

天文轨道周期驱动下的南海渐新世 海相烃源岩发育控制因素*

徐恩泽^{1,2} 张尚锋^{1,3} 王雅宁^{1,3} 朱 锐^{1,3} 梁建昊¹ 张 泽⁴

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 南方石油勘探开发有限责任公司, 海南海口 570100

3 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100

4 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074

摘 要 重点探讨了南海北部渐新世天文轨道强迫气候变化对海平面和沉积速率的控制, 进而影响有机质的生成与保存。利用研究区 L9、C6、Y9 等钻井自然伽马测井、孢粉、有孔虫和有机质数据, 运用旋回地层学分析方法, 以揭示天文轨道周期对烃源岩发育的控制机制。在南海北部地区识别出 2.4 Ma 超长偏心率及 1.2 Ma 长斜率周期。认为偏心率和斜率高值时期, 气候温暖湿润, 海平面处于高位, 生物生产力提高, 沉积环境还原性增强, 有利于有机质堆积保存, 有机质丰度介于 1.5%~4% 之间, 其中无定形有机质含量增加 14.2%; 在偏心率 and 斜率低值时期, 气候寒冷干燥, 海平面处于低位, 生物生产力降低, 沉积环境氧化性增强, 有机质丰度介于 0.3%~1.5% 之间, 其中煤质有机质组分占比为 66.4%~95.1%; 且研究发现沉积速率小于 9 cm/ka 时, 有机质丰度达 3.5%, 沉积速率大于 12 cm/ka 时, 有机质丰度为 0.3%~0.7%; 在以上研究基础上, 总结出天文周期控制下渐新世南海北部海相烃源岩的发育模式, 有助于预测优质烃源岩的时空分布规律, 为深时深地油气勘探提供科学依据。

关键词 南海北部 渐新世 天文轨道驱动 烃源岩 古气候

第一作者简介 徐恩泽, 男, 1995 年生, 博士, 工程师, 主要从事旋回地层学和油气地质研究。E-mail: 708895738@qq.com。

通讯作者简介 张尚锋, 男, 1964 年生, 教授, 主要从事层序地层学和油气地质研究。E-mail: jpuzhangsf@163.com。

中图分类号: P534.61⁺4 文献标志码: A

Astronomical orbital cycle-driven controls on the Oligocene marine hydrocarbon source rock development in the South China Sea

XU Enze^{1,2} ZHANG Shangfeng^{1,3} WANG Yaning^{1,3} ZHU Rui^{1,3} LIANG Jianhao¹ ZHANG Ze⁴

1 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2 Southern Petroleum Exploration and Development Corporation, Haikou 570100, China

3 Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4 School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

* 国家自然科学基金(编号: 41472098)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41472098)]

收稿日期: 2024-10-29 改回日期: 2024-11-26

Abstract This study focuses on the control of astronomical orbital forcing climate change on sea level and sedimentation rate during the Oligocene in the northern South China Sea, which in turn affects the generation and preservation of organic matter. Using natural gamma logging data from drilling Wells L9, C6, and Y9 in the study area, together with Palynology, foraminiferal, and organic matter data, cyclostratigraphic analyses are applied to reveal the control mechanism of astronomical orbital cycles on hydrocarbon source rock development. The 2.4 Ma ultra-long eccentricity and 1.2 Ma long obliquity cycles were identified in the northern part of the South China Sea. During high-eccentricity and high-obliquity phases, the climate was warm and humid, sea level was relatively high, biological productivity increased, and the depositional environment became more reducing, all of which favored the accumulation and preservation of organic matter. Under these conditions, the abundance of organic matter ranged from 1.5% to 4%, with amorphous organic matter content increasing by 14.2%. In contrast, during low-eccentricity and low-obliquity phases, the climate was cold and arid, sea level was low, biological productivity decreased, and the depositional environment became more oxidizing. In this case, the organic matter abundance ranged from 0.3% to 1.5%, with vitrinite-rich (coaly) components accounting for 66.4% to 95.1%. Furthermore, it was found that when the sedimentation rate was less than 9 cm/ka, the organic matter abundance could reach ~ 3.5%, whereas at rates greater than 12 cm/ka, the abundance decreased to 0.3% ~ 0.7%. On this basis, a depositional model for Oligocene marine hydrocarbon source rocks in the northern South China Sea under astronomical forcing was established, providing insights into the spatial and temporal distribution of high-quality source rocks and offering a scientific reference for future deep-time and deep-Earth hydrocarbon exploration.

Key words northern South China Sea, astronomical orbit drive, Oligocene, hydrocarbon source rocks, palaeoclimate

About the first author XU Enze, born in 1995, Ph.D. and engineer, is mainly engaged in cyclostratigraphy and oil and gas geology research. E-mail: 708895738@qq.com.

About the corresponding author ZHANG Shangfeng, born in 1964, professor, is mainly engaged in stratigraphy and oil and gas geology research. E-mail: jpuzhangsf@163.com.

0 引言

烃源岩是油气生成的物质基础,其中海相烃源岩因其广泛分布和高效的成烃潜力,成为全球油气资源的重要来源(米立军等, 2022),海相环境中丰富的生物生产力、有机质的高效保存条件,使得海相烃源岩在全球油气勘探中占据重要地位,其发育分布决定了盆地油气资源的分布和规模(何登发等, 2019),因此,研究和理解烃源岩的发育模式对于海洋石油勘探和资源评价具有重要意义。前人关于烃源岩发育特点已经进行了大量的研究,提出了包括地质构造活动(Beglinger *et al.*, 2012; 刘池洋等, 2014; Xu *et al.*, 2024a)、火山活动驱动(Zeng *et al.*, 2024)、热液活动(Wen *et al.*, 2010; 吴景富等, 2013)、古生产力(Zhu *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024b)、沉积环境(黎茂稳等, 2022;

Wu *et al.*, 2024)、古气候环境(Bralower and Thierstein, 1984; 李友川等, 2011; Bechtel *et al.*, 2012)、海平面活动(Gonçalves, 2002; Bechtel *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2024)等控制下的烃源岩发育机制。然而地球作为太阳系的行星之一,其本身的运动以及其他行星与恒星的运动对其内部(如沉积、构造、环境)的影响不容忽视。自米兰科维奇旋回理论提出以来(Milankovitch, 1941),天文强迫机制对气候变化的影响得到了广泛关注(赵韶华等, 2022; 李猛等, 2024),但关于气候变化如何通过海平面变化及沉积过程影响烃源岩发育分布的具体机制,尚需进一步探讨。

全球碳循环在千年尺度上通过生物圈的反馈机制维持自我平衡,更长尺度的地质事件主要依赖于地球接收的太阳辐射变化(Falkowski *et al.*, 2008;

Liu *et al.*, 2024), 而地球接收的太阳辐射受到地球轨道参数(偏心率、斜率、岁差)的周期性变化影响, 从而引起地球气候的周期性变化(Milankovitch, 1941)。这种气候的变化往往控制着不同类型有机质的形成和保存, 如温暖湿润的气候伴随着良好的植被发育生长及较高的生产力, 高海平面和低的氧化分解作用为有机质提供了良好的保存条件(程锦翔等, 2022); 在相对干旱寒冷的气候背景下, 植被的减少以及氧化作用的增强, 导致有机质的生成和保存条件都会显著变差(Lanci *et al.*, 2010)。对于这种天文轨道驱动下的气候变化引起的有机碳埋藏, 目前已经得到了许多关注(Huang *et al.*, 2021; 肖强等, 2021; Xu *et al.*, 2024b)。

中国南海北部琼东南盆地和珠江口盆地在新生代形成了多套生烃潜力巨大的烃源岩, 使其成为新生代重要的含油气盆地, 其中盆地的渐新世沉积保存了丰富的古气候变化信息(张尚锋等, 2024), 蕴含着揭示区域地质演化和气候变化的重要意义, 其海相地层具有优质的生烃条件(曾清波等, 2015; 赵飞等, 2017; 昌建波, 2020; 高阳东等, 2024)。本研究基于南海北部地区钻井的自然伽马测井数据、微体古植物、有孔虫数据以及有机质数据, 通过旋回地层学方法构建高分辨率天文年代标尺, 阐述了天文轨道参数变化如何驱动该区域的气候演化, 进一步驱动盆地内沉积速率变化和海平面变化, 以及这些变化如何影响有机质埋藏和保存, 从而揭示了天文轨道变化与烃源岩形成的关系, 建立了天文轨道周期驱动下的渐新世海相烃源岩的发育模式。

1 概况

南海北部地处被动大陆边缘构造单元之上, 受到了太平洋板块、印度—澳大利亚板块以及欧亚板块的相互作用等全球板块构造演化及区域构造运动的共同控制(程世秀等, 2012), 反映了南海从晚中生代到新生代的大规模扩张与演化历史(何家雄等, 2007; 郑洪波等, 2008; 曾智伟, 2020)。自新生代以来, 随着南海的打开, 北部陆架经历了一系列拉张作用, 自西向东的构造格局和演化历程呈现出差异化特点, 从西部裂陷盆地向东部过渡为被动大陆边缘盆地, 而且伴随伸展断陷及南海扩

张, 盆地依次经历断陷、断拗及被动陆缘等构造演化过程, 且盆地的形成与火山活动密切相关(邱宁等, 2014; 赵明辉等, 2023)。

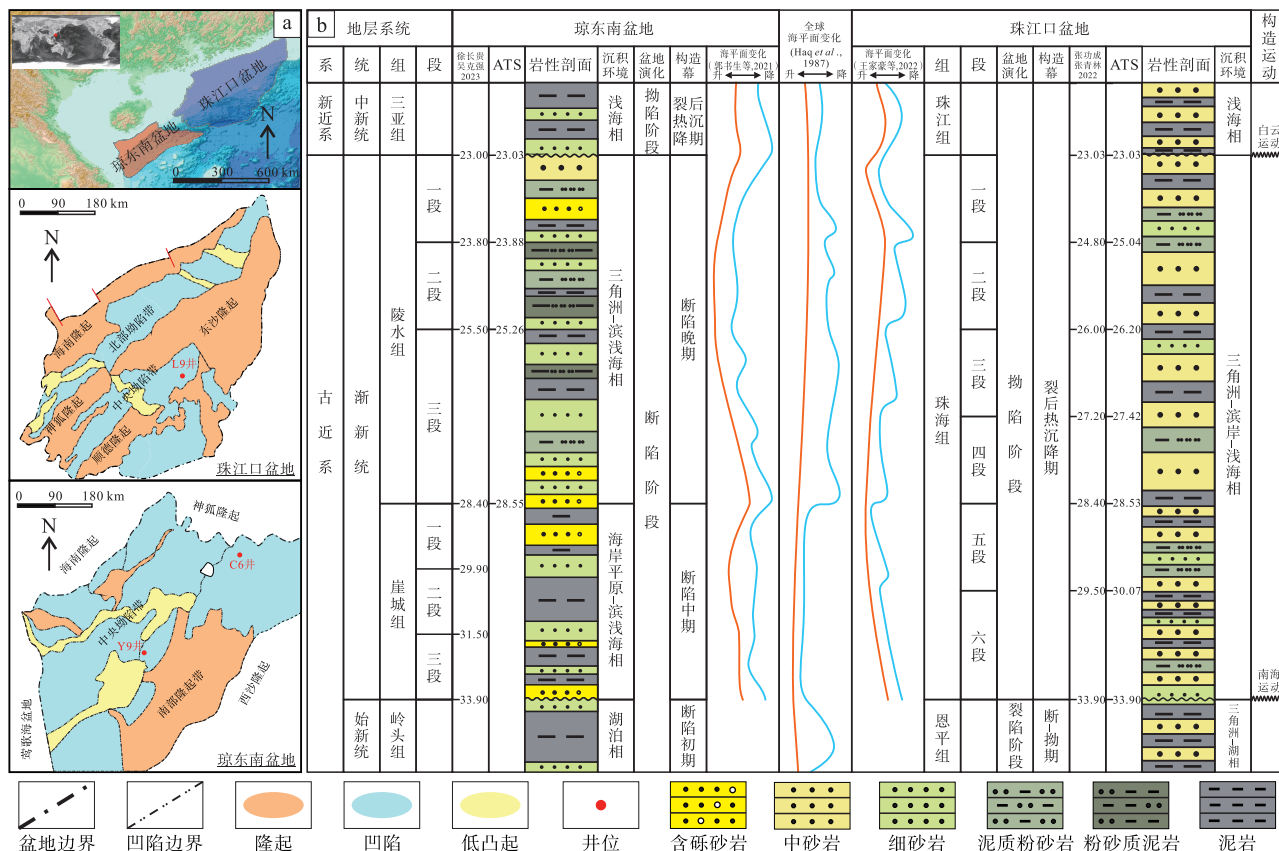
南海北部沉积受构造背景、气候变化以及沉积供应等多重因素控制影响, 形成了不同的区域沉积充填地层组合序列。新生代盆地充填以海相沉积为主(张青林等, 2022; 吴克强等, 2023)。古近纪, 从早期主要以陆相河湖及三角洲砂泥岩互层沉积为主, 逐渐过渡为晚期的海陆过渡—海相泥岩夹砂岩沉积(图 1), 该时期内琼东南盆地陵水组地层结构呈现出北厚南薄的特征, 属于断陷晚期的侵蚀产物, 地层下部以海陆过渡相沉积为主, 中上部发育海相沉积, 整体反映了滨海碎屑沉积体系和半封闭浅海沉积体系的发育特征。主要由中—粗砂岩及灰色泥岩组成, 呈互层状分布, 厚度不等(周杰等, 2019; 郭书生等, 2021; 徐长贵和尤丽, 2022)。珠江口盆地珠海组厚度通常为 350 ~ 2000 m, 受南海运动的影响, 珠海组与恩平组之间局部发育不整合面, 为裂拗转换的分界面。以大型三角洲沉积为主, 坡折带以下发育深水扇, 岩性以砂岩—泥岩互层为主(张功成, 2023; 王家豪等, 2024)。新近纪, 随着南海的海底扩张和沉降, 区域沉积环境总体上为海相泥岩夹砂岩及近岸三角洲砂泥岩互层沉积, 特别是在中新世至上新世阶段, 深海盆地的海相泥质沉积物广泛发育, 并且发育海相灰岩沉积。

