琼东南盆地北礁凹陷陵水组旋回地层学及古气候分析

张尚锋[1a,1b]，徐敏[1a*]，唐武[2]，徐恩泽[1a]，王雅宁[1a,1b]，朱锐[1a,1b]

1. 长江大学 a. 地球科学学院；b. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室，武汉 430100；
2. 中海油研究总院有限责任公司，北京 100028

第一作者，E-mail：jpuzhangsf@163.com

* 通信作者，E-mail：Ty0xumin@126.com

2024-05-16 收稿；2024-07-05 修回；2024-07-09 接受

基金项目：中海石油(中国)有限公司重大科技项目(2021-KT-YXKY-05)；国家自然科学基金项目(41472098)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)05-0095-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240264

摘　要：通过天文旋回研究，建立北礁凹陷渐新统陵水组的高精度且连续时间地层格架，并丰富该地区的古气候研究。采用时间序列分析方法，对北礁凹陷 A 井开展了旋回地层学分析研究；结合古生物多指标解释，开展了古气候演变分析。结果表明：在北礁凹陷陵水组沉积地层识别出了 405 ka 长偏心率周期、100 ka 短偏心率周期、42.7 ka 和 43.2 ka 斜率周期及 20.5 ka 岁差周期。通过天文调谐建立了持续时间约 5.59 Ma 的“浮动”天文年代标尺，以渐新世顶界面的地质年龄 23.03 Ma 作为时间锚点，最终建立陵水组 (28.62 ~ 23.03 Ma) 高精度的绝对天文年代框架。其中陵一段、陵二段和陵三段的底界面年龄分别为 23.97, 25.43, 28.62 Ma，平均沉积速率分别为 18.4, 8.6, 12.8 cm/ ka。利用有孔虫、有机碳质量分数、有机屑组分和碳氧同位素等古气候指标重建了陵水组沉积时期的古气候，其整体表现为暖–凉–暖的变化趋势。古气候分析和天文旋回分析对比显示，这一时期的气候演化受到偏心率、岁差等天文轨道力的控制。对北礁凹陷陵水组沉积地层进行天文旋回研究，探讨天文轨道参数对古气候的控制作用，建立了渐新统陵水组高精度且连续的时间地层格架。该方法为油气勘探中优质储集体层段预测提供了精细的年代框架，促进了北礁凹陷油气勘探的发展。

关键词：琼东南盆地；北礁凹陷；旋回地层学；天文年代标尺；古气候

琼东南盆地是新生代富气断陷盆地。中央坳陷带南部深水区渐新统崖城组发育的海陆过渡相煤系地层具有很好的生烃条件，渐新统陵水组碎屑砂岩是主力储层之一[1-5]。但目前对于陵水组地层的年龄存在一些争议。刘晓锋等[6]基于对南海深水区 LS33a 钻井岩心的取样和化石鉴定，通过与大洋钻探 (ODP) 在南海实施的 184 航次的钻探结果和“国际年代地层表 (2012)”等的对比分析，构建了 LS33a 钻井生物地层年代格架，认为陵水组底界面年龄为 28.1 Ma; DING 等[7]运用生物化石定年，认为琼东南盆地深水区 B19-2 井陵一段、陵二段和陵三段的底界面年龄分别为 23.8, 25.5, 28.4 Ma。这种年龄的差异是使用岩屑样品进行分析以及采样密度低所造成的。

天文旋回是从全球尺度上研究太阳辐射量与地球气候波动之间关系，并认为在其他天体影响下，地球在自转和公转过程中，轨道参数(偏心率、斜率、岁差)会发生(准)周期性变化，从而驱动太阳辐射在不同纬度和季节的变化，导致全球或区域气候模式的变化。对海洋沉积物记录的研究至关重要，地球轨道参数的变化会导致全球冰量的增减，进而引起全球海平面的波动，这些周期性气候变化会在沉积物的层序、厚度和组成中留下记录，可以用来重建古气候变化[8-9]。

著录信息：张尚锋，徐敏，唐武，等. 琼东南盆地北礁凹陷陵水组旋回地层学及古气候分析[J]. 地质科技通报，2025，44(5)：95-105.
ZHANG Shangfeng, XU Min, TANG Wu, et al. Cyclostratigraphy and paleoclimate analysis of the Lingshui Formation in the Beijiao Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 95-105.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

天文旋回分析方法广泛应用时间序列分析，将能够反映古气候变化的连续数据序列进行数字信号处理，提取和描述轨道参数的变化规律。通过将天文旋回理论与这种分析相结合，可以建立一个全面的、高精度的、连续的绝对天文年代标尺，有助于校正地质年龄，这在天文周期研究中被广泛使用[10-12]。该方法与古生物、地磁反转、放射性等技术无关，而且由于米氏旋回的高频特征（最高频率达到约 20 ka），天文调谐地质年代表甚至可以精确到几十千年。诸多地质学家对全球界限层型及点的精确定年表明该方法的确有效[13-14]。

本研究引进天文旋回分析方法，选择琼东南盆地北礁凹陷单井进行研究，建立高精度且连续的天文年代地层格架，限定陵水组地层沉积时间，此外结合有孔虫、有机碳质量分数、有机屑组分和碳氧同位素等古气候指标，分析该时期古气候演化特征，从而为创建高精度大尺度沉积微相分布图、探究储集层时空分布和演化、预测储层−盖层组合等提供地质基础，进而为南海天文旋回研究提供参考，促进旋回地层学的发展，有助于更深入地了解该地区的地质历史。

1　区域地质概况

琼东南盆地位于南海北部西缘，介于海南岛与西沙群岛之间的海域，西以莺歌海盆地相隔，东接珠江口盆地神狐隆起，总面积约 4 万 km^2。盆地在平面上呈 NE 向展布，形成于太平洋板块与欧亚板块的相互作用和南海海底扩张，是一个新生代断陷盆地[3-4]。琼东南盆地内部整体表现出“南北分带、东西分块”的构造格局，包含北部坳陷、中部隆起、中央坳陷、南部隆起 4 个一级构造单元以及北礁凹陷、松南低凸起、长昌凹陷、宝岛凹陷、松涛凹陷等 17 个二级构造单元。盆地经历了中生代碰撞造山、古近纪断陷期和新近纪坳陷期 3 个阶段，在垂向上呈现出下断上坳的结构[15-17]。本研究井位于琼东南盆地中央坳陷带南部的北礁凹陷（图 1）。该凹陷是一个典型的南断北超的半地堑，北邻松南低凸起；南部受控于 NE−SW 向 11 号断裂，与北礁凸起相邻。

