

文章编号: 1000-0550(2010) 05-1006-06

中太平洋铁锰结壳灰度序列中米兰柯维奇周期的识别及结壳生长速率的演化^①

韩喜球¹ 邱中炎^{1,2}

(1 国家海洋局第二海洋研究所 & 国家海洋局海底科学重点实验室 杭州 310012; 2 浙江大学地球科学系 杭州 310027)

摘要 利用数字图像处理提取中太平洋海山铁锰结壳 (CB14) 生长剖面的灰度序列, 运用功率谱分析方法揭示出结壳由表及里 5 个亚层中分别存在多级序的显著周期, 它们均能够分别与地球轨道周期 (偏心率周期、黄赤交角周期和岁差周期) 的级序很好匹配, 根据匹配结果获得 CB14 第 1 至第 5 亚层的生长速率分别为 2.15、2.70、2.43、2.75、2.67 mm/Ma, 各亚层的界面年龄分别为 1.3、2.5、5.9、6.7、7.5 Ma。表明晚中新世以来, 结壳的生长速率呈现波动变化, 最近 1.3 Ma 以来, 结壳的生长速率明显减慢。认为通过识别结壳灰度序列中存在的米兰柯维奇周期可以有效获得结壳各生长阶段的高分辨率生长速率, 可以为研究中新世以来古海洋环境的演化提供重要信息。

关键词 铁锰结壳 灰度序列 谱分析 米兰柯维奇周期 生长速率 中太平洋

第一作者简介 韩喜球 女 1969 年出生 博士 研究员 海底资源与海洋环境记录研究 E-mail: xqhan@sin.org.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

大洋铁锰结壳主要分布在全球海洋 400~4 000 m 水深范围内的海山、海脊和海台上, 其中在 800~2 500 m 水深范围最为丰富。由于结壳的生长速率非常慢, 一般为每百万年数毫米^[1~4], 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, 目前各种常规的定年方法都难以使它的年代分辨率达到 0.1~1 Ma 而且对于老于 10~15 Ma 的部分无法给出准确的年龄^[5]。因此, 长期以来, 结壳高分辨率长序列年代框架的建立一直是难题。米兰柯维奇旋回是一种全球范围的高频变化力, 它在地层记录中的烙印主要通过气候变化实现。近年来研究表明, 大洋多金属结核的生长纹层中包含了米兰科维奇周期, 并提出可以利用地球轨道周期法确定大洋多金属结核的生长速率和年龄^[6~9]。生长在海山上的铁锰结壳具有与多金属结核完全类似的生长结构, 它的生长记录同样也烙上了地球轨道周期的印记, 已研究发现铁锰结壳中的 Al 元素序列呈现清晰的米兰科维奇周期, 并利用高分辨率²³⁰Th/²³²Th 测年进行了验证^[8]。

自 Gascoyne^[10] 和 White^[11] 对石笋微层灰度开展工作以来, 微层的灰度研究在全球变化研究中已逐渐得到重视。如李彬等^[12] 通过扫描石笋光面的反射光

强度研究桂林地区的古环境变化。秦小光等^[13] 通过对北京石花洞石笋薄片样品微层灰度特征的研究, 发现石笋薄片在透光条件下测得的灰度主要受地表气温 (尤其是夏季气温) 的影响, 可以作为气温的替代性指标。本文尝试通过提取铁锰结壳生长剖面的灰度变化序列, 进行功率谱分析, 识别隐含在结壳明暗变化的生长纹层中的米兰柯维奇周期, 以期获得结壳的高分辨率生长速率, 并进一步确定结壳的年龄, 以了解结壳各生长阶段在生长速率上的变化, 为古海洋环境变化研究提供信息。

