

文章编号: 1671-1505(2025)01-0209-16 DOI: 10.7605/gdxb.2025.014

鄂尔多斯盆地南缘旬探 1 井奥陶系天文旋回 信号提取及三级层序的判识*

李 阳

中国石油辽河油田分公司, 辽宁盘锦 124010

摘 要 鄂尔多斯盆地南缘下古生界奥陶系尚未开展旋回地层学分析, 识别奥陶系的天文轨道周期信号, 以此建立高精度地质年代标尺, 并合理划分三级层序, 对该区油气勘探具有重要意义。结合旋回地层学理论和信号分解技术, 对旬探 1 井下古生界奥陶系进行了旋回地层学分析。研究表明, 不同层段的沉积速率存在差异, 旬探 1 井冶里期—亮甲山期沉积速率分布在 4.2~5.6 cm/ka 之间, 马家沟期沉积速率在 2.2~5.5 cm/ka 之间变化, 平凉期—背锅山期沉积速率变大, 在 4.3~9.3 cm/ka 之间变化; 旬探 1 井奥陶系中存在显著的米兰科维奇旋回信号, 记录了偏心率和斜率天文轨道周期, 使用 405 ka 长偏心率周期建立年龄模型, 进行天文调谐, 以此建立旬探 1 井奥陶系浮动天文年代标尺, 冶里期—亮甲山组沉积时限~3.25 Ma, 马家沟组—背锅山组沉积时限~27.4 Ma; 结合小波变换, 综合分析奥陶系三级层序频率主要分布在 0.011 cycles/m 左右, 并据此将旬探 1 井奥陶系划分为 13 个三级层序。本研究为奥陶系层序划分及其天文旋回研究提供了新的定量方法和科学依据, 有助于提升地层沉积过程的精细认识和时间尺度的准确性。

关键词 鄂尔多斯盆地 奥陶系 旋回地层学 天文旋回 三级层序 小波变换

作者简介 李阳, 男, 1988 年生, 2022 年毕业于西南石油大学获博士学位; 现为在站博士后, 主要从事沉积储集层及数据挖掘相关研究。E-mail: 7891235@qq.com。

中图分类号: P534.42 文献标志码: A

Extraction of astronomical cycle signals and identification of third-order sequences in the Ordovician of Well XT1, southern margin of Ordos Basin

LI Yang

PetroChina Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124010, China

Abstract In the southern margin of the Ordos Basin, no cyclostratigraphic analysis has yet been conducted on the Paleozoic Ordovician to identify astronomical orbital cycle signals. This analysis is crucial for establishing a high-precision geological timescale and reasonably dividing third-order sequences, which is of significant importance for oil and gas exploration in the area. Combining cyclostratigraphic theory and signal decomposition techniques, a cyclostratigraphic analysis of the Paleozoic Ordovician in the Well XT1

* 辽宁省自然科学基金计划项目 (编号: 2024-BS-338) 与中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司重点科技项目 (编号: 2023KJXM-11) 联合资助。[Co-funded by the Liaoning Provincial Natural Science Foundation (No. 2024-BS-338) and the Key Science and Technology Project of PetroChina Liaohe Oilfield Company (No. 2023KJXM-11)]

收稿日期: 2024-02-29 改回日期: 2024-10-14

was performed. The results indicate that there are differences in sedimentation rates among different strata. The sedimentation rate during the Yeli and Liangjiashan stages in Well XT1 area ranges from 4.2 to 5.6 cm/ka, while the Majiagou stage varies between 2.2 and 5.5 cm/ka. The sedimentation rate during the Pingliang and Beiguoshan stages increases, ranging from 4.3 to 9.3 cm/ka. Significant Milankovitch cycle signals are present in the Ordovician of Well XT1, recording eccentricity and obliquity astronomical orbital periods. A 405 ka eccentricity cycle was used to establish an age model for astronomical tuning, creating a fluctuating astronomical timescale for the Ordovician in Well XT1, with the sedimentation period for the Yeli to Liangjiashan Formations at approximately 3.25 Ma, and for the Majiagou to Beiguoshan Formations at around 27.4 Ma. Using wavelet transformation, the frequency of the Ordovician third-order sequences was primarily distributed around 0.011 cycles/m, allowing the division of the Ordovician in Well XT1 into approximately 13 third-order sequences. This study provides a new quantitative method and scientific basis for the division of Ordovician sequences and the study of astronomical cycles, contributing to a refined understanding of sedimentary processes and the accuracy of timescales.

Key words Ordos Basin, Ordovician, cyclostratigraphy, astronomical cycles, third-order sequence, wavelet transformation

About the author LI Yang, born in 1988, received his Ph.D. from Southwest Petroleum University in 2022. His research focuses on sedimentary reservoirs and data mining. E-mail: 7891235@qq.com.

米兰科维奇在 1941 年研究第四纪冰期成因时提出了地球轨道三要素（偏心率、斜率和岁差）周期性变化对冰期、间冰期的影响假说，并定量计算了地球轨道参数（Berger, 1988, 2013; Waltham, 2015; 闫建平等, 2017; 许可, 2021）。由 Fischer 等（1988）和 Hilgen 等（2004）提出的旋回地层学是以米兰科维奇理论为基础的一门地层学分支学科，主要研究受天文轨道力驱动的具有周期性变化的沉积记录，并对沉积记录进行识别、描述、对比和成因解释。Hays 等（1976）通过对南印度更新世钻孔的有孔虫氧同位素进行旋回地层学分析，识别出斜率和岁差周期，验证了米兰科维奇旋回的存在，此后米兰科维奇理论受到地质学家的广泛关注，并取得了丰富的研究成果，同时沉积地层中记录天文轨道周期信号的思想得到了众学者的认同（吴怀春等, 2017; Li *et al.*, 2019; 钟阳阳, 2019; Boulila *et al.*, 2020; Berger, 2021; 刘冬洋, 2021; 许可, 2021）。

对于奥陶系来说，由于缺乏有效的年龄控制和可对比的天文目标曲线，只能根据地质历史时期相对稳定的 405 ka 长偏心率来作为天文模型进行调谐，建立一个具有相对时间刻度的“浮动”天文年代标尺，达到天文校正的效果（任传真, 2020），其中短偏心率周期为 ~125 ka、~100 ka 和