2 方法和数据

2.1 数据选取

自然伽马射线测井(GR)用于测量地层中自然存在的放射性核元素衰变过程中放出的伽马射线的强度, 该强度与铀、钍和钾的含量有关, 温暖湿润的气候往往促进化学风化作用, 导致含铀、钍、钾的黏土矿物(如伊利石、蒙脱石等)增加, 而干冷气候下风化作用较弱, 导致放射性元素含量的降低, GR 数据强度的变化可以反映气候冷暖湿干的变化(朱春霞等, 2022), 大量的研究表明自然伽马测井数据可以用于古气候的重建及旋回地层学的研究(Fischer and Wefer, 1999; 汪品先, 2006; Peng *et al.*, 2024)。

旋回地层学研究一般选取连续沉积、无长时间



a—从上至下分别为珠江口盆地及琼东南盆地位置图、珠江口盆地构造单元简图、琼东南盆地构造单元简图；

b—琼东南盆地、珠江口盆地渐新统沉积地层综合柱状图

图 1 南海北部研究区域地质背景

Fig. 1 Geological background of the study area in northern South China Sea

沉积缺失或侵蚀事件的地层作为研究对象（田世峰等，2012），且后期未遭受构造、岩浆、热液等活动破坏以保存原始的沉积旋回信号。本次研究的晚始新世到渐新世南海北部总体构造以沉降为主，未遭受长时间剥蚀作用，地层较为连续，在钻井岩心中未发现明显的沉积间断或者岩性突变，也未发现岩浆侵入或热液活动事件，且对于研究的钻井还有生物地层年代进行约束，同时前人在此区域也开展过磁性地层、生物地层以及层序地层学工作（刘晓锋等，2018），这是开展本次旋回地层学研究的基础。采用自然伽马测井序列作为古气候替代指标，选择近于凹陷中心沉积地层较为连续、且沉积环境较为稳定的钻井，其岩性以泥岩夹砂岩或泥岩为主，其中砂岩沉积不是事件性沉积，砂岩和泥岩互层能够很好地反应天文轨道周期对于海平面变化的控制，不影响周期信号的识别，采样间隔均为 0.125 m，能够很好地反映这 2 个盆地在渐新世的古环境和古气候演变。

选取有孔虫数据和孢粉数据进行生物年代学和古气候分析，其浮游有孔虫分带和定年依据 Berggren 等（1995）和 Speije 等（2020）提出的方案和最新的地质时间标准 GTS2020，以及南海地区的有孔虫分带方案（刘晓锋等，2018）。采用 Tilia 软件进行孢粉组合特征数据统计、绘图，通过分析孢粉组合的变化特征，进行古气候重建。在以上分析的基础上，确定有机质组分及丰度以便了解南海北部渐新世海相烃源岩的特征，详实反映南海北部海相烃源岩发育的控制因素。

2.2 时间序列分析方法

采用 Acycle2.8 软件对自然伽马测井序列进行处理（Li et al., 2019）。对自然伽马测井序列运用 LOESS 函数拟合去除长期趋势（彭军等，2022），对去趋势的 GR 序列进行 2π -MTM 多窗口频谱分析（Thomson, 1982），并在 99%、95%、90% 的置信水平下，使用稳健的一阶自回归“AR(1)”红

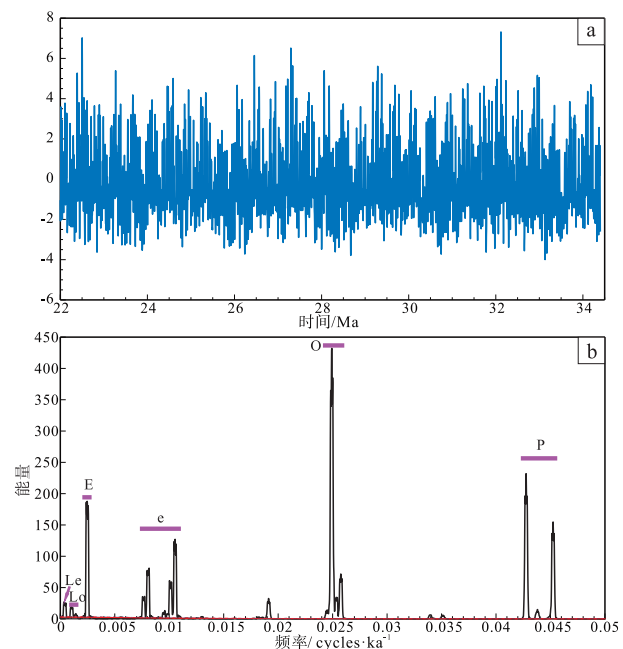
噪声模型对信号进行测试 (Mann and Lees, 1996)。应用快速傅里叶变换 (FFT) 以及滑动窗口对数据进行演化频谱分析, 以确定深度域中频率的变化和主控周期 (宋翠玉和吕大伟, 2022)。利用统计学方法对功率谱识别的峰值进行评估, 同时应用相关系数法 COCO/eCOCO (Li *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019) 对 GR 数据序列进行最优沉积速率估算。COCO 方法基于一系列可能的沉积速率, 将深度域 GR 数据序列转换为时间序列, 然后计算该时间序列的频谱与天文解决方案之间的相关系数; 并记录对相关系数有贡献的天文参数的数量; 同时使用蒙特卡洛模拟评估无天文驱动信号的零假设。最优沉积速率由高相关系数、多旋回信号及低零假设水平共同决定。eCOCO 还采用滑动窗口技术, 能够追踪替代指标深度域上的沉积速率变化。随后采用高斯带通滤波器分离 GR 数据中的各天文周期, 再对获得的 405 ka 长偏心率周期进行调谐建立年龄模型, 实现深度域数据向时间域数据的转化 (田军等, 2022)。

海平面变化重建在旋回地层学研究中是至关重要的一部分, 尤其是在研究气候变化对全球海平面波动的影响时, 天文轨道强迫被证明是调节地球气候系统的重要机制 (李红佼等, 2023)。在基于沉积噪声模型 (Sedimentary noise model) 的海平面变化重建过程中, 利用轨道调谐后的动态噪声模型 (DYNOT) 工具, 能够准确地识别和分析海平面变化趋势 (Li *et al.*, 2018)。

3 结果

3.1 深度域分析结果

南海北部大陆边缘东部珠江口盆地 L9 井 (3156~3626 m) GR 序列去趋势后的 2π -MTM 频谱分析显示, 该段存在 ~84.8 m、~44.8 m、~15.1 m、~3.5 m 和 ~1.5 m 这 5 个优势谱峰 (图 3-c), 谱峰置信度均大于 95%, 根据 Laskar 等 (2011) 的计算, 渐新世 (34.5~22 Ma) 理论天文轨道参数超长偏心率、长斜率、长偏心率、短偏心率、斜率分别为 2.4 Ma、1.2 Ma、405 ka、~100 ka、40.4 ka (图 2)。L9 井深度域的沉积旋回之比约为 24:12:4:1:0.40。其比值与最新的理论天文轨道周期解决方案中米兰科维奇旋回周期比



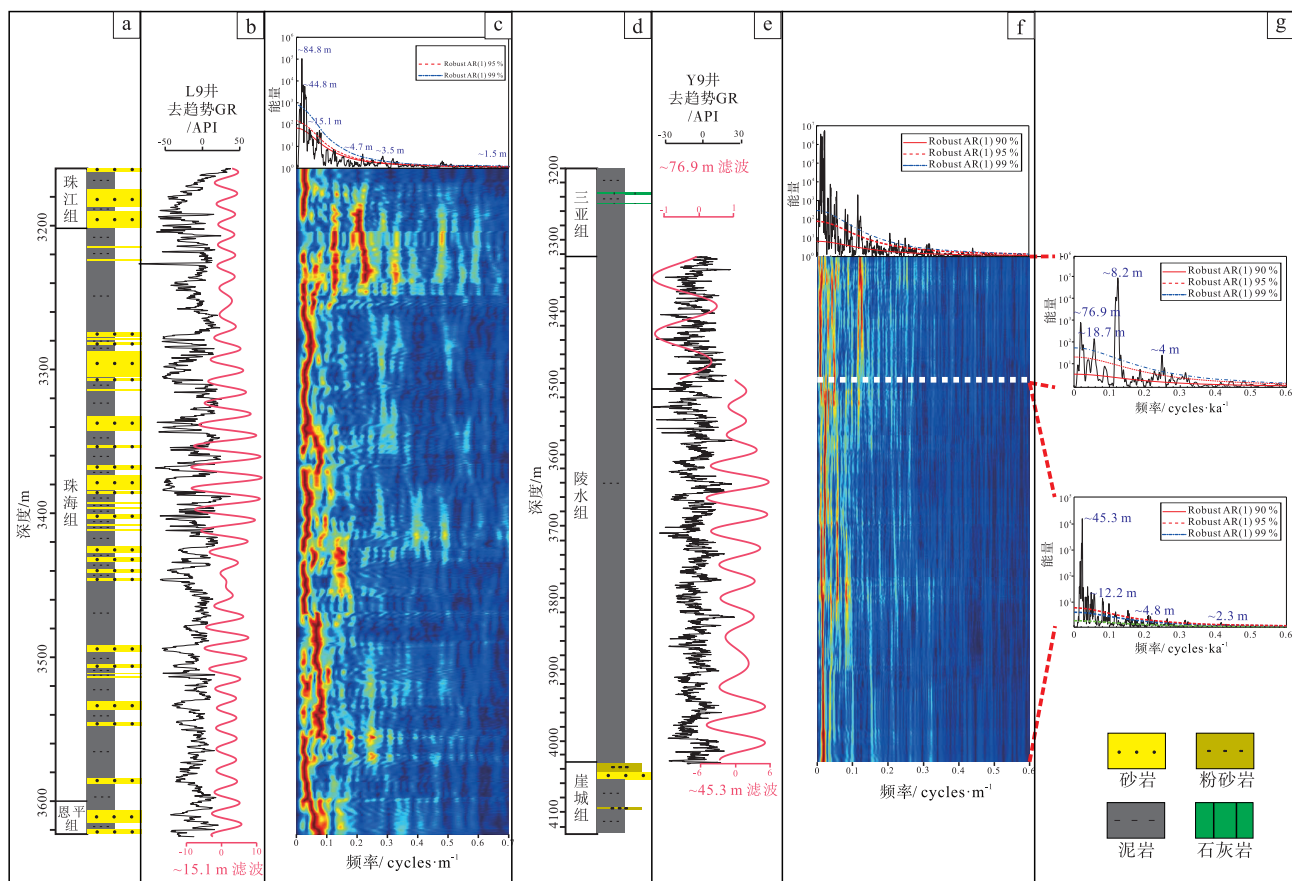
a—34.5~22 Ma 理论天文轨道周期 (Laskar *et al.*, 2011); b—34.5~22 Ma 理论天文轨道周期 2π -MTM 频谱分析, Le、Lo、E、e、O 和 P 分别为超长偏心率、长斜率、长偏心率、短偏心率、斜率和岁差信号

