪伟等, 2008). Os 同位素标准曲线定年法可以得到分辨率较高的结壳年代框架, 并且可以推断结壳的间断期, 相对传统定年方法具有更优的发展前景. 超微化石在结壳中的保存情况往往不佳, 分析困难, 且无法给出分辨率较高的年代框架(苏新等, 2004), 但其对于 Os 法定年具有重要的佐证价值. 古海洋学重大事件对结壳年代学结果的佐证也是一项有益的尝试(王晓红等, 2008), 但由于地质历史时期古海洋环境条件具有重复性, 首先需要比较可靠的年代学数据作为支撑. 同位素年代学方面, Be(Frank *et al.*, 1999) 和 Th(韩喜球等, 2009) 等同位素可以厘定的年龄范围有限(<15 Ma), 而 Sr 同位素则存在与海水交换作用的理论问题(Ingram *et al.*, 1990).

本研究测定了中、西太平洋 6 块多金属结壳样品的分层 Os 同位素组成 ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ), 将其与标准曲线对比, 以考察测定值曲线与标准曲线的贴合程度并为样品定年. 将结壳 Os 同位素曲线相对标准曲线的异常现象与构造尺度的壳源、幔源供给事件结合起来进行了初步分析.

## 1 样品采集与测试方法

样品分别依托中国大洋协会和广州海洋地质调查局“十五”、“十二五”和“十三五”项目, 采自中、西太平洋的 4 个海山区, 取样位置如图 1 所示. 其中, MS1 采自麦哲伦海山区, 为一致密结核状结壳; MHD79 采自马绍尔海山区, 为一典型三层结壳; CLD34-2 和 CLD50 采自马尔库斯威克海山区, 前者是一薄层结壳, 后者为一不规则三层结壳;

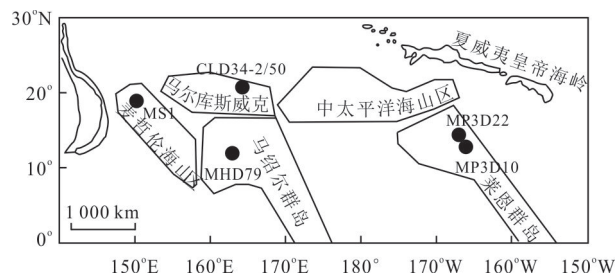


图1 中、西太平洋多金属结壳取样位置示意

Fig.1 Location of polymetallic crusts from central-western Pacific

MP3D10和MP3D22采自莱恩海山区,皆为典型三层结壳.

对多金属结壳进行分层取样,先把样品按垂直其生长方向加工成1~2 cm厚的片状,然后用小型手钻逐层取样,选用1 mm的合金钻头,顺层依次钻取、收集,钻出的粉末供后续加工分析使用.每个样品的取样厚度为1 mm左右,总重量为2 g左右.样品分别分层取样7~22层,所有样品用玛瑙研钵粉碎为小于74  $\mu\text{m}$ (200目)的粉末.Os同位素测定先后由国家地质测试中心完成,仪器为MAT262负离子转换热表面电离质谱仪(李江山,2007)、TJA PQ ExCell等离子质谱仪(丁旋等,2008)、Triton-plus热表面电离质谱仪(张志超,2014;周涛,2016).详细实验测试方法和参数如下(李超等,2015):采用Carius管分解样品(冷却温度为 $-50\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,烘箱温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温24 h),利用Teflon细管蒸馏分离钨(蒸汽温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加热60 min),用尖底瓶微蒸馏纯化Os(电热板温度 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加热4 h),采用法拉第杯多接收模式质谱测定(以逐级剥谱法扣除O同位素干扰,采用 $^{192}\text{Os}/^{188}\text{Os}=3.0827$ 作为内标以迭代法对Os进行质量分馏校正).所有数据的平均不确定度为0.0037(以MS1和MP3D22为例,数据见表1和表2).Co等元素的测定先后由中国地质大学(北京)地学实验中心(仪器为Platform电感耦合等离子质谱仪)、国家地质测试中心(仪器为PE8300等离子质谱仪,采用标准为LY/T1253-1999,允许的误差范围 $<0.01\%$ )和核工业北京地质研究院分析测试研究所(仪器为JXA8100电子探针仪,采用标准为GB/T 15074-2008,使用ZAF校正法)完成.

根据Co元素质量百分含量(%)的测定结果,应用区域性适用的Co经验公式估算结壳各层位平均生长速率并对受磷酸盐化影响较重的层位进行校正,方法参见Puteanus and Halbach(1988).根据结

壳每层的取样厚度计算单层的生长年龄,之后进行累加得到Co法年龄;该年龄为最小年龄,即不考虑间断的年龄.将Co法与Os法结合起来,以Co法年龄作为横坐标,测得的Os同位素比值作为纵坐标,将得到的每个样品的Os同位素曲线与标准曲线的形态(趋势和取值)进行比对,厘定样品的生长-间断年代框架.其中,Os同位素测定值和变化趋势与标准曲线对比确定宏观生长-间断期,根据Co法年龄估算每个生长期内的精细年代间隔.

