第 27 卷 第 5 期
2025 年 10 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27 No. 5
Oct. 2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1314-19 **DOI**:10.7605/gdlxb.2025.038

天文旋回约束下的湖相泥页岩岩相发育规律：以四川盆地凉高山组为例*

赵 琳[1] 鲜本忠[1] 刘乙辰[1] 陈绵琨[2] 彭 伟[2]
舒 逸[2] 余志云[1] 石浩程[1]

1 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
2 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院，湖北武汉 430223

摘 要 四川盆地侏罗系凉高山组页岩油的勘探开发潜力巨大，对泥岩沉积演化模式的认识越来越迫切，而天文旋回是驱动泥岩沉积演化的重要机制。本研究选取自然伽马测井曲线为古气候替代指标，对四川盆地复兴地区凉高山组凉二下亚段展开旋回地层学分析，建立高频层序地层格架，探索在层序格架内部泥页岩岩相的时空分布规律。得出以下结果：(1) 在研究区凉二下亚段中识别出 405 ka、128 ka、43 ka 和 21 ka 等多级天文周期，长、短偏心率旋回分别对应四级、五级层序，由此进行高精度地层划分与对比。(2) 结合元素地球化学的古环境参数和 TOC 趋势分析，证明了古气候、陆源输入条件和 TOC 与天文周期之间关系密切，明确了长、短偏心率对岩相及其组合发育的控制作用。长偏心率是控制气候演化、有机质富集以及岩相空间展布的关键因素，短偏心率进行局部调控。(3) 根据岩相及岩相组合的天文响应，总结了偏心率主控的气候和沉积旋回模式。偏心率极大值附近，日晒、降水和河流径流增强导致湖泊扩张，盆地中心多发育富有机质深水纹层状泥岩；偏心率极小值附近，气候干旱，季风、降水变弱，风化程度较高，河流下切侵蚀严重，盆地上斜坡发育大规模三角洲砂体，下斜坡区和深水区主要发育异重流砂岩。对于认识富有机质泥岩成因、预测优质泥岩储集层具有重要意义。

关键词 陆相页岩油 岩相 岩相组合 天文旋回 凉高山组 侏罗系 四川盆地

第一作者简介 赵琳，女，1999 年生，博士研究生，现从事深水沉积地质研究。E-mail：zhaolin2572021@163.com。

通讯作者简介 鲜本忠，男，1973 年生，博士，教授、博士生导师，长期从事沉积学与储层地质学教学与研究工作。E-mail：xianbzh@cup.edu.cn。

中图分类号：P512.2 **文献标志码**：A

Lithofacies development patterns of lacustrine shales under astronomical forcing: a case study of the Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin

ZHAO Lin[1] XIAN Benzhong[1] LIU Yichen[1] CHEN Miankun[2] PENG Wei[2]
SHU Yi[2] YU Zhiyun[1] SHI Haocheng[1]

*国家自然科学基金项目（编号：42172109，42172108）、中国石油化工股份有限公司“10 条龙”科研项目“复兴侏罗系陆相页岩油气藏地质评价技术”（编号：P21078-2）、中国石油大学（北京）科研启动基金项目（编号：2462020BJRC002，2462020YXZZ020）联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China（Nos. 42172109，42172108），the “Ten Dragons” Scientific Research Project of China Petroleum and Chemical Corporation（No. P21078-2）and the China University of Petroleum（Beijing）Research Initiation Fund Project（Nos. 2462020BJRC002，2462020YXZZ020）]

收稿日期：2024-05-06 改回日期：2024-12-02

1 *College of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*
2 *Research Institute*, *SINOPEC Jianghan Oilfield Company*, *Wuhan* 430223, *China*

Abstract The exploration and development potential of shale oil in the Jurassic Lianggaoshan Formation of the Sichuan Basin is enormous. Understanding the depositional and evolutionary patterns of mudstone has become increasingly urgent, and astronomical forcing is an important mechanism driving mudstone deposition and evolution. In this study, the natural Gamma Ray logging curve was selected as a proxy for paleoclimate, and a cyclostratigraphic analysis of the Lower Liang 2 Submember in the Fuxing area of the Sichuan Basin was conducted to establish a high-frequency sequence stratigraphic framework and explore the spatial and temporal distribution patterns of mudstone lithofacies within the sequence pattern. The following results were obtained: (1) Multiple astronomical cycles of 405 ka, 128 ka, 43 ka, and 21 ka were identified in the Lower Liang 2 Submember, corresponding to the fourth and fifth-order sequences. High and low-eccentricity cycles were used to achieve high-precision stratigraphic subdivision and correlation. (2) Combining the palaeoenvironmental parameters of elemental geochemistry with the trend analysis of Total Organic Carbon (TOC), we have demonstrated the close relationship between palaeoclimate, terrestrial input conditions, TOC, and astronomical cycles. This study has elucidated the significant control exerted by long-and short-eccentricity cycles on lithofacies development and their combinations. Eccentricity emerges as a crucial factor governing climate evolution and lithofacies spatial distribution. The Long Eccentricity is a key factor in controlling climate evolution, organic matter enrichment, and the spatial distribution of lithofacies, while the Short Eccentricity plays a role in local regulation. (3) Based on the astronomical response of lithofacies and lithofacies combinations, we have summarized the climate and sedimentary cyclicity patterns primarily controlled by Eccentricity. During periods of high Eccentricity, intensified insolation, precipitation, and river runoff lead to lake expansion, with deepwater laminated mudstone rich in organic matter forming in the basin center. Conversely, during periods of Low Eccentricity, the climate becomes arid, monsoons weaken, and weathering intensifies, resulting in severe river incision and the development of large-scale deltaic sand bodies on basin slopes. Turbidite sandstones mainly form in the downslope and deepwater areas. This research is of great significance for understanding the origin of organic-rich mudstones and predicting high-quality mudstone reservoirs.

Key words continental shale oil, lithofacies, lithofacies association, astronomical cycles, Lianggaoshan Formation, Jurassic, Sichuan Basin

About the first author ZHAO Lin, born in 1999, is a Ph.D. candidate specializing in deepwater sedimentary geology. E-mail: zhaolin2572021@163.com.

About the corresponding author XIAN Benzhong, born in 1973, holds a Ph.D. and serves as a professor and doctoral supervisor. His primary areas of expertise include sedimentology and reservoir geology, with a focus on both teaching and research. E-mail: xianbzh@cup.edu.cn.

1　概述

随着全球能源需求的不断增长，传统常规油气资源面临枯竭或开发难度大等问题，页岩油气勘探开发逐渐成为当前国内能源开发的重要领域之一。泥岩作为天文旋回研究的理想载体，相关学者在高频层序划分及天文年代学（Huang *et al.*, 2020；高祥宇等，2022；石巨业等，2023）、有机质富集（Ma *et al.*, 2016；周靖皓等，2022；张天舒等，2023；冯路尧等，2023）、古气候（Tuenter *et al.*, 2003；Valero *et al.*, 2014；Boulila *et al.*, 2021；Qiu

et al., 2023)、特殊事件的沉积响应(Abels *et al.*, 2009; Rampino *et al.*, 2021; Jin *et al.*, 2022)等方面展开了大量研究,取得了一系列突破。天文旋回通过驱动古气候可在米级尺度上影响泥岩岩相类型和各阶段发育模式(李国萃等,2023;马义权等,2023;栾旭伟等,2024)。

目前的研究多集中在天文旋回对正常湖相细粒沉积的影响上,而有关天文旋回对湖相细粒事件沉积的影响研究较少。Jin 等(2022)通过对英国北海盆地碳同位素负飘移以及泥质为主的浊积岩序列分析,揭示了岁差尺度的气候变化对沉积物供应以及浊积岩沉积的驱动。多位学者针对东营凹陷中始新统细粒沉积岩建立了岁差和短偏心率旋回共同控制作用的沉积模式(石巨业,2018;栾旭伟等,2024),Zhong 等(2023)提出长偏心率低值期有利于发育滑塌重力流。Xu 等(2023)研究了东营凹陷沙四段湖相细粒事件沉积与天文旋回的关系,认为长偏心率主控湖相细粒事件沉积,长偏心率高值期频繁的季风为风暴岩的发育创造了有利条件,长偏心率低值期地表侵蚀严重,多发于滑塌、浊流及异重流沉积。其中气候对异重流沉积的影响已备受关注,而气候变化与天文周期密切相关,异重流沉积对天文周期与气候的响应将成为地学研究的新趋向(杨仁超和田源,2020)。尽管异重流的天文响应相关研究已有先例,但是天文旋回驱动异重流的机理尚不清晰。

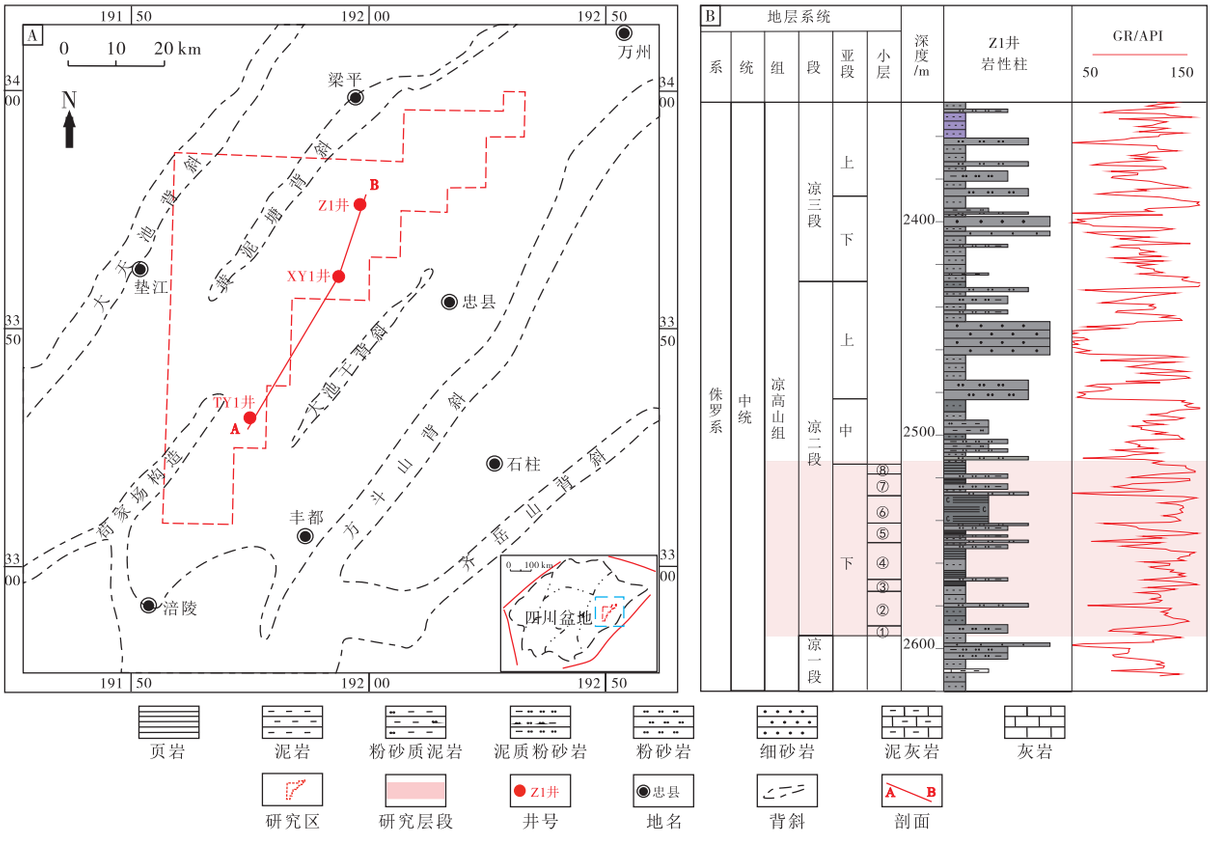
四川盆地复兴地区凉高山组泥页岩和致密砂岩具有分布面积广、埋深浅和资源潜力大等特点,前人大多主要聚焦于砂岩储集层砂体的展布(张天舒等,2019;易娟子等,2022;洪海涛等,2023)、砂岩储集层的评价(王威等,2022;胡东风等,2023;彭伟等,2023)和页岩油气的评价(胡东风等,2021;王威等,2022;刘苗苗等,2023)。凉高山组经历了 3 次较大规模的水进—水退旋回,分为 1 个三级层序和 4 个四级层序(成大伟等,2023),而当前针对凉二下亚段富有机质页岩层段的高分辨率地层学研究相对较少,缺乏对深水区泥岩高频岩相变化及其沉积演化模式的清晰认识,制约了四川盆地页岩油勘探进一步突破。本研究以四川盆地复兴地区凉高山组凉二下亚段为例,基于岩心精细观察、岩石薄片鉴定和元素地球化学等多种测试分析资料,识别出多级别天文旋回信号,展开精细地层划分与对比,划分了岩相及岩相组合类型,探讨了不同岩相类型的成因及展布样式,揭示了天文旋回对异重流沉积的控制作用,建立了天文驱动的泥岩岩相沉积模式,对四川盆地侏罗系陆相页岩油气勘探开发具有重要意义。

