

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019110701

# 中、西太平洋多金属结壳生长速率变化与制约因素

王洋, 方念乔

中国地质大学, 北京 100083

**摘要:** 多金属结壳在不同生长区域、层位存在生长速率的差异, 这在一定程度上反映了其生长条件的优劣, 说明其受到了诸多海洋要素的制约。本研究在总结生长速率变化与结壳生长区域、年代和结构构造的关系的同时, 分析生长间断发生与生长速率变化的关系, 并尝试对多金属结壳生长环境条件的转变进行探讨。多金属结壳的生长速率随采样海山区位置由东向西(莱恩海山区—麦哲伦等海山区)、结构构造由致密到疏松再到较致密和生长期由老到新由高至低变化。最低含氧带之下合适的深度、较强的氧化性、较丰富的陆源物质供给和海洋中较高的碳酸钙溶解率有利于结壳的生长, 使其具有较大的生长速率。多金属结壳生长间断的发生对应3种生长速率变化情形: ①在生长速率由低升高前, 主要对应65~60 Ma的间断期, 此时水动力条件不佳, 结壳因生长环境过差而间断, 由差转好时复生长; ②生长速率由高转低时, 主要对应51~42 Ma和40~35 Ma的两次间断期, 此时气候回暖同时陆源风尘供应水平较低, 结壳在生长环境变差时间断, 稍好时复生长; ③生长速率持续偏低时, 对应28~18 Ma的间断期, 此时大洋CaCO<sub>3</sub>溶解率持续偏低, 结壳在长时间较差的生长环境中断续生长。

**关键词:** 多金属结壳; 生长速率; 生长间断; 古海洋环境

中图分类号:P736.3 文献标识码:A

## Variation in growth rate of polymetallic crusts in the central and western Pacific Ocean and its constraining factors

WANG Yang, FANG Nianqiao

China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** The growth rate of polymetallic crust varies in different growing areas and layers, constrained by some marine factors. In this paper, the polymetallic crust growth rate and its variation with growth region, age and structures are studied, in addition to the relationship between growth discontinuity and growth rate change. It is found that from east to west of the study area, i.e. from the Line Seamounts to Magellan Seamounts, the growth rate of polymetallic crusts decreases as the crusts change from dense to loose to sub-dense in layers, from old to young in ages and from high to low in topography. The areas below OMZ, where it is strong in oxidability, abundant in terrigenous materials supply and high in dissolution rate of calcium carbonate, are the areas favorable to the growth of crusts. Hiatus of crusts corresponding to three types of growth rate changes are observed in the study area: a) before the growth rate turned from low to high, which mainly corresponds to the hiatus of 65~60 Ma, the hydrodynamic condition of the environment is not good enough to crust growth, so the crust stopped growing and the crust could only resume growing when conditions were improved. b) when the climate warmed up and the supply of continental-derived wind dust remain low, the growth rate of crust would drop from high, which mainly corresponds to the two hiatuses during 51~42 Ma and 40~35 Ma. The crusts stopped growing when the environment became severe, and could only resume growing when it was slightly getting better. c) the growth rate remained low, which corresponded to the hiatus of 28~18 Ma, while the dissolution rate of CaCO<sub>3</sub> in the ocean was low. The crusts grew intermittently if the growth environment remained poor.

**Key words:** polymetallic crusts; growth rate; hiatus; paleoceanic environment

多金属结壳以极慢的生长速率(mm/Ma级)在洋底成层生长<sup>[1-2]</sup>, 十余厘米厚度的样品生长年龄即可达数十万年<sup>[3-4]</sup>, 使之成为研究构造尺度古海洋学环境演化的良好载体<sup>[5]</sup>。

诸多因素可能影响了多金属结壳的生长速率, 其中包括结壳受成岩作用影响程度、结构构造差异和古海洋环境要素演化等。一般而言, 水成型结壳的生长速率远小于成岩型结核, 前者一般为2~

资助项目: 中国大洋矿产资源研究开发协会“十三五”资源环境项目“合同区海山形成演化及铁锰矿床成矿模型研究”(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及古海洋学研究, E-mail: WangY\_SOS@cugb.edu.cn

收稿日期: 2019-11-07; 改回日期: 2020-02-28。蔡秋蓉编辑

4 mm/Ma, 而后者可达 10 mm/Ma 以上<sup>[6]</sup>, 受到成岩作用影响较大或者混合成因结壳的生长速率可能偏大一些<sup>[7]</sup>。不少学者还将不同的构造特征与结壳的生长速率大小联系起来, 认为含有沉积物杂质较多的疏松层具有偏高的生长速率, 因其生长期间水动力较强, 有利于水成型矿物的发育<sup>[8]</sup>, 但实际情况更为复杂。很多学者估算了多金属结壳分层生长速率变化规律, 发现结壳表层的生长速率低于底层<sup>[9-10]</sup>, 但有些研究得到的结果恰恰相反<sup>[11]</sup>。到目前为止, 生长速率与结构构造层之间的关系尚没有统一认识。古海洋学环境方面也有过不少讨论。已有研究指出, 第四纪气候波动<sup>[9,12]</sup>、深层水循环<sup>[9,13-14]</sup>、地球轨道强迫<sup>[5]</sup>、古最低含氧带和 CCD 深度变化<sup>[15-16]</sup>、陆源风化物侵蚀事件<sup>[17]</sup>可能对结壳的生长造成影响。

现有多种方法可以估算多金属结壳的生长速率, 对于采自太平洋内部的样品, 各种方法得到的结果虽处同一数量级, 但也存在显著差距。其中, 超微化石年代学法得到的生长速率范围从 0.1 mm/Ma<sup>[1]</sup> 到 5 mm/Ma 以上<sup>[18]</sup> 不等; Be 同位素法的结果范围为 2.56~14.2 mm/Ma<sup>[19]</sup>; Co 经验公式法得到的生长速率则为 0.8 mm/Ma<sup>[20]</sup> 至 11.64 mm/Ma 之间<sup>[21]</sup>。部分方法得到的结壳生长速率过大, 这可能与未识别的生长间断、过低的定年精度以及方法的适用性不佳有关。可见, 多金属结壳生长速率的测算受制于研究方法的局限性和准确性。

由于多金属结壳生长速率估算方法的局限性和生长间断的普遍性, 目前报道的生长速率数据具有较大不确定性, 影响因素也不甚明确。在长达几十万年的生长过程中, 多金属结壳的生长速率变化幅度很大, 同一样品不同层位生长率差别可达几倍之多<sup>[11,20]</sup>, 且普遍存在多个生长间断期。基于成矿理论<sup>[16]</sup>, 结壳生长速率较低的阶段其生长环境应较为恶劣, 容易发生生长间断, 而生长速率较高的阶段生长环境应该较为有利, 结壳连续生长且结构构造规则, 而实际情况有待考证。对于结壳生长间断与生长速率变化的关系, 目前尚无相关研究。

本研究采用区域性适用的 Co 经验公式法估算了中、西太平洋 6 块多金属结壳的生长速率, 同时通过比对海水 Os 同位素曲线对 Co 法结果进行限定, 研究不同区域、不同层位和不同年代的生长速率的变化情况及其与生长间断的关系, 从而论证多金属结壳生长的有利/不利条件, 为厘定多金属结壳的生长间断期年代提供帮助, 具有重要的古海洋学和年代学意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品信息

