

朱春霞, 张尚锋, 王雅宁, 等. 陆丰凹陷韩江组旋回地层学分析及天文年代标尺的建立[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(4): 42-52.

ZHU Chunxia, ZHANG Shangfeng, WANG Yaning, et al. Cyclical stratigraphic analysis and establishment of astronomical chronograph of Hanjiang Formation in Lufeng Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(4): 42-52.

陆丰凹陷韩江组旋回地层学分析及天文年代标尺的建立

朱春霞^{1,2}, 张尚锋^{1,2*}, 王雅宁¹, 徐恩泽¹

(1 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 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 434023)

摘要:珠江口盆地新生代典型的海相盆地,也是我国重要的海上油气生产基地。前期已有很多学者对珠江口盆地的地层划分与对比开展了研究,但研究的精度不够。为了提高珠江口盆地陆丰凹陷韩江组地层划分与对比的精度,选择珠江口盆地陆丰凹陷 A、B 井韩江组的自然伽马数据序列作为古气候替代性指标,使用频谱分析、滤波等方法进行旋回地层学分析。通过深度域频谱分析和小波分析认为,该套地层中保存了米兰科维奇旋回信号,且主要受 405 ka 长偏心率周期的影响。利用稳定的 405 ka 长偏心率周期进行天文调谐,结合古生物地层年代框架,建立起陆丰凹陷“绝对”天文年代标尺;结合碳氧同位素变化曲线,估算出 2 次碳同位素负漂移和 1 次碳同位素正向偏移事件的持续时间;利用天文旋回周期计算出陆丰凹陷韩江组的沉积速率,发现沉积速率的变化与海平面变化具有相关性。

关键词:珠江口盆地; 陆丰凹陷; 韩江组; 米兰科维奇旋回; 频谱分析; 天文年代标尺; 沉积速率

中图分类号:P736.2; P539.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.307

0 引言

珠江口盆地新生代典型的海相盆地,也是我国重要的海上油气生产基地。前人对珠江口盆地的地层划分与对比已多有研究,如秦国权^[1]根据珠江口盆地实际情况和浮游有孔虫生物事件的测年资料,建立了本区新生代三级层序的年龄;李珊珊等^[2]利用钙质超微化石分带、国际年代地层表以及 ODP184 航次等资料,建立了珠江口盆地西部渐新世以来的钙质超微化石年代地层格架。然而用于确定地层层序年代的微体古生物,包括浮游有孔虫及钙质超微化石资料的采样密度较为有限,且多来自于岩屑分析,受岩屑掉块的影响,使所得结果

的可信度降低,而且利用古生物建立的年龄框架为百万年级,时间分辨率较低,限制了研究区地层的精细划分与对比。

米兰科维奇 (Milankovitch) 提出地球轨道参数偏心率、斜率和岁差发生周期性变化,会引起地球表面日照量周期性变化,进而导致地球气候系统周期性变化,由此可以推断,对气候敏感的地层可以记录地球轨道参数的变化规律^[3]。这种在米兰科维奇天文轨道作用下形成的地层被叫做米兰科维奇旋回 (简称米氏旋回)^[4]。旋回地层学就是通过研究这种受天文轨道影响的地层,识别其中的米氏旋回,从而建立高分辨率天文地质年代标尺,并进行地层的精细划分与对比^[5]。近年来,旋回地层学还被应用于估算沉积速度^[6]、解释古气候演化和相对海平面的变化^[7-8]以及推测重大地质事件发生的时间^[9]等研究。

随着珠江口盆地油气勘探的发展,对地层划分与对比精度的要求越来越高。本文选取自然伽马数据序列 (GR) 作为古气候替代性指标,基于米兰科维奇旋回理论,进行深度域频谱分析,识别出

收稿日期: 2021-12-01

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

作者简介: 朱春霞 (1997—), 女, 在读硕士, 主要从事沉积学与层序地层学方面的研究工作。E-mail: 2859585394@qq.com

* 通讯作者: 张尚锋 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与层序地层学方面的研究工作。E-mail: 1291789217@qq.com

地层中的米兰科维奇旋回信号; 然后利用小波变换和时间域频谱分析, 验证其结果的可靠性; 最后通过滤波和天文调谐, 建立高精度的“绝对”天文年代标尺。在此基础上, 对研究区进行地层精细划分与对比, 估算其沉积速率, 并探讨沉积速率和古气候之间的关系。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于我国南海的东北部, 盆地呈近 NE—SW 走向, 长约 800 km, 宽 100~300 km。自北向南依次划分为北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带^[10], 其中, 北部坳陷带自西向东划分为珠三坳陷和珠一坳陷。陆丰凹陷则位于北部坳陷带珠一坳陷的东北部, 其东临海

丰凸起, 南部为东沙隆起, 西接惠州凹陷, 北部为北部断阶带, 面积约为 7 760 km²(图 1a)。

珠江口盆地经历了早始新世—渐新世断(裂)陷、中新世早—中期的拗陷(裂后)沉降以及晚中新世以后的断块升降等三大演化阶段^[11]。自下向上依次发育古近系神狐组、文昌组、恩平组 and 珠海组, 新近系珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系琼海组^[12]。中中新世韩江组沉积期属于拗陷沉降阶段, 沉积环境比较稳定, 广泛接受了以海相三角洲-浅海陆棚相为主的沉积物沉积, 总体上为一套绿灰色泥岩与砂岩、含砾砂岩互层, 地层厚度为 500~1 100 m, 是珠江口盆地重要的储层。根据前人已有的浮游有孔虫及钙质超微化石等资料^[10,13], 认为珠江口盆地中中新世韩江组的顶底界年龄分别为 10 Ma 和 15.97 Ma(图 1b)。

