

川中地区中侏罗世早期天文驱动下的湖平面波动及沉积物分布规律

冯潇飞^{1,2}, 赵晓明^{1,2}, 张喜^{1,2}, 葛家旺^{1,2}, 杨长城³, 梁岳立^{1,2}, Massine Bouchakour^{1,2}

(1. 天然气地质四川省重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 3. 中国石油西南油气田公司 气田开发管理部, 四川 成都 610056)

摘要: 陆相湖盆的湖平面升降导致的盆内沉积充填差异对油气形成与富集具有重要影响, 而湖平面波动受气候作用影响明显。选取川中地区中侏罗世早期沙溪庙组一段的湖相连续沉积记录, 采用高分辨率自然伽马测井资料作为气候替代指标, 开展了中侏罗世早期陆相地层的旋回地层学研究, 对长、短偏心率周期进行滤波分析, 建立了沙溪庙组一段的浮动天文年代标尺。研究发现: ① 沙溪庙组一段陆相湖盆沉积地层中保存了完好的天文旋回响应信号; ② 通过川中地区沙溪庙组一段的天文年代标尺计算, 认为沙溪庙组一段沉积持续时间约为 2.43 Ma; ③ 偏心率接近极大值且岁差振幅较大表明气候温暖、潮湿, 湖平面相对上升, 发育偏泥质沉积, 偏心率接近极小值且岁差振幅较小表明气候寒冷、干旱, 发育偏砂质沉积, 砂质沉积物厚度差异受岁差振幅所调控; ④ 中侏罗世早期不同尺度的轨道周期驱动力共同控制了气候的变化, 气候变化引起湖平面的波动, 湖平面的波动影响了沉积物的分布。

关键词: 湖平面波动; 气候变化; 旋回地层学; 沉积物分布规律; 沙溪庙组一段; 中侏罗世; 陆相湖盆; 四川盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Astronomically forced lake-level fluctuation and sediment distribution patterns during the early Middle Jurassic, central Sichuan Basin

FENG Xiaofei^{1,2}, ZHAO Xiaoming^{1,2}, ZHANG Xi^{1,2}, GE Jiawang^{1,2}, YANG Changcheng³,
LIANG Yueli^{1,2}, Massine Bouchakour^{1,2}

(1. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Gas Field Development Management Department, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610056, China)

Abstract: The differences in sedimentary filling within a continental lacustrine basin, caused by lake-level fluctuations, pose significant impacts on hydrocarbon generation and enrichment, while the lake-level fluctuations are notably influenced by climatic changes. In this study, we investigate the continuous lacustrine sedimentary records preserved in the 1st member of the Shaximiao Formation (also referred to as the Sha 1 Member) of the early Middle Jurassic in the central Sichuan Basin. Using the high-resolution natural gamma-ray (GR) log data as paleoclimate proxies, we explore the cyclostratigraphy of the early Middle Jurassic continental strata. Through the filtering of long and short eccentricity cycles, we establish a floating astronomical time scale (ATS) for the Sha 1 Member. The results indicate that the sedimentary strata in the lacustrine basin of the Sha 1 Member preserve well-defined response signals to astronomical cycles. Calculations by the ATS reveal that the Sha 1 Member in the central Sichuan Basin underwent continuous deposition for approximately 2.43 Ma. The combination of eccentricity maxima and relatively high precession amplitude suggests a warm and humid climate. In this case, the lake level rose relatively, resulting in the development of argillaceous sediment. In contrast, the combination of eccentricity minima and relatively low precession amplitude implies a cold and arid climate. In this case, sandy sediment occurred, the thickness of which is modulated by precession amplitude. The driving forces of

收稿日期: 2024-04-12; 修回日期: 2024-09-02。

第一作者简介: 冯潇飞(1993—), 男, 博士研究生, 油气开发地质。E-mail: fxf0916@163.com

通信作者简介: 赵晓明(1982—), 男, 教授、博士研究生导师, 沉积学与油气地质。E-mail: zhxm98@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072183); 国家自然科学基金青年基金项目(41902124); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0810)。

the orbital cycles at different scales during the early Middle Jurassic jointly determined the climatic changes, which caused lake-level fluctuations and further affected the sediment distribution.

Key words: lake-level fluctuation, climatic change, cyclostratigraphy, sediment distribution pattern, the 1st member of the Shaximiao Formation (Sha 1 Member), Middle Jurassic, continental lacustrine basin, Sichuan Basin

引用格式:冯潇飞,赵晓明,张喜,等. 川中地区中侏罗世早期天文驱动下的湖平面波动及沉积物分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1368–1382. DOI: 10. 11743/ogg20240512.

FENG Xiaofei, ZHAO Xiaoming, ZHANG Xi, et al. Astronomically forced lake-level fluctuation and sediment distribution patterns during the early Middle Jurassic, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1368–1382. DOI: 10. 11743/ogg20240512.

陆相湖盆地层赋存着丰富的油气资源量,其气候作用下的湖平面变化和沉积物分布规律,是学术界及工业界共同关注的热点^[1-2]。但与海洋环境相比,陆相湖盆通常对气候变化敏感,且具有面积较小、水位波动频繁、储层砂体纵横交错且厚度较薄等特征^[3-4],这导致恢复湖平面波动演化及识别湖盆内沉积物空间配置规律具有较大的难度,延缓了陆相湖盆油气勘探开发的进程。

旋回地层学是以米兰科维奇旋回理论为基础的一门地层学分支学科,主要研究受地球轨道驱动力引起的、具有周期性变化的沉积记录,广泛应用于天文年代标尺建立、湖(海)平面及古气候的恢复、沉积响应特征识别、精细等时地层划分和沉积速率分析等方面。然而近20年来,尤其是中侏罗世时期的旋回地层学研究,主要是针对海相地层展开的,在侏罗世时期的陆相沉积中,由于气候替代性资料的缺乏和地层的不连续性等原因,陆相沉积的旋回地层学研究仍存空白^[5]。那么,侏罗世陆相湖盆湖平面的演化是否受到天文气候及天文驱动力的调控?湖盆内沉积物的空间配置规律是否与天文周期相关?这些问题有待进一步研究。

四川盆地中部地区(川中地区)中侏罗世发育典型的陆相湖盆^[6-7],本文聚焦于中侏罗统沙溪庙组一段(发育于中侏罗世早—中晚 Aalenian 期),利用高分辨率自然伽马测井系列,开展米兰科维奇旋回地层分析,建立沙溪庙组一段的高精度天文年代标尺;通过沉积噪声模拟和湖泊水位高频变化分析技术,恢复沙溪庙组一段的相对湖平面变化,揭示湖平面波动及其天文轨道气候作用间的调控过程;探讨陆相湖盆内部沉积物充填模式与天文轨道气候之间的耦合关系。此研究可为陆相“泥包砂”沉积背景的湖盆区域有利储层砂体的油气勘探,提供科学的、不受人为因素影响的可靠依据。

1 地质背景

四川盆地位于北纬 30° 附近古扬子板块的西缘,

是基于上扬子克拉通发展起来的多旋回叠合盆地^[8]。自震旦纪以来,四川盆地整体以沉降为主^[6],但构造—沉积具有多旋回性,致使纵向上发育多套油气层,侏罗系是已发现埋藏最浅的含油气层系^[6-7]。考虑到构造活动和沉积填充过程的变化,四川盆地可进一步划分为6个次级构造单元:川北低缓带、川西低陡带、川中平缓带、川西南低褶带、川东高陡断褶带和川南低陡穹形带^[7](图 1b)。研究区主要位于川中平缓构造带。

川中地区侏罗系为一套巨厚的陆相地层,下侏罗统自流井组、凉高山组和中侏罗统沙溪庙组保存完整,上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组部分剥蚀(图 1c),其中,沙溪庙组为一套巨厚的陆相碎屑岩沉积,厚度介于 1 000 ~ 1 500 m,岩性为杂色泥岩夹灰色和灰绿色细粒砂岩,具有典型“泥包砂”的特点(单砂体厚度介于 10 ~ 18 m),以叶肢介页岩为标志层分为沙溪庙组一段(沙一段)与沙溪庙组二段(沙二段)^[6-7]。川中地区沙二段以浅水三角洲—河流相沉积为主,沙一段以三角洲—湖泊相沉积为主,顶部叶肢介页岩为一套最大湖泛期的产物,该标志层在川中地区范围内都可以进行追踪对比^[7]。沙一段底部的灰绿色泥岩和灰色粉砂岩,与下伏凉高山组顶部的灰黑色泥岩分界标志明显^[11]。磷灰石裂变径迹研究表明,川中地区中侏罗世以慢速沉降为主^[12],这表明在沙一段沉积时期,地层为连续沉积,没有发生过抬升剥蚀作用及沉积间断。沙一段纵向上发育多套油气层,储层保存完整,泥岩和细粒砂岩较为发育,旋回性强,对气候和环境的变化反映灵敏^[13]。根据前人对四川盆地侏罗纪陆相生物年代地层学的研究,中侏罗统底部沙溪庙组底界面(Aalenian 阶底界面)的沉积年代为(174. 1±0. 1) Ma^[8-9](图 1c)。