本研究选择采自中、西太平洋 4 个海山区的 6 块结壳样品(样品信息和取样点位如表 1 和图 1 所示)。利用小型手钻(选用直径 1.00 mm 的合金钻头)逐层钻取结壳粉末样品, 研磨过筛。每层取样厚度平均为 3 mm, 重约 2 g。麦哲伦海山区样品结核状结壳 MS1 由外层向内层取样 16 个点, 可细分为 5 个构造层, 结构皆较致密, 最内层与邻层存在较为明显的不整合。马绍尔海山样品 MHD79 为上较致密层—中疏松层—下致密层典型 3 层结构结壳, 由顶到底取样 20 个点。马尔库斯威克海山区样品 CLD34-2 为一单层结壳, 仅存较致密层, 取样 14 个点(对应定年点位 7 个)。该海山区另一样品 CLD50 为一不规则 3 层结构结壳, 壳层环绕基岩生长, 大致也可分为较致密—疏松—致密 3 层结构, 共取样 20 层(对应定年点位 9 个)。采自莱恩海山区的两块结壳样品 MP3D10 和 MP3D22 皆为典型 3 层结构结壳, 由顶至底分别取样 17 层和 22 层。样品 MHD79 的 X 衍射结果显示, 结壳主要结晶矿物为水羟锰矿, 同时具有磷酸盐化矿物碳氟磷灰石(CFA)以及方解石等次要矿物<sup>[22]</sup>。

### 1.2 Co 经验公式法

结壳 Co 的含量(即质量百分数 wt%, 下文简写为 [Co])与生长速率之间具一定的反相关关系, 即生长速率越快, [Co] 越低<sup>[6]</sup>, 据此很多学者提出了若干经验公式<sup>[20,23-25]</sup>。在测得结壳 [Co] 的情况下, 可依据经验公式估算其生长速率, 再根据其生长厚度(单层取样厚度)推算年龄。经过对不同 Co 经验公式应用的结果比对, 选择区域性适用的方法对样品的生长速率进行了估算。该生长速率是多金属结壳在每个生长期內连续生长时的生长速率。其中, 麦哲伦海山区样品选用 Manheim 和 L-Bostwick<sup>[23]</sup> 的公式(公式 1), 马尔库斯威克和莱恩海山区样品选用 McMurtry 等<sup>[24]</sup> 的公式(公式 2)。对受磷酸盐化作用影响较大的壳层进行校正, 方法如 Puteanus 和 Halbach<sup>[20]</sup> 所述。

$$\text{Growth Rate}(\text{mm/Ma}) = 0.68 / ([\text{Co}]^{1.67}) \quad (1)$$

$$\text{Growth Rate}(\text{mm/Ma}) = 1.67 \times ([\text{Co}]^{-0.47}) \quad (2)$$

式中, Growth Rate 为结壳生长速率, [Co] 为样品分

表1 结壳取样信息和结构构造简述  
Table 1 Sampling information and structural description

样品名称	采样区域	采样位置	层位	宏观描述		
MS1	麦哲伦海山区	12.1°N、153.3°E 2 128 m	较致密	结核状结壳，环绕核心生长。 整体致密，按生长纹理大致可分为5层，无明显疏松层。		
			致密			
MHD79	马绍尔海山区	11.7°N、163.2°E 2 381 m	较致密	亮黑色—黑褐色，致密块状，组成纯净，横纵节理发育，贝壳状断口。		
			疏松	黄白色—黄褐色，质地疏松，杂质较多。		
			致密	亮黑色—黑褐色，致密块状，片理发育。		
CLD34-2	马尔库斯威克海山区	21.67°N、160.5°E 2 191 m	较致密	黑褐色，致密块状，组成纯净，柱状构造。		
			较致密	黑褐色，同心圆构造，具柱状构造。		
CLD50			疏松	黑褐色，多孔，充填大量碎屑，构造杂乱。		
			致密	亮黑色，组成纯净，具平行纹层构造，具生物痕迹。		
MP3D10	莱恩海山区	13.2°N、165.3°W 2 739 m	较致密	黑褐色，致密块状。		
			疏松	黑褐色—黄褐色，裂隙和孔洞多，大量杂质。		
			致密	亮黑色—黄白色，致密块状，节理裂隙发育。		
MP3D22		14.3°N、166.1°W 3 214 m	较致密	褐黑色，呈层状，金属光泽。		
			疏松	灰色—黄褐色，裂隙和孔洞多。		
			致密	亮黑色，致密块状，组成纯净。		

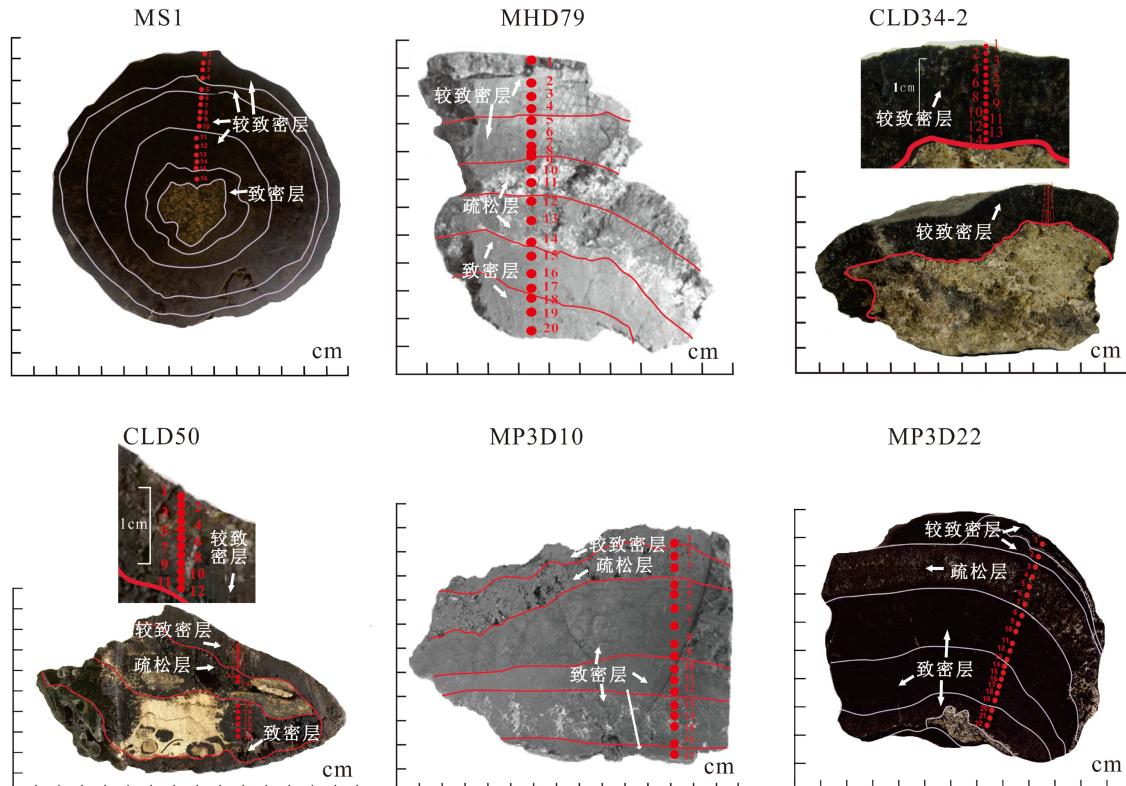


图1 壳层划分与取样点位示意图  
Fig.1 Division of crust layer and sampling points

层钴质量百分含量(wt%)。

### 1.3 Co-Os 法定年体系

将经验公式法估算的不考虑生长间断的最小年龄(Co 法年龄)数据与测定的结壳分层 Os 同位素组成数据结合, 绘制 Co-Os 曲线, 将其与 80 Ma 以来海水 Os 同位素曲线<sup>[3]</sup>比对, 根据形态和取值的贴合程度划分结壳的生长—间断区间, 厘定其年代框架。其中, 结壳的宏观生长期受控于测定的 Os 同位素曲线的趋势和取值, 而 Co 法则可以估算宏观框架下更为精细的年代间隔, 从而提高年代框架的分辨率。

### 1.4 测试方法

Co 等元素百分含量的测定分别由中国地质大学(北京)地学实验中心、国家地质测试中心和核工业北京地质研究院分析测试研究所完成, 采用仪器包括 Platform 电感耦合等离子质谱仪、PE8300 等离子质谱仪和 JXA8100 电子探针仪。Os 同位素测定由国家地质测试中心完成, 采用仪器包括 MAT262 负离子热表面电离质谱仪、Triton-plus 热表面电离质谱仪等, 测试过程和参数详见 Du 等<sup>[26]</sup>, 测试结果的平均不确定度为 0.003 7。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生长速率的区域性特征