2 地质背景和研究方法

复兴地区位于四川盆地东部,构造上隶属于川东部高陡断褶带,东西被大天池背斜和大池干背斜夹持(图 1-A),发育一系列北东—南西向展布的大型复背斜和复向斜。中晚三叠世,由于勉略洋的关闭和秦岭造山带的隆升,四川盆地逐渐结束海相沉积,晚三叠世开始接受陆相碎屑沉积。侏罗系四川盆地受到多次大规模湖侵影响,发育自流井组东岳庙段、大安寨段及凉高山组凉二下亚段 3 套富有机质泥岩。凉二下亚段整体处于深水区,主要为湖泊—湖底扇—三角洲沉积,发育灰黑色泥页岩夹薄层砂岩,是一套良好的烃源岩,厚度为 60~80 m(图 1-B)。

对复兴地区 Z1 井凉二下亚段 80 m 连续岩心样品进行了测井数据分析、岩心及薄片观察、X 衍射全岩矿物分析(XRD)、主微量元素分析和总有机碳(TOC)含量分析,并通过测井曲线计算 TOC 含量来克服采样的不均匀。其中,元素采用 AxiosmAX X 射线荧光仪依据国家标准 GB/T 14506.28—2010 完成测试,总有机碳含量使用 CS844 碳硫分析仪器(编号 3250)进行测试。自然伽马测井曲线(GR)对沉积物中黏土矿物含量和有机质的变化比较敏感,反映了古气候和古环境的变化(陈中红等,2004)。Z1 井、XY1 井和 TY1 位于深水区,发育一套灰黑色泥页岩夹薄层砂岩,为半深湖—深湖沉积,整体无沉积间断。本研究选取 Z1 井、XY1 井和 TY1 井的自然伽马曲线(GR)为古气候替代指标,GR 数据数值范围为 50~120 API,采样间隔为 0.125 m,满足天文旋回研究的要求。

使用 Acycle V 2.8 软件进行旋回地层时间序列分析(Li *et al.*, 2019),将数据序列由深度域转化为时间域,首先通过去异常值、去趋势和预白化对原始数据序列进行预处理,消除轨道周期的长趋势,增强高频旋回。其次 2π 多锥度法(MTM)功率谱分析(Thomson, 1982)用于评估原始数据中



A—四川盆地复兴地区构造与地理位置；B—四川盆地侏罗系凉高山组地层柱状图

图 1　四川盆地复兴地区位置及侏罗系凉高山组地层柱状图

Fig. 1　Location and stratigraphic column of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Fuxing area of Sichuan Basin

是否存在循环，再通过滑动窗口快速傅里叶变换的进化谱分析（Kodama and Hinnov，2014）用于跟踪可变波长或局部周期，利用相关系数法确定最佳沉积速率，并对数据中的天文周期频率进行零假设显著性检验（Li *et al.*，2018）。然后采用旋回厚度比法，确定数据沉积旋回与轨道参数之间的对比关系，最后利用滤波工具提取各级天文信号。

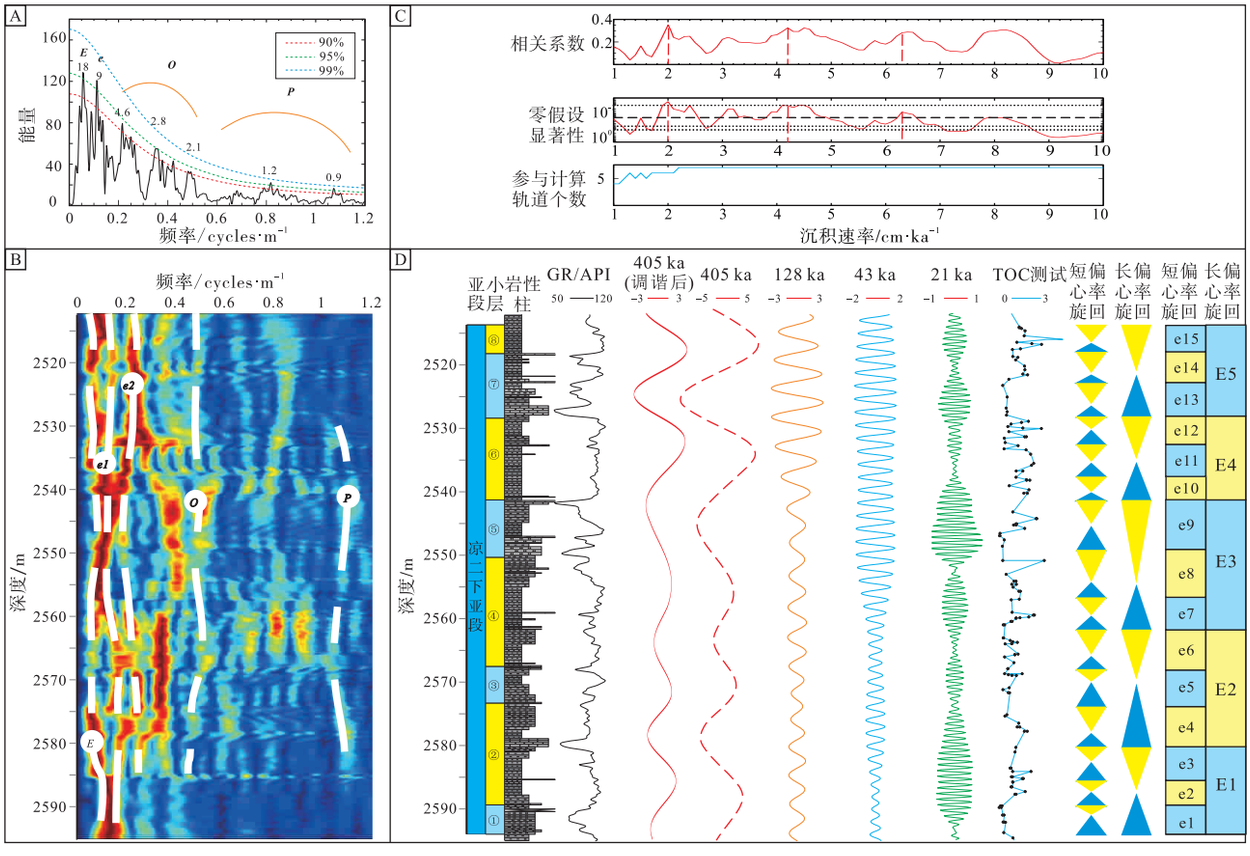
3　研究结果

3.1　旋回地层划分

3.1.1　天文旋回识别

凉二下亚段由于缺少连续且可靠的定年资料，目前该研究区仍未有准确的定年资料。凉二下亚段为中侏罗统底部，本研究拟将其地质年龄界定于 174～170 Ma（Luo *et al.*，2014；刘宇，2021），展开旋回地层学研究。通过 Acycle 软件获取了 La2004 天文轨道方案（Laskar *et al.*，2004）中 174～170 Ma 期间的 ETP（偏心率、斜率和岁差）数据，并使用 2π 多锥度法功率谱分析（MTM）方法对 ETP 数据进行频谱分析，提取出长偏心率 E，短偏心率 e1、e2，斜率 O1、O2，岁差 P1、P2 和 P3，岁差 P2，可知理论天文轨道参数的周期近似满足 23.8∶7.5∶5.6∶2.5∶2∶1.2∶1.1∶1。

本次研究采用“LOWESS”局部回归平滑方法对 Z1 井 GR 数据原始序列去除 35%的长期趋势，并进行预白化处理。在鲁棒红噪模型 Robust AR（1）下，利用 MTM 方法进行频谱分析可知，存在多个能量较高的频率峰值超过 90%置信水平，这些主峰波长分别为 18 m、9 m、4.6 m、2.8 m、2.1 m、1.2 m 和 0.9 m（图 2-A）。作为旋回地层解释的有力证据，通过天文检验（COCO）进行零假设显著性检验，结果显示，零假设显著性主要存在 2 cm/ka、4.2 cm/ka 和 6.3 cm/ka 等 3 个峰值，说明地层可能存在 3 个主要沉积速率，结合参与计算的轨道个数与相关系数分析，综合可知



A—GR 数据的频谱分析结果；B—GR 数据的滑动频谱分析结果；C—GR 数据的相关系数分析结果（COCO）；D—GR 数据的各级周期滤波提取以及层序划分结果

图 2 四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段旋回地层分析

Fig. 2 Cyclical stratigraphic analysis of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

4.2 cm/ka 的零假设显著性最低，为最佳平均沉积速率（图 2-B）。18.0 m、4.6 m、2.3 m、1.0 m 与轨道参数比值吻合，认为该套沉积地层良好地记录了天文信号。

EHA 滑动能谱图显示，405 ka 长偏心率在深度域中连续性较好，较为稳定（图 2-C），405 ka 是最稳定的天文周期，通常作为一个“节拍器”来建立显生宙地层的时间尺度（Laskar *et al.*，2004，2011）。基于对平均沉降速率和天文周期的解释，采用 La2010d 方案对 GR 数据进行调谐，进化快速傅里叶变换结果表明，各级天文周期信号在时域内是连续的。通过带通滤波提取出深度域数据序列中的记录了 405 ka 长偏心率 E、128 ka 短偏心率 e1、98 ka 短偏心率 e2、43 ka 斜率 O1 和 21 ka 岁差 P 天文信号曲线，在凉二下亚段 Z1 井主要识别出 5 个 405 ka 长偏心率旋回，15 个 128 ka 短偏心率旋回，推测凉二下亚段沉积持续时间约 2 Ma（图 2-D）。依据上述方法，对 XY1 井和 TY1 井进行单井旋回地层学分析，分别提取出了长、短偏心率周期。

3.1.2 旋回地层对比

层序地层学通过分析地层的成因、沉积环境和地层的几何形态，来识别和划分地层序列，这些地层单元通常与沉积基准面的周期性变化有关。旋回地层是指地球轨道参数周期性变化影响气候，在沉积地层中表现为岩性、结构以及沉积构造等方面的变化，这种旋回性地层记录是不同级别旋回的有序叠加，在全球范围内具有可对比性。因此，保存在地层中的旋回性沉积记录是天文周期控制或驱动沉积节律的最好历史见证。前人以界面的成因和差异性为依据，划分出基准面巨旋回、超长期旋回、长期旋回、中期旋回、短期旋回和超短期旋回等 6 个级别旋回，并且厘定出各级别旋回的时间跨度，认为后 3 个级别旋回受到天文因素长偏心率、短偏心

率和岁差的影响（郑荣才等，2001）。在法国 Tethyan 盆地，中国渤海湾盆地、四川盆地、松辽盆地等地，众多学者逐渐将四级、五级层序与长、短偏心率旋回相结合，开展了区域或者全球性的地层等时对比（Boulila *et al.*，2010；石巨业等，2023；冯路尧等，2023）。

在层序地层学和旋回地层学的基础之上，结合测井曲线、岩心岩性和总有机碳含量等数据，遵循“分级对比，逐级控制”的基本原则，以最大洪泛面为标志层，四级层序约束五级层序，以五级层序为地层对比的基本单位，开展浅—深水统一地层划分与对比，建立全区地层格架。Z1 井划分出 5 个四级层序（E1-E5）、15 个五级层序（e1-e15），往北东浅水（B-A）方向地层出现缺失，XY1 井顶底分别缺失 1 个五级层序，TY1 井底部缺失 1 个四级层序（图 3）。因此，认为在湖盆深水区地层也存在缺失。

3.2　岩相及其组合特征

3.2.1　岩相类型及其特征

针对 Z1 井的岩石薄片、X 衍射全岩分析及测录井资料，采用结构优先原则，矿物组分和沉积构造为主要依据，将研究区凉二下亚段划分出泥岩类和砂岩类岩相 2 大类（表 1）。

3.2.2　岩相组合类型及其特征

湖相环境复杂多变，深水泥页岩的岩石矿物组分和沉积构造等记录的环境信息相对完整。根据沉积环境和内部结构相似性，将泥页岩层系划分出有成因意义的、测井可识别的地层单元。在复兴地区凉二下亚段识别出 2 大类、共 3 种岩相组合类型，分别为岩相组合 A、岩相组合 B1 和岩相组合 B2（图 4）。