1 样品

所研究的铁锰结壳样品采自中太平洋一海山, 取样水深 3 018 m, 由中国大洋协会组织的 DY95-8 航次拖网所得。样品为砾状结壳, 呈圆饼状, 表面光滑, 局部有瘤状突起。该结壳样品具两层结构, 外层厚约 1.9 cm, 内层厚约 3 cm, 内外层之间呈角度不整合接触 (图 1)。本文重点对该样品的外层进行研究。

在显微镜下观察, 结壳的生长纹层明暗相间, 具有典型的似叠层石结构, 柱体形态规则。其纹层在纵向上明暗相间, 在横向上稳定, 可追索 (图 2)。由于

①国际海底区域研究开发课题 (编号: DY105-01-01-08); 国家自然科学基金项目 (批准号: 40106005, 40476050); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资金项目 (编号: JT0801) 资助。

收稿日期: 2010-05-20 收修修改稿日期: 2010-06-05

生长环境的变化, 叠层石柱体的形态大小和纹层的明暗程度在剖面上具有分带性。根据分带现象, CB14 样品的外层可分为 5 个亚层, 各亚层之间未见生长间断现象。

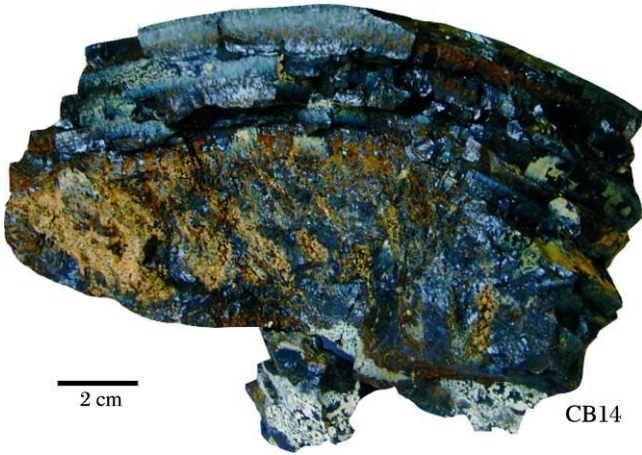


图 1 CB14 铁锰结壳样品纵向断面

Fig 1 The vertical section of Fe-Mn crust CB14



图 2 铁锰结壳样品 CB14 外层显微结构照片 (局部), 具典型的似叠层石结构。照片宽度 4 mm

Fig 2 The micro-texture of the outer layer of CB14 (part), containing typical stromatolite-like texture. The width of picture is 4 mm.

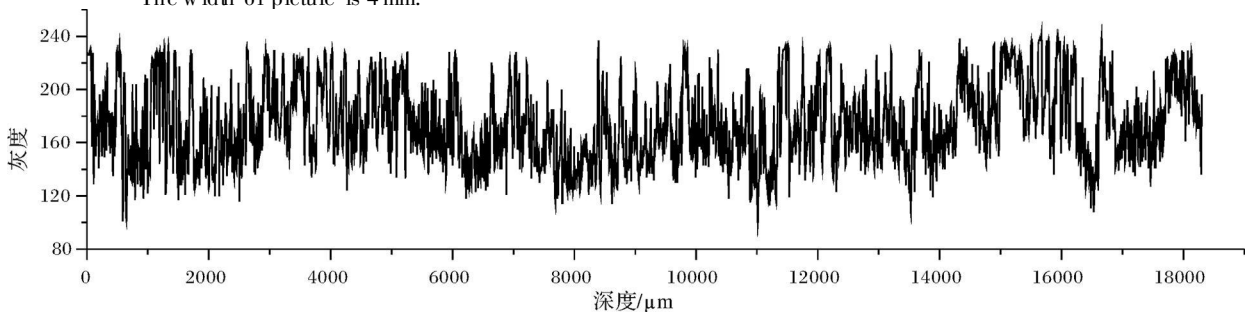


图 3 CB14 样品外层 (0~18.6 mm) 生长剖面的灰度变化曲线

Fig 3 The gray-level series of the growth profile of the outer layer (0~18.6 mm) of CB14