将6块多金属结壳样品的Os同位素组成曲线与80 Ma以来大洋海水Os同位素标准曲线比对,厘定结壳年代框架,总结其区域性和阶段性规律,识别贴合异常,结合壳源、幔源供给关系进行初步解释.

## 2 结果与讨论

根据上述Co-Os法定年体系,结合多金属结壳结构构造分层、生长速率变化规律,以及超微化石年代学、磷酸盐化事件和其他地球化学证据,得到了中、西太平洋多金属结壳的年代框架(表1,表2,图2).其中,麦哲伦海山样品MS1始生长于54 Ma左右,经历了54~35 Ma和28~17 Ma两期大规模间断后连续生长至今.马绍尔海山样品MHD79在80 Ma左右开始生长,其间经历了5次规模不等的间断,除28~11 Ma的规模较大以外,其余4次的间断跨域均为5~10 Ma.采自马尔库斯威克海山区的样品CLD34-2和CLD50存在较多层位缺失,前者仅有一薄层壳体留存下来,自8 Ma至今连续生长;后者为不规则三层结构,可初步厘定出35~32 Ma、13 Ma附近和6~1 Ma三个生长期.MP3D10和MP3D22两块样品采自莱恩海山区,始生长年代分别为65 Ma和80 Ma,先后经历了5个间断期,其生长期和间断期年代具有一定可比性.其中,35~30 Ma、12~10 Ma为其共同的生长期,而65~60 Ma、55~45 Ma和25~15 Ma为其共同的间断期.其中,MP3D10的超微化石地层学结果(李江山,2007)与本文Co-Os年代框架对应良好,是本文年代学结果的有力佐证.综上所述,中、西太平洋不同海山区多金属结壳的生长期和间断期具有普遍的一致性,主要生长期包括80~75 Ma、70~65 Ma、60~50 Ma、42~40 Ma、35~28 Ma、15~10 Ma、8~0 Ma,普遍存在的间断期包括65~60 Ma、51~

表 1 麦哲伦海山区结壳 MS1 的 Os 同位素组成和 Co-Os 法定年结果及常量元素含量

Table 1 Os isotopic composition, Co-Os dating and major element data of crust MS1 from Magellan seamount

取样点	取样深度 (mm)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	不确定度	Co-Os 年龄 (Ma)	Co 最小年龄 (Ma)	Co (%)	K (%)	Si (%)	Al (%)
1	3	0.966 8	0.000 2	1.18	1.18	0.36	0.82	12.80	2.54
2	6	0.941 2	0.000 3	2.00	2.00	0.37	0.75	12.39	2.39
3	9	0.907 0	0.000 3	2.90	2.90	0.43	0.71	10.54	1.96
4	11	0.874 6	0.000 4	3.75	3.75	0.48	0.66	9.16	1.67
5	13	0.827 1	0.000 4	8.00	4.72	0.51	0.69	8.19	1.56
6	15	0.787 9	0.000 1	10.00	5.60	0.49	0.65	7.55	1.52
7	17	0.777 8	0.000 1	10.92	6.52	0.44	0.69	8.11	1.65
8	20	0.781 2	0.000 1	12.23	7.83	0.50	0.66	7.22	1.45
9	22	0.790 7	0.000 1	14.43	10.03	0.74	0.62	5.12	1.06
10	25	0.790 9	0.000 1	17.18	12.78	0.75	0.61	4.52	0.94
11	28	0.769 5	0.000 1	28.00	15.09	0.76	0.56	3.44	0.74
12	30	0.708 6	0.000 2	29.87	16.96	0.67	0.57	2.97	0.61
13	33	0.617 7	0.000 2	32.20	19.29	0.62	0.56	2.79	0.57
14	37	0.617 7	0.000 2	33.81	20.90	0.46	0.56	2.63	0.52
15	41	0.506 9	0.000 1	35.52	22.61	0.44	0.54	2.64	0.54
16	46	0.431 5	0.000 3	54.00	25.84	0.61	0.52	2.44	0.60

表 2 莱恩海山区结壳 MP3D22 的 Os 同位素组成和 Co-Os 法定年结果及常量元素含量

Table 2 Os isotopic composition, Co-Os dating and major element data of crust MP3D22 from Line seamount