1）岩相组合 A。由纹层状富粉砂黏土质泥岩相和纹层状富黏土粉砂质泥岩相组成（图 5-A，5-B）。其长英质矿物含量介于 26.6%～51.0%之间，平均含量约 39.0%，黏土矿物含量介于 40.0%～62.9%之间，平均含量约 52.7%，碳酸盐矿物含量极少，普遍少于 5.0%，表明此时沉积主要来源于陆源输入。纹层状构造在复兴地区比较常见，其纹层厚度和组分在横向相对较为稳定。纹层类型较为复杂，包括黏土质纹层、粉砂质纹层。黏土质纹层主要由黏土矿物和有机质组成，有机质含量高低显示出明暗相间的纹层（图 5-C，5-D）。粉砂质纹层主要由石英和长石组成，一般呈正粒序或块状（图 5-E，5-F），局部可见生物扰动，底部常见侵蚀

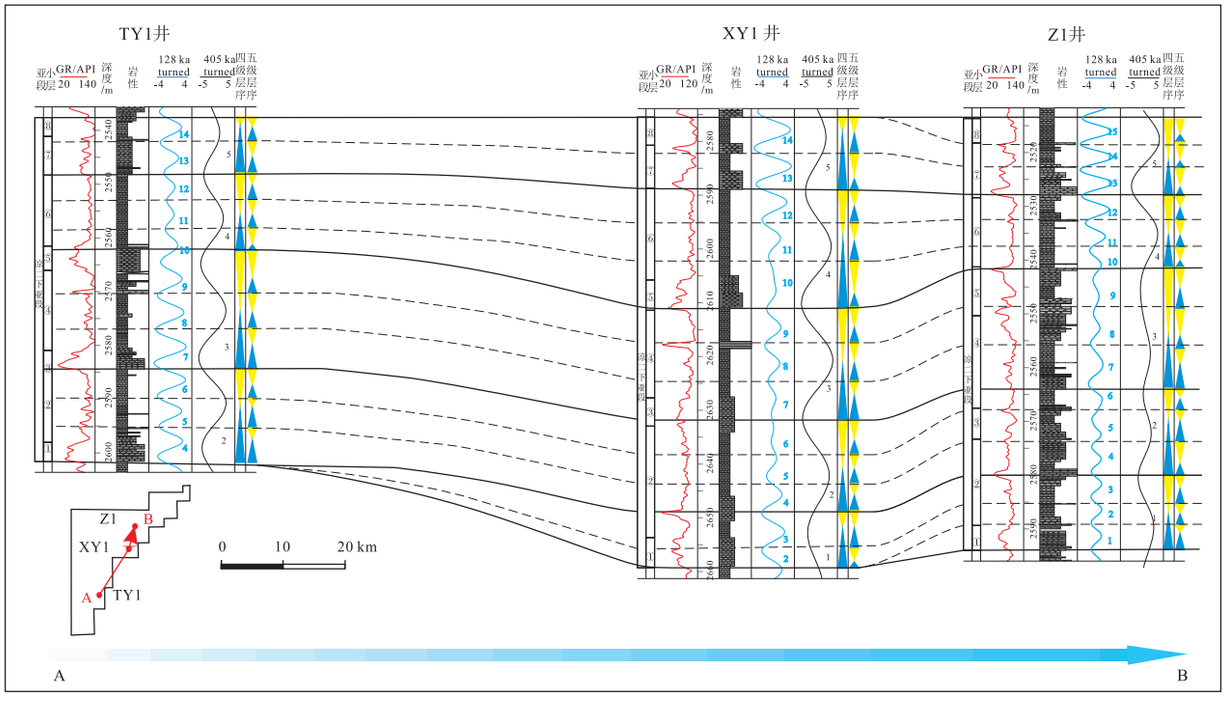


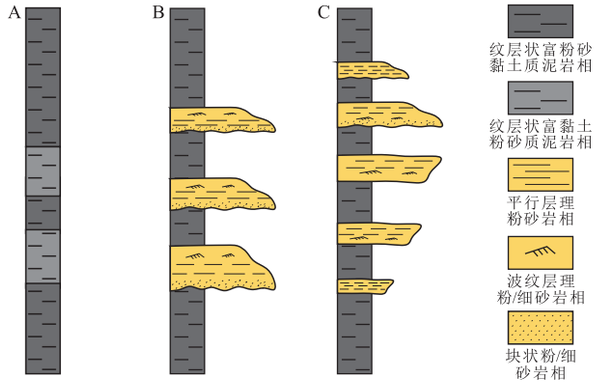
图 3　四川盆地复兴地区凉二下亚段顺物源短偏心率尺度地层对比（剖面位置见图 1-A）

Fig. 3　Stratigraphic correlation of source profile in short eccentricity scale of the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin（profile location in Fig. 1-A）

表 1 四川盆地复兴地区凉二下亚段岩相类型及其沉积特征

Table 1 Lithofacies division scheme of the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin

岩相大类	岩相亚类	长英质矿物/%	碳酸盐矿物/%	黏土矿物/%	沉积特征
泥岩类	纹层状富粉砂黏土质泥岩相	25-50	<25	>50	深灰色、灰黑色,纹层发育,可见深色富有机质黏土纹层和长英质纹层相间
	纹层状富黏土粉砂质泥岩相	>50	<25	25-50	深灰色,纹层发育,可见深色黏土质纹层和浅色长英质纹层,粉砂质纹层较薄
砂岩类	平行层理粉砂岩相	>50	/	<50	灰色,平行层理,与薄暗色泥岩层或泥质纹层频繁互层
	波纹层理粉/细砂岩相	>50	/	<50	灰色,发育波纹层理,常见粉细砂岩与泥质纹层互层
	块状层理粉/细砂岩相	>50	/	<50	浅灰色,泥质含量很低,整体均一,无韵律,呈块状构造



A—岩相组合 A;B—岩相组合 B1; C—岩相组合 B2

图 4 四川盆地复兴地区凉二下亚段岩相组合模式

Fig. 4 Lithofacies combination pattern of the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin

面。2 种纹层形成季节性层耦结构，指示出水体安静的泥质沉积。

2)岩相组合 B1。自下而上依次发育块状粉/细砂岩相、平行层理粉/细砂岩相、波纹层理粉砂岩相以及纹层状富粉砂黏土质泥岩相和纹层状富黏土粉砂质泥岩相。整体表现为向上变细的正韵律序列，底部发育正递变块状砂岩相(图 6-A)，中部由平行层理细砂岩相过渡为波纹层理粉砂岩相(图 6-B)，顶部发育纹层状富黏土粉砂质泥岩相(图 6-C)，可见泥质异重流形成的沉积层，底部侵蚀接触和整体沉积呈正粒序，指示以砂质底床载荷、砂质悬浮载荷的搬运方式，代表了洪水能量逐渐变弱的过程。块状砂岩相中，可见生物介壳(图 6-D)，杂基支撑，分选较差，可见明显的双峰式结构(图 6-E，6-F)，反映了底载与悬浮共存的沉积作用。

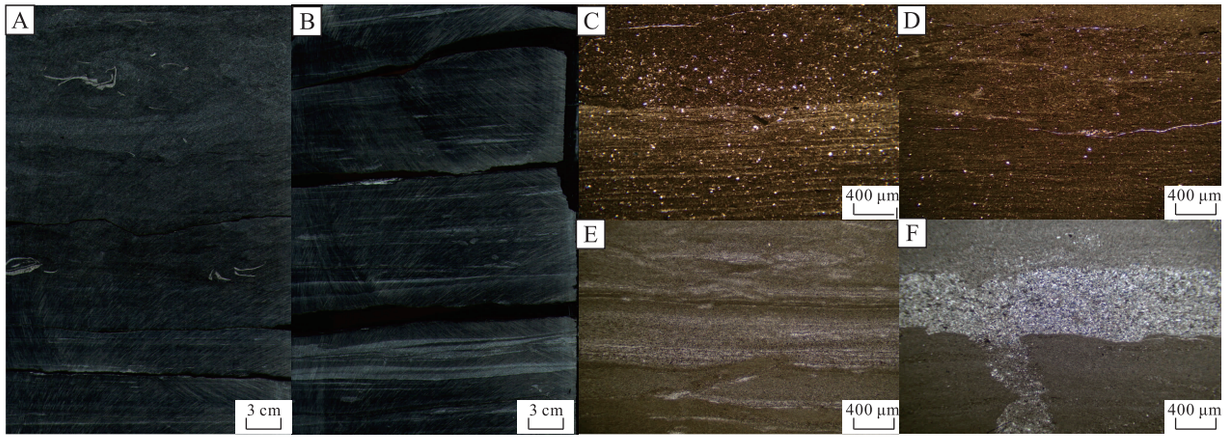
3) 岩相组合 B2。由纹层状富粉砂黏土质泥岩相或纹层状富黏土粉砂质泥岩相、平行层理粉砂岩(图 7-A)、块状粉/细砂岩相(图 7-B) 和波纹层理粉/细砂岩相(图 7-C) 组成，整体表现出反—正复合韵律。岩相组合中下部以波浪作用为主，平行层理与波纹层理的反复出现指示了水流湍急的环境，沉积物成分、结构成熟度高，应为分支河口坝沉积；中上部沉积构造由块状构造、槽状交错层理过渡为平行层理，粒度上呈正粒序，反映了水流速度减小、能量变低的过程，顶部常见泥岩相，推测为支流间湾沉积。该岩相组合反映了三角洲前缘浅水区的沉积特征。

3.3 沉积环境演化

沉积环境是沉积过程的决定性因素，气候、水体性质和物源等控制了半深湖—深湖不同类型泥岩等细粒沉积的发育（陈世悦等，2017)。主微量元素的绝对、相对含量变化一定程度上反映了古环境特征，已经成为重建古环境的有效手段。

3.3.1 古气候特征及演化

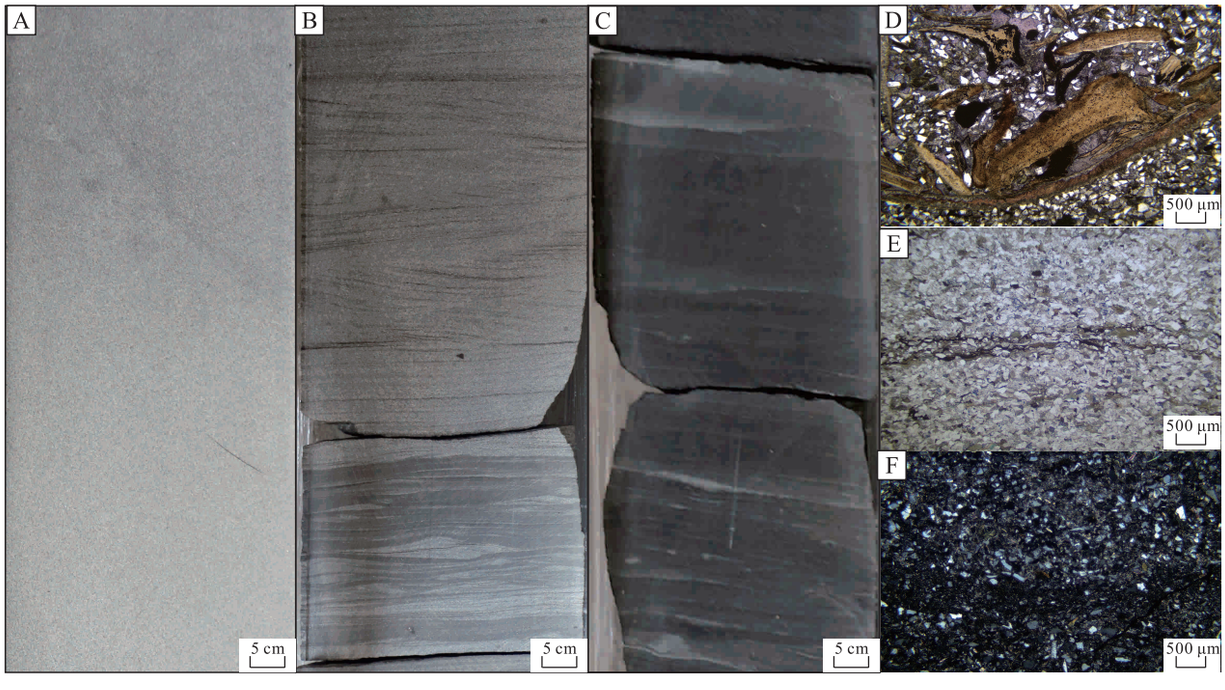
本次选取古气候干湿指数 $C=\sum(Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)/\sum(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)$ 和 Sr/Cu 值进行古气候分析。Fe、Mn、Cr、V、Co、Ni 等元素趋向于湿润气候条件下富集，而 Ca、Mg、Sr、Ba、K、Na 更趋向于干旱气候，干湿指数越大，气候越湿润，其中 C 值<0.2 指示干旱气候、0.2~0.6 指示半湿润—半干旱气候、>0.6 指示温暖湿润气候（余文强等，2024)。当 Sr/Cu 值较低，在 1~5 之间时，则指示此时气候为温湿气候，当 Sr/Cu 值大于 5 时，指示此时古气候为干热气候（刘刚和周东升，2007)。凉二下亚段干湿指数 C 值主要集中于 0.7~1.4 区间，Sr/Cu 值主要介于 2~5 区间，而在 E4 长偏心率旋回末期干湿指数 C 值与 Sr/Cu