2 灰度序列的获取

将样品沿中轴切开, 磨平, 抛光制成光片, 利用反光显微镜拍摄显微照片, 所用的显微镜型号为 Nikon Eclipse E 600 Pol 配有数码摄像系统 (Digital sight DS-U1)。经过无缝拼接后, 提取结壳生长剖面反射率的灰度序列。具体方法步骤如下:

1) 把结壳光片放在反光显微镜下观察并连续照相, 为了便于对显微照片进行无缝拼接, 相邻照片要有一定的重叠部分。

2) 拼接照片时, 首先利用 Photoshop 软件微调照片的亮度和对比度, 使两相邻照片的重叠部分具有完全一致的色调, 然后拼合照片。

3) 所有照片拼接完成后, 利用 Photoshop 软件调整图像方向并进行裁切, 使图像的水平方向平行于微层, 纵轴为铁锰结壳中叠层石柱体的生长方向。

4) 选择完整的叠层石柱体的生长剖面, 利用数字图像处理技术把图像的灰度数字化, 即得铁锰结壳生长纹层的灰度在空间域上的变化序列。序列的步长为每个像元的长度, 本文处理时取每个像元的大小为 $1.19 \mu\text{m} \times 1.19 \mu\text{m}$ 。

在反射光下测得的结壳纹层的灰度综合体现了结壳中矿物成分含量的变化。灰级越高, 图像越亮, 锰矿物含量越高, 铁质矿物及粘土等杂质含量越少; 反之, 灰级越低, 图像越暗, 铁质矿物及粘土等杂质含量越多。图 3 为 CB14 结壳外层由表及里生长剖面的灰度变化曲线。

3 灰度序列的功率谱分析

铁锰结壳生长纹层的灰度可以看作是气候与环境的替代指标。灰度的空间序列是时间序列的随机函数。为了识别结壳生长剖面上灰度变化所记录的气候与环境变化的周期信息, 本文把所提取的灰度空间序列资料进行功率谱分析。通过功率谱分析, 能够

以谱峰的形式, 将序列中的一些隐含的显著周期揭示出来。

功率谱分析的方法和原理详见文献 [14]。使用 Origin7. 0 数据处理分析软件, 在分析前, 首先对原始数据进行每 5 点平滑处理, 以减小噪声影响。在进行快速傅立叶变换 (FFT) 时, 取自由度为 1, 置信度为 90%, 并选用 Blackman 延时窗对样品粗谱进行平滑处理。采样间隔即序列的步长为 1. 19 μm 。

各亚层的功率谱分析结果见图 4 和表 1。由图 4 和表 1 可以看出, CB14 号样品各亚层灰度序列的主要周期集中在 212. 8~ 277. 8, 126. 6~ 153. 8, 80. 0~ 112. 4, 52. 1~ 75. 2, 38. 2~ 48. 3 μm 。其中, 层 I -2 和 I -4 的主要周期比较接近, 它们具有 153. 8~ 151. 5, 90. 9~ 87. 0, 59. 5~ 56. 8, 38. 2, 31. 7~ 28. 4 μm 等周期, 由于层 I -4 的序列长度较短, 未能出现一级长周期。

4 灰度序列中米兰柯维奇周期的识别

我们尝试把 CB14 灰度序列中识别出来的主要周期与米兰科维奇周期进行匹配, 并计算其相对误差。表 2 列出了最佳匹配结果, 相对误差均控制在 $\pm 10\%$ 以内。由于利用谱分析得到的显著周期是所分析序列存在的平均循环周期, 为统计意义上的准周期。轨道周期也是准周期, 据 Berger 和 Pestiaux^[15], 在天文波段里, 谱峰 $103 \pm 24 \text{ ka}$, $42 \pm 8 \text{ ka}$, $23 \pm 4 \text{ ka}$ 显著存在, 谱峰约 54 ka 在地质记录里亦很常见。因此, 可以认为铁锰结壳中灰度序列中的主要显著周期是地球轨道周期打下的烙印。由于 Fe-Mn 结壳的生长结构的变化是全球气候和环境及区域海洋要素变化的综合体现, 反射率的灰度变化序列中还出现一些其它非显著谱峰, 这些周期可能代表了铁锰结壳的生长对气候系统或轨道周期变化非线性响应的结果。