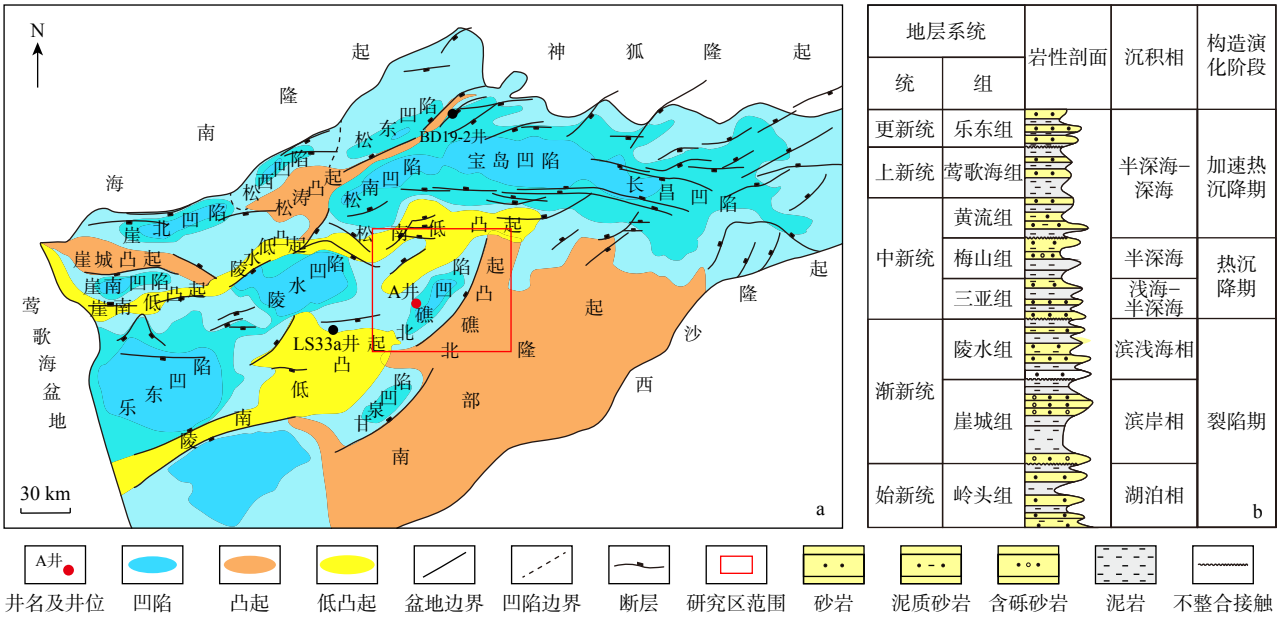


图 1　琼东南盆地构造单元 (a) 及地层充填演化图 (b)

Fig. 1　Tectonic units (a) and stratigraphic filling evolution (b) of the Qiongdongnan Basin

始新统沉积时期盆地处于断陷期，仅在凹陷内部发育湖相沉积，南部陡坡带主要发育中深湖相地层，滨浅湖相主要发育在北部缓坡带。崖城组沉积时期，随着海平面升高以及南海扩张，琼东南盆地逐渐接受海陆过渡相−滨浅海相沉积，北礁凹陷因北部松南低凸起及南部北礁凸起的阻隔，形成障壁海岸（泻湖）沉积环境，WN 方向地势稍低，形成潮汐通道并与陵水凹陷相连，受 11 号断裂活动影响，沉积中心分布在凹陷近断裂的北东侧。崖城组地层上超于始新统之上，披覆于松南低凸起，在凹陷北及东北部高部位发育海岸平原相沉积。陵水组沉积时期，海平面进一步升高，低凸起范围逐渐缩小，北礁凹陷过渡为正常滨浅海沉积，11 号断裂仍对陵三段和陵二段沉积控制作用显著，沉积中心逐渐向西迁移，陵一

段沉积时期为北礁凹陷的填平补齐阶段。三亚组–梅山组沉积时期，伴随海平面升高，北礁凹陷一直处于浅海环境。至黄流组沉积时期及其后期，北礁凹陷接受了半深海–深海沉积[1-5, 18-21]。

琼东南盆地陵水组发育一个完整的二级层序，与底部的下渐新统崖城组和顶部的下中新统三亚组均为不整合接触。其中早期陵三段发育一套粒度偏粗的浅色砂岩夹少量生物碎屑灰岩；中期陵二段发育大套泥岩；晚期陵一段为砂泥岩互层[5, 20-23]。

2 数据与方法

2.1 数据筛选

旋回分析对用于分析的井的确定极其重要，遵循的原则包括：(1)钻测井、录井、分析测试等各种资料丰富，研究层段地层完整；(2)尽可能远离断层和沉积供应通道，避免造成地层缺失；(3)远离物源区，地层稳定展布。这些确保影响天文周期的主要因素是海平面变化，有助于避免其他因素的干扰[24]。

在此基础上，进一步选择古气候替代指标。其需要满足以下要求：(1)能够保存气候冷暖、干湿变化的相关信号[25-26]；(2)满足 Nyquist 采样定理，保证在最短的岁差周期沉积厚度内至少有 3 个数据点，以保证 2 个数据间隔，避免旋回信息的缺失[27]。

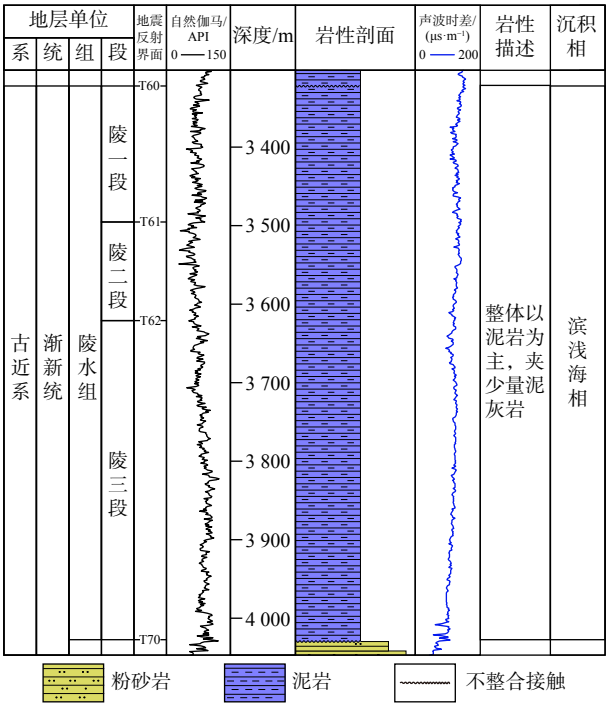


图 2 A 井综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive strata colum of the Well A

基于上述原则，本研究优选北礁凹陷中北部 A 井作为研究井(图 2)，自然伽玛测井数据作为研究的古气候替代指标。A 井陵水组地层完整，岩性以泥岩为主，夹少量泥灰岩，为滨浅海沉积，处于稳定的沉积环境，自然伽马取样间隔为 0.125 m。

2.2 数据预处理与旋回分析流程

天文旋回分析过程中，沉积速率差异过大即相同的长偏心率周期内沉积的地层厚度差距过大，会导致在频谱分析的过程中，产生多个差别过大的长偏心率谱峰，影响后续的旋回分析。本研究通过 DING 等[7] 对陵水组各段年龄标定，发现估算的陵一段平均沉积速率(22.47 cm/ka)与陵二、三段平均沉积速率(11.57 cm/ka)差别过大，因此将基于 A 井对陵一段和陵二、三段分别进行天文旋回分析。

地层在沉积的过程中会受到各种因素的影响，从地层中获取的古气候替代指标也必然会存在其他因素导致的“噪音”信号，因此，在进行频谱分析之前，需要对数据进行一系列的预处理[28]，其中包括：①利用局部平均值代替在单个或极短范围内明显偏离原始数据趋势的异常值；②采取插值方法保证数据为等间距数据以及去除数据序列中单调递增或递减的整体趋势等，为后续的频谱分析做基础。

旋回分析主要通过 Matlab 中的 Acycle 软件包[29]完成，流程如下：(1)对预处理后的自然伽马数据进行深度域频谱分析、演化功率谱分析及小波分析，识别出沉积地层中记录的米兰科维奇旋回频谱峰值信号；(2)通过滤波提取出地球轨道参数如偏心率、斜率及岁差的周期，建立年代模型；(3)进行深时转换，将数据序列从深度域转到时间域，利用天文调谐建立“浮动”天文年代标尺；(4)结合绝对年龄锚点，建立高分辨率的绝对天文年代标尺(ATS)[30-35]；(5)通过有孔虫定量分析、有机碳定量分析、深海碳–氧同位素、有机屑组分及地球轨道参数周期变化，综合探讨琼东南盆地北礁凹陷陵水组晚渐新统气候演化特征。