A—以纹层状富粉砂黏土质泥岩相为主，偶见漂浮状介壳，2514.8 m；B—以纹层状富黏土粉砂质泥岩相为主，可见粉砂质纹层，2571.3 m；C、D—正交偏光，纹层状富粉砂黏土质泥岩相，可见明亮的粉砂质纹层与暗色黏土质纹层相间，2514.8 m、2545.7 m；E、F—正交偏光，纹层状富黏土粉砂质泥岩相，可见粉砂质纹层，石英和长石呈细晶状，2571.3 m、2525.2 m

图 5　四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段岩相组合 A 岩心和薄片照片

Fig. 5　Core and thin section photos of lithofacies combination A of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

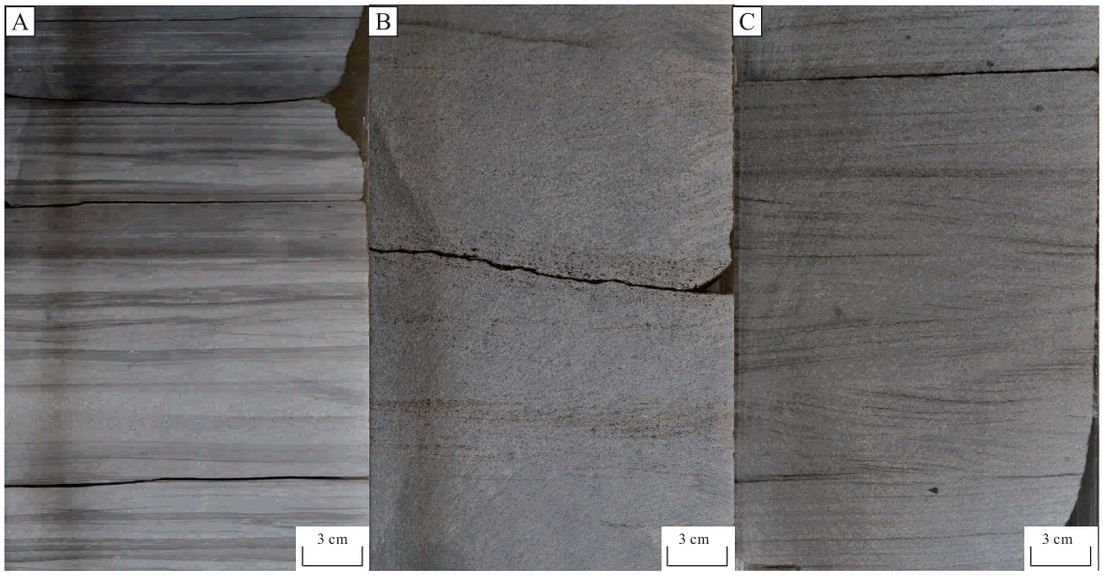


A—正韵律序列的块状粉/细砂岩相，2595.4 m；B—平行层理细砂岩相过渡为波纹层理粉砂岩相，2551.1 m；C—平行层理细砂岩相过渡为波纹层理粉砂岩相，2580.1 m；D—正交偏光，块状粉砂岩相的生物介壳；E—单偏光，块状粉砂岩相，杂基支撑，分选较差，可见明显的双峰式结构，2579.1 m；F—正交偏光，块状粉砂岩相，2582.3 m

图 6　四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段岩相组合 B1 岩心和薄片照片

Fig. 6　Core and thin section photos of lithofacies combination B1 of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

值 3 次急剧变化，干湿指数 C 值最小值为 0.2，Sr/Cu 值最大为 17.8，因此认为该沉积期处于温暖湿润的气候，在 E4 长偏心率旋回末期出现 3 次短暂的干旱期(图 8-A；图 9)。



A—平行层理粉砂岩，2573.4 m；B—块状粉/细砂岩相，2578.6 m；C—波纹层理粉/细砂岩相，2535.9 m

图 7 四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段岩相组合 B2 岩心照片

Fig. 7 Core and thin section photos of lithofacies combination B2 of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

3.3.2 古盐度特征及演化

Sr/Ba 值常用来判别沉积水体的盐度，由于 Sr 元素比 Ba 元素的迁移能力更强、化合物溶解度更低，Ba 元素更容易从水体中析出。Sr/Ba>1 指示海相咸水沉积环境，0.5~1 指示海陆过渡相半咸水环境，<0.5 指示陆相淡水环境（Zhang *et al.*，2017）。Ca/(Ca+Fe)>0.8、0.4~0.8、<0.4 分别对应咸水、半咸水和淡水环境（郭来源等，2015）。凉二下亚段 Sr/Ba 值主要集中于 0.2~0.5 区间，Ca/(Ca+Fe)值主要介于 0~0.4 区间，在 E4 长偏心率旋回末期 Sr/Ba 值与 Ca/(Ca+Fe) 值出现 3 次短暂的变大，最大值分别为 1.54、0.83，因此认为该沉积期处于淡水环境，在 E4 长偏心率旋回末期出现 3 次短暂的水体咸化(图 8-B；图 9)。

3.3.3 氧化还原条件及演化

U、V、Mo、Cr、Co 是水体氧化还原条件的敏感元素。V/Cr 值，<2 指示富氧氧化，2~4.25 指示贫氧条件，>4.25 指示还原条件；U/Th 值，<0.75 指示富氧氧化条件，0.75~1.25 指示贫氧条件，>1.25 指示缺氧还原条件（李艳芳等，2015）。凉二下亚段 U/Th 值主要集中于 0.15~0.30 区间，V/Cr 值主要介于 0~0.4 区间，2 项指标相对稳定，认为该沉积期处于富氧环境(图 8-C；图 9)。

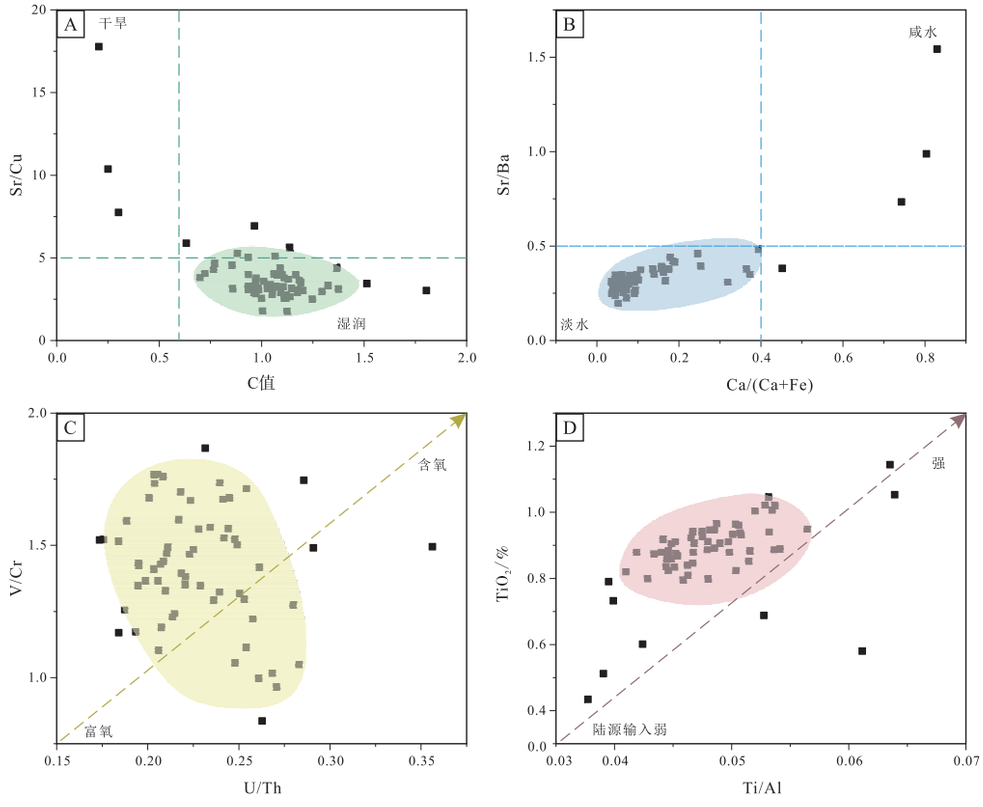
3.3.4 陆源碎屑输入及演化

通常恢复物源的元素有 Ti、Al、Ca 等元素，由于 Ti 元素在泥岩中含量较高，稳定性好，TiO_2 含量越高、Ti/Al 值越高表明陆源输入越多（王国平等，2006）。凉二下亚段 TiO_2 含量主要集中于 0.7%~1.1%区间，Ti/Al 值主要介于 0.04~0.06 之间，在 E4 长偏心率旋回中期二者达到最大值，分别为 0.94%、0.067，在认为该沉积期处于陆源输入较强，在 E4 长偏心率旋回中期陆源输入最强(图 8-D；图 9)。

4 讨论

4.1 天文旋回对沉积环境演化的影响

关于地球轨道驱动气候变化已经展开了大量研究，但其具体的驱动机制仍未达成一致。本节结合四川盆地凉二下亚段古环境演化的主导周期，来讨论地球轨道对古环境演化的驱动机制。前人在松辽盆地、渤海湾盆地等的研究发现，偏心率是影响气候的关键性因素，偏心率极大值时期，气候湿润、陆源输入强（邹卓延等，2016；冯路尧等，2023；



A—古气候干湿指数 C 与Sr/ Cu交会图；B—古盐度指标 Sr/ Ba 与 Ca/（Ca+Fe） 交会图；C—氧化还原指标 V/ Cr 与 U/ Th 交会图；D—陆源输入指标 TiO_2 含量与 Ti/ Al 交会图

图 8　四川盆地复兴地区凉二下亚段 Z1 井沉积环境参数交会图

Fig. 8　Sedimentary environment parameter intersection diagram of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

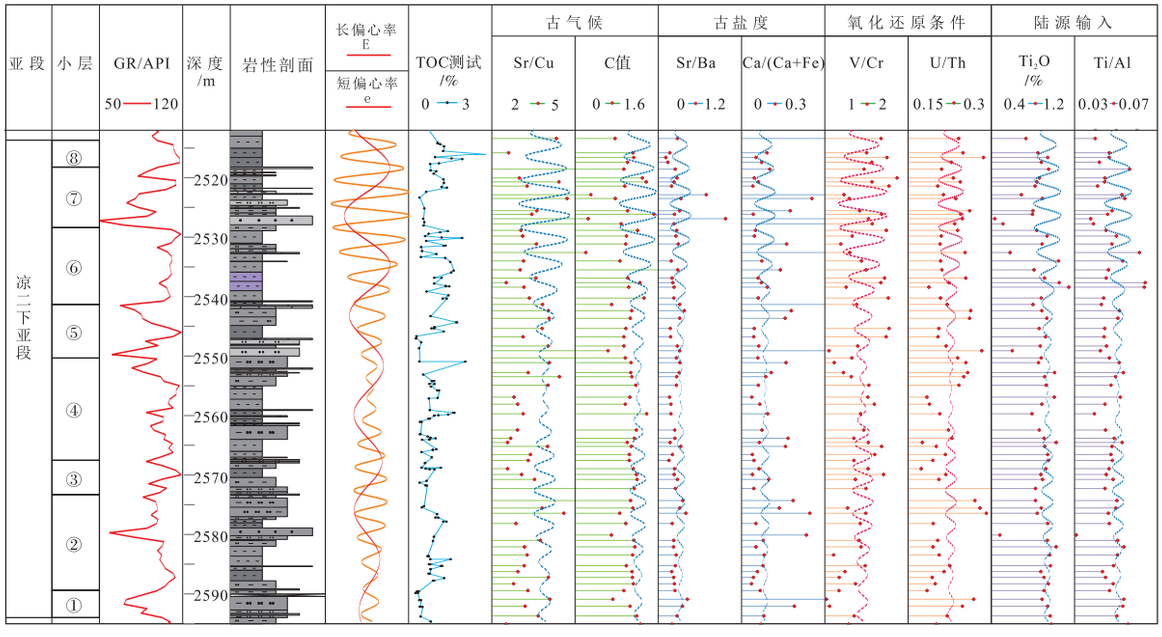


图 9　四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段沉积环境演化过程

Fig. 9　Vertical distribution of mineral content of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

