



# 广西东攀二叠系-三叠系界线剖面地球化学 高分辨率旋回研究

彭兴芳<sup>①</sup> 冯庆来<sup>①\*</sup> 李周波<sup>②</sup> 蒙有言<sup>③</sup>

(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(武汉)数学与物理学院, 武汉 430074; ③ 广西地质勘查总院, 南宁 530031)

**摘要** 利用频谱分析方法对广西东攀深水相二叠系-三叠系界线剖面进行了地球化学高分辨率旋回地层研究. 发现米兰柯维奇旋回特征在该剖面保存较为理想, 其中 Ce/La 比值频谱分析结果显示古生代-中生代之交沉积旋回的周期比恰好近似为 5:2:1, 很好的体现了天文轨道控制的沉积旋回现象, 从而进一步支持米兰柯维奇理论.

**关键词** 频谱分析 P-T 界线 地球化学 旋回地层 广西

随着沉积地层学研究的不断深入, 人们发现沉积地层不仅具有叠覆性, 而且具有周期性. 一套成因连续的地层序列是一定时间序列内各种沉积事件的物质记录, 蕴含着大量的地质时间信息. 开发利用这些地层记录中的地质时间信息, 能够建立小于百万年级的高分辨率地质时间坐标. 塞尔维亚学者米兰柯维奇(Milankovitch)提出的 Milankovitch 理论, 为我们进行高分辨率旋回研究奠定了理论基础. 该理论认为地球轨道运行中 3 个重要参数(地球轨道的偏心率、斜率和岁差)的变化影响了地球表面接收的日照量的变化, 进而影响了气候系统的变化. 气候演化影响着沉积环境的变化. 沉积地层的物理、化学性质及物性结构就记录了气候的变化和 Milankovitch 旋回周期. 这些天文周期信息可以用于沉积地层地质年代学研究.

米兰柯维奇旋回控制气候的变化已被第四纪的气候旋回研究证实<sup>[1]</sup>, 但在前第四纪, 气候的变化是否受米兰柯维奇旋回的影响、如何在更古老的地层中识别? 如何应用米兰柯维奇旋回特征进行前第四纪

旋回地层学研究? 一直是探索性的问题. 到目前为止, 国内外已有不少的成功研究实例. Anderson<sup>[2,3]</sup>依据蒸发岩的年厚度变化规律, 分析了美国新墨西哥州和德克萨斯州 Castile 组二叠纪蒸发岩地层序列的轨道成因, 并利用其清楚的岩石学纹理结构为 Castile 组创立了纹层年表. Fischer 和 Herbert<sup>[4]</sup>利用地球化学参数作为替代指标识别出了白垩纪深海、半深海碳酸盐沉积序列中的米氏旋回特征; Goldhammer 等<sup>[5,6]</sup>, Hinnov 和 Goldhammer<sup>[7]</sup>将各级旋回的时间间隔结合同位素年龄值估算, 利用时间序列分析(time-series analysis)的方法展示了保存在中三叠世碳酸盐台地相地层中的米氏旋回; Osleger<sup>[8]</sup>根据岩性岩相的差异及其厚度的变化规律同样揭示了北美 Appalachian 地区晚寒武世潮坪相碳酸盐地层中的米氏旋回; House<sup>[9]</sup>通过沉积韵律推算出泥盆纪米兰柯维奇旋回, 并利用它建立了地层时间尺度; 对于 P-T 界线附近地层, 选取磁化率曲线为替代指标的时频分析, 其结果显示了与米兰柯维奇旋回周期的一致性<sup>[10~12]</sup>. 中国学者在泥盆纪地层学研究中也证实了米氏旋回的存在<sup>[13~15]</sup>. 总之,

收稿日期: 2007-06-10; 接受日期: 2007-10-24

国家自然科学基金创新团队项目(批准号: 40621002)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20060491502)资助