~95 ka，斜率和岁差周期可依据 Waltham（2015）的天文周期方案计算得出。在旋回地层学分析的基础上，多数学者为能提高地层划分的分辨率及确定沉积时限，将旋回划分方案和层序时限进行对比，进而将层序级别划分与天文旋回联系起来，发现高频层序（四级、五级、六级层序）与米兰科维奇旋回周期密切相关，即天文轨道力驱动气候变化导致海平面周期性变化影响地层具旋回性沉积，四级层序反映了 405 ka 长偏心率周期以及可能的 ~160 ka 至 ~200 ka 的斜率调制周期，五级层序对应 ~100 ka 短偏心率周期，六级层序与岁差（~20 ka）及斜率（~40 ka）周期有关（Boulila *et al.*, 2014; 梅冥相, 2015; 吴怀春等, 2017; Boulila *et al.*, 2018; 石巨业等, 2019; 田军等, 2022）。三级层序—一级层序与板块运动所引起的构造型海平面变化有关，但三级层序也可受天文驱动海平面变化的影响（梅冥相, 2015），三级层序可能与 ~1.2 Ma 超长斜率周期（s3 - s4）和 ~2.4 Ma 超长偏心率周期（g4 - g3）对应，二者具有 2:1 的共振现象。如在中生代冰室效应时期，三级层序与长斜率周期存在成因联系，其周期为 ~1.2 Ma，在中生代温室效应时期，三级层序在某种程度上则与长偏心率周期相对应，其周期为 ~2.4 Ma（陈留勤, 2008; 梅冥相, 2015; 闫建平

等, 2017; 钟阳阳, 2019)。目前来看, 国内外不少学者已经对古生代进行旋回地层学分析并尝试识别古生代 $g_4 - g_3$ 和 $s_3 - s_4$ 调制周期, Wu 等 (2023) 已经建立古生代天文地质年代表; Fang 等 (2015, 2016, 2017, 2018) 对古生代二叠系和奥陶系进行频谱分析时, 发现了 ~ 2.4 Ma 超长偏心率和 ~ 1.2 Ma 超长斜率信号; Zhong 等 (2018) 对黄泥塘剖面 and CJ-3 岩心中奥陶世 MS 序列开展旋回地层学研究, 识别出超长偏心率 ($g_4 - g_3$) 和超长斜率周期分别为 ~ 1.9 Ma 和 ~ 1.2 Ma; Cong 等 (2019) 对古生代二叠系同样也识别出 ~ 2.4 Ma 超长偏心率和 ~ 1.2 Ma 超长斜率信号。

鄂尔多斯盆地南缘下古生界奥陶系现存的层序划分方案多以 Vail 提出的层序地层学为理论基础, 通过确定层序界面来划分三级层序, 但此种类型划分方案往往具有较低的分辨率, 且具有不确定性, 很难评估地层的沉积速率与沉积年限 (孟祥化和葛铭, 2002; 杨伟利等, 2017; 王龙等, 2018)。为了能更好地对研究区三级层序进行划分, 笔者尝试结合旋回地层学理论及信号分解技术, 以定量的方式识别研究区三级层序的频率, 进而分析三级层序与天文轨道参数周期之间的关系, 合理划分三级层序 (旋回), 并进行沉积时限、沉积速率的估算。

1 区域地质背景

研究区位于鄂尔多斯盆地南缘, 北起甘肃省庆阳市, 南到陕西省麟游县, 西至甘肃省陇县, 东抵陕西省铜川市, 包含伊陕斜坡、渭北隆起以及天环凹陷 3 个构造单元 (周进高等, 2020; 李文厚等, 2021; 孟卫工等, 2021; 赵航和冯永超, 2024; 王翔等, 2024) (图 1)。该区奥陶系发育完整, 主要有下奥陶统冶里组、亮甲山组、马家沟组马一段、马二段和马三段, 中奥陶统马家沟组马四段、马五段和马六段, 上奥陶统平凉组和背锅山组; 奥陶系与下伏寒武系连续沉积, 而与上覆石炭系呈不整合接触关系 (王香增等, 2022)。于春勇 (2019)、师平等 (2021) 和师平等 (2022) 对于鄂尔多斯地块南缘奥陶系划分与对比进行了系统的总结, 盆地不同区域对于奥陶系划分以及命名具有一定区别, 整体上冶里组—亮甲山组、马家沟组与平凉组—背锅山组的分层界限是一致的, 同时通过盆地南缘野外地质剖面的碳氧同位素与全球标准剖面的碳

同位素的对比 (付金华等, 2020), 进而确定鄂尔多斯盆地南缘奥陶系各组与国际地质年代表之间的关系, 笔者划分方案与上述学者一致, 奥陶系沉积时限在 $485.4 \pm 1.9 \sim 443.8 \pm 1.5$ Ma 之间 (图 2)。

