

富钴结壳高分辨率定年: 地球轨道周期印记法与 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法对比研究

韩喜球^{①②*}, 邱中炎^{①②③}, 马维林^{①②}, 钱江初^{①②}

① 国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012;

② 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

③ 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

* E-mail: xiquhan@hotmail.com

收稿日期: 2008-07-17; 接受日期: 2009-01-10

国际海底区域研究课题(编号: DY105-01-01-08, DYXM-115-02-1-02)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号: JT0801)和国家自然科学基金项目(批准号: 40106005)资助

摘要 由于海山富钴结壳的生长速率十分缓慢, 长期以来, 对其年代和生长速率的高分辨率准确测定一直是个难题. 利用电子探针原位提取中太平洋海山富钴结壳(样品号: CB14)的元素含量变化剖面, 运用功率谱分析方法识别结壳第一亚层(0~3 mm) Al 元素含量变化曲线中存在的显著周期, 通过与米兰柯维奇周期的匹配, 获得结壳的高分辨率生长速率. 同时, 利用数控微钻对该结壳的第一亚层以 0.1 mm 为间隔进行高分辨率连续取样, 并利用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 法对其进行测年. 结果表明利用地球轨道周期印记法得到结壳的第一亚层生长速率为 2.14 mm/Ma, 与利用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法获得的结壳的生长速率(2.15 mm·Ma⁻¹)相吻合, 同时得到结壳第一亚层(0~3 mm)底界的年龄约为 1.4 Ma. 认为地球轨道的周期性变化所引起的气候与环境效应在结壳的生长剖面上打下了烙印, 利用地球轨道周期印记法确定富钴结壳的生长速率是一个有效而且可靠的新方法, 可应用于为世界海域富钴结壳建立高分辨率长序列的年代框架.

关键词

海山富钴结壳
米兰柯维奇周期
 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年
生长速率
中太平洋

海山富钴结壳除了经济价值外, 还蕴含了上千万年来丰富的古海洋、古环境、古气候信息. 可是由于结壳的生长速率十分缓慢, 受取样分辨率、测年所需最低样品用量及各种测年方法本身的局限性所限制, 目前常规的定年方法一般都难以使它的年代分辨率达到 0.1~1 Ma, 而且对老于 10~15 Ma 的部分无法给出准确的年龄^[1]. 利用米兰柯维奇旋回对沉积地层进行定年已经是一个较成熟的方法, 已有的大量的研究证明地层中确实存在与米兰柯维奇旋回(地球轨道偏心率、黄赤交角和岁差周期)相应的周期性信息^[2~4]. 最近几年我们在研究东太平洋水成型多金属

结核时, 发现结核的生长纹层中也包含了地球轨道周期的印记^[5], 利用地球轨道周期印记法获得结核的生长速率与放射性测年法获得的生长速率能很好吻合^[6]. 中太平洋海山富钴结壳与东太平洋水成型多金属结核具有类似的显微生长结构, 其化学成分变化规律和地球轨道周期之间一定也存在某种纽带关系, 这种纽带关系将为高分辨率长序列的结壳年代框架的建立提供可能.

为了研究结壳的化学成分变化规律和地球轨道周期之间所可能存在的纽带关系, 我们通过原位提取富钴结壳生长剖面元素变化序列, 利用功率谱分

析的方法, 获得结壳的成分变化所隐含的显著周期的谱系结构, 并与天文周期的谱系结构进行对比, 若发现两者之间可以相互匹配, 则认为地球轨道的周期性变化在海山富钴结壳的成分变化上打下了烙印, 可以利用轨道周期这个节拍器求取富钴结壳的生长速率。同时, 我们对结壳的外表层进行 0.1 mm 间隔的高分辨率取样, 利用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年对结壳进行高分辨率放射性测年, 并计算结壳的生长速率, 以验证利用地球轨道周期法测定结壳生长速率和年代的可靠性。