王浒等，2025）。

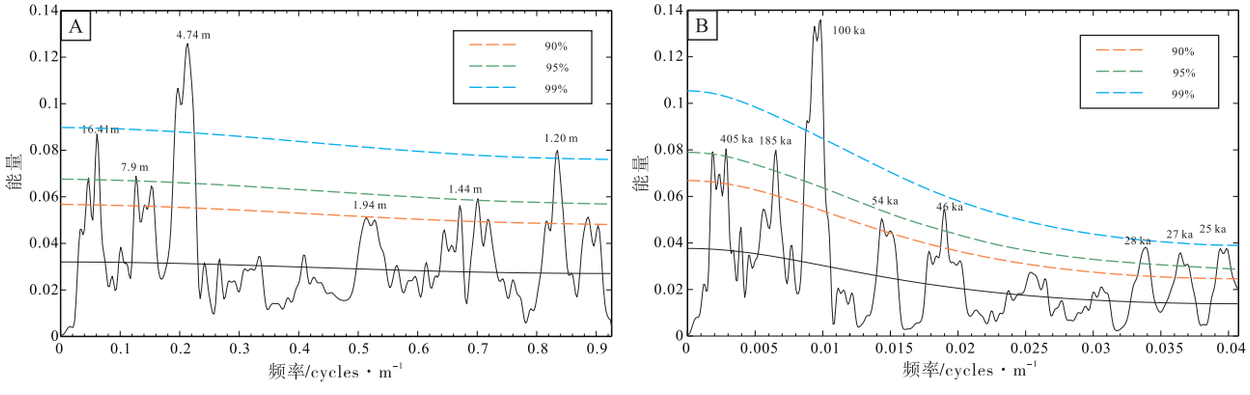
基于各项地球化学指标曲线，发现古气候、古盐度、氧化还原条件和陆源输入等指标在垂向上呈现周期性变化（图 9）。将其与长、短偏心率曲线相拟合，结果显示，当长偏心率较大时，气候整体较为湿润，陆源输入较大，古盐度较小，氧化程度较低；当长偏心率较小时，气候整体较为干旱，陆源输入较小，古盐度偏大，环境偏氧化。其中古气候 Sr/Cu值和 C 值、古盐度 Sr/Ba 值、Ca/Ca+Fe 值、陆源输入 TiO_2 含量和 Ti/Al 曲线在短期内变化波动一致，而与氧化还原条件的相关性较小。当短偏心率曲线处于高值区，研究区处于相对温暖湿润、古盐度和陆源输入较大的环境下；短偏心率曲线处于低值区附近，研究区处于半干旱—半湿润、古盐度和陆源输入较小的沉积环境。其中在部分短偏心率曲线的低值区古盐度 Ca/Ca+Fe 值出现异常高值，推测是在风化作用过程中 Fe 元素的溶解流失导致的。

地球轨道的变化会导致太阳辐射量在地球表面的纬度分布产生差异，尤其是在低纬度地区，季风系统的发展受到岁差周期的影响较为显著（汪品先，2009）。季风系统的发展与海陆分布格局密切相关，四川盆地从晚三叠世开始转为陆相沉积，陆地规模变大（李英强和何登发，2014），来自太平洋的东南季风强度增大。综合所示，偏心率周期在 405 ka 和 128 ka 尺度上调控岁差振幅来控制环境变化，其中 405 ka 长偏心率周期是驱动古气候的主要因素，128 ka 短偏心率进行局部调控。因此在偏心率高值期，地球轨道变得更加椭圆，岁差振幅变大，使得接收到太阳的辐射量增加，同一纬度季节性明显（Abels *et al.*，2013；Valero *et al.*，2014；Liu *et al.*，2018），气候温热，陆源输入较大，水体含氧量变大、盐度减小。反之，偏心率低值期，地球轨道趋向圆形，地球接收到太阳的辐射量减少，季节性变弱，气候干冷，陆源输入较小，水体含氧量变小、盐度增大。

4.2 天文旋回控制下的有机质富集

作为石油资源形成的关键过程，有机质的富集通常受到植被覆盖、降水、地表径流、沉积环境和生产力等多因素的控制，然而这些均受到日照和气候变化的调节。研究表明，地球轨道影响着气候变化，进而控制有机质积累（周靖皓等，2022；Jin *et al.*，2024）。本研究以 Z1 井的 TOC 含量实测资料为例，探讨了有机质富集对天文旋回的响应。将各级天文周期曲线与 TOC 含量变化曲线相拟合，发现 TOC 含量垂向上呈现出与长偏心率周期曲线类似的周期性波动，在长偏心率高值区，TOC 含量普遍较高，在长偏心率低值区，TOC 含量普遍较低（图 9）。

将 TOC 数据进行深度域与时间域分析，二者都表现出很好的米兰科维奇旋回信号。TOC 深度域显示出在多个优势主峰，对应的旋回厚度约 16.4 m、7.9 m、4.7 m、1.9 m、1.4 m 和 1.2 m（图 10-A）。调谐后的 TOC 序列的功率谱提供了天文周期的有力证据，存在显著的主峰，即长偏心率周期 405 ka，短偏心率周期 150 ka、107 ka，斜率周期 68 ka、



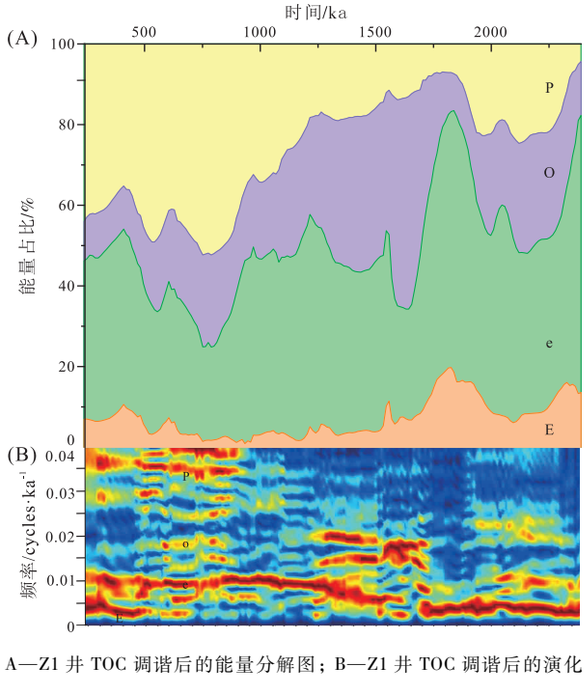
A—Z1 井 TOC 深度域频谱分析；B—Z1 井 TOC 时间域频谱分析

图 10 四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段深度域、时间域频谱分析

Fig. 10 Analysis and modification of depth domain and time domain spectrum of the Lower Liang 2 Submember of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

54 ka、38 ka 和岁差周期 33 ka、30 ka（图 10-B）。由 Li 等（2019）开发的能量分解分析（PDA）方法通过评估轨道驱动与多个古气候代理指标的总功率比来测试对天文驱动变化的敏感性。将 PDA 方法应用于所有 Z1 井的 405 ka 调谐后的 TOC 序列，揭示了轨道周期的不同功率比。其中长偏心率频率范围为 0.0025±0.0003 ka^{-1}，短偏心率频率范围为 0.012±0.0025 ka^{-1}，斜率频率范围为 0.024±0.010 ka^{-1}，岁差频率范围为 0.08±0.02 ka^{-1}，所有 PDA 计算都是在研究井中使用 500 ka 滑动窗口和 2π MTM 方法进行的（Falahatkhah *et al.*, 2023）。在 PDA 分析中，可以在沉积记录的功率比中检测到偏心率、斜率、岁差的振幅，这可能是天文驱动指示器的关键线索，其中偏心率能量占比较高（图 11-A）。405 ka 调谐 TOC 序列 EHA 谱图的频谱功率显示了所有的天文周期频率，其中短偏心率周期显示出较为连续稳定的天文信号（图 11-B），与 EHA 谱图中轨道周期频率的结果是相似的。

有机质的富集整体取决于气候与陆源输入、古盐度以及氧化还原条件。在长偏心率高值期间，地



A—Z1 井 TOC 调谐后的能量分解图；B—Z1 井 TOC 调谐后的演化能谱图。P：岁差；O：斜率；e：短偏心率；E：长偏心率

图 11　四川盆地复兴地区 Z1 井凉二下亚段有机碳含量能量分解图

Fig. 11　Power decomposition analysis of organic carbon content of Well Z1 of the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin

球轨道变得更加椭圆，接收到的太阳辐射量增加，使得北半球气候炎热潮湿，受东南季风影响，降雨量增多，陆源输入增加，带入大量营养物质，生物繁盛，提高了湖泊的生产力，水体较深有利于有机质的保存。相反，在长偏心率低值期间，地球轨道变得接近圆，接收到的太阳辐射量增加，使气候干冷，降雨量和陆源输入减少，湖泊生产力较低，有机质富集和保存受到限制。与其他轨道周期相比，认为长偏心率在长期尺度上控制了凉二下亚段的有机质富集，短偏心率进行局部调控。

4.3　天文旋回对岩相发育的控制作用

栾旭伟等（2024）认为岁差旋回和偏心率旋回共同驱动气候的变化，在岩相尺度上控制了含碳酸盐细粒沉积岩的沉积作用。Zhong 等（2023）建立了长偏心率和岁差控制的气候和沉积旋回模式，提出长偏心率控制了相类型。由于研究区岩性复杂、岩相变化快，本研究尝试以岩相组合为单位，讨论复兴地区凉二下亚段湖相泥页岩的沉积机制。

将各级天文周期曲线与矿物组分、有机质含量变化曲线进行对比，分析各旋回的沉积地质响应，发现 405 ka 长偏心率旋回、128 ka 短偏心率旋回与矿物组分、有机质含量的变化息息相关。在每个长偏心率旋回内部，矿物组分和有机质含量大致对应“升高—降低—升高”或“降低—升高—降低”的变化趋势，其中黏土矿物和有机质含量先增大后减小，长英质矿物含量先减小后增大（图 12）。研究区岩相及其组合类型复杂，不同沉积期发育类型有所差别。

在 Z1 井长偏心率旋回 E1、E2、E5 内部，水体较深，自下而上主要发育岩相组合 A、B1，其中岩相组合 B1 易沉积于湖侵阶段。长偏心率旋回 E3 内部，随着水体加深，先后沉积岩相组合 B1、A，中后期湖水大规模后退，湖平面快速下降，发育以岩相组合 B2 为特征的浅水三角洲沉积。长偏心率旋回 E4 内部，整体处于半深水—深水环境，湖平面波动幅度较小，岩相组合类型单一，主要发育岩相组合 A。

通过岩相组合的垂向发育序列，发现各种岩相组合类型在长偏心率旋回内部有一定的规律。张建国（2017）认为东营凹陷岁差旋回与岩相有明显对应关系，发现了岁差旋回与风暴再悬浮沉积的内在联系。本研究认为长偏心率通过驱动气候变化，