经验公式法估算得到的生长速率结果如表 2 所示。其中, 麦哲伦海山区结壳样品 MS1 生长速率范围为 1.08~3.82 mm/Ma, 平均为 2.15 mm/Ma。该生长速率为 1.55~3.32 mm/Ma, 平均为 2.25 mm/Ma。采自偏西部的这两个海山区的结壳的平均生长速率为 2.2 mm/Ma。相比之下, 采自马尔库斯威克海山样品虽然现存构造层差异很大, 但都具有较低的平均生长速率, CLD34-2 为 1.85 mm/Ma(范围为 1.67~2.17 mm/Ma), CLD50 为 1.95 mm/Ma(范围为 1.47~2.29 mm/Ma), 二者平均为 1.9 mm/Ma。然而, 采自莱恩海山区的多金属结壳却存在普遍较大的生长速率, 平均为 3.1 mm/Ma。MP3D10 的生长速率为 2.75 mm/Ma, 范围为 2.11~3.39 mm/Ma, 而 MP3D22 的平均生长速率可达 3.38 mm/Ma, 范围为 2.46~3.95 mm/Ma。由此可见, 中、西太平洋地区结壳的生长速率存在一定的区域性特征, 偏东部的莱

恩海山区的样品较大, 偏北部的马尔库斯威克海山区的较小, 而偏西部的麦哲伦和马绍尔海山区的处于二者之间。目前, 尚无明确的生长速率区域性分布特征的报道。在已有研究中, 符亚洲<sup>[27]</sup>报道的莱恩海山区结壳 MP5D17 的生长速率范围为 2.1~3.7 mm/Ma, 与本研究得到的结果较为接近。

### 2.2 生长速率的剖面变化规律

如图 2 所示, 生长速率在剖面上具有一定幅度的变化。具有典型 3 层结构且生长年代跨域较长的样品由底至顶, 生长速率整体上逐渐降低, 如马绍尔海山区样品 MHD79、莱恩海山区样品 MP3D10 和 MP3D22。这种情况与 Jeong<sup>[28]</sup> 的报道相似, 他发现马尔库斯威克海山区结壳老壳层的生长速率平均为 3 mm/Ma, 相对新壳层的 2 mm/Ma 较高。同样地, Halbach 和 Puteanus<sup>[29]</sup> 的研究显示, 壳层越年轻, [Co] 越高, 从而具有较低的生长速率。本研究中, 马尔库斯威克海山区的两块样品年代跨域较短, 没能显示出明显的剖面特征。而采自麦哲伦海山区的样品 MS 则显得比较特殊, 虽然中下部的生长速率也是逐渐降低的, 但在最外层却具有较高的生长速率。这可能是因为该样品表层结壳生长环境较好(接收到持续增加的陆源剥蚀物供应), 且相对于莱恩海山区样品保留比较完整, 取样较密集。马绍尔海山区样品 MHD79 和马尔库斯威克海山区样品 CLD34-2、CLD50 也存在类似特征。

### 2.3 生长速率变化与结构构造的关系

以肉眼观察为主, 辅以显微结构照片(如图 3A 所示的结构构造突变界面和图 3B 所示的不整合面)和年代框架数据(图 4), 来对多金属结壳进行宏观分层(图 1)。分别整理了 6 块样品较致密上层、疏松中层和致密下层的生长速率, 结果如表 2 和图 2 所示。麦哲伦海山区样品 MS1 较薄的致密下层生长速率为 1.54 mm/Ma, 较致密层的平均生长速率为 2.19 mm/Ma。马绍尔海山区样品 MHD79 的致密下层平均生长速率为 2.39 mm/Ma, 疏松中层为 2.69 mm/Ma, 较致密上层为 1.91 mm/Ma。马尔库斯威克海山区单较致密层样品 CLD34-2 的平均生长速率为 1.85 mm/Ma, 另一样品 CLD50 的致密层, 疏松层, 较致密层的平均生长速率分别为 2.15, 1.93 和 1.83 mm/Ma。莱恩海山的两块样品 MP3D10 和 MP3D22 致密层, 疏松层和较致密层的平均生长速率分别为 2.83, 2.56, 2.11 mm/Ma 和 3.46, 2.66, 2.46 mm/Ma。可见, 除 MS1 外, 中、西太平洋多金属结

表2 中、西太平洋多金属结壳分层生长速率  
Table 2 Growth rate changes within the crust layers in Western-Central Pacific

取样点位	取样深度/mm	Co含量/%	生长速率/(mm/Ma)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	Co-Os年龄/Ma	分层平均值
麦哲伦海山区MS1						
1	3	0.36	3.82	0.966 8	1.18	
2	6	0.37	3.64	0.941 2	2	
3	9	0.43	2.79	0.907 0	2.9	
4	11	0.48	2.35	0.874 6	3.75	
5	13	0.51	2.07	0.827 1	8	
6	15	0.49	2.27	0.787 9	10	
7	17	0.44	2.70	0.777 8	10.92	
8	20	0.50	1.92	0.781 2	12.23	较致密层2.19
9	22	0.74	1.14	0.790 7	14.43	
10	25	0.75	1.09	0.790 9	17.18	
11	28	0.76	1.08	0.769 5	28	
12	30	0.67	1.34	0.708 6	29.87	
13	33	0.62	1.50	0.617 7	32.2	
14	37	0.46	2.48	0.617 7	33.81	
15	41	0.44	2.64	0.506 9	35.52	
16	46	0.61	1.54	0.431 5	54	致密层1.54
平均值		0.54	2.15	0.756 1		
马绍尔海山区MHD79						
1	2	0.51	2.09	0.969 0	2.63	
2	9	0.54	1.90	0.877 4	6.05	
3	15	0.50	2.16	0.840 2	8.47	
4	19.5	0.49	2.24	0.780 0	10.59	
5	24.5	0.61	1.55	0.783 0	28	较致密层1.91
6	28.5	0.60	1.60	0.693 7	30.51	
7	32.5	0.58	1.69	0.560 2	32.29	
8	34.5	0.52	2.03	0.568 1	33.52	
9	37.5	0.53	1.96	0.388 3	35.05	
10	40.5	0.49	2.24	0.533 1	40	
11	44.5	0.50	2.16	0.405 8	42.54	
12	51.5	0.42	2.93	0.432 4	51	疏松层2.69
13	59.5	0.39	3.32	0.443 4	53.26	
14	66.5	0.43	2.78	0.308 0	55.42	
15	71.5	0.48	2.31	0.368 4	65	
16	77	0.44	2.68	0.422 0	66.87	
17	81.5	0.43	2.75	0.507 5	68.32	
18	85	0.54	1.90	0.606 0	75	
19	90	0.50	2.18	0.589 5	77.44	
20	96	0.46	2.49	0.696 3	79.04	
平均值		0.50	2.25	0.588 6		