\* 联系人, E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

米氏旋回在前第四纪地层中同样存在。

地球化学数据对古气候变化有良好的记录，是反映气候与环境变化的良好代用指标。本文尝试利用地球化学资料对广西东攀二叠系-三叠系界线剖面大隆组、罗楼组进行快速傅里叶变换法(FFT)频谱分析，建立地化数据向地质目标的映射关系，寻找其沉积旋回的主要周期特征，进而讨论地层高频层序周期与 Milankovitch 旋回之间的联系。

1 研究区地质概况

在桂西南地区，区域性的构造运动导致中二叠世碳酸盐岩台地裂解，晚二叠世部分地区沉降形成深水盆地，有的地区仍为碳酸盐岩台地，形成了浅水台地与深水盆地并存的古地理格局<sup>[16]</sup>。东攀剖面属于深水相二叠系-三叠系界线地层剖面，出露完整，地层连续，岩性韵律旋回清楚，沉积纹层发育，为深水低能环境沉积<sup>[17]</sup>，适合高分辨率地层学研究。

该剖面下部 2~5 层，岩性上表现为泥岩与硅质岩、含泥硅质岩韵律旋回，单层泥岩及硅质岩中发育有明暗相间的纹层，代表了沉积物的周期性变化；剖面上部 6~14 层为稳定的泥岩沉积(夹火山事件层)，在岩性的变化上并没有明显的旋回；往上，岩性逐渐过渡到罗楼组典型的瓦片状泥岩与泥灰岩韵律性互层，这种泥岩/灰岩层束在下扬子地区下三叠统具有均一性、周期性和多级次的特点，可追索对比<sup>[18]</sup>。根据生物地层学研究，二叠系-三叠系界线位于 12~13 层之间<sup>[19]</sup>(图 1)。

2 地球化学资料的频谱分析

2.1 频谱分析的理论基础

事件周期性出现的频繁程度可用时间序列中的频率来表示。快速傅里叶变换法 (FFT) 频谱分析技术是研究周期性现象中最常用的一种统计方法，主要通过对一复合波系列进行傅里叶变换，将其分解成若干振幅和相位不同的间谐波，并找出其中振幅最大的波，即该复合波中的主要频率。

傅里叶变换函数常由连续函数得出，若变换函数为  $x(t)$ ，则傅里叶变换由下式得出

$$X(f)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)e^{-j2\pi ft}dt,$$
 (1)

式中:  $t$  为时间;  $j$  是虚数;  $f$  为频率。

在实际过程中，采样都是离散和有限的。如果是

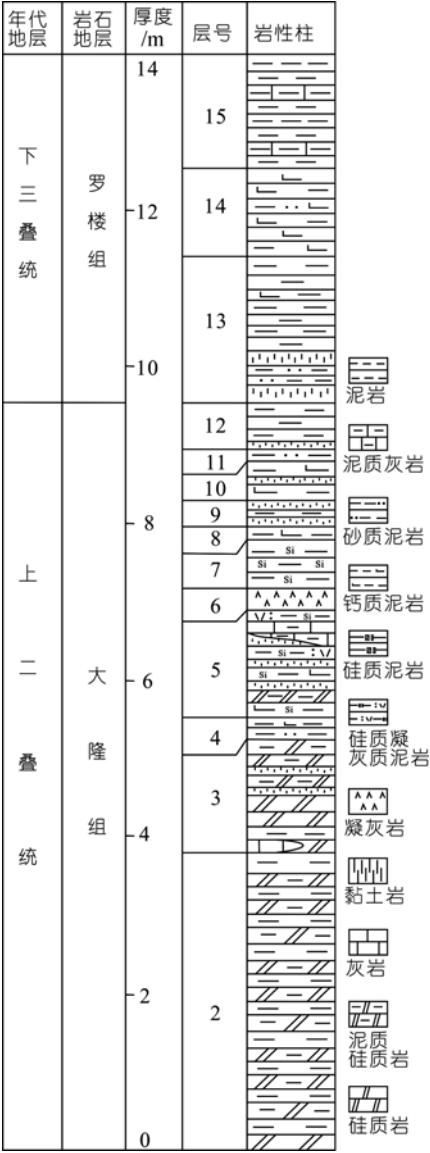


图 1 广西东攀地层剖面柱状图

连续信号，在应用计算机处理时也需要进行截断并离散化，因此在实际数据处理时，都采用离散傅里叶变换。详细说明和推导过程见参考文献<sup>[20~22]</sup>，这里直接给出变换公式。