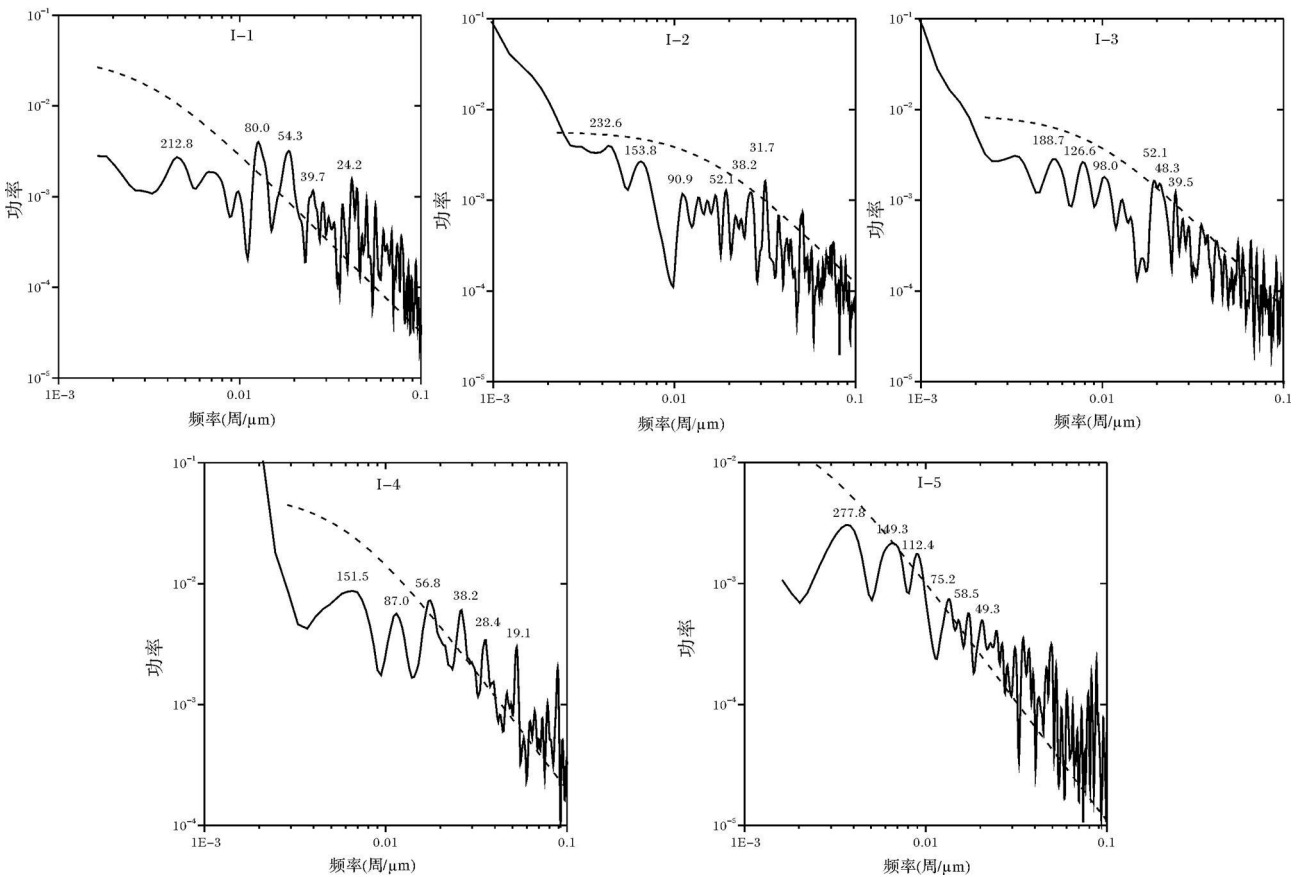


图 4 CB14 号样品外层各亚层灰度空间序列的功率谱分析图谱。

图中 I -1, I -2, I -3, I -4, I -5 分别代表结壳外层由表及里的 5 个亚层。虚线为置信度曲线, 置信度为 90%

Fig 4 The power spectra patterns of gray-level series I -1, I -2, I -3, I -4 and I -5 represents each sub-layer respectively. The dash line represents 90% confidence level

表 1 CB14 结壳外层各亚层灰度序列的主要周期

Table 1 Main cyclicities of the gray-level series presents in the each sub-layer of crust CB14

谱峰 / μm				
I -1	I -2	I -3	I -4	I -5
212.8		188.7		277.8
	153.8	126.6	151.5	149.3
80	90.9	98	87	112.4
54.3	59.5	52.1	56.8	75.2
39.7	52.1	48.3	38.2	58.5
24.2	38.2	39.5	28.4	49.3
	31.7		19.1	

表 2 CB14 结壳外层各亚层灰度序列的显著空间周期及其与米兰柯维奇周期匹配后对应的时间周期与相对误差

Table 2 The prominent periodicities of gray-level series from the sub-layers of crust CB14 compared with present Milankovitch orbital periods and their relative errors

现今地球轨道周期 /ka	偏心率	黄赤交角		岁差	
		100	54	41	23