续表 2

取样点位	取样深度/mm	Co含量/%	生长速率/(mm/Ma)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	Co-Os年龄/Ma	分层平均值
马尔库斯威克海山区CLD34-2						
1	2	0.57	2.17	1.027 6	1.32	
2	4	0.70	1.97	0.996 5	2.37	
3	6	0.81	1.84	0.979 6	3.48	
4	8	0.98	1.68	0.947 7	4.67	较致密层1.85
5	10	0.88	1.77	0.921 1	5.77	
6	12	1.00	1.67	0.912 9	6.95	
7	14	0.81	1.84	0.832 9	8.29	
平均值		0.85	1.85	0.945 5		
马尔库斯威克海山区CLD50						
1	2	0.51	2.29	1.022 0	1.17	
2	4	1.17	1.55	1.016 9	2.3	
3	6	0.73	1.93	0.975 4	3.34	较致密层1.83
4	8	1.32	1.47	0.936 5	4.63	
5	10	0.74	1.92	0.848 1	5.73	
6	14	0.73	1.93	0.670 1	13	疏松层1.93
7	30	0.65	2.05	0.621 9	32	
8	34	0.53	2.24	0.508 5	32.95	致密层2.15
9	40	0.57	2.17	0.399 9	34.84	
平均值		0.76	1.95	0.78		
莱恩海山区MP3D10						
1	3	0.61	2.11	0.915 1	3	较致密层2.11
2	7	0.41	2.54	0.812 4	10	
3	10	0.40	2.57	0.763 9	11.17	疏松层2.56
4	13	0.41	2.54	0.769 9	12.35	
5	16	0.57	2.17	0.801 2	28	
6	20	0.51	2.29	0.750 0	30.18	
7	26	0.44	2.46	0.596 3	32.42	
8	31	0.50	2.31	0.568 0	34.15	
9	34	0.31	2.90	0.672 1	35.18	
10	37	0.30	2.92	0.694 7	40	
11	40	0.30	2.94	0.687 7	41.02	致密层2.83
12	43	0.27	3.06	0.664 4	42.16	
13	47	0.24	3.27	0.642 0	54	
14	51	0.23	3.35	0.599 0	55.05	
15	54	0.22	3.38	0.513 1	55.79	
16	56	0.22	3.39	0.524 1	56.53	
17	59	0.39	2.60	0.502 4	65	
平均值		0.37	2.75	0.675 1		

续表 2

取样点位	取样深度/mm	Co含量/%	生长速率/(mm/Ma)	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	Co-Os年龄/Ma	分层平均值
莱恩海山区MP3D22						
1	4	0.44	2.46	0.826 7	8	较致密层2.46
2	8	0.37	2.66	0.636 2	11	疏松层2.66
3	11	0.31	2.90	0.712 5	31	
4	15	0.18	3.74	0.718 2	32.07	
5	19	0.16	3.95	0.650 7	33.08	
6	23	0.16	3.95	0.651 6	34.03	
7	26.5	0.20	3.56	0.653 3	34.95	
8	29.5	0.27	3.09	0.584 4	56	
9	32.5	0.22	3.40	0.535 1	56.81	
10	35	0.23	3.33	0.565 8	57.63	
11	38	0.21	3.48	0.574 1	58.49	
12	41	0.21	3.48	0.604 8	59.5	
13	45	0.19	3.65	0.611 2	60.6	致密层3.46
14	49	0.20	3.56	0.690 2	66	
15	51	0.20	3.56	0.777 9	66.7	
16	54	0.21	3.48	0.821 1	67.42	
17	56	0.23	3.33	0.854 7	68.17	
18	59	0.22	3.40	0.862 8	69.05	
19	62	0.22	3.40	0.803 5	69.94	
20	65	0.24	3.27	0.839 6	78	
21	70	0.21	3.48	0.897 3	79.44	
22	75	0.25	3.20	0.916 9	80.53	
平均值		0.23	3.38	0.717 7		

注: MS1 和 MHD79 采用 Manheim 和 L-Bostwick<sup>[23]</sup> (式1) 的经验公式, 其他4个样品则采用 McMurtry 等<sup>[24]</sup> (式2) 的公式, 对受到磷酸盐化影响较大的 MHD79、CLD50 和 MP3D10 依据 Puteanus 和 Halbach<sup>[8]</sup>的方法进行了磷酸盐化校正。分别计算了样品各宏观构造层的平均生长速率。

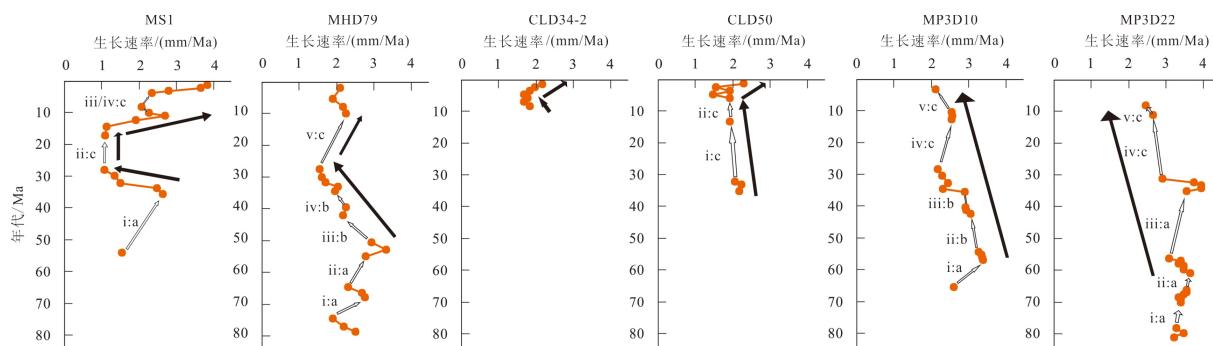


图 2 多金属结壳的生长速率年代剖面图

实心点位为结壳的分层生长速率, 纵坐标为 Co-Os 法年龄, 空心箭头为生长间断(小写序号表示)起止的生长速率高低变化指示  
(a. 由低变高, b. 由高转低, c. 低值区间), 实心箭头指示生长速率的剖面变化规律。

Fig.2 Comparison of age profiles of polymetallic crusts

The solid points are the layered growth rate of the crust, the ordinate is the age by Co-Os method, the hollow arrow indicate the change of the growth rate (a. low to high, b. high to low, c. low value interval) from beginning to the end of a hiatus (lower case number), and the solid arrows indicating the profile change.

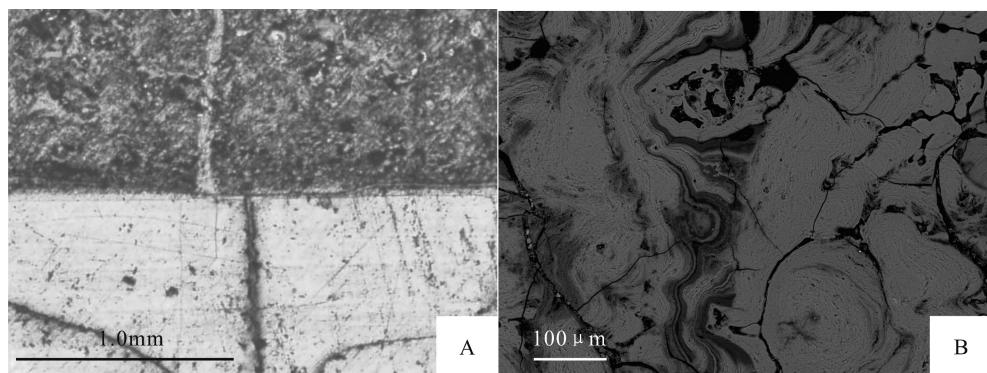


图 3 多金属结壳生长间断的显微证据

A. MHD79 的结构构造突变界限<sup>[30]</sup>, B. MS1 扫描电镜下的生长不整合<sup>[31]</sup>。

Fig.3 Microscopic records of growth discontinuity of polymetallic crusts

A. The sharp structural boundary of MHD79<sup>[30]</sup>, B. Growth disconformity under SEM of MS1<sup>[31]</sup>.

壳生长速率与结构构造分层存在一定关系,致密层最高,平均为 2.71 mm/Ma,疏松层略低为 2.46 mm/Ma,较致密层最低为 2.03 mm/Ma,这在一定程度上解释了生长速率在剖面上的变化规律,但接受大量杂质混染的疏松层并不具有明显偏高的生长速率<sup>[18,27]</sup>,而是低于致密层。

#### 2.4 生长速率的时代性特征

根据 1.2、1.3 所述的 Co-Os 法定年体系,得到的中、西太平洋 6 块多金属结壳年代框架如图 4 所示。普遍的生长期包括晚白垩世的一期(约 80~75 Ma)、70~65、60~50、42~40、35~28、15~10、8~0 Ma。整理概括了 6 块样品在每个生长期内的生长速率,以分析其与生长年代的关系(表 3)。结果显示,结壳生长速率的变化与结壳生长年代存在一定关系。新生代以来,具有较高生长速率的年代区间,包括 60~50、42~32 和 15~0 Ma,而在 32~28 Ma 的生长期内,存在一极低生长速率期(图 2)。虽然 Segl 等<sup>[9]</sup>和 Ling 等<sup>[10]</sup>在研究中也指出结壳的老壳层相对新壳层具有较高的生长速率,但他们并未对应壳层生长年代区间且未分析结壳中下部层位的情况。