假定有一段  $N$  项离散时间序列  $x_m$ ，其离散傅里叶变换为

$$X_k=\sum_{m=0}^{N-1}x_mW^{(mk)},\quad W=e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$
 (2)

$$j=\sqrt{-1},$$

式中  $X_k$  为频谱值( $k=0, 1, 2, \cdots, N-1$ )。

快速傅里叶变换(FFT)是计算离散傅里叶变换

(DFT)的一种快速算法,能迅速提高 DFT 的运算速度. FFT 的算法形式种类很多,如基 2FFT 算法和基 4FFT 算法等,但基本上可以分成两大类:时间抽取法(DIT-FFT)和频率抽取法(DIF-FFT). (DIT-FFT)和(DIF-FFT) 算法思想基本一致,只是划分方式略有差异. 本文采用基 2FFT 算法中的频率抽取法(DIF-FFT) 进行计算.

当  $k$  为偶数时,用  $2k$  代替  $k$ ,可以得到

$$X_{2k} = \sum_{m=0}^{A-1} (x_m + x_{m+A})W^{(2mk)}, \tag{3}$$

式中:  $k=0, 1, \cdots, A-1; A=N/2$ .

当  $k$  为奇数时,可以用  $2k+1$  代替  $k$ ,得到

$$X_{2k+1} = \sum_{m=0}^{A-1} (x_m - x_{m+A})W^{(m)}W^{(2mk)}, \tag{4}$$

式中:  $k=0, 1, \cdots, A-1; A=N/2$ .

由于频谱值  $X_k$  没有直观意义,习惯上总将其转化成能量,构成直观的能量频谱图,对应于频谱  $f_k$  的谐振能量为

$$P_k [\text{real}(X_k)]^2 + [\text{imag}(X_k)]^2, \tag{5}$$

式中:  $P_k$  表示频率的分量;  $k=0, 1, 2, \cdots, N-1$ .

2.2 频谱分析方法

所研究的地层序列总长度为 14 m(第 2 层至第 15 层). 在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室使用 POEMS (Plasma Optical Emission Mass Sepectrometer) III 等离子体光谱仪进行样品测定,共测定 34 种元素(微量元素 19 种,稀土元素 15 种);利用 X-射线荧光光谱测定法测试了常量元素,由武汉综合岩矿测试中心完成. 获得了比较完整的地球化学资料. 为了研究古气候的演变,选择与气候关系

密切的元素比值<sup>[23]</sup>,探索其地层变化规律. 图 2 显示了 Si/Al, Ti/Al, Fe/Al, Mn/Al, P/Al, K/Al, Ca/Al, Mg/Al 和 Ce/La(北美页岩标准化后)比值随地层变化的曲线.

为了频谱分析,删除火山事件成因黏土层的地化数据,对正常背景沉积层的 47 组地球化学数据按 0.5 等间距样条插值,进行数字离散化. 在此基础上对数据进行快速傅里叶变换(FFT) 的时-频转换,将地球化学资料的时间(深度)领域转换到频率领域,得出频谱曲线(图 3). 图中横坐标代表频率,纵坐标代表相对功率,而图中功率高点表示该频率的时间序列在地层中的重要性. 功率值越大,表明该周期的沉积旋回在地层中出现得越频繁,因此高点处的频率对应于曲线的主要频率,这样可以找出频谱曲线中的主要频率值,进而可以求出相应的波长,得出旋回周期.

