



安徽巢湖早三叠世印度期旋回地层研究

郭 刚^① 童金南^{①*} 张世红^② 张 杰^① 白凌燕^②

(^① 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074; ^② 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 安徽巢湖平顶山西剖面印度期地层由一系列多级泥岩/灰岩岩性旋回组成. 以野外剖面岩性变化观察为基础, 辅以岩石磁化率的功率谱分析和小波分析方法, 识别出与米兰柯维奇天文周期对应的短偏心率 and 岁差旋回, 但倾角周期在本区表现不明显. 在印度期地层中共识别出 12 个短偏心率周期, 56 个岁差周期. 据此旋回分析, 推算出印度期地质时限约为 1.1 Ma, 对应的地层平均沉积速率(成岩压实后)约为 3.7 cm/ka. 沉积速率曲线表明当时的沉积环境较为稳定. 如果将二叠系-三叠系界线年龄值确定为 252.6 Ma, 可推算出印度阶-奥伦尼克阶界线的年龄值为 251.5 Ma.

关键词 下三叠统印度阶 磁化率 旋回地层 功率谱分析 小波分析 安徽巢湖

安徽巢湖平顶山西剖面(31.6°N, 117.8°E)作为印度阶-奥伦尼克阶界线的全球层型侯选剖面^[1], 近年来得到较深入研究^[2]. 在全国地层委员会(2002)所提出的“中国区域年代地层表”中, 中国的下三叠统被划分为两阶, 即殷坑阶和巢湖阶, 并与国际下三叠统两阶(印度阶和奥伦尼克阶)相对应^[3,4]. 巢湖平顶山西剖面也是殷坑阶-巢湖阶界线的层型剖面^[3~6]. 因此, 该剖面的地层序列和研究工作不仅在我国区域地层研究中举足轻重, 而且对国际三叠纪年代地层学研究和国际地质年表的完善具有非常重要作用. 特别是经历了二叠纪末重大全球变化和生物大灭绝后, 三叠纪初地球生态系陷入极度危机, 新兴生物处于复苏初期阶段^[7~12], 这一重大地质和生物突变的关键信息也记录在这一时期的地层中, 建立三叠纪初期高分辨率的地层序列至关重要.

在对巢湖地区早三叠世地层进行野外研究中发现, 该地层的岩石地表露头表现出非常好的泥岩/灰岩岩性旋回(图 1), 从宏观上看, 其具有米兰柯维奇

(Milankovitch)天文周期的特点. 为了明确判定该地层旋回性沉积的特性, 我们选择平顶山西剖面上连续的印度期地层序列, 进行了野外岩性逐层记述和统计, 并以 2 cm 间隔密度连续采集样品进行磁化率分析, 试图判定这些旋回的性质, 为该地层的进一步研究提供高分辨率背景材料.

旋回地层研究能够将地层的分辨率提高到万年级^[13]. 米兰柯维奇旋回自提出以来, 已有大量的研究及总结^[14~19]. 自 1988 年意大利国际会议上, Fischer 和 Premoli-Silva 公开提出了旋回地层(Cyclostratigraphy)的概念后, 旋回地层学迅速成长为地质学领域的又一支极具潜力的新兴分支学科^[17].

日地天文轨道周期一直以来被认为是进行旋回地层学研究的最有效方法之一, 从而成为人们热点研究的对象, 因为用这种方法取得的数字年龄值分辨率高, 相对误差小, 影响因素能较大幅度地排除, 可将地层特征、成因和年龄值的研究融为一体, 全面提高地层古生物的整体研究水平^[13], 并能建立更高

收稿日期: 2007-02-08; 接受日期: 2007-09-25

国家自然科学基金(批准号: 40325004, 40621002)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB80640)和科技部基础专项项目(批准号: 2006FY120300-11)资助

* 联系人, E-mail: Jntong@cug.edu.cn



图 1

(a) 安徽巢湖平顶山西坡剖面全景图; (b), (c) 平顶山西剖面出露的层束组岩性旋回的近照, 图中地质锤(圆圈所示部位)的长度为 34 cm. 向右方向地层由老变新

精度的“天文年代表”^[20~22].

旋回地层学的研究范围已由第四纪扩展到新生代、中生代, 古生代甚至前寒武纪^[22]. 对于中国南方三叠纪旋回地层的研究, 童金南等^[23]利用岩性数据对煤山剖面三叠系底部地层进行了旋回地层研究, 采用功率谱分析的方法识别出了米兰柯维奇旋回. Hansen 等^[24]通过对二叠系-三叠系界线地层高分辨率磁化率数据分析, 识别出了界线地层中的米兰柯维奇地层记录, 并将世界不同区域, 甚至海、陆相地层中相关的旋回事件联系起来. Peng 等^[25,26]也曾探索了安徽巢湖平顶山北剖面的旋回地层. Yang 等^[27]对贵州南部南盘江地区碳酸盐岩台地内部及边缘相的旋回地层进行了对比研究, 识别出了很好的周期旋回记录. 这些成果表明, 与米兰柯维奇周期事件相关的沉积记录在三叠纪地层中可以很好地保存、识别和研究.