#### 2.5 生长速率与古海洋环境演化的关系

多金属结壳的主要成矿元素是 Fe 和 Mn,充足的成矿物质供应固然有利于结壳生长<sup>[32]</sup>。在海水中,Fe 的来源是多样的,包括风尘、沉积物(及其再悬浮)以及热液等<sup>[33]</sup>,并随洋流输运到大洋内部<sup>[34]</sup>。各种来源的 Fe 被固结在浮游生物骨骼中<sup>[6]</sup>,随着生物碎屑的降落而溶解进入海水,并在一定深度内再悬浮混合,从而控制了海洋初级生产力<sup>[35]</sup>。而 Mn 则主要固结于埋藏于海底的有机相中<sup>[36]</sup>,其溶解相

通过再悬浮作用输入到中层水中,并大量赋存于最低含氧带(OMZ)<sup>[37]</sup>。铁锰的主要沉降物质是还原相的,需要被氧化成矿<sup>[38]</sup>。含氧量较低的 OMZ 不利于此过程的发生,结壳位于其间时生长速率相对偏低<sup>[39]</sup>。而当结壳处于 OMZ 其上或其下时,往往具有较高的生长速率<sup>[37]</sup>。在这个深度范围,富 Mn 的 OMZ 水团与氧化性较强的水体充分混合,从而造就了有利的成矿条件。在本研究中,莱恩海山区的两块样品都采自相对较深的位置(表 1),其长时间处于 OMZ 深度以下,而不像其他样品在较早生长期大多处于 OMZ 之中,这可能是导致其生长速率相对较高的原因之一。然而,随着两块样品的进一步下降,与 OMZ 距离逐渐增大,可能接收 Mn 的供给逐渐不足,导致表层的生长速率有所衰减。另一方面,碳酸钙的溶解为海水供应了大量的 Fe,为结壳成矿提供原料,有利于结壳的生长<sup>[16]</sup>。据许东禹<sup>[40]</sup>和 Siesser<sup>[41]</sup>的报道,太平洋碳酸钙溶解率在渐新世普遍较低,这可能对应着结壳 32~28 Ma 的低生长速率区间。多金属结壳 MS1、MHD79 和 MP3D22 的 Fe 含量在该时代都处于较低水平(图 5)。

适当的底流条件总体上有利于结壳的发育(如海山顶部的水流较强从而发育最厚的结壳<sup>[42]</sup>),因为其携带了富氧的水团,同时也可以防止沉积物对结壳的覆盖和混染<sup>[43]</sup>,但其可导致 OMZ 缩减从而影响 Mn 元素的溶解。莱恩海山区独特的地理优势可能是该地区结壳生长速率较高的原因之一。西太平洋地区的多金属结壳由于被马里亚纳海沟和火山岛链阻隔,洋流很难深入其间,而莱恩海山区则可以从东面直接接收洋流的滋养,从而存在相对有利的水成和氧化环境。

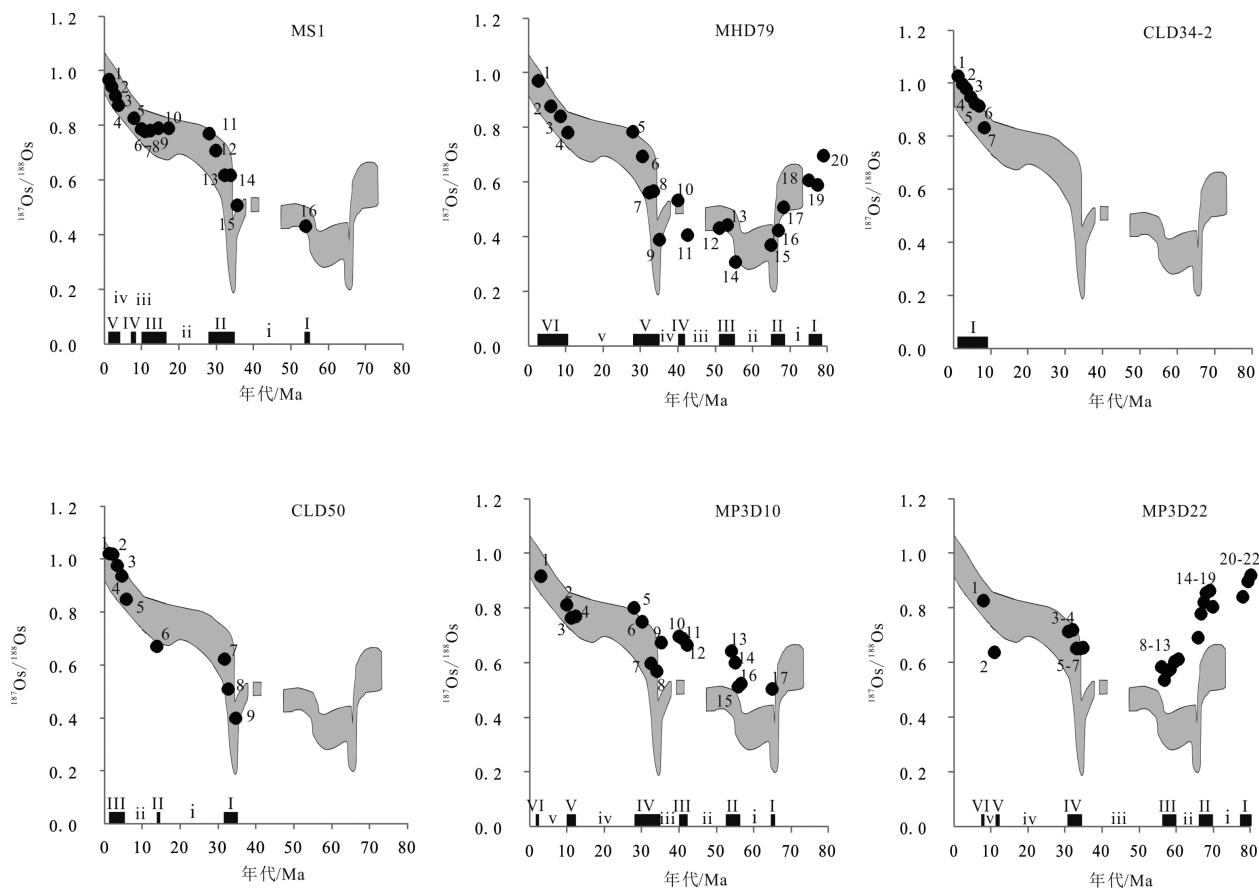


图 4 多金属结壳的 Co-Os 年代框架

曲线框体是 Klemm 等<sup>[3]</sup>报道的海水 Os 同位素曲线, 横坐标上的黑色实线是划分的生长期(大写序号对应生长期, 小写序号对应间断期), 实心圆为样品  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  测定值。

Fig.4 Co-Os age patterns of polymetallic crusts

The curvilinear frames are the seawater curve from Klemm et al. [3], and the black solid lines of abscissa are the divided growing periods (capital serial number corresponds to growth periods, while small serial number corresponds to hiatus). The solid circles are the measured value of the crusts.

