

赵韶华, 王雅宁, 张尚锋, 等. 南海北部中新世古气候分析——基于天文旋回的冷却事件响应[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(4): 53-62.

ZHAO Shaohua, WANG Yaning, ZHANG Shangfeng, et al. Miocene paleoclimate analysis of the northern South China Sea: response to cooling events based on astronomical cycles[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(4): 53-62.

# 南海北部中新世古气候分析

## ——基于天文旋回的冷却事件响应

赵韶华<sup>1,2</sup>, 王雅宁<sup>1,2\*</sup>, 张尚锋<sup>1,2</sup>, 朱锐<sup>1,2</sup>, 徐恩泽<sup>1</sup>, 易志凤<sup>1</sup>, 巩高阳<sup>1</sup>, 王玉瑶<sup>1</sup>, 刘浩童<sup>1</sup>

(1 长江大学地球科学学院, 武汉 430000; 2 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北荆州 434000)

**摘要:** 中国南海北部蕴藏着丰富的油气资源, 分析该区域中新世古气候, 对其油气资源开发有着极其重要的意义。综合运用 Matlab 软件频谱分析及滤波方法深入分析南海北部珠江口盆地惠陆低凸起中部 A 井 1 949.12~2 020 m 自然伽马测井数据 (GR) 的天文年代标尺, 精确推测出对应时间段的古气候事件, 并分析造成此事件的原因。研究结果显示, 该 GR 数据序列的功率谱显示出 68.8、16.99、7.81、3.74 m 厚度的沉积旋回周期, 其中, 68.8 m 和 16.99 m 厚度的沉积旋回分别对应 405 ka 的长偏心率周期信号和 100 ka 的短偏心率周期信号; 7.81 m 的沉积旋回对应 46 ka 的斜率周期信号; 3.74 m 的沉积旋回对应 22 ka 的岁差周期信号。由此表明, A 井的沉积地层记录了天文轨道信号 (偏心率、斜率、岁差)。根据建立的天文年代标尺确定整个韩江组地质年龄约为 10.2~16.5 Ma, 推测出 14~15 Ma 期间可能由于偏心率振幅降低发生了冷却事件。

**关键词:** 古气候分析; 冷却事件; 米兰科维奇旋回; Matlab; 频谱分析; 珠江口盆地; 南海

中图分类号: P736.2; P539.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.266

## 0 引言

气候演化是当今人类最关心的问题之一, 对研究地球科学具有极其重要的意义。随着青藏高原在中新世的隆升, 古气候变化达到高峰, 全球古气候变化信息丰富, 这对现代气候模式的研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。自新生代以来, 全球气候普遍变冷, 极地无冰“温室地球”从古新世到始新世早期转变为现在的极地冰雪覆盖的“冰窖地球”<sup>[1]</sup>。在这一过程中, 一些重要的气候变化事件引起了许多地质学家和古气候学家的关注 (图 1), 如古新世至始新世热最大值 (PETM)、渐新世初骤冷事件 (Oi-1)、早

中新世降温事件 (Mi-1)、中中新世变冷事件 (Mi-3) 和北极冰盖扩展事件<sup>[3-7]</sup>。中新世是全球新生代气候演化的重要时期之一, 主要表现为大陆漂移和造山活动。这些构造活动导致了气候和海洋环境变化, 如南极冰盖的扩张和南极循环加强, 导致深海沉积间断增加、深海区块的发展、垂直温度分层的海水和海洋环流的变化以及全球气候和生态系统的进化。因此, 中新世气候变化已成为地球科学研究的一个热点。边缘海作为连接海洋和陆地生态系统的桥梁, 受全球气候变化、构造环境、季风等区域因素的影响较大, 通常对全球变化具有“放大”或“增强”作用, 并且边缘海沿岸地区陆源物质丰富, 沉积速率高, 海相化石丰富, 可为古气候研究提供丰富的资料。

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇地带, 是西太平洋典型的边缘海。南海由于其独特的形态特征和地理位置 (东亚季风影响区), 对全球气候变化非常敏感。同时, 西太平洋深水沉积速率高、碳酸盐保存条件好, 是古气候研究的理想场所<sup>[4]</sup>。由于第四纪古气候和古环境

收稿日期: 2021-10-13

资助项目: “十三五”国家重大科技专项 (2017ZX05032-002-002); 国家自然科学基金 (41472098)

作者简介: 赵韶华 (1996—), 女, 在读硕士, 主要从事应用沉积学方面的研究工作。E-mail: 814538878@qq.com

\* 通讯作者: 王雅宁 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积储层、层序地层及勘探目标评价方面的研究工作。E-mail: 156006285@qq.com