1 巢湖地区早三叠世地质背景与沉积特征

巢湖地区地处下扬子地块北部边缘, 与华北板块以及郯城-庐江大型转换断层相接, 但无显著的构造热事件影响到早三叠世的沉积记录, 适合于多学科地层学研究^[28,29]. 在古地理位置上, 早三叠世时期

巢湖地区处于下扬子碳酸盐缓坡台地较深水区, 也是当前残留的下扬子地块上早三叠世水体最深的沉积区之一^[6]. 因此, 当其他地区在早三叠世晚期因印支运动抬升导致沉积物和化石记录贫乏的时候, 该区仍保持有良好的地质记录^[28].

正是由于巢湖地区早三叠世这种特殊的沉积环境, 使得该区下三叠统发育有非常好的灰岩/泥岩连续沉积旋回, 为开展旋回地层研究提供了很好的素材. 我们重点对巢湖平顶山西剖面中的印度期地层进行高分辨率旋回地层研究, 研究地层从二叠系-三叠系界线之下 1 m 的大隆组硅泥质岩石中开始, 直到印度阶-奥伦尼克阶界线之上约 2.5 m 处(剖面第 25 层^[2]), 全段地层厚约 44 m(图 2).

这段地层除底部约 1 m 大隆组硅质岩和硅质泥岩外, 其他均为殷坑组的泥岩(或页岩)与泥灰岩(或瘤状灰岩)互层. 大隆组地层一般由薄层硅质岩和薄层硅质泥岩组成, 殷坑组岩性变化较大, 大致包括以下 7 种岩性类型: (1) 灰绿色、灰黑色、土黄色的泥岩, 常含有双壳类和菊石等化石; (2) 浅灰色、浅黄色钙质泥岩; (3) 黑色、灰黑色钙质页岩; (4) 浅灰色或