从图 3 中可以看到,元素比值的频谱图出现明显峰值的频率点是: K/Al: 86, 61, 48; Si/Al: 143, 86, 39; Mg/Al: 143, 72, 54; P/Al: 215, 86, 61, 43, 其中 86 和 61 两个峰值点可能是一个峰值的两个上升阶段; Mn/Al: 215, 84, 43; Fe/Al: 215, 76, 41; Ca/Al: 188, 75, 54; Ti/Al: 215, 84, 43; Ce/La: 215, 86, 43. 可以看出在多个地球化学指标频谱图中反复出现的峰值频率点为 215, 86 和 43. 说明: (1) 地层中的化学元素很好的记录了地层信息; (2) 由于各个元素的化学性质的差异,不是所有的频谱图都能很好的体现地层记录的旋回性. 例如 K, Mg, Ca 受成岩作用和后期风化作用较大, Si, Ca 和 P 受生物兴衰影响较大, 频谱分析效果不理想; 而 Al, Mn, Fe, Ce 和 La 受古气候和沉积环境影响较大, 其化学性质相对稳定, 分析结果比较理想.

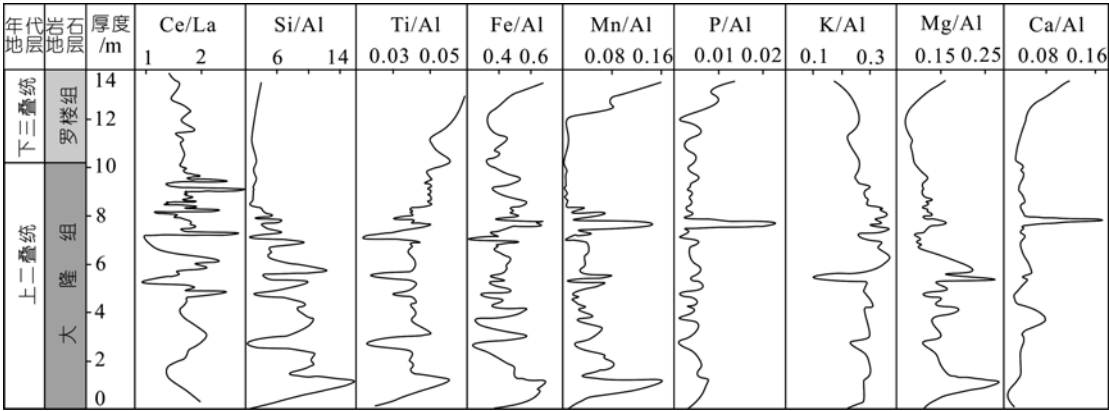


图 2 东攀剖面部分常量元素与 Al 比值及 Ce/La 曲线变化图

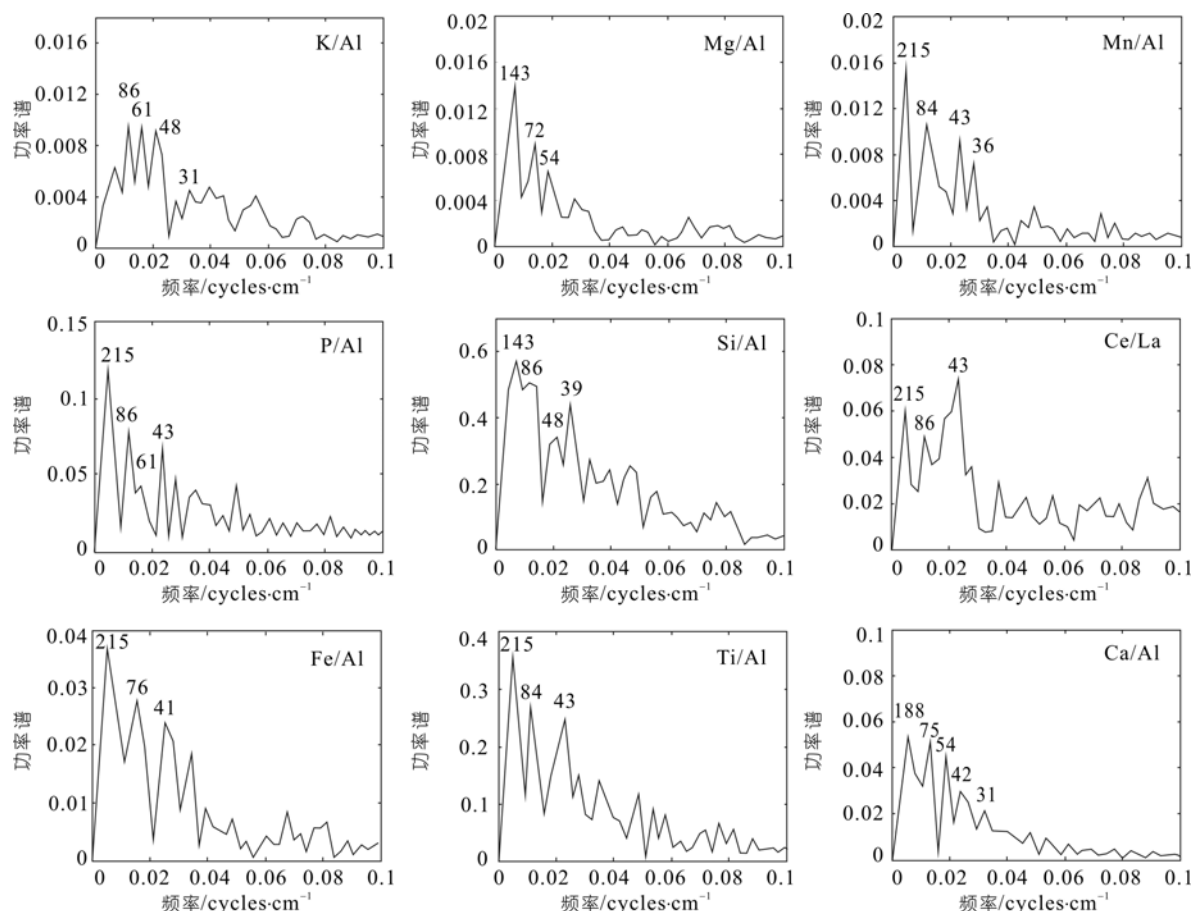


图 3 东攀剖面地球化学资料变化的快速傅里叶变换频谱图