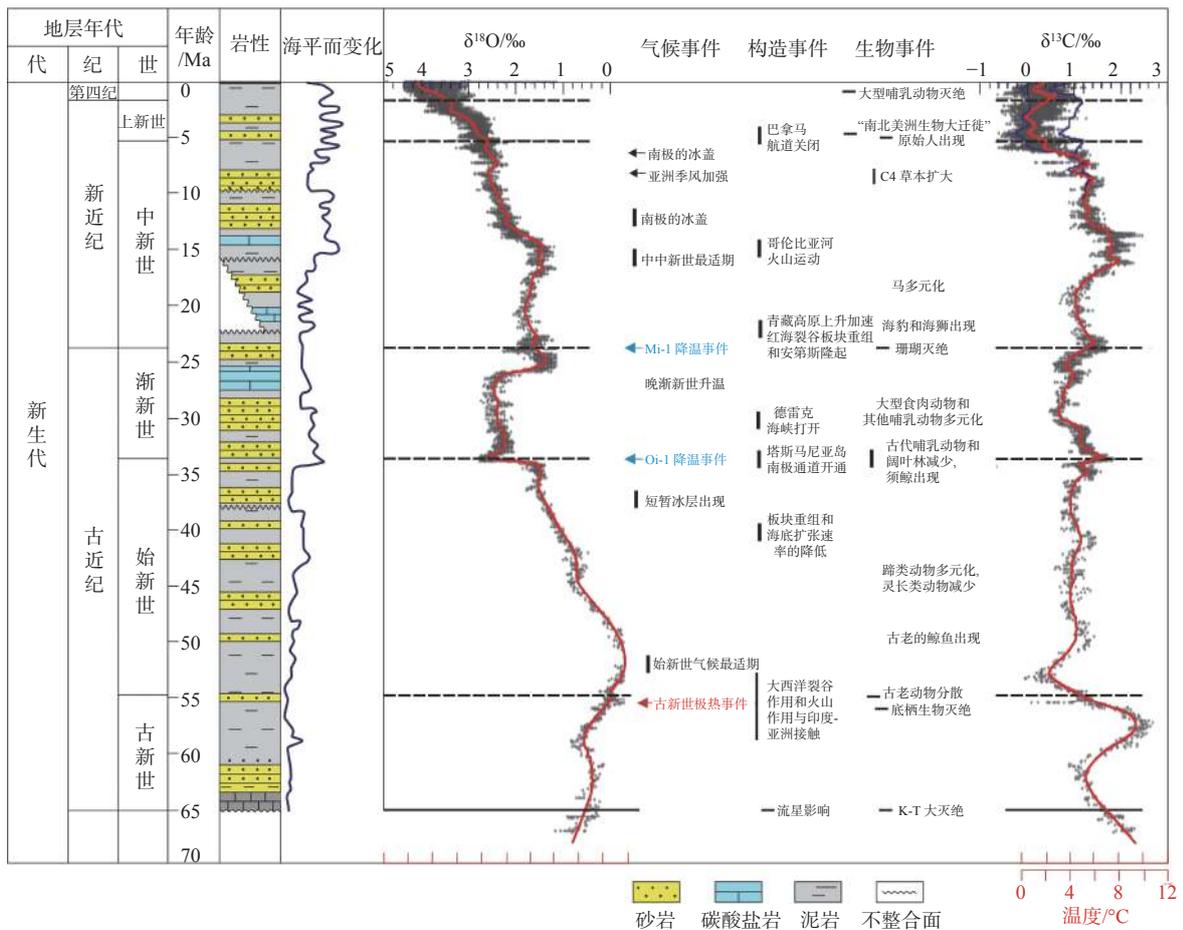


图1 深海氧、碳同位素曲线与新生代主要地质事件

Fig.1 Oxygen and carbon isotope curves of deep sea and major geological events during the Cenozoic

变化与人类最密切相关,对南海北部古气候方面的研究主要集中在第四纪,很少涉及到中新世古气候事件(中中新世冷却事件)。为了解南海北部中新世古气候事件,寻找合适的古环境演化替代指标具有重要意义。大量研究结果发现,由于目前研究中多以地球物理、地球化学等参数作为古气候替代性指标,选取自然伽马测井资料与天文周期相结合,建立天文年代表,更能较好地推测出南海北部冷却事件。

结合天文旋回研究古气候问题越来越受到广大学者的关注,频谱分析是研究天文旋回的核心,而 Matlab 软件正好可以很好地实现频谱分析。Matlab 提供了多种测井曲线频谱分析方法,可以更加方便地解决测井曲线的数字化。频谱分析后,对其结果进行滤波、天文调谐,最后构建天文年代表尺。依据天文年代表尺对研究区域主要古气候事件进行推测,为科研人员对某一时期古气候事件的确定提供了新的思路。至今,前人已经运用频谱分析方法对旋回地层进行了一些研究,发现沉积旋回

与旋回厚度之间具有很好的一致性,并取得了地层中保存的沉积旋回周期;同时还结合 Matlab 中自带的函数编制了旋回分析的预处理程序,用以识别沉积物中米兰柯维奇旋回信号<sup>[8-12]</sup>。然而目前的研究仅限于结合频谱分析对米兰科维奇旋回信号进行识别,大致推测出主要古气候事件,还不足以精确到某时期古气候事件,从而忽略了冷却事件。因此,在前人研究的基础上,本次研究对南海北部珠江口盆地中新世韩江组运用频谱分析方法进行天文旋回研究,建立起准确可靠的天文年代表尺,结合中国中新世主要地质事件以及古气候特征,推测中新世韩江组在 14~15 Ma 期间可能发生了冷却事件。

### 1 地质背景

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇区,其形成演化与海盆扩张和三大板块相对运动密切相关。对于南海形成的动力学机制,国内外学者做了大量的研究工作,并提出了

以下几种模式: ①弧后扩张模式; ②“印藏碰撞-华南大陆挤出-左行拉分”模式; ③“地幔上涌”模式; ④陆缘伸展扩张模式; ⑤大西洋型海底扩张模式。南海海底磁条带及构造特征揭示了南海海盆的形成是区域拉张的结果。南海盆地的演化历史可以分为 3 个阶段: ①早古新世的裂谷(海底扩张前)阶段; ②晚古新世—早中新世的扩张阶段; ③晚中新世的扩张后(闭合)阶段<sup>[4]</sup>。

珠江口盆地位于南海北部陆架和陆坡上的大型新生代沉积盆地<sup>[13]</sup>。沉积岩厚度逾万米, 东部为东沙隆起带, 南部为西沙-东沙隆起带, 西部为海南隆起带和莺歌海盆地, 北部为万山隆起带, 西南部为台湾盆地。本文研究的层中新世韩江组位于珠江口盆地珠一坳陷惠陆低凸起。惠陆低凸起沿 NW—SE 向呈条带状展布, 其东北侧和西南侧分别为陆丰凹陷及惠州凹陷。

新生代珠江口盆地具有“下断上拗”的双层结构。基底为前古近纪变质岩、火山岩, 新生代地层自下而上依次为神狐组、文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组和万山组。其中, 古近系神狐组为冲积-洪积杂色泥岩、砂岩夹火山碎屑沉积, 文昌组为湖相泥岩夹砂岩, 恩平组为河湖、沼泽和三角洲相砂泥岩夹煤层。新近系珠海组为海陆过渡相砂、泥岩沉积, 珠江组、韩江组、粤海组和万山组为海相三角洲和浅海陆棚相大套连续的中—细粒砂岩、粉砂岩、泥岩和局部发育的台地相碳酸盐岩沉积<sup>[14-16]</sup>。A 井位于惠陆低凸起的中部(图 2)。钻孔钻遇的新近系自上而下为万山组、粤海组、韩江组和珠江组。中中新世韩江组沉积期是裂后沉降阶段, 构造运动不活跃, 接受了大量的沉积物堆积, 适合天文旋回分析。