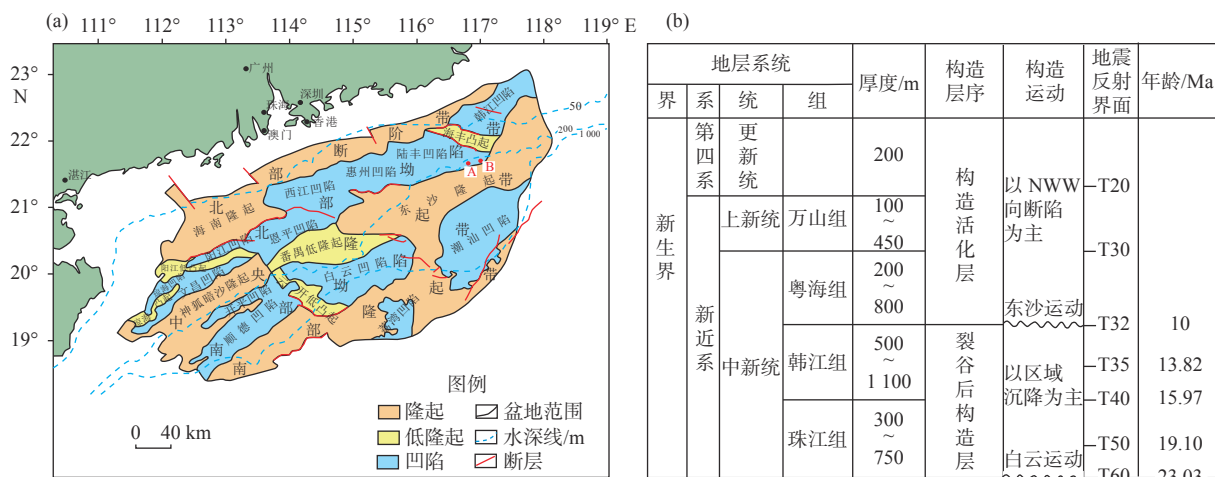


图 1 珠江口盆地构造单元与综合柱状图

Fig.1 Tectonic units in Pearl River Mouth Basin and synthesize column

2 数据筛选与处理

2.1 数据筛选

在进行旋回地层学分析之前, 选择古气候替代性指标是非常重要的一步, 古气候替代性指标应该可以将地层中对气候变化敏感的信息记录下来。目前, 用于旋回地层学分析的古气候替代性指标主要有: 岩性的变化、磁化率数据、非磁滞剩磁、碳氧稳定同位素、自然伽马数据序列、电阻率测井数据以及生物丰度和生物灭绝速度等^[14]。近年来, 有不少学者选择 GR 数据序列作为古气候替代性指标进行旋回地层学分析, 并取得了理想的研究成果^[15-18]。

GR 数据序列反映的是放射性元素衰变过程中伽马射线的强度, 通常表现出黏土矿物中含有大量的钾 (K) 和钍 (Th), 有机质则更容易吸附铀 (U), 由于黏土矿物和有机质的含量对环境 and 气候条件普遍敏感, GR 数据序列也保存了与气候周期性相关的信号^[19]。

A、B 井位于珠江口盆地陆丰凹陷的东南部, 现代水深约为 200 m(图 1a)。陆丰凹陷韩江组以海相三角洲-浅海陆棚相为主, 沉积环境稳定, 米兰科维奇旋回周期记录较完整, 有利于开展旋回地层学分析。本文选取 A、B 井韩江组的 GR 数据序列作为古气候替代性指标进行旋回地层学分析, 其采样间隔为 0.125 m。A 井韩江组位于井深 783.4~1 515.5 m, 地层厚度为 732.1 m, 地层岩性为灰色泥岩、灰色粉

砂质泥岩和灰色砂岩互层, GR 取值范围为 35~75 API。B 井韩江组位于井深 1 062~1 590.75 m, 地层厚度为 528.75 m, 为大段白色泥岩夹薄层砂岩, GR 取值范围为 40~100 API。砂岩在 GR 曲线上显示低值, 泥岩显示高值, 粉砂岩和泥质砂岩介于二者之间, GR 数据序列与岩性具有良好的对应关系^[20]。

2.2 数据处理

本文使用 Acycle 软件程序包^[21]进行数据预处理和频谱分析等相关计算。

(1) 数据预处理

在频谱分析前, 需要对古气候替代性指标进行一系列的预处理^[22], 包括: ①使用 outlier removal 程序包去除数据中的异常值; ②采用 interpolation 程序包对非等间距数据进行线性插值; ③使用 de-trending 程序包, 根据数据趋势的大小 (即逐渐增加或逐渐降低) 进行去趋势化处理。

(2) 旋回分析

首先, 使用 spectral analysis 程序包 Multi-taper Method (MTM) 方法获取频谱分析图, 其中横坐标为频率, 纵坐标为相对功率^[23], 主要选择 95% 置信度以上谱峰进行对比, 对处于 90%~95% 置信度选择性地使用^[24-25]; 其次, 使用 evolutionary spectral analysis 程序包绘制深度域和时间域上的滑动窗口频谱图, 根据实际情况选择滑动窗口大小, 一般为主导周期的 2~4 倍; 然后, 利用 wavelet transform 程序包绘制深度域的小波功率谱; 最后, 通过 filtering 程序包的高斯带通滤波提取出主要天文旋回周期, 选择稳定的 405 ka 长偏心率周期进行天文调谐, 并在绝对年龄“锚点”的控制下, 建立研究区“绝对”天文年代标尺。

3 旋回地层学分析

3.1 天文轨道周期分析

目前, 国际上主要采用 BERGER 等^[26-27]、LASKAR 等^[28-29]提出的方法来计算理论天文轨道周期。本文选择 LASKAR 等^[28]方案计算天文轨道参数 ETP (E 为偏心率; T 为斜率, 也可用 O 来表示; P 为岁差) 在 10.0~15.97 Ma 期间的理论值, 并对其进行频谱分析 (图 2), 得到的主周期分别为 405 ka (E)

长偏心率周期和 125 ka (e_1)、95 ka (e_2) 短偏心率周期; 40.6 ka (O_1) 斜率周期以及 23.6 ka (P_1)、22.3 ka (P_2) 和 19.1 ka (P_3) 岁差周期。

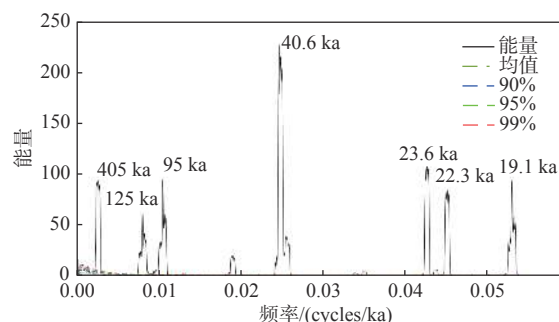


图 2 10~15.97 Ma 天文轨道参数及其主要周期

Fig.2 10~15.97 Ma astronomical orbital parameters and main periods

3.2 深度域频谱分析

对 A 井预处理后的 GR 数据序列进行了深度域频谱分析 (图 3a), 结果显示, 地层中的主要旋回厚度为 99.0、48.0、15.5、10.0、5.7、5.0、4.5、2.8、2.6、2.3 m, 其中, 48.0、15.5、5.0、2.6 m 的比值约为 18.5:6.0:1.9:1.0, 与 10~15.97 Ma 期间的长偏心率周期 405 ka、短偏心率周期 125 ka、斜率周期 40.6 ka、岁差周期 22.3 ka 的比值 (即 $E:e_1:O_1:P_1=18.2:5.6:1.8:1.0$) 非常接近, 可初步认为该地层中存在米兰科维奇旋回信号。由于 A 井韩江组总厚度为 732.1 m, 持续时间约为 5.97 Ma, 计算得出的平均沉积速率约为 12.26 cm/ka, 因此可以认为, 约 48.0 m 的旋回厚度代表了 405 ka 的长偏心率周期, 约 15.5 m 的旋回厚度代表了约 125 ka 的短偏心率周期, 约 5.0 m 的旋回厚度代表了约 40.6 ka 的斜率周期, 约 2.6 m 的旋回厚度代表了约 22.3 ka 的岁差周期。从滑动窗口频谱图中可以看出, 代表约 405 ka 长偏心率周期的 48.0 m 沉积旋回是稳定存在的, 而其他的沉积旋回在深度上信号较弱且不连续。小波分析的结果 (图 4a) 也显示, 48.0 m 的长偏心率旋回在整个深度段中十分明显。