2 数据方法

2.1 自然伽马测井

探明沉积序列中的轨道信号并建立高精度的时

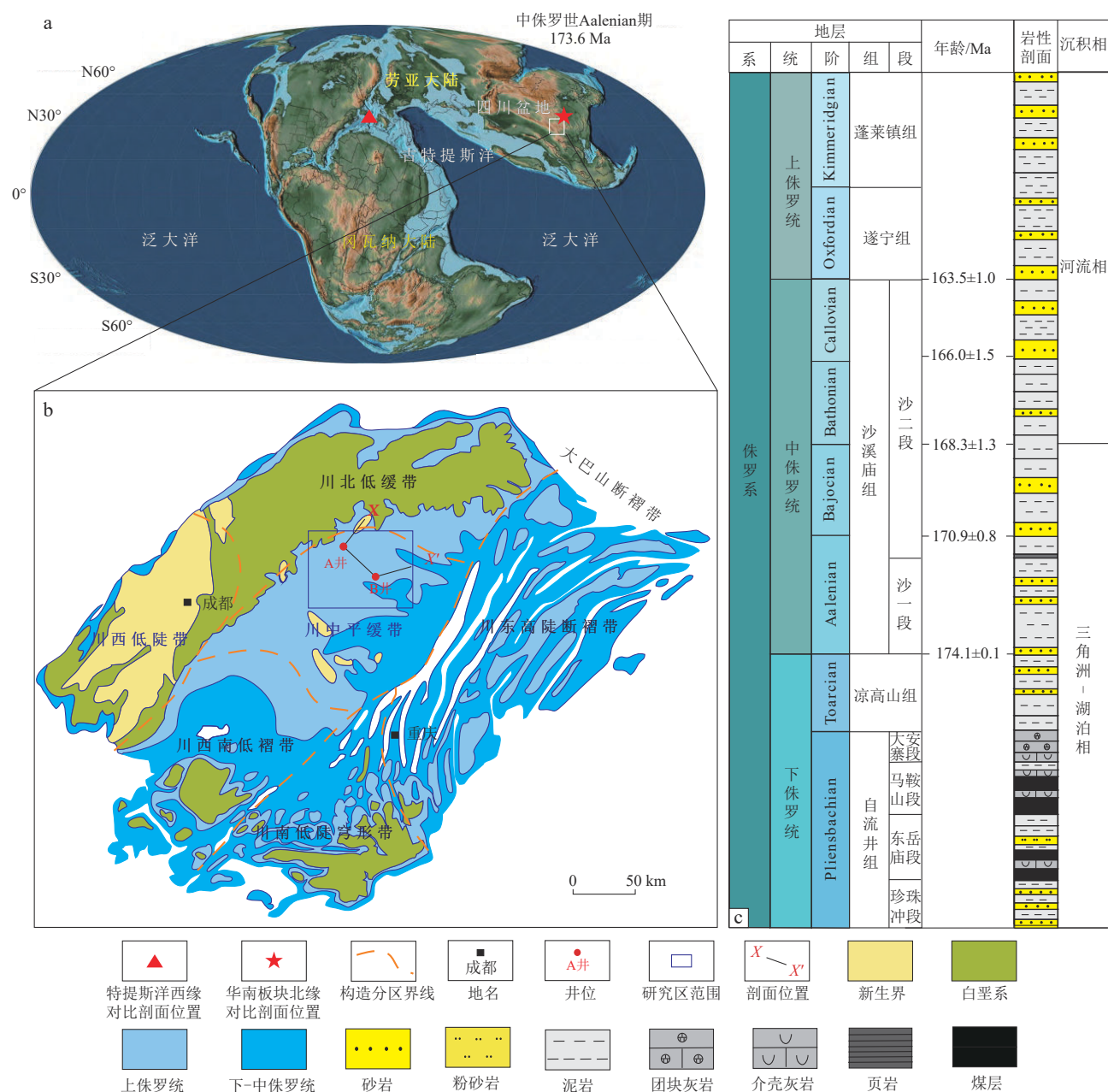


图1 川中地区古地理位置及地层综合柱状图(据文献[6-10]修改)

Fig. 1 Paleogeographic location and composite stratigraphic column of the central Sichuan Basin (modified after references [6-10])

a. 中侏罗世 Aalenian 期 173.6 Ma 全球古地理格局; b. 四川盆地构造特征及研究区位置; c. 川中地区侏罗系综合柱状图

(c 图中的年龄为生物地层及锆石定年, 引自参考文献[8, 10].)

间框架,需要获取分辨率高、连续性好的古气候替代性指标^[14-15]。自然伽马测井(GR)测量沉积物中伽马射线的强度,可以灵敏地显示沉积物中岩性的差异,进而反映古气候环境中的微小变化,通常比许多其他古气候替代指标具有更高的信噪比^[15],是米兰科维奇旋回分析的理想数据,因此被广泛应用于时间序列分析^[16]。高 GR 值通常与富含黏土矿物的泥质沉积物有关,而低 GR 值则与砂岩或富含碳酸盐的沉积物有关^[17-19]。在温暖、潮湿的气候条件下,伴随着强烈的

水流和化学风化作用,黏土矿物输入增加,GR 值变高;而在干燥寒冷的气候环境下,黏土矿物输入减少,GR 值相应变低^[20]。因此,本次研究使用 GR 数据作为替代性指标进行时间序列分析,用于旋回地层学分析的沙一段 GR 数据序列来源于 A 井和 B 井测井数据,GR 曲线深度范围分别为 2 062 ~ 2 427 m 和 2 534 ~ 2 893 m(图 1b,图 2)。在开展信号分析之前,首先需对数据进行预处理,以剔除所构建时间序列中各类环境“噪音”^[21]。

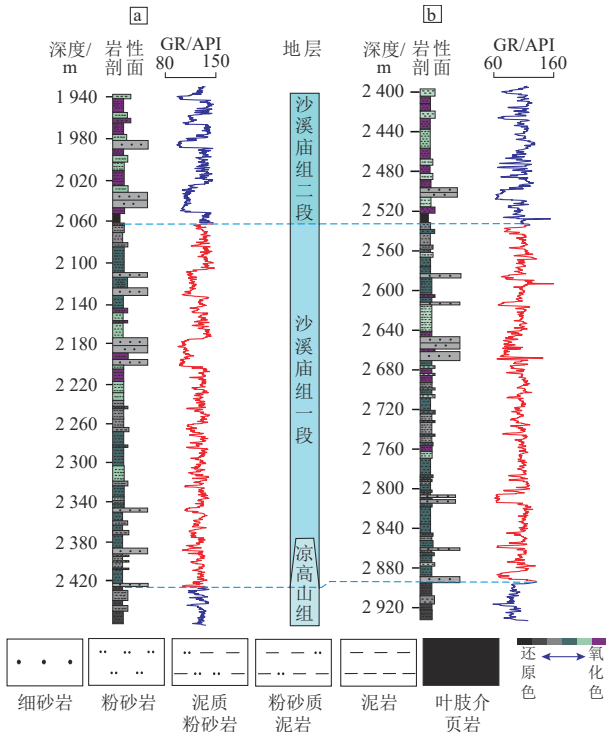


图2 川中地区A井(a)和B井(b)中侏罗统沙一段古气候替代指标(井位见图1b)

Fig. 2 Paleoclimate proxies for the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A (a) and B (b) in the central Sichuan Basin (see Fig. 1b for well locations)
(蓝色虚线段分别为目的层顶、底界线。)

2.2 旋回地层学分析

沉积过程的随机性、沉积速率的不规律性、沉积间断以及其他复杂的地质过程都有可能干扰沉积物中天文信号的提取,产生“噪音”^[22],因此需要定量的旋回地层学方法来区分天文旋回信号和噪声,最终搭建高精度天文年代地层格架。本研究GR序列具有高采样分辨率,并且完全覆盖了研究层位。分别选取A井和B井的沙一段进行旋回地层学研究,主要步骤如下:①对GR数据序列插值和去趋势化处理;②利用多窗口频谱分析方法(multi-taper method, MTM)^[21]对去趋势化数据序列进行频谱分析,波峰代表不同的天文轨道周期,主要选择95%置信度的峰值频率进行分析,对处于90%~95%置信度的数据结果选择性使用;采用基于快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)的演化谱分析方法检测谱峰信号的时间演化;③采用相关系数分析法(correlation coefficient, COCO)及演化相关系数分析法(evolutionary correlation coefficient, eCOCO)进行零假设检验,追踪沉积速率变化,COCO和eCOCO分析都通过2 000次的蒙特卡罗模拟来评估1~50 cm/kyr

(步长0.3 cm/kyr)的沉积速率变化^[21],判断天文周期信号识别的准确性;④通过高斯带通滤波处理,利用滤波获取的405 kyr长偏心率周期来调谐短偏心率周期、斜率周期和岁差周期^[23],并以405 kyr长偏心率周期信号调谐至对应年龄天文数值解,完成从深度域到时间域的转换,最终建立沙一段“浮动的天文年代标尺”。上述所有数据分析皆利用Acycle 2.4.1^[15]软件完成。

2.3 基于沉积噪声模型的湖平面重建方法

基于沉积噪声模型的湖平面重建方法,是在天文旋回分析的基础上,通过定量分析沉积记录中除了天文旋回成分之外的“噪声”,来反映相对湖(海)水平面的波动情况^[19,21]。这种方法的可行性已经在国内、外许多海相和陆相沉积地层中得到证实,近年来已被广泛应用于地质历史时期湖(海)平面的重建工作^[18-19,21]。当湖(海)平面下降时,沉积环境不稳定性的增加通常会产生与水深相关的高噪声,反之亦然。沉积噪声模型可以通过计算与天文轨道周期成分无关的信号(即噪声)方差与沉积记录总方差的比率来描述沉积噪声的特征^[21]。该模型涉及两种互补方法,包括轨道调谐分析后的沉积噪声模型(DYNOT)和Lag-1自相关系数(ρ_1)分析^[21]。在数据序列中,水位较深段通常包含低沉积噪声,导致较低的DYNOT值;相反,高沉积噪声对应高DYNOT值,表明存在较低的沉积水位。本研究通过DYNOT的方法对405 kyr调谐的GR序列进行模拟,重建了古湖泊水位变化。GR的模拟运行窗口设置为400 kyr,为消除噪声模型方法所包含的不确定性,使用5 000次迭代的蒙特卡罗分析对其进行评估。

2.4 湖泊水位高频变化曲线分析

Nio等(2005)提出了一种利用湖泊水位高频变化曲线分析(integrated prediction error filter analysis, INPEFA)技术研究层序地层变化的方法^[24],该方法目前被广泛应用于高分辨率层序地层格架搭建的工作中^[4,25]。INPEFA曲线可以突显出原始测井曲线中肉眼不易观察到的变化趋势。通过最大熵频谱分析(MESAGR)处理测井曲线得到估计值^[26],随后通过测井实际值减去估计值便可得到预测误差滤波分析曲线(prediction error filter analysis, PEFA)^[26],在PEFA曲线的基础上对其进行积分得到INPEFA曲线,使趋势不太明显的PEFA曲线变成INPEFA曲线,趋势的变化由多个拐点隔开,从而使趋势变得更加明显,INPEFA值向上增加表现为正趋势,向上减小则对应负趋势。INPEFA曲线的拐点和曲线变化趋势反映了不同级次