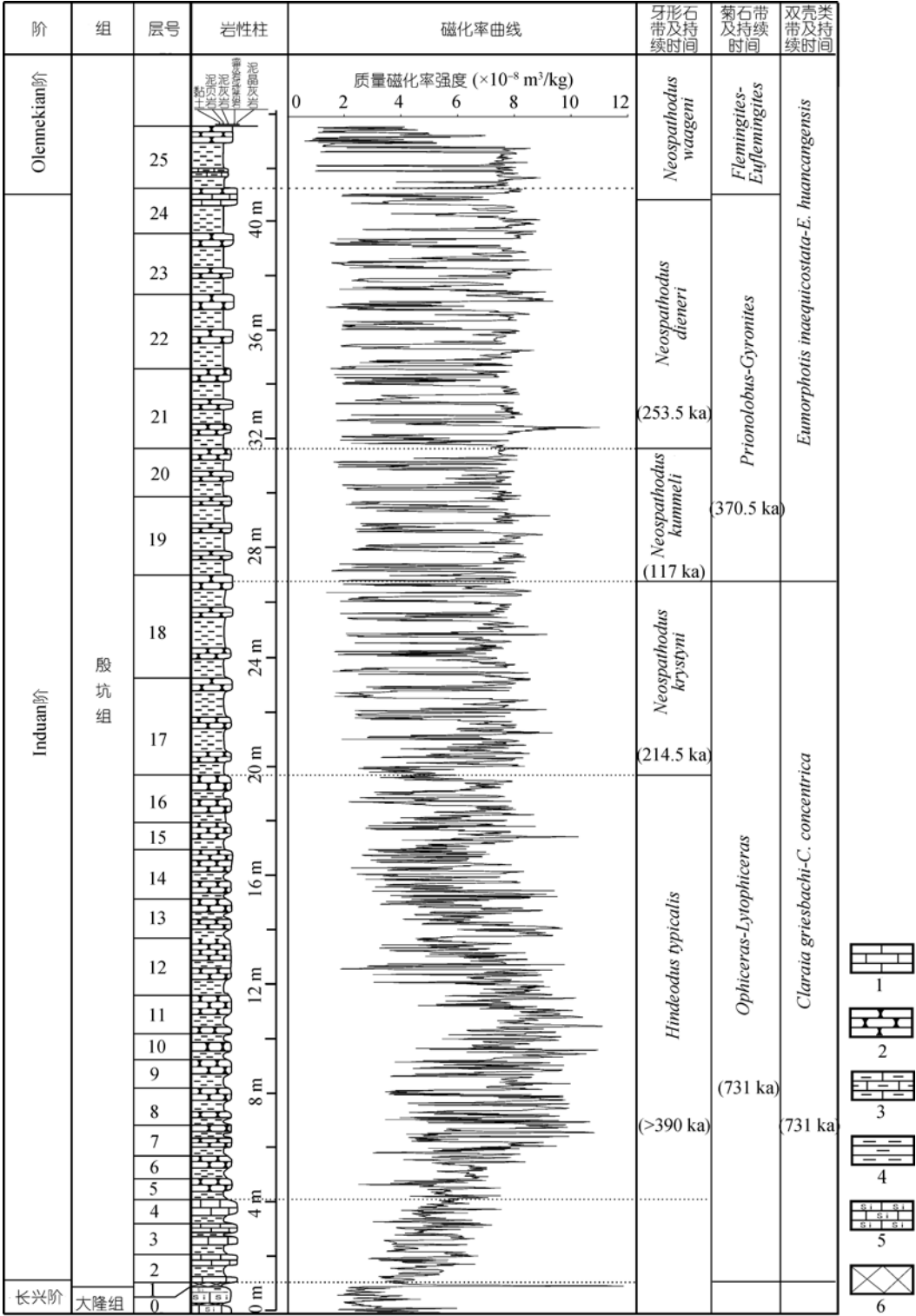


图 2 巢湖平顶山西剖面下三叠统印度阶综合地层柱状图及磁化率分布曲线
1. 灰岩; 2. 瘤状灰岩; 3. 泥灰岩; 4. 泥岩或页岩; 5. 硅质岩; 6. 黏土

灰黄色泥灰岩, 通常表面风化严重, 呈现黄褐色或土黄色; (5) 灰色、深灰色泥晶灰岩, 常含有丰富的牙形石; (6) 灰色、浅灰色泥质条带灰岩; (7) 灰色、浅灰色, 表面分化成灰黄色、褐黄色瘤状灰岩, 瘤状灰岩

中灰泥比变化较大, 泥很少时表现为泥质条带灰岩. 宏观上, 不管从岩性组合还是从风化面颜色变化上都能够从剖面露头上很直观地识别出各种级别的地层旋回(见图 1), 所有这些有规律的岩性组合变化, 显然代表沉积物源、沉积介质(水化学)等沉积环境的周期性变化.

根据岩性组合, 这些旋回主要可归纳为 4 种层束结构(bundles)(图 3). (1) 下部为浅灰色中薄层灰岩, 中部为过渡的土黄色泥灰岩或钙质泥岩, 上部为灰黄色、灰绿色泥岩或黑色页岩(图 3(d)); (2) 下部为土黄色微薄层状瘤状灰岩, 上部为灰绿、灰黄、灰黑色泥岩, 中部偶尔会发育有土黄色钙质泥岩(图 3(e)); (3) 中薄层的瘤状灰岩或泥质条带灰岩为主, 顶部有一层微薄层的钙质泥岩(图 3(f)); (4) 下部为灰黄色的钙质泥岩, 中部为黑色页岩, 上部为灰绿色泥岩(图 3(g)). 这些层束主要可以组合成以下 3 种形式的层束组(bundle set, BS)(图 3). (1) 下部为 d 类层束, 上部为 g 类层束组成的层束组(图 3(a)); (2) 下部为 f 类层束, 上部为 e 类层束组成的层束组(图 3(b)); (3) 下部为 f 类层束, 上部为 g 类层束组成的层束组(图 3(c)). 此外,

4 或 5 个层束组可以形成一个超层束组(BS group)^[29](图 1(b)和(c)).

该剖面地层从宏观岩性组合上看旋回性显著, 并且这种旋回性在华南区域上具有普遍性^[23,24,27]. 这种普遍性反映了某种区域乃至全球性外力驱使作用, 其旋回性可能与天文轨道周期的变化有关. 为了进一步证实这种岩性旋回可能存在与由日地轨道系统驱动的米兰柯维奇气候变化周期之间的相关关系, 我们对这段约 44 m 的地层进行了系统的岩石磁化率采样分析, 以便从客观上更准确地识别各类旋回事件的性质.