对 B 井预处理后的 GR 数据序列进行深度域频谱分析 (图 3b) 得出的主要旋回厚度为 35.0、10.7、7.5、4.7、4.3、3.2、3.0、2.8、2.2、1.8 m, 其中, 35.0 m:10.7 m:2.8 m:1.8 m 约为 19.4:5.9:1.6:1.0, 与天文轨道周期 18.2:5.6:1.8:1.0 接近, 可认为该地层中存在米兰科维奇旋回信号。B 井韩江组的地层总厚度为 528.75 m, 持续时间约为 5.97 Ma, 计算出平

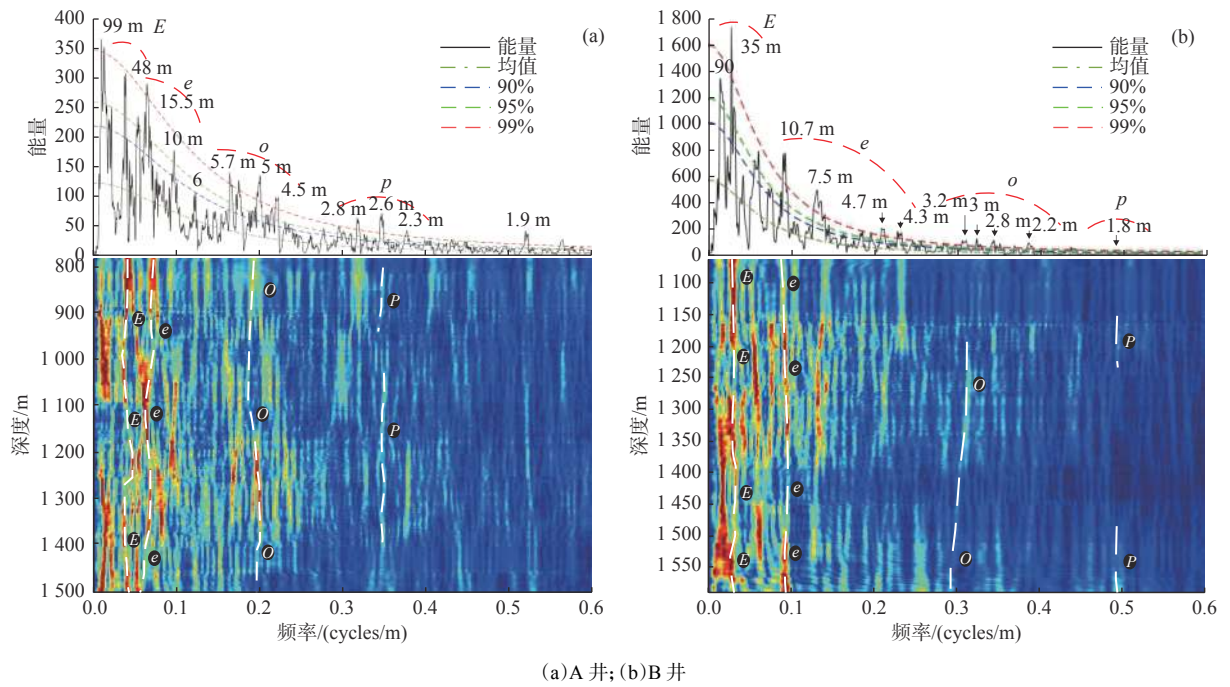
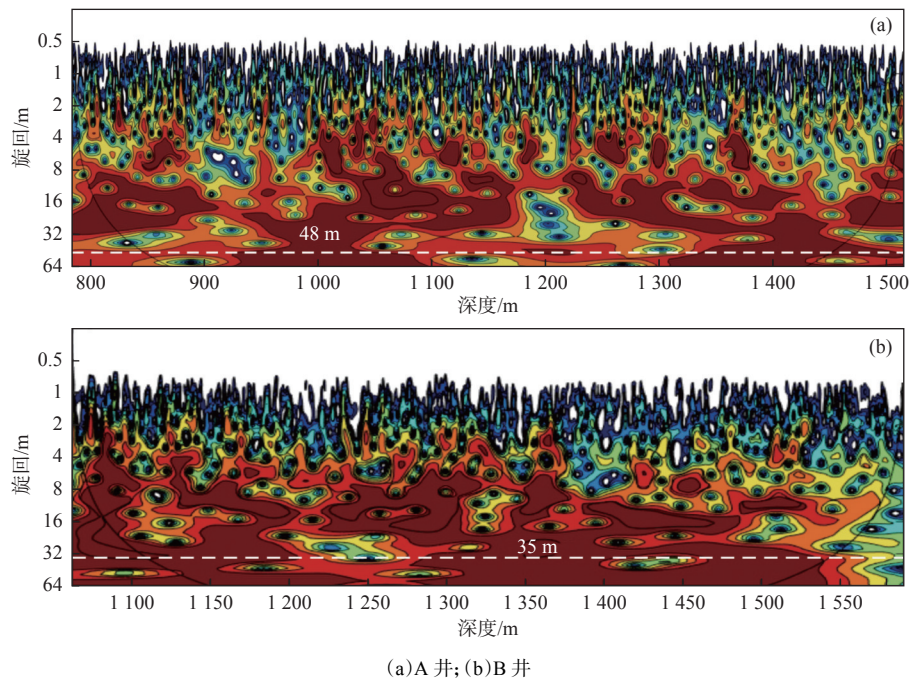
图 3 深度域 2π MTM 多窗口频谱分析和滑动窗口频谱分析Fig.3 2π MTM multi-window spectrum analysis and sliding window spectrum analysis in the depth domain