的层序界面和沉积旋回变化;正趋势通常代表气候开始湿润,水位相对升高,往往发育正旋回类型;负趋势则代表气候开始干旱,水位相对降低,常发育下降半旋回类型^[4,25,27]。

3 旋回地层学结果及相对湖平面恢复

3.1 旋回地层学结果

3.1.1 频谱特征

川中地区中侏罗世早期地层表现出明显的旋回性,从目的层GR数据中提取出沉积旋回的主要频率(即单位旋回数)是旋回分析的关键^[15]。在深度域上,对A井和B井沙一段去趋势GR数据进行MTM频谱分析(图3)。分析可知,功率谱图显示在95%置信率曲线之上,A井存在60.3、14.3~17.3、4.8~6.3和2.4~3.6 m等多个能量谱波长高峰,对应持续时间为405、94~114、31~42和17~24 kyr;B井存在58.4、14.9~15.7、5.1和2.4~3.5 m等多个能量谱波长高峰,对应持续时间

为405、107~112、36和16~25 kyr。这些轨道周期可以解释为长偏心率周期(60.3 m和58.4 m)为405 kyr、短偏心率周期(16.1 m和14.9 m)约107 kyr、斜率周期(5.2 m和5.1 m)约34 kyr及岁差周期(2.4 m)约17 kyr(图4)。通过GR演化谱分析发现,A井和B井405 kyr的旋回周期最为稳定、连续(图4,GR演化谱分析中的白色虚线)。

A井与B井的轨道周期参数比值相似,且二者与侏罗纪理论天文轨道周期参数比值20:5:2:1相吻合^[13],误差在10%之内波动^[28],由此说明研究区沙一段沉积过程是受地球轨道周期变化所控制,其记录了较为完整的米兰科维奇旋回。

3.1.2 相关系数分析

COCO和eCOCO是一种基于蒙特卡洛模拟的零假设(H_0)检验方法。COCO分析了地层深度域中古气候替代指标能量谱与时间域天文模型之间的相关系数,并评估信号中不存在天文周期的零假设显著性水平,其中COCO峰值段所对应的沉积速率代表最佳沉积速率,且可以否定无天文周期信号的原假设,并可进一步采用eCOCO方法跟踪沉积速率变化^[23]。利用COCO分析法估算A井和B井沙一段沉积速率,对0~40 cm/kyr的沉积速率进行2 000次蒙特卡洛模拟,分析认为A井和B井平均沉积速率分别为15.09 cm/kyr和14.86 cm/kyr,且分别出现了13.76~19.99 cm/kyr和13.91~18.35 cm/kyr峰值区间(图5a, c),其 H_0 的置信水平平均低于0.01(图5b, d), H_0 的置信水平越低,此沉积速率段存在的可能性越高,可以否定无天文周期信号的原假设。

eCOCO分析表明,A井和B井沙一段沉积速率分别介于11.79~19.66 cm/kyr和12.88~17.69 cm/kyr(图6a, c),且沉积速率较为连续, H_0 的显著性水平小于0.01(图6b, d)。COCO分析已经表明,在A井和B井的平均沉积速率约为15.1 cm/kyr和14.9 cm/kyr,结果与COCO分析得出的沉降速率区间基本一致。基于以上结果表明,二者沉积速率相似,A井和B井沙一段识别的天文周期信号是可靠的。

3.1.3 滤波与天文调谐

频谱特征与相关性分析均表明,A井和B井沙一段沉积过程受到了地球轨道驱动力的影响,通过时-深转换建立高精度且连续的天文地质年代,便可建立起相对时间概念的天文年代标尺。A井和B井沙一段调谐后GR数据序列通过滤波处理,分别提取了代表

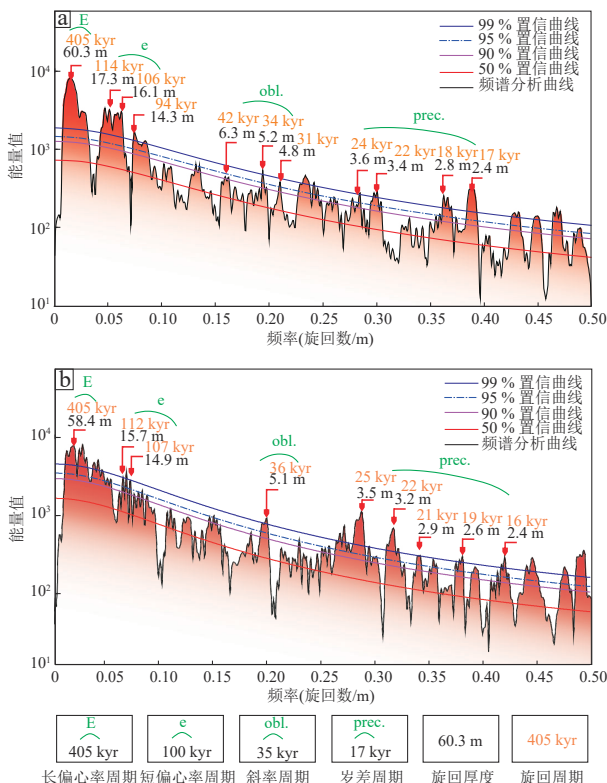


图3 川中地区A井(a)和B井(b)中侏罗统沙一段深度域MTM频谱分析

Fig. 3 Depth-domain multi-taper method (MTM) spectral analyses for the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A (a) and B (b) in the central Sichuan Basin

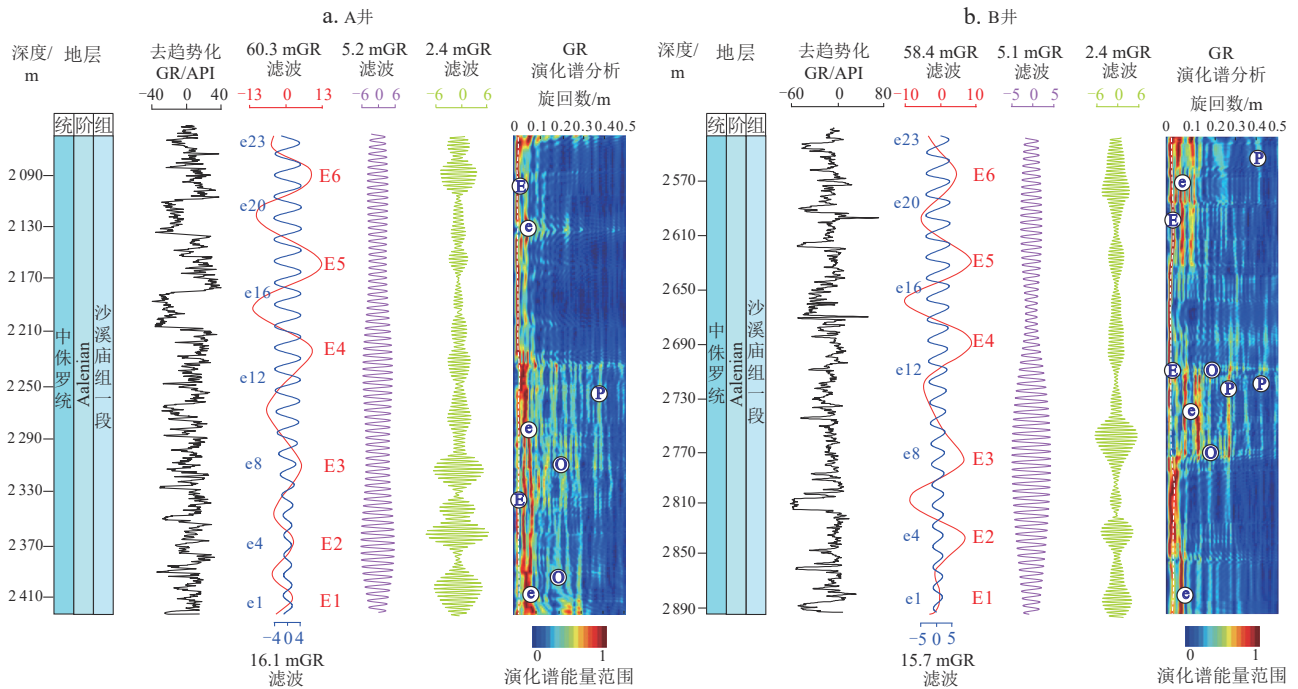


图4 川中地区A井(a)和B井(b)中侏罗统沙一段深度域轨道周期滤波曲线

Fig. 4 Depth-domain orbital filtered curves for the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A (a) and B (b) in the central Sichuan Basin (图中E为长偏心率周期,e为短偏心率周期,O为斜率周期,P为岁差周期。E1—E6和e1—e23分别代表长、短偏心率周期个数。白色虚线指示405 kyr能量。)