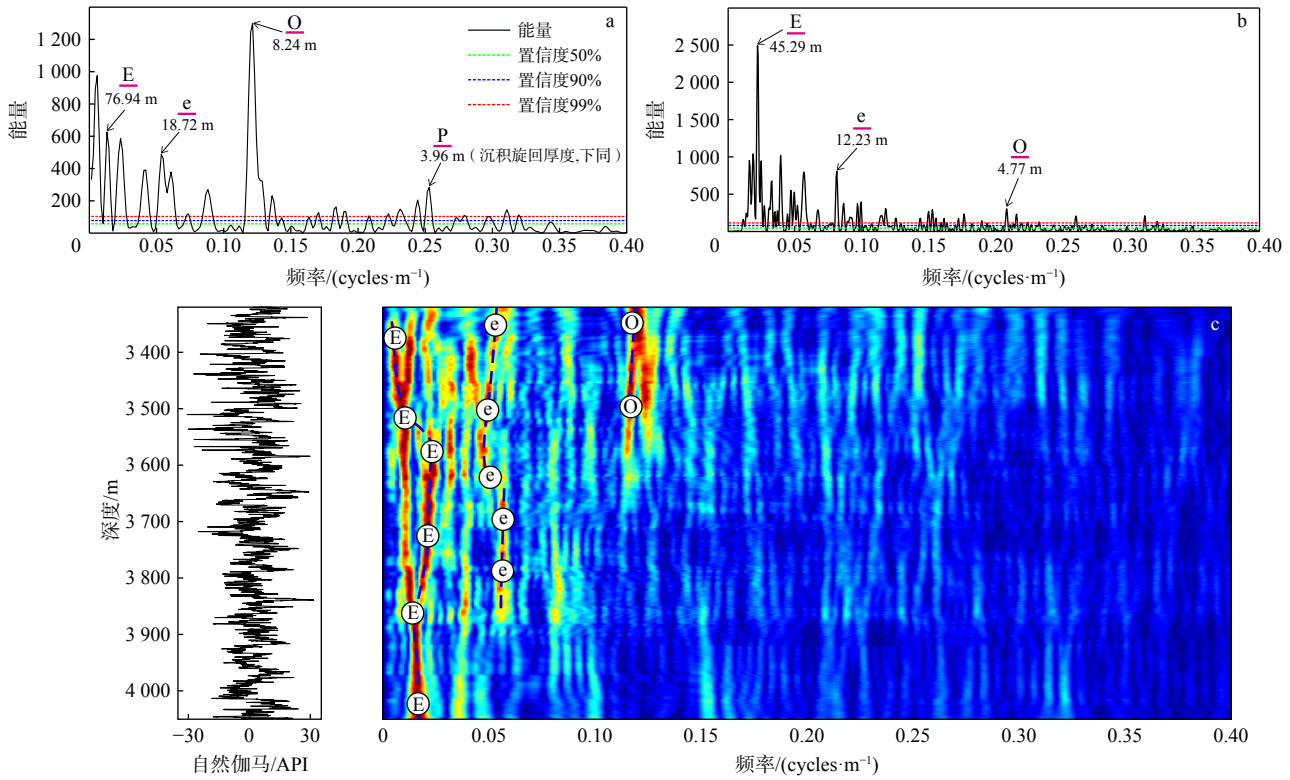
3 天文旋回分析

3.1 深度域频谱分析

通过分别对陵一段和陵二、三段自然伽马 *GR* 测井数据进行深度域多窗口频谱分析 (图 3a, b)，选取置信度 95% 以上的峰值频率，陵一段主要识别出的沉积旋回厚度有 76.94, 18.72, 8.24, 3.96 m；陵二、三段主要识别出的沉积旋回厚度有 45.29, 12.23, 4.77 m，未识别到岁差旋回，其比例关系与新生代地

球轨道周期的长偏心率周期：短偏心率周期：斜率周期：岁差周期的比值(20：5：2：1)[36]相似。

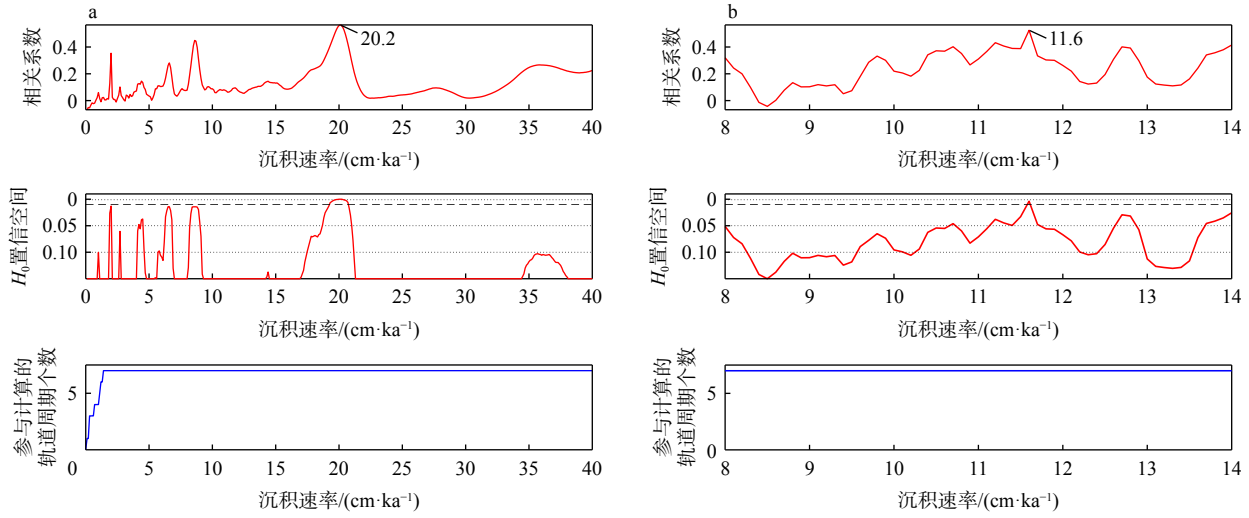
相关性(COCO)检验分析表明，陵一段和陵二、三段的平均沉积速率估计分别为 20.2, 11.6 cm/ka(图 4)。仿真结果表明，该段沉积速率小于 1‰(图中最上方的虚线)的 H_0 置信度，表明 7 个天文轨道参数对沉积过程的影响。因此，可以推断研究部分的沉积是由天文轨道驱动的。利用估算的平均沉积速率计算出的周期分别约为 400, 100, 40, 21 ka，与理论周期密切相关。可以认为陵一段中 76.94, 18.72 m



a. 陵一段深度域 Lomb 频谱分析结果，其中带有 E、e、O、P 标签的玫红色实线分别代表长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回；b. 陵二、三段深度域 Lomb 频谱分析结果，其中带有 E、e、O 标签的玫红色实线分别代表长偏心率、短偏心率和斜率旋回；c. 陵水组深度域演化功率谱分析结果，其中带有 E、e、O 标签的蓝色虚线分别代表长偏心率、短偏心率和斜率旋回

图 3　陵水组深度域频谱分析和演化功率谱分析

Fig. 3　Spectral analysis and evolutionary power spectrum in depth of the Lingshui Formation



a. 陵一段沉积速率为 0 ~ 40 cm/ka 的测试结果，步长为 0.1 cm/ka；b. 陵二、三段沉积速率为 8 ~ 14 cm/ka 的测试结果，步长为 0.1 cm/ka