图 4 深度域小波功率谱

Fig.4 Depth domain wavelet power spectrum

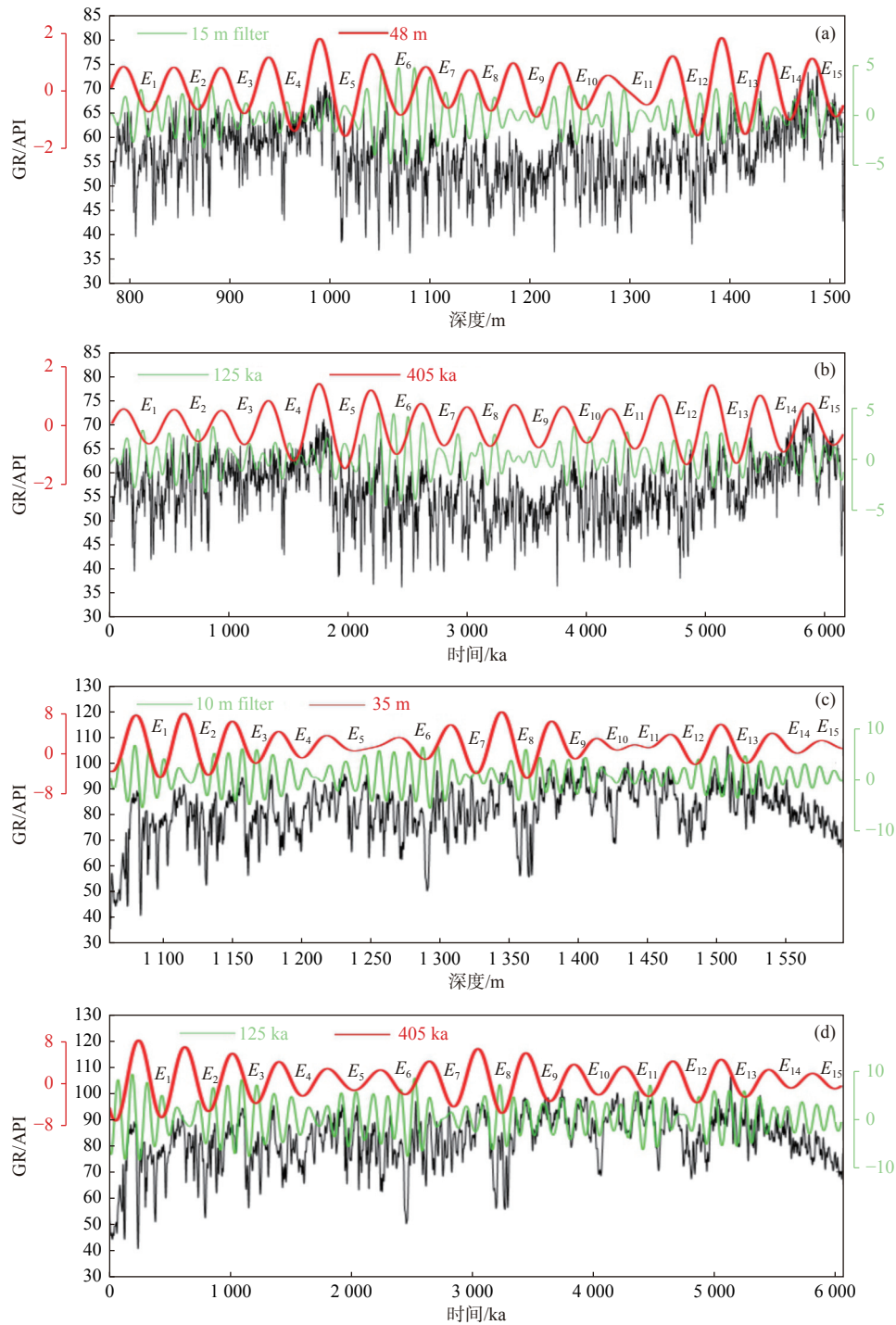
均沉积速率约为 8.85 cm/ka, 因此得到约 35.0、10.7、2.8、1.8 m 的旋回厚度分别代表了 405 ka 长偏心率、125 ka 短偏心率、41 ka 斜率和 22 ka 岁差周期。滑动窗口频谱分析 (图 3b) 和小波变换 (图 4b) 得出的旋回厚度与频谱分析的结果几乎一致。

3.3 时间域频谱分析

根据 A 井深度域频谱分析和小波变换的结果, 对 GR 数据序列进行滤波处理, 使用高斯带通滤波, 提取 A 井中分别代表 405 ka 长偏心率和 125 ka 短

偏心率的 48 m 和 15 m 厚度的旋回周期, 结果得到有 15 个 48 m 旋回周期的滤波曲线和 51 个 15 m 旋回周期的滤波曲线(图 5a)。利用稳定的 405 ka 长偏心率周期对 48 m 旋回周期的滤波曲线进行调

谐, 得到时间域数据序列(图 5b)。对其进行时间域频谱分析和滑动窗口频谱分析(图 6a), 结果得到 405 ka 长偏心率周期, 125 ka 短偏心率周期, 50、40、36 ka 斜率周期以及 25、23、21 ka 岁差周期。



(a) A 井深度域的 GR 数据序列、15 m 和 48 m 滤波曲线(带宽: $0.064\ 47 \pm 0.012\ 89$ cycles/m; $0.020\ 76 \pm 0.004\ 15$ cycles/m);
 (b) 405 ka 调谐(a)中的 GR 数据序列、125 ka 和 405 ka 滤波曲线(带宽: 0.008 ± 0.002 cycles/ka; $0.002\ 46 \pm 0.000\ 49$ cycles/ka);
 (c) B 井深度域的 GR 数据序列、10 m 和 35 m 滤波曲线(带宽: $0.093\ 64 \pm 0.018\ 69$ cycles/m; $0.028\ 36 \pm 0.002\ 67$ cycles/m);
 (d) 405 ka 调谐(c)中的 GR 数据序列、125 ka 和 405 ka 滤波曲线(带宽: 0.008 ± 0.002 cycles/ka; $0.002\ 46 \pm 0.000\ 49$ cycles/ka)