1 样品和方法

所研究的富钴结壳样品(CB14)来自中国大洋矿产资源研究与开发协会组织的 DY95-8 航次。该样品采自中太平洋海山区的 CB 海山, 取样水深 3018 m, 由拖网所得。样品呈褐色砾状, 表面略有曲度, 但较平整光滑(图 1)。该结壳厚约 5.5 cm, 宏观上可分内外两层, 外层厚约 2 cm, 内层厚约 3.5 cm, 内外层之间呈角度不整合接触。把样品从纵向切开进行抛光后, 首先在反光显微镜下对结壳的显微生长结构进行详细的观察, 并拍摄和无缝拼接显微照片, 在此基础上进行电子探针分析剖面位置的选择和放射性测年取样位置的选择。

在中国科学院上海硅酸盐研究所测试分析中心进行电子探针线扫描分析。分析仪器为日本电子 JXA8100。分析前先对样品进行喷碳处理, 分析时的工作参数为: 加速电压 20.0 kV, 电子束斑直径 5 μm , 束流为 4.987E-08(A), 电子束停留时间为 300 ms, 扫描步长为 3 μm 。

功率谱分析使用 Origin7.0 数据处理分析软件, 利用快速傅立叶变换方法(FFT)对富钴结壳地球化学序列进行有限离散功率谱分析(DFT)。在分析之前, 首先对原始数据进行处理, 对于来自非铁锰矿物的数据点(如偶然探测到微裂缝、微孔隙, 或生物碎屑和黏土颗粒等机械沉积物)视为数据畸点进行剔除, 用相邻数据点的平均值来代替。然后进行 5 点滑动平均, 以减小噪声影响。分析时的采样间隔为 3 μm 。利用红噪声假设检验法对 FFT 所揭示的各隐含周期进行显著性检验。

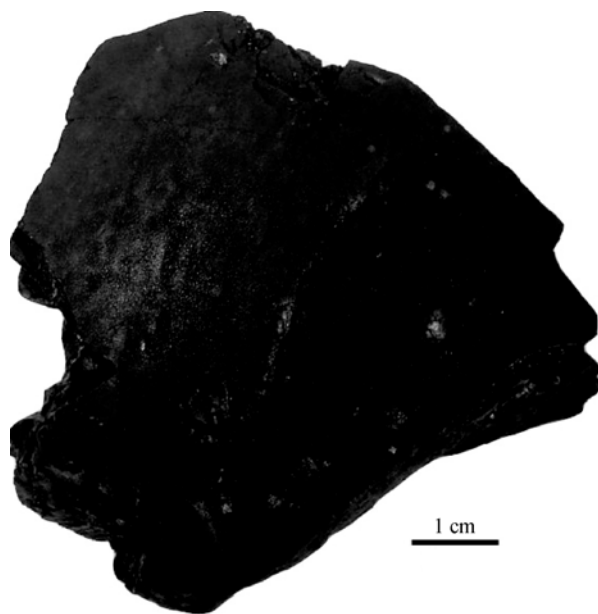


图 1 富钴结壳样品 CB14

样品呈褐色, 表面光滑

在德国莱布尼茨海洋科学研究所(IFM-GEOMAR)对结壳进行了高分辨率取样和铀系测年。所使用的取样设备为数控微钻, 微钻的直径为 8 mm, 按 0.1 mm 间隔从表层往下进行精细连续取样。对所取得的粉末样称重后倒入盛有 200 μL ^{229}Th 标样 ($102.99 \pm 0.1 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 300 μL ^{236}U 标样 ($239.9 \pm 0.1 \text{ pg/g}$) 的 Teflon 烧杯中, 加入 8 mL $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 和 100 μL H_2O_2 , 热液经蒸发和 130°C 干燥后加入 8 mL $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 , 然后置入装有 2 mL 1×8 树脂的 Bio-Rad 10 mL 聚丙烯柱子, 树脂和柱子事先用 20 mL $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 清洗, 再用 10 mL $7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 洗提到 Teflon 烧杯, 最后用 50 μL 的 HClO_4 溶解树脂里的残余离子。分离出来的 Th 溶液在 160°C 的温度下蒸发并干燥, 然后在样品中加入 3 mL 5% 的 HCl 备用。铀部分的化学处理使用 10 mL 的超纯水 (18.2 MOhm)、超纯 HClO_4 和 H_2O_2 、亚沸蒸馏的 HCl 和 HNO_3 溶液。整个过程 ^{230}Th , ^{232}Th , ^{234}U 和 ^{235}U 的空白量分别为 (2.7 ± 1.5) fg, (50.49 ± 4.78) pg, (5.9 ± 1.7) fg 和 (945 ± 22) fg。U 和 Th 同位素的检测使用的分析仪器为 AXIOM MC-ICP-MS, 用 100 ppt ^{238}U 溶液测试仪器的灵敏度, 在 400 Res 模式下, 灵敏度 $> 20 \text{ GHz} \cdot \text{ppm}^{-1}$ 。