取样点	取样深度 (mm)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	不确定度	Co-Os 年龄 (Ma)	Co 最小年龄 (Ma)	Co (%)	K (%)	Si (%)	Al (%)
1	4	0.826 7	0.000 1	8.00	2.44	0.44	1.07	7.52	2.09
2	8	0.636 2	0.000 3	11.00	3.75	0.37	1.24	7.26	2.18
3	11	0.712 5	0.000 8	31.00	4.96	0.31	0.86	5.45	1.55
4	15	0.718 2	0.000 3	32.07	6.03	0.18	1.02	8.22	2.31
5	19	0.650 7	0.000 4	33.08	7.04	0.16	0.93	7.43	2.10
6	23	0.651 6	0.000 1	34.03	7.99	0.16	0.94	7.26	2.09
7	27	0.653 3	0.000 1	34.95	8.91	0.20	0.92	6.28	1.65
8	30	0.584 4	0.000 1	56.00	9.88	0.27	0.76	4.98	1.22
9	33	0.535 1	0.000 1	56.81	10.69	0.22	0.70	4.74	1.16
10	35	0.565 8	0.000 1	57.63	11.51	0.23	0.70	4.48	1.09
11	38	0.574 1	0.000 4	58.49	12.37	0.21	0.65	4.33	1.07
12	41	0.604 8	0.000 3	59.50	13.38	0.21	0.66	4.71	1.19
13	45	0.611 2	0.000 2	60.60	14.48	0.19	0.62	4.28	1.11
14	49	0.690 2	0.000 4	66.00	15.32	0.20	0.63	4.26	0.98
15	51	0.777 9	0.000 2	66.70	16.02	0.20	0.66	4.40	0.95
16	54	0.821 1	0.002 6	67.42	16.74	0.21	0.59	4.18	0.93
17	56	0.854 7	0.000 7	68.17	17.49	0.23	0.67	4.43	1.07
18	59	0.862 8	0.000 3	69.05	18.37	0.22	0.72	4.79	1.19
19	62	0.803 5	0.000 4	69.94	19.26	0.22	0.71	4.66	1.06
20	65	0.839 6	0.000 2	78.00	20.48	0.24	1.08	7.36	1.58
21	70	0.897 3	0.000 8	79.44	21.92	0.21	1.27	8.88	1.96
22	75	0.916 9	0.000 5	80.53	23.01	0.25	1.45	10.16	2.57

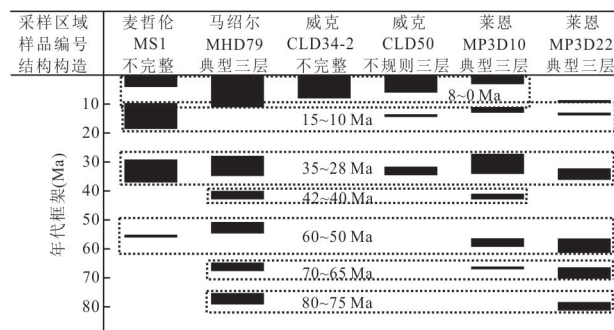


图 2 中、西太平洋多金属结壳的年代框架

Fig.2 Age frame of polymetallic crusts from central-western Pacific

黑色框体为结壳的生长期,点线框内为总结的区域性共同生长期

42 Ma、40~35 Ma 和 28~18 Ma 等。结壳的大规模间断期大多对应太平洋大规模磷酸盐化期(如 39~34 Ma 和 27~21 Ma 两期;Hein *et al.*, 1993),小规模磷酸盐化事件(如 71 Ma 和 31 Ma;Hein *et al.*, 1993)则与样品 P%、Ca% 剖面峰值的年代相符,佐证了年代框架的可靠性。

如图 3 所示,马尔库斯威克海山区和莱恩海山区的多金属结壳样品的 Os 同位素曲线相对标准曲线有不同程度的“偏高现象”。马尔库斯威克海山的 2 个样品在 7 Ma 以来相对标准曲线偏高,莱恩海山

区的 2 个样品皆在 33 Ma 之前的老壳层表现出“偏高现象”。其中,马尔库斯威克海山区的偏高异常不如莱恩海山区明显,其比值范围尚处于标准曲线框体的上限,而莱恩海山区则偏离程度较高。这种偏高异常体现出区域性和阶段性特征。除了上述 2 个海山区,麦哲伦和马绍尔海山区结壳的 Os 同位素曲线并不存在此类异常现象,而存在“偏高”的 2 个海山区的样品也不是在整个生长过程中都出现了偏高异常,只是在一部分时代内偏高,其他时代则与标准曲线贴合。图 3 显示,马尔库斯威克海山区 CLD 两个样品偏高的幅度虽不如莱恩海山区 MP3 两个样品显著,但其偏高点都位于标准曲线框体上端,紧邻曲线框定范围的上限,这与另外 2 个样品的情况有区别。随着分析测试技术的发展,海水 Os 同位素曲线精度显著提高,在结壳 Os 同位素组成与海水曲线比对的过程中,将其比值和趋势做出更精确的对应可能是今后的研究重点和发展趋势。

马尔库斯威克海山区和莱恩海山区结壳样品的 Os 同位素异常现象并非偶然。第一,这 4 块样品的数据是与其余样品一起,先后三批采用相似的方法和仪器在同一单位测量得到的结果。第二,“偏高现象”呈明显的区域性分布,2 个海山区全部 2 个样