2 旬探 1 井旋回地层学分析

2.1 研究方法

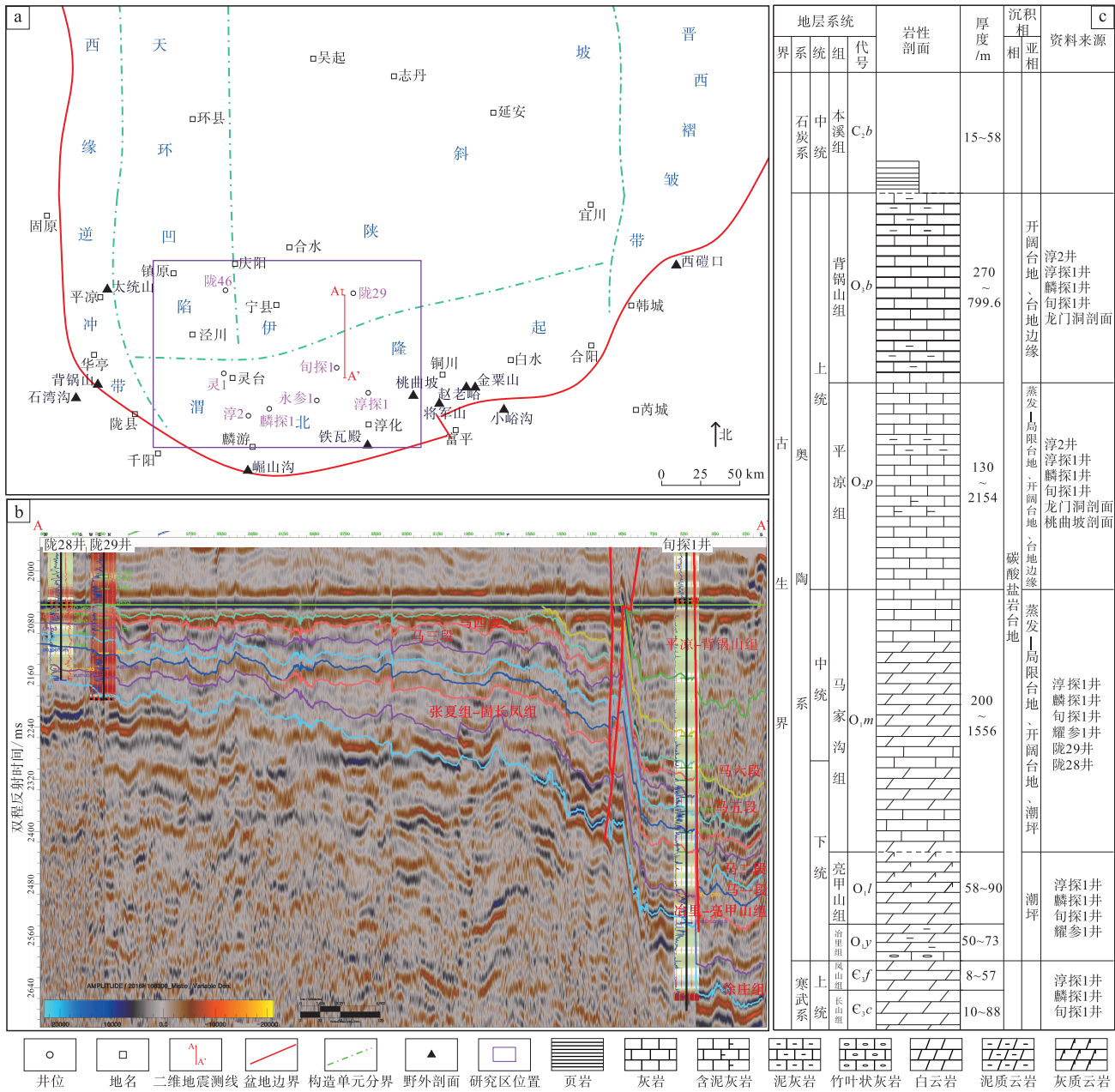
时间序列分析是旋回地层学研究的主要方法, 在选取合理古气候替代指标基础上进行数据预处理、频谱分析、滤波和天文调谐等计算步骤, 便可提取单井或地质剖面中的天文旋回信号 (Mann and Lees, 1996; Weedon, 2003; Li *et al.*, 2018a, 2019), 北京大学李明松老师开发的 Acycle 软件可完成旋回地层学分析中数据处理。下载地址为: <https://acycle.org>。

选用自然伽马数据作为古气候替代指标来对旬探 1 井进行旋回地层学分析。对自然伽马曲线按照 0.125 m 进行数据插值以及使用稳健局部加权回归散点平滑法 (rLOWESS) 来进行去趋势分析。基于 Waltham (2015) 方案作为天文解决方案 (图 3), 使用相关系数法进行沉积速率评估 (Meyers and Sageman, 2007; Meyers, 2015; Li *et al.*, 2019), 通过 MTM 频谱分析来识别奥陶系天文轨道周期信号 (Kodama and Hinnov, 2014), 识别 405 ka 长偏心率信号, 并使用高斯带通滤波将 405 ka 天文信号提取出来, 进行天文调谐。本次研究选取旬探 1 井进行旋回地层学分析, 该井沉积地层较为完整, 受风化壳岩溶作用较小, 适合开展旋回地层学分析, 建立奥陶系的“浮动”天文年代标尺。

旬探 1 井冶里组—亮甲山组与马家沟组之间发育明显不整合面, 故进行分段分析: (1) 冶里组—亮甲山组 ($3851.2 \sim 4000.0$ m) 和 (2) 马家沟组和平凉组—背锅山组 ($2691.5 \sim 3851.2$ m)。对以上 2 段自然伽马数据使用相关系数方法 (Correlation coefficient, COCO) 来估算最佳沉积速率, 且进行 5000 次 Monte Carlo 模拟, 绘制演化相关系数图 (Evolutionary Correlation Coefficient, eCOCO) 来研究沉积速率在纵向上的变化规律。

2.2 冶里组—亮甲山组 ($3851.2 \sim 4000.0$ m)