显著空间周期 / μm	212.8		80.0	54.3	39.7
I -1 层 所推断的时间周期 /ka	99.0		37.2	25.1	18.3
相对误差 /%	1.0		-9.2	9.2	-3.7
显著空间周期 / μm	153.8		59.5	52.1	
I -2 层 所推断的时间周期 /ka	56.9		22.0	19.3	
相对误差 /%	5.5		-4.2	-1.6	
显著空间周期 / μm	126.6	98.0	52.1	48.3	
I -3 层 所推断的时间周期 /ka	52.1	40.3	21.4	19.9	
相对误差 /%	-3.5	-1.6	1.9	4.6	
显著空间周期 / μm	151.5		56.8		
I -4 层 所推断的时间周期 /ka	54.9		20.6		
相对误差 /%	1.7		-2.0		
显著空间周期 / μm	277.8	149.3	112.4	58.5	49.3
I -5 层 所推断的时间周期 /ka	104.4	56.1	42.3	22.0	18.5
相对误差 /%	4.4	3.9	3.1	-4.4	-2.5

5 铁锰结壳的生长速率及其演化

利用功率谱分析所获得的结壳的主要空间周期与地球轨道周期得到了很好的匹配, 根据结壳空间周期与地球轨道周期这一对应关系, 可以计算出结壳各亚层的平均生长速率(表 3)。显微镜下观察表明, CB14 样品各亚层的生长纹层是连续且匀称的, 未见生长间断, 因此可以认为各亚层内部的生长速率是稳定的。由于结壳在现代海洋环境中仍在生长, 可以认为其表面年龄为 0, 那么根据各亚层的生长速率, 可以计算得到结壳连续生长层任意位置的累积年龄(表 3)。

由表 3 可见, 结壳 CB14 外层各亚层的生长速率在 2.15~2.70 mm/Ma 之间变化, 其外壳层底部的年

龄约为 7.5 Ma, 整个外壳层的平均生长速率为 2.54 mm/Ma。不同生长阶段结壳的生长速率不一, 在距今约 1.3~2.5 Ma 和距今约 5.9~6.7 Ma 期间, 结壳的生长速率较快, 距今 1.3 Ma 以来, 结壳的生长速率明显降低。