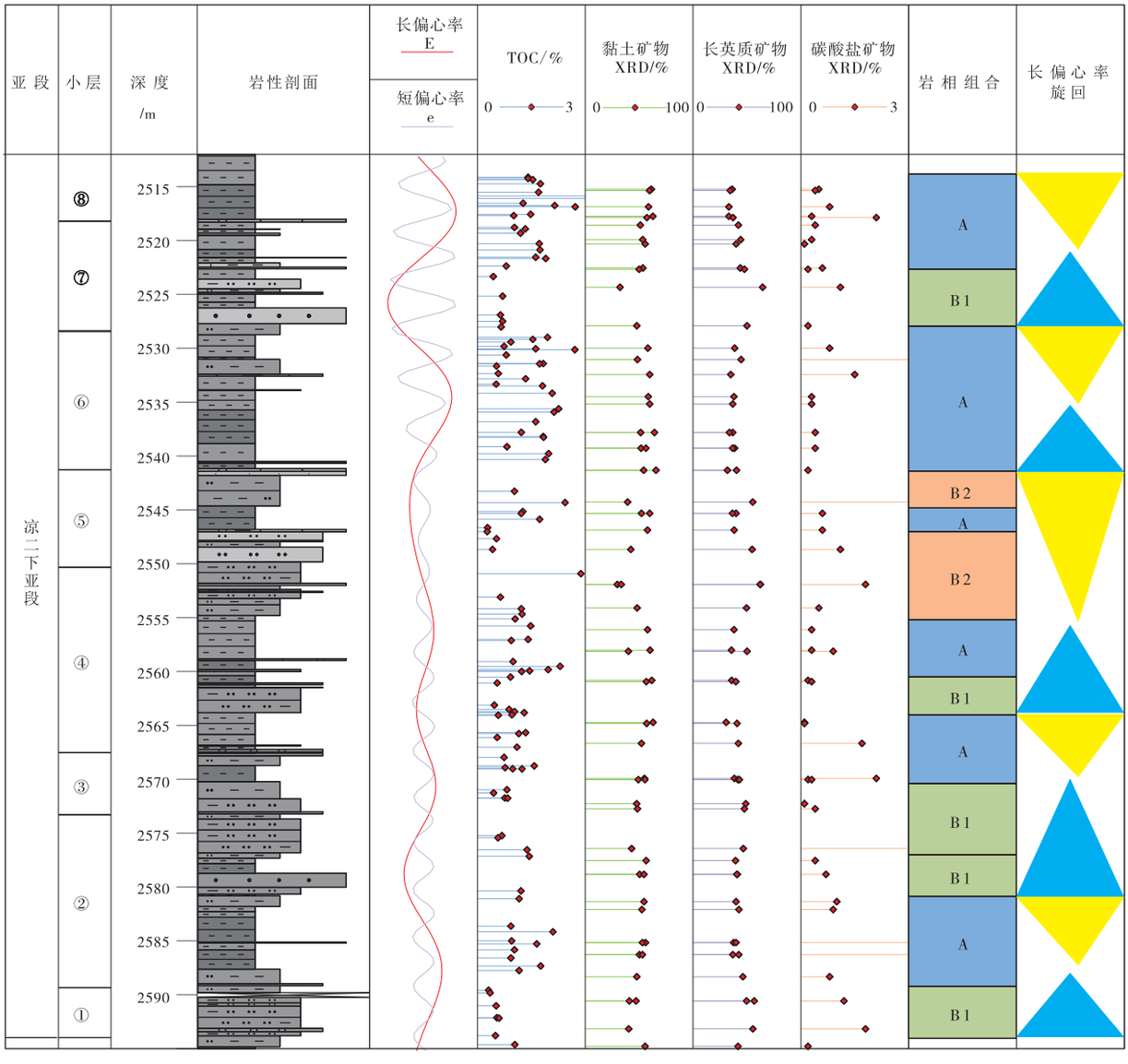


图 12 四川盆地复兴地区凉二下亚段 Z1 井岩相组合分布

Fig. 12 Lithofacies combination distribution of Well Z1 of the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin

在岩相组合尺度上不仅控制了深水纹层状的泥岩，同时也控制了浅水成因和深水异重流成因的砂岩。在长偏心率高值期，气候温暖湿热，季节性变化显著，降雨充沛，湖盆主要发育以纹层状泥岩为特征的岩相组合 A；长偏心率低值期，气候干旱、降雨量减少，母岩风化程度较高，在上斜坡区多沉积浅水的三角洲砂体成因的岩相组合 B2，而在盆地下斜坡区和深水区主要发育异重流成因的岩相组合 B1。

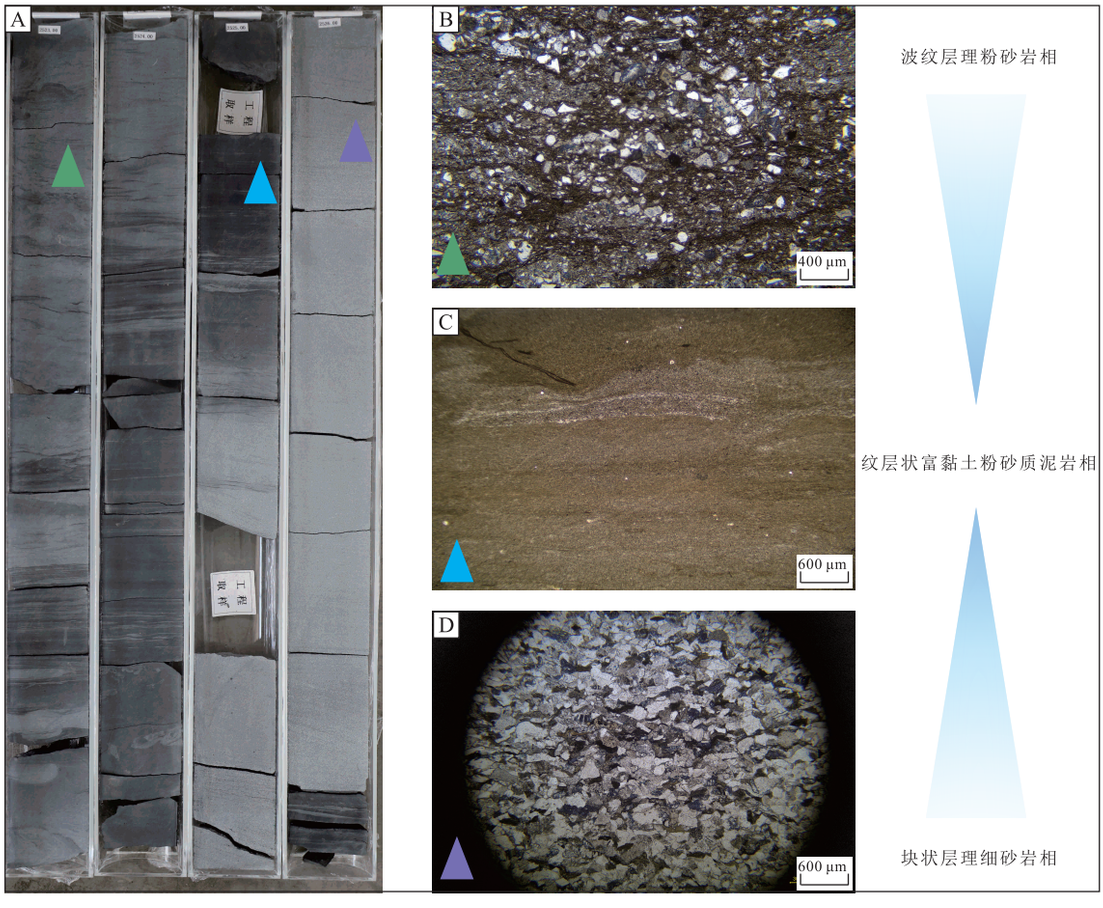
其中，岩相组合 A 主要发育在 405 ka 长偏心率的高值期，气候温暖湿热，季节性变化显著，河流携带大量的陆源碎屑物质和营养成分，促进藻类勃发，为有机质的繁殖与沉淀提供了有利条件。陆源输入的黏土与有机质具有很强的化学活性，可以相互作用形成“黏土-有机质”复合体，以黏土-有机质纹层形式在湖泊中沉积。河水注入导致水体浑浊，使水体中 Ca^{2+}、Co_3^{2-} 处于不饱和状态，少有碳酸盐矿物沉淀（张建国，2017）。因此该时期黏土含量较高且富含有机质，主要发育富有机质纹层状富粉砂黏土泥岩相和纹层状富黏土粉砂质泥岩相。

岩相组合 B1 主要发育在 405 ka 长偏心率的低

值增长期，异重流容易发生。然而，有学者认为气候驱动是控制东营凹陷斜坡堆积模式及相关深水沉积的主要因素，认为在湿润期，进入湖盆的河流流量、输沙通量和降水增加，湖泊水位上升，有利于产生异重流，更容易通过湖底通道将沉积物带入遥远的深水环境（Liu *et al.*，2020）。也有人提出，气候和海平面变化协同控制着与宽缓陆架相关的陆坡上异重流的发展，相对温暖潮湿、海平面较低的阶段，洪水发生的频率和强度会更高，更易触发异重流（Luo *et al.*，2023）。结合研究区的沉积现象，认为半干旱气候（杨田等，2015）和较低的湖平面条件是异重流形成的最佳条件。虽然干旱地区洪水是罕见的，但干旱气候河流比湿润气候河流常年输送粗粒物质的效率可高 400 倍（Laronne and Reid，1993）。在半干旱气候条件，植被并不繁盛，母岩风化严重，河流向下侵蚀强烈，造成水土流失，可以增加河流携带沉积物的浓度，能够保证充分的沉积物供给，湖平面较低，河流与汇水盆地之间高差大，减少湖水的顶托作用，河流携带的沉积物进入湖盆直接卸载，有利于异重流沉积的发生。前人在研究东营凹陷沙四上亚段中发现，当长偏心率较小时，近日点的地球远离太阳，到达地表的太阳辐射较少，导致降水少的干冷气候，湖泊水位下降，陆生植被发育不良，并且源区水土流失严重，河流中悬浮物浓度高，有利于形成异重流沉积（Xu *et al.*，2023），与本研究发现吻合。

岩相组合 B2 多发育在 405 ka 长偏心率的减小期间，气候干旱，降雨量较小，湖水大规模后退，湖平面大幅降低，整体处于浅水环境，多发育以河口坝为特征的三角洲前缘沉积。

Z1 井中，纹层状的泥岩相十分发育，以纹层状富粉砂黏土质泥岩相为主，普遍分布于各短偏心



A—短偏心率旋回 e13 岩心特征，2522～2526 m；B—波纹层理粉砂岩相，2523.20 m；C—纹层状富黏土粉砂质泥岩相，2525.22 m；D—块状层理粉砂岩相，2526.15 m

图 13　四川盆地复兴地区 Z1 井 e13 短偏心率旋回内岩相分布

Fig. 13　Lithofacies distribution within short eccentricity cycle e13 of Well Z1 in Fuxing area of Sichuan Basin

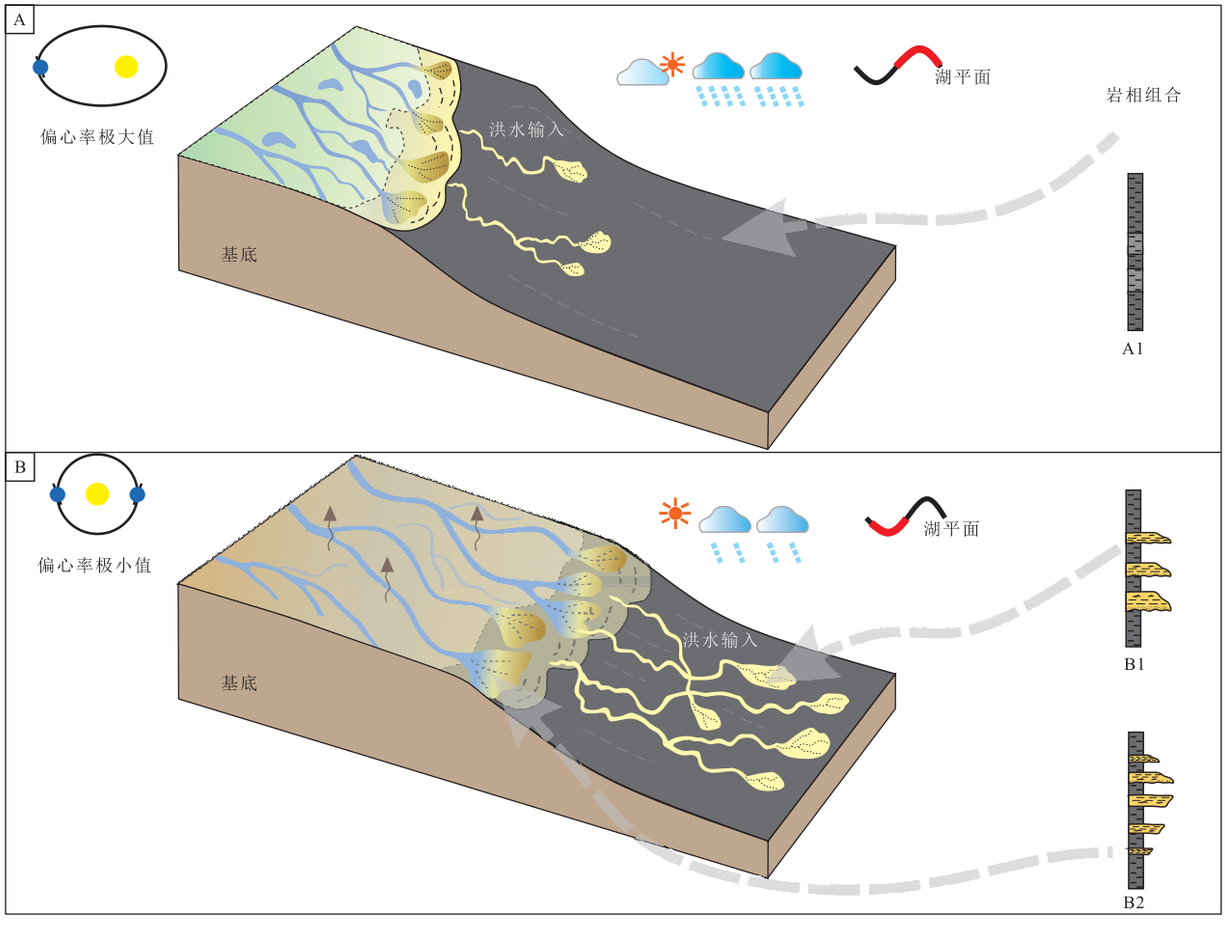
率旋回的基准面附近，此时水体较深。而发育平行层理、波纹层理以及块状层理的粉砂岩相和细砂岩相主要发育在短偏心率旋回的界面附近，处于水体较为动荡的浅水环境。例如，在 Z1 井短偏心率旋回 e13 中，在长偏心率逐渐变大、气候开始湿润的背景下，自下而上沉积了块状层理细砂岩相、纹层状富粉砂黏土质泥岩相和波纹层理粉砂岩相 3 种岩相类型，整体上反映了一个水进—水退旋回，与短偏心率的周期性变化相对应(图 13)。因此认为在长偏心率的宏观控制下，岩相类型也受到短偏心率旋回的局部调制。