经相关系数法估算该段地层最佳沉积速率为



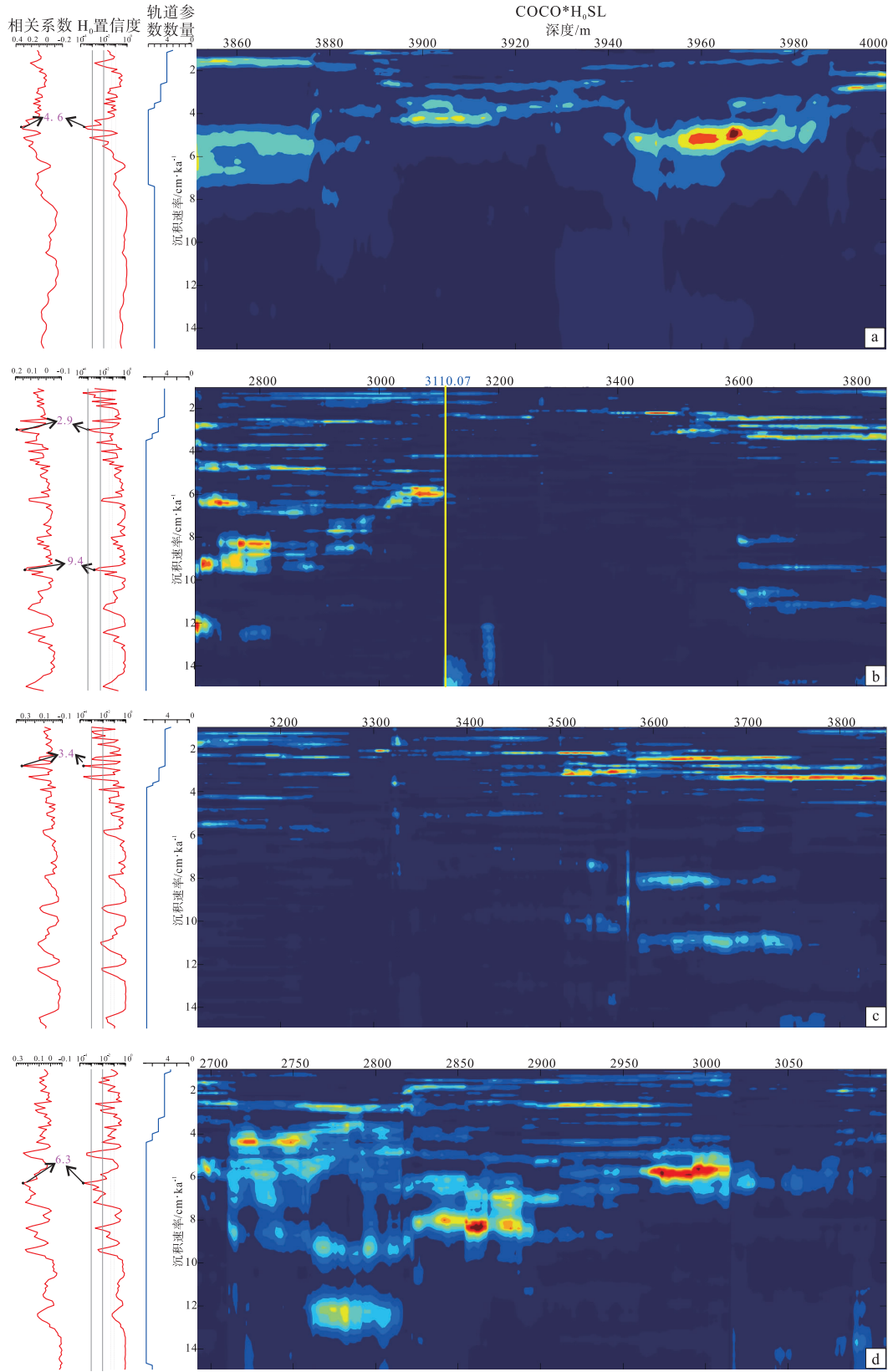
a—鄂尔多斯盆地南缘构造图及研究区位置；b—过陵28井、陵29井和旬探1井的二维地震剖面（奥陶系顶层拉平）；
c—鄂尔多斯盆地南缘奥陶系综合柱状图

图 1 鄂尔多斯盆地南缘综合地质背景图

Fig. 1 Comprehensive geological background map of the southern margin of Ordos Basin

4.6 cm/ka (Waltham 方案, 分析数据年龄中值设置为 480 Ma)。从演化相关系数图中可以发现 3851.2 ~ 3876.23 m 之间的沉积速率为 ~5.6 cm/ka, 3876.23~3944.76 m 之间的沉积速率为 ~4.2 cm/ka, 3944.76~3989.28 m 之间的沉积速率 ~5.2 cm/ka (图 4-a)。经 MTM 频谱分析可知置信度超 90% 的波峰有 7 个 (图 5-e; 表 1)。结合最佳沉积速率, 可以发现 16.528 m 波峰接近

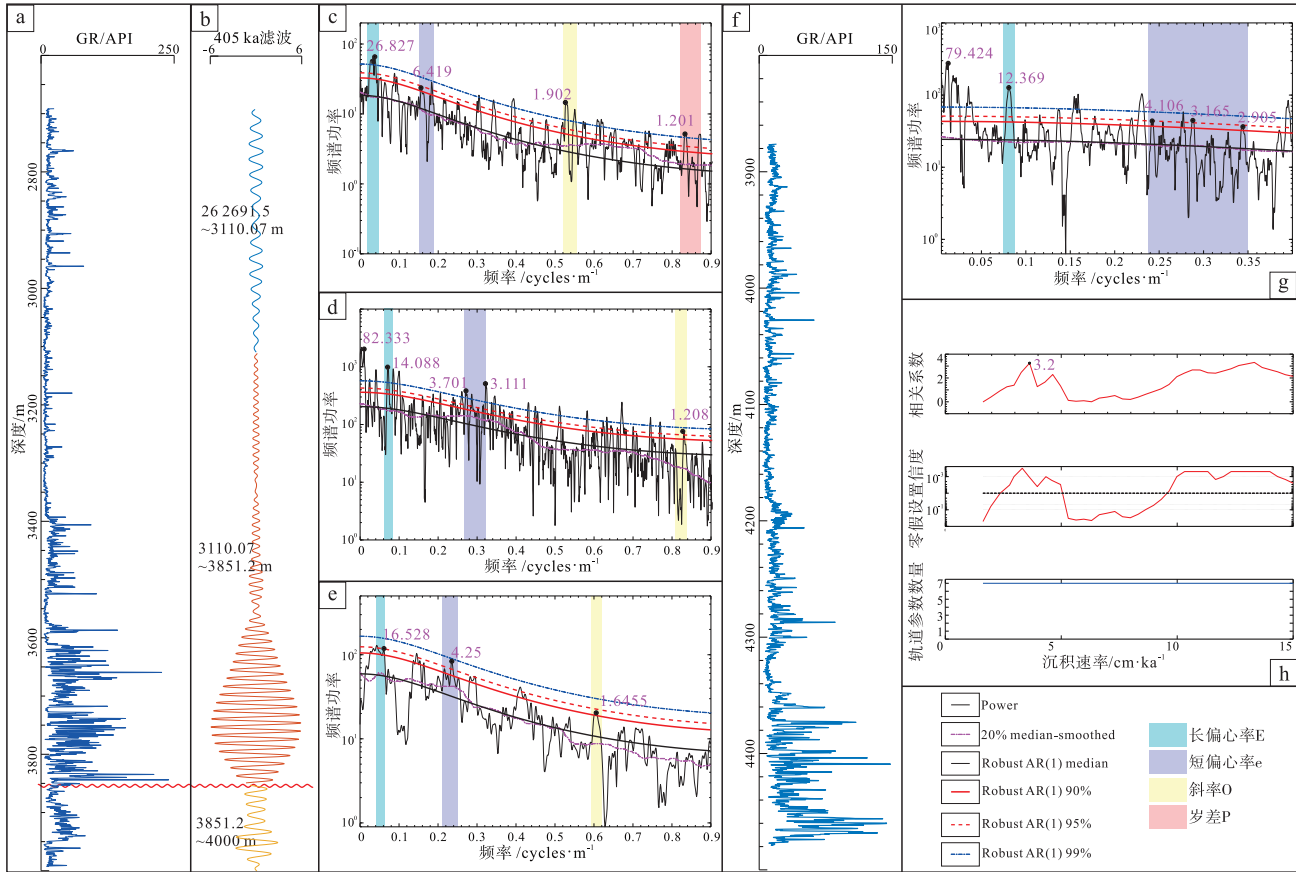
405 ka 长偏心率周期, 4.250 m 波峰接近 ~100 ka 短偏心率周期, 1.645 m 波峰接近 ~32 ka 斜率周期。据此对 16.528 m 波峰进行高斯带通滤波 (滤波带宽为 0.053781 ± 0.010756 cycles/m), 识别出 ~8 个长偏心率周期, 经天文调谐计算该段地层沉积时限 ~3.25 Ma (图 5-b)。从时间域的 MTM 频谱分析中可以发现, 3851.2~4000.0 m 沉积序列存在 405 ka、~160 ka、~100 ka、~56 ka 和 ~32 ka