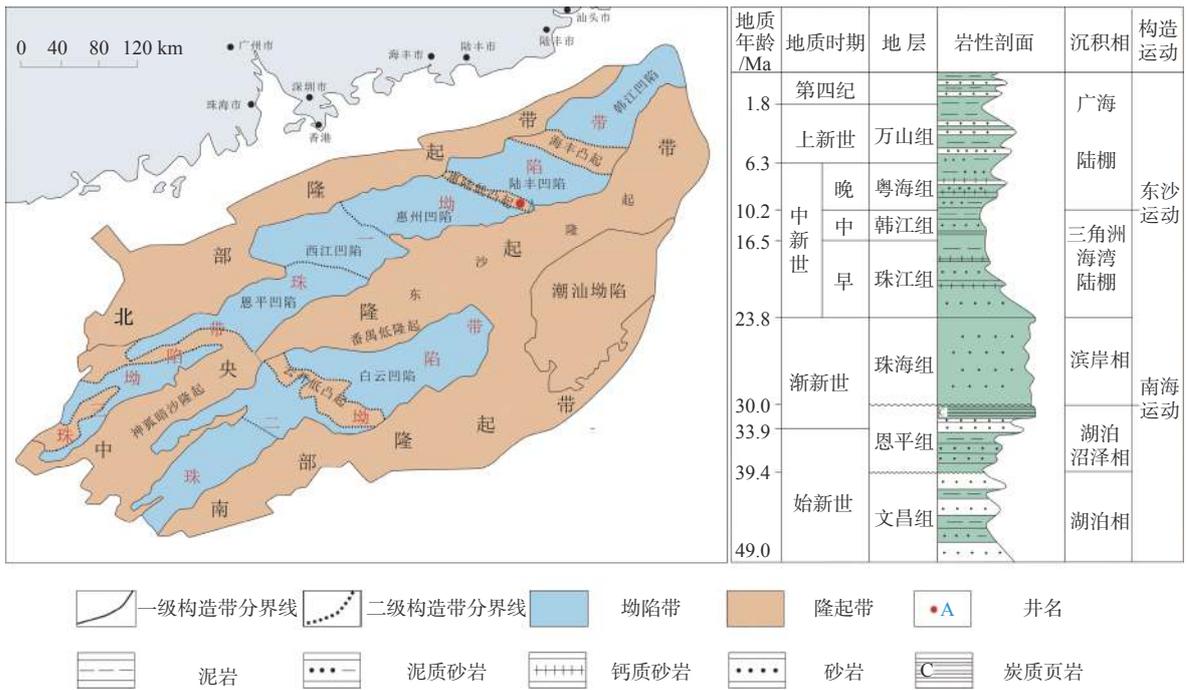


图 2 珠江口盆地惠州凹陷构造位置及综合柱状图<sup>[17-18]</sup>

Fig.2 Structural location and comprehensive histogram of Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin<sup>[17-18]</sup>

## 2 天文旋回分析

### 2.1 分析过程

#### (1) 数据准备

在天文旋回分析过程中一般多用磁化率和自然伽马曲线等测井数据资料。与其他测井曲线相比, 自然伽马曲线利用放射衰变原理, 因放射性不

同而对地层泥质含量的改变有不同反应, 还可以看出古环境、古气候的改变; 同时, 自然伽玛测井具有取样点间隔均匀、测点连续的特点, 故本文在对珠江口盆地惠陆低凸起中部地层进行古气候分析过程中主要采用自然伽马数据资料。

#### (2) 数据处理

一般的采样数据多以地球物理、地球化学等参数作为古气候替代性的测量指标, 其中往往包含一些随机的干扰或者其他非时间环境的影响因素, 所

以在频谱分析前往往需要滤除掉这些不必要的频率,但是数据经过多次滤波后,在频谱分析前再次滤波会损失一些有用的频率,从而导致部分重要数据的丢失,故本文在数据处理前期未对数据进行先过滤。傅里叶变换将整个数据的长度看作一个周期,将整个数据的平均值压制成线性趋势,这样很难识别一些有用的高频数据成分,所以在分析前必须去除均值和线性趋势。详细数据处理过程为:①调用 xlsread 函数或者直接使用导入工具导入自然伽马测井数据;②通过 Matlab 中 Sampling rate 校验 A 井为等间距数据,其采样间距为 0.125 m,根据采样定理,采样间距不低于 1/4 个岁差周期, A 井采样间距满足采样定理,因此不需要插值处理<sup>[19]</sup>;③使用 mean 函数去均值;④使用 detrend 函数去除线性趋势。

### (3) 频谱分析

通过调用下文基于 Matlab 实现频谱分析的程序来识别地层中的旋回和因沉积速率变化产生的旋回波动。本研究应用 Matlab 中的 fft 函数对 GR 数据进行傅里叶变换,将深度域上的数据序列转变为频率域的数据序列;同时调用 robust 函数进行稳健回归分析,取不同的参数,可得到不同置信区间,本文采用 95% 置信曲线对以上结果进行分析。

### (4) 滤波

对频谱分析后的数据序列分析,识别出研究区域中的天文旋回主控频率;再通过高斯带通滤波提取出代表长偏心率 and 短偏心率的 天文旋回,滤除掉与天文旋回无关的“噪音”;然后通过天文调谐将深度域转化为时间域。

### (5) 建立天文年代标尺

根据计算不同的米兰科维奇旋回周期的个数来建立“浮动”的天文年代标尺,结合绝对年龄锚点建立绝对天文年代标尺。

### (6) 古气候事件分析

根据建立的天文年代标尺结合偏心率的振幅,分析判断珠江口盆地韩江组长偏心率信号减弱造成的古气候事件的地质年龄,并结合 405 ka 滤波曲线推测此事件的发生原因。

## 2.2 频谱分析方法

目前常见的频谱分析方法主要包括多窗谱分析(MTM)、经典谱估计法、最大熵谱法(MEM)、演化图谱法。多窗口分析法(MTM)是一种适用于短序列、高噪音背景下,低方差、高分辨率的分析方法,其优点是具有频率分辨稳定性以及较好的抗噪性,

是目前旋回地层学研究中较为常用的频谱分析方法。经典谱估计是一种利用傅里叶变换实现的谱分析方法,其缺点是功率谱分辨率低,其中较常见的是自相关法(BTM)和周期图法:自相关法是先利用不同的窗函数对自相关估计进行加权,然后对加权后的自相关估计进行傅里叶变换;周期图法是对采样数据进行傅里叶变换,然后对结果进行平方。最大熵谱(MEM)是确保信息熵最大,然后用迭代法推导出未知相关函数,虽然其计算结果的谱峰比较尖锐,分辨率比常规方法高,但计算过程会产生不可靠的谱及假峰值,并且有时候谱峰会比常规周期的相位略微偏移。演化图谱法是给定一个窗口值,其所计算的频谱足够检测这一段的沉积周期,不仅可以显示不同波段的波在时间(深度)域和频率域 2 个域内的变化特征,而且还可显示出研究层段的沉积速率的变化,并可根据演化图谱的变化判断可能存在的沉积间断。