### 3 米兰柯维奇旋回的识别

地球轨道三要素的变化周期分别为: 岁差长周期约为 23 ka, 短周期为 19 ka; 斜率周期为 41 ka; 偏心率长周期为 400 ka, 短周期为 100 ka. 由于在地质时期地-月距离的逐渐增大以及地球自转速度减慢, 所以地质历史时期的岁差旋回与斜率旋回的周期年限比现代短. 然而, 偏心率旋回的周期年限在漫长地质时期是稳定的<sup>[24,25]</sup>. 因此, 米兰柯维奇旋回周期在某个特定的地质历史时期具有相对的稳定性, 其 3 个参数的周期比值是稳定的. 我们可以通过这一点有效地识别出地层中米兰柯维奇旋回的周期信息. 方法是分析频谱曲线中主要频率成分(即幅度高于一般的频率), 通过反复比较和鉴定找出其波长及其相互间的比率关系. 如果地层序列中的这些波长比率与地史时期气候变化的旋回周期比率相同或相似, 就可以说明这些波长的频率反映古气候变化的信息, 也就是我们所需要的沉积旋回的分析依据.

根据 Berger 等<sup>[26]</sup>的计算, 古生代-中生代之交米兰柯维奇旋回偏心率周期、斜率周期与岁差周期的比值约为 5:2:1. 本文研究层段地化资料频谱显示出 3 个较稳定的峰值频率之比: P/Al: 5:2:1; Mn/Al: 5:1.955:1; Fe/Al: 5.2:1.8:1; Ti/Al: 5:1.955:1; Ce/La: 5:2:1. 这些比值与 Berger 的计算结果非常相似. 说明东攀剖面中的沉积旋回与米兰柯维奇旋回间有很好的对应关系.