a—井深 3851.2~4000.0 m; b—井深 2691.5~3851.2 m; c—井深 3110.07~3851.2 m; d—井深 2691.5~3110.07 m

图 4 旬探 1 井奥陶系各井段基于相关系数法计算的沉积速率

Fig. 4 Sedimentation rates calculated based on correlation coefficient method in each section of the Ordovician in Well XT1



a—旬探 1 井奥陶系自然伽马曲线；b—旬探 1 井奥陶系长偏心率滤波结果；c—旬探 1 井 2691.5~3110.07 m 频谱分析结果；d—旬探 1 井 3110.07~3851.2 m 频谱分析结果；e—旬探 1 井 3851.2~4000.0 m 频谱分析结果；f—麟探 1 井 3876.2~4480.0 m（主要为马家沟组）自然伽马曲线；g—麟探 1 井 3876.2~4480.0 m（主要为马家沟组）频谱分析结果；h—麟探 1 井 3876.2~4480.0 m（主要为马家沟组）基于相关系数法计算的沉积速率

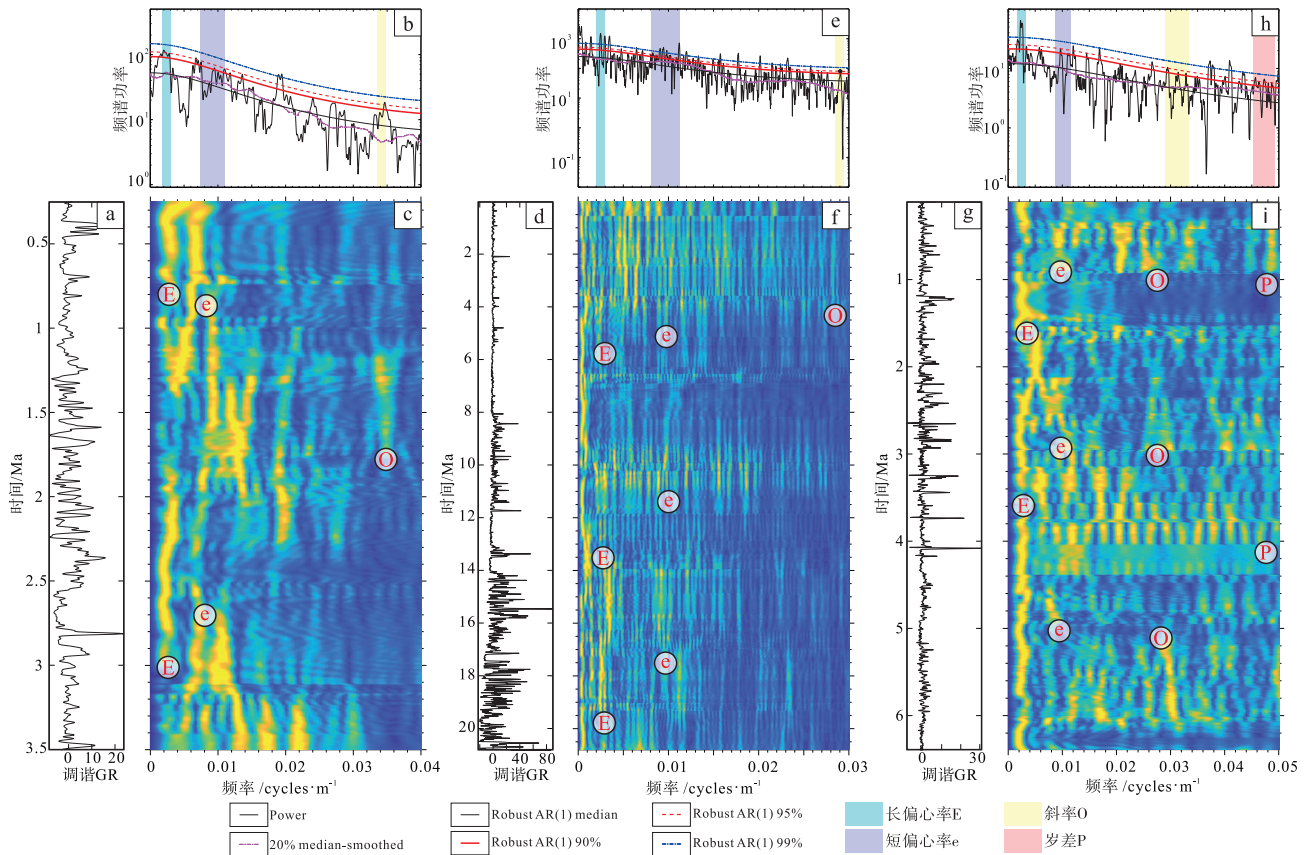
图 5 旬探 1 井和麟探 1 井旋回地层学分析结果

Fig. 5 Cyclostratigraphic analysis results of Wells XT1 and LT1

表 1 旬探 1 井奥陶系各井段 MTM 频谱分析结果

Table 1 MTM spectrum analysis results for each well section of the Ordovician in Well XT1