图 4　A 井陵水组的相关性（COCO）检验分析

Fig. 4　Analysis of the COCO test for the Lingshui Formation of the Well A

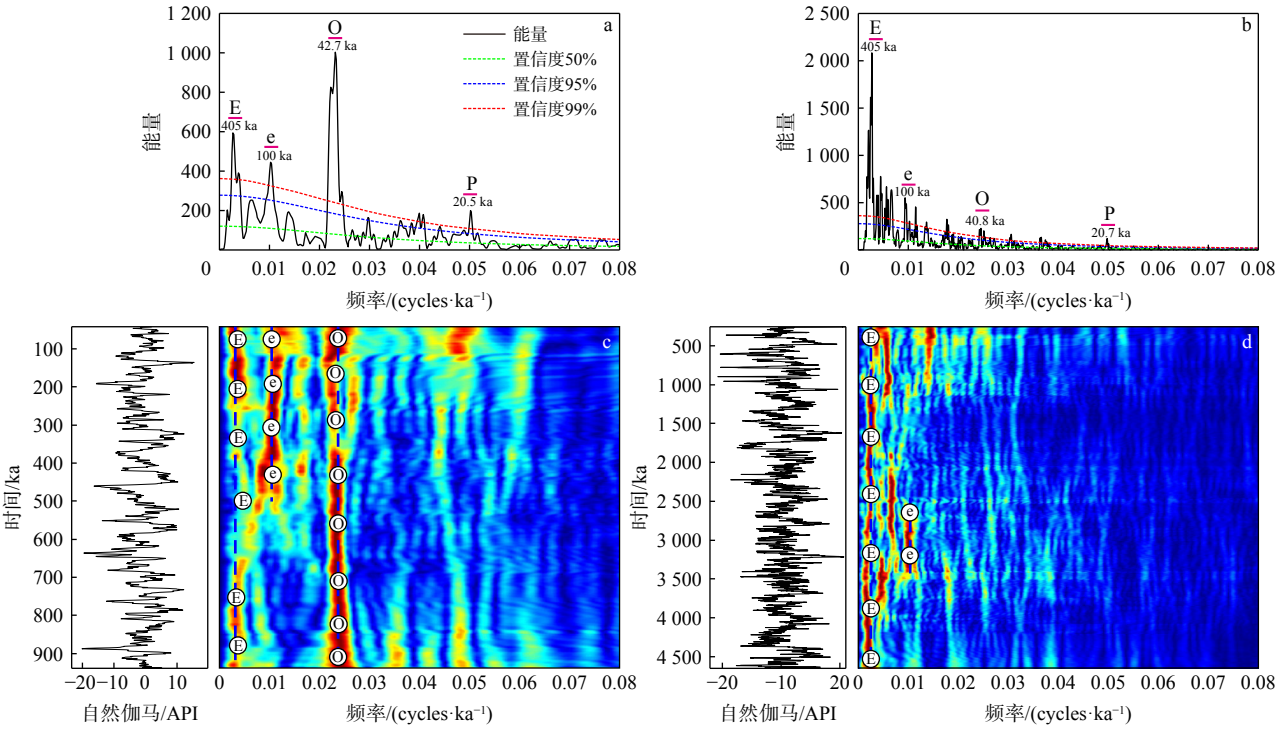
厚度的沉积旋回对应于 405 ka 的长偏心率周期信号和 100 ka 的短偏心率周期信号，8.24 m 厚度的沉积旋回分别对应于 42.7 ka 的斜率周期信号，3.96 m 厚度的沉积旋回对应于 20.5 ka 的岁差周期信号；陵二、三段中 45.29, 12.23 m 厚度的沉积旋回分别对应于 405 ka 的长偏心率周期信号和 100 ka 的短偏心率周期信号，4.77 m 厚度的沉积旋回对应于 43.2 ka 的斜率周期信号。

在演化功率谱分析中可以看出 405 ka 长偏心率周期稳定出现(图 3c)，连续分布于整个 A 井的陵水组，在深度 4 000 ~ 3 500 m 剖面内，沉降速率发生了明显变化，高能谱峰值向右移动，表明沉积速率降低；在陵一段(深度 3 322 ~ 3 495 m)剖面内，405 ka 长偏心率谱峰值向左移动，42.7 ka 斜率谱峰值明显增强，说明陵一段沉积时期是由长偏心率和斜率共同控制，沉积速率上升；短偏心率周期信号断续分布，岁差周期信号几乎没有被记录。

3.2 时间域频谱分析和天文调谐

通过深度域频谱分析结果可以确定陵一段 76.94 m 厚度的沉积旋回对应于 405 ka 长偏心率周期，陵二、三段 45.29 m 厚度的沉积旋回对应于 405 ka 长偏心率周期，故选择稳定的 405 ka 的旋回周期对深度域的自然伽马数据序列进行天文调谐，通过计算 405 ka 长偏心率周期旋回在深度域中的数量来建立起深度域和时间域的年代模型，从而将自然伽马数据序列由深度域转换到时间域。

调谐后的时间域频谱分析显示陵一段具有显著的 405, 100, 42.7, 20.5 ka 的峰值(图 5a, b)，陵二、三段具有显著的 405, 100, 43.2 ka 的峰值(图 5c, d)，表明陵水组地层保存了天文驱动的信号。



a. 陵一段时间域 Lomb 频谱分析结果，其中带有 E、e、O、P 标签的玫红色实线分别代表长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回；b. 陵二、三段时间域 Lomb 频谱分析结果，其中带有 E、e、O、P 标签的玫红色实线分别代表长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回；c. 陵一段时间域演化功率谱分析结果，其中带有 E、e、O 标签的蓝色虚线分别代表长偏心率、短偏心率和斜率旋回；d. 陵二、三段时间域演化功率谱分析结果，其中带有 E、e 标签的蓝色虚线分别代表长偏心率和短偏心率旋回

图 5 陵水组时间域频谱分析和演化功率谱分析

Fig. 5 Spectrum analysis and evolutionary power spectrum in time of the Lingshui Formation

根据时间域频谱分析结果，对陵一段和陵二、三段 405 ka 长偏心率调谐数据分别进行滤波处理，使用高斯带通滤波，在陵一段识别出了约 2.5 个 405 ka 长偏心率旋回周期的滤波曲线、9.5 个 100 ka 短偏心率旋回周期的滤波曲线(图 6a)，在陵二、三段识别出约 11 个 405 ka 长偏心率旋回周期的滤波曲线、46 个 100 ka 短偏心率旋回周期的滤波曲线(图 6b)。时间域频谱分析和演化功率谱分析显示陵水组沉积