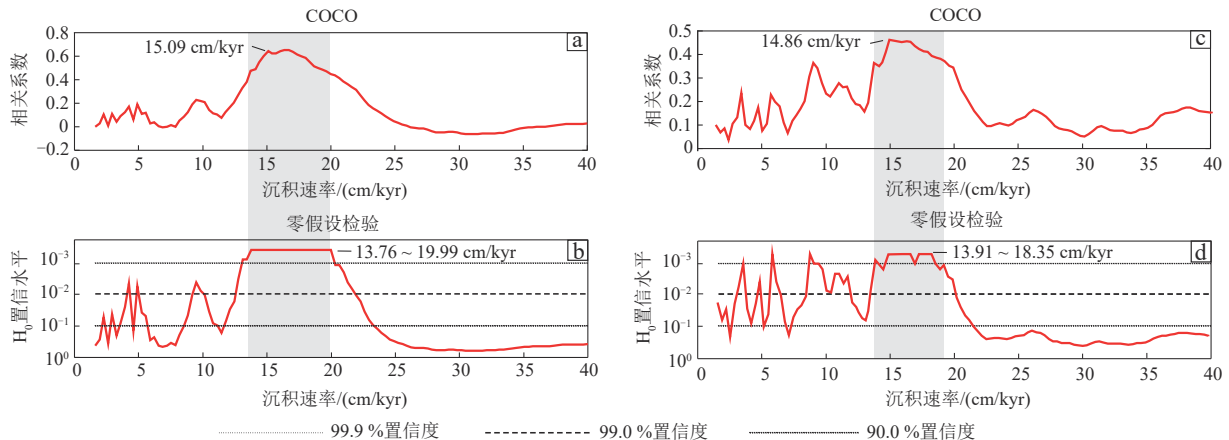


图5 川中地区A井和B井中侏罗统沙一段自然伽马测井序列COCO沉积速率分析

Fig. 5 Depositional rates of the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A and B in the central Sichuan Basin derived from GR log-based correlation coefficient (COCO) analysis

a. A井coco相关系数分析;b. A井沉积速率零假设检验;c. B井coco相关系数分析;d. B井沉积速率零假设检验

405 kyr长偏心率周期的60.3 m和58.4 m厚度的旋回,输出了6个长偏心率周期,其高斯滤波旋回数分别为 $(0.00246 \pm 0.00031) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.00246 \pm 0.00050) \text{ m}^{-1}$;分别提取了代表100 kyr短偏心率周期的16.1 m和14.9 m厚度的旋回,输出了23个短偏心率周期,其高斯滤波旋回数分别为 $(0.0094 \pm 0.0004) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.0093 \pm 0.0003) \text{ m}^{-1}$;分别提取了代表35 kyr斜率周期的5.2 m和5.1 m厚度旋回,输出了约70个斜率周期,其高斯滤

波旋回数分别为 $(0.02969 \pm 0.00037) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.02810 \pm 0.00046) \text{ m}^{-1}$;分别提取了代表17 kyr岁差周期的2.7 m和2.4 m厚度旋回,输出了约114个岁差周期,其高斯滤波旋回数分别为 $(0.05882 \pm 0.00237) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.06250 \pm 0.0019) \text{ m}^{-1}$ (图7)。

3.2 相对湖平面恢复

采用400 kyr的滑动窗口,对调谐后的GR序列进

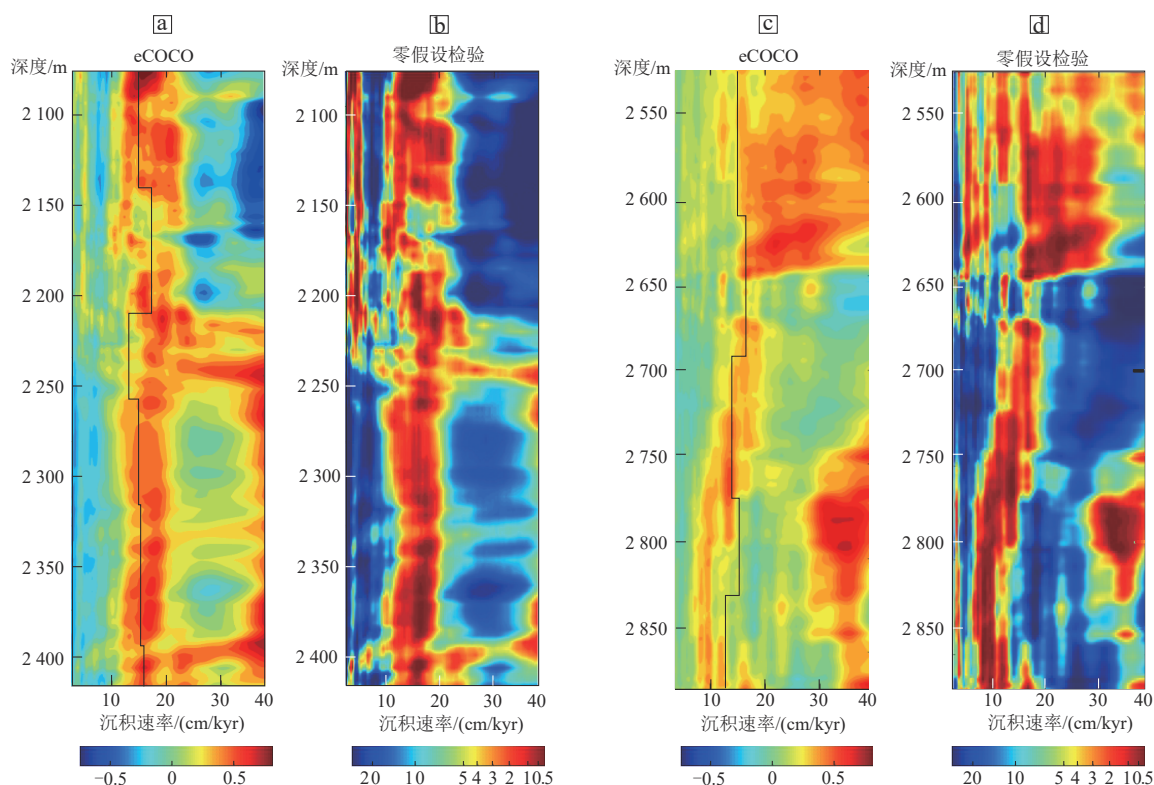


图6 川中地区A井和B井中侏罗统沙一段GR测井序列eCOCO沉积速率分析

Fig. 6 Depositional rates of the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A and B in the central Sichuan Basin derived from GR log-based evolutive correlation coefficient (eCOCO) analysis

a. A井eCOCO相关系数分析; b. A井沉积速率零假设检验; c. B井eCOCO相关系数分析; d. B井沉积速率零假设检验

(a和c图中的黑色曲线分别为A井和B井的可能沉积速率, 405 kyr尺度调谐。)

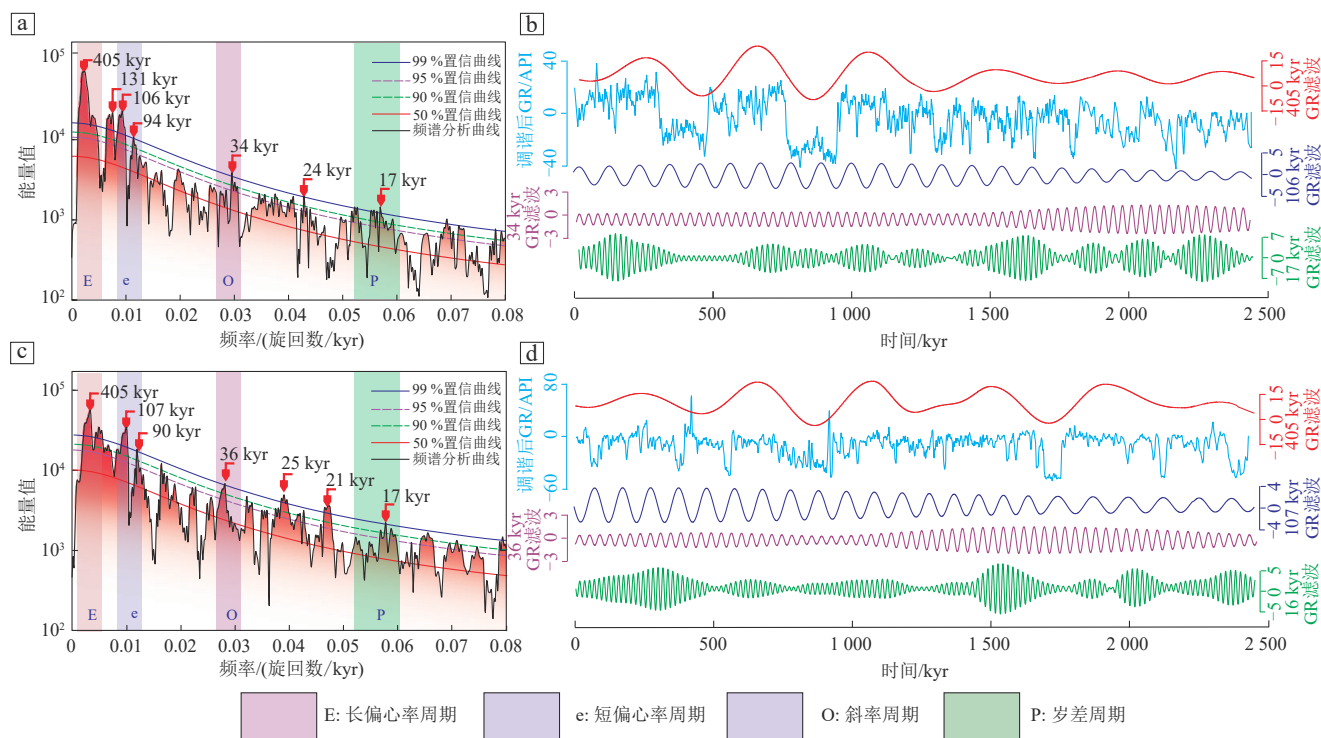


图7 川中地区A井和B井中侏罗统沙一时间域频谱及滤波曲线

Fig. 7 Time-domain frequency spectra and filtered curves of the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A and B in the central Sichuan Basin

a. A井时间域MTM频谱分析; b. A井滤波曲线; c. B井时间域MTM频谱分析; d. B井滤波曲线

行了沉积噪声模拟,提取了研究区沙一段沉积时期湖相沉积记录中的噪声曲线,并对湖平面高频趋势变化曲线进行分析。DYNOT沉积噪声模型显示(图8),沙一段沉积时期相对湖平面整体升高,相继经历了早期(沙一段底部)湖平面逐渐上升,并在中期湖平面达到最高位,随后湖平面开始稳定且缓慢地下降,而在晚期湖平面再次快速上升,最终达到湖平面最高位(沙一段顶部);在INPEFA曲线上,沙一段底部(Aalenian早期)呈整体正偏趋势,代表相对湖平面开始上升,该趋势一直持续到沙一段中部,随后INPEFA曲线开始负偏,湖平面呈下降趋势,并在沙一段沉积末期INPEFA曲线继续为正偏趋势,此时代表湖平面再次上升(图8)。