表 3 结壳在不同生长期内的生长速率 (单位: mm/Ma)  
Table 3 Growth rate of crusts during different growing periods (unit:mm/Ma)

样品名称	生长期/Ma						
	80~75	70~65	60~50	42~40	35~28	15~10	8~0
MS1			1.54-I		1.81-III	1.82-III	2.93-III
MHD79	2.19-I	2.58-I	3.01-II	2.2-II	1.77-III		2.1-III
CLD34-2							1.85-III
CLD50					2.15-I	1.93-II	1.83-III
MP3D10		2.6-I	3.35-I	2.97-I	2.43-I	2.55-II	2.11-III
MP3D22	3.32-I	3.46-I	3.41-I		3.62-I	2.66-II	2.46-III

注: I-致密层, II-疏松层, III-较致密层。

多数报道显示, 陆源物质的供应整体上有利于结壳的生长。以采自南海和波罗的海的样品为例, 距离大陆较近的地区可在短时间内发育厚度极大的结核、结壳样品<sup>[44-45]</sup>。莱恩海山在随太平洋板块

运移的过程中距离美洲大陆相对较近, 可能接受了大量源自该地区的风运和水运而来陆源物质, 从而结壳的生长速率较高。MP3D10 的疏松层斑杂质层的碎屑物质相对 MHD79 更多(图 6), MP3D22

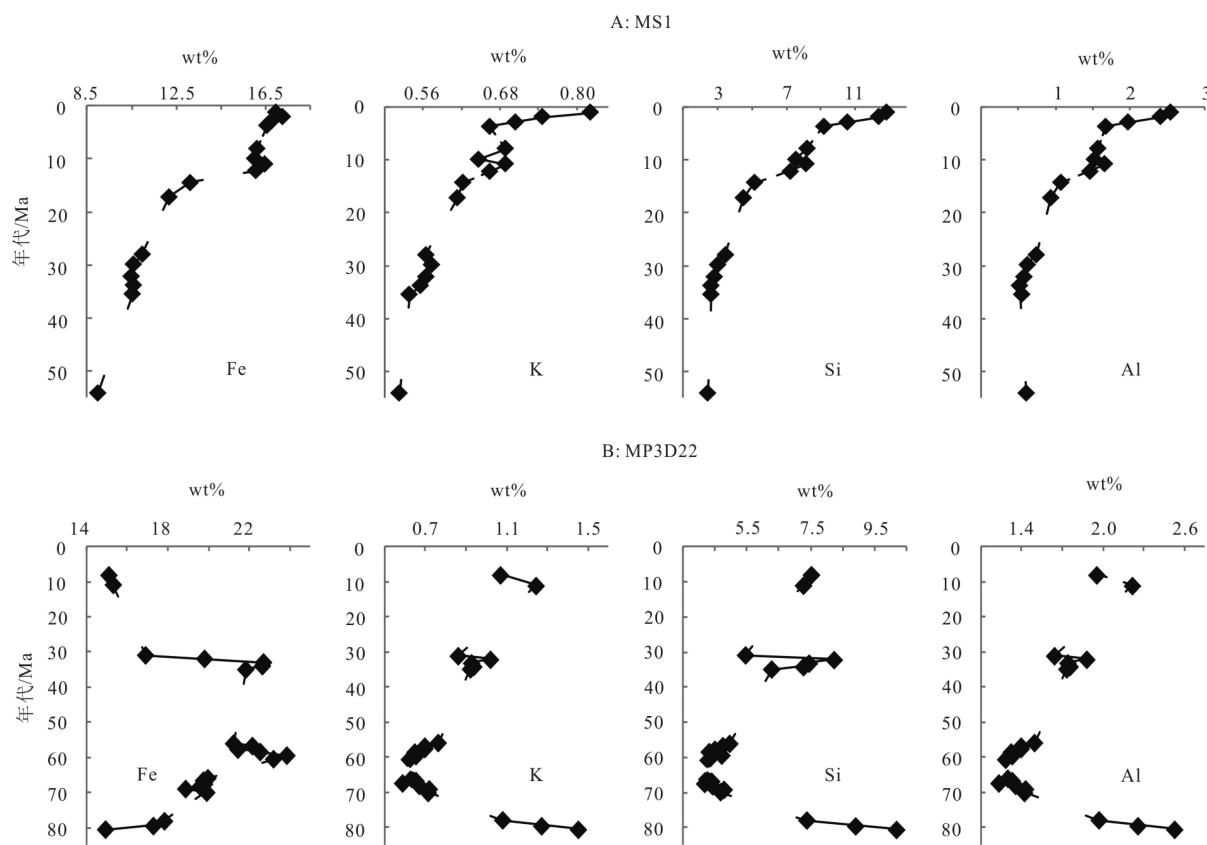


图 5 结壳样品 Fe、K、Si、Al 元素年代剖面  
A. 麦哲伦海山区样品 MS1, B. 莱恩海山区样品 MP3D22。

Fig.5 Age profiles of Fe, K, Si and Al in crust samples

A. MS1 from Magellan Seamounts, B. MP3D22 from Line Seamounts.

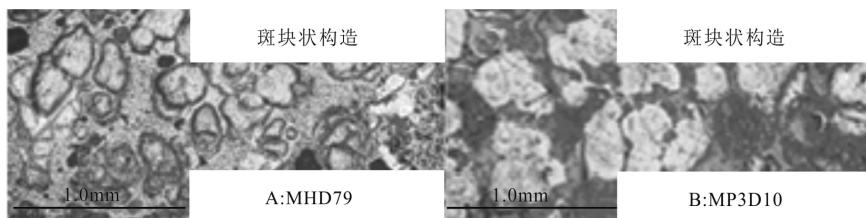


图 6 结壳样品斑杂状构造显微照片<sup>[22]</sup>  
A. 马绍尔海山区样品 MHD79, B. 莱恩海山区样品 MP3D10。

Fig.6 Micrograph of variegated texture of a crust sample<sup>[22]</sup>

A. MHD79 from Marshall Seamounts, B. MP3D10 from Line Seamounts.

的 K 和 Al 含量相对 MS1 较高(图 5)(与佟景贵<sup>[46]</sup>的结果相似)可以作为证据。另外, 莱恩海山区和麦哲伦海山区结壳生长速率剖面变化分别与美洲风尘和亚洲风尘的演化模型<sup>[47]</sup>对应良好, 前者在 33 Ma 以前的生长速率由于美洲季风的衰落而逐渐降低, 而后者在 15 Ma 以来的生长速率随着东亚季风的加剧而逐渐上升(图 2), 这种变化与陆源风尘指示元素 K, Si, Al 的剖面特征也可对比(图 5), 这一定程度上解释了结壳生长速率在剖面上的变化

特征(如在 32~28 Ma 的低值区间)。

结壳生长速率的高低与结构构造特征和所处时代的冷暖并无明显联系, 而真正造成影响的是其背后所代表的具体古海洋学环境因素。结壳处于疏松层的点位并不对应大幅偏高的生长速率值, 个别点位的高值可能对应了短时大量的一次杂质混染事件, 而处于致密层的点位也可以对应很高的生长速率值。另外, 渐新世以来总体上是一个逐渐变冷的过程, 而晚白垩世至新生代早期气候则相对较

暖，结壳的生长速率并未展现出在冰期或间冰期内普遍较高的特征。在冰期，生物生产力总体较高，Fe、Mn 固结相供应充足，底层流的发育带来了有利的氧化环境和水动力条件，但同时也伴随着 Fe、Mn 的固结率上升、OMZ 的缩减和沉积物沉积速率的上升等不利条件。在间冰期，化学风化的加强导致海水酸化，有利于 Fe 的溶解和 OMZ 的扩展，但却因水动力不足导致海水氧化程度不高和磷酸盐化作用的发生。国内外学者对于冰期/间冰期环境对结壳的影响的认识也并不统一，Eisenhauer 等<sup>[12]</sup>发现结壳高生长速率期对应间冰期，而李江山等<sup>[30]</sup>发现结壳的生长期大多对应于冰期。丁旋等<sup>[48]</sup>充分论证了冰期和间冰期的古海洋学环境特征，指出其对结壳生长的影响是各种有利、不利因素的叠加耦合的结果，并不是简单的对应关系，这与本研究的认识较为一致。