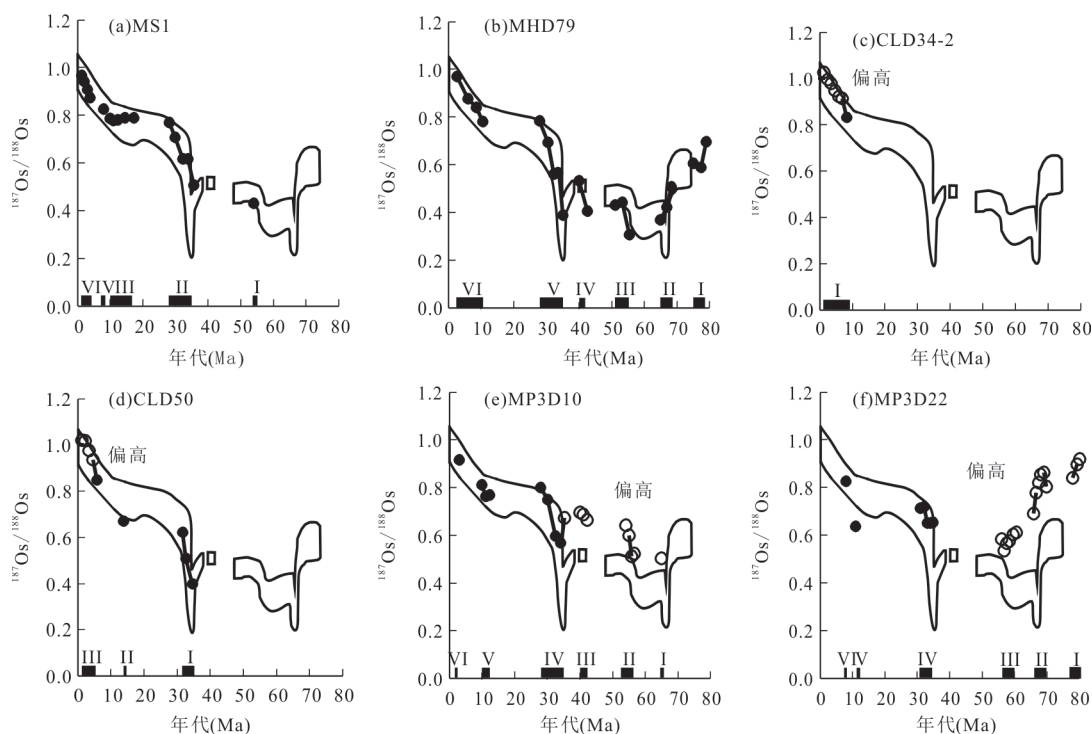


图 3 多金属结壳区域性、阶段性偏高现象

Fig.3 The regional and periodic anomalies of Os isotopic composition of polymetallic crusts in two seamounts  
曲线框体为 Klemm *et al.* (2005) 报道的标准曲线。横坐标的黑色实线为划分的生长期;实心圆为贴合曲线的测定值,空心圆则为偏高点

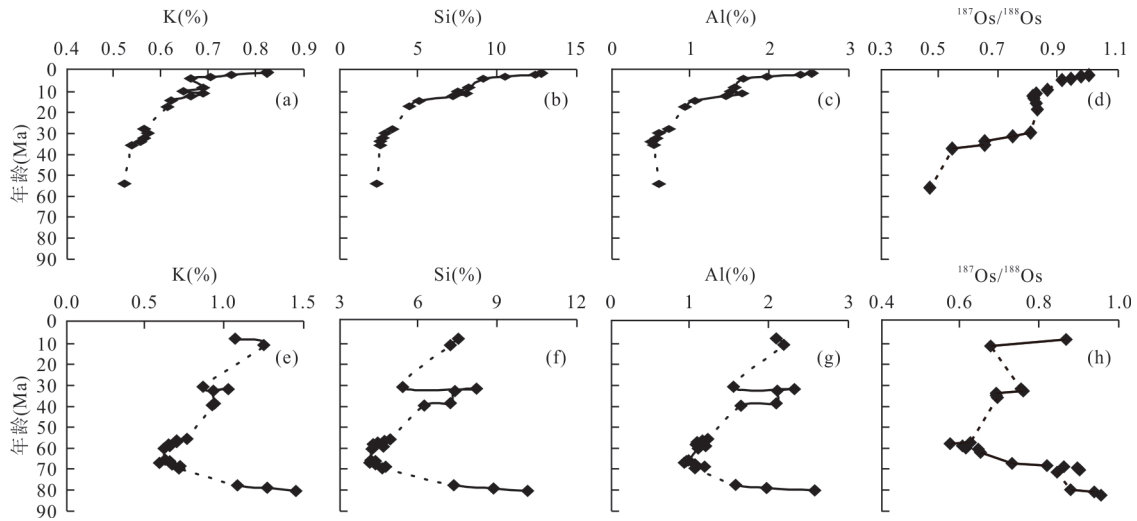


图4 麦哲伦海山区结壳 MS-1(a~d)和莱恩海山区结壳 MP3D22(e~h)的 K、Si、Al 的含量和 Os 同位素组成年代剖面  
 Fig.4 K, Si, Al contents and Os isotopic composition profiles of the crust MS-1 (a–d) from Magellan seamount and crust MP3D22 (e–h) from Line seamount