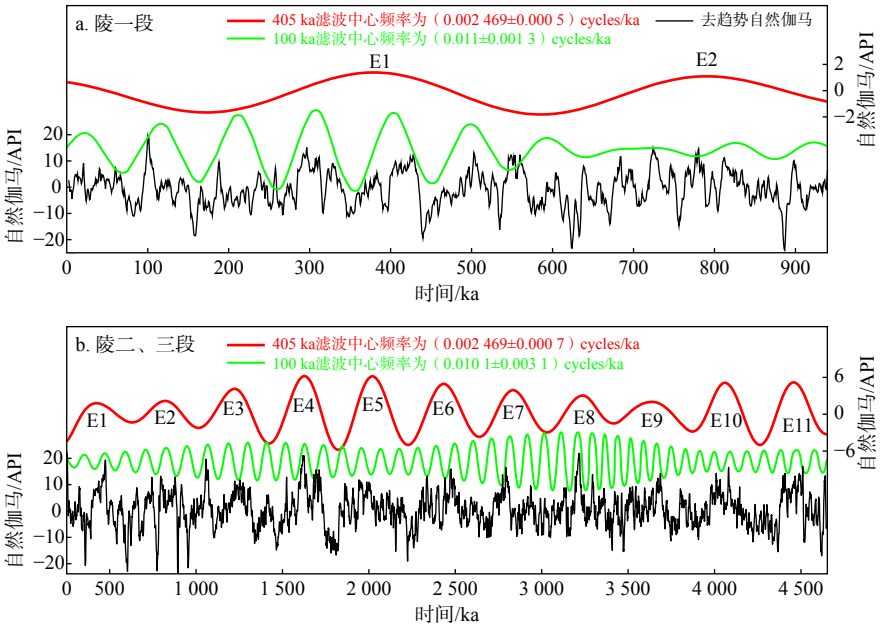


图 6　陵水组时间域滤波结果（E1 ~ E11 分别为第 1 ~ 11 个 405 旋回）

Fig. 6　Time domain filtering results of the Lingshui Formation

时期主要受到 405 ka 长偏心率周期旋回控制。

4　天文年代标尺建立

基于上述分析，陵水组 405 ka 的长偏心率信号较为稳定，可以作为天文调谐的“节拍器”，将陵一段和陵二、三段自然伽马测井数据序列中提取 405 ka 长偏心率滤波曲线作为调谐曲线，经过调谐后，得出约 705 m 厚的陵水组自然伽马数据序列，记录了该段沉积地层的持续时间约为 5.59 Ma。根据 2020 年国际地质年代表(GTS2020)以及 DING 等[7] 的研究，认为渐新统顶界面的地质年龄为 23.03 Ma。本研究依据此点作为时间锚点起始点，建立了琼东南盆地北礁凹陷陵水组绝对天文年代标尺(ATS)(图 7)。

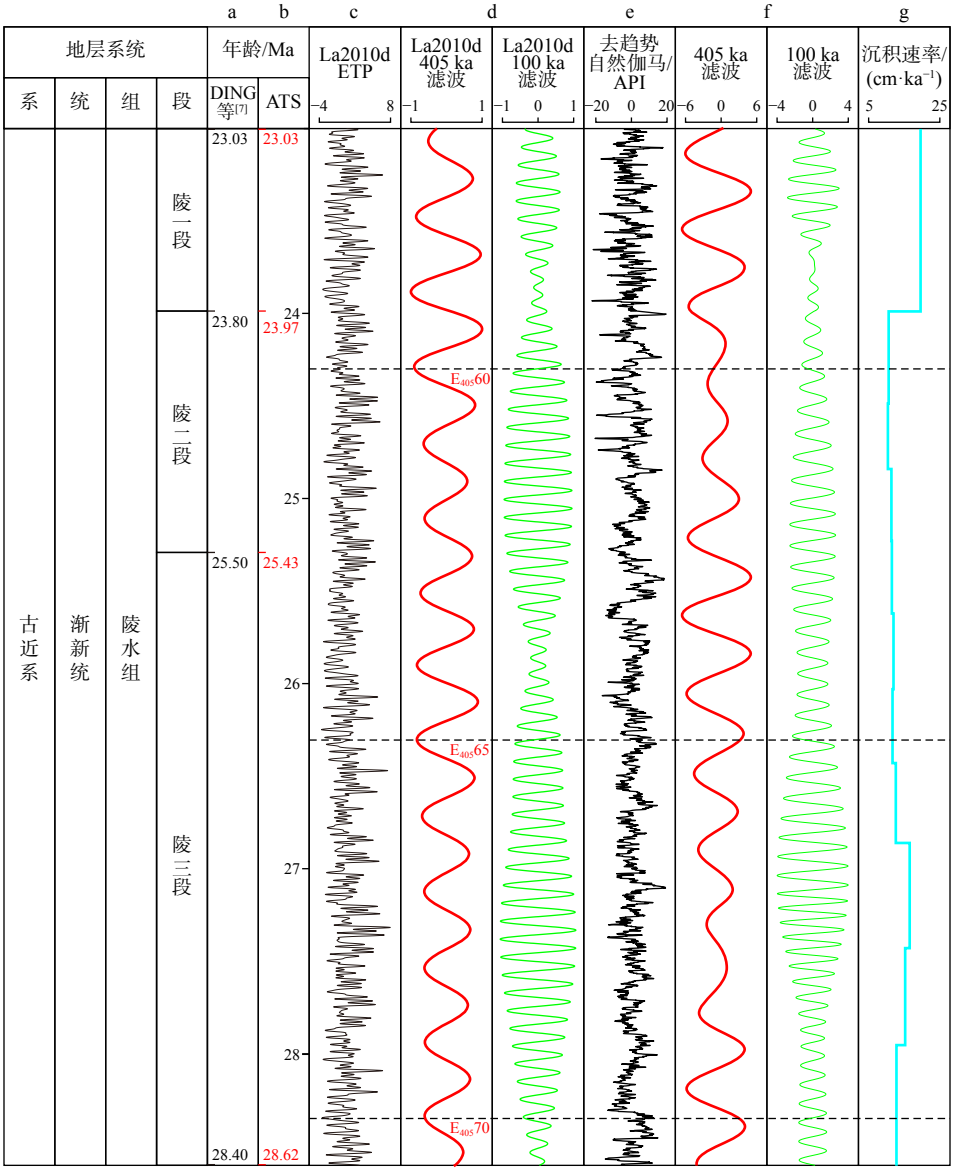
通过天文旋回分析结果得出北礁凹陷陵水组底界面的地质年龄为 28.62 Ma。将读取的 13.5 个 405 ka 长偏心率周期旋回，与 La2010d[37] 偏心率理论曲线的 57 ~ 70 旋回(E57 ~ E70)进行对比，能够明显发现 405 ka 长偏心率振幅变化趋势具有很强的对应性。本研究计算得出，陵一段底界年龄为 23.97 Ma，陵二段底界年龄为 25.43 Ma，陵三段底界年龄为 28.62 Ma，陵水组底界年龄为 28.62 Ma。这些年龄能够很好地与 DING 等[7] 的研究成果吻合，验证了本研究天文时间尺度的可靠性，并且通过天文旋回分析得到天文年代格架更为精准且连续。

由基于天文年代标尺分析结果计算得出的沉积速率曲线可以看出：陵水组平均沉积速率为 12.6 cm/ka，陵一段平均沉积速率为 18.4 cm/ka，陵二段平均沉积速率为 8.6 cm/ka，陵三段平均沉积速率为 12.8 cm/ka；此外，由陵三段沉积晚期到陵二段沉积时期沉积速率出现了明显下降，可能是由于该时期偏心率变幅改变导致气候变化从而造成沉积供应不充分；陵二段的平均沉积速率最低是由于其在整个陵水组沉积时期处于海侵时期，物质供应不充分；陵一段沉积时期沉积速率明显上升，可能是由于海平面下降并伴随着气温回升，处于温暖潮湿的环境中，其沉积供应充足。

5　古气候分析

前文基于北礁凹陷 A 井陵水组自然伽马测井数据 *GR* 进行天文旋回分析建立了持续时间约 5.59 Ma 的陵水组绝对天文年代标尺(ATS)，本节基于该绝对天文年代标尺对陵水组其他古气候替代指标进行对比分析(图 8)。