2 磁化率样品采集、处理 and 数据分析方法

对巢湖平顶山西剖面上近 44 m 的地层进行 2 cm 间隔的连续采样, 平均每个样品采集约 100 g, 共采集样品 2184 个, 并在野外现场记录了各样品的岩性特征. 在室内从每个样品中选取少量无明显成岩影响的新鲜样品用铜制器皿碾碎后装入直径 2 cm, 高 2 cm 的圆柱形塑料盒中(每样一盒). 样品在中国地质大学(北京)古地磁与古环境磁学实验室用 KLY-4 型卡

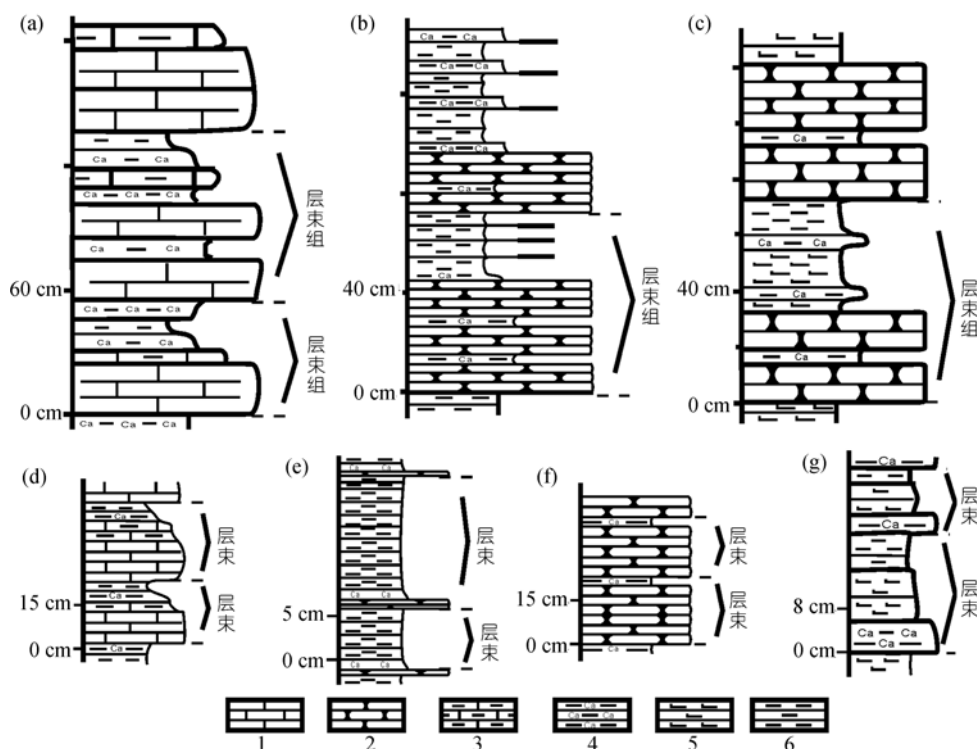


图 3 剖面上岩性的组合形式

(a)~(c)为 3 种层束组的构成; (d)~(g)为归纳的次一级别的 4 种层束结构. 由两种或两种以上的岩性交互组成的低级旋回构成层束, 多个层束组合的大旋回构成层束组, 几个层束组组成超层束组^[23]. 1. 灰岩; 2. 瘤状灰岩; 3. 泥灰岩; 4. 钙质泥岩; 5. 页岩; 6. 泥岩

帕桥磁学仪器测量出样品的体积磁化率。为了减小样品装样时的密度误差, 仔细测量了每个磁化率样品的质量, 并去除样品盒的影响, 然后将所测得的体积磁化率数据换算成质量磁化率用于数据分析。

在数据分析中, 首先采用了小波分析^[30]去除其中的噪音干扰信号, 以提取其中的规律性周期信号特征^[31]。利用 MATLAB 7.0 工具软件包中的小波工具箱对磁化率信号进行三尺度小波分解, 将其分解为高频的部分和低频的部分^[32]。分解所得的低频部分如图 4 所示。

时间序列数据分析的另一种常用处理方法是功率谱估计分析, 它十分有利于估算随时间变化的各类周期信号的频率和长度。功率谱估计分析的方法很早就被运用于旋回地层周期的识别和提取, 并取得了很好的效果^[17,19,33~35]。基本思想是首先利用采样的方法将模拟信号转化为数字信号(AD 转换), 即从野外剖面上采样测试所获得的磁化率数据, 这些数据就是从剖面上提取的一系列离散信号, 然后对这些离散信号进行功率谱估计^[36]。本文使用了 MATLAB 7.0 分析软件, 并在频谱工具箱^[32]中选择了 2 种方法来对磁化率数据进行功率谱估计分析: (1) FFT 法(快速傅里叶变换), 它是经典功率谱分析中最常用、最主要的方法, 它利用了三角函数的周期性计算技巧而成为信号处理的一个重要工具^[19,32]; (2) Welch 法, 又称为加权交叠平均法, 它是对经典谱估计方法中直接法改进的一种方法, 其原理是将 N 点有限长序列分成部