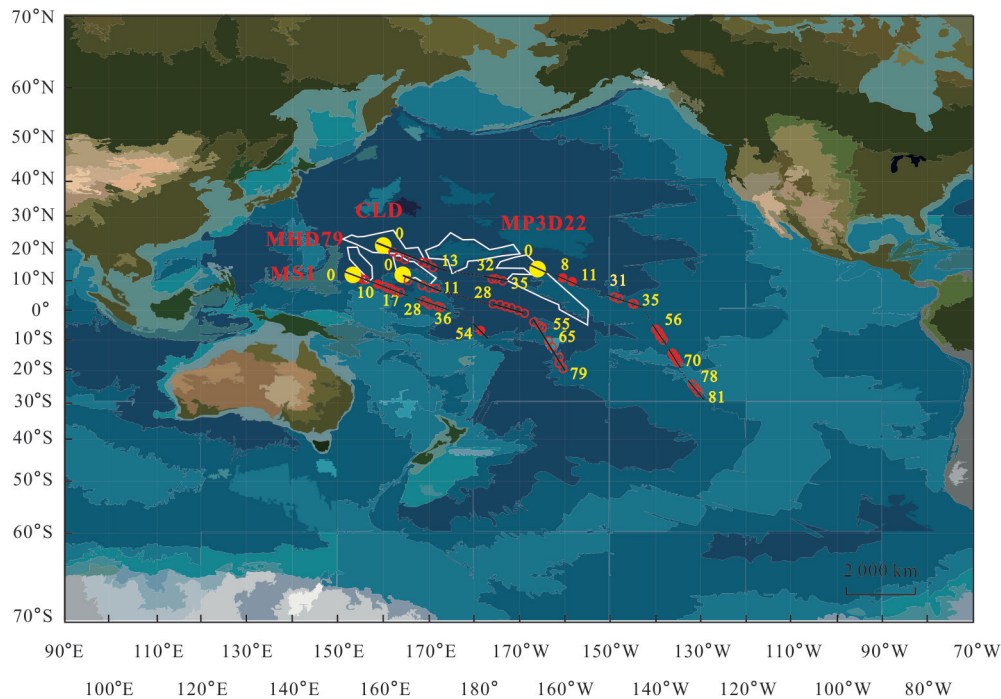


图5 结壳样品所在海山古经纬度恢复示意图

Fig.5 Paleo latitude and longitude of the seamount where the crust samples settled

红色点位是海山古位置,黄色点位是海山现今位置,黄色数字为点位对应的壳层年龄(Ma),黑色实/虚线为结壳的生长/间断区间

品都出现偏高异常,且偏高幅度和曲线形态几乎一致.第三,孟宪伟等(2008)发表的中太平洋海山区样品的曲线同样存在“偏高现象”.第四, $^{187}\text{Re}$ 的原位衰变几乎可以忽略.据 Klemm *et al.*(2005)的报道,结壳中 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 的平均值为 32.83,从而造成 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的波动平均值仅为 0.03,这对于 Os 同位素曲线的偏离影响甚微.本文样品的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$

测试平均值则更低(0.14),对 Os 同位素组成的影响也更小.

需要指出的是,虽然海山区 2 个样品的 Os 同位素比值偏高,但其变化趋势与标准曲线趋势相似.因此,在与标准曲线比对定年时,只能通过趋势形态对应原则厘定这 2 个(特别是莱恩海山区)海山区结壳的生长年代框架.虽然这种区域性、阶段性的

偏高现象给多金属结壳的Co-Os法定年造成了一定困难,但趋势形态比对定年的思路也是对该方法的一种补充.依据这个原则得到的莱恩海山区多金属结壳的年代框架与李江山等(2008)和丁旋等(2008)得到的超微化石年代学结果吻合,证实了方法的可行性和结果的可靠性.

如何解释这种Os同位素曲线区域性、阶段性偏高异常目前还缺乏证据,不过基于Os同位素变化理论,比值的异常偏离可能受到地质历史时期壳源、幔源物质的供应关系变化的影响.80 Ma以来海水的Os同位素标准曲线正是反映了这一时期内陆源风化、超基性岩供给和陨击事件造成的壳源、幔源物质供应关系的变化.如前所述,虽然马尔库斯威克海山区和莱恩海山区的2个样品的Os同位素比值偏高,但其变化趋势与海水Os同位素标准曲线相似,这说明样品依然受控于中、西太平洋Os同位素的整体物源供应模式,可能造成2个海山区异常的物源供给事件未能打破太平洋体系的整体格局.Os同位素的持续偏高可能反映了陆源物质供应量持续偏高或幔源物质供应量持续偏低.中、西太平洋海山区,尤其是莱恩海山区在白垩世以来持续经历了多期较强的火山作用改造(Winterer, 1993; 赵俐红等, 2010),所以一种情况的可能性较小.

马尔库斯威克海山区和莱恩海山区多金属结壳Os同位素异常偏高的现象可能与其在随太平洋板块运移沉降过程中,在特定时期到达特定位置,从而接受了区域性陆源物质供给有关.马尔库斯海山区在中、西太平洋区域位于西北部,在漂移过程中率先通过赤道并到达中纬度地区,在近10 Ma,该区域的样品可能接受了大量随西风带运输而来的欧亚大陆风化剥蚀物,从而在7 Ma以来表现出偏高异常.莱恩海山区处于中、西太平洋区域的东部,虽然距离欧亚大陆较远但是距离美洲大陆较近. Leinen and Health(1981)研究认为,美洲风尘通量在古新世之前持续较大,在古新世至渐新世期间逐渐降低,之后几乎消失.几乎与此同时,随着青藏高原的隆升,东亚季风开始形成,亚洲风尘通量在渐新世以来逐渐上升,并在如15~13、8、3.6、2.5 Ma时出现峰值.麦哲伦海山区样品MS1和莱恩海山区样品MP3D22的陆源风化剥蚀物指示元素K、Si、Al的含量年代剖面 and Os同位素组成剖面(表1,表2)可分别与亚洲风尘和美洲风尘通量演化模型对比,并同时受结壳所在海山的运移轨迹(本文采用Glates软