### 2.2.1 基于 Matlab 实现频谱分析的程序

基于 Matlab 实现的频谱分析流程(图 3)包括以下步骤:

①将数据保存为表格文件,每个表格内数据需按从小到大顺序排列;②调用 xlsread 函数或者使用导入工具导入深度(时间)和伽马测井数据;③检查数据是否等间距,若等间距直接进行下一步,若不等间距,深度按 0.025 m 的间隔进行插值计算;④使用 mean 函数对滤波后的数据进行中心化变换;⑤使用 detrend 函数去除趋势。至此前期的数据处理步骤结束,接着使用傅里叶变换 fft 函数进行频

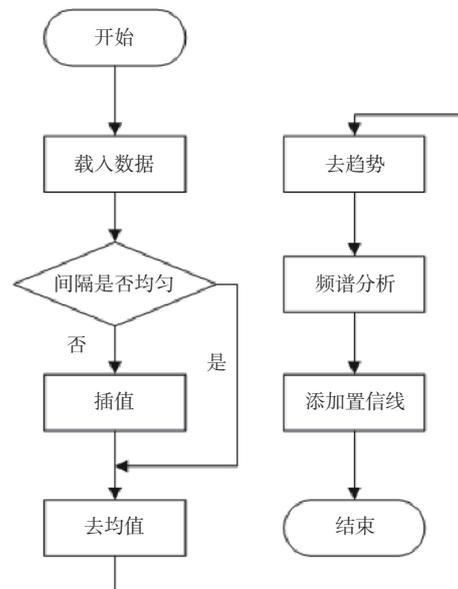


图 3 基于 Matlab 的流程

Fig.3 Matlab based flow chart

谱分析。代码如下所示:

预处理数据:

```
ys=spline1(d,y,di,'spline');% 插值
ys = detrend(ys);% 去除线性趋势
```

代码中的第 1 个  $ys$  是测井曲线数据插值后得到的数据矩阵, 在插值函数中  $d$  为导入的深度数据矩阵,  $y$  为导入的古气候替代性指标的测量值数据矩阵, 而  $di$  则是经过插值计算后得到的深度序列, 其代码结构如下:

```
di=1249.12:0.025:2020;
```

式中: 1249.12 为起始深度, m;

0.025 为插值间隔, m;

2020 为最终深度, m。

对上述预处理后的数据, 利用 Matlab 中的 `fft` 函数进行频谱分析, 其调用代码如下:

```
Y = fft(ys, N);
```

式中:  $Y$  为测井曲线的快速傅立叶变换值;

`fft` 为快速傅立叶变换函数;

$N$  为数据  $ys$  的长度。

频谱值  $Y$  对应于频率  $f$  的谐振能量为:

```
Pyy = Y.*conj(Y);
```

式中:  $Pyy$  为频率  $f$  的谐振能量值;

$Y$  为频率  $f$  的快速傅立叶变换值;

`conj(Y)` 为  $Y$  的共轭复数<sup>[8]</sup>。

```
f=fs*(0:round(N/2))/N;% 求对应的频率序列
```

式中:  $f$  为频率值;

$fs$  为采样频率, 是采样间隔或插值间隔的倒数。

因为要求的功率是模数, 而得到的频谱曲线是左右对称的, 所以只需要取一半, `round(N/2)` 是对  $N/2$  进行取整<sup>[14]</sup>。

```
plot(f, Pyy(1:round(N/2)+1));% 能量谱图
```

```
b = robustfit(x, y, wfun, tune, const);% 回归分析
```

```
plot(x, b(1)+b(2)*x);% 绘图
```

式中:  $b$  为返回系数估计向量 `wfun` 指定一个加权函数;

`tune` 为调协常数;

`const` 的值为 `on` 时添加一个常数项, 为 `off` 时忽略常数项。

对频谱分析得到的功率谱图进行分析, 需要计算多个数据点寻找偏心率、斜率和岁差, 相对比较麻烦, 故需要结合回归分析, 选择在置信曲线以上的主频率, 这样需要计算的数据量减少, 更方便进行分析得到旋回周期。稳健拟合对数据的拟合程度好些, 忽略了异常值, 因此, 对于均匀采样间隔数

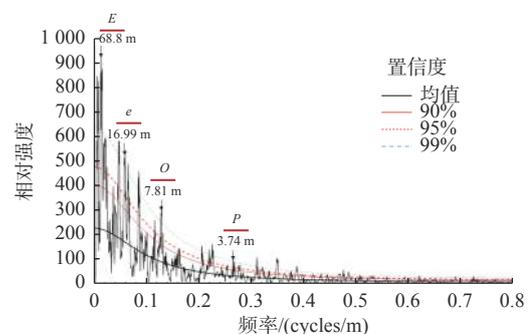
据在 Matlab 中调用 `robust` 函数进行稳健回归分析, 取不同的参数, 得到不同置信区间, 结合置信曲线分析, 通常采用置信度 95% 以上的数据点; 也可以结合 Matlab 自带的 `cftool` 工具分析。对于不均匀采样间隔的数据可以采用基于 Lomb-Scargle 算法的 `Redfit` 软件对频谱分析后的数据进行分析得到置信曲线。

## 3 结果和讨论

### 3.1 频谱分析结果

对珠江口盆地惠陆低凸起中部 A 井自然伽马测井曲线进行数据处理, 再使用快速傅里叶变换 `fft` 频谱分析, 根据相应的频谱分析图来确定相对应的主要频率曲线, 以识别主要的频谱曲线值, 计算得到相应的周期<sup>[20-22]</sup>。通过频谱分析得到的主要周期与分布范围有很好的对应关系, 可以认为这些周期是由米兰科维奇周期引起的。控制这些旋回形成的因素是米兰科维奇旋回引起的古气候旋回。

测井资料必须记录沉积结构、构造、岩性和岩石等的周期性变化, 这是高频旋回研究的主要资料。能量谱中能量的相对强度表明了地层中频率周期的重要性<sup>[23]</sup>。能量值越高, 该周期在地层中出现的频率越高<sup>[24]</sup>。通过 `fft` 频谱分析来识别沉积物中的米兰科维奇旋回信号, 将深度域上的数据序列转变为频率域的数据序列, 横坐标为频率, 纵坐标为能量, 在深度域频谱分析过程中频率单位为 (cycles/m), 在时间域频谱分析过程中频率单位为 (cycles/ka)。频谱分析结果结合置信曲线分析 (图 4), 通常采用置信度 95% 以上的数据点, 对 95%~99% 的数据点谨慎选择使用。