4.4 天文旋回控制下的泥页岩沉积规律

湖泊盆地通常规模较小，这使得它们对与天文周期相关的气候足够敏感。通过砂泥岩相组合的空间展布样式，结合湖平面波动的气候响应机制记录，建立了天文旋回驱动的多类型岩相（组合）沉积机制及演化模式(图 14)。

长偏心率低值期，地球轨道趋向圆形，近日点和远日点的距离较小，同时岁差的振幅较小，地球接收到太阳的辐射量减少，同一纬度季节变化不显著。在这个时期，气候干旱、季节变化不明显，植被稀疏，母岩风化程度较高，水土流失严重，上斜坡区三角洲规模较大。湖平面降低，地形高差较大，河流向下侵蚀强烈，这种环境条件有利于异重流的沉积，使沉积物容易被带入深水区（杨田等，2015；Liu *et al.*, 2020)。因此，在这个时期斜坡区和深水区会发育不同的岩相组合。盆地斜坡带容易形成异重流，斜坡区和深水区通常会发育以岩相组合 B1 为主的异重流砂岩，而深水区能量较低，常常发育纹层状泥岩相，主要以岩相组合 A 为特征(图 14-A)。

长偏心率高值期，地球轨道变得更加椭圆，近日点和远日点的距离变大，岁差的振幅较大，



A—偏心率极大值附近岩相发育模式；B—偏心率极小值附近岩相发育模式

图 14 四川盆地复兴地区凉二下亚段偏心率控制下的岩相发育模式

Fig. 14 Lithofacies development model under control of eccentricity in the Lower Liang 2 Submember in Fuxing area of Sichuan Basin

使得接收到太阳的辐射量增加，季节性明显。此时，气候温暖湿润，年降雨量增大、风化作用增强、植被繁盛，有利于浮游生物生长，产生大量有机质，使得深水区发育富有机质泥岩。湿润和温暖的气候使得植被繁盛，对碎屑沉积物起到了圈闭和阻挡作用（Luo *et al.*，2023），海平面较高会影响河口的泥沙量，沉积物在三角洲沉积之后，泥沙浓度的减小会降低斜坡区异重流事件的发生以及沉积规模（杨仁超等，2023）。该时期斜坡区和深水区主要发育富有机质泥岩，以岩相组合 A 为主，在斜坡区偶见以岩相组合 B1 为特征的异重流砂岩(图 14-B)。

5　结论

1）在四川盆地东部复兴地区侏罗系凉高山组二下亚段中识别出 405 ka、128 ka、43 ka 和 21 ka 多级天文旋回信号，长、短偏心率旋回分别控制的地层厚度约 18 m、4.6 m，最佳沉积速率约 4.2 cm/ka，以短偏心率旋回（五级层序）为地层对比的基本单元，搭建高频地层格架。

2）古环境指标和总有机碳（TOC）数据的趋势分析表明，二者在垂向上显示出于短偏心率相似的周期性变化，表明天文旋回控制了复兴地区凉二下亚段沉积期的环境变化，进而控制了有机质的富集。

3）偏心率是控制气候变化和岩相及其组合时空分布的关键因素，其中长偏心率控制着有机质富集、岩相和岩相组合分布，短偏心率进行局部调控。长偏心率高值期，气候温暖湿润、降雨量大，湖平面较高，深水区易发育纹层状泥岩；长偏心率低值期，气候干旱、降雨量减少，母岩风化程度较高，在上斜坡区多沉积浅水的三角洲砂体，而在盆地下斜坡区和深水区主要发育异重流砂岩和纹层状泥岩。

致谢　感谢审稿人提出的宝贵建议和意见。

参考文献(References)

陈世悦，张顺，刘惠民，鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报，19(2)：271-284.［Chen S Y，Zhang S，Liu H M，Yan J H. 2017. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，19(2)：271-284］

陈中红，查明，金强. 2004. 自然伽马及自然伽马能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用. 地球物理学报，47(6)：1145-1150.［Chen Z H，Zha M，Jin Q. 2004. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin. Chinese Journal of Geophysics，47(6)：1145-1150］

成大伟，张志杰，洪海涛，张少敏，秦春雨，袁选俊，张斌，周川闽，邓庆杰. 2023. 四川盆地东部侏罗系凉高山组层序结构、沉积演化及其主控因素. 石油勘探与开发，50(2)：262-272.［Cheng D W，Zhang Z J，Hong H T，Zhang S M，Qin C Y，Yuan X J，Zhang B，Zhou C M，Deng Q J. 2023. Sequence structure，sedimentary evolution and their controlling factors of the Jurassic Lianggaoshan Formation in the East Sichuan Basin，SW China. Petroleum Exploration and Development，50(2)：262-272］

冯路尧，张建国，姜在兴，李长昇，白云风. 2023. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应. 石油学报，44(2)：299-311.［Feng L Y，Zhang J G，Jiang Z X，Li C S，Bai Y F. 2023. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response Qingshankou Formation in Songliao Basin. Acta Petrolei Sinica，44(2)：299-311］

高祥宇，邵龙义，王学天，华芳辉，鲁静. 2022. 乐平统含煤岩系旋回地层的天文周期驱动：以黔西北毕节地区为例. 矿业科学学报，7(1)：89-100.［Gao X Y，Shao L Y，Wang X T，Hua F H，Lu J. 2022. Astronomical forcing in Lopingian coal-bearing cycles：a case study of Bijie area in northwestern Guizhou. Journal of Mining Science and Technology，7(1)：89-100］

郭来源，李忠生，解习农，尚飞，樊中海，刘峥君，吴峰. 2015. 湖相富有机质泥页岩地球化学元素高频变化及其地质意义：以泌阳凹陷 BY1 井取心段为例. 现代地质，29(6)：1360-1370.［Guo L Y，Li Z S，Xie X N，Shang F，Fan Z H，Liu Z J，Wu F. 2015. High-frequency variation of geochemical elements and its geological implication on lacustrine organic-rich mudstone and shale formation：an example from the core：taking segment of well BY1 in the Biyang depression. Geoscience，29(6)：1360-1370］

洪海涛，张少敏，张芮，关旭. 2023. 四川盆地凉高山组层序地层格架及有利勘探区优选. 特种油气藏，30(2)：58-64.［Hong H T，Zhang S M，Zhang R，Guan X. 2023. Establishment of sequence stratigraphic framework and optimization of favorable exploration areas of Lianggaoshan formation，Sichuan Basin. Special Oil & Gas Reservoirs，30(2)：58-64］

胡东风，魏志红，刘若冰，魏祥峰，陈斐然，刘珠江. 2021. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力：以四川盆地涪陵地区侏罗系为例. 天然气工业，41(8)：113-120.［Hu D F，Wei Z H，Liu R B，Wei X F，Chen F R，Liu Z J. 2021. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas：a case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin. Natural Gas Industry，41(8)：113-120］

胡东风,李真祥,魏志红,段金宝,缪志伟,潘磊,黎承银,段华. 2023. 四川盆地北部地区巴中 1HF 井侏罗系河道砂岩油气勘探突破及意义. 天然气工业,43(3):1-11. [Hu D F,Li Z X,Wei Z H,Duan J B,Miao Z W,Pan L,Li C Y,Duan H. 2023. Breakthrough in oil and gas exploration of Jurassic channel sandstone in Well Bazhong 1HF in northern Sichuan Basin and its significance. Natural Gas Industry,43(3):1-11]

李国荤,石巨业,樊太亮,胡德胜,游君君,李一凡,高志前,邓成昆,范家豪,周刚. 2023. 天文周期约束下始新统湖相地层页岩岩相组合类型及其发育模式:以北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组为例. 第四纪研究,43(6):1614-1629. [Li G C,Shi J Y,Fan T L,Hu D S,You J J,Li Y F,Gao Z Q,Deng C K,Fan J H,Zhou G. 2023. Shale lithofacies association types and development models in Eocene lacustrine facies strata constrained by astronomical cycles: a case study of the Liushagang formation in the Weixinan Sag,Beibuwan Basin. Quaternary Sciences,43(6):1614-1629]

李艳芳,邵德勇,吕海刚,张瑜,张小龙,张同伟. 2015. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系. 石油学报,36(12):1470-1483. [Li Y F,Shao D Y,Lü H G,Zhang Y,Zhang X L,Zhang T W. 2015. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng formation—Longmaxi formation,Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica,36(12):1470-1483]

李英强,何登发. 2014. 四川盆地及邻区早侏罗世构造-沉积环境与原型盆地演化. 石油学报,35(2):219-232. [Li Y Q,He D F. 2014. Evolution of tectonic-depositional environment and prototype basins of the Early Jurassic in Sichuan Basin and adjacent areas. Acta Petrolei Sinica,35(2):219-232]

刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用:以江汉盆地潜江组为例. 石油实验地质,29(3):307-310,314. [Liu G,Zhou D S. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang formation in the Jianghan Basin as an example. Petroleum Geology & Experiment,29(3):307-310,314]

刘苗苗,付小平,倪楷. 2023. 岩相组合特征及其对页岩含气性的影响:以涪陵地区凉高山组为例. 断块油气田,30(1):1-8. [Liu M M,Fu X P,Ni K. 2023. Characteristics of lithofacies combinations and its influence on shale gas-bearing property: a case study of the Lianggaoshan formation in Fuling area. Fault-Block Oil & Gas Field,30(1):1-8]

刘宇. 2021. 四川盆地侏罗纪地层锆石年代学研究现状与展望. 四川地质学报,41(3):366-370,376. [Liu Y. 2021. Present situation and prospect of zircon geochronology of Jurassic strata in the Sichuan Basin. Acta Geologica Sichuan,41(3):366-370,376]

栾旭伟,孔祥鑫,张金亮,蒋龙,彭艳霞,蔡媛. 2024. 天文旋回约束下东营凹陷中始新统含碳酸盐细粒沉积岩成因分析. 沉积学报,42(2):688-700. [Luan X W,Kong X X,Zhang J L,Jiang L,Peng Y X,Cai Y. 2024. Astronomical forcing of origins of Eocene carbonate-bearing finegrained sedimentary rock in Dongying Sag. Acta Sedimentologica Sinica,42(2):688-700]

马义权,施玲娜,刘惠民,陆永潮,张晨,马超. 2023. 天文驱动下的中始新世东营凹陷气候水文演化与有机质富集机理. 第四纪研究,43(6):1630-1642. [Ma Y Q,Shi L N,Liu H M,Lu Y C,Zhang C,Ma C. 2023. Astronomically forced climate-hydrological evolution and organic matter accumulation of middle Eocene lake record in the Dongying depression. Quaternary Sciences,43(6):1630-1642]

彭伟,舒逸,陈绵琨,刘皓天,肖雄,管文静. 2023. 四川盆地复兴地区侏罗系凉高山组致密砂岩储层特征及其主控因素. 地质科技通报,42(3):102-113. [Peng W,Shu Y,Chen M K,Liu H T,Xiao X,Guan W J. 2023. Tight sandstone reservoir characteristics and main controlling factors of Jurassic Lianggaoshan Formation in Fuxing area,Sichuan Basin. Bulletin of Geological Science and Technology,42(3):102-113]

石巨业. 2018. 东营凹陷始新世泥页岩段米氏旋回识别及其环境响应研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文:132. [Shi J Y. 2018. Recognition of Milankovitch cycles in the Eocene terrestrial formation and environmental responses in Dongying Sag. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing):132]