2 结果

2.1 富钴结壳表层的显微生长结构

在显微镜下观察, 结壳内部具有典型的似叠层石结构^[7,8]. 该结壳的外层可进一步细分为 5 个亚层, 各亚层之间为连续过渡, 未见生长间断现象(图 2). 从表面到深部 3 mm 处为第一亚层, 该亚层叠层石纹层连续且匀称, 呈现低缓的波状起伏(图 1), 反映了该生长期结壳的生长环境较稳定, 生长速率稳定. 结壳第一亚层和下伏第二亚层在叠层石纹层的形态和反射率上存在差异. 其中第二亚层的黏土等机械沉积物含量明显较第一亚层高, 使暗层相对较发育, 同时纹层的起伏也较大, 显得相对疏松(图 2), 反映第二亚层的生长环境和生长速率较第一亚层有所变化. 本文着重对结壳的第一亚层进行研究.

2.2 地球化学剖面及其周期性

在结壳磨光面上从外到内沿叠层石柱体进行电子探针线扫描分析, 获取了结壳第一亚层生长剖面上 Si, Al, Fe 和 Mn 等主要元素的 X 射线强度变化数据, 剖面长度为 2946 μm , 每种元素均获得 944 个数据. 其含量变化曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 总体上, Si 和 Al 相互呈正相关, Fe 与 Mn 呈负相关. 结壳成分上的波动与其生长纹层的明暗变化有良好的对应关系. 反射率较低的纹层, 黏土等机械沉积物含量较高, Fe, Al 和 Si 元素的含量就较高, 相反, 反射率较高的纹层水羟锰矿等锰矿物含量较高, Mn 元素的含量较高. 大洋多金属结核中元素成分也具有类似的分布特征^[8]. 个别微层 Fe 与 Mn 含量同时表现为低值, 多数情况是所测的点为微裂缝或微孔隙(这时, 不仅 Fe 与 Mn 含量很低, Si 和 Al 含量也为低值), 也有可能测点是黏土或生物碎屑等机械沉积物(若是前者, Al, Si 含量较高; 若是后者, 则主要为钙质生物碎屑或硅质生物碎屑而呈现高 Si 或高 Ca 的特点).

结壳中的 Al 元素主要来自黏土等铝硅酸盐矿物, 由风或河流从陆地搬运到大洋, 经机械沉积作用沉积在富钴结壳中. Si 元素有部分与 Al 元素一样来自黏土等陆源碎屑物质, 还有部分来自海洋里硅质生物碎屑. Mn 和 Fe 元素主要来自大洋水体, 由海洋生物死亡后溶解释放, 并在结壳中富集, 但也有部分可能来自海底火山和海底热液活动及陆源碎屑物质和颗粒物. 由于海洋中陆源物质的供应多寡与全球气候和环境变化有关, 本文选择 Al 元素的含量变化作