## 2.6 生长速率与生长间断的关系

如 2.2 所述，结壳不同层位的生长速率变化存在一定规律，整体表现为由底至顶逐渐下降。由于古海洋环境决定了结壳发育的优劣，这种变化规律与结壳生长年代区间的关系相对结构构造更大，从而生长速率的变化与结壳发生间断的时间可能存在一定对应关系。通过综合对比 6 块结壳生长间断发生前后生长速率的变化情况（图 2），得到如下规律：①多金属结壳在生长速率由低变高的过程中易发生间断（情形 a），如 MS1 的间断期 i、MHD79 的间断期 i、ii、MP3D10 的 i 和 MP3D22 的 i、ii、iii，在发生的全部 21 次间断中占 33.3%（7 次）。②在生长速率由高转低的过程中容易发生间断（情形 b），如 MHD79 的间断期 iii、iv 和 MP3D10 的间断期 ii、iii，这种情况占到了总间断次数的 19%。③在生长速率持续较低的区间内容易发生间断（情形 c），如 MS1 的间断期 ii、iii 和 iv、MHD79 的 v、CLD50 的 i 和 ii、MP3D10 的 iv 和 v、MP3D22 的 iv 和 v，在发生的间断中占 47.7%。通过对上述规律的整合，我们发现中、西太平洋多金属结壳普遍存在的间断期分别可以对应上述生长速率变化情形：间断期 65~60 Ma 对应“情形 a”，早古新世暖期较温和的水动力条件以及较低的生产力可能造成了此期间断。间断期 51~42 Ma 对应“情形 b”，与早始新世气候最佳期（EECO）对应，这同样也是一个暖期。此两次间断期之间的生长期（60~50 Ma）具有较高生长速率，对应以强化学风化作用著称的古新世碳同位素最高期（PETM），此时海水被酸化，CaCO<sub>3</sub> 大量溶

解供应了大量的溶解 Fe，结壳成矿物质充足。间断期 40~35 Ma 对应“情形 b”，可能反映了美洲风尘和亚洲风尘通量同时较低的时期，同时随着 CaCO<sub>3</sub> 溶解率的逐渐降低，结壳复生长时也具有不高的生长速率。间断期 28~18 Ma 则对应“情形 c”，可能由于海洋中 CaCO<sub>3</sub> 溶解率的长期不足导致，表现为与此间断期相邻的生长期持续较低的生长速率。此后，在 15~0 Ma，偏西部的海山区结壳生长速率较高持续上升，主要是由于该区域开始不断接受欧亚大陆的风化剥蚀物。Segl 等<sup>[49]</sup>尝试将结壳的生长速率突变点作为生长间断的时代标志（time marker），为结壳定年提供年代控制点。该思路与本文不谋而合，但其研究的局限性是只考虑了生长速率突变的情况而忽视了在持续较低的生长速率区间，多金属结壳也很有可能发生间断。

## 3 结论

(1) 中、西太平洋多金属结壳生长速率变化规律存在区域性和剖面特征。偏东部的莱恩海山区结壳具有相对较高的生长速率（平均 3.1 mm/Ma），而偏北部的马尔库斯威克海山区相对较低（平均 1.9 mm/Ma），偏西部的麦哲伦海山区和马绍尔海山区结壳的生长速率（平均 2.2 mm/Ma）处于二者之间。莱恩海山区多金属结壳较高的生长速率与其所处适当的成矿深度、较强的氧化性水流条件和可接受相对丰富的陆源物质供应有关。6 块样品的生长速率在剖面上自底至顶（由老至新）总体表现为由高至低的变化，部分样品在中新世以来生长速率又有所回升。其中，60~50、42~32 和 15~0 Ma 的年代区为结壳生长速率高值期，而在 32~28 Ma 区间内生长速率较低。生长速率在剖面上的变化可能与美洲、亚洲风尘输运强度和海水碳酸钙溶解率的演化有关。

(2) 中、西太平洋多金属结壳普遍存在的间断期分别可以对应以下 3 种生长速率变化情形：间断期 65~60 Ma 对应“生长速率由低升高（情形 a）”，可能与早古新世暖期较温和的水动力条件以及较低的生产力有关。间断期 51~42 和 40~35 Ma 对应“生长速率由高转低（情形 b）”，可能与气候回暖以及风尘通量供应较低有关。间断期 28~18 Ma 则对应“生长速率持续偏低（情形 c）”，可能是由海洋中 CaCO<sub>3</sub> 溶解率的长期不足导致的。

致谢：中国大洋协会和广州海洋地质调查局

为本研究提供项目和样品支持。同时对国家地质测试中心杜安道、屈文俊、李超研究员和其他测试人员对本研究提供的高水平测试数据表示感谢!感谢丁旋、李江山、张振国、高莲凤、吴长航、张艳、张志超、周涛和黄和浪对本研究和前期研究的贡献!

## 参考文献 (References)

- [1] Cowen J P, De Carlo E H, McGee D L. Calcareous nannofossil biostratigraphic dating of a ferromanganese crust from Schumann Seamount [J]. *Marine Geology*, 1993, 115 (3-4) : 289-306.
- [2] Chabaux F, Unions R K, Cohen A S, et al. 238U-234U-230Th disequilibrium in hydrogenous oceanic Fe-Mn crusts: Palaeoceanographic record or diagenetic alteration? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (17) : 3619-3632.
- [3] Klemm V, Levasseur S, Frank M, et al. Osmium isotope stratigraphy of a marine ferromanganese crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 238 (1-2) : 42-48.
- [4] 李江山, 方念乔, 屈文俊, 等. 中太平洋富钴结壳的Os同位素定年与结壳生长间断[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2008, 51 (10) : 1452-1459. [LI Jiangshan, FANG Nianqiao, QU Wenjun, et al. Os Isotope dating and growth hiatuses of Co-rich crust from central Pacific [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51 (10) : 1452-1459.]
- [5] Hein J R, Bohrson W A, Schulz M S, et al. Variations in the fine-scale composition of a central Pacific ferromanganese crust: Paleoceanographic implications [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7 (1) : 63-77.
- [6] Halbach P, Segl M, Puteanus D, et al. Co-fluxes and growth rates in ferromanganese deposits from Central Pacific Seamount areas [J]. *Nature*, 1983, 304 (5928) : 716-719.
- [7] 栾锡武. 大洋富钴结壳成因机制的探讨——水成因证据[J]. *海洋学研究*, 2006, 24 (2) : 8-19. [LUAN Xiwu. Cobalt-rich ferromanganese crusts formation—Evidences of hydrogenous origin [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24 (2) : 8-19.]
- [8] 朱克超, 赵祖斌, 李扬. 麦哲伦海山区MD、ME、MF海山富钴结壳特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21 (1) : 33-38. [ZHU Kechao, ZHAO Zubin, LI Yang. Cobalt-rich ferromanganese crusts from the MA, ME, and MF seamounts of the Magellan seamounts [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21 (1) : 33-38.]
- [9] Segl M, Mangini A, Banani G, et al. 10Be-dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean palaeocirculation [J]. *Nature*, 1984, 309 (5968) : 540-543.
- [10] Ling H F, Burton K W, O'Nions R K, et al. Evolution of Nd and Pb isotopes in Central Pacific Seawater from ferromanganese crusts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 146 (1-2) : 1-12.
- [11] 潘家华, DeCarlo E, 刘淑琴, 等. 西太平洋富钴结壳生长与富集特征[J]. *地质学报*, 2005, 79 (1) : 124-132. [PAN Jiahua, DeCarlo E, LIU Shuqin, et al. Growth and enrichment characteristics of Co-rich crusts in the Western Pacific [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79 (1) : 124-132.]
- [12] Eisenhauer A, Gögen K, Pernicka E, et al. Climatic influences on the growth rates of Mn crusts during the Late Quaternary [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109 (1-2) : 25-36.
- [13] Mangini A, Segl M, Glasby G P, et al. Element accumulation rates in and growth histories of manganese nodules from the southwestern Pacific basin [J]. *Marine Geology*, 1990, 94 (1-2) : 97-107.
- [14] Von Blanckenburg F, O'Nions R K, Hein J R. Distribution and sources of pre-anthropogenic lead isotopes in deep ocean water from Fe-Mn crusts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (24) : 4957-4963.
- [15] Banakar V K, Pattan J N, Mudholkar A V. Palaeoceanographic conditions during the formation of a ferromanganese crust from the Afanasiy-Nikitin seamount, North Central Indian Ocean: geochemical evidence [J]. *Marine Geology*, 1997, 136 (3-4) : 299-315.
- [16] Banakar V K, Hein J R. Growth response of a deep-water ferromanganese crust to evolution of the Neogene Indian Ocean [J]. *Marine Geology*, 2000, 162 (2-4) : 529-540.
- [17] Frank M, O'Nions R K. Sources of Pb for Indian Ocean ferromanganese crusts: a record of Himalayan erosion? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 158 (3-4) : 121-130.
- [18] 潘家华, 张静, 刘淑琴, 等. 西北太平洋富钴结壳的钙质超微化石地层学研究及意义[J]. *地球学报*, 2007, 28 (5) : 411-417. [PAN Jiahua, ZHANG Jing, LIU Shuqin, et al. Calcareous nannofossil biostratigraphy of Co-rich crusts from Northwestern Pacific and its significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28 (5) : 411-417.]
- [19] Noguchi A, Yamamoto Y, Nishi K, et al. Paleomagnetic study of ferromanganese crusts recovered from the northwest Pacific- testing the applicability of the magnetostratigraphic method to estimate growth rate [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87 : 16-24.
- [20] Puteanus D, Halbach P. Correlation of Co concentration and growth rate-A method for age determination of ferromanganese crusts [J]. *Chemical Geology*, 1988, 69 (1-2) : 73-85.
- [21] 初凤友, 胡大千, 姚杰. 中太平洋YJC海山富钴结壳矿物组成与元素地球化学[J]. *世界地质*, 2006, 25 (3) : 245-253. [CHU Fengyou, HU Daqian, YAO Jie. Mineral composition and element geochemistry of Co-rich crust from the YJC sea mount in the Central Pacific Ocean [J]. *Global Geology*, 2006, 25 (3) : 245-253.]
- [22] 李江山, 方念乔, 丁旋, 等. 富钴结壳显微构造与元素含量: 基于中太平洋MHD79样品的研究[J]. *现代地质*, 2007, 21 (3) : 518-523. [LI Jiangshan, FANG Nianqiao, DING Xuan, et al. Microstructure and element abundance of Co-rich crust: Evidences from the layered sample MHD79 collected from the Central Pacific [J]. *Geoscience*, 2007, 21 (3) : 518-523.]
- [23] Manheim F T, Lane-Bostwick C M. Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydrothermal discharge on the Pacific sea floor [J]. *Nature*, 1988, 335 (6185) : 59-62.
- [24] McMurry G M, Vonderhaar D L, Eisenhauer A, et al. Cenozoic accumulation history of a Pacific ferromanganese crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125 (1-4) : 105-118.
- [25] Frank M, O'Nions R K, Hein J R, et al. 60 Myr records of major elements and Pb-Nd isotopes from hydrogenous ferromanganese crusts: Reconstruction of seawater paleochemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63 (11-12) : 1689-1708.