图中  $E$ 、 $e$ 、 $O$ 、 $P$  分别为长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回

图 4 珠江口盆地 A 井 (1249.12~2020 m) 自然伽马测井曲线 `fft` 频谱分析结果

Fig.4 The `fft` spectrum analysis results of gamma logging curve in Well A (1249.12~2020 m), Pearl River Mouth Basin

对 A 井的 GR 测井数据序列进行的深度域频谱分析表明, GR 数据序列的功率谱具有 68.8、16.99、7.81、3.74 m 的峰值频率, 同时, 它们的比例大致符合 50 Ma 以来地球轨道周期的长偏心率周期( $E$ )、短偏心率周期( $e$ )、斜率周期( $O$ )、岁差周期( $P$ )的比值( $E:e:O:P=20:5:2:1$ )<sup>[25]</sup>。68.8 m 和 16.99 m 厚度的沉积旋回分别对应 405 ka 的长偏心率周期信号和 100 ka 的短偏心率周期信号; 7.81 m 厚度的沉积旋回对应 46 ka 的斜率周期信号; 3.74 m 厚度的沉积旋回对应 22 ka 的岁差周期信号。从频谱分析图可以看出, 68.8 m 处的波峰明显, 其他厚度波峰不太明显, 表明 A 井沉积过程中, 长偏心率周期的影响最大, 斜率、岁差可能受气候周期等因素的干扰, 信息记录能量较弱, 即频率的能量强度小, 波峰不明显。由此表明, A 井的沉积地层记录了天文轨道信号(偏心率、斜率、岁差)。

### 3.2 滤波及天文调谐结果

在频谱分析的结果上, 将 A 井代表长偏心率和短偏心率的沉积旋回通过滤波的方式提取出来。对 68.8 m 的 GR 信号进行高斯带通滤波, 识别出了 19 个长偏心率周期; 对 16.99 m 的 GR 信号进行高斯带通滤波, 识别出了 49 个短偏心率周期(图 5)。

通过以上分析可以确定, A 井识别出来的 38.2 m 沉积旋回对应于 405 ka 长偏心率周期, 利用 405 ka 对深度域的 GR 数据序列进行天文调谐, 将 GR 数据序列从深度域转换到时间域。由于目前只有 405 ka 的长偏心率信号较稳定, 故本次研究以从惠州凹陷 A 井 GR 曲线中提取出来的 405 ka 长偏心率滤波曲线为调谐曲线, 100 ka 的短偏心率曲线为参考曲线进行天文调谐。调谐结果显示惠陆低凸

起中部 A 井持续时间为 6.3 Ma。

### 3.3 建立天文年代标尺

经过天文调谐后的韩江组 771 m 厚的 GR 数据序列记录了该段沉积地层的持续时间约为 6.3 Ma, 秦国权<sup>[26]</sup>根据浮游有孔虫、钙质超微以及孢粉组合等资料为依据推测出中新世韩江组底界面的地质年龄为 16.5 Ma, 本文将此点作为时间锚点起始点。基于上述分析, 以 405 ka 调谐的 GR 测井曲线数据序列建立惠陆低凸起韩江组的天文地质年代框架, 建立绝对的天文年代标尺(图 6)<sup>[27-28]</sup>。计算得出惠州凹陷韩江组顶界面的地质年龄为 10.2 Ma, 底界面的地质年龄为 16.5 Ma。

### 3.4 古气候事件分析

由以上建立的天文年代标尺大概确定整个韩江组地质年龄为 10.2~16.5 Ma。结合秦国权<sup>[14]</sup>2000 年编制的珠江口盆地新生代地层综合柱状剖面图, 确定韩江组底部为 16.5 Ma, 持续时间约为 6.3 Ma。由此可以证明本文根据天文年代标尺推算的珠江口盆地中新世韩江组地质年龄是可靠的。在此期间新生代出现了重要的气候事件, 即中新世中期全球海洋和大气发生了冷却事件。由先前温暖的气候突然发生气温大幅度下降。冷却后全球又迅速回温并且气候条件达到中中新世最适宜期(MMCO)。由以上天文年代标尺看, 在 14~15 Ma, 405 ka 偏心率的振幅明显降低, 冷却事件可能是由于偏心率变化导致。在此前, 前人通过对柴达木盆地路乐河剖面红度进行频谱分析发现, 盆地内新生代气候变化受天文轨道变化驱动, 干旱炎热或温暖湿润期, 偏心率强度较大, 寒冷期偏心率强度减