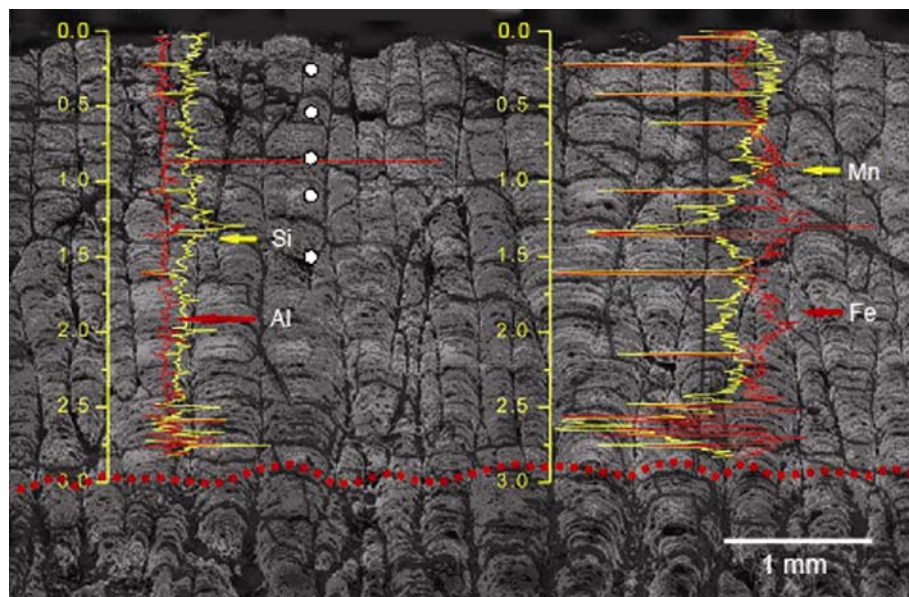


图 2 CB14 样品表层的内部显微结构和主要元素 Mn, Fe, Al, Si 的含量变化曲线及放射性测年层位. 曲线的纵坐标为深度, 单位: mm, 横坐标为 X 射线强度计数(已隐去). 图中白色实心圆点为 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 放射性测年的层位, 每层厚度为 0.1 mm. 虚线位置代表结壳第一亚层的底界

为气候与环境的替代指标, 对其进行功率谱分析以识别结壳的生长所记录的气候与环境变化的周期信息. 通过功率谱分析, 能够以谱峰的形式, 将序列中的一些隐含振动周期成分揭示出来. 如果谱图上出现了代表周期的谱峰, 并且这些谱峰通过了显著性检验, 则可认为序列中含有显著周期.

对 Al 元素变化序列进行功率谱分析, 由表 1 和图 3 可见, Al 元素含量变化序列中依次存在 256.4, 170.6, 113.9, 87.8, 51.5, 42.2 和 25.8 μm 等主要谱峰. 其中, 113.9, 87.8, 51.5, 42.2 和 25.8 μm 的谱峰通过了显著性检验, 为显著周期, 最显著的周期为 87.8 μm . 除了这 5 个显著周期外, 还出现 256.4, 170.6 μm 的长周期(图 3).

表 1 CB14 样品 Al 序列的主要周期及其对应的谱峰强度和显著性检验结果

主要周期/ μm	功率	显著性检验 ^{a)}
256.4	0.0358	-
170.6	0.0373	-
113.9	0.0724	+
87.8	0.1002	+
51.5	0.037	+
42.2	0.0736	+
25.8	0.0517	+