分交叠的 L 段数据, 每段有 M 个样本, 然后求取每一段的 M 个样本的功率谱估计, 最后求出所有 L 段数据功率谱的平均值^[19,32]。用这 2 种方法分析所得到的功率谱图如图 5 所示。

3 结果与讨论

根据小波分析的结果(图 4), 我们能识别出明显的近似(4-5):1 的周期旋回。在研究剖面的印度期地层中一共可明确识别出 12 个大旋回和若干次一级别的小旋回。与野外剖面上观察记录到的岩性变化相对照, 可以发现这些次级小旋回与岩性组合中的层束组完全一致(图 1, 3), 而这些大旋回对应于岩性组合中的超层束组(图 4, 6)。

另一方面, 从功率谱分析的结果(图 5)可以看出, FFT 与 Welch 法功率谱分析结果非常的一致。功率谱估计显示最突出频率峰值分别为 0.02637(换算成地层厚度为 0.76 m)和 0.00586(厚度值为 3.41 m)。这两者之间的比值约为 4.67:1, 体现了米兰柯维奇天文周期中岁差与偏心率之间的关系^[37]。

由此可见, 巢湖平顶山西剖面印度期地层旋回表现为以下特征:

(1) 根据磁化率小波分析, 结合野外露头剖面上岩性组合变化, 识别出两级(层束组和超层束组)旋回, 两者之间层数的比值为(4-5):1; 而通过功率谱分析, 得到的两个周期的比值为 1:4.67。两者结果很好的吻合, 这与三叠纪时期米氏旋回中的岁差与短偏心率周期的比值很相近^[37]。

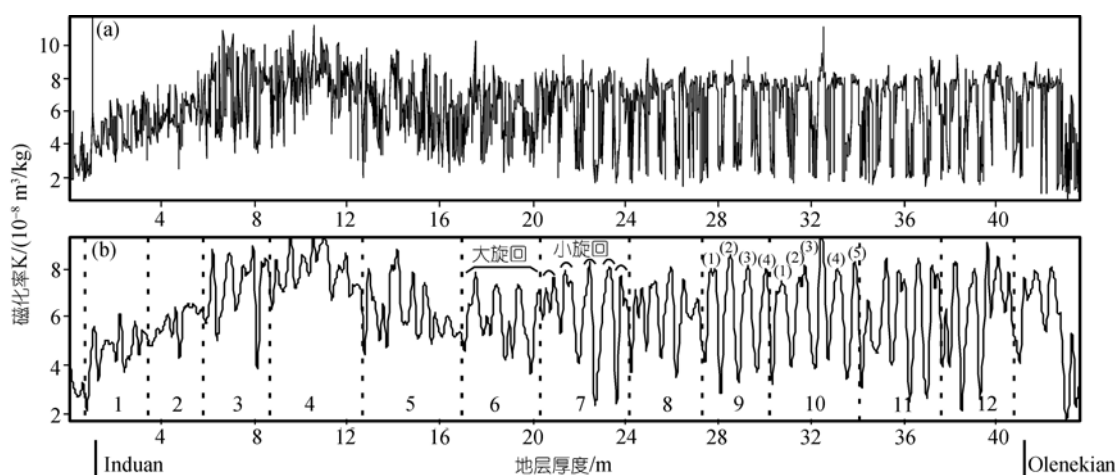


图 4 巢湖平顶山西剖面磁化率小波去噪分析图

(a) 原始的磁化率数据曲线; (b) 小波去噪后得到的磁化率数据低频曲线。1~12 代表划分的大旋回; (1)~(5)代表划分的次一级小旋回

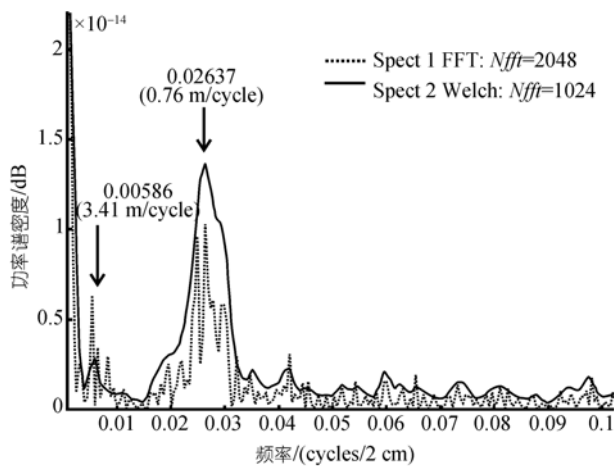


图 5 基于 FFT 和 Welch 算法的巢湖平顶山西剖面磁化率功率谱估计分析图

实线所示的是基于 Welch 算法的功率谱估计; 虚线所示的是基于 FFT 算法的功率谱估计

(2) 在野外露头剖面上记录到岩性层束组的平均厚度为 70.2 cm, 超层束组的平均厚度为 330.5 cm; 这个结果与频谱分析得到的厚度分别为 76 和 341 cm 非常接近。