图 2 ETP 理论天文轨道周期

Fig. 2 ETP theoretical astronomical orbit period

值一致 (Laskar *et al.*, 2011), 因此初步认为 ~84.8 m 对应于 ~2.4 Ma 超长偏心率周期, ~44.8 m 对应 ~1.2 Ma 长斜率周期, ~15.1 m 对应 405 ka 的长偏心率周期, ~3.5 m 对应 100 ka 的短偏心率周期, ~1.5 m 对应 39 ka 的斜率周期。据此估算出该井平均沉积速率约为 3.6 cm/ka。采用 COCO/eCOCO 方法对 L9 井测试范围内 1~10 cm/ka 进行了 5000 次蒙特卡洛模拟, 结果显示存在 2.5 cm/ka、3.2 cm/ka 以及 7.9~8.5 cm/ka 这 3 个沉积速率峰值 (图 4-a), 且三者均小于 1‰ 的 H_0 显著性水平, 通过天文轨道匹配数及最高相关系数确定最佳沉积速率, eCOCO 分析显示, 其估算的演化沉积速率与 COCO 方法确定的最佳沉积速率 3.2 cm/ka 一致, 并在最佳沉积速率附近表现出最高的相关系数, 7.9~8.5 cm/ka 沉积速率相关系数较低且不稳定, 故不能作为最佳沉积速率, 而 2.5 cm/ka 仅对应 5 个天文轨道参数, 匹配数较低, 认为也不可作为最佳沉积速率。

南海北部大陆边缘西部琼东南盆地 Y9 关键井 GR 序列去趋势后的演化能谱显示, 在约 3500 m 处能量最强的低频信号发生了明显位移 (图 3-f), 表



a—珠江口盆地 L9 井的地层及岩性；b—珠江口盆地 L9 井去趋势 GR 序列（黑线）及 ~ 15.1 m 滤波（红线，滤波带宽 0.066 ± 0.006 cycles/m）；c—珠江口盆地 L9 井的去趋势 GR 序列的 2π -MTM 多窗口频谱分析结果及 eFFT 演化频谱图（滑动窗口 93 m，步长 0.7 m）；d—琼东南盆地 Y9 井的地层及岩性；e—琼东南盆地 Y9 井去趋势 GR 序列（黑线）及 ~ 36.8 m 滤波（红线，分段滤波带宽 0.01 ± 0.0035 cycles/m， 0.02 ± 0.005 cycles/m）；f—琼东南盆地 Y9 井的去趋势 GR 序列的 2π -MTM 多窗口频谱分析结果及 eFFT 演化频谱图（滑动窗口 80 m，步长 0.8 m）；g—琼东南盆地 Y9 井的去趋势 GR 序列的 2π -MTM 多窗口频谱分析分段结果

图 3 南海北部珠海组和陵水组深度域分析结果

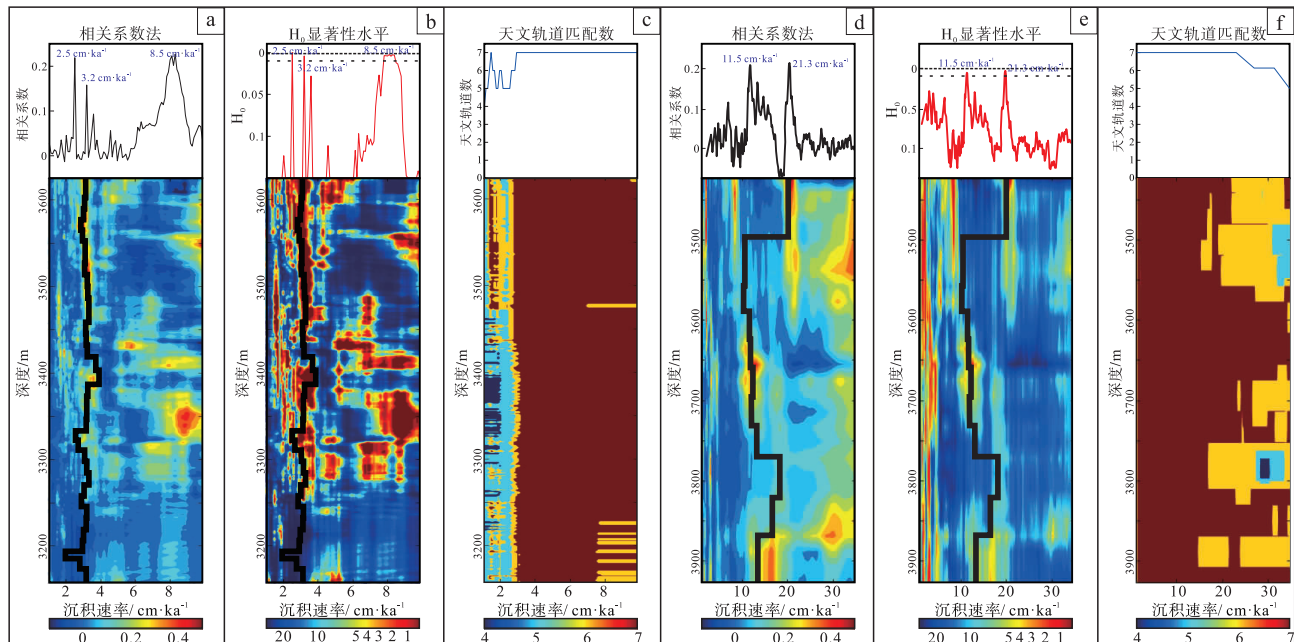
Fig. 3 Depth-domain analysis results of the Zhuhai and Lingshui Formations in northern South China Sea

明了去趋势深度域 GR 序列归因于 405 ka 长偏心率周期的旋回厚度并不一致，沉积速率差异过大，这是由于海平面变化造成沉积环境改变导致。因而对该井的去趋势 GR 序列分段进行的 2π -MTM 频谱分析(图 3-g)。在陵一段(3322~3495 m)，其 2π -MTM 功率谱显示出 ~ 76.9 m、 ~ 18.7 m、 ~ 8.2 m、 ~ 4.0 m 的优势谱峰，其比值约为 4:1:0.40:0.22，与该时期 Laskar 等(2011)的天文轨道周期解决方案中米氏旋回周期比率一致。因此认为深度域中 ~ 76.9 m 为长偏心率周期， ~ 18.7 m 为短偏心率周期， ~ 8.2 m 为斜率周期， ~ 4.0 m 为岁差周期，陵一段平均沉积速率约为 20.2 cm/ka。在陵二段、陵三段(3495~4027 m)，其 2π -MTM 功率谱显示

出 ~ 45.3 m、 ~ 12.2 m、 ~ 4.8 m、 ~ 2.3 m 的优势谱峰，其比值约为 4:1:0.40:0.20，与该时期 Laskar 等(2011)的天文轨道周期解决方案中米氏旋回周期比率一致。因此认为深度域中 ~ 45.3 m 为长偏心率周期， ~ 12.2 m 为短偏心率周期， ~ 4.8 m 为斜率周期， ~ 2.3 m 为岁差周期，陵二段、陵三段平均沉积速率约为 11.6 cm/ka。CO-CO/eCOCO 分析表明存在 11.5 cm/ka 和 21.3 cm/ka 的最优沉积速率(图 4-c)，这说明该井依据旋回厚度比值的天文周期成立，而且分段讨论具有合理性。

3.2 天文年代学分析结果

依据以上深度域分析结果，通过天文调谐将关



a—L9 井的 COCO 分析 (上) eCOCO 分析 (下) 测试 1~10 cm/ka 范围内的沉积速率, 步长为 0.1 cm/ka, 并进行了 5000 次蒙特卡罗模拟; b—L9 井的零假设 (上) 和演化零假设 H_0 显著水平 (下); c—L9 井的天文轨道匹配数 (上) 和演化天文轨道匹配数 (下); d—Y9 井的 COCO 分析 (上) eCOCO 分析 (下) 测试 1~35 cm/ka 范围内的沉积速率, 步长为 0.1 cm/ka, 并进行了 5000 次蒙特卡罗模拟; e—Y9 井的零假设 (上) 和演化零假设 H_0 显著水平 (下); f—Y9 井的天文轨道匹配数 (上) 和演化天文轨道匹配数 (下)

图 4 南海北部典型井 COCO 及 eCOCO 分析结果

Fig. 4 COCO and eCOCO analysis results of typical wells in northern South China Sea

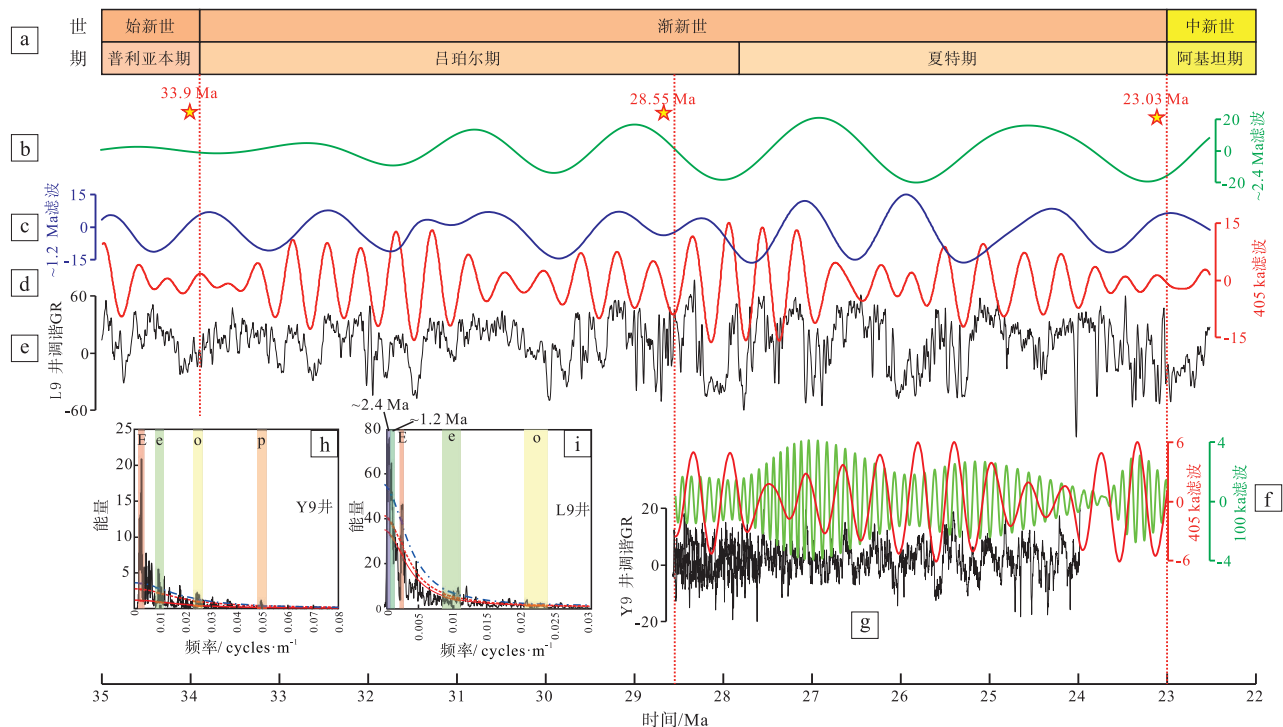
键井归因于 405 ka 长偏心率旋回厚度调谐至理论轨道长偏心率 (~405 ka), 珠江口盆地 L9 井渐新世浮动天文年代标尺持续时间约为 12.5 Ma。405 ka 调谐 GR 序列的 2π -MTM 频谱分析显示出了 ~2.4 Ma、~1.2 Ma、405 ka (E)、95 ka (e)、52 ka 和 39 ka (o) 的优势谱峰(图 5-i)。在南海北部大陆边缘东部珠江口盆地根据生物地层学、层序地层学研究和该地区锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 定年结果的研究以及国际地质年代表 GTS2020 (Ogg, 2020; 曾智伟, 2020; 玄昌姬等, 2024), L9 井 3202 m 处的渐新统顶界面的绝对年龄为 23.03 Ma, 将此年龄作为锚点, 建立了 L9 井晚始新世至早中新世 ~34.6~21.7 Ma 的绝对天文年代标尺(图 5-b, 5-c, 5-d, 5-e)。根据 Laskar 等 (2011) 的天文轨道周期解决方案在渐新世期间, 2.4 Ma 超长偏心率周期、1.2 Ma 长斜率周期和 405 ka 的长偏心率周期是主要天文旋回周期。并且基于调谐的 GR 数据的天文年代模型具有与未调谐的 GR 序列模型基本一致的演化模式, 即在 34.6~21.7 Ma 之间主要受到的 2.4 Ma 超长偏心率、1.2 Ma 长斜率和