a) “+”表示通过显著性检验,“-”表示未通过显著性检验

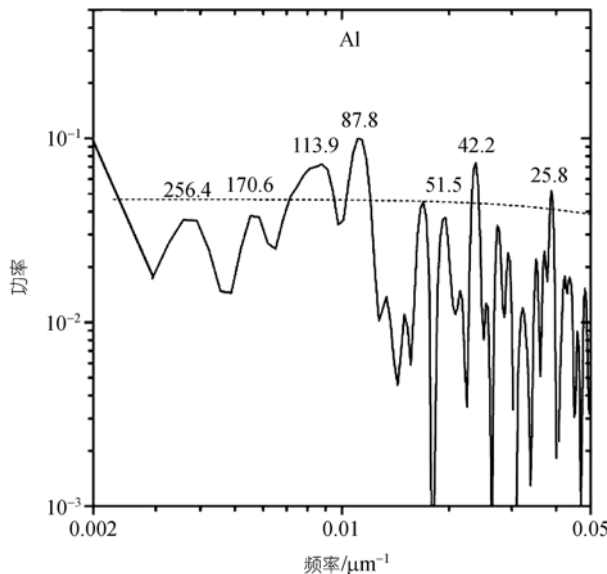


图 3 CB14 结壳第一亚层 Al 元素含量空间变化序列的功率谱分析图谱
虚线为 90%显著性水平

2.3 Al 元素含量变化序列中米兰柯维奇周期的识别及生长速率的计算

利用功率谱分析揭示出 Al 元素含量变化存在多个周期, 其中 113.9, 87.8, 51.5, 42.2 和 25.8 μm 是显著周期. 这些显著周期中数 87.8 μm 的谱峰最强, 为最显著周期. 如果该谱峰对应黄赤交角周期(41 ka), 即结壳的生长速率为 2.14 $\text{mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$, 那么空间域上的各显著周期(113.9, 87.8, 51.5, 42.2 和 25.8 μm)分别对应 53.2, 41.0, 24.0, 19.7 和 12 ka. 这些周期分别与地球轨道周期的黄赤交角周期(54 和 41 ka)、岁差周期(23 和 19 ka)和半岁差周期吻合, 相对误差为-1.6%~3.9%. 除了上述 5 个显著周期外, 还存在 256.4 和 170.6 μm 两个非显著的长周期(图 3), 它们在时间域上则分别对应 119.7 和 79.7 ka, 可能均与地球的偏心率周期(100 ka)有关. 这两个周期不够显著的原因, 可能是由于所分析的序列长度有限的缘故. 值得指出的是轨道周期是统计意义上的准周期, 据 Berger^[2], 在天文波段里, 谱峰(103±24), (42±8)和(23±4) ka 是显著存在的, 谱峰约 54 ka 在地质记录里亦很常见. 因此可以认为 Al 元素序列的谱系结构与天文资料的谱系结构能很好吻合.

根据所获得的结壳的生长速率(2.14 $\text{mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$), 把 Al 元素在空间域上的变化序列转换成时间序列后再作谱分析, 可以清楚地看出谱图上存在 53.1, 41, 24, 19.7 和 12 ka 的谱峰, 分别对应地球轨道的黄赤交角周期(54 和 41 ka)、岁差周期(23 和 19 ka)和半岁差周期(11~12 ka), 其中 41 ka 的谱峰最显著(图 4). 上述表明, 该富钴结壳表层的生长是以地球黄赤交角周期作为主要节拍器以 2.14 $\text{mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$ 的速率生长. 由于结壳的表面年龄可以视为 0, 根据所获得的结壳生长速率(2.14 $\text{mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$), 可以得到 CB14 第一亚层(0~3 mm)底部的年龄为 1.40 Ma.

值得指出的是, 本文仅展示了结壳中 Al 元素的记录与地球轨道周期之间的关系, 其他元素如 Si, Fe 和 Mn 含量的波动也一定程度上反映了气候与环境的变化^[6], 对其进行谱分析也能够得到类似结果.