基于 A 井的分析测试资料可以发现陵三段沉积时期有孔虫相对丰度对较高，*w*(TOC)(0.54% ~ 0.68%)最高，有机屑组分中，煤质含量持续减小，草质含量持续增高，无定形有机质含量增高，沉积速率高，表明陆源碎屑持续供应，水体加深[40-42]，处于温暖湿润环境；陵二段沉积时期有孔虫相对丰度较低，*w*(TOC)(0.45% ~ 0.61%)较陵三段有所降低，有机屑组分中，煤质含量大幅减小，无定形有机质含量增高，沉积速率降低，推测可能是由于陆源碎屑供应减弱，



a. DING 等[7] 的地层界面年龄；b. 天文年代标尺(ATS)校准的地层界面年龄；c. 根据 La2010d 模型，以理论轨道参数(ETP) 格式显示的 28.62 ~ 23.03 Ma 期间的地球轨道参数；d.La2010d 模型中 ETP 格式显示的 405 ka 长偏心率和 100 ka 短偏心率滤波曲线；f. A 井去趋势后自然伽马曲线的 405 ka 长偏心率和 100 ka 短偏心率滤波曲线；g. 根据天文年代尺度结果计算出的沉积速率曲线

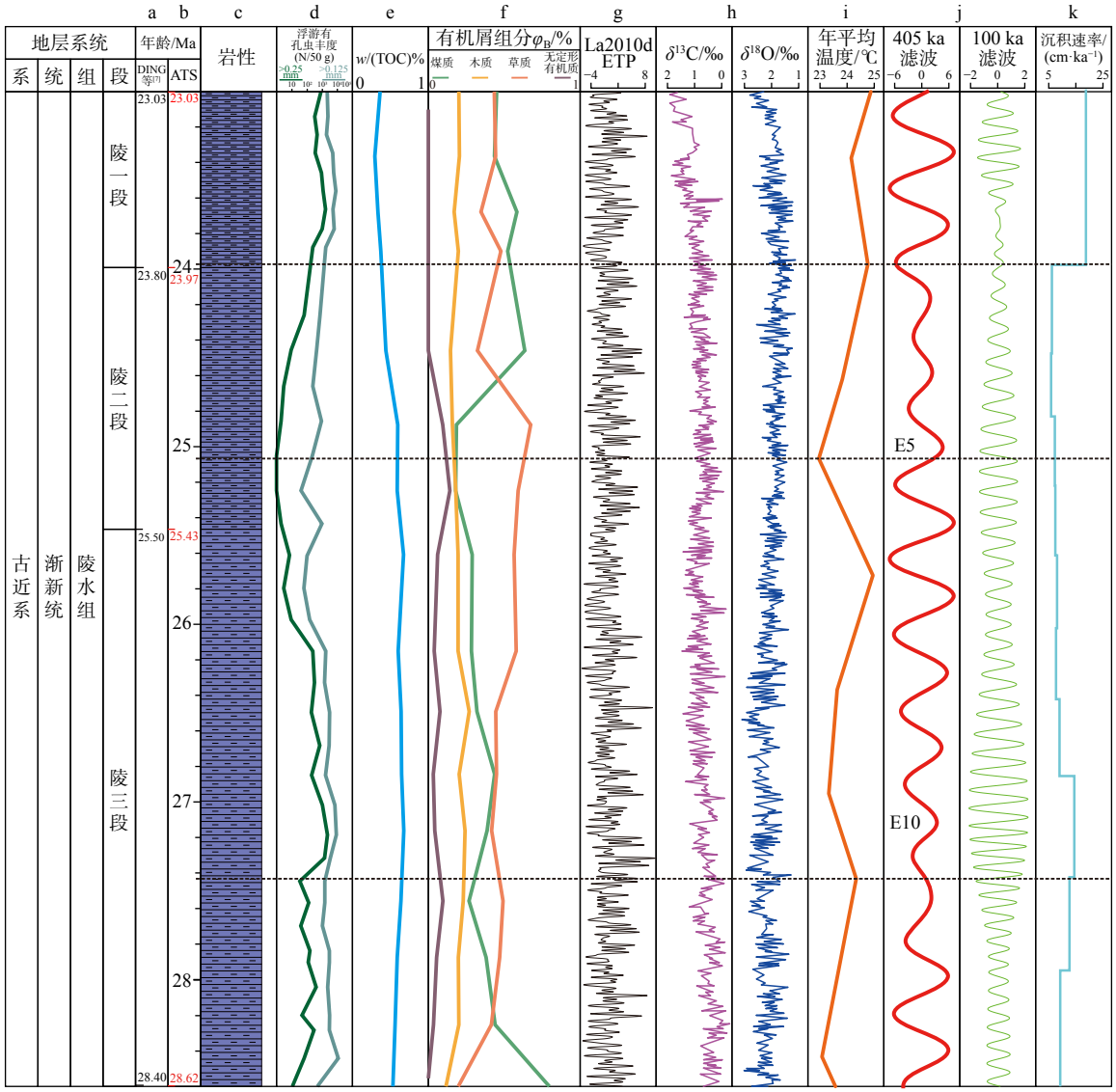
图 7　A 井渐新统陵水组绝对天文年代标尺

Fig. 7　Absolute astronomical age scale for the Oligocence Lingshui Formation of the Well A

水体变深，为寒冷湿润环境；陵一段沉积时期有孔虫相对丰度较高，w(TOC)(0.31% ~ 0.38%)持续降低，有机屑组分中煤质和草质含量相近，缺少无定形有机质，沉积速率最高，表明陵一段沉积时期陆源碎屑供应充分，处于温暖湿润环境。

在约 24, 25, 27.5 Ma 时期 405 ka 长偏心率变幅发生改变，与之对应的同时期有孔虫相对丰度呈现出相同的变化趋势，而孢粉相中无定形有机质含量变化趋势与之相反。这是由于偏心率的调幅作用可以控制气候周期的强度、调节气候岁差的变幅，因此偏心率发生变化，岁差随之发生变化，导致气候发生改变。

结合南海 17490 站通过有孔虫数据获取的年平均温度曲线[39] 和 ODP1218 站的底栖有孔虫碳氧同位素[38] 能够看出，当偏心率振幅发生改变，南海年平均温度以及赤道太平洋的底栖有孔虫碳氧同位素也发生了改变，表明气候发生了改变。这与田军等[43] 对南沙 ODP1143 站有孔虫稳定碳氧同位素研究所表现出的南海气候与地球轨道要素具有线性关系，在 405 ka 长偏心率周期上有孔虫碳同位素 $\delta^{13}C$ 与地球轨道参数 ETP 具有很好的相关性一致，并且据汪品先等[44] 研究，第四纪的米兰科维奇旋回已经追踪到整个新生代，利用深海沉积的氧同位素分析，证明了三大轨道参数的变化贯穿着全部新生代，反映



a. DING 等[7] 的地层界面年龄；b. 天文旋回(ATS)校准的地层界面年龄；g. 根据 La2010d 模型，以理论轨道参数（ETP）格式显示的 28.62 ~ 23.03 Ma 期间的地球轨道参数；h. 来自 ODP1218 站[38] 的有孔虫碳和氧同位素；i. 年平均温度来自南海 17490 站有孔虫数据[39]；j. A 井去趋势后 *GR* 曲线的 405 ka 长偏心率和 100 ka 短偏心率滤波曲线；k. 根据天文时间尺度结果计算出的沉积速率曲线

图 8　A 井渐新统陵水组古气候替代指标对比

Fig. 8　Comparison of palaeoclimate proxies for the Oligocene Lingshui Formation of the Well A