405 ka 的长偏心率控制。这说明 L9 井中突出的天文轨道周期信号是稳定的, 天文调谐并没有明显改变数据的真实天文特征 (Zhang *et al.*, 2022)。

琼东南盆地 Y9 井晚渐新世浮动天文年龄为 5.55 ± 0.2 Ma。405 ka 调谐 GR 分段序列的 2π -MTM 频谱分析均显示出了偏心率、斜率、岁差周期(图 5-h), 琼东南盆地陵水组其顶界面根据生物年代学及前人研究 (Ding *et al.*, 2021) 认为是渐新统顶界面 (23.03 Ma), 故以 23.03 Ma 作为年龄锚点, 建立了琼东南盆地 28.55~23.03 Ma 绝对天文年代标尺(图 5-f, 5-g)。

3.3 有孔虫定量分析

通过对南海北部大陆边缘地区 22~34.5 Ma 的 80 个样品分析, 发现该时期有孔虫样品中含有中等的浮游有孔虫(图 6)。共发现有孔虫化石 40 属 56 种, 其中浮游类 6 属 22 种, 有孔钙质底栖类 26 属 26 种, 砂质壳 5 属 5 种, 瓷质壳 3 属 3 种, 主要包含典型的渐新世浮游有孔虫种类包括 *Paragloborotalia opima*, *Paragloborotalia nana*, *Tenuitella* spp., *Globigerinita* spp., *Globorotaloides suteri*, *Globo-*



a—地质年代 (35—22 Ma); b—e—L9 井调谐 GR 序列的 ~ 2.4 Ma 滤波 (绿线, 滤波带宽: 0.00046 ± 0.00015 cycles/ka), ~ 1.2 Ma 滤波 (蓝线, 滤波带宽: 0.00084 ± 0.0003 cycles/ka), 405 ka 滤波 (红线, 滤波带宽: 0.00247 ± 0.005 cycles/ka), 调谐后的 GR 序列 (黑线); f—g—Y9 井调谐 GR 序列的 405 ka 滤波 (红线, 滤波带宽: 0.00247 ± 0.005 cycles/ka), 100 ka 滤波 (绿线, 滤波带宽: 0.01 ± 0.002 cycles/ka), 调谐后的 GR 序列 (黑线); h—Y9 井调谐 GR 序列分段的 2π -MTM 多窗口频谱分析结果; i—L9 井调谐 GR 序列的 2π -MTM 多窗口频谱分析结果

图 5 南海北部典型井时间域分析结果

Fig. 5 Time-domain analysis results of type wells in northern South China Sea

quadrina venezuelana 和 *Globigerina ciperoensis*, *Turborotalia ampliapertura* 和 *Turborotalia euapertura* 以及零星 *Chiloguembelina cubensis* (Li *et al.*, 2004)。根据浮游有孔虫定年种的末现面 (LO), 南海北部渐新世地层可以划分为以下化石带: P18—P19 带 (33.90~30.28 Ma), 其顶部标志为 LO *Turborotalia ampliapertura*; P20—P21a 带 (30.28~28.09 Ma), 其顶部标志为 LO *Chiloguembelina cubensis*; P21b (28.09~26.93 Ma), 顶界以 LO *Paragloborotalia opima* 与 *Globorotalia opima opima* 为标志; P22 带 (26.93~23.03 Ma), 在样品中见有 N4 底界 P22 顶界的标志化石 LO *Globigerina ciperoensis*, 此外, 白垩化现象也可以作为渐新世与中新世分界的标志 (李前裕和汪品先, 2007; Cramer *et al.*, 2009)。

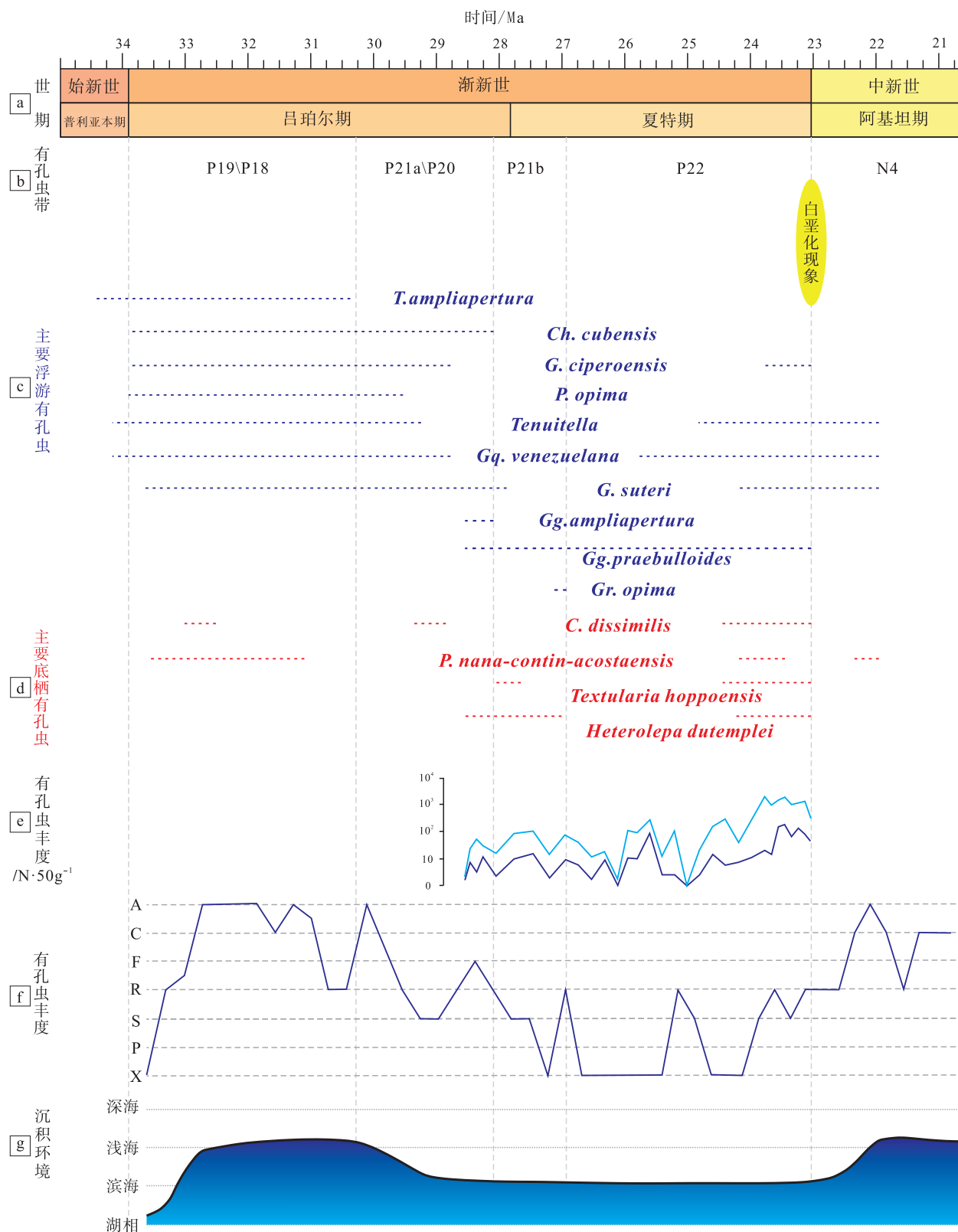
在约 34 Ma 时开始出现少量浮游有孔虫, 并且往上连续增多, 表明从浅海环境发展到外陆架或更深水沉积环境 (Li *et al.*, 2004)。在 29~26 Ma 期间浮游有孔虫含量稀少, 说明可能转变为浅水陆架至

滨海相沉积。而后, 23 Ma 浮游有孔虫含量有明显增加, 有白垩化现象, 反应了这一时期前后的高海面事件 (Cramer *et al.*, 2009)。从晚渐新世到中新世, 如大量浮游有孔虫所示, 几乎都处于较为稳定的陆坡环境。不过, 中新世样品含碎壳高, 说明中新世处于外陆坡、比渐新世更深水的沉积环境。

3.4 孢粉学分析

对南海北部大陆边缘分析鉴定孢粉样品 65 个, 取样间隔平均 5~30 m, 经鉴定有较丰富的孢粉, 且主要孢粉组合具有相似性 (图 7)。共鉴定得孢粉种类 67 个, 其中蕨类孢子种类 11 个, 裸子植物花粉种类 7 个, 被子植物花粉种类 49 个, 见有浮游藻类, 含量为 1.0%~38.6%。共鉴定出浮游藻类种类 20 个, 其中河湖相藻类种类 4 个, 海相沟鞭藻类 16 个。

根据孢粉组合及数量变化, 称为 *Q. minutus-Pinuspollenites-Polypodiaceasporites* 组合。本组合中



a-b—地质年代、有孔虫化石带 (Speijer *et al.*, 2020; 玄昌姬等, 2024); c-d—南海北部主要浮游有孔虫和主要底栖有孔虫; e—C6 井有孔虫丰度; f-g—L9 井有孔虫丰度 (A=丰富, C=常见, F=频繁, R=罕见, S=零星, P=存在, X=无)、有孔虫丰度反映的环境变化