深度范围 /m	沉积速率 /cm·ka ⁻¹	置信度超 90%的波峰/m	波峰对应频率/cycles·m ⁻¹	对应天文周期
3851.2~4000.0	4.2~5.6	23.242, 16.528, 6.887, 4.250, 3.381, 2.431, 1.645	0.043, 0.061, 0.145, 0.235, 0.294, 0.413, 0.608	16.528 m 波峰对应 405 ka 长偏心率周期, 4.250 m 波峰对应 100 ka 短偏心率周期, 1.645 m 波峰对应 32 ka 斜率周期
3110.07~3851.2	2.2~5.5	97.5, 82.333, 40.714, 24.536, 14.088, 11.762, 10.041, 6.269, 4.862, 3.701, 3.111, 2.33, 1.963, 1.495, 1.347, 1.208	0.010, 0.012, 0.025, 0.04, 0.07, 0.084, 0.1, 0.16, 0.206, 0.270, 0.321, 0.43, 0.509, 0.669, 0.743, 0.828	14.088 m 波峰对应 405 ka 长偏心率周期, 3.701 m 波峰对应 125 ka 短偏心率周期, 3.111 m 波峰对应 95 ka 短偏心率周期, 1.208 m 波峰对应 33 ka 斜率周期
2691.5~3110.07	4.3~9.3	30.326, 26.827, 11.372, 6.419, 5.463, 3.295, 2.935, 2.543, 1.902, 1.824, 1.648, 1.201, 1.153	0.033, 0.037, 0.088, 0.156, 0.183, 0.303, 0.341, 0.341, 0.392, 0.526, 0.549, 0.606, 0.833	26.827 m 波峰对应 405 ka 长偏心率周期, 6.419 m 波峰对应 95 ka 短偏心率周期, 1.902 m 波峰对应 33 ka 斜率周期



a—旬探1井 3851.2~4000.0 m 调谐 GR; b—旬探1井 3851.2~4000.0 m 调谐 GR 频谱分析图; c—旬探1井 3851.2~4000.0 m 调谐 GR 滑动窗口频谱图, 滑动窗口为 600 ka; d—旬探1井 3110.07~3851.2 m 调谐 GR; e—旬探1井 3110.07~3851.2 m 调谐 GR 频谱分析图; f—旬探1井 3110.07~3851.2 m 调谐 GR 滑动窗口频谱图, 滑动窗口为 3000 ka; g—旬探1井 2691.5~3110.07 m 调谐 GR; h—旬探1井 2691.5~3110.07 m 调谐 GR 频谱分析图; i—旬探1井 2691.5~3110.07 m 调谐 GR 滑动窗口频谱图, 滑动窗口为 600 ka

图 6 旬探 1 井奥陶系各井段时间域 MTM 频谱分析和滑动窗口分析

Fig. 6 The 2π MTM spectrum analysis, evolutionary Fast Fourier Transform (eFFT) analysis and astronomical time scale of in the Ordovician of Well XT1

为 3.4 cm/ka (使用 Waltham 方案, 分析数据年龄中值设置为 470 Ma), 从演化相关系数图中可知, 3110.07 ~ 3272.7 m 之间的沉积速率 ~ 2.4 ~ 5.5 cm/ka, 3272.7 ~ 3851.2 m 之间的沉积速率 ~ 2.2~3.4 cm/ka (图 4-c)。对该段地层的 GR 进行 MTM 频谱分析, 发现置信度超 95% 的波峰主要有 16 个(图 5-d; 表 1)。结合最佳沉积速率, 发现 14.088 m 波峰与 405 ka 长偏心率周期对应, 3.701 m 波峰与 ~ 125 ka 短偏心率周期接近, 3.111 m 波峰与接近 ~ 95 ka 短偏心率周期, 而 1.208 m 周期与 ~ 33 ka 斜率周期接近。据此对 14.088 m 波峰进行高斯带通滤波 (滤波带宽为 0.070445 ± 0.041694 cycles/m), 识别出约 53 个长偏心率周期, 进行调谐并建立浮动天文标尺, 该段

地层沉积时限 ~ 21 Ma (图 5-b)。从时间域的 MTM 频谱分析中可以发现, 3110.07~3851.2 m 沉积序列置信度超 95% 的周期有 ~ 2.4 Ma、~ 1162 ka、405 ka、~ 155 ka、~ 125 ka、~ 95 ka、~ 57 ka、~ 43 ka 以及 ~ 33 ka, 并且从演化频谱图中可以发现接近直线的 ~ 2.4 Ma 超长偏心率周期信号和 405 ka 长偏心率周期信号, ~ 125 ka 短偏心率周期信号和 ~ 95 ka 短偏心率周期信号相对不明显(图 6-b; 表 1)。

2.3.2 2691.5~3110.07 m

此段沉积地层主要为平凉组—背锅山组, 具有较快的沉积速率, 经相关系数法估算后可知, 最佳沉积速率为 6.3 cm/ka (使用 Waltham 方案, 分析数据年龄中值设置为 450 Ma), 从演化相关系数图中可以发现, 2691.5 ~ 2763.54 m 之间的沉积速率

~4.3 cm/ka, 2763.54 ~ 2820.52 m 之间的沉积速率~9.3 cm/ka, 2820.52 ~ 2889.5 m 之间的沉积速率~8.2 cm/ka, 2820.52 ~ 3110.07 m 之间的沉积速率~5.7 cm/ka (图 4-d)。对该段地层的 GR 数据进行 MTM 频谱分析, 其置信度超 95% 波峰主要有 13 个(图 5-c; 表 1)。结合最佳沉积速率, 发现 26.827 m 波峰接近 405 ka 长偏心率周期, 6.419 m 波峰接近~95 ka 短偏心率周期, 1.902 m 波峰接近~33.3 ka 斜率周期。据此对 26.827 m 波峰进行高斯带通滤波(滤波带宽为 0.037276 ± 0.03802 cycles/m), 识别出~15 个长偏心率周期, 进行调谐并建立浮动天文标尺, 该段地层沉积时限~6.4 Ma (图 5-b)。从时间域的 MTM 频谱分析中可以发现, 2691.5 ~ 3110.07 m 沉积序列置信度超 95% 的周期有 405 ka、~160 ka、~92 ka、~80 ka 以及~37 ka, 从演化频谱图中可以发现接近直线的 405 ka 长偏心率周期信号, ~95 ka 短偏心率周期信号和~37 ka 斜率周期信号仅在沉积序列中部较为明显(图 6-c; 表 1)。