着温度的变化。因此天文轨道周期可能是气候变化的关键驱动力。

6　结　论

(1)通过对南海北部琼东南盆地北礁凹陷 A 井陵水组进行天文旋回研究，成功识别出沉积记录中的米兰科维奇信号。通过识别出的 405 ka 周期的长偏心率进行天文调谐，利用渐新世顶界年龄 23.03 Ma 作为锚点，计算出陵水组底界面年龄为(28.62±0.2)Ma，陵水组的高精度年代框架为 23.03 ~ 28.62 Ma，持续时间约为 5.59 Ma、平均沉积速率为 12.6 cm/ka，其中陵一段底界年龄为 23.97 Ma、平均沉积速率为 18.4 cm/ka；陵二段底界年龄为 25.43 Ma、平均沉积速率为 8.6 cm/ka；陵三段底界年龄为 28.62 Ma、平均沉积速率为 12.8 cm/ka。陵二段沉积速率较低可归因于这一时期的偏心率变化减少，导致了气候变化和沉积物供应不足。

(2)综合浮游有孔虫比例及丰度、*w*(TOC)、有机屑组分以及其他古气候替代指标，认为北礁凹陷陵水组沉积时期气候整体表现为暖−凉−暖的变化趋势，气候转变与天文轨道参数的变化相互对应。综合分析认为，在温带气候条件下，南海北部琼东南盆地渐新统时期气候变化受到由偏心率变幅控制的气候岁差变幅影响，进而影响太阳辐射量的时空分配所控制，偏心率变幅改变，气候也发生变化。

所有作者声明无利益冲突

The authors declare that no competing interests exist

参考文献：

[1] 朱继田, 杨希冰, 胡向阳, 等. 琼东南盆地北部中生代凹陷特征及油气成藏条件初探 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 83-93.
ZHU J T, YANG X B, HU X Y, et al. Characteristic and petroleum geology of the Mesozoic Sags of the northern Qiongdongnan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 83-93. (in Chinese with English abstract)

[2] 徐长贵, 尤丽. 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 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1061-1072.
XU C G, YOU L. North slope transition zone of Songnan–Baodao Sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1061-1072. (in Chinese with English abstract)

[3] 徐长贵, 邓勇, 吴克强, 等. 南海北部强活动型被动陆缘盆地宝岛 21-1 大气田的发现及地质意义 [J]. 石油学报, 2023, 44(5): 713-729.
XU C G, DENG Y, WU K Q, et al. Discovery and geological significance of the large gas field Baodao 21-1 in a passive epicontinental basin with strong activity in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 713-729. (in Chinese with English abstract)

[4] 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 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 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 651-661.
WU K Q, XIE X N, PEI J X, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 651-661. (in Chinese with English abstract)

[5] 张功成, 纪沫, 陈莹, 等. 琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力 [J]. 石油学报, 2024, 45(1): 226-240.
ZHANG G C, JI M, CHEN Y, et al. Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 226-240. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘晓锋, 孙志鹏, 刘新宇, 等. 南海北部深水区 LS33a 钻井微体古生物年代地层格架 [J]. 沉积学报, 2018, 36(5): 890-902.
LIU X F, SUN Z P, LIU X Y, et al. Chronostratigraphic framework based on micro-paleontological data from drilling LS33a in deep water area of northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(5): 890-902. (in Chinese with English abstract)

[7] DING W J, HOU D J, GAN J, et al. Palaeovegetation variation in response to the Late Oligocene-Early Miocene East Asian summer monsoon in the Ying-Qiong Basin, South China Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 567: 110205.

[8] 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.
WU H C, FANG Q. Cyclostratigraphy and astrochronozones[J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(3): 227-238. (in Chinese with English abstract)

[9] 田军, 吴怀春, 黄春菊, 等. 从 40 万年长偏心率周期看米兰科维奇理论 [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3543-3568.
TIAN J, WU H C, HUANG C J, et al. Revisiting the Milankovitch theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3543-3568. (in Chinese with English abstract)

[10] XU K, CHEN H H, HUANG C J, et al. Astronomical time scale of the Paleogene lacustrine paleoclimate record from the Nanxiang Basin, Central China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 532: 109253.

[11] 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 C X, ZHANG S F, WANG Y N, 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. (in Chinese with English abstract)

[12] 张念念, 范天来, 黄春菊, 等. 西沙群岛琛科 2 井珊瑚礁钻孔天文年代标尺的建立及天文周期记录 [J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 436-450.
ZHANG N N, FAN T L, HUANG C J, et al. Identification of orbital cycles in coral-reef core from Well CK-2, Xisha Islands and insights into coral reef evolution in the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 436-450. (in Chinese with English abstract)

[13] HILGEN F J, LANGEREIS C G. The age of the Miocene-Pliocene boundary in the Capo Rossello area (Sicily)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 91(1/2): 214-222.

[14] HÜSING S K, CASCELLA A, HILGEN F J, et al. Astrochronology of the Mediterranean langhian between 15.29 and 14.17 Ma[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 290(3/4): 254-269.

[15] 施和生, 杨计海, 张迎朝, 等. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 691-698.
SHI H S, YANG J H, ZHANG Y Z, et al. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 691-698. (in Chinese with English abstract)

[16] 王真真, 朱继田, 李安琪, 等. 琼东南盆地新生代东西分块差异构造演化及控藏意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(4): 157-169.
WANG Z Z, ZHU J T, LI A Q, et al. Differential control of structures over reservoirs and its significance in Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(4): 157-169. (in Chinese with English abstract)

[17] 张功成. 南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论 [J]. 石油学报, 2023, 44(4): 569-582.
ZHANG G C. Theory of deepwater hydrocarbon accumulation controlled by progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 569-582. (in Chinese with English abstract)

[18] 张功成, 刘震, 米立军, 等. 珠江口盆地–琼东南盆地深水区古近系沉积演化 [J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 632-641.
ZHANG G C, LIU Z, MI L J, et al. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641. (in Chinese with English abstract)

[19] 龙根元, 吴世敏, 曾广东. 琼东南盆地北礁凹陷伸展构造的几何学分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 71-77.
LONG G Y, WU S M, ZENG G D. Structural geometry of the Beijiao Sag of the Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(3): 71-77. (in Chinese with English abstract)

[20] 张义娜, 张功成, 何玉平, 等. 琼东南盆地北礁凹陷崖城组沉积与烃源岩发育特征 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 725-732.
ZHANG Y N, ZHANG G C, HE Y P, et al. Sedimentation and source rock characteristics of Yacheng Formation in Beijiao Sag of Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 725-732. (in Chinese with English abstract)

[21] 李俞锋, 蒲仁海, 唐明, 等. 一种新型底流与浊流交互作用形成的储集砂体: 以北礁凹陷为例 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(6): 55-66.
LI Y F, PU R H, TANG M, et al. A new reservoir sand body resulted from interaction between turbidity flows and bottom currents: A case from Beijiao Sag of Qiongdongnan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(6): 55-66. (in Chinese with English abstract)

[22] 张毅, 毛宁波, 何丽娟, 等. 琼东南盆地深水区新生代海底扇沉积演化: 以宝南断阶带为例 [J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 48-54.
ZHANG Y, MAO N B, HE L J, et al. Sedimentary evolution of submarine fan of Cenozoic in deep-water area of Qiongdongnan Basin: A case study in Baonan Fault Terrace Zone[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(3): 48-54. (in Chinese with English abstract)

[23] 谢辉, 周蒂, 石红才, 等. 珠江口盆地–琼东南盆地深水区新生代构造沉积演化对比分析 [J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 48-61.
XIE H, ZHOU D, SHI H C, et al. Comparative study on the Cenozoic tectonic and sedimentary evolution in the deep water areas of the Zhujiang River Estuary Basin and the Qiongdongnan Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 48-61. (in Chinese with English abstract)

[24] 杜威, 纪友亮, 季梦瑶, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 142-151.
DU W, JI Y L, JI M Y, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(4): 142-151. (in Chinese with English abstract)

[25] FALAHATKHAH O, KORDI M, FATEMI V, et al. Recognition of Milankovitch cycles during the Oligocene-Early Miocene in the Zagros Basin, SW Iran: Implications for paleoclimate and sequence stratigraphy[J]. Sedimentary Geology, 2021, 421: 105957.