图 6 南海北部有孔虫定量分析图

Fig. 6 Quantitative foraminiferal analysis in northern South China Sea

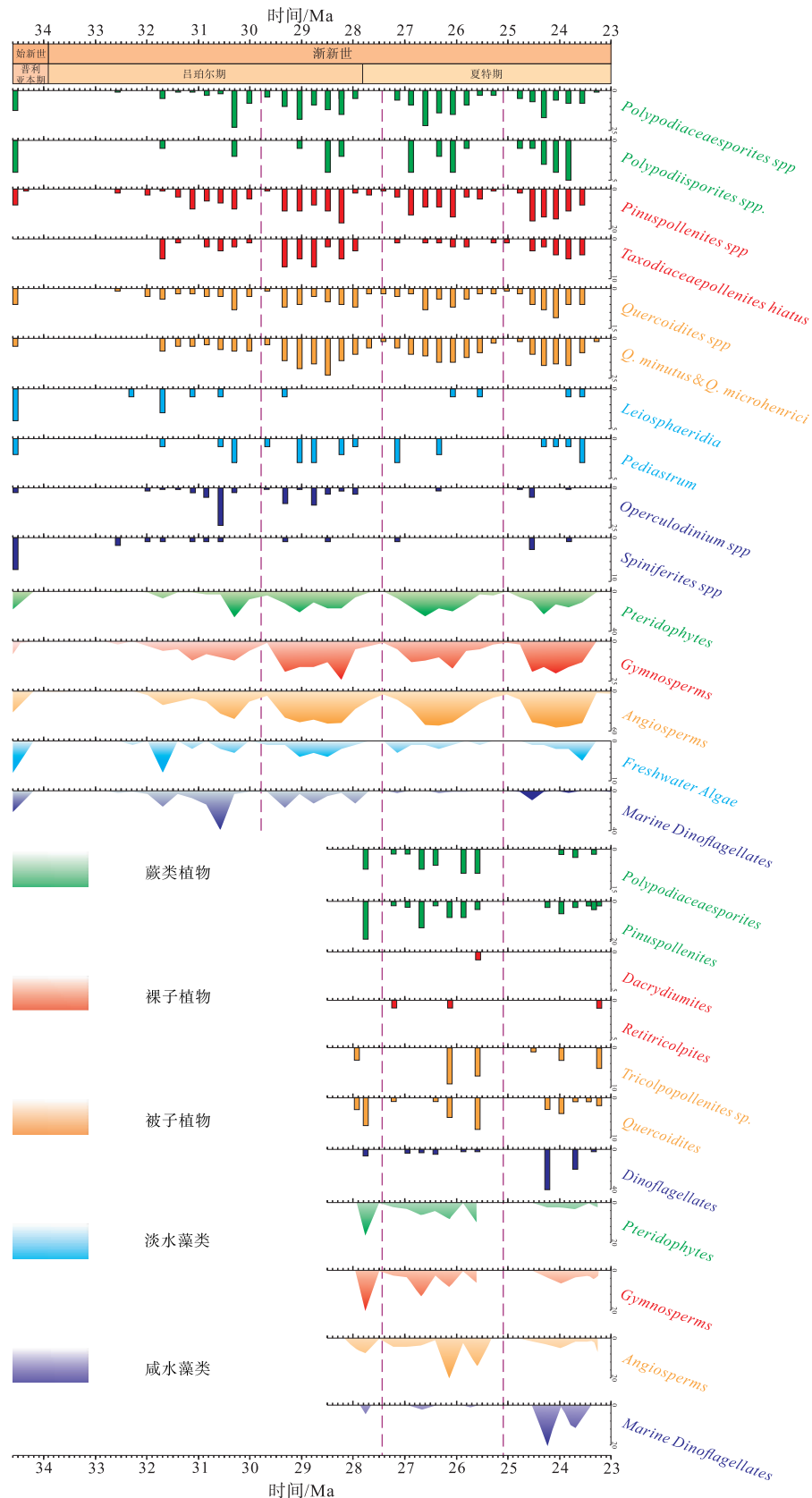


图 7 南海北部渐新世主要孢粉记录统计

Fig. 7 Oligocene pollen records statistics in northern South China Sea

被子植物较多 (48%~68%), 裸子植物 (15%~18%) 和蕨类植物 (14%~16%) 次之, 藻类较少 (3%~9%), 被子植物主要为 *Q. minutus*、*Q. microhenrici*、*Quercoidites*、*Cupuliferoipollenites*、*Retitricolpites* spp.; 裸子植物主要为 *Pinuspollenites* spp. 和 *Taxodiaceapollenites hiatus* 少见 *Abietineaepollenites* spp.; 蕨类植物主要为 *Polypodiaceasporites* 和 *Polypodiisporites*, 少见 *Pinuspollenites*、*Extrapunctatosporites* 和 *Toroisporis*; 藻类主要为咸水 *Operculodinium* spp. 和少量淡水 *Pediastrum*。

从孢粉类型来看, 蕨类孢粉 (*Polypodiaceasporites* spp.、*Polypodiisporites* spp.、*Toroisporis* sp.、*Extrapunctatosporites* spp.) 均为热带—亚热带、湿生孢粉。裸子类植物孢粉中, 占比最大的 *Pinuspollenites* spp. 为广温性植物孢粉, 即在热带到温带气候中均可生长。而在被子类植物孢粉中占比较大的 *Q. minutus*、*Q. microhenrici* 和 *Quercoidite* 在热带—温带气候中均有分布, 且均为湿生植物。

在孢粉组合中, 渐新世孢粉中热带—亚热带孢粉植物比例小于 60%, 亚热带—温带孢粉植物比例大于 30%, 旱生植物孢粉比例小于 20%, 参照最新气候带划分原则 (Bruch *et al.*, 2011; McCoy *et al.*, 2024), 亚热带—温带孢粉植物比例超过 30% 表明该区域属于亚热带—温带气候带, 而旱生植物孢粉比例低于 20% 则指示湿润气候, 说明渐新世时期整体处于亚热带—温带温暖湿润气候环境。在藻类孢粉中, 各段出现占比最大的均为半咸水的海相沟鞭藻, 其代表渐新世研究区可能处于滨海或浅海的沉积环境中 (Wu *et al.*, 2003; Mao *et al.*, 2007)。

4 讨论

4.1 烃源岩控制因素

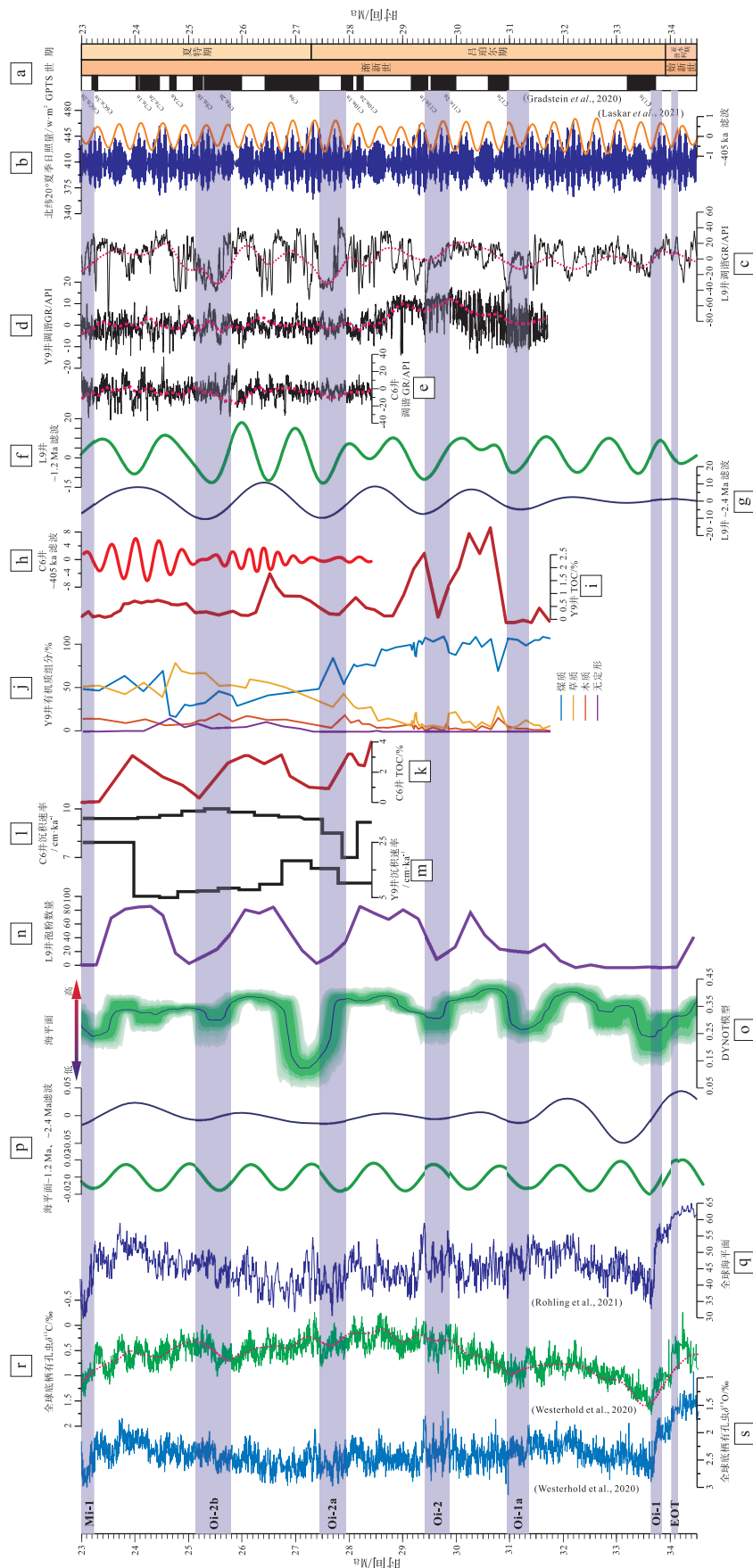
天文轨道参数 (包括偏心率、斜率和岁差) 的周期性变化驱动了全球气候的波动, 斜率控制高低纬度间太阳辐射量的空间分配影响气候, 而偏心率则是通过对岁差的调幅影响气候系统 (Ao *et al.*, 2021; 田军等, 2022)。基于多种古气候替代指标分析, 在南海渐新世期间, 整体呈现出亚热带—温带温凉湿润的气候特征, 并保持着较低的温度, 且在晚渐新世出现了气候变暖的现象, 1.2 Ma 长斜

率周期和 2.4 Ma 超长偏心率周期高值时期对应米兰科维奇周期驱动的气候暖期 (图 8), 而低值时对应冷期, 多口井古气候替代指标变化与全球碳氧同位素记录的对比进一步支持了这一结论 (Westerhold *et al.*, 2020), 暖期与冷期交替导致海平面和沉积速率的变化 (Ruhl *et al.*, 2010), 从而控制有机质的生成环境、保存条件以及有机质的组成结构, 决定了烃源岩的分布和质量 (Ma *et al.*, 2016)。

4.1.1 海平面波动

全球海平面变化与气候变化密切相关, 而天文轨道强迫已被证明可以调节地球的气候系统 (Hochmuth *et al.*, 2022; De Lira Mota *et al.*, 2023; 李红佼等, 2023), 对南海北部地区 DYNOT 的中值以及全球海平面变化曲线进行了约 2.4 Ma 和 1.2 Ma 周期的滤波分析 (图 8), 结果显示长周期轨道变化与百万年尺度的海平面变化之间存在因果关系 (Zhang *et al.*, 2024), 2.4 Ma 超长偏心率周期与 1.2 Ma 长斜率周期低值时海平面下降。海平面变化对烃源岩的影响主要通过改变沉积环境和有机质保存条件来实现 (肖强等, 2021), 海平面的升降直接影响了沉积环境的氧化还原状态、水体深度、营养物质供应以及有机质的生成和保存。

在海平面上升和下降的过程中, 沉积环境和气候条件的变化导致了有机质组分的变化。在低海平面时期, 沼泽、潟湖面积扩大, 导致煤质屑占比高达 73%~95% (Bechtel *et al.*, 2012; 丁修建等, 2023), 而随着海平面的逐步上升, 木质、草质及无定形有机质含量增加, 尤其是无定形有机质含量从 0 增加至 14.2%, 反映出更多海洋生产力的贡献 (Niu *et al.*, 2021)。有机质丰度的变化也随着海平面变化波动, 在低海平面时期, 陆源有机质碎屑输入量减少, 沉积环境氧化性强, 不利于有机质的保存 (程锦翔等, 2022), 有机质丰度 0.3%~1.5%, 在海平面上升至最大海泛面时, 有机质丰度大大增加 1.5%~4%, 最大海泛面时期, 海平面达到最高点, 此时的沉积环境最为还原, 水体深度较大, 氧气匮乏, 极大地减少了有机质的氧化分解。这一时期往往是有机质富集的高峰期, 尤其是在富营养的深水区, 浮游植物和藻类的生长加速, 为沉积物提供了丰富的有机质 (Herbert *et al.*, 1986)。此时形成的沉积物富含无定形有机质, 并且保存条件最为优越, 极为有利于烃源岩的发育, 最大海泛面时期



a—渐新世地磁极性时间标尺 (GPTS 2000) (Ogg, 2020); b—20°N 夏季平均日照量和 405 ka 偏心率滤波 (Laskar *et al.*, 2011); c—e—L9、C6、Y9 井的 405 ka 调谐的 GR 序列, 红色虚线为平滑趋势线; f—h—L9、C6 井 405 ka 调谐的 GR 序列中 ~2.4 Ma、~1.2 Ma 和 405 ka 滤波 (Yang *et al.*, 2024); i—k—Y9、C6 井的 TOC 含量及其组分; l—m—C6、Y9 井沉积速率曲线; n—L9 井孢粉数量; o—L9 井 DYNOT 海平面模型; p—海平面 ~2.4 Ma 滤波 (蓝线) 及 ~1.2 Ma 滤波 (绿线); q—全球海平面变化数据 (Rohling *et al.*, 2021); r—s—全球底栖有孔虫碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 和氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) (Westerhold *et al.*, 2020); 紫色条带为渐新世气候事件标注

图 8 南海北部渐新世古气候演化及有机质综合对比

Fig. 8 Integrated comparison of the Oligocene palaeoclimate evolution and organic matter in northern South China Sea

是烃源岩生成的关键期（彭晓东等，2022）。

整体来看，海平面变化对烃源岩的发育产生了显著影响，在低海平面时期，陆源有机质碎屑输入量低，氧化条件较强，不利于有机质的保存，而随着海平面上升，沉积环境变得更加还原，有利于有机质的保存和富集，尤其在最大海泛面时期，形成了良好的烃源岩保存环境。