3 三级层序与天文旋回的关系

针对鄂尔多斯盆地奥陶系的层序划分, 国内多数学者对此做了大量的研究, 多集中于鄂尔多斯盆地中部马家沟组的层序划分, 划分方案各不相同, 有些按照马家沟组属于下奥陶统, 将马家沟组划分为 3~5 个三级层序; 有些划分方案按马家沟组属于中奥陶统, 将马家沟组划分为 2 个三级层序(杨伟利等, 2017; 王龙等, 2018; 杨友运等, 2019; 周进高等, 2020), 杨友运等(2019)对盆地南缘的麟探 1 井划分了 12 个三级层序, 付金华等(2020)对盆地南缘的旬探 1 井进行了三级层序划分, 共识别出 7 个三级层序。史晓颖(1996)、孟祥化和葛铭(2002)、杨伟利等(2017)在研究中朝地台早古生代层序地层格架及演化过程中, 结合地层、岩性、古生物、地球化学等多项数据, 认为奥陶系三级层序的最佳时限应介于 2~5 Ma 之间。前人对层序的划分一般基于层序界面的识别, 很难给出明确的沉积时限以及沉积速率。在进行旬探 1 井旋回地层学分析前, 结合前人研究成果(郭彦如等, 2012; 杜金虎等, 2019; 杨友运等, 2019; 付金华等, 2020; 杨华等, 2021), 使用自然伽马、光电吸收截面、电阻率及声波时差

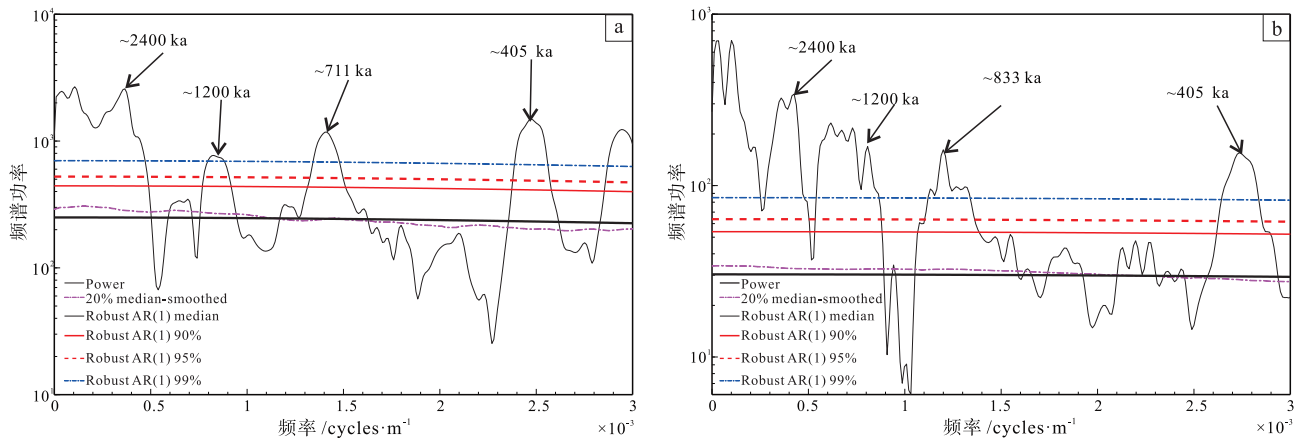
等曲线以及岩性特征来识别层序界面, 进而对旬探 1 井奥陶系进行地质角度的三级层序划分, 每个三级层序测井曲线变化韵律明显, 海侵体系域的自然伽马与电阻率曲线组合形态一般为钟型, 高位体系域为漏斗型, 为探索旬探 1 井中存在的长周期天文信号提供基础。

三级层序可以同时受构造作用和天文轨道力作用的影响, Boulila 等(2011)和梅冥相(2015)曾提出“海平面变化层序”的概念。中新生代的三级层序与天文旋回已经建立对应关系, 即新生代的三级层序与长斜率调节作用旋回存在成因联系, 周期~1.2 Ma; 中生代三级层序与偏心率调节作用旋回有关, 周期~2.4 Ma。由于受固有的极地冰盖动力学、温室效应气体的影响和构造运动等的影响, 长周期调节作用旋回运用到更古老的地质时代可能会存在一些困难。奥陶纪早中期, 地球的温室效应较强, 大气中二氧化碳浓度较高, 导致全球气候相对温暖, 促进了海洋生物的繁荣, 温室气体的高浓度维持温暖的海洋环境, 非常适合碳酸盐沉积, 因此鄂尔多斯盆地奥陶系沉积了中厚层的碳酸盐岩。在奥陶纪晚期, 尤其是赫南特期(约 4.45 亿年前), 温室气体浓度的下降导致全球气温下降, 导致南极附近的冈瓦纳大陆上形成了大规模的极地冰盖, 这一冰盖的形成和扩展直接影响了海平面变化和沉积环境, 鄂尔多斯盆地南缘多数缺失赫南特期沉积地层(包括旬探 1 井)(Gibbs *et al.*, 1999; Villas *et al.*, 2002; Longman *et al.*, 2021)。鄂尔多斯盆地南缘经历了以下 4 个阶段构造演化历史: 冶里期—亮甲山期, 前陆盆地初始挠曲阶段; 马一期—马五期, 前陆盆地结构成型阶段; 马六期—平凉期, 前陆盆地快速沉降阶段; 背锅山期, 前陆盆地快速充填阶段(师平平, 2022)。旬探 1 井构造活动相对较弱, 主要沉积环境是相对平静的海洋环境, 从过旬探 1 井的地震剖面上(图 1-b), 可以发现旬探 1 井下古生界沉积比较完整, 地层产状较为平坦, 同时不发育断层, 比较适合旋回地层学分析。偏心率主要周期为~9 Ma、~2.4 Ma、405 ka、~125 ka、~100 ka 和~95 ka, 偏心率周期性的变化主要是金星和木星运行产生的万有引力作用在地球轨道上造成的(Li *et al.*, 2019; 许可, 2021)。前面对旬探 1 井 3110.07 ~ 3851.2 m 进行 MTM 频谱, 发现存在 82.25 m 和 97.4013 m 波峰,