(3) 通过功率谱分析估算出研究剖面印度期地层中含有约 11.6 个大的周期和 54.13 个次一级小的周期, 这与岩性中划分出的 12 个超层束组和 56 个层束组基本可以对照。

(4) 采用 Schwarzacher 的沉积物累计曲线模型^[18], 将各个旋回按地层厚度累计成图(图 7), 近线性直线的图形表明, 当时巢湖地区的沉积环境较为稳定, 未出现明显大的沉积波动, 十分有利于旋回地层及其他地质研究。

根据以上结果, 如按照 Berger 和 Loutre 提供关于地史各时期岁差周期值(早三叠世时的岁差平均值约为 19.5 ka)来估算, 可计算出印度阶时限约为 1.1 Ma(对应的平均沉积速率为 3.7 cm/ka)。如果按照最新认识的二叠系-三叠系界线年龄值为 252.6 Ma^[11]可向前推算出 Induan/Olenekian 界线年龄值大约为 251.5 Ma。同样也可以估算出平顶山西剖面上各化石带的地质年限值(图 2)。如按照 19.5 ka 的岁差周期, 利用图 6 划分的层旋回估算得牙形石中 *Hindeodus typicalis* 带在三叠纪持续的时间约 390 ka; *Neogondolella krystyni* 带持续的时间约 214.5 ka; *Neospathodus kummeli* 带持续的时间约 117 ka; *Neospathodus dieneri* 带持续的时间约 253.5 ka。另外还有菊石和双壳带持续的时限估算如图 2 中所示。