而且在我们的研究中发现, Ce/La 比值的频谱图出现明显峰值的频率点刚好与多个地化指标频谱图中反复出现的频率点 (215, 86, 43) 吻合. 从图 4 中可以看到主要的峰值频率点 A、B 和 C, 分别对应的频率值为 0.004652, 0.011630, 0.023260 cycles/cm; 转换为相应波长为 215, 86, 43 cm/cycles. 由于离散化分析间隔为 0.5, 因此地层主要旋回厚度为 107.5, 43, 21.5 cm/cycles. 由此地层主要旋回厚度之比为 5:2:1. 本文研究剖面岩性较简单, 沉积韵律旋回清楚, 岩相



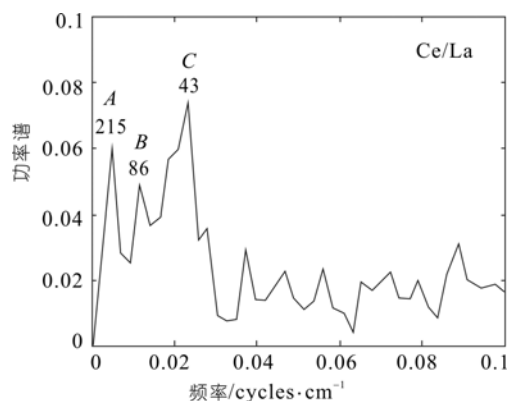


图 4 Ce/La 比值 FFT 频谱分析曲线

没有明显变化<sup>[17]</sup>, 可以认为其沉积速率基本稳定。所以, 各沉积旋回周期的比值近似为 107.5:43:21.5, 即 5:2:1。而古生代-中生代之交沉积旋回的周期比恰好近似为 5:2:1。这说明 Ce/La 比值很好的体现了天文轨道控制的沉积旋回现象。

究其原因, 可能与 Ce 和 La 的化学性质有关。Ce 和 La 属于稀土元素, 受成岩及成岩后风化作用影响较小, 其比值变化主要受物源和沉积环境影响。Ce/La 值可以反映海底氧化还原度<sup>[27]</sup>, 也可以反映海平面周期性升降: Ce/La 值剧降示大海侵, 上升示大海退, 这种海平面升降是受古气候变化控制的<sup>[28]</sup>。对于东攀剖面来说, 沉积环境氧化还原条件没有明显变化。由此可以推断东攀剖面 Ce/La 值的变化主要来自古气候变化的影响(图 5)。所以, Ce/La 值能较好地反映米兰柯维奇旋回。

另外, 在图 4 中可以看到 A、B 和 C 三个主要频率点中, 点 C 的峰值最大, 代表这一频率出现得最为频繁, 从上文分析中可以看到它代表的是天文周期中岁差的周期因素。这说明在东攀剖面岁差级别的旋回表现得最为明显。

通常, 人们认为导致气候变化的 3 个轨道周期为偏心率, 斜率和岁差。地球轨道运动结构的变化影响了太阳辐射量的接收。也就是说, 不同的纬度接收太阳辐射量不同。偏心率是与地-日距离联系紧密的参数。地球轨道运动的偏心率非常小, 其变化也很小。因此, 偏心率的变化对于全年日照总量的影响可以忽略不计(小于 0.2%, 据 Berger<sup>[29]</sup>)。斜率是黄道面与赤道面的夹角, 变化于 22°~24.5°。斜率越大, 季节性旋回的波幅也就越大。斜率的变化导致了季节性程度的差异。与斜率有关的全年日照量的变化在高纬