图 5 自然伽马数据序列和滤波曲线

Fig.5 Gamma data series and filtering curves

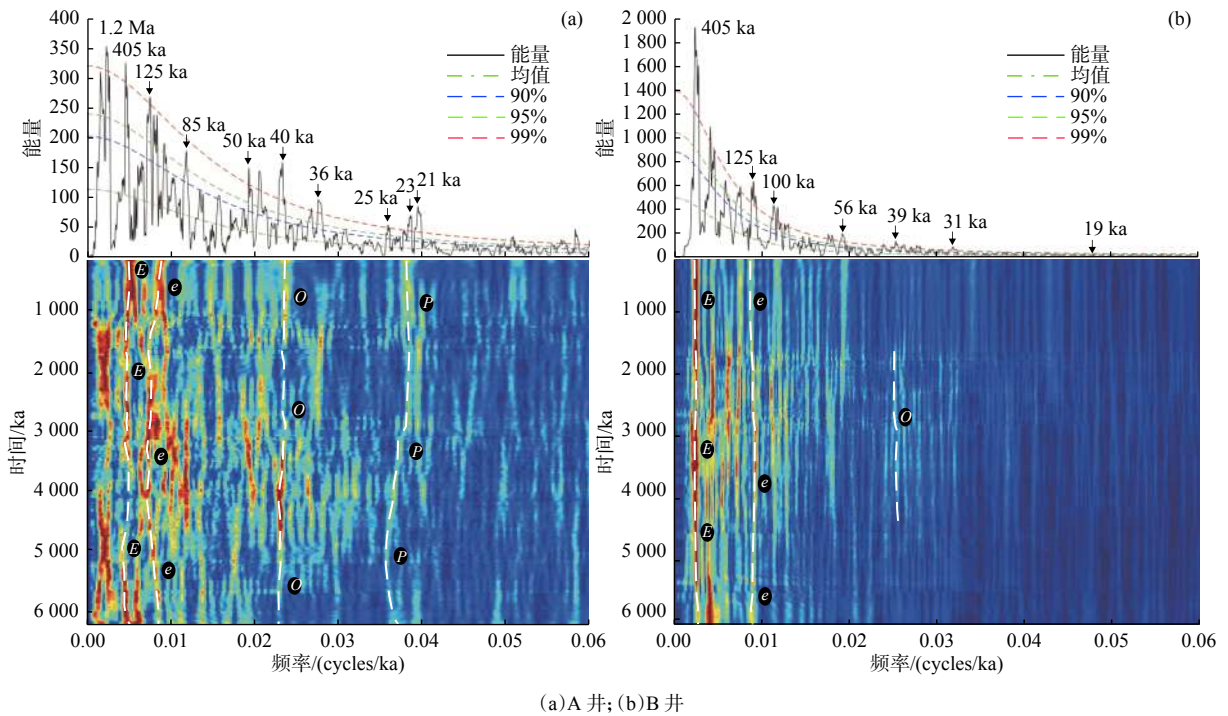


图 6 405 ka 调谐 GR 数据序列的 2π MTM 多窗口频谱分析和滑动窗口频谱分析

Fig.6 2π MTM multi-window spectrum analysis and sliding window spectrum analysis of 405 ka tuned GR series

对 B 井深度域 GR 数据序列进行滤波处理, 得到 15 个 35 m 旋回的滤波曲线和 49 个 10 m 旋回的滤波曲线(图 5c)。利用 405 ka 长偏心率周期对 35 m 旋回周期的滤波曲线进行调谐, 获得时间域数据序列(图 5d)。时间域频谱分析和滑动窗口频谱分析(图 6b)得到 405 ka 长偏心率周期, 125 ka 和 100 ka 短偏心率周期, 56 ka、39 ka、31 ka 斜率周期和 19 ka 岁差周期。

这些周期与 10~15.97 Ma 的理论天文轨道周期十分接近, 验证了陆丰凹陷 A、B 井韩江组存在米兰科维奇旋回信号, 并且 405 ka 长偏心率周期稳定存在。

4 天文年代标尺的建立

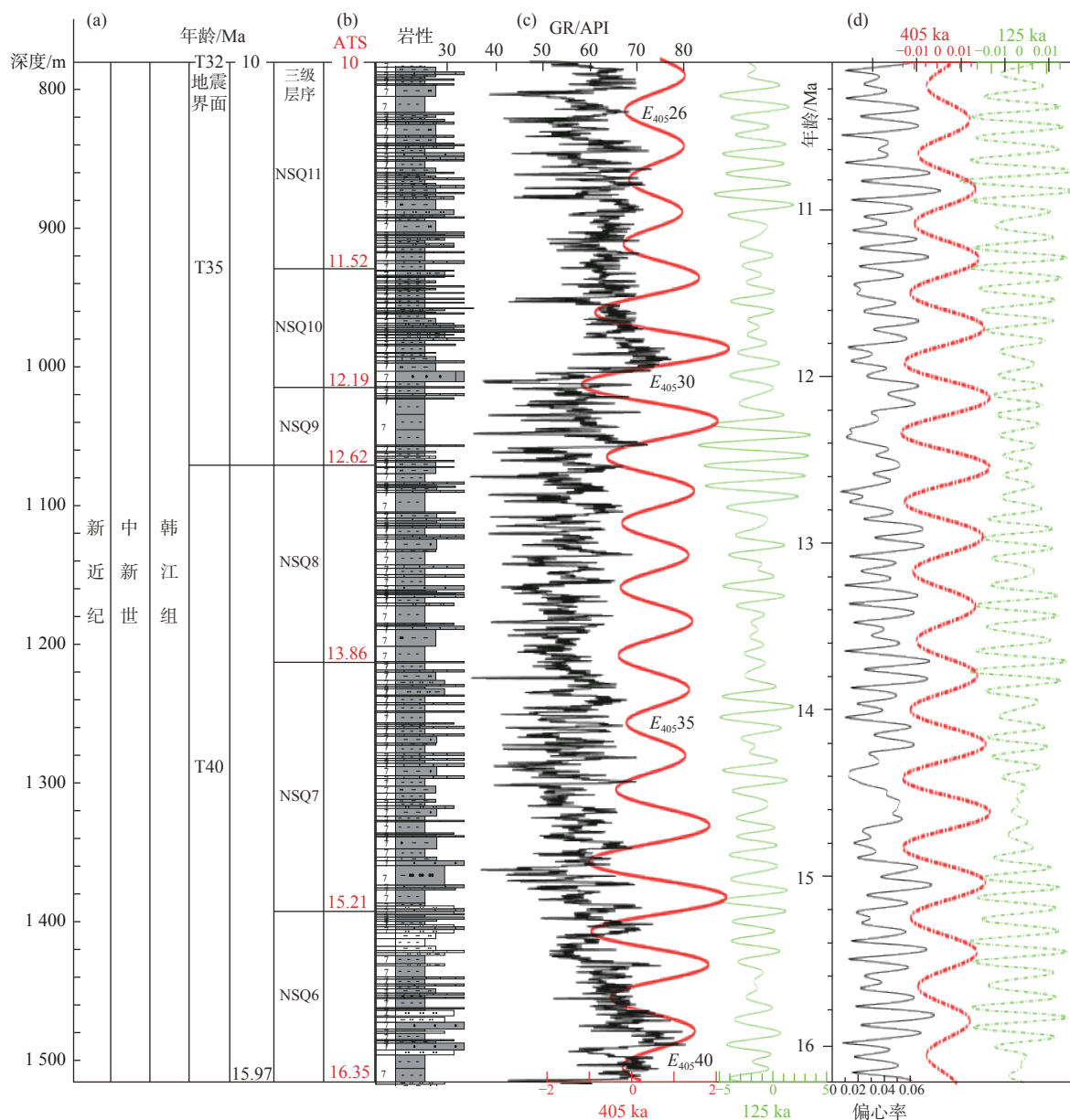
天文目标曲线选择 LASKAR 等^[28] 的 405 ka 长偏心率曲线和 125 ka 短偏心率曲线, 对应的调谐曲线选择从 A、B 井 GR 测井曲线中提取出来的 405 ka 长偏心率滤波曲线和 125 ka 短偏心率滤波曲线。根据前人的研究结果, 以韩江组顶界年龄 10 Ma 作为起始时间锚点^[13], 建立天文年代标尺(Astronomical Time Scale, ATS), 得到以下结论: A 井韩江组持续时间约为 6.35 Ma, 推算出韩江组的底界年龄为 16.35 Ma; B 井持续时间约为 6.26 Ma, 推算出韩江组底界年龄为 16.26 Ma。由于海相地