表 3 铁锰结壳 CB14 各亚层的生长速率和年龄

Table 3 The growth rate and age of each sub-layer of crust CB14

	I -1 层	I -2 层	I -3 层	I -4 层	I -5 层
厚度 /mm	2.83	3.05	8.48	2.18	2.09
平均生长速率 / (mm/Ma)	2.15	2.70	2.43	2.75	2.67
底界年龄 / (Ma)	1.3	2.5	5.9	6.7	7.5

我们曾对该结壳的第一亚层进行了高分辨率²³⁰Th/²³²Th 测年, 获得生长速率为 2.13 mm/Ma^[8], 利用地球轨道周期法获得的第一亚层 2.15 mm/Ma 的生长速率与高分辨率放射性测年得到的生长速率完美吻合, 说明本研究的可靠性, 同时也说明结壳的灰度可以作为有效的环境变化指标。Chen 等^[4]利用¹⁰B 测年法研究了中太平洋一海山铁锰结壳的年龄, 得到结壳表层 0~3 mm 的平均生长速率为 2.85 mm/Ma, 6~10 mm 的平均生长速率为 4.6 mm/Ma, 较本研究得到的生长速率高, 但同样存在表层生长速率较次表层的生长速率低的现象。

原位提取铁锰结壳的反射率灰度, 利用地球轨道周期作为标尺对结壳进行定年, 能有效避免取样环节所引入的误差。不足之处在于谱分析获得的周期是准周期, 在与米兰科维奇周期进行匹配的时候同样也存在误差。因此, 我们强调不能单一地利用地球轨道周期法定年, 需要借助放射性测年等手段在其可测范围内对轨道周期法的定年结果进行校验, 将使研究结果更加可靠。

6 结论

利用数字图像处理技术提取了中太平洋海山铁锰结壳样品显微生长剖面反射率的灰度变化序列, 利用地球轨道周期法研究结壳的生长速率及其演化, 得到如下主要结论:

(1) CB14 结壳样品外层包含 5 个亚层, 通过功率谱分析, 发现各亚层的灰度变化包含了米兰柯维奇周期信号。

(2) 根据功率谱所揭示出的显著空间周期与地球轨道周期的对应关系, 计算出了 CB14 结壳外层各

亚层的生长速率分别为 2.15、2.70、2.43、2.75、2.67 mm/Ma。各亚层的界面年龄分别约为 1.3、2.5、5.9、6.7 和 7.5 Ma。结壳的生长一直处于波动状态,最近 1.3 Ma 以来结壳的生长速率较前期明显减慢。

(3) 利用地球轨道周期法并结合放射性定年等手段的交叉验证是确定结壳生长速率和年龄的有效方法,可以为研究中新世以来古海洋环境演化提供重要信息。

参考文献 (References)