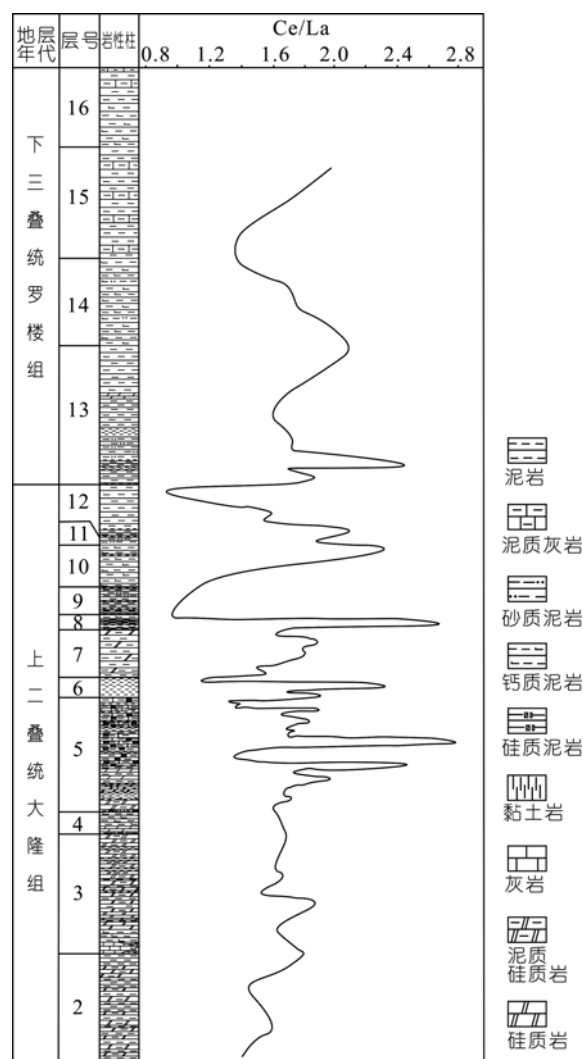


图 5 东攀二叠系-三叠系界线地层剖面 Ce/La 纵向变化曲线

度地区表现明显。岁差是指地球自转轴的进动。从原理上来说, 与岁差旋回有关的接收日照量的变化和季节的长短是由变化的地-日距离和变化的地球沿轨道运动的速度引起的。岁差决定了各个季节长短的变化, 并且由岁差引起的季节性日照量的变化在低纬度表现明显。东攀剖面岁差级别旋回之所以最为明显, 可能源于其古地理位于赤道附近。

## 4 结论

(1) 本文所应用的频谱分析方法是把时间序列看作是无数具有振幅和相位的随机振荡的周期的叠加。地球轨道参数的周期性变化影响了气候的变化, 这种变化以各种地质记录进而保存在沉积地层中, 包括磁化率、孢粉组合、岩性、地球化学元素变化、

同位素组成等. 因此选择合适的记录作为替代指标, 建立地质时间序列的随机模型, 对于地质过程的定量化及揭示地质过程的内部特征有着非常重要的意义.

(2) 广西东攀深水相二叠系-三叠系界线地层剖面地球化学资料频谱分析结果显示, 该剖面地层旋回厚度的比值与米兰柯维奇旋回的偏心率、斜率和岁差的周期比值有很好的对应关系, 因此可以认为该沉积地层中较好地保存了米兰柯维奇旋回, 气候是该沉积旋回形成的主控因素.

(3) 研究区所选地球化学资料中, Ce/La 曲线较其他地化指标更好地反映了由气候变化引起的地层旋回. 表明在地球化学替代指标选取上应尽量选取一些化学性质稳定, 且最能体现古气候变化的化学元素.

(4) 在米兰柯维奇旋回各参数中, 岁差对该剖面沉积旋回的影响最大.