层稳定性的特点, 和计算出的 A、B 井持续时间相差较小, 且与前人利用古生物资料建立的年代格架基本一致^[10,13], 表明 A、B 井的天文年代标尺可用于陆丰凹陷地层的高精度划分与对比(图 7、8)。

利用建立的天文年代标尺, 可以用于识别碳同位素偏移事件的时间。HOLBOURN 等^[30] 根据南海 ODP 1146 站位碳氧同位素曲线认为, 约在 15.6 Ma 和 10.8 Ma 时, $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移, 为短暂的增温过程, 这一短暂的温暖与大量的负碳同位素的转移有关; 约在 13.8 Ma 时, $\delta^{13}\text{C}$ 增加, 对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 也增加, 指示该时期对应中中新世中期南极冰盖的扩张(EAIE)。利用已建立的天文年代标尺, 估算出 2 次碳同位素负漂移事件的持续时间分别约为 120 ka 和 80 ka, 1 次碳同位素正向偏移的持续时间约为 230 ka(图 9)。

5 沉积速率与古气候的响应

在旋回地层学中, 沉积速率是利用每个旋回的厚度除以其对应的旋回周期得到^[10], 所得到沉积速率为连续的沉积速率, 且精度高。据此方法得到的陆丰凹陷韩江组 A 井和 B 井的沉积速率变化曲线图(图 9)表明, 陆丰凹陷 A 井的沉积速率波动范围为 10.78~15.99 cm/ka, 平均沉积速率约为 12.23 cm/ka; B 井的沉积速率波动范围为 6.36~



(a) 地层单位及年龄; (b) 天文年龄; (c) 岩性、自然伽马数据序列、滤波曲线; (d) 天文理论轨道曲线及滤波曲线

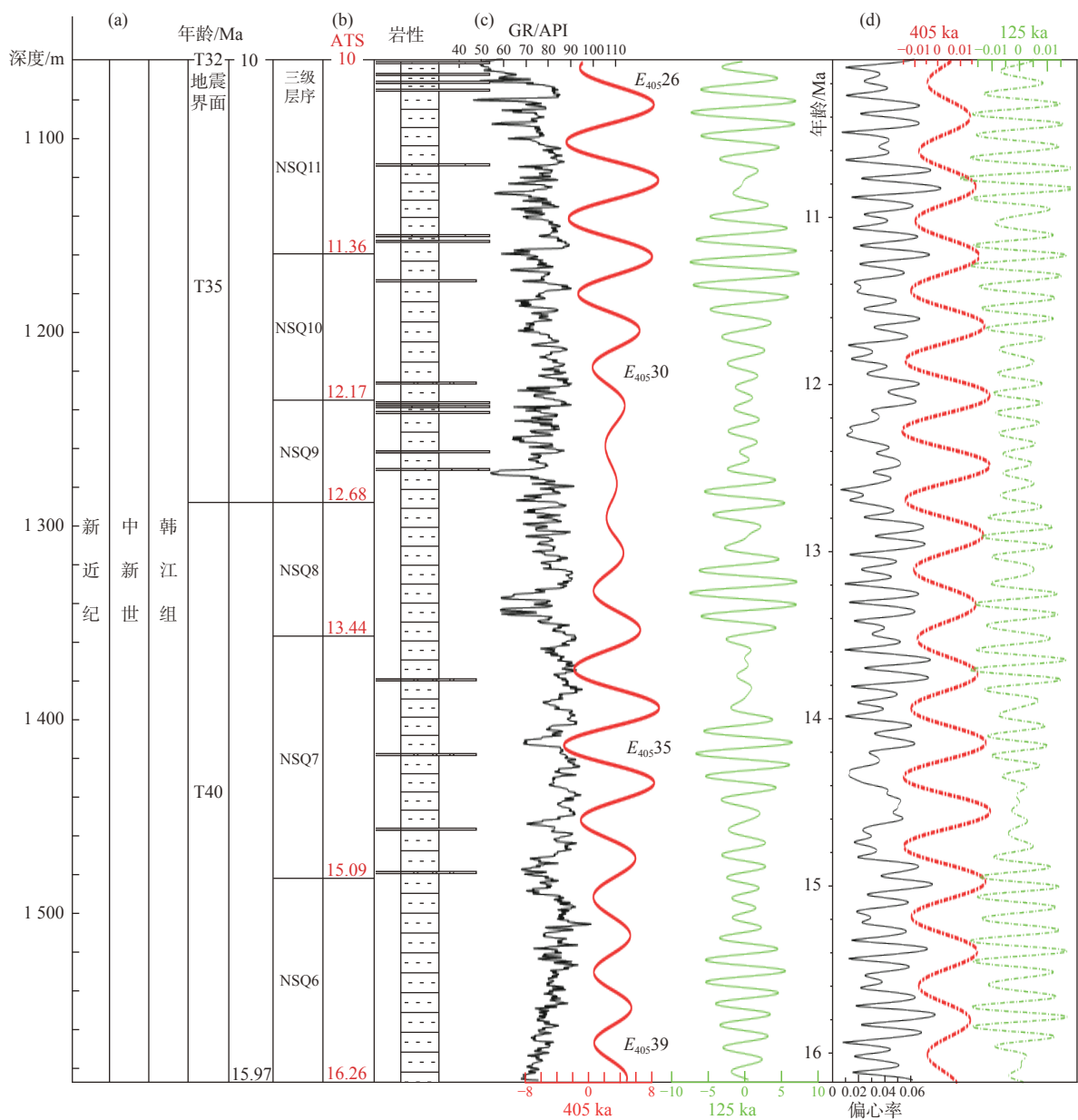
图 7 陆丰凹陷 A 井韩江组“绝对”天文年代标尺

Fig.7 The "absolute" astronomical chronograph of Hanjiang Formation in Well A, Lufeng Sag