- [26] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenites HLP and JDC [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(1): 41-52.
- [27] 符亚洲. 中太平洋莱恩海山富钴结壳的地球化学及Os同位素地层年代学研究[D]. 中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 2006: 89-92. [FU Yazhou. Geochemistry and Os isotopic geochronology of cobalt rich crusts in the Line seamount, Central Pacific Ocean [D]. Doctor Dissertation of Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006: 89-92.]
- [28] Jeong K S, Jung H S, Kang J K, et al. Formation of ferromanganese crusts on northwest intertropical Pacific seamounts: electron photomicrography and microprobe chemistry [J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2-4): 541-559.
- [29] Halbach P, Puteanus D. The influence of the carbonate dissolution rate on the growth and composition of Co-rich ferromanganese crusts from Central Pacific seamount areas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 68(1): 73-87.
- [30] 李江山. 中、西太平洋富钴结壳地球化学及古海洋环境[D]. 中国地质大学, 2007: 20-28. [LI Jiangshan. Geochemistry and paleoceanic environment of cobalt rich crusts in the central and western Pacific [D]. China University of Geosciences, 2007: 20-28.]
- [31] 张志超. 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[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2014: 11-13. [ZHANG Zhichao. Geochronology of cobalt rich crusts in the central and western Pacific and its paleoceanographic significance [D]. Master Dissertation of China University of Geosciences, 2014: 11-13.]
- [32] Halbach P, Giovanoli R, von Borstel D. Geochemical processes controlling the relationship between Co, Mn, and Fe in early diagenetic deep-sea nodules [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 60(2): 226-236.
- [33] Boyd P W, Ellwood M J. The biogeochemical cycle of iron in the ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(10): 675-682.
- [34] Resing J A, Sedwick P N, German C R, et al. Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean [J]. *Nature*, 2015, 523(7559): 200-203.
- [35] Bressac M, Guieu C, Ellwood M J, et al. Resupply of mesopelagic dissolved iron controlled by particulate iron composition [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 995-1000.
- [36] Ostrander C M, Nielsen S G, Owens J D, et al. Fully oxygenated water columns over continental shelves before the Great Oxidation Event [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(3): 186-191.
- [37] Aplin A C, Cronan D S. Ferromanganese oxide deposits from the central Pacific Ocean. I. Encrustations from the Line Islands Archipelago [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(2): 427-436.
- [38] Robbins L J, Funk S P, Flynn S L, et al. Hydrogeological constraints on the formation of Palaeoproterozoic banded iron formations [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(7): 558-563.
- [39] De Carlo E H. Paleoceanographic implications of rare earth element variability within a Fe-Mn crust from the central Pacific Ocean [J]. *Marine Geology*, 1991, 98(2-4): 449-467.
- [40] 许东禹. 太平洋古海洋事件和成矿作用[C]//第30届国际地质大会论文集, 第13卷, 海洋地质学, 古海洋学. 北京: 地质出版社, 1999: 101-113. [XU Dongyu. Paleoceanic events and mineralization in the Pacific Ocean [C]//Proceedings of the 30th International Geological Congress, Volume 13, Marine Geology and Paleoceanography. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 101-113.]
- [41] Siesser W G. Paleoproductivity of the Indian Ocean during the Tertiary period [J]. *Global and Planetary Change*, 1995, 11(1-2): 71-88.
- [42] Roden G I. Effects of the Fieberling seamount group upon flow and thermohaline structure in the spring of 1991 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 9941-9961.
- [43] Pautot G, Melguen M. Deep bottom currents, sedimentary hiatuses and polymetallic nodules [J]. *Technical Bulletin*, 1976, 2: 54-61.
- [44] 张振国. 南海北部陆缘多金属结核地球化学特征及成矿意义[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2007: 98-102. [ZHANG Zhenguo. Approach to geochemical characteristics and minerogenetic environment of polymetallic nodules from the northern continental margin of the South China Sea [D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2007: 98-102.]
- [45] 吴长航. 南海北部陆缘大型多金属结核的生长及元素地球化学特征研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2009: 63-117. [WU Changhang. Research on the growth and elemental geochemical characteristics of large-scale polymetallic nodules from the Northern continental margin of the South China Sea [D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2009: 63-117.]
- [46] 佟景贵. 太平洋富钴结壳矿物地球化学及古海洋与古环境重建[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2007: 6-13. [TONG Jingguo. Geochemical and mineralogical study on the Co-rich ferromanganese crust from the Pacific ocean and the palaeocean and palaeoenvironment reconstruction [D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2007: 6-13.]
- [47] Leinen M, Heath G R. Sedimentary indicators of atmospheric activity in the northern hemisphere during the Cenozoic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 36(1-2): 1-21.
- [48] 丁旋, 高莲凤, 方念乔, 等. 太平洋海山富钴结壳生长过程与新生代海洋演化关系[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 52(8): 1091-1103. [DING Xuan, GAO Lianfeng, FANG Nianqiao, et al. The relationship between the growth process of the ferromanganese crusts in the Pacific seamount and Cenozoic ocean evolvement [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(8): 1091-1103.]
- [49] Segl M, Mangini A, Beer J, et al. Growth rate variations of manganese nodules and crusts induced by paleoceanographic events [J]. *Paleoceanography*, 1989, 4(5): 511-530.