2.4 ²³⁰Th_{ex}/²³²Th 高分辨率测年

²³⁰Th_{ex}/²³²Th 法常用用来对结壳进行定年. 其原理是: 溶解在海水中的 ²³⁸U 衰变生成 ²³⁰Th, 由于 ²³⁸U

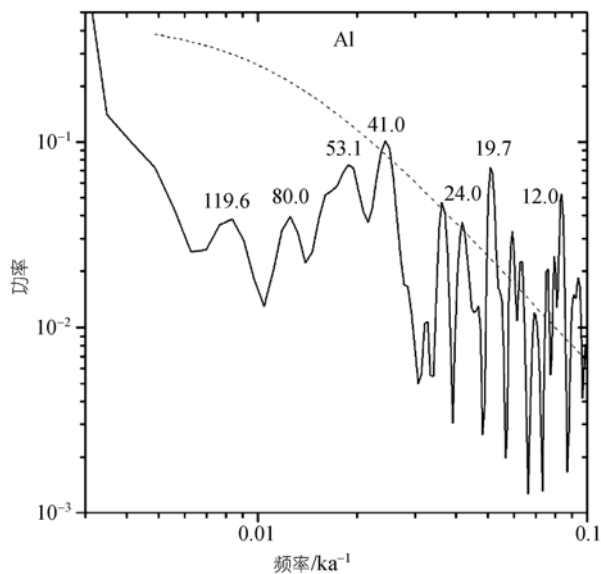


图 4 CB14 结壳第一亚层 Al 元素含量时间变化序列的功率谱分析图谱
虚线为 90% 显著性水平

在氧化性水体中以铀酰离子稳定存在, 不易被吸附沉淀, 而 ^{230}Th 极易被 Fe-Mn 氧化物吸附(主要通过离子交换吸附形式定向地向结壳中迁移), 因此由于 ^{230}Th 迁移能力大于 ^{238}U , 造成结壳中占绝对主导的 ^{230}Th 不是结壳中的 ^{238}U 原位衰变形成的, 即过剩 ^{230}Th , 这些过剩的 ^{230}Th 随时间衰变而减少, 因此可以用来测定结壳的年代. 其计年公式为 $\text{Ln}^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}(h) = -\lambda h/v + \text{Ln}^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}(0)$, 其中 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}(h)$ 与 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}(0)$ 分别表示深度为 h 处与表层处 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 的放射性强度比值, λ 为衰变常数, v 为生长速率 [9].

为了验证结壳中米兰柯维奇周期存在的真实性及根据米兰柯维奇周期计算结壳生长速率的可靠性, 对 CB14 样品从表及里按 0.1 mm 的间隔用数控微钻进行了高分辨率精细取样, 并用 MC-ICP-MS 进行高精度 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年. 由于显微镜下观察发现该样品从表层到 3 mm 深度具有连续稳定的生长结构(图 2), 表明该亚层具有较稳定的生长速率, 因此, 仅在表层选择性地挑选了 5 层进行 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年, 分析结果见表 2.

由表 2 可见, 除了最后一层外, ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{230}Th 的含量随深度的增加而降低. 深度 1.5~1.6 mm 看来

已经到了 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法的测年下限, 误差值明显变大而数据不可用, 其余各层的分析精度均优于 $\pm 0.54\%$. 图 5 为 $\text{Ln}^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}_A$ 深度变化关系图, 对数据进行拟合后计算得到 CB14 表层(0~1.3 mm)的平均生长速率约为 $2.15 \text{ mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$. 根据该生长速率, 得到 CB14 结壳第一亚层(0~3 mm)底部的年龄约为 1.40 Ma.

表 2 CB14 表层 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年分析结果

深度 /mm	^{238}U /ppm	^{232}Th /ppm	^{230}Th /ppb	$(^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th})_A$ dpm/dpm
0.3~0.4	14.99±0.03	93.08±0.21	24.76±0.06	49.49±0.17
0.5~0.6	12.36±0.02	74.14±0.22	11.48±0.03	27.80±0.11
0.8~0.9	14.45±0.03	68.01±0.14	3.25±0.01	7.52±0.03
1.2~1.3	13.78±0.02	48.88±0.11	0.56±0.002	1.30±0.007
1.5~1.6	13.95±0.68	51.63±0.29	0.24±0.289	0.051±0.058