4 浮动天文标尺建立及其对沉积环境分布控制讨论

4.1 沙一段浮动天文标尺的建立

川中地区沙一段沉积记录中共保存了6个稳定的

405 kyr长偏心率周期,以及23个相对稳定的106 kyr短偏心率周期,故沙一段的持续时间大致为2.43 Ma,据U-Pb锆石定年及生物定年数据可得,中侏罗的底界面(Aalenian阶)的地质年龄为 (174.10 ± 0.10) Ma^[9],在川中地区的地层划分方案中,沙一段的底界面与中侏罗统的底界面相对应^[2],故沙一段的底界面地质年龄为 (174.10 ± 0.10) Ma,本文粗略采用174.10 Ma,最终推算出沙一段顶界面时间为171.67 Ma(图8)。

沙一段顶部发育一套厚度相对稳定的含叶肢介页岩,其分布范围几乎遍布整个川中地区^[6]。叶肢介生物大量的灭亡表明,沙一段沉积末期至沙二段沉积初期,川中地区气候环境经历了剧烈的变化。Price等学者通过对同为北纬30°附近的古特提斯洋西岸(位置见图1a)黏土矿物含量变化进行了分析,揭示出Aalenian中晚期至末期¹⁸O含量存在急剧降低的趋势,气候快速由温暖向寒冷过渡,古温度由+10°突变为-10°^[29-31]。同期,化学蚀变指数(CIA)显示的研究区气候特征,也存在突变(图9c),CIA作为气候替代指标被广泛用于古气候重建^[32-33],炎热潮湿气候沉积物的CIA一般在80~100,温暖、潮湿气候沉积物的CIA一般在70~80,

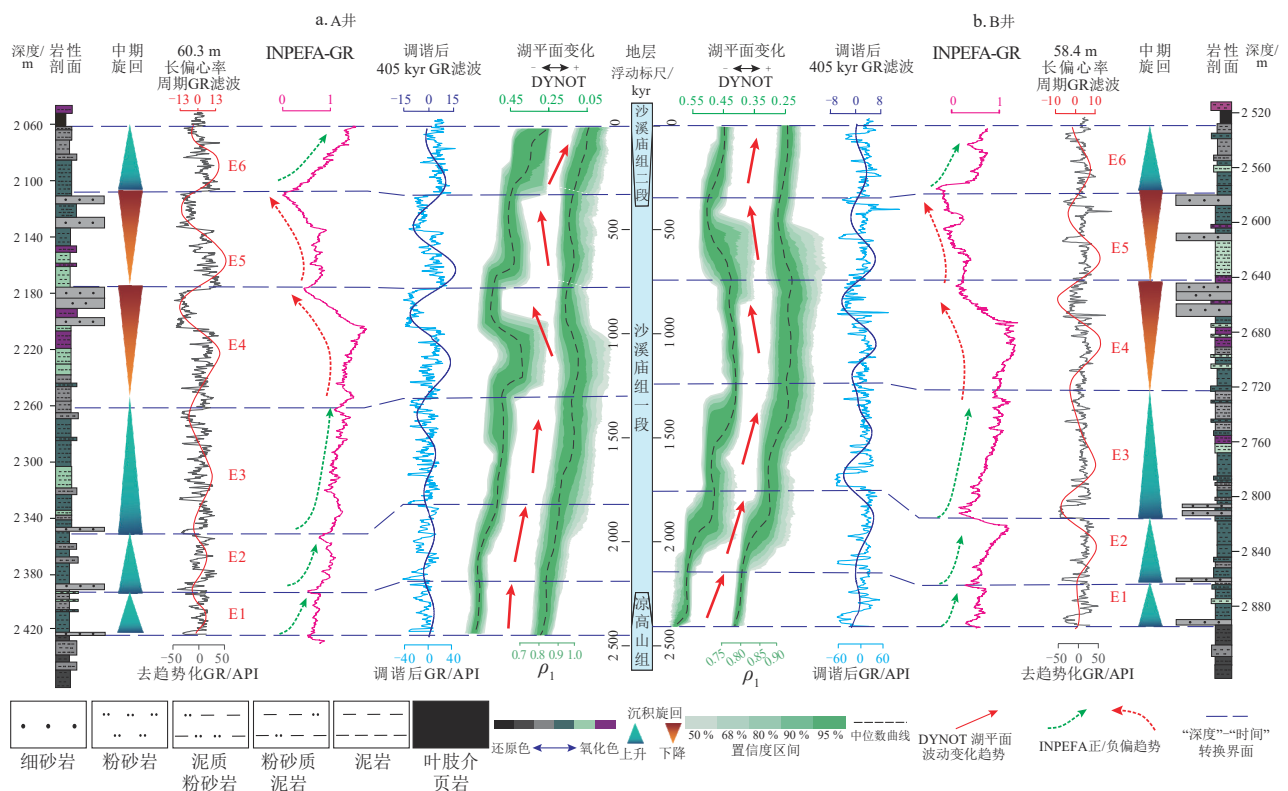


图8 川中地区A井(a)和B井(b)中侏罗统沙一段沉积时期湖平面恢复

Fig. 8 Schematic diagram showing the reconstructed lake level during the deposition of the Middle Jurassic Sha 1 Member in wells A (a) and B (b) in the central Sichuan Basin
(ρ_1 为自相关系数。E1—E6为长偏心率周期个数。)

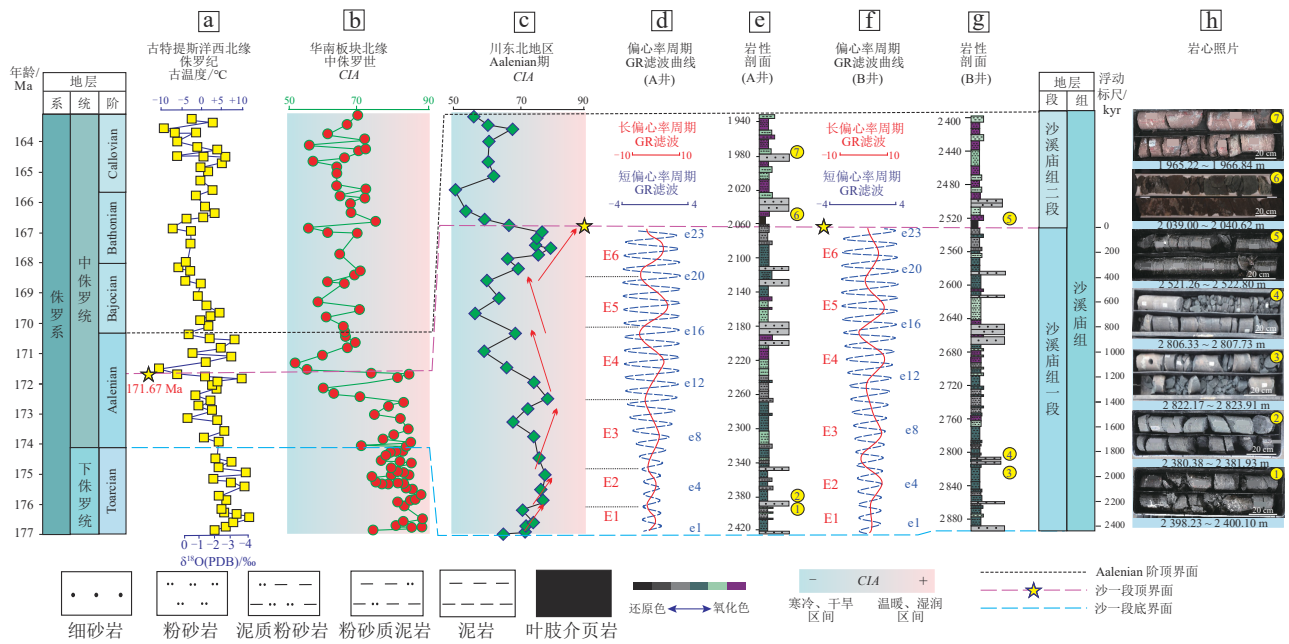


图9 川中地区中侏罗统沙一段沉积期古气候变化趋势及沙一段顶部天文年代标尺

Fig. 9 Trend of paleoclimate variations during the deposition of the Middle Jurassic Sha 1 Member in the central Sichuan Basin and the ATS for the top of the member

a. 北纬30°古特提斯洋西北缘侏罗纪古温度变化(地理位置见图1a, 据文献[31]修改); b. 华南板块北缘中侏罗世CIA数值变化(地理位置见图1a, 据文献[34]修改); c. 与研究区相近的川东北地区Aalenian期CIA数值变化及变化趋势(地理位置见图1b, 据文献[35]修改); d, f. 分别为A井和B井的长、短偏心率周期GR滤波曲线; e, g. 分别为A井和B井的岩性剖面; h. A井和B井指示泥岩颜色变化的岩心照片(E1—E6和e1—e23分别代表长、短偏心率周期个数。)

寒冷、干旱气候沉积物的CIA一般在50~70,因此无论是北纬30°附近的古特提斯洋西岸还是川中地区,Aalenian中晚期至末期的气候,都存在由温暖、潮湿转变为寒冷、干旱的现象。值得注意的是,CIA值在Aalenian中晚期至末期出现的急剧变小也并非个例,近期研究表明,华南板块北缘秭归盆地中侏罗统Aalenian中晚期至末期的元素地球化学分析中,也出现相同的特征^[34](图1a,图9b),而川中地区与华南板块北缘秭归盆地中侏罗世早期沉积物源都同为大巴山地区,且二者距离较近^[35]。综上,在Aalenian中晚期至末期阶段(172.0~171.5 Ma)(图8),北纬30°区域经历了由温暖、潮湿突变为寒冷、干旱的极端气候变化,这使得沙一段顶部时期发育的叶肢介生物大量灭亡,由此印证了2.43 Ma浮动天文标尺的可靠性。