12.84 cm/ka, 平均沉积速率约为 8.91 cm/ka。B 井的平均沉积速率小于 A 井的是由于 B 井主要发育泥岩, 表示韩江组的水体较深, 沉积环境较稳定, 沉积速率较小。

沉积速率主要受物源供给和可容纳空间大小的影响, 珠江口盆地韩江组主要受西北部稳定的物源控制, 且该时期处于拗陷沉降阶段, 构造活动不活跃, 所以该区的沉积速率主要受海平面变化的影响。结合秦国权^[31]绘制的珠江口盆地海平面变化曲线发现, 沉积速率与海平面变化曲线具有较好的响应关系。在韩江组沉积早期, 海平面总体呈上升

趋势, 使得 A、B 井所在区域的可容纳空间增大, 而物源相对稳定, 导致 2 口井的沉积速率相对下降, 其中, A 井的沉积速率由 15 cm/ka 下降为 9 cm/ka; B 井的沉积速率由 9 cm/ka 下降为 6 cm/ka。韩江组沉积中期, 海平面总体波动下降, 导致可容纳空间减小, 沉积物迅速向盆地中央推进, 对应的沉积速率变大。A 井在该时期的沉积速率由 9 cm/ka 上升为 16 cm/ka; B 井沉积速率由 6 cm/ka 上升为 13 cm/ka。韩江组沉积晚期, 海平面上升, 水体处于一个较深的环境, 沉积速率总体较小。相对于韩江组中期, 该时期的沉积速率呈下降的趋势, A 井的



(a) 地层单位及年龄; (b) 天文年龄; (c) 岩性、自然伽马数据序列及滤波曲线; (d) 天文理论轨道曲线及滤波曲线

图 8 陆丰凹陷 B 井韩江组“绝对”天文年代标尺

Fig.8 The "absolute" astronomical chronograph of Hanjiang Formation in Well B, Lufeng Sag

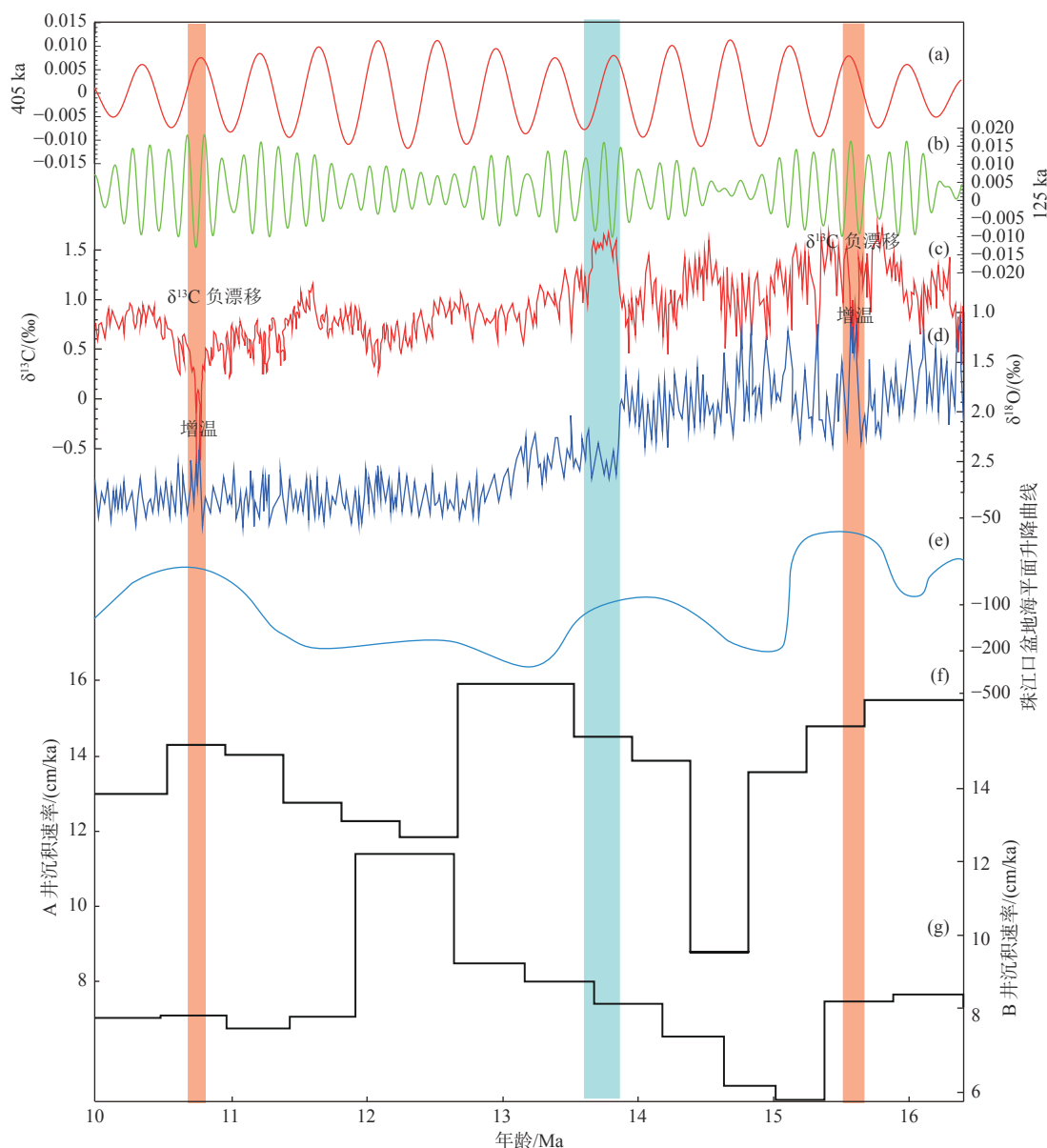
沉积速率由 16 cm/ka 降低为 13 cm/ka, B 井的沉积速率由 13 cm/ka 降低为 8 cm/ka。A、B 井沉积速率的变化与海平面的变化具有较好响应,但由于位置和水深环境等因素的影响,使得 A、B 井的沉积速率变化并不完全一致,但总的趋势是一致的。

6 结论

(1)对珠江口盆地陆丰凹陷韩江组 A、B 井 GR 数据序列进行的深度域频谱分析和小波分析表明, A 井韩江组存在稳定的代表 405 ka 长偏心率周

期的 48 m 沉积旋回, B 井韩江组也存在代表 405 ka 长偏心率周期的 35 m 沉积旋回。A、B 两井中还存在代表其他天文轨道周期的旋回,但并不稳定,会随着深度的变化而有所变化。