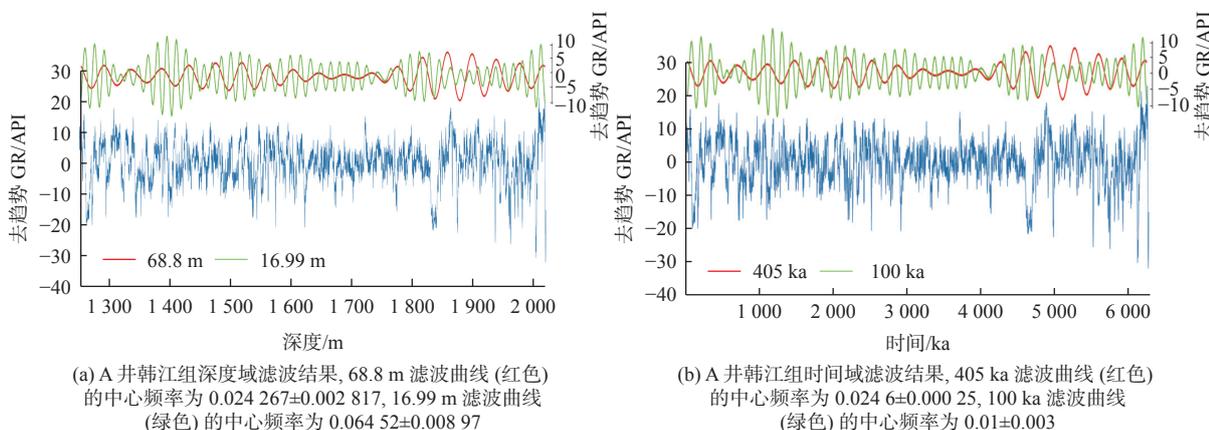
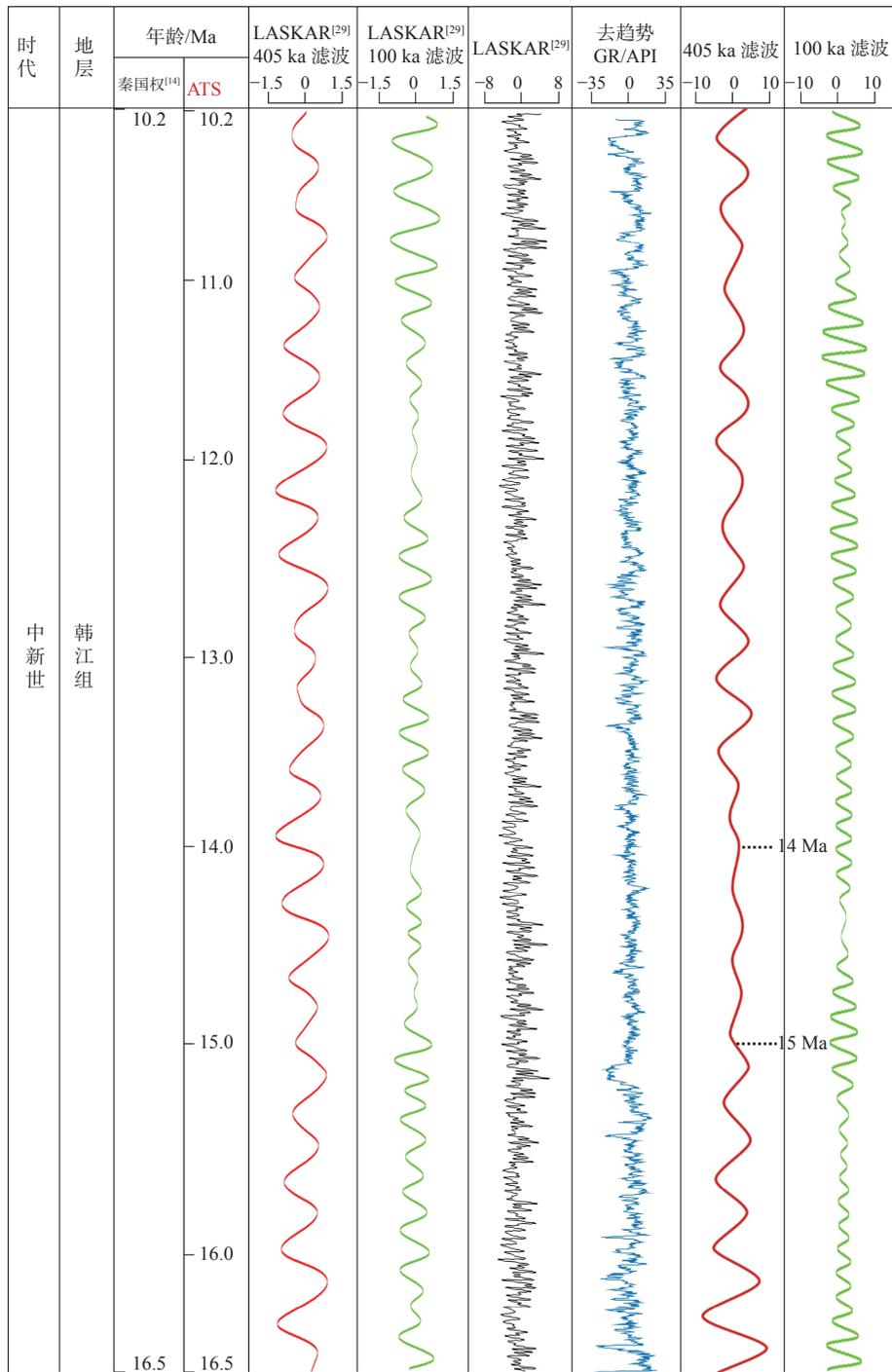


图 5 A 井韩江组深度域与时间域滤波结果

Fig.5 Filtering results in depth domain and time domain of Hanjiang Formation in Well A



通过自然 GR 测井数据序列建立的天文年代标尺长达 6.3 Ma(年代区间为 16.5~10.2 Ma)。从左至右的 405 ka 理论滤波曲线(橘红色)、100 ka 理论滤波曲线(浅绿色)和理论 ETP 轨道曲线(黑色)均来自 LASKAR<sup>[29]</sup>