4.2 天文周期对沉积环境演化及沉积物分布的控制作用

4.2.1 天文周期驱动下的气候演化及湖平面波动

天文变化与地球表层的许多过程有关,包括湖(海)平面波动、气候振荡和沉积物供给等因素,这些控

制因素是盆地沉积环境演化共同作用的结果^[36-37]。基于调谐后的GR测井序列,首次利用DYNOT恢复了整个中侏罗统沙一段的湖平面曲线变化,显示出沙一段的湖平面整体呈上升趋势(图8),同时INPEFA曲线的变化趋势及CIA变化趋势与DYNOT整体呈现出很好的同步性(图8,图9c),这种湖平面整体上升变化趋势,与前人对沙一段基于岩性组合推测的湖平面上升结果一致^[18],因此证实了DYNOT模型重建沙一段的湖平面变化是可行的。据A井和B井的DYNOT确定的相对湖平面变化可知,两口井大致皆有6处较明显的湖平面低位(DYNOT高值,图8),其位置与405 kyr长偏心率滤波周期曲线的低值相对应(图8,E1—E6周期灰色阴影位置),DYNOT中值曲线与405 kyr滤波表现出“同相位”共变关系,这证明沙一段高频的湖平面波动,是受405 kyr长偏心率天文轨道周期调控。早期大多数湖(海)平面升降都是围绕三级层序或更高级次层序构建的^[38],本研究构建的湖平面升降具有更高的时间分辨率。

轨道参数周期性变化会使得地球表面接受的日照量呈周期性变化,进而驱动地球表层气候系统的周期性波动^[17]。湖平面的演化与沉积时期的古气候密切

相关^[36],大量证据表明,陆相湖盆湖平面的波动变化均受控于天文轨道气候作用^[21,39-40]。那么,控制川中地区沙一段时期湖平面波动的天文轨道气候作用机制是什么?当偏心率接近极大值,地球公转轨道接近椭圆形,地球靠近太阳,虽然地球所接受的太阳辐射量增大^[28],但偏心率周期对地表日照量的直接影响不足1%^[19,41],偏心率的变化主要会影响季风周期的调节,最终对地球气候变化产生强有力的控制作用^[42]。当偏心率接近极大值时,较大的近日点和远日点的距离差,会使季节性差异变大^[30,43],导致夏季风增强,降雨偏多,降雨量大于蒸发量,气候温暖湿润,导致川中地区该时期陆相湖盆汇水充分;当偏心率接近极小值,地球公转轨道接近圆形,近日点和远日点的距离差减小,该时期季节反差变小^[21,44],海、陆间水气循环减弱,陆地降水减少,气候整体寒冷、干旱,川中地区该时期湖平面随之降低。斜率主要影响地球高纬度气候,对中、低纬度地区气候影响较小^[17],岁差记录往往在中、低纬度都有较好的保存,因此在中侏罗世,川中地区(北纬30°附近)受偏心率调控的岁差周期振幅对日照量分布的直接贡献很大,太阳辐射与其岁差周期的轨道响应呈线性关系^[45-47],偏心率较大值多对应岁差振幅高幅,偏心率较小值多对应岁差振幅低幅^[48]。当偏心率和岁差振幅整体较大时,轨道周期共振,季节性差异明显,夏至日接近远日点处^[48-51],太阳直射北半球,整体接受日照量较大,冬季温暖且漫长,气候温暖湿润,故湖盆汇水充分,该时期川中地区湖平面整体较高,DYNOT高值及INPEFA正偏的趋势变化(图8),证实了该过程的正确性;当岁差振幅较小时,对于北半球来说,虽夏季日照量极大,但整体接受日照量较少,气候表现为干燥寒冷,陆地储水单元储水量较少,川中地区湖平面随之下降,该过程同样被DYNOT低值及INPEFA负偏趋势所验证。因此,天文轨道周期通过驱动中侏罗世沙一段时期气候干湿、冷暖的差异,最终调控了川中地区湖平面的波动变化。

4.2.2 天文轨道周期约束下的沉积物发育模式

气候周期性波动信息会被保存在对气候变化敏感的沉积地层中,使沉积地层表现出不同级别旋回变化。地球轨道参数常常通过影响古气候的波动及湖平面的变化,来控制沉积物的发育类型^[45,51]。前人在对湖相沉积进行旋回地层学研究时发现,浅湖背景下GR极小值与偏心率极小值对应,此时气候整体相对干冷,GR低值对应低含量的有机质,同时对应高Sr/Ba元素含量比值,指示水体较浅的沉积环境,地表整体径流量

减少,间歇性河道与水下分流河道携带较少量的陆源沉积物质,搬运至浅湖地区沉积下来^[47,52]。与之相反的是,GR极大值与长偏心率极大值相对应时,气候整体较为温暖湿润,在相同区域位置Sr/Ba元素含量比值变低,指示沉积水体加深,流水能量减弱,沉积物粒度相对较细,分流河道间和湖相泥质细粒沉积物发育^[47,52],中侏罗统沙一段沉积时期存在该沉积物发育模式(图10),在众多无侵蚀且连续沉积背景下的天文旋回研究中,均发现有相同的规律^[13,53]。

对比轨道周期驱动下的沉积物沉积特征,发现E1—E6(周期)各阶段长偏心率低值处所对应的砂质沉积物具有明显的厚度差异性(图8,图9),这可能与受偏心率调制的岁差周期振幅高、低存在关联。当低岁差振幅、长偏心率大值转为长偏心率较小值时,粗粒沉积物厚度相对较大(图10),这是由于在长偏心率大值和低岁差振幅的模式下,形成了持续的相对干旱沉积环境,导致川中地区中侏罗世早期相对湖平面的位置相对较低,在该时期,湖盆面积减小,季节性河流和三角洲分支河道体系带来了大量的粗粒碎屑^[54],为偏心率极小值时期提供了厚度较大的粗粒沉积物;而当高岁差振幅、长偏心率大值转为长偏心率较低值时,粗粒沉积物的厚度相对较小(图10),这是因为在长偏心率较大值、高岁差振幅的模式下,气候相对湿润,川中地区中侏罗世早期湖平面相对较高,这种情况下水流动力相对较弱,大量富含有机质的细粒沉积物聚集,而粗粒沉积物的供给相对较少,因此,在随后的长偏心率极小值时期,粗粒沉积物砂体的厚度相对较薄。

4.2.3 天文旋回约束下的沙一段沉积演化规律

基于上述不同天文轨道周期的地质响应特征(图10,图11),并结合中侏罗世早期湖平面的演化过程,建立起沙一段的沉积演化模式。当E1—E3阶段长偏心率处于极大值时,岁差振幅较大,夏季风增强,太阳在远日点直射北半球,导致季节性差异变大,降雨偏多,降雨量大于蒸发量,气候温暖湿润,湖平面相对较高,川中地区中侏罗世早期湖泊整体处于扩张的过程,可容空间较大,物源供给不足,故长偏心率极大值时期多发育粉砂质泥岩和泥岩沉积;当E1—E3阶段长偏心率较小、岁差周期振幅为低幅时,季风强度、太阳辐射量均较弱,气候相对寒冷、干旱,湖平面相对下降,由于研究区距离物源较近,沉积物以季节性河流带来的较粗粒沉积物为主,并在长偏心率极小值处发育偏粗粒沉积物。早侏罗世—中侏罗世早期一般被认为以典型

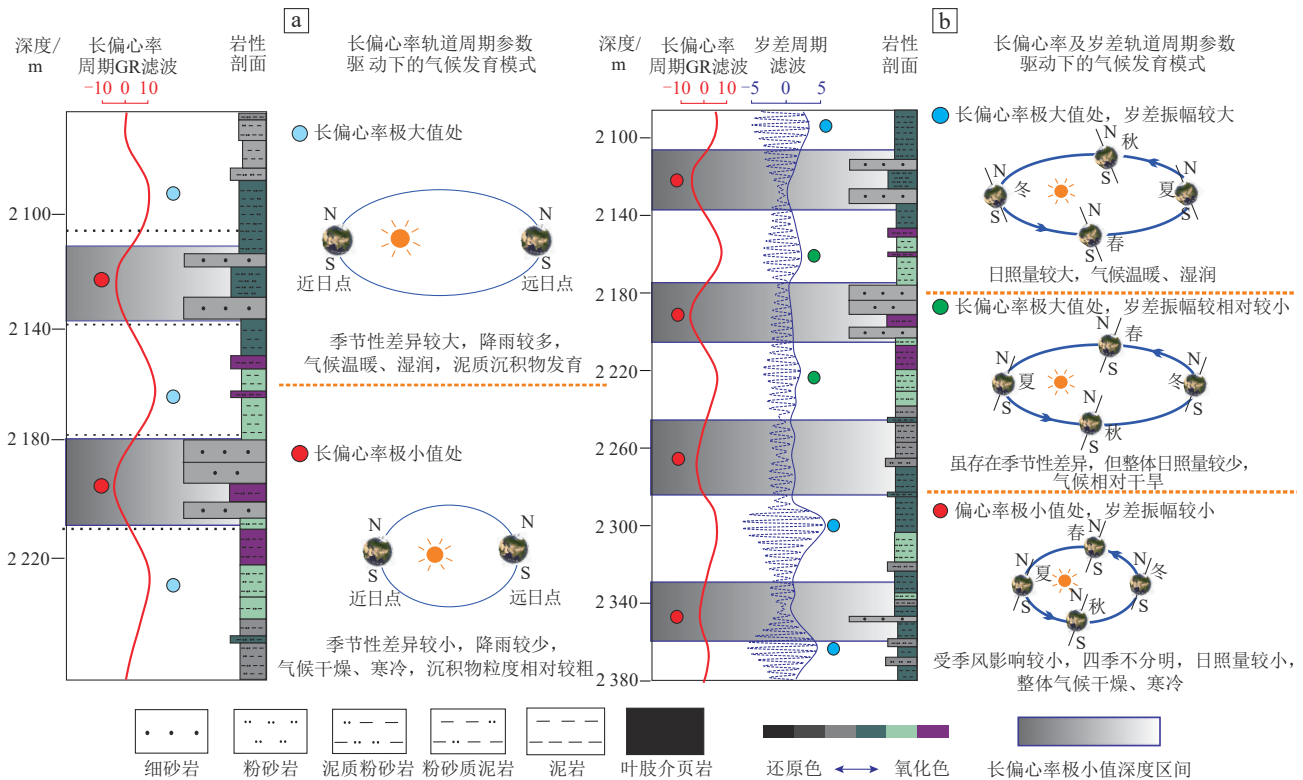


图10 轨道周期参数驱动下的气候及沉积发育模式

Fig. 10 Schematic diagram showing the climate and sedimentary models driven by orbital periodicity parameters

a. 长偏心率周期调控; b. 长偏心率及岁差周期共振调控

(轨道周期变化仅针对北半球。)