石巨业,金之钧,刘全有,樊太亮,高志前,王宏语. 2023. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用. 地学前缘,30(4):142-151. [Shi J Y,Jin Z J,Liu Q Y,Fan T L,Gao Z Q,Wang H Y. 2023. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks. Earth Science Frontiers,30(4):142-151]

汪品先. 2009. 全球季风的地质演变. 科学通报,54(5):535-556. [Wang P X. 2009. Global monsoon in a geological perspective. Chinese Science Bulletin,54(5):535-556]

王涔,石巨业,朱如凯,梁新平. 2025. 天文周期驱动下湖相细粒沉积岩有机质富集模式:以东营凹陷 LY1 井沙三下—沙四上亚段为例. 沉积学报,43(2):750-768. [Wang B,Shi J Y,Zhu R K,Liang X P. 2025. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: A case study of the lower Es3 and upper Es4 sub-member in well LY1,Dongying Sag. Acta Sedimentologica Sinica,43(2):750-768]

王国平,张玉霞,翟正丽,贾琳. 2006. 半干旱区沼泽沉积剖面特征元素比值及其物源、氧化还原变化信息. 吉林大学学报(地球科学版),36(3):449-454. [Wang G P,Zhang Y X,Zhai Z L,Jia L. 2006. Ratios of specific elements and their implications for original source of sediments and redox condition within sedimentation profile of the marsh in sedmi-arid areas. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),36(3):449-454]

王威,石文斌,付小平,谢佳彤,倪楷. 2022. 四川盆地涪陵地区中侏罗统凉高山组陆相页岩油气富集规律探讨. 天然气地球科学,33(5):764-774. [Wang W,Shi W B,Fu X P,Xie J T,Ni K. 2022. Oil and gas enrichment regularity of continental shale of Lianggaoshan formation of Middle Jurassic in Fuling area,Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience,33(5):764-774]

杨仁超,田源. 2020. 天文周期与异重流沉积前沿科学问题探讨. 非

常规油气,7(5)：1-7. [Yang R C,Tian Y. 2020. Discussion on the scientific issues in frontiers of astronomical cycles and hyperpycnal flow deposits. Unconventional Oil & Gas,7(5)：1-7]

杨仁超,李作福,张学才,慈兴华,方旭庆,李传华,刘海宁. 2023. 异重流沉积研究进展与展望. 沉积学报,41(6)：1917-1933. [Yang R C,Li Z F,Zhang X C,Ci X H,Fang X Q,Li C H,Liu H N. 2023. Advances and perspectives in the study of hyperpycnal flow deposition. Acta Sedimentologica Sinica,41(6)：1917-1933]

杨田,操应长,王艳忠,张少敏,张会娜,王思佳. 2015. 异重流沉积动力学过程及沉积特征. 地质论评,61(1)：23-33. [Yang T,Cao Y C,Wang Y Z,Zhang S M,Zhang H N,Wang S J. 2015. Sediment dynamics process and sedimentary characteritics of hyperpycnal flows. Geological Review,61(1)：23-33]

余文强,杨田,蔡来星,李晓芳,何青. 2024. 四川盆地中部中侏罗统沙溪庙组沉积期古环境与古气候演化：以永浅 1 井为例. 地质学报,98(4)：1211-1228. [Yu W Q,Yang T,Cai L X,Li X F,He Q. 2024. Paleoenvironment and paleoclimate evolution during the depositional period of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan basin：a case study of well Yongqian 1. Acta Geologica Sinica,98(4)：1211-1228]

易娟子,张少敏,蔡来星,陈守春,罗鑫,于吉星,罗妮娜,杨田. 2022. 川东地区下侏罗统凉高山组地层沉积充填特征与油气勘探方向. 吉林大学学报(地球科学版),52(3)：795-815. [Yi J Z,Zhang S M,Cai L X,Chen S C,Luo X,Yu J X,Luo N N,Yang T. 2022. Strata and sedimentary filling characteristics of the lower Jurassic Lianggaoshan formation and its hydrocarbon exploration in eastern Sichuan Basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),52(3)：795-815]

张建国. 2017. 济阳坳陷始新统沙三下亚段湖相细粒沉积岩成因机制研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文：150. [Zhang J G. 2017. The formation mechanisms of lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the Eocene lower Es3 strata,the Jiyang Depression. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)：150]

张天舒,陶士振,吴因业,杨家静,庞正炼,杨晓萍,陈燕燕,袁苗,刘敏,范建玮,冯荣昌. 2019. 层序演化对三角洲—滩坝沉积体系有利储层类型与分布的控制作用：以四川盆地中部侏罗系凉高山组为例. 天然气地球科学,30(9)：1286-1300. [Zhang T S,Tao S Z,Wu Y Y,Yang J J,Pang Z L,Yang X P,Chen Y Y,Yuan M,Liu M,Fan J W,Feng R C. 2019. Control of sequence stratigraphic evolution on the types and distribution of favorable reservoir in the delta and beach-bar sedimentary system：case study of Jurassic Lianggaoshan formation in central Sichuan Basin,China. Natural Gas Geoscience,30(9)：1286-1300]

张天舒,朱如凯,蔡毅,王华建,吕丹,周海燕,付秀丽,刘畅,崔坤宁,张素荣,王涔,吴松涛,张婧雅,姜晓华,冯有良,刘合. 2023. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层序等时格架下的有机质分布规律. 石油与天然气地质,44(4)：869-886. [Zhang T S,Zhu R K,Cai Y,Wang H J,Lyu D,Zhou H Y,Fu X L,Liu C,Cui K N,Zhang S R,Wang B,Wu S T,Zhang J Y,Jiang X H,Feng Y L,Liu H. 2023. Distribution of organic matter in the Qingshankou Formation Shale,Gulong Sag,Songliao Basin observed within an isochronous sequence stratigraphic framework. Oil & Gas Geology,44(4)：869-886]

郑荣才,彭军,吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. 沉积学报,19(2)：249-255. [Zheng R C,Peng J,Wu C R. 2001. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. Acta Sedimentologica Sinica,19(2)：249-255]

周靖皓,鲜本忠,张建国,钟骑,陈鹏. 2022. 高频旋回地层约束下的湖相页岩有机质富集规律：以东营凹陷古近系沙三下亚段为例. 古地理学报,24(4)：759-770. [Zhou J H,Xian B Z,Zhang J G,Zhong Q,Chen P. 2022. Organic matter enrichment law of lacustrine shale constrained by high resolution cyclostratigraphy：a case study from lower sub-member of member 3 of Paleogene shahejie formation,Dongying Sag. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),24(4)：759-770]

邹卓延,黄春菊,李明松,张杨. 2016. 晚渐新世-早中新世气候变化在赤道大西洋的天文响应. 中国科学：地球科学,46(9)：1231-1240. [Zou Z Y,Huang C J,Li M S,Zhang Y. 2016. Climate change response to astronomical forcing during the Oligocene-Miocene transition in the equatorial Atlantic. Scientia Sinica(Terrae),46(9)：1231-1240]

Abels H A,Abdul Aziz H,Calvo J P,Tuenter E. 2009. Shallow lacustrine carbonate microfacies document orbitally paced lake-level history in the Miocene Teruel Basin(North-East Spain). Sedimentology,56(2)：399-419.

Abels H A,Kraus M J,Gingerich P D. 2013. Precession-scale cyclicity in the fluvial lower Eocene Willwood formation of the Bighorn Basin,Wyoming(USA). Sedimentology,60(6)：1467-1483.

Boulila S,Galbrun B,Hinnov L A,Collin P Y,Ogg J G,Fortwengler D,Marchand D. 2010. Milankovitch and sub-Milankovitch forcing of the Oxfordian(Late Jurassic)Terres Noires formation(SE France)and global implications. Basin Research,22(5)：717-732.

Boulila S,Dupont-Nivet G,Galbrun B,Bauer H,Châteauneuf J J. 2021. Age and driving mechanisms of the Eocene-Oligocene transition from astronomical tuning of a lacustrine record(Rennes Basin,France). Climate of the Past,17(6)：2343-2360.

Falahatkhah O,Serajamani M,Kadkhodaie A,Aïfa T,Ebrahimi S,Ciabeghodsi A A,Zamanzadeh S M,Sfidari E,Vahidinia M,Ghaderi A. 2023. Orbital obliquity evolution during the Late Paleozoic ice age across the northeastern Gondwana：implications for regional sea-level change trigger and reservoir quality assessment. Marine and Petroleum Geology,153：106312.

Huang C J,Ogg J G,Kemp D B. 2020. Cyclostratigraphy and astrochronology：case studies from China. Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,560：110017.

Jin S D,Liu Y,Ma C,Zhang Q L,Chen A Q. 2024. Orbital cycles recorded in early Cambrian shales with implications for organic matter accumulation. Journal of Asian Earth Sciences,263：106033.

Jin S M, Kemp D B, Jolley D W, Vieira M, Zachos J C, Huang C J, Li M S, Chen W H. 2022. Large-scale, astronomically paced sediment input to the north sea basin during the Paleocene Eocene Thermal Maximum. Earth and Planetary Science Letters, 579: 117340.

Kodama K P, Hinnov L A. 2014. Rock Magnetic Cyclostratigraphy. John Wiley & Sons.

Laronne J B, Reid L. 1993. Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers. Nature, 366: 148-150.

Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A C M, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. Astronomy and Astrophysics, 428: 261-285.

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: A89.

Li M S, Hinnov L A, Huang C, Ogg J G. 2018. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and Obliquity forcing. Nature Communications, 9: 1004.

Li M S, Hinnov L, Kump L. 2019. Acycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education. Computers & Geosciences, 127: 12-22.

Liu J P, Xian B Z, Ji Y L, Gong C L, Wang J H, Wang Z, Chen P, Song D L, Wei W Z, Zhang X M, Dou L X. 2020. Alternating of aggradation and progradation dominated clinothems and its implications for sediment delivery to deep lake: the Eocene Dongying depression, Bohai Bay Basin, East China. Marine and Petroleum Geology, 114: 104197.

Liu Z H, Huang C J, Algeo T J, Liu H M, Hao Y Q, Du X B, Lu Y C, Chen P, Guo L Y, Peng L. 2018. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66 - 23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, Northeastern China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 510: 78-92.

Luo K W, Su M, Liu S, Shi J C, Wang C, Chen H, Yang S L, Lin Z X, Wei L J. 2023. Sea-level, climate, and oceanographic controls on recent deepwater hyperpycnites: a case example from the shenhu slope (northern South China Sea). Quaternary Science Reviews, 311: 108148.

Luo L, Qi J F, Zhang M Z, Wang K, Han Y Z. 2014. Detrital zircon U-Pb ages of late triassic-late jurassic deposits in the western and northern Sichuan Basin Margin: constraints on the foreland basin provenance and tectonic implications. International Journal of Earth Sciences, 103: 1553-1568.

Ma Y Q, Fan M J, Lu Y C, Liu H M, Hao Y Q, Xie Z H, Liu Z H, Peng L, Du X B, Hu H Y. 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.

Qiu R Y, Fang L H, Lu Y Z, Chen Y X, Huang R D, Lei W Z, Zhang P Y, Li M S. 2023. Cyclostratigraphy of the Lower Jurassic (Toarcian) terrestrial successions in the Sichuan Basin, southwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, 250: 105617.

Rampino M R, Caldeira K, Zhu Y H. 2021. A pulse of the earth: a 27.5 Myr underlying cycle in coordinated geological events over the last 260 Myr. Geoscience Frontiers, 12: 101245.

Thomson D J. 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. Proceedings of the IEEE, 70: 1055-1096.

Tuenter E, Weber S L, Hilgen F J, Lourens L J. 2003. The response of the African summer monsoon to remote and local forcing due to precession and obliquity. Global and Planetary Change, 36: 219-235.

Valero L, Garcés M, Cabrera L, Costa E, Sáez A. 2014. 20 Myr of eccentricity paced lacustrine cycles in the Cenozoic Ebro Basin. Earth and Planetary Science Letters, 408: 183-193.

Xu T Y, Peng J, Yu L D, Han H D, Yang Y M, Zeng Y, Wang Y B. 2023. The control of astronomical cycles on lacustrine fine-grained event sedimentation: a case study of the Chunshang sub-member of the upper Es4 in the Dongying Sag. Petroleum Science, 20(3): 1395-1416.

Zhang X G, Lin C Y, Zahid M A, Jia X P, Zhang T. 2017. Paleosalinity and water body type of Eocene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Basin. Journal of Petroleum Science and Engineering, 158: 469-478.

Zhong Q, Zhang J G, Wang S Q, Li J L, Jiang Z X, Qiu Y B. 2023. Depositional evolution of eocene deep-lake mudrock lithofacies driven by astronomical forcing in the Dongying Depression, China. Marine and Petroleum Geology, 158: 106516.

(责任编辑 李新坡)