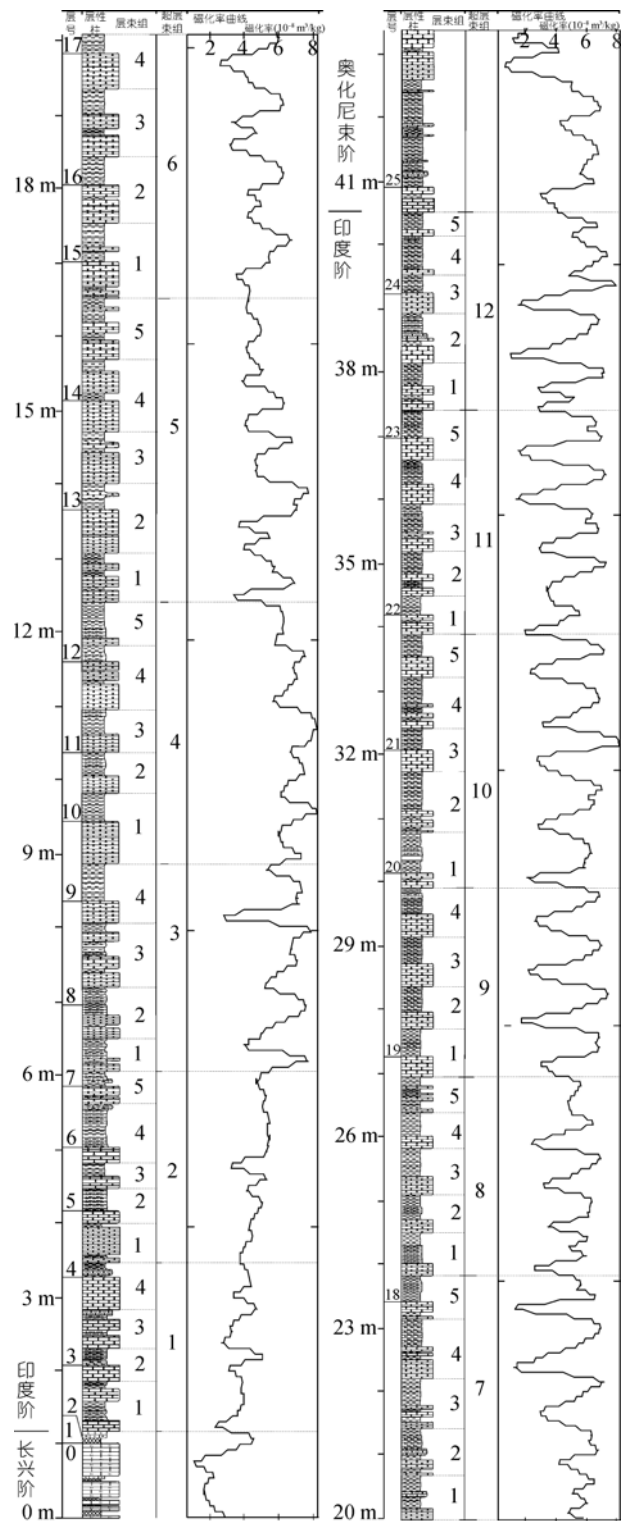


图 6 巢湖平顶山西剖面下三叠统岩性和磁化率旋回划分柱状图

spathodus dieneri 带持续的时间约 253.5 ka。另外还有菊石和双壳带持续的时限估算如图 2 中所示。

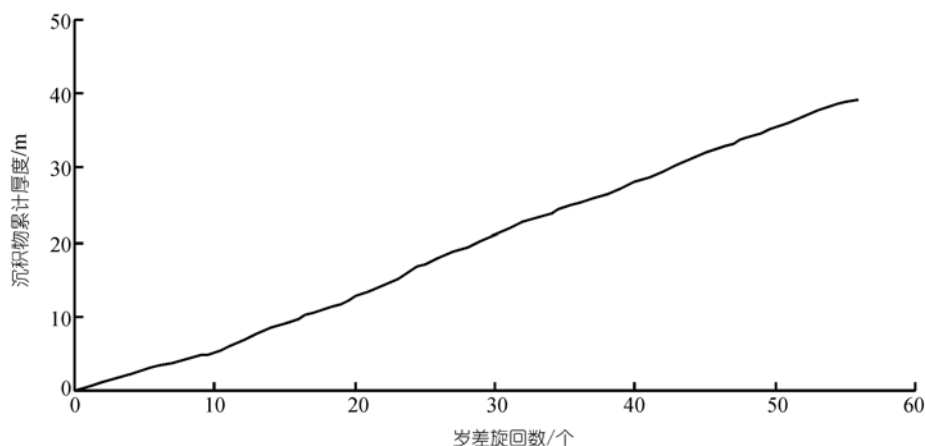


图 7 巢湖平顶山西剖面沉积物累积曲线

横坐标为剖面中自下而上的岁差旋回数累计, 纵坐标为对应的地层厚度累积

4 结论

(1) 巢湖地区早三叠世地层中存在有明显的米兰克维奇天文旋回, 其中岁差周期最为明显, 短偏心率周期较为明显, 倾角周期不明显. 平顶山西坡印度阶地层大致包括 12 个短偏心率周期和 56 个岁差周期.

(2) 根据划分的岁差周期旋回, 计算出印度阶地质时限约为 1.1 Ma, 对应的地层平均沉积速率(成岩压实后)为 3.7 cm/ka.

(3) 巢湖地区印度期沉积物累积曲线表明当时的沉积环境较为稳定, 十分适合于旋回地层等相关地质研究.

(4) 若以浙江长兴煤山剖面二叠系-三叠系界线年龄值 252.6 Ma 作为参照, 可推算出巢湖平顶山西剖面上 Induan/Olenekian 界线年龄值约为 251.5 Ma.

致谢 感谢徐道一老师对文稿件进行了细心校正, 朱宗敏老师在采样准备阶段给予了帮助. 对在研究工作期间给予过帮助的老师 and 同学在此一并表示由衷的谢意.

参 考 文 献

- 1 Tong J N, Zakharov Y D, Orchard M J, et al. A candidate of the Induan-Olenekian boundary stratotype in the Tethyan region. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 46(11): 1182—1200
- 2 童金南, Hansen H J, 赵来时, 等. 印度阶-奥伦尼克阶界线层型候选剖面——安徽巢湖平顶山西剖面地层序列. *地层学杂志*, 2005, 29: 205—214
- 3 童金南, 赵来时, 左景勋. 下三叠统殷坑阶和巢湖阶及其界线研究. *地层学杂志*, 2005, 29: 548—564
- 4 全国地层委员会, 编. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京: 地质出版社, 2002. 1—72
- 5 Tong J N, Yin H F, Zhang J J, et al. Proposed new Lower Triassic stages in South China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2001, 44(11): 961—967
- 6 殷鸿福, 童金南. 关于中国的海相三叠系建阶及下三叠统分阶界线. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27: 490—497
- 7 Erwin D H. After the end: recovery from extinction. *Science*, 1988, 279: 1324—1325[DOI]
- 8 Erwin D H. The end and the beginning: Recoveries from mass extinction. *Trends Ecol Evol*, 1988, 13: 344—349[DOI]
- 9 Erwin D H. The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian. New York: Columbia University Press, 1993. 1—327
- 10 童金南. 华南古生代末大绝灭后的生态系复苏. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22: 373—376
- 11 Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe I, et al. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*, 2004, 305: 1760—1763[DOI]
- 12 Tong J, Zhang S, Zuo J, et al. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 66—80
- 13 龚一鸣, 徐冉, 汤中道, 等. 广西上泥盆统轨道旋回地层与牙形石带的数字定年. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(7): 635—643
- 14 Milankovitch M. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. *Acad roy Ser Ed spec 132: Sec Sci Math nat*, 1941, 33: 1—633
- 15 Bayer U, Seilacher A. *Sedimentary and Evolutionary Cycles*. New York: Springer-Verlag, 1985. 1—464
- 16 Einsele G, Ricken W, Seilacher A. *Cycles and Events in Stratigraphy*. New York: Springer-Verlag, 1991. 1—955
- 17 Schwarzscher W. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory*. Amsterdam: Elsevier, 1993. 1—25
- 18 Schwarzscher W. Repetitions and cycles in stratigraphy. *Earth-Sci Rev*, 2000, 50: 51—75[DOI]
- 19 Weedon G P. *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles*. New