的温室气候著称,其大气 CO_2 浓度约为当今的 3 ~ 6 倍^[55],并且中侏罗世早期的 CIA 数值整体处在温暖、湿润范围内,因此,虽然在偏心率低值、岁差振幅低幅处,湖平面存在相对下降的趋势,但是沙一段 E1—E3 时期,湖平面整体处于上升阶段(图 11, E1—E3);在 E4—E5 阶段长偏心率极大值处,岁差振幅幅度相较于 E1—E3 阶段明显减弱,虽季节性差异大、季风作用明显,但太阳在远日点直射南半球,北半球整体接受日照量较少,进而夏季风减弱降雨偏少,气候整体温暖、潮湿程度降低,湖平面缓慢升高,整体为缓慢湖扩的过程,可容空间相对较大,长偏心率极大值期发育粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等偏细粒沉积物;在 E4—E5 阶段长偏心率较小、岁差周期振幅较低幅时,气候相对寒冷、干旱,由于 E4—E5 阶段偏心率极大值时期川中地区中侏罗世早期湖平面并未有大幅升高,此时湖平面降至更低位,高沉积速率的河道沉积开始出现,沙一段中晚期出现的分流河道沉积很好地阐明了此时盆地的加速充填过程^[54],故在偏心率极小值时期较粗粒砂体厚度增大。DYNOT 沉积噪声模型也揭示了 E4—E5 阶段的湖平面整体下降过程;在 E6 阶段长偏心率极大值处,岁差振幅变大,远日点处太阳再次直射北半球,导致气

候整体变得温暖湿润,湖平面再次上升,沉积地层以细粒泥岩为主。

研究区井—震标定剖面中的地震响应特征,印证了天文旋回驱动下的沉积物时空分布与旋回波动之间良好的耦合关系。在 E1—E3 和 E6 阶段,地震剖面呈现出弱振幅、中等频率和中等连续性的地震响应特征,代表湖平面逐渐上升,砂质沉积物供给较少(图 12),而在 E4—E5 阶段,地震剖面可见强振幅、中—高频率和连续性较好的亮点状地震反射特征,代表湖平面降低的背景下,偏砂质的沉积物供给增多(图 12)。

天文轨道参数通过调控气候的变化影响着沉积物的发育,利用天文轨道参数间的配置关系预测有利储层砂体的发育,对川中地区“泥包砂”沉积背景,以及类似浅水湖泊盆地的油气勘探具有重要的指导意义。

5 结论

1) 建立了四川盆地川中地区沙溪庙组一段的天文年代标尺,得出沙溪庙组一段沉积时期为 174.10 ~ 171.67 Ma。

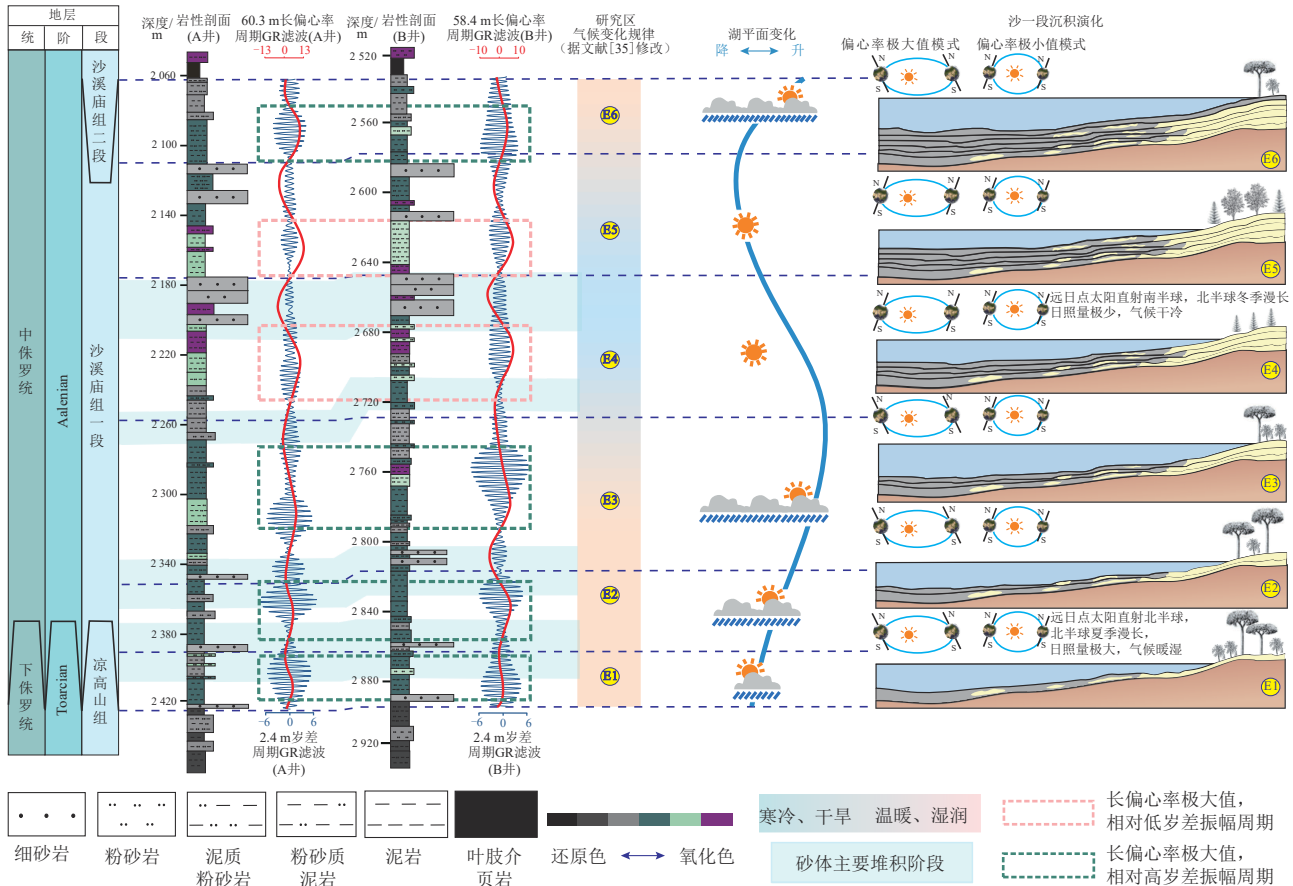


图 11 川中地区中侏罗统沙一段沉积演化规律

Fig. 11 Schematic diagram showing sedimentary evolution pattern of the Middle Jurassic Sha 1 Member in the central Sichuan Basin (E1—E6为长偏心率周期个数。)

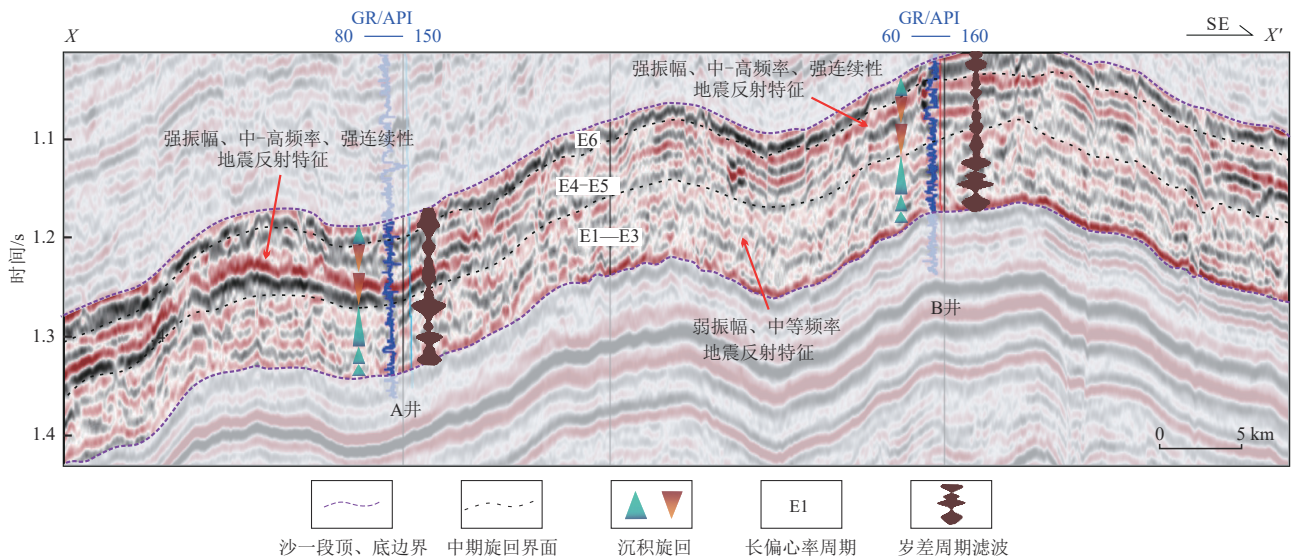


图 12 川中地区中侏罗统沙一段井-震标定剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 12 Well-tied seismic section of the Sha 1 Member in the central Sichuan Basin (see Fig. 1b for the section location)

2) 川中地区沙溪庙组一段沉积时期的湖平面波动,显著受控于天文轨道周期驱动的气候变化。当偏心率接近极大值且岁差振幅较大时,日照量较大,且季

节性反差较强,降雨增多,因此气候湿润,湖平面相对上升,该时期多以泥质沉积发育为主;当偏心率接近极小值且岁差振幅较小时,季风和日照量对北半球影响

均较小,地球季节性反差较弱,气候干冷,湖平面相对下降,该时期以偏砂质沉积发育为主。

3) 高长偏心率值和相对低岁差振幅周期的出现,将使川中地区处于持续的偏干旱环境,使后续长偏心率极小值时期,沉积间歇性的河道砂体,从而造成砂质沉积物厚度上的差异,该规律可为川中地区以及类似“泥包砂”沉积背景盆地的油气勘探开发提供新的靶区目标。