**致谢** 在论文写作过程中与马丽艳进行了多次有意义的讨论, 评审专家提出宝贵修改意见, 在此一并表示感谢.

## 参 考 文 献

- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194: 1121—1132[DOI]
- Anderson R Y. A long geoclimatic record from the Permian. *J Geophys Res*, 1982, 87: 7285—7294
- Anderson R Y. Orbital forcing of evaporite sedimentation. In: Berger A, Imbrie J, Hays J, et al, eds. *Milankovitch and Climate*. Dordrecht: Dordrecht Reidel Publication Company, 1984. 147—162
- Fischer A G, Herbert T D. Stratification rhythms: Italo-American studies in the Umbrian facies. *Mem Soc Geol Italy*, 1986, 31: 45—51
- Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. High frequency glacio-eustatic sealevel oscillations with Milankovitch characteristics recorded in Middle Triassic platform carbonates in northern Italy. *Am J Sci*, 1987, 287: 853—892
- Goldhammer R K, Lehmann P J, Dunn P A. The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequence (Lower Ordovician EL Paso GP, West Texas) constraints from outcrop data and stratigraphic modeling. *J Sediment Petrol*, 1993, 63(3): 318—359
- Hinnov L A, Goldhammer R K. Spectral analysis of Middle Triassic Latemar limestone. *J Sediment Petrol*, 1991, 61: 1173—1193
- Osleger D A. Subtidal carbonate cycles: implications for allocyclic versus autocyclic controls. *Geology*, 1991, 19: 917—920[DOI]
- House M R. Devonian sedimentary microrhythms and a Givetian time scale. *Proc Ussher Soc*, 1991, 7: 392—395
- Hansen H J, Lojen S, Toft P, et al. Magnetic susceptibility and organic carbon isotopes of sediments across some marine and terrestrial Permian-Triassic boundaries. In: Yin H, Dickens J M, Shi G R, et al, eds. *Permian-Triassic Evolution of Tethys and Western Circum Pacific*. Amsterdam: Elsevier, 1999. 271—289
- Rampino M R, Prokoph A, Adler A. Tempo of the end-Permian event: high-resolution cyclostratigraphy at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 2000, 28: 643—646[DOI]
- Dolenec T, Lojen S, Ramovs A. The Permian-Triassic boundary in Western Slovenia (Idrijca Valley section): magnetostratigraphy, stable isotopes, and elemental variations. *Chem Geol*, 2001, 175: 175—190[DOI]
- Bai S L. Milankovitch cyclicity and time scale of the Middle and Upper Devonian. *Int Geol Rev*, 1995, 37: 1109—1114
- 江大勇, 郝维城, 白顺良. 广西泥盆系吉维特阶上部地层中的化学旋回与米兰柯维奇偏心率旋回的关系. *科学通报*, 1999, 44(9): 989—992
- 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
- 蒙有言, 周秋娥, 李玉坤. 凭祥-东门大断裂中段特征及控岩控相初析——以宁明-板利地区为例. *广西地质*, 2002, 15(4): 1—4
- 蒙有言, 冯庆来, 何卫红, 等. 广西柳桥深水相区古生代-中生代之交沉积特征及地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(增刊): 25—36
- 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(2): 22—26
- 蒙有言, 冯庆来, 何卫红, 等. 桂西南柳桥地区深水相二叠系-三叠系界线剖面. *地层学杂志*, 2005, 29(4): 323—332
- 努斯鲍默 H J, 著. 胡光锐, 译. *快速傅里叶变换和卷积算法*. 上海: 科学技术文献出版社, 1984. 98—130
- Cara M. Time-frequency analysis. *Eos Trans Am Geophys Union*, 1982, 63(51): 12—20
- 李震. 一种利用傅里叶快速变换实现频谱分析的方法. *南昌高专学报*, 2002, (2): 58—60
- Arthur M A, Dean W E. A holistic geochemical approach to cyclostratigraphy: examples from Cretaceous pelagic limestone sequences. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin: Springer, 1991. 126—166
- Berger A, Loutre M F, Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 1992, 255: 560—566[DOI]
- Schwarzacher W. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory*. Amsterdam: Elsevier, 1993. 29—48
- Berger A, Loutre M F. Astronomical Forcing Through Geological Time. In: De Boer P L, Smith D G, eds. *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Oxford: Blackwell Science Publications, 1994. 15—24
- Bai S L, Bai Z Q, Ma X P, et al. Devonian Events and Biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press, 1994. 13—45, 62—75
- 郝维城, 白顺良, 江大勇. 法门阶上部米兰柯维奇旋回在中国发育的一致性. *科学通报*, 2000, 45(15): 1654—1660
- Berger A L. Milankovitch theory and climate. *Rev Geophys*, 1988, 26: 624—657