- York: Cambridge University Press, 2003. 1—259
- 20 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geological time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 2004, 27: 83—100
- 21 Rio D, Silva I P, Capraro L. The geological time scale and the Italian stratigraphic record. *Episodes*, 2003, 26: 259—263
- 22 徐道一. 天文地质年代表与旋回地层学研究进展. *地层学杂志*, 2005, 29: 635—640
- 23 童金南, 殷鸿福. 浙江长兴煤山剖面 Griesbachian 期旋回地层研究. *地层学杂志*, 1999, 23: 130—135
- 24 Hansen H J, Lojen S, Toft P, et al. Magnetic susceptibility and organic carbon isotopes of sediments across some marine and terrestrial Permo-Triassic boundaries. In: Yin H F, Dickins J M, Shi G R, et al, eds. *Permian-Triassic Evolution of Tethys and Western Circum-Pacific*. Amsterdam: Elsevier, 2000. 271—289
- 25 Peng Y Q, Tong J N, Gao Y Q, et al. Lower Triassic Griesbachian cycles sediments in Chaohu, Anhui province, China. In: Yin H F, Tong J N, eds. *Proceedings of the International Conference on Pangaea and the Paleozoic-Mesozoic Transition*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. 29—34
- 26 Peng Y Q, Tong J N. Griesbachian cyclostratigraphy at Majiashan section, Anhui province, China. *J China Univ Geosci*, 2001, 12: 22—26
- 27 Yang W, Lehrmann D J. Milankovitch climatic signals in Lower Triassic (Olenekian) peritidal carbonate successions, Nanpanjiang Basin, South China. *Palaeogeogr Palaeocl Palaeoecol*, 2003, 201: 283—306[DOI]
- 28 童金南, 赵来时, 左景勋, 等. 安徽巢湖地区下三叠统综合层序地层序列. *地球科学——中国地质学学报*, 2005, 30: 40—46
- 29 童金南, 左景勋, 赵来时, 等. 安徽巢湖下三叠统剖面研究. *地层古生物论文集*. 北京: 地质出版社, 2004. 147—163
- 30 Percival D B, Walden A T, 著. 程正兴, 等, 译. *时间序列分析的小波方法*. 北京: 机械工业出版社, 2006. 1—562
- 31 Crick R E, Ellwood B B, Hladil J, et al. Magnetostratigraphy susceptibility of the Pridolian-Lochkovian (Silurian-Devonian) GSSP (Klonk, Czech Republic) and a coeval sequence in Anti-Atlas Morocco. *Palaeogeogr Palaeocl Palaeoecol*, 2001, 167: 73—100[DOI]
- 32 飞思科技产品研发中心, 编著. *MATLAB 7 辅助信号处理技术与应用*. 北京: 电子工业出版社, 2005. 1—450
- 33 Gradstein F M, Agterberg F P, Brower J C. *Quantitative Stratigraphy*. Dordrecht: D. Reidel Publ Co., 1985. 1—598
- 34 Weedon G P. The spectral analysis of stratigraphy time series. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin: Springer, 1991. 840—854
- 35 Mayer H. Times-series analysis in cyclic stratigraphy: an example from the Cretaceous of the Southern Alps, Italy. *Math Geol*, 1993, 25: 975—1001
- 36 佐藤幸男, 著. 宋伟刚, 译. *信号处理入门*. 北京: 科学出版社, 2000. 1—162
- 37 Berger A, Loutter M F, Laskar J. Astronomical forcing through geological time. In: Boer P L, Smith D G, eds. *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994. 15—24