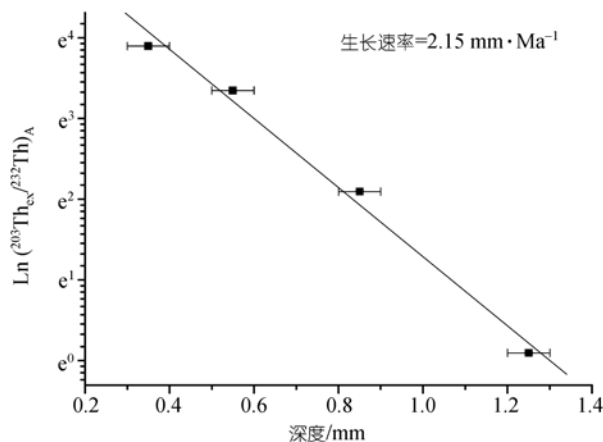


图 5 CB14 结壳的 $(^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th})_A$ 深度剖面

各点拟合直线的斜率表明结壳的生长速率为 $2.15 \text{ mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$, 图中的误差标注为取样深度系统误差, 而分析误差因非常小, 隐藏在正方形标注下不可见

上述表明对 CB14 表层利用高分辨率 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 法测年与利用地球轨道周期印记法定年获得了基本相同的生长速率和年代, 说明地球轨道周期性变化所驱动的气候与环境变化的确在富钴结壳的生长过程中打下了烙印, 利用地球轨道周期印记法确定结壳的生长速率和年龄是值得信赖的. 作为比较, 程振波等 [10] 对中太平洋 Allison 海山 ($178^{\circ}26'57''\text{W}$, $18^{\circ}00'31''\text{N}$, 水深 2600 m) 采集的一个结壳样品进行了 ^{10}Be 法测年, 得出了 1.05 Ma 以来结壳生长速率为 $2.85 \text{ mm} \cdot \text{Ma}^{-1}$ 的结论. Ling [11] 和 McMurry [12] 也对中太平洋的富钴结壳进行研究, 得到的生长速率在

1.08~2.7 mm/Ma之间变化, 表明本研究得到CB14 结壳的生长速率是个合理的数值.

2.5 讨论

海山富钴结壳可以视作高度浓缩型的沉积地层, 它把上千万年的古海洋记录浓缩在数厘米厚的生长纹层中. 在传统的结壳定年方法中, ^{10}Be 法和 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 法最为可靠, 但两者均受时限的制约, 前者只能测定年轻于 10~15 Ma的结壳层位, 后者最多只能测定 450 ka^[1]. 由于海山结壳的生长速率一般为百万年毫米级, 因此测年方法的选择、取样技术和测年技术对测年精度至关重要. 若要获得高分辨率和高精度的年龄数据, 必须进行高分辨率取样和高精度测年. 常规的无辅助取样法的取样分辨率为毫米级, 由取样带来的误差就可高达数十万年甚至上百万年, 这严重影响了结壳在古海洋学研究上的应用价值. 徐兆凯等^[13]尝试用游标卡尺辅助测深, 达到 0.2~0.3 mm的取样间隔, 较有效地降低了由取样带来的定年误差. 本研究利用数控微钻连续精确取样, 取样分辨率高达 0.1 mm, 取样过程中可能存在的系统误差为 ± 0.05 mm, 约相当于 ± 23.5 ka; 利用MC-ICP-MS进行 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年的分析误差优于 $\pm 5.4\%$, 测年分辨率和精度得到了很大提高. 同时, 结合富钴结壳显微生长结构的观察和分析, 由 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年给出的结壳的生长速率是可信的. 就地球轨道周期而论, 电子探针线扫描的采样间隔仅为 3 μm (约对应 1.4 ka), 利用电子探针原位分析获取元素含量变化曲线, 通过谱分析后与米兰柯维奇周期进行匹配, 所能识别的最小显著周期为半岁差周期 12 ka, 相对误差为 -1.6% ~ 3.9% . 因此, 本研究较常规方法在定

年精度和分辨率方面均要高出数倍甚至 2 个数量级.