参 考 文 献

- [1] SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46 (6): 1073–1087.
- [2] 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 等. 四川盆地川中—川西地区沙溪庙组层序地层特征[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(9): 1216–1224.
XIAO Fusen, WEI Tengqiang, WANG Xiaojuan, et al. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuansong-Chuanxi area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(9): 1216–1224.
- [3] 朱红涛, 徐长贵, 杜晓峰, 等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44 (3): 539–552.
ZHU Hongtao, XU Changgui, DU Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 539–552.
- [4] HU Yong, XIAO Juan, HE Wenxiang, et al. Application of high frequency lake level change in the prediction of tight sandstone thin reservoir by sedimentary simulation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 128: 105049.
- [5] HUANG Chunju. Chapter two-astronomical time scale for the Mesozoic[J]. *Stratigraphy & Timescales*, 2018, 3: 81–150.
- [6] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. *天然气工业*, 2022, 42 (1): 12–24.
YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 12–24.
- [7] YANG Tian, LI Xiaofeng, YANG Yu, et al. Evolution from shallow-water deltas to fluvial fans in lacustrine basins: A case study from the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin, China[J]. *Sedimentology*, 2024, 71(3): 1023–1055.
- [8] WANG Jun, YE Yong, PEI Rui, et al. Age of Jurassic basal sauropods in Sichuan, China: A reappraisal of basal sauropod evolution[J]. *GSA Bulletin*, 2018, 130(9/10): 1493–1500.
- [9] ZHOU Yuxuan, DAI Hui, YU Haidong, et al. Zircon geochronology of the new dinosaur fauna in the Middle Jurassic lower Shaximiao Formation in Chongqing, SW China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 592: 110894.
- [10] SCOTese C R, SCHETTINO A. Chapter 3-Late Permian-Early Jurassic paleogeography of western Tethys and the world [M]// SOTO J I, FLINCH J F, TARI G. *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 57–95.
- [11] 杨雨, 谢继容, 曹正林, 等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2023, 44(6): 917–932.
YANG Yu, XIE Jirong, CAO Zhenglin, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44 (6): 917–932.
- [12] XU Changhai, ZHOU Zuyi, CHANG Yuan, et al. Genesis of Daba arcuate structural belt related to adjacent basement upheavals: Constraints from Fission-track and (U-Th)/He thermochronology [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53 (11): 1634–1646.
- [13] QIU Ruoyuan, FANG Linhao, LU Yuanzheng, et al. Cyclostratigraphy of the Lower Jurassic (Toarcian) terrestrial successions in the Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 250: 105617.
- [14] 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.
LIU Yang, WU Huaichun, ZHANG Shihong. Cyclostratigraphy research on the Hanjiang-Wanshan Formations in Zhuoyi Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3): 411–423.
- [15] LI Mingsong, HINNOV L, KUMP L. Aycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education [J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 127: 12–22.
- [16] WU Huaichun, ZHANG Shihong, JIANG Ganqing, et al. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(3/4): 308–323.
- [17] WU Huaichun, ZHANG Shihong, HINNOV L A, et al. Time-calibrated Milankovitch cycles for the late Permian [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2452.
- [18] WANG Meng, CHEN Honghan, HUANG Chunju, 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] HUANG Chunju, OGG J G, KEMP D B, et al. Cyclostratigraphy and astrochronology: Case studies from China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 560: 110017.
- [20] VAN VUGT N, LANGEREIS C G, HILGEN F J. Orbital forcing in Pliocene-Pleistocene Mediterranean lacustrine deposits: Dominant expression of eccentricity versus precession[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 172(3/4): 193–205.
- [21] LI Mingsong, HINNOV L A, HUANG Chunju, et al. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1004.
- [22] MEYERS S R. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 190–223.
- [23] KODAMA K P, ANASTASIO D J, NEWTON M L, et al. High-resolution rock magnetic cyclostratigraphy in an Eocene flysch, Spanish Pyrenees[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(6): Q0AA07.
- [24] DJIN NIO S, BROUWER J H, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. *First Break*, 2005, 23(4): 71–75.
- [25] 夏辉, 王龙, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1397–1412.
- XIA Hui, WANG Long, ZHANG Daofeng, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1397–1412.
- [26] 刘洛夫, 徐敬领, 高鹏, 等. 综合预测误差滤波分析方法在地层划分及等时对比中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 564–572.
- LIU Luofu, XU Jingling, GAO Peng, et al. Application of comprehensive prediction error filter analysis to stratigraphic division and isochronous correlation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 564–572.
- [27] 梁岳立, 赵晓明, 张喜, 等. 轨道周期约束下海-陆过渡相页岩层系高精度层序界面识别及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1231–1242.
- LIANG Yueli, ZHAO Xiaoming, ZHANG Xi, et al. Orbital forced high-resolution sequence boundary identification of marine-continental transitional shale and its geological significance: A case in Shan 2³ sub-member at the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1231–1242.
- [28] 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 Cuiyu, LYU Dawei. Advances in time series analysis methods for Milankovitch Cycles[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 380–395.
- [29] PRICE G D. The evidence and implications of polar ice during the Mesozoic[J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48(3): 183–210.
- [30] MARTINEZ M, DERA G. Orbital pacing of carbon fluxes by a ~9-My eccentricity cycle during the Mesozoic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(41): 12604–12609.
- [31] IKEDA M, BÔLE M, BAUMGARTNER P O, et al. Orbital-scale changes in redox condition and biogenic silica/detrital fluxes of the Middle Jurassic Radiolarite in Tethys (Sogno, Lombardy, N-Italy): Possible link with glaciation? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 457: 247–257.
- [32] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [33] FEDO C M, YOUNG G M, NESBITT H W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition[J]. *Precambrian Research*, 1997, 86(3/4): 201–223.
- [34] DAI Xianduo, DU Yuansheng, ZIEGLER M, et al. Middle Triassic to Late Jurassic climate change on the northern margin of the South China plate: Insights from chemical weathering indices and clay mineralogy[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585: 110744.
- [35] 陈晓慧, 曾建理, 张廷山, 等. 川东北地区中侏罗世新田沟期古气候波动的地球化学响应[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3223–3238.
- CHEN Xiaohui, ZENG Jianli, ZHANG Tingshan, et al. Geochemical response to paleoclimate fluctuation during Xintiangou Period (Middle Jurassic), Northeastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(12): 3223–3238.
- [36] CARROLL A R, BOHACS K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(6): 1033–1053.
- [37] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1292–1308.
- PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1292–1308.
- [38] BOULILA S, HAQ B U, HARA N, et al. Potential encoding of coupling between Milankovitch forcing and Earth's interior processes in the Phanerozoic eustatic sea-level record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103727.
- [39] HAQ B U. Jurassic sea-level variations: A reappraisal[J]. *GSA Today*, 2018, 28(1): 4–10.
- [40] MILLER K G, KOMINZ M A, BROWNING J V, et al. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. *Science*, 2005, 310(5752): 1293–1298.
- [41] HAYS J D, IMBRIE J, SHACKLETON N J, et al. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages: For 500,000 years, major climatic changes have followed variations in obliquity and precession[J]. *Science*, 1976, 194(4270): 1121–1132.

- [42] WANG Pinxian, WANG Bin, CHENG Hai, et al. The global monsoon across time scales: Mechanisms and outstanding issues [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 174: 84–121.
- [43] OLSEN P E, KENT D V. Milankovitch climate forcing in the tropics of Pangaea during the Late Triassic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 122(1/4): 1–26.
- [44] ZHANG Xi, ZHAO Xiaoming, GE Jiawang, et al. Karst topography paces the deposition of Lower Permian, organic-rich, marine-continental transitional shales in the southeastern Ordos Basin, northwestern China [J]. *AAPG Bulletin*, 2024, 108(5): 849–875.
- [45] SUN Jimin, HUANG Xiaogang. Half-precessional cycles recorded in Chinese loess: Response to low-latitude insolation forcing during the Last Interglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(9/10): 1065–1072.
- [46] VOLLMER T, WERNER R, WEBER M, et al. Orbital control on Upper Triassic playa cycles of the Steinmergel–Keuper (Norian): A new concept for ancient playa cycles [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 267(1/2): 1–16.
- [47] WU Wei, ZHANG Lin, QIU Yibo, et al. Milankovitch cycle of continental deep-water fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of Es3 of Well FY1 in Dongying Sag and its significance for shale oil exploration [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2023, 41(6): 2140–2160.
- [48] HINNOV L A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences [J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(11/12): 1703–1734.
- [49] RUDDIMAN W F. Orbital changes and climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23/24): 3092–3112.
- [50] 刘晓东, 石正国. 岁差对亚洲夏季风气候变化影响研究进展 [J]. *科学通报*, 2009, 54(20): 3097–3107.
- LIU Xiaodong, SHI Zhengguo. Effect of precession on the Asian summer monsoon evolution: A systematic review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3097–3107.
- [51] 孙善勇, 刘惠民, 操应长, 等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义——以东营凹陷牛页1井沙四上亚段为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 846–858.
- SUN Shanyong, LIU Huimin, CAO Yingchang, et al. Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: A case study of the Upper Es4 member of Well NY1 in Dongying Sag [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 846–858.
- [52] 李猛, 李昕, HESSELBO S P, 等. 冰室-(超)温室气候动荡期湖平面演化及天文轨道气候作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(1): 264–280.
- LI Meng, LI Xin, HESSELBO S P, et al. Orbital pacing and secular evolution of lake-level changes reconstructed by sedimentary noise modeling during the Early Jurassic icehouses-(super)greenhouses [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(1): 264–280.
- [53] FALAHATKHAH O, SERAJAMANI M, KADKHODAIE A, et al. Orbital obliquity evolution during the Late Paleozoic Ice Age across the northeastern Gondwana: Implications for regional sea-level change trigger and reservoir quality assessment [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 153: 106312.
- [54] 付蕾, 张本健, 曹正林, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 85–93.
- FU Lei, ZHANG Benjian, CAO Zhenglin, et al. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(1): 85–93.
- [55] NORDT L, BREECKER D, WHITE J. Jurassic greenhouse ice-sheet fluctuations sensitive to atmospheric CO₂ dynamics [J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(1): 54–59.

(编辑 许诺)