4.1.2 沉积速率调控

天文轨道周期驱动的气候变化通过影响沉积速率的变化从而控制有机质的形成，气候变化直接影响风化作用（Ogi *et al.*, 2008）、侵蚀与沉积物搬运过程（Lisiecki and Stern, 2016；张瑞等，2023），并通过调控海平面波动、沉积物供应和碳循环影响沉积速率（Maher and Chamberlain, 2014）。这些变化在高分辨率的沉积记录中清晰可见，为深入理解沉积速率对烃源岩发育的影响提供了重要线索。

沉积速率对有机质丰度具有重要影响，南海北部 Y9 井陵一段的平均沉积速率约为 20 cm/ka，有机质丰度 0.3%~0.4%，陵二段、陵三段的平均沉积速率为 12 cm/ka，有机质丰度 0.4%~0.7%，随着沉积速率的增加，有机质丰度呈现出下降的趋势，C6 井的平均沉积速率为 9 cm/ka（Yang *et al.*, 2024），有机质丰度平均为 3.5%，而 Y9 井的平均有机质丰度仅为 0.6%。这表明沉积速率越低越有利于有机质的保存，由于沉积物过快堆积，特别是在以粗颗粒沉积物为主导的情况下，有机质可能因被稀释而减少，从而导致有机质丰度降低（Ma *et al.*, 2016）。

从有机质组分来看，当沉积速率 15~20 cm/ka 时，有机质组分以煤质屑为主，占比 75%~85%，而当沉积速率降低至 12 cm/ka 时，煤质屑含量降低至 25%~50%，无定形有机质含量从 0 增加至 10%（图 8）。沉积速率在控制有机质丰度与组分方面起到重要作用，低沉积速率有利于优质烃源岩的发育。

4.2 烃源岩发育模式

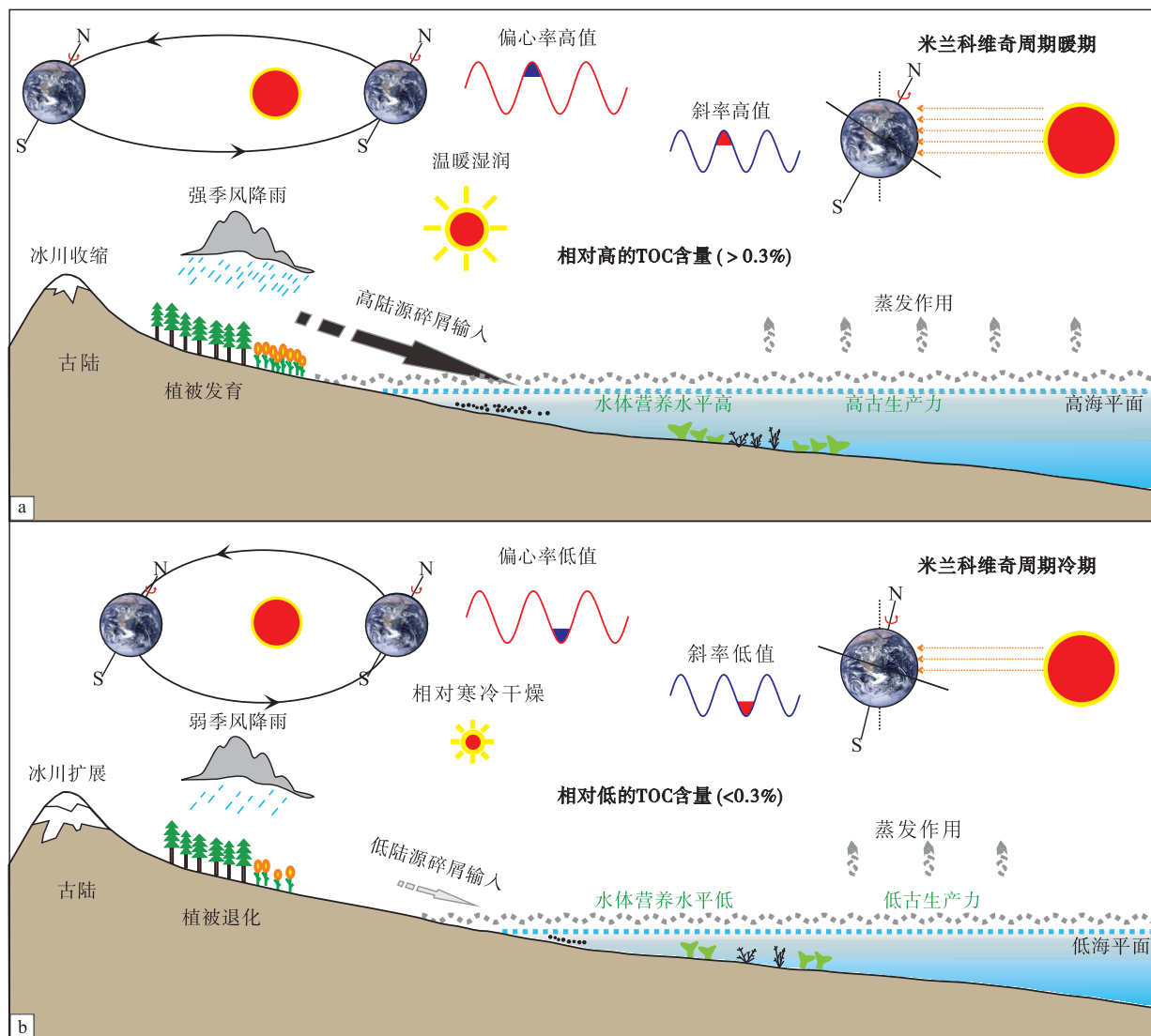
烃源岩的发育和分布与天文旋回变化存在明显的周期性关联，1.2 Ma 长斜率周期与 2.4 Ma 超长偏心率周期共同控制了渐新世的气候变化，这些周期性变化通过影响海平面和沉积速率，进而控制了烃源岩的时空分布（图 9）。

在米兰科维奇旋回暖期，2.4 Ma 超长偏心率周期、1.2 Ma 长斜率周期均处于高值（Ruhl *et al.*, 2010），烃源岩表现出较高的有机质丰度 1.5%~4%，在天文轨道强迫下的气候温暖湿润时期往往伴随着较高的生物生产力和较强的植被生长，特别是在湿润的气候条件下，植物生长旺盛，产生大量的有机质，海平面上升，氧化还原环境较为稳定，有机质的降解速度较慢（程锦翔等，2022），这一气候条件有利于有机质富集（图 9-a）。在米兰科维奇旋回冷期，2.4 Ma 超长偏心率周期和 1.2 Ma 长斜率周期处于低值，导致气候相对寒冷干旱，植被减少，植物的生长受到抑制，海平面降低，氧化作用增强，有机质的保存条件恶化，陆源有机质碎屑供给减少，导致有机质丰度较低，为 0.3%~1.5%（Lanci *et al.*, 2010；肖强等，2021），这种气候条件下的烃源岩中，有机质的积累较少，从而影响了烃源岩的生烃潜力（图 9-b）。

对有机质组分研究发现，气候变化对不同类型的有机质影响显著。在渐新世早期吕珀尔期，气候相对寒冷，煤质屑含量占比 66.4%~95.1%，由于森林植被在寒冷气候下的保存环境较为优越，沼泽和潟湖面积增大，形成煤质有机质（丁修建等，2023），煤质屑通常具有较高的生气潜力，在高成熟度地质条件下可转化为天然气（Herbert *et al.*, 1986；Niu *et al.*, 2021），这一时期烃源岩的发育有利于天然气的形成。而在渐新世晚期夏特期，气候相对温暖湿润，木质和草质有机质含量较高，平均占比约 53%，草质有机质的增加则反映了温暖气候时期草本植物在温暖气候中的相对优势，无定形有机质则主要来自浮游生物和藻类，其含量的变化受水体生产力的影响较大，在温暖气候下，水体富营养化程度较高，浮游生物繁殖旺盛，因此在吕珀尔期间占比为 0，而在夏特期无定形有机质的含量相应增加，最大达到 14.2%，无定形有机质是优质烃源岩的主要组成部分，尤其是在富有机质的海洋或湖泊沉积环境中，脂类物质是石油生成的主要来源，因此无定形有机质对烃源岩的生成，特别是石油生成，起到了至关重要的作用（Katz, 1995；Bechtel *et al.*, 2012）。

5 结论

本次研究在南海渐新世识别出 2.4 Ma 超长偏



a—米兰科维奇旋回暖期控制下的烃源岩发育模式；b—米兰科维奇旋回冷期控制下的烃源岩发育模式

图 9 天文轨道周期驱动下的烃源岩发育模式

Fig. 9 Hydrocarbon source rock development model driven by astronomical orbital cycles

心率和 1.2 Ma 长斜率周期，通过与该地区多种古气候替代指标以及全球碳氧同位素综合对比，认为天文轨道周期通过调控太阳辐射分布，影响高纬度冰盖动态变化与低纬度气候系统，控制了该时期海平面和沉积速率的变化。

在米兰科维奇暖期海平面处于高位，温暖气候促进了生物生产力的提升，有机质沉积环境还原性增强，有利于形成较高品质的烃源岩（TOC 含量 1.5%~4.0%）。而在米兰科维奇冷期海平面处于低位，寒冷气候导致生物生产力降低，有机质暴露于氧化环境中，保存条件恶化，导致烃源岩的质量与潜力降低（TOC 含量 0.3%~1.5%）。此外，夏

特期的温暖湿润气候有利于无定形有机质的生成（占有机碳的 14.2%）；而在吕珀尔期的冷干气候中，由于海平面较低，沼泽和潟湖面积扩大，导致煤质屑组分比例增加（66.4%~95.1%）。

沉积速率也是烃源岩发育的重要调控因素。低沉积速率（<9 cm/ka）有利于有机质保存（TOC 含量 3.5%）和无定型有机质的增加（14.2%）。而沉积速率过高（>12 cm/ka）易导致有机质稀释，丰度下降（0.3%~0.7%），煤质屑组分增加（50%~85%）。

本研究揭示了天文轨道强迫下的气候变化，通过控制海平面变化与沉积速率，从而影响南海北部

渐新世海相烃源岩的发育模式及时空分布，为未来烃源岩分布预测及评价提供了重要参考。

参考文献 (References)