件模型(Müller *et al.*, 2018)并参考传统的视极旋转法(赵俐红, 2005)、运移参数几何法(任向文, 2005)和热点追踪法(Wessel and Kroenke, 1997)进行经纬度恢复)的控制,而这在一定程度上可以解释Os同位素区域性、阶段性偏高的现象.如图4和图5所示,在晚白垩世时,MP3D22处于南半球东南信风带影响范围内,接受了来自美洲大陆的风尘,K、Si、Al的含量和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值处于高值区间.在古新世至渐新世,MP3D22逐渐进入赤道无风带并恰巧对应美洲风尘的衰退期,K、Si、Al的含量和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值逐渐下降.在以上2个时期,位于研究区东部的莱恩海山区结壳样品可以持续接受美洲风尘的供给,大量的陆源风化物进入结壳造成了 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的阶段性偏高.而西部样品MS1、MHD79、CLD50由于距离美洲大陆太远,均没有接收到来自美洲的陆源风尘,所以Os同位素比值处于正常范围.渐新世以来,2个海山区都进入了北半球西风带的影响范围,开始接受更强大的西风带运输而来的亚洲风尘,K、Si、Al的含量和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值持续飙升,MS1的元素剖面还显示出15~13 Ma的峰值.这一时期,研究区的多数地区都吹拂在强劲的盛行西风之下,Os同位素比值未表现出区域性的异常特征.

### 3 结论

(1)中、西太平洋多金属结壳的主要生长期包括80~75 Ma、70~65 Ma、60~50 Ma、42~40 Ma、35~28 Ma、15~10 Ma、8~0 Ma,普遍存在的间断期包括65~60 Ma、51~42 Ma、40~35 Ma和28~18 Ma等.

(2)马尔库斯威克海山区多金属结壳Os同位素曲线在7 Ma以来相对标准曲线偏高,莱恩海山区的样品则在33 Ma之前的老壳层表现出“偏高现象”.造成偏高的原因可初步解释为这2个海山区在运移沉降过程中阶段性地接收行星风系运输的亚洲和美洲的大陆风尘.

致谢:感谢国家地质测试中心杜安道、屈文俊、李超研究员为本文提供高水平测试数据!感谢本团队相关人员对本研究和前期研究的贡献.感谢审稿人的建设性意见和建议!

### References

Allègre, C. J., Luck, J. M., 1980. Osmium Isotopes as Petrogenetic and Geological Tracers. *Earth and Planetary*

- Science Letters*, 48(1): 148–154. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(80\)90177-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(80)90177-6)
- Banakar, V. K., Pattan, J. N., Mudholkar, A. V., 1997. Palaeoceanographic Conditions during the Formation of a Ferromanganese Crust from the Afanasiy-Nikitin Seamount, North Central Indian Ocean: Geochemical Evidence. *Marine Geology*, 136(3–4): 299–315. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(96\)00065-5](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00065-5)
- Ding, X., Gao, L. F., Fang, N. Q., et al., 2008. The Relationship between the Growth Process of the Ferromanganese Crusts in the Pacific Seamount and Cenozoic Ocean Evolution. *Scientia Sinica Terrae*, 38(10): 1297–1308 (in Chinese).
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00079-4)
- Fu, Y. Z., Peng, J. T., Qu, W. J., et al., 2005. Os Isotopic Compositions of a Cobalt-Rich Ferromanganese Crust Profile in Central Pacific. *Chinese Science Bulletin*, 50(15): 1654–1659 (in Chinese).
- Han, X. Q., Qiu, Z. Y., Ma, W. L., et al., 2009. High-Resolution Dating of Co-Rich Crusts: A Comparative Study Using the Methods of Orbital Pacing and  $^{230}\text{Thex}/^{232}\text{Th}$  Dating. *Scientia Sinica Terrae*, 39(4): 497–503 (in Chinese).
- Hein, J. R., Yeh, H. W., Gunn, S. H., et al., 1993. Two Major Cenozoic Episodes of Phosphogenesis Recorded in Equatorial Pacific Seamount Deposits. *Paleoceanography*, 8(2): 293–311. <https://doi.org/10.1029/93pa00320>
- Ingram, B. L., Hein, J. R., Farmer, G. L., 1990. Age Determinations and Growth Rates of Pacific Ferromanganese Deposits Using Strontium Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(6): 1709–1721. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90402-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90402-7)
- Klemm, V., Levasseur, S., Frank, M., et al., 2005. Osmium Isotope Stratigraphy of a Marine Ferromanganese Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1–2): 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.07.016>
- Klemm, V., Frank, M., Levasseur, S., et al., 2008. Seawater Osmium Isotope Evidence for a Middle Miocene Flood Basalt Event in Ferromanganese Crust Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.028>
- Leinen, M., Heath, G. R., 1981. Sedimentary Indicators of Atmospheric Activity in the Northern Hemisphere during the Cenozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 36(1–2): 1–21. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(81\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0031-0182(81)90046-8)
- Levasseur, S., Birck, J., Allègre, C. J., 1998. Direct Measurement of Femtomoles of Osmium and the 187Os/186Os Ratio in Seawater. *Science*, 282(5387): 272–274. <https://doi.org/10.1126/science.282.5387.272>
- Li, C., Yang, X., Zhao, H., et al., 2015. High Precise Isotopic Measurements of Pg-ng Os by Negative Ion Thermal Ionization Mass Spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 34(4): 392–398 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. S., 2007. Characteristics of the Growth-Discontinuity Age of Cobalt Rich Crusts in the Central-Western Pacific and Its Paleoceanographic Significance (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, J. S., Fang, N. Q., Qu, W. J., et al., 2008. Os Isotope Dating and Growth Hiatuses of Co-Rich Crust from Central Pacific. *Scientia Sinica Terrae*, 38(9): 1122–1129 (in Chinese).
- Meisel, T., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. The Osmium Isotopic Composition of the Earth’s Primitive Upper Mantle. *Nature*, 383(6600): 517–520. <https://doi.org/10.1038/383517a0>
- Meng, X. W., Liu, Y. G., Qu, W. J., et al., 2008. Osmium Isotope of the Co-Rich Crust from Seamount Allison, Central Pacific and Its Use for Determination of Growth Hiatus and Growth Age. *Scientia Sinica Terrae*, 38(9): 1130–1135 (in Chinese).
- Müller, R. D., Cannon, J., Qin, X. D., et al., 2018. GPlates: Building a Virtual Earth through Deep Time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7): 2243–2261. <https://doi.org/10.1029/2018gc007584>
- Peucker-Ehrenbrink, B., Ravizza, G., Hofmann, A. W., 1995. The Marine 187Os/186Os Record of the Past 80 Million Years. *Earth and Planetary Science Letters*, 130(1–4): 155–167. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(95\)00003-u](https://doi.org/10.1016/0012-821x(95)00003-u)
- Pegram, W. J., Krishnaswami, S., Ravizza, G. E., et al., 1992. The Record of Sea Water 187Os/186Os Variation through the Cenozoic. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4): 569–576. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(92\)90132-f](https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90132-f)
- Pegram, W. J., Turekian, K. K., 1999. The Osmium Isotopic Composition Change of Cenozoic Sea Water as Inferred from a Deep-Sea Core Corrected for Meteoritic