(2)基于识别出的主导旋回周期,将 GR 数据序列的滤波曲线与天文目标曲线相对应,在陆丰凹陷 A 井韩江组建立了 10~16.35 Ma 的“绝对”天文年代标尺, B 井建立了 10~16.26 Ma 的“绝对”天文年代标尺。基于海相地层具有相对稳定的特点,且建立的标尺与前人利用古生物资料建立的年代格架基本一致,表明 A、B 井韩江组的天文年代标尺



(a)理论 405 ka 滤波曲线;(b)理论 125 ka 滤波曲线;(c) $\delta^{13}\text{C}$ 曲线;(d) $\delta^{18}\text{O}$ 曲线;(e)珠江口盆地海平面升降曲线;(f)A 井沉积速率曲线;(g)B 井沉积速率曲线。图中橙色带表示短暂的增温,蓝色带表示降温。深海氧同位素数据引自文献 [30]

图 9 陆丰凹陷韩江组沉积速率曲线和深海氧同位素曲线对比

Fig.9 Comparison of sedimentation rate curve and oxygen isotope curve of Hanjiang Formation in Lufeng Sag

可用于陆丰凹陷地层的高精度划分与对比。利用天文年代标尺,估算出 2 次碳同位素负漂移和 1 次碳同位素正向偏移事件的持续时间。

(3)根据沉积速率变化曲线,陆丰凹陷 A、B 两井的平均沉积速率分别为 12.23 和 8.91 cm/ka,由于受所在位置和水深环境等因素的影响,A、B 两井的沉积速率变化并不完全一致,但总的趋势是一致的。

参考文献:

[1] 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变

化[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(1): 2-11.

- [2] 李珊珊,彭松,邓勇,等. 珠江口盆地西部渐新世以来钙质超微化石年代地层研究[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(3): 308-316.
- [3] 贾东力,田景春,林小兵,等. 塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组米兰科维奇旋回沉积记录[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 749-758.
- [4] 吴怀春,房强. 旋回地层学和天文时间带[J]. 地层学杂志, 2020, 44(3): 227-238.
- [5] 吴怀春,张世红,冯庆来,等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(3): 409-428.
- [6] 徐伟,解习农. 基于米兰科维奇周期的沉积速率计算新方法: 以东营凹陷牛38井沙三中为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 207-214.

- [7] 黄春菊,张杨,李明松,等.晚渐新世—早中新世气候变化在赤道大西洋的天文响应[J]. 2016, 46(9): 1231-1240.
- [8] 伊海生. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 456-466.
- [9] 马雪莹,邓胜徽,卢远征,等.华南上奥陶统宝塔组天文年代格架及其地质意义[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 281-291.
- [10] 刘洋,吴怀春,张世红,等.珠江口盆地珠一坳陷韩江组-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.
- [11] 耿威. 珠江口盆地惠州凹陷古近系储层沉积学特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [12] 王思琦,张忠涛,林畅松,等.白云凹陷东南部晚渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及沉积地貌演化[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(1): 33-42.
- [13] 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.
- [14] 马雪莹,卢远征,樊茹,等.新疆柯坪大湾沟中、上奥陶统旋回地层学研究及其地质意义[J]. 地层学杂志, 2021, 45(1): 29-37.
- [15] 尹青,伊海生,夏国清,等.基于测井曲线频谱分析在伦坡拉盆地古近系米氏旋回层序及可容空间变化趋势中的研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1288-1297.
- [16] 李堃宇,伊海生,夏国清. 基于测井曲线频谱分析柴达木盆地西部七个泉地区上、下油砂山组米兰科维奇旋回特征[J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 87-91.
- [17] 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.
- [18] WANG M, CHEN H H, HUANG C J, et al. Astronomical forcing and sedimentary noise modeling of lake-level changes in the Paleogene Dongpu Depression of North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 535: 116116.
- [19] LIU Z H, HUANG C J, ALGEO T J, et al. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66–23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, northeastern China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2018, 510: 78-92.
- [20] 刘杰,孙美静,苏明,等. 神狐海域水合物钻探区第四纪米氏旋回高频层序地层划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 11-18.
- [21] LI M S, HINNOV L, KUMP L. Acycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. *Computers and Geosciences*, 2019, 127: 12-22.
- [22] 杨彦峰,符超峰,徐新文,等. 青藏高原东北缘尖扎盆地晚中新世地层绝对天文年代标尺的建立[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(4): 710-723.
- [23] 张若琳,金思丁. 渤海湾盆地沾化凹陷罗69井沙三下亚段旋回地层学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1516-1531.
- [24] 张喜,张廷山,赵晓明,等. 天文轨道周期及火山活动对中上扬子区晚奥陶世—早志留世有机碳聚集的影响[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 732-744.
- [25] 袁学旭. 基于主成分分析的米兰科维奇旋回识别和应用研究[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(4): 48-56.
- [26] BERGER A, LOUTRE M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [27] BERGER A, LOUTRE M F, LASKAR J. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies[J]. *Science New Series*, 1992, 255(5044): 560-566.
- [28] 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): 265-285.
- [29] LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M, et al. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, 532: 89-104.
- [30] HOLBOURN A, KUHN T W, CLEMENS S, et al. Middle to late Miocene stepwise climate cooling: evidence from a high-resolution deep water isotope curve spanning 8 million years[J]. *Paleoceanography*, 2013, 28(4): 688-699.
- [31] 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应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 1-18.

Cyclical stratigraphic analysis and establishment of astronomical chronograph of Hanjiang Formation in Lufeng Sag

ZHU Chunxia^{1,2}, ZHANG Shangfeng^{1,2*}, WANG Yaning¹, XU Enze¹

(1 School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2 Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology of Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

Abstract: As a typical Cenozoic Marine basin, the Pearl River Mouth Basin is also an important offshore oil and gas production base in China. Many scholars have studied the stratigraphic division and correlation of the Pearl River Mouth Basin, but the research accuracy is not enough. In order to improve the accuracy of stratigraphic division and correlation of Hanjiang Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin, the natural gamma ray data series of Hanjiang Formation in Well A and Well B in Lufeng Sag were selected as paleoclimate surrogate indexes, and the cyclic stratigraphy was analyzed by spectral analysis and filtering methods. Through depth domain spectral analysis and wavelet analysis, it is identified that Milankovich cycle is preserved in the formation, and it is mainly affected by the 405 ka long eccentricity period. Using the stable 405 ka long eccentricity period for astronomical tuning, combined with the paleontological stratigraphic dating frame, the absolute astronomical dating scale of Lufeng Depression was established. Combined with the carbon and oxygen isotope change curves, the duration of two carbon isotope negative shift events and one positive shift event was estimated. Using the sedimentation rate calculated by astronomical cycle, it is found that the change of sedimentation rate is correlated with the change of sea level.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Lufeng Sag; Hanjiang Formation; Milankovitch cycles; spectral analysis; astronomical time scale; sedimentation rate