- Segal M, Mangini A, Banani G, *et al*. ^{10}Be dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean paleocirculation [J]. *Nature*, 1984, 309: 540-543
- Puteanus D, Halbach P. Correlation of Co concentration and growth rate—A method for age determination of ferromanganese crusts [J]. *Chemical Geology*, 1988, 69: 73-85
- Ingram B L. Age determinations and growth rates of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 1709-1721
- Cheng Z, Shi X, Wu Y, *et al*. Growth ages of ferromanganese crusts from the western and central Pacific: Comparison between nanofossil analysis and ^{10}Be dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (24): 3035-3040
- Eisenhauer A. Climate influence on the growth of Mn crust during the late Quaternary [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109: 25-36
- 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 [J]. *地质学报*, 2001, 75 (4): 548-553 [Han Xiqiu, Wang Huiqun, Fang Yinxia, *et al*. The spectral analyses of rhythmic laminae of stromatolite in manganese nodules from Pacific Ocean and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75 (4): 548-553]
- Han X, Jin X, Yang S, *et al*. Rhythmic growth of Pacific ferromanganese nodules and their Milankovitch climatic origin [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2003, 211: 143-157
- 韩喜球, 邱中炎, 马维林, 等. 铁锰结壳的高分辨率年代和生长速率: 地球轨道周期印记法与放射性测年法的对比研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2009, 39 (4): 497-503 [Han Xiqiu, Qiu Zhongyan, Ma Weilin, *et al*. High resolution dating of Co-rich crusts: a comparative study using the methods of orbital pacing and $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ dating [J]. *Science in China Series D*, 2009, 52 (3): 484-488]
- 韩喜球. 大洋多金属结核的生长韵律与全球变化 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 107 [Han Xiqiu. *The Rhythmic Growth of Pelagic Polymetallic Nodules and Global Climate Changes* [M]. Beijing: Geological Press, 2009: 107]
- Gascoyne M. Trace elements in calcite: The only cause of speleothem color? [J]. *National Speleological Society Bulletin*, 1978, 40: 98
- White W B. Reflectance spectra and color in speleothems [J]. *National Speleological Society Bulletin*, 1981, 43: 20-26
- 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林盘龙洞石笋发光性特征及其古环境记录的初步研究 [J]. *地球学报*, 1997, 18 (4): 400-406 [Li Bin, Yuan Daoxian, Lin Yushi, *et al*. Luminescence and paleoenvironmental record in a stalagmite in Panlong Cave, Guilin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18 (4): 400-406]
- 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义——II. 灰度的年际变化 [J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30 (3): 239-248 [Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng, Tan Ming, *et al*. Characteristics of annual lamina gray level variations in a stalagmite from Shihua Cave in Beijing and its climatic significance (II) [J]. *Science in China Series D*, 2000, 43 (5): 521-533]
- 陈上及, 马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 481-579 [Chen Shangji, Ma Jierui. *The Analysis Methods of Marine Data Processing and Their Applications* [M]. Beijing: Ocean Press, 1991: 481-579]
- Berger A, Pestiaux P. Astronomical frequencies in paleoclimatic data [M] // Ye Duzheng, Fu Congbin, Chao Jiping, *et al* editors. *The Climate of China and Global Climate*. New York: China Ocean Press, Springer-Verlag, 1987: 106-114

The Identification of Milankovitch Cycles in the Gray-Level Series of Fe-Mn Crust from the Central Pacific Ocean and Its Growth Rate Evolution

HAN Xiqiu¹ QIU Zhong-yan^{1, 2}

(1. Second Institute of Oceanography & Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012)

2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract A Fe-Mn crust sample (CB14) from a seamount in the central Pacific Ocean was studied in detail. According to the micro-texture of the growth profile of the crust, its outer layer (18.7 mm in thickness) can be divided into 5 sub-layers, no hiatus observed between the adjacent sub-layers. Using the technique of digital image process-

ing the gray-level variation series of the reflectivity of the growth pattern were obtained. The power spectral analysis revealed that most of the prominent cycles identified from gray-level series are corresponding to Milankovitch cycles (eccentricity, obliquity and precession). Through matching and tuning to the Milankovitch cycles, we obtained that the growth rates of sub-layer 1 through sub-layer 5 are 2.15, 2.70, 2.43, 2.75 and 2.67 mm/Ma, respectively. Their corresponding ages are 1.3, 2.5, 5.9, 6.7 and 7.5 Ma, respectively. Our results show that since late Miocene, the growth rates of Fe-Mn crust changed alternatively, since recent 1.3 Ma, the growth rate of the Fe-Mn crust slowed down significantly. It is considered that the gray-level series of the growth profile of Fe-Mn crusts can be used as a paleo-environmental indicator, and the application of orbital pacing method on gray-level series is an effective approach to determine the high resolution growth rates of Fe-Mn crust and hence provide important information on paleo-environmental change.

Key words Fe-Mn crust; gray level series; Milankovitch cycles; growth rate; central Pacific Ocean