- Contributions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (23–24): 4053–4058. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00308-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00308-7)
- Puteanus, D., Halbach, P., 1988. Correlation of Co Concentration and Growth Rate: A Method for Age Determination of Ferromanganese Crusts. *Chemical Geology*, 69 (1–2): 73–85. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90159-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90159-3)
- Ravizza, G., 1993. Variations of the  $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$  Ratio of Seawater over the Past 28 Million Years as Inferred from Metalliferous Carbonates. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1–4): 335–348. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(93\)90177-b](https://doi.org/10.1016/0012-821x(93)90177-b)
- Ravizza, G., 1998. Osmium–Isotope Geochemistry of Site 959: Implications for Re–Os Sedimentary Geochronology and Reconstruction of Past Variations in the Os–Isotopic Composition of Seawater. In: Mascle, J., Lohmann, G. P., Moullade, M., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 159: 181–186. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.159.035.1998>
- Ravizza, G., Peucker–Ehrenbrink, B., 2003. The Marine  $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$  Record of the Eocene–Oligocene Transition: The Interplay of Weathering and Glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1–2): 151–165. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00137-7](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00137-7)
- Ren, X. W., 2005. The Metallogenic System of Co–Rich Manganese Crusts in Western Pacific (Dissertation). Institute of Oceanology of Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Sharma, M., Wasserburg, G. J., Hofmann, A. W., et al., 1999. Himalayan Uplift and Osmium Isotopes in Oceans and Rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(23–24): 4005–4012. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00305-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00305-1)
- Su, X., Ma, W. L., Cheng, Z. B., 2004. Calcareous Nannofossil Biostratigraphy for Co–Rich Ferromanganese Crusts from Central Pacific Seamounts. *Earth Science*, 29(2): 141–147 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Xue, T., He, G. W., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Walker, R. J., Morgan, J. W., 1989. Rhenium–Osmium Isotope Systematics of Carbonaceous Chondrites. *Science*, 243(4890): 519–522. <https://doi.org/10.1126/science.243.4890.519>
- Walker, R. J., Morgan, J. W., Beary, E. S., et al., 1997. Applications of the  $^{190}\text{Pt}$ – $^{186}\text{Os}$  Isotope System to Geochemistry and Cosmochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(22): 4799–4807. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00270-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00270-6)
- Wang, X. H., Zhou, L. P., Wang, Y. M., et al., 2008. Paleoenvironmental Implications of High–Density Records in Co–Rich Seamount Crusts from the Pacific Ocean. *Scientia Sinica Terrae*, 38(9): 1112–1121 (in Chinese).
- Wen, X., de Carlo, E. H., Li, Y. H., 1997. Interelement Relationships in Ferromanganese Crusts from the Central Pacific Ocean: Their Implications for Crust Genesis. *Marine Geology*, 136(3–4): 277–297. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(96\)00064-3](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00064-3)
- Wessel, P., Kroenke, L. W., 1997. A Geometric Technique for Relocating Hotspots and Refining Absolute Plate Motions. *Nature*, 387(6631): 365–369. <https://doi.org/10.1038/387365a0>
- Winterer, E. L., Natland, J. H., van Waasbergen, R. J., et al., 1993. Cretaceous Guyots in the Northwest Pacific: An Overview of Their Geology and Geophysics. The Mesozoic Pacific: Geology, Tectonics, and Volcanism. American Geophysical Union, Washington D. C., 307–334. <https://doi.org/10.1029/gm077p0307>
- Yang, Z., Jiang, H., Yang, M. G., et al., 2017. Zircon U–Pb and Molybdenite Re–Os Dating of the Gangjiang Porphyry Cu–Mo Deposit in Central Gangdese and Its Geological Significance. *Earth Science*, 42(3): 339–356 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Song, J. L., Tang, J. X., et al., 2017. Petrogenesis, Diagenesis and Mineralization Ages of Galale Cu–Au Deposit, Tibet: Zircon U–Pb Age, Hf Isotopic Composition and Molybdenite Re–Os Dating. *Earth Science*, 42(6): 862–880 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., 2014. Os Isotope Chronology of the Co–Rich Polymetallic Crust from Western and Central Pacific and Its Paleooceanographic Significance (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B. S., Li, J., Long, X. P., et al., 2018. Re–Os Isochron Age of Pyrites from Meiling Cu Deposit in the Eastern Tianshan: A Case Study for the Os Isotopic Heterogeneity. *Earth Science*, 43(9): 2966–2979 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. H., 2005. Study on the Formation of Seamounts Distributed by Cobalt–Rich Crust in the Central–West Pacific (Dissertation). Institute of Oceanology of Chinese

Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).

- Zhao, L.H., Jin, X.L., Gao, J.Y., et al., 2010. The Research on the Drifting History and Possible Origin of the Magellan Seamount Trail. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(3): 60–66 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T., 2016. The Zonal Migration of the Seamounts in Middle–West Pacific during Cenozoic and Its Influence on the Formation of Cobalt Bearing Crust. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 丁旋, 高莲凤, 方念乔, 等, 2008. 太平洋海山富钴结壳生长过程与新生代海洋演化关系. *中国科学: 地球科学*, 38(10): 1297–1308.
- 符亚洲, 彭建堂, 屈文俊, 等, 2005. 中太平洋富钴结壳剖面的钨同位素组成. *科学通报*, 50(15): 1654–1659.
- 韩喜球, 邱中炎, 马维林, 等, 2009. 富钴结壳高分辨率定年: 地球轨道周期印记法与  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  测年法对比研究. *中国科学: 地球科学*, 39(4): 497–503.
- 李超, 杨雪, 赵鸿, 等, 2015. pg-ng 级 Os 同位素热表面电离质谱高精度分析测试技术. *岩矿测试*, 34(4): 392–398.
- 李江山, 2007. 中—西太平洋富钴结壳生长—间断年代特征及古海洋学意义(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 李江山, 方念乔, 屈文俊, 等, 2008. 中太平洋富钴结壳的 Os 同位素定年与结壳生长间断. *中国科学: 地球科学*, 38(9): 1122–1129.
- 孟宪伟, 刘焱光, 屈文俊, 等, 2008. 中太平洋 Allison 海山富 Co 结壳 Os 同位素组成及其生长间断与生长年代的确定. *中国科学: 地球科学*, 38(9): 1130–1135.
- 任向文, 2005. 西太平洋富钴结壳成矿系统(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 苏新, 马维林, 程振波, 2004. 中太平洋海山区富钴结壳的钙质超微化石地层学研究. *地球科学*, 29(2): 141–147.
- 孙晓明, 薛婷, 何高文, 等, 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*, 22(12): 3014–3026.
- 王晓红, 周力平, 王毅民, 等, 2008. 太平洋富钴结壳高密度环境记录解读. *中国科学: 地球科学*, 38(9): 1112–1121.
- 杨震, 姜华, 杨明国, 等, 2017. 冈底斯中段岗讲斑岩铜钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(3): 339–356.
- 张志, 宋俊龙, 唐菊兴, 等, 2017. 西藏嘎拉勒铜金矿床的成岩成矿时代与岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及辉钼矿 Re-Os 定年. *地球科学*, 42(6): 862–880.
- 张志超, 2014. 中西太平洋富钴结壳 Os 同位素年代学研究及古海洋学意义(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 赵冰爽, 李杰, 龙晓平, 等, 2018. 东天山梅岭铜矿床黄铁矿 Re-Os 等时线年龄: Os 同位素不均一的结果. *地球科学*, 43(9): 2966–2979.
- 赵俐红, 2005. 中西太平洋富钴结壳生长海山的构造成因研究(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 赵俐红, 金翔龙, 高金耀, 等, 2010. 麦哲伦海山链漂移史及可能的来源. *海洋学报*, 32(3): 60–66.
- 周涛, 2016. 中—西太平洋新生代海山纬向迁移对富钴结壳生长环境的影响(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.