[26] 王嘉伟, 金思丁, 魏祥峰, 等. 黔西南下石炭统打屋坝组页岩的天文旋回识别及层序地层划分 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 288-303.
WANG J W, JIN S D, WEI X F, et al. Orbital cycle recognition and sequence stratigraphic division of the Lower Carboniferous Dawuba Formation shales in Southwest Guizhou[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 288-303.(in Chinese with English abstract)

[27] 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, 2011, 36(1): 12-16.
ZHAO Q L, WU H C, LI H Y, et al. Determination of the optimal sampling interval for cyclostratigraphic analysis by using sampling theorem and accumulation rates[J]. Earth Science, 2011, 36(1): 12-16. (in Chinese with English abstract)

[28] 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 S H, WANG Y N, ZHANG S F, 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. (in Chinese with English abstract)

[29] LI M S, HINNOV L, KUMP L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.

[30] 宋翠玉, 吕大炜. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展 [J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 380-395.
SONG C Y, LÜ D W. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 380-395. (in Chinese with English abstract)

[31] YANG H Z, TANG W, XU E Z, et al. Cyclostratigraphy and paleoclimate analysis of the Lingshui Formation in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin, China[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(1): 100224.

[32] LIU J, MA X D, LU Y C, et al. Astronomically forced Late Paleocene-Early Eocene climate variability in the Subei Basin, East China[J]. Global and Planetary Change, 2024, 232: 104350.

[33] HUA X, YIN R S, KEMP D B, et al. Mercury isotope constraints on the timing and pattern of magmatism during the end-Triassic mass extinction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 624: 118438.

[34] LIU D Y, HUANG C J, KEMP D B, et al. Paleoclimate and sea level response to orbital forcing in the Middle Triassic of the eastern Tethys[J]. Global and Planetary Change, 2021, 199: 103454.

[35] HUANG C J, OGG J G, KEMP D B. Cyclostratigraphy and astrochronology: Case studies from China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 560: 110017.

[36] LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.

[37] LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M, et al. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2011, 532: A89.

[38] PALIKE H, NORRIS R D, HERRLE J O, et al. The heartbeat of the Oligocene climate system[J]. Science, 2006, 314: 1894-1898.

[39] 刘磊, 管红香, 冯俊熙, 等. 南海北部 31 ka 以来 GDGTs 组成及其对古温度和季风变化的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(3): 144-159.
LIU L, GUAN H X, FENG J X, et al. Composition of glycerol dibiphytanyl glycerol tetraethers(GDGTs) and its responses to paleotemperature and monsoon changes since 31 ka in northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(3): 144-159. (in Chinese with English abstract)

[40] 谭思哲, 高顺莉, 葛和平, 等. 南黄海盆地二叠系烃源岩孢粉相特征及其形成环境 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(3): 691-700.
TAN S Z, GAO S L, GE H P, et al. Palynofacies characteristics and formation environment of Permian source rock in South Yellow

Sea Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3): 691-700. (in Chinese with English abstract)

[41] 马博, 吉利明, 张明震, 等. 酒西盆地红柳峡地区下白垩统烃源岩孢粉相与沉积古环境特征 [J]. 岩性油气藏, 2021, 33(5): 22-33.
MA B, JI L M, ZHANG M Z, et al. Palynofacies and sedimentary paleoenvironment of Lower Cretaceous source rocks in Hongliuxia area, Jiuxi Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(5): 22-33. (in Chinese with English abstract)

[42] 马博, 吉利明, 张明震, 等. 酒西盆地下白垩统赤金堡组烃源岩孢粉相特征及其石油地质意义 [J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1376-1387.
MA B, JI L M, ZHANG M Z, et al. Palynofacies characteristics of source rocks of Lower Cretaceous Chijinbao Formation in Jiuxi Basin and their petroleum geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1376-1387. (in Chinese with English abstract)

[43] 田军, 汪品先, 成鑫荣. 南沙 ODP1143 站有孔虫同位素变化对地球轨道驱动的响应 [J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(5): 452-460.
TIAN J, WANG P X, CHENG X R. Response of isotopic changes of foraminifera at ODP1143 station in Nansha to earth orbit drive[J]. Science in China(Ser. D), 2004, 34(5): 452-460. (in Chinese)

[44] 汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
WANG P X, TIAN J, HUANG E Q, et al. Earth system and evolution[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)

Summary for “琼东南盆地北礁凹陷陵水组旋回地层学及古气候分析”

Cyclostratigraphy and paleoclimate analysis of the Lingshui Formation in the Beijiao Sag, Qiongdongnan Basin

ZHANG Shangfeng[1a, 1b], XU Min[1a*], TANG Wu[2], XU Enze[1a], WANG Yaning[1a, 1b], ZHU Rui[1a, 1b]

1a. College of Earth Sciences; 1b. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

First author, E-mail: jpuzhangsf@163.com

* Corresponding author, E-mail: Ty0xumin@126.com

Abstract: [**Objective**] A high-resolution, continuous chronostratigraphic framework was established using the astronomical cycles, and the paleoclimatic characteristic was analyzed for the Oligocene Lingshui Formation of the Beijiao Sag. [**Methods**] The cyclostratigraphy characteristics and the paleoclimatic evolution were determined by time series and multiple paleontological proxies analyses, respectively, in the Well A of the Beijiao Sag. [**Results**] Cycles of 405 ka long eccentricity, 100 ka short eccentricity, 42.7 ka and 43.2 ka obliquity, and 20.5 ka precession were identified in the Lingshui Formation of the Beijiao Sag. Considering the time anchor of 23.03 at the top of Oligocene, the astronomical tuning revealed a "floating" astronomical chronology scale of 5.59 Ma. Within the high-precision absolute astronomical timeframe of the Lingshui Formation (28.62−23.03 Ma), the bottom boundary ages of Ling Ⅰ, Ling Ⅱ, and Ling Ⅲ members can be determined as 23.97 Ma, 25.43 Ma, and 28.62 Ma, respectively. These ages correspond to the average sedimentation rates of 18.4 cm/ka, 8.6 cm/ka, and 12.8 cm/ka, respectively. The palaeoclimatic indicators, including the foraminifera, organic carbon, organic detrital fractions, and carbon and oxygen isotopes, suggest an overall warm-cool-warm trend during the deposition of Lingshui Formation. The comparison of palaeoclimate evolution with astronomical rotation suggested that the climate evolution during this period was mainly controlled by astronomical orbital forces such as eccentricity and age difference. Astronomical cyclostratigraphic study on the Lingshui Formation of the Beijiao Sag explores the control of astronomical orbital parameters on paleoclimate and establishes a high-resolution and continuous chronostratigraphic framework. [**Conclusion**] This method provides a refined chronological framework for predicting high-quality reservoir intervals in oil and gas exploration, promoting the development of oil and gas exploration in the Beijiao Sag.

Key words: Qiongdongnan Basin; Beijiao Sag; cyclostratigraphy; astronomical time scale; paleoclimate

Received: 2024-05-16; Revised: 2024-07-05; Accepted: 2024-07-09

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240264