- 昌建波. 2020. 珠江口盆地珠江组强制海退砂体与岩性油气藏：以惠州凹陷南部为例. 海相油气地质, 25(2): 121–131. [Chang J B. 2020. Forced-regressive sand bodies and the related lithologic reservoirs of Zhujiang Formation in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 25(2): 121–131]
- 程锦翔, 邓敏, 王正和, 余谦, 张海全, 刘伟, 赵安坤, 杨贵来. 2022. 康滇古陆西侧早志留世古海洋氧化—还原环境及优质烃源岩发育模式：以盐源地区 CYD2 井为例. 地质通报, 41(10): 1813–1828. [Cheng J X, Deng M, Wang Z H, Yu Q, Zhang H Q, Liu W, Zhao A K, Yang G L. 2022. Paleo-marine redox conditions and development model of high-quality source rocks of the Early Silurian on the west side of Kangdian Oldland: a case study of CYD2 well in Yanyuan area. Geological Bulletin of China, 41(10): 1813–1828]
- 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 余珊, 戴黎明, 马云, 赵淑娟, 王霄飞, 安慧婷. 2012. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因. 海洋地质与第四纪地质, 32(6): 79–93. [Cheng S X, Li S Z, Suo Y H, Liu X, Yu S, Dai L M, Ma Y, Zhao S J, Wang X F, An H T. 2012. Cenozoic tectonics and dynamics of basin groups of the northern South China Sea. Marine Geology & Quaternary Geology, 32(6): 79–93]
- 丁修建, 高天泽, 李淑凤, 赵龙梅, 孙宇鹏. 2023. 煤系烃源岩特征与发育机制研究现状. 科学技术与工程, 23(13): 5373–5389. [Ding X J, Gao T Z, Li S F, Zhao L M, Sun Y P. 2023. Research status of characteristics and development mechanism of coal-measure source rocks. Science Technology and Engineering, 23(13): 5373–5389]
- 高阳东, 朱伟林, 彭光荣, 龙祖烈, 汪旭东, 石创, 陈聪, 黄玉平, 张博. 2024. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩评价及油气资源分布预测. 石油勘探与开发, 51(5): 986–996. [Gao Y D, Zhu W L, Peng G R, Long Z L, Wang X D, Shi C, Chen C, Huang Y P, Zhang B. 2024. Evaluation of source rocks and prediction of oil and gas resources distribution in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China. Petroleum Exploration and Development, 51(5): 986–996]
- 郭书生, 廖高龙, 梁豪, 彭志春, 王世越. 2021. 琼东南盆地 BD21 井深水天然气勘探重大突破及意义. 中国石油勘探, 26(5): 49–59. [Guo S S, Liao G L, Liang H, Peng Z C, Wang S Y. 2021. Major breakthrough and significance of deep-water gas exploration in Well BD21 in Qiongdongnan Basin. China Petroleum Exploration, 26(5): 49–59]
- 何登发, 马永生, 刘波, 蔡勋育, 张义杰, 张健. 2019. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题. 地学前缘, 26(1): 1–12. [He D F, Ma Y S, Liu B, Cai X Y, Zhang Y J, Zhang J. 2019. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China. Earth Science Frontiers, 26(1): 1–12]
- 何家雄, 施小斌, 夏斌, 刘海龄, 阎贫, 姚永坚, 张树林. 2007. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景. 地球科学进展, 22(3): 261–270. [He J X, Shi X B, Xia B, Liu H L, Yan P, Yao Y J, Zhang S L. 2007. The status of petroleum exploration in the northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas. Advances in Earth Science, 22(3): 261–270]
- 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 李志明, 蒋启贵, 吴世强, 李政, 徐祖新. 2022. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义. 石油与天然气地质, 43(1): 1–25. [Li M W, Ma X X, Jin Z J, Li Z M, Jiang Q G, Wu S Q, Li Z, Xu Z X. 2022. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China. Oil & Gas Geology, 43(1): 1–25]
- 李红佼, 张廷山, 张喜, 肖强, 高璐彪. 2023. 天文轨道周期调制的海平面变化对生物礁发育的影响：以川东北地区晚二叠世长兴期为例. 断块油气田, 30(1): 52–59. [Li H J, Zhang T S, Zhang X, Xiao Q, Gao L B. 2023. Effects of sea level change modulated by astronomical orbital period on organic reefs development: a case study of Late Permian Changxing in Northeast Sichuan. Fault-Block Oil & Gas Field, 30(1): 52–59]
- 李猛, 李昕, P. HESSELBO, S, 李明杰, 刘文进, 吴伟, 潘结南, 高瑞珍. 2024. 冰室-(超)温室气候动荡期湖平面演化及天文轨道气候作用. 中国科学：地球科学, 54(1): 264–280. [Li M, Li X, Hesselbo P, Li M J, Liu W J, Wu W, Pan J N, Gao R Z. 2024. Orbital pacing and secular evolution of lake-level changes reconstructed by sedimentary noise modeling during the Early Jurassic icehouses-(super)greenhouses. Science China Earth Sciences, 54(1): 264–280]
- 李前裕, 汪品先. 2007. 新近纪海相生物地层事件年龄新编. 地层学杂志, 31(3): 197–208. [Li Q Y, Wang P X. 2007. New ages for Neogene marine biostratigraphic events. Journal of Stratigraphy, 31(3): 197–208]
- 李友川, 米立军, 张功成, 傅宁, 孙玉梅. 2011. 南海北部深水区烃源岩形成和分布研究. 沉积学报, 29(5): 970–979. [Li Y C, Mi L J, Zhang G C, Fu N, Sun Y M. 2011. The formation and distribution of source rocks in the deep-water area of the northern South China Sea. Acta Sedimentologica Sinica, 29(5): 970–979]
- 刘池洋, 赵俊峰, 马艳萍, 王建强, 熊林芳, 陈建军, 毛光周, 张东东, 邓煜. 2014. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题. 地学前缘, 21(1): 75–88. [Liu C Y, Zhao J F, Ma Y P, Wang J Q, Xiong L F, Chen J J, Mao G Z, Zhang D D, Deng Y. 2014. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag. Earth Science Frontiers, 21(1): 75–88]
- 刘晓锋, 孙志鹏, 刘新宇, 刘东生, 翟世奎, 龙海燕, 姜龙杰, 毕东杰. 2018. 南海北部深水区 LS33a 钻井微体古生物年代地层格架. 沉积学报, 36(5): 890–902. [Liu X F, Sun Z P, Liu X Y, Liu D S, Zhai S K, Long H Y, Jiang L J, Bi D J. 2018. Chronostratigraphic framework based on micro-paleontological data from drilling LS33a in deep water area of northern South China Sea. Acta Sedimentologica Sinica, 36(5): 890–902]
- 米立军, 周守为, 谢玉洪, 张功成, 杨海长. 2022. 南海北部深水区油气勘探进展与未来展望. 中国工程科学, 24(3): 58–65. [Mi L J, Zhou S W, Xie Y H, Zhang G C, Yang H C. 2022. Deep-water oil and gas exploration in northern South China Sea: progress and outlook. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 24(3): 58–65]
- 彭军, 于乐丹, 许天宇, 韩浩东, 杨一茗. 2022. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析. 石油与天然气地质, 43(6): 1292–1308. [Peng J, Yu L D, Xu T Y, Han H D,

- Yang Y M. 2022. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(6): 1292–1308]
- 彭晓东, 徐锦龙, 方朝刚, 沈仕豪, 章诚诚. 2022. 宣广盆地中二叠世栖霞组层序地层特征及页岩气勘探前景. *华东地质*, 57(10): 3189–3207. [Peng X D, Xu J L, Fang C G, Shen S H, Zhang C C. 2022. Sequence stratigraphic characteristics and shale gas exploration prospect of Middle Permian Qixia Formation in the Xuancheng–Guangde Basin. *East China Geology*, 57(10): 3189–3207]
- 邱宁, 王章稳, 王振峰, 孙志鹏, 孙珍, 周蒂. 2014. 南海北部琼东南盆地地层结构与地壳伸展特征. *地球物理学报*, 57(10): 3189–3207. [Qiu N, Wang Z W, Wang Z F, Sun Z P, Sun Z, Zhou D. 2014. Tectonostratigraphic structure and crustal extension of the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(10): 3189–3207]
- 宋翠玉, 吕大伟. 2022. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展. *沉积学报*, 40(2): 380–385. [Song C Y, Lü D W. 2022. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 380–395]
- 田军, 吴怀春, 黄春菊, 李明松, 马超, 汪品先. 2022. 从 40 万年长偏心率周期看米兰科维奇理论. *地球科学*, 47(10): 3543–3568. [Tian J, Wu H C, Huang C J, Li M S, Ma C, Wang P X. 2022. Revisiting the Milankovitch theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle. *Earth Science*, 47(10): 3543–3568]
- 田世峰, 陈中强, 查明. 2012. 珠江口盆地中中新世韩江组天文调谐地质年代代表. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(1): 27–32. [Tian S F, Chen Z Q, Zha M. 2012. Astronomical time scale of middle Miocene Hanjiang Formation in Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(1): 27–32]
- 汪品先. 2006. 地质计时的天文“钟摆”. *海洋地质与第四纪地质*, (1): 1–7. [Wang P X. 2006. Astronomical “pendulum” for geological clock. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1): 1–7]
- 王家豪, 庞雄, 王华, 柳保军, 陈鑫鑫. 2024. 珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组潮流改造的砂质海底扇沉积. *地球科学*, 49(1): 71–83. [Wang J H, Pang X, Wang H, Liu B J, Chen X X. 2024. Tide current-reworked sandy submarine fan deposits in Miocene Zhujiang Formation, Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 49(1): 71–83]
- 吴景富, 杨树春, 张功成, 单竟男, 唐晓音, 梁建设. 2013. 南海北部深水盆地地热历史及烃源岩热演化研究. *地球物理学报*, 56(1): 170–180. [Wu J F, Yang S C, Zhang G C, Shan J N, Tang X Y, Liang J S. 2013. Geothermal history and thermal evolution of the source rocks in the deep-water area of the northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(1): 170–180]
- 吴克强, 解习农, 裴健翔, 任建业, 尤丽, 姜涛, 权永彬. 2023. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义: 以琼东南盆地为例. *石油与天然气地质*, 44(3): 651–661. [Wu K Q, Xie X N, Pei J X, Ren J Y, You L, Jiang T, Quan Y B. 2023. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: a case study of Qiongdongnan Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 651–661]
- 肖强, 张廷山, 张喜, 李红佼, 雍锦杰, 刘宇龙, 李潇雨. 2021. 川南五峰组—龙马溪组有机质富集规律: 基于旋回地层学的研究. *海相油气地质*, 26(2): 105–112. [Xiao Q, Zhang T S, Zhang X, Li H J, Yong J J, Liu Y L, Li X Y. 2021. Organic matter enrichment in Wufeng Formation–Longmaxi Formation in southern Sichuan: based on cyclostratigraphy. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(2): 105–112]
- 徐长贵, 尤丽. 2022. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制. *石油勘探与开发*, 49(6): 1061–1072. [Xu C G, You L. 2022. North slope transition zone of Songnan–Baodao sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1061–1072]
- 玄昌姬, 李前裕, 刘传联. 2024. 珠江口盆地荔湾凹陷 W22 井渐新世生物地层研究. *微体古生物学报*, 41(1): 45–52. [Xuan C J, Li Q Y, Liu C L. 2024. Oligocene biostratigraphy of Well W22 in the Liwan Sag of the Pearl River Mouth Basin. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 41(1): 45–52]
- 曾清波, 陈国俊, 张功成, 纪沫, 韩银学, 郭帅, 王龙颖. 2015. 珠江口盆地深水珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义. *沉积学报*, 33(3): 595–606. [Zeng Q B, Chen G J, Zhang G C, Ji M, Han Y X, Guo S, Wang L Y. 2015. The shelf-margin delta feature and its significance in Zhuhai Formation of deep-water area, Pearl River Mouth Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 595–606]
- 曾智伟. 2020. 南海北部珠江口盆地古近纪源—汇系统耦合研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Zeng Z W. 2020. Source-to-sink (S2S) system analysis of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan)]
- 张功成. 2023. 南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论. *石油学报*, 44(4): 569–582. [Zhang G C. 2023. Theory of deep-water hydrocarbon accumulation controlled by progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 44(4): 569–582]
- 张青林, 张向涛, 李洪博, 宋朋霖, 贾兆扬, 曾婷, 陶文芳. 2022. 南海北部狭窄陆架—断裂陆坡控制的大型深水扇体系. *地球科学*, 47(7): 2421–2432. [Zhang Q L, Zhang X T, Li H B, Song P L, Jia Z Y, Zeng T, Tao W F. 2022. Large submarine fan system controlled by narrow continental shelf-faulted continental slope in northern South China Sea. *Earth Science*, 47(7): 2421–2432]
- 张瑞, 金之钧, 朱如凯, 李明松, 惠潇, 魏韧, 贺翔武, 张谦. 2023. 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义. *石油与天然气地质*, 44(4): 829–845. [Zhang R, Jin Z J, Zhu R K, Li M S, Hui X, Wei R, He X W, Zhang Q. 2023. Investigation of deposition rate of terrestrial organic-rich shales in China and its implications for shale oil exploration. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 829–845]
- 张尚锋, 徐敏, 唐武, 徐恩泽, 王雅宁, 朱锐. 2024. 琼东南盆地北礁凹陷陵水组旋回地层学及古气候分析. *地质科技通报*, 1–13. [Zhang S F, Xu M, Tang W, Xu E Z, Wang Y N, Zhu R. 2024. Cyclostratigraphy and paleoclimate analysis of Lingshui Formation in Beijiao Sag, Qiongdongnan Basin. *Geological Science and Technology Bulletin*, 1–13]
- 赵飞, 祝幼华, 季兴开, 冯净. 2017. 南海北部珠江口盆地深水 LW5 井晚渐新世—早中新世孢粉组合. *微体古生物学报*, 34(2): 201–210. [Zhao F, Zhu Y H, Ji X K, Feng J. 2017. Late Oligocene to