图 6 A 井韩江组绝对天文年代标尺

Fig.6 Absolute astronomical chronology of Hanjiang Formation in Well A

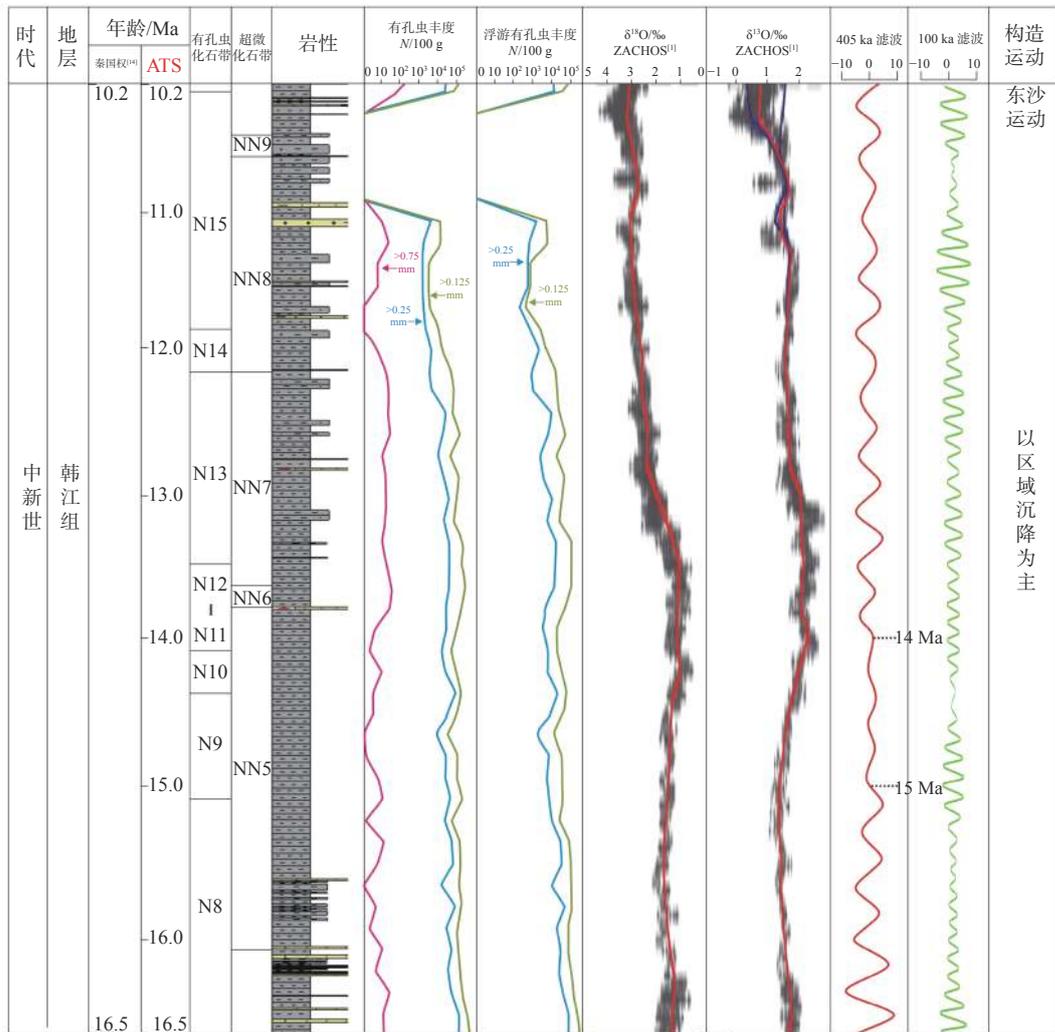
小<sup>[30]</sup>。研究发现,中新世时期古气候的变化达到顶峰,在中中新世时期,西北内陆干旱区范围变广,东部季风增强,并且在 14~15 Ma 时期全球海洋和大气发生冷却事件<sup>[3]</sup>。因此,推测珠江口盆地中新世韩江组 14~15 Ma 的偏心率低振幅以及最小值对应了中中新世期间冷却事件。

通过对韩江组自然伽马曲线进行频谱分析以

及滤波建立了天文年代标尺,大概确定韩江组的顶界年龄为 10.2 Ma。基于天文年代标尺对中中新世韩江组古气候事件进行分析,可以推测在 14~15 Ma 之间可能由于偏心率振幅降低发生了冷却事件,之后气温又迅速回温达到中中新世最适宜期(MMCO)(图 7)。浮游有孔虫主要是反映海水表层温度,用于研究古气候变化。在 14~15 Ma 期间,可能由于

海水表层温度降低导致浮游有孔虫减少,使得关于在此期间发生冷却事件的推测得到了进一步验证<sup>[31]</sup>。秦国权<sup>[26]</sup>对有孔虫化石的定量分析发现,上中新世/中中新世界线附近是有孔虫化石富集段,是珠江口盆地二级层序中主要最大海泛面附近密集层的所在位置,13 Ma前应是中中新世早、中期,这一年龄值应落在浮游有孔虫 N13-N10 带的范围内(相当于超微 NN7 带下部)。前人利用地磁极性分带和珠江口盆地样品古生物建立了珠江口盆地有孔虫和超微各自的生物带年代对应表<sup>[14]</sup>。依据前人建立

的有孔虫生物带年代对应表对比出浮游有孔虫 N16-N15 带界线对应 10.5 Ma, N8-N7 带界线对应 16.4 Ma; 依据超微生物带年代对应表对比出超微 NN9-NN8 带对应 10.5 Ma, NN5-NN4 带对应 16.2 Ma, 可推测出珠江口盆地韩江组地质年代区间大致为 6.5~10.2 Ma, 这与基于频谱分析建立的天文年代标尺所推测的珠江口盆地韩江组的地质年龄一致, 由此可以验证使用频谱分析方法研究古气候事件是可靠的。



405 ka 理论滤波曲线(橘红色)、100 ka 理论滤波曲线(浅绿色)和理论ETP 轨道曲线(黑色)均来自 LASKAR<sup>[29]</sup>

图 7 A 井韩江组有孔虫、浮游有孔虫丰度、氧碳同位素和滤波曲线对比

Fig.7 Comparison of foraminifera and planktonic foraminifera abundance, oxygen and carbon isotopes and filtering curves in Well A of Hanjiang Formation

### 4 结论

频谱分析方法部分的整个程序是结合 Matlab 的自带函数,编写了对测井曲线进行频谱分析的程

序。该程序对数据可实现如下功能:插值、去均值、去除线性趋势等数据预处理;调用 fft 函数对预处理后的数据进行频谱分析,并调用 robust 函数编写置信曲线进行结果分析。本方法可以完成沉积物中米兰科维奇旋回识别前的各种数据处理要求,并

对结果结合置信曲线进行分析。通过调用此程序可以对自然伽马测井曲线进行频谱分析判别米兰柯维奇周期,相对于自带的工具箱,更加方便处理分析。

通过结合天文旋回分析方法对研究区域进行频谱分析,揭示出珠江口盆地的沉积过程受到了偏心率、斜率以及岁差的影响。基于频谱分析的结果进行滤波提取出长偏心率和短偏心率的天文旋回,通过天文调谐将深度域转化为时间域,可以计算出珠江口盆地韩江组地质年龄持续时间约为 6.3 Ma,以秦国权<sup>[26]</sup>推测的中新世韩江组底界面 16.5 Ma 作为时间锚点起始点,建立了珠江口盆地中新世韩江组天文年代标尺,最终推测出珠江口盆地中中新世 14~15 Ma 期间可能由于偏心率变化导致气温突然骤降而发生了冷却事件。冷却事件后,全球迅速回温,并且气候达到中中新世最适宜期。已有古生物分析结果(有孔虫、超微化石带)等资料也验证了这一结论的正确性,由此可见,天文旋回可以较准确地推测出古气候事件,为古气候研究提供新的方法和思路。