通过对富钴结壳生长剖面米兰柯维奇周期的识别, 可以为连续生长的结壳建立高分辨率长序列的年代框架. 如果结壳生长过程中存在一个或多个生长间断, 则可以确定结壳各生长阶段所延续的时间及其生长速率, 并能获得结壳末次生长间断的年龄, 这时若能够得到其他直接或间接方法的辅助获得结壳生长间断延续的时间, 那么利用该方法可以帮助为结壳建立起完整的高分辨率长序列年代框架.

3 结论

本文尝试利用地球轨道周期印记法测定中太平洋海山富钴结壳表层的高分辨率年代和生长速率, 并利用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 放射性测年法进行验证. 结果表明, 结壳生长剖面上的Al元素含量序列存在 113.9, 87.8, 51.5, 42.2 和 25.8 μm 的显著周期, 经过匹配发现它们分别对应地球轨道的黄赤交角周期(54 和 41 ka)、岁差周期(23 和 19 ka)和半岁差周期(11~12 ka), 相对误差为 -1.6% ~ 3.9% . 根据匹配结果得到结壳第一亚层(0~3 mm)的生长速率约为 2.14 mm/Ma, 底界年龄约为 1.40 Ma. 利用数控微钻对同一样品的表层以 0.1 mm的间隔进行高分辨率连续取样, 利用MC-ICP-MS对样品进行高精度的 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年, 获得的生长速率和年龄数据与地球轨道周期印记法获得的结果完美吻合. 认为地球轨道的周期性变化所引起的气候与环境效应在结壳的生长剖面上打下了烙印, 利用地球轨道周期印记确定富钴结壳的生长速率和年龄是一个有效而且可靠的新方法, 可应用于世界海域富钴结壳高分辨率长序列年代框架的建立.

致谢 本文所研究的样品来自 DY95-8 航次, 感谢参加航次调查的全体科学家和船员. 德国 Leibniz Institute of Marine Sciences(IFM-GEOMAR)的 Jan Fietzke 博士和 Anton Eisenhauer 教授帮助完成结壳的放射性测年, 两位评阅人提出了有益的修改建议, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 Eisenhauer A, Goegen K, Pernicka E, et al. Climatic influences on the growth rates of Mn crusts during the Late Quaternary. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 109: 25—36 [\[DOI\]](#)
- 2 Berger A L. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies. *Nature*, 1989, 342(9): 133 [\[DOI\]](#)

- 3 Gong Y M, Li B H. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeocol*, 2001, 168: 237—248[DOI]
- 4 吴兴宁, 赵宗举. 塔中地区奥陶系米级旋回层序分析. *沉积学报*, 2005, 23(2): 310—315
- 5 韩喜球, 王惠群, 方银霞, 等. 太平洋锰结核中叠层石纹层的谱分析及其意义. *地质学报*, 2001, 75(4): 548—553
- 6 Han X Q, Jin X L, Yang S F, et al. Rhythmic growth of Pacific ferromanganese nodules and their Milankovitch climatic origin. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 211: 143—157[DOI]
- 7 边立曾, 张富生, 林承毅, 等. 深海锰结核的描述方法及术语. *南京大学学报(自然科学版)*, 1996, 32(2): 287—294
- 8 韩喜球, 方银霞, 金翔龙, 等. 东太平洋多金属结核的叠层石包壳及其沉积环境意义. *海洋学报*, 2000, 22(5): 73—81
- 9 Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G J. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500000 years. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 81: 175—192
- 10 程振波, 石学法, 苏新, 等. 西、中太平洋铁锰结核壳生长年龄: 超微化石与 ^{10}Be 测年的对比. *科学通报*, 2006, 51(22): 2685—2689
- 11 Ling H F. Evolution of Nd and Pb isotopes in Central Pacific seawater from ferromanganese crusts. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146: 1—12[DOI]
- 12 McMurtry G M. Cenozoic accumulation history of a Pacific ferromanganese crust. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 125: 105—118[DOI]
- 13 徐兆凯, 李安春, 蒋富清, 等. 东菲律宾海晚中新世末期以来古海洋环境演化的新型铁锰结核壳记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(4): 512—520