- early Miocene palynological assemblages of Well LW5 in the deep-water area, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 34(2): 201–210]
- 赵明辉, 袁野, 张佳政, 张翠梅, 高金尉, 王强, 孙珍, 程锦辉. 2023. 南海北部被动陆缘洋陆转换带张裂—破裂研究新进展. *热带海洋学报*, 43(2): 173–183. [Zhao M H, Yuan Y, Zhang J Z, Zhang C M, Gao J W, Wang Q, Sun Z, Cheng J H. 2023. New developments on the rift-breakup of the continent-ocean transition zone in the northern margin of the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 43(2): 173–183]
- 赵韶华, 王雅宁, 张尚锋, 朱锐, 徐恩泽, 易志凤, 巩高阳, 王玉瑶, 刘浩童. 2022. 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. *海洋地质前沿*, 38(4): 53–62. [Zhao S H, Wang Y N, Zhang S F, Zhu R, Xu E Z, Yi Z F, Gong G Y, Wang Y Y, Liu H T. 2022. Miocene paleoclimate analysis of the northern South China Sea: response to cooling events based on astronomical cycles. *Marine Geology Frontiers*, 38(4): 53–62]
- 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 梅西, 李建如, 葛黄敏, 黄恩清. 2008. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成, 动力控制及反映的东亚季风演化. *第四纪研究*, 28(3): 414–424. [Zheng H B, Chen G C, Xie X, Mei X, Li J R, Ge H M, Huang E Q. 2008. Grain size distribution and dynamic control of late Quaternary terrigenous sediments in the South China Sea and their implication for East Asian monsoon evolution. *Quaternary Sciences*, 28(3): 414–424]
- 周杰, 杨希冰, 杨金海, 甘军, 吴昊, 何小胡, 胡斌. 2019. 琼东南盆地松南低凸起古近系构造—沉积演化特征与天然气成藏. *地球科学*, 44(8): 2704–2716. [Zhou J, Yang X B, Yang J H, Gan J, Wu H, He X H, Hu B. 2019. Structure-sedimentary evolution and gas accumulation of Paleogene in Songnan Low Uplift of the Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 44(8): 2704–2716]
- 朱春霞, 张尚锋, 王雅宁, 徐恩泽. 2022. 陆丰凹陷韩江组旋回地层学分析及天文年代标尺的建立. *海洋地质前沿*, 38(4): 42–52. [Zhu C X, Zhang S F, Wang Y N, Xu E Z. 2022. Cyclical stratigraphic analysis and establishment of astronomical chronograph of Hanjiang Formation in Lufeng Sag. *Marine Geology Frontiers*, 38(4): 42–52]
- Ao H, Rohling E J, Zhang R, Roberts A P, Holbourn A E, Ladant J-B, Dupont-Nivet G, Kuhnt W, Zhang P, Wu F. 2021. Global warming-induced Asian hydrological climate transition across the Miocene-Pliocene boundary. *Nature Communications*, 12(1): 6935.
- Bechtel A, Jia J, Strobl S A, Sachsenhofer R F, Liu Z, Gratzner R, Püttmann W. 2012. Palaeoenvironmental conditions during deposition of the Upper Cretaceous oil shale sequences in the Songliao Basin (NE China): implications from geochemical analysis. *Organic Geochemistry*, 46: 76–95.
- Beglinger S E, Wees J D, Cloetingh S, Doust H. 2012. Tectonic subsidence history and source-rock maturation in the Campos Basin, Brazil. *Petroleum Geoscience*, 18(2): 153–172.
- Berggren W A, Kent D V, Swisher C C, Aubry M P, Aubry M P, Hardenbol J. 1995. A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, 54: 129–212.
- Bralower T J, Thierstein H R. 1984. Low productivity and slow deep-water circulation in mid-Cretaceous oceans. *Geology*, 12(10): 614–618.
- Bruch A A, Utescher T, Mosbrugger V. 2011. Precipitation patterns in the Miocene of Central Europe and the development of continentality. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304(3–4): 202–211.
- Chen R, Bai X, Huang C, Wu X, Shang F. 2024. How marine incursions affect the sedimentary environment and the quality of source rocks in the Upper Cretaceous Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 170: 107140.
- Cramer B, Toggweiler J, Wright J, Katz M, Miller K. 2009. Ocean overturning since the Late Cretaceous: inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation. *Paleoceanography*, 24: PA4216.
- De Lira Mota M A, Dunkley Jones T, Sulaiman N, Edgar K M, Yamaguchi T, Leng M J, Adloff M, Greene S E, Norris R, Warren B. 2023. Multi-proxy evidence for sea level fall at the onset of the Eocene-Oligocene transition. *Nature Communications*, 14(1): 4748.
- Ding W, Hou D, Gan J, Wu P, Zhang M, George S C. 2021. Palaeovegetation variation in response to the late Oligocene-early Miocene East Asian summer monsoon in the Ying-Qiong Basin, South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 567: 110205.
- Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. 2008. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*, 320(5879): 1034–1039.
- Fischer G, Wefer G. 1999. Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic; with 43 Tables. Springer-Verlag: 489–512
- Gonçalves F T. 2002. Organic and isotope geochemistry of the Early Cretaceous rift sequence in the Camamu Basin, Brazil: paleolimnological inferences and source rock models. *Organic Geochemistry*, 33(1): 67–80.
- Herbert T D, Stallard R, Fischer A G. 1986. Anoxic events, productivity rhythms, and the orbital signature in a mid-Cretaceous deep-sea sequence from central Italy. *Paleoceanography*, 1(4): 495–506.
- Hochmuth K, Whittaker J M, Sauermilch I, Klocker A, Gohl K, LaCasce J H. 2022. Southern Ocean biogenic blooms freezing-in Oligocene colder climates. *Nature Communications*, 13(1): 6785.
- Huang H, Gao Y, Ma C, Jones M M, Zeeden C, Ibarra D E, Wu H, Wang C. 2021. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes. *Science Advances*, 7(28): eabf9489.
- Katz B J. 1995. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks: an update. *Paleogeography, Paleoclimate, and Source Rocks*: 61–79.
- Lanci L, Muttoni G, Erba E. 2010. Astronomical tuning of the Cenomanian Scaglia Bianca Formation at Furlo, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2): 231–237.
- Laskar J, Fienga A, Gastineau M, Manche H. 2011. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy Astrophysics*: 532.
- Li M, Hinnov L, Huang C, Ogg J G. 2018. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing. *Nature Communications*, 9(1): 1004.
- Li M, Hinnov L, Kump L. 2019. Acycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers Geosciences*, 127: 12–22.

- Li Q, Jian Z, Li B. 2004. Oligocene-Miocene planktonic foraminifer biostratigraphy, Site 1148, northern South China Sea. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 184: 1–26.
- Lisiecki L E, Stern J V. 2016. Regional and global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stacks for the last glacial cycle. *Paleoceanography*, 31(10): 1368–1394.
- Liu J, Shi J, Lu Y, Fan X, Zhang Z, Zhang R, Wang Z, Xu K, Xiao A, Kemp D B, Huang C. 2024. Astronomical forcing of terrestrial organic carbon burial in East Asia during the Eocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 646: 119014.
- Ma Y, Fan M, Lu Y, Liu H, Hao Y, Xie Z, Liu Z, Peng L, Du X, Hu H. 2016. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: constraints from lithofacies and geochemical studies in the Zhanhua Depression, eastern China. *International Journal of Coal Geology*, 167: 103–118.
- Maher K, Chamberlain C. 2014. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle. *Science*, 343(6178): 1502–1504.
- Mann M E, Lees J M. 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, 33(3): 409–445.
- Mao S, Li J, Qin X, Wu G, Harland R. 2007. Dinoflagellate cysts and environmental evolution of the Oligocene to Lower Miocene at site 1148, ODP Leg 184, South China Sea. *Palynology*, 31(1): 37–52.
- McCoy J, Gibson M E, Hocking E P, O'Keefe J M, Riding J B, Roberts R, Campbell S, Abbott G D, Pound M J. 2024. Temperate to tropical palaeoclimates on the northwest margin of Europe during the middle Cenozoic. *Palaeontologia Electronica*, 27(1): 1–66.
- Milankovitch M. 1941. *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Serbian Academy Special Publication, 133: 1–633.
- Niu L, Gao Y, Huang H, Tian X, Dong T, Yang Q, Cao X, Wang C. 2021. Controlling factors for organic carbon burial in the Late Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin, NE China. *Energies*, 14(16): 4783.
- Ogg J. 2020. Geomagnetic Polarity Time Scale. In: *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 159–192.
- Ogi M, Rigor I G, McPhee M G, Wallace J M. 2008. Summer retreat of Arctic sea ice: role of summer winds. *Geophysical Research Letters*, 35(24): 701.
- Peng C, Zou C, Zhang S, Shu J, Wang C. 2024. Geophysical logs as proxies for cyclostratigraphy: sensitivity evaluation, proxy selection, and paleoclimatic interpretation. *Earth-Science Reviews*: 104735.
- Rohling E J, Yu J, Heslop D, Foster G L, Opdyke B, Roberts A P. 2021. Sea level and deep-sea temperature reconstructions suggest quasi-stable states and critical transitions over the past 40 million years. *Science Advances*, 7(26): eabf5326.
- Ruhl M, Deenen M, Abels H, Bonis N, Krijgsman W, Kürschner W. 2010. Astronomical constraints on the duration of the early Jurassic Hettangian stage and recovery rates following the end-Triassic mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1–2): 262–276.
- Speijer R, Pälike H, Hollis C, Hooker J, Ogg J. 2020. The Paleogene Period. In: *Geologic Time Scale 2020*: 1087–1140.
- Thomson D J. 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 70(9): 1055–1096.
- Wen Z, Hua Y, Li X, Yi Y. 2010. Lake-bottom hydrothermal activities and their influence on high-quality source rock development: a case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(4): 424–429.
- Westerhold T, Marwan N, Drury A J, Liebrand D, Agnini C, Anagnostou E, Barnett J S K, Bohaty S M, De Vleeschouwer D, Florindo F, Fredericks T, Hodel D A, Holbourn A E, Kroon D, Lauretano V, Littler K, Lourens L J, Lyle M, Pälike H, Zachos J C. 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369(6509): 1383–1387.
- Wu G, Qin J, Mao S. 2003. Deep-water Oligocene pollen record from South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2511–2515.
- Wu Z C, Shi J Y, Fan T L, Jiang M. 2024. Sedimentary paleoenvironment and its control on organic matter enrichment in the Mesoproterozoic hydrocarbon source rocks in the Ordos Basin, southern margin of the North China Craton. *Petroleum Science*, 21(4): 2257–2272.
- Xu J, Jiang J, Wang D, Xu P, Wang F, Li H, Cheng X, Wu Q, Cheng F, Lin L, Xu Y. 2024a. Main controlling factors evolution on high-quality source rocks development in the Shan'an Sag, Bohai Bay Basin, NE China: implication from structure, depositional environment, and organic matter. *Journal of Asian Earth Sciences*, 263: 106020.
- Xu Q, Zhu Y, Chen S, Liu Y, George S C. 2024b. Organic matter accumulation as a convergence response to astronomical forcing: insights from Milankovitch periods and sea-level fluctuations during the early Cambrian. *Marine and Petroleum Geology*, 163: 106812.
- Yang H, Tang W, Xu E, Zhang S, Wang Y, Xu M. 2024. Cyclostratigraphy and paleoclimate analysis of the Lingshui Formation in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin, China. *Energy Geoscience*, 5(1): 100224.
- Zeng W, Wang B, Chen X, Fu G, Zhang Z, Huang Z. 2024. Geochemical characteristics and formation mechanism of organic-rich source rocks of mixed sedimentary strata in continental saline lacustrine basin: a case study of Permian Pingdiquan formation in the Shishugou Sag, Junggar Basin, Northwest China. *International Journal of Coal Geology*, 287: 104508.
- Zhang Q, Fu X, Wang J, Mansour A, Wei H, Zhang T, Wang M. 2024. Orbitally-paced climate change during the Carnian Pluvial Episode. *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118546.
- Zhang Z, Licht A, De Vleeschouwer D, Wang Z, Li Y, Kemp D B, Tan L, Zhang R, Qiang X, Huang C. 2022. East Asian monsoonal climate sensitivity changed in the late Pliocene in response to Northern Hemisphere glaciations. *Geophysical Research Letters*, 49(23): e2022GL101280.
- Zhu G, Zhang Z, Jiang H, Yan L, Chen W, Li T, Li X. 2023. Evolution of the Cryogenian cratonic basins in China, paleo-oceanic environment and hydrocarbon generation mechanism of ancient source rocks, and exploration potential in 10000 m-deep strata. *Earth-Science Reviews*, 244: 104506.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐 杰)