#### 参考文献:

- [1] ZACHOS J, PAGANI M, SLOAN L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [2] 张立海, 刘凤民, 张业成. 青藏高原隆起对中国地质自然环境影响[C]//青藏高原地质过程与环境灾害效应文集. 中国地质学会, 中国地震学会, 2005.
- [3] 薛莉, 张世涛. 中国中新世地质事件、古气候对桦木属(桦木科)植物影响及其主要分布地层简述[J]. *中国水运*, 2019, 19(4): 122-123.
- [4] 薛力园. 南海北部陆丰凹陷中新世古环境演化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [5] XING Y, UTESCHER T, JACQUES F M B, et al. Paleoclimatic estimation reveals a weak winter monsoon in southwestern China during the Late Miocene: evidence from plant macrofossils[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 358/360: 19-26.
- [6] 刘欣雨, 张旗, 张成立, 等. 中新世全球重要事件及其意义: 数据挖掘的启示[J]. *科学通报*, 2017, 62(15): 1645-1654.
- [7] 李玲, 郑洪波, 赵良, 等. 中新世以来长江下游和黄土高原地区黏土矿物的时空变化及古气候意义[J]. *古地理学报*, 2011, 13(3): 355-362.
- [8] 李凤杰, 王多云, 郑希民, 等. 测井曲线频谱分析在含煤地层沉积旋回研究中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(6): 14-18.
- [9] 李新虎. 测井曲线拐点在测井层序地层分析中的应用研究[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(6): 815-819.
- [10] 李凤杰, 赵俊兴. 基于Matlab的测井曲线频谱分析及其在地质研究中的应用: 以川东北地区二叠系长兴组为例[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 531-534.
- [11] 赵庆乐, 张世红, 王婷婷, 等. 利用Matlab函数识别沉积物中的米兰柯维奇旋回信号[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(5): 1217-1220.
- [12] 高迪, 郭变青, 邵龙义, 等. 基于MATLAB的小波变换在沉积旋回研究中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2012, 34(4): 444-448.
- [13] 刘洋, 吴怀春, 张世红, 等. 珠江口盆地珠—坳陷韩江组—万山组旋回地层学[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(3): 411-423.
- [14] 秦国权. 珠江口盆地新生代地层问题讨论及综合柱状剖面图编制[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(1): 22-29.
- [15] 范时清, 廖健雄. 中国南海北部新生代古环境的变迁[J]. *广西科学院学报*, 2005, 2(1): 51-55.
- [16] 邓宏文, 郑文波. 珠江口盆地惠州凹陷古近系珠海组近海湖汐沉积特征[J]. *现代地质*, 2009, 23(5): 767-775.
- [17] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪源-汇系统耦合研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020.
- [18] 王福国, 梅廉夫, 施和生, 等. 珠江口盆地珠—坳陷古近系构造样式分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(4): 448-454.
- [19] 赵庆乐, 吴怀春, 李海燕, 等. 利用采样定理与沉积速率确定旋回分析最佳采样间隔[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(1): 12-16.
- [20] 谢国根, 郑俊. 基于Matlab小波分析的旋回划分及其地质意义: 以东海盆地西湖凹陷保椒斜坡带北段Pb-1井平湖组为例[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(2): 169-172.
- [21] 郑希民, 郭彦如, 刘化清, 等. 应用自然伽马测井曲线小波分析划分陆相坳陷盆地三级层序的方法: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(5): 672-676.
- [22] 李江涛, 李增学, 余继峰, 等. 基于测井数据小波变换的层序地层对比: 以鲁西和济阳地区石炭、二叠系含煤地层为例[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 639-645.
- [23] 伊海生. 地层记录中旋回层序界面的识别方法及原理[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 991-998.
- [24] 郭少斌, 陈成龙. 利用米兰科维奇旋回划分柴达木盆地第四系层序地层[J]. *地质科技情报*, 2006, 26(4): 27-30.
- [25] 唐闻强, 伊海生, 陈云, 等. 基于测井曲线频谱分析米氏旋回特征: 以柴西苏斯地区上干柴沟组为例[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(11): 4360-4368.
- [26] 秦国权. 微体古生物在珠江口盆地新生代晚期层序地层学研究中的运用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(4): 1-18.
- [27] 田世峰, 陈中强, 查明. 珠江口盆地中中新世韩江组天文调谐地质年代表[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1): 27-32.
- [28] 徐健, 德勒恰提·加娜塔依. 米兰科维奇旋回识别与天文标尺的建立: 以莫索湾地区莫21井三工河组一段为例[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(2): 197-207.
- [29] LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [30] 田茜. 柴达木盆地新生代生物标志化合物特征与亚洲内陆干旱环境演化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [31] 薛力园, 丁旋, 万晓樵. 南海北部陆丰凹陷LF14井中新世浮游有孔虫生物地层研究[J]. *微体古生物学报*, 2017, 34(3): 320-332.

## Miocene paleoclimate analysis of the northern South China Sea: response to cooling events based on astronomical cycles

ZHAO Shaohua<sup>1,2</sup>, WANG Yaning<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Shangfeng<sup>1,2</sup>, ZHU Rui<sup>1,2</sup>, XU Enze<sup>1</sup>, YI Zhifeng<sup>1</sup>,  
GONG Gaoyang<sup>1</sup>, WANG Yuyao<sup>1</sup>, LIU Haotong<sup>1</sup>

(1 School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430000, China; 2 Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434000, Hubei, China)

**Abstract:** Rich oil and gas resources occur in the northern South China Sea. To analyze the Miocene paleoclimate is of great significance to oil and gas exploration in the region. In this paper, spectrum analysis and filtering method of the Matlab software are used to process the natural gamma logging curves from 1 949.12 m to 2 020 m of the Well A in the middle of the Huilu Low Uplift of the Pearl River Mouth Basin, and the paleoclimatic events in corresponding time periods are accurately predicted and the origins of the events revealed. The results suggest that the power spectrum of the GR data series shows depositional cycles of 68.8 m, 16.99 m, 7.81 m and 3.74 m. And it is deduced that the deposition cycles of 68.8 m and 16.99 m correspond to the long eccentricity signal of 405 ka and the short eccentricity signal of 100 ka, respectively. The deposition cycle of 7.81 m corresponds to the slope periodic signal of 46 ka, and the deposition cycle of 3.74 m corresponds to the precession periodic signal of 22 ka. The deposits penetrated by the well recorded perfectly the astronomical orbital signals (eccentricity, slope, precession). According to the established astronomical chronology, the geological age of the whole Hanjiang Formation is approximately in the range of 10.2~16.5 Ma, and a cooling event may have occurred between 14 Ma and 15 Ma due to the decrease in eccentricity amplitude.

**Key words:** paleoclimate analysis; cooling event; Milankovitch cycle; Matlab; spectrum analysis; Pearl River Mouth Basin; South China Sea