若按照 3110.07~3851.2 m 井段 405 ka 的主要沉积速率 3.4 cm/ka 进行计算, 82.25 m 和 97.401 m 波峰的沉积时限分别为 2419.118 ka 和 2864.744 ka, 因此 82.25 m 和 97.4013 m 这 2 个波峰可能与超长偏心率~2.4 Ma 对应, 对应频率分别为 0.0122 cycles/m 和 0.0105 cycles/m, 由于 2 个长周期在频谱图中分布较近, 取二者频率均值 0.0114 cycles/m 进行高斯带通滤波, 得到~2.4 Ma 超长偏心率周期滤波曲线。此外, 为了能更好地研究~2.4 Ma 超长偏心率周期在研究区奥陶系中存在的普遍性, 所以选取麟探 1 井的 3876.2~4480.0 m (主要为马家沟组, 因为冶里组—亮甲山组和平凉组—背锅山组~2.4 Ma 超长偏心率周期信号不明显)进行了频谱分析, 从频谱图中可以发现置信度超 95%的波峰主要有 11 个 (94.316 m、79.424 m、46.433 m、28.207 m、12.420 m、6.301 m、4.336 m、4.101 m、6.301 m、3.465 m、2.905 m), 与旬探 1 井波峰分布相似, 结合相关系数法估算沉积速率为 3.2 cm/ka, 可以判断 79.424 m 波峰对应~2.4 Ma 超长偏心率周期(图 5-g, 5-h)。结合上述分析, 旬探 1 井和麟探 1 井中均发现~2.4 Ma 超长偏心率信号和~1.2 Ma 超长斜率信号(图 7), 结合旬探 1 井从地质角度划分的三级层序, 其与~2.4 Ma 超长偏心率周期沉积地层厚度具有较好的对应关系, 因此作者尝试探索使用~2.4 Ma 超长偏心率周期来对旬探 1 井的三级层序进行划分。

在识别沉积地层中的米氏旋回时, 小波变换也常被应用, 通常是选用合适的小波基函数, 然后使

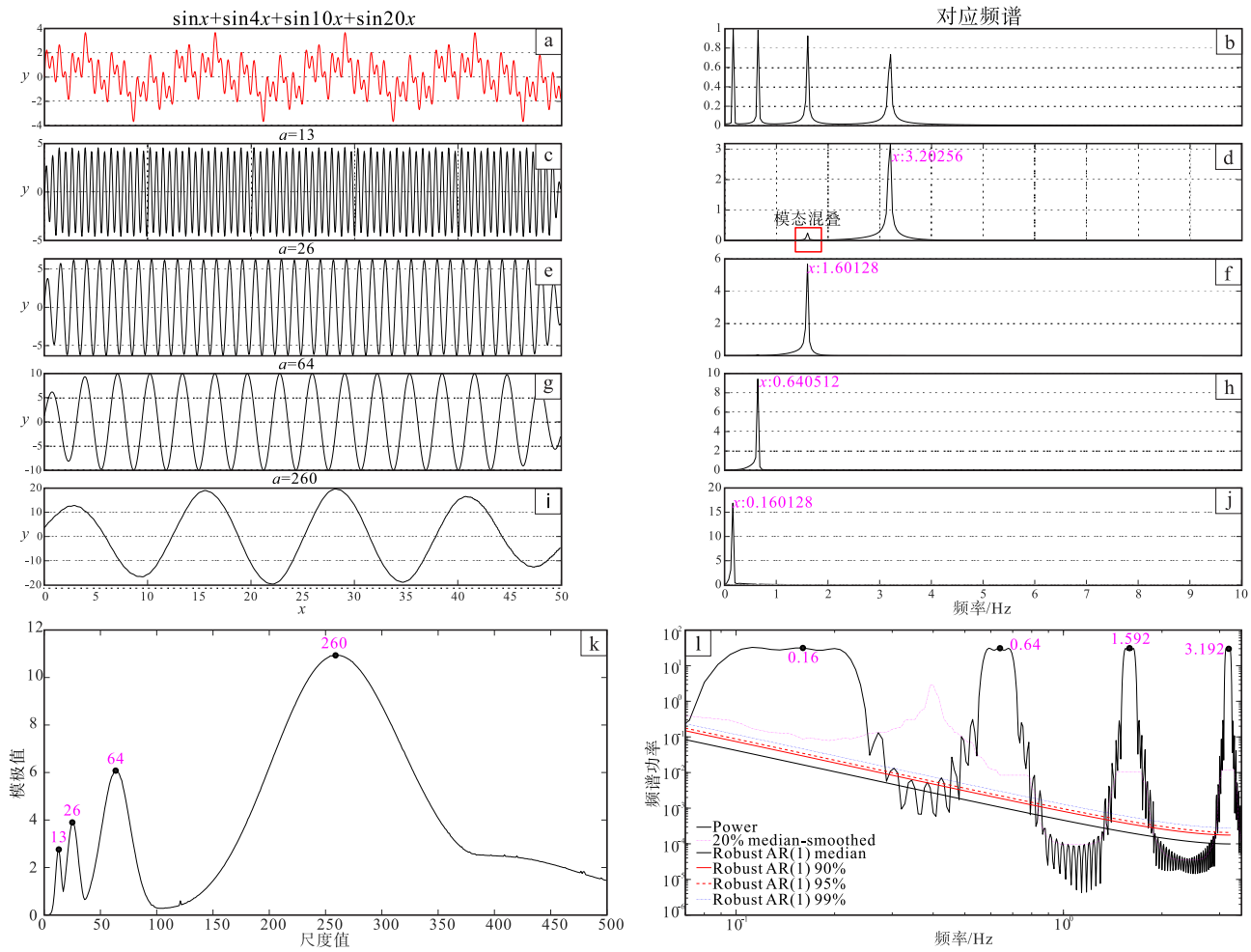
用 Matlab 自带的小波分析工具包中的一维连续小波变换 (Continuous Wavelet 1-D) 求取替代指标参数的模极大值, 通过对各个模极大值的比例关系来确定不同尺度天文周期的关系, 但此种方法确定的模极大值可能存在偏差, 虽然模极大值的比例关系与天文轨道参数周期的比例一致, 但也会存在模极大值与天文轨道周期对应出错的问题 (Laskar *et al.*, 2004; 王浩, 2020; 刘冬洋, 2021; 刘天娇等, 2022; 张家明等, 2023)。其实 MTM 频谱分析中各个旋回的频率与小波变换中尺度的频率具有较好的对应关系, 结合相关系数法以及 MTM 频谱分析, 分析小波变换模极大值对应尺度的频率, 便可以很好地解决这个问题(图 8)。如使用小波变换的方法来识别旬探 1 井 3110.07~3851.2 m 井段的天文旋回时 (选用 Morlet 小波基, 采样间隔为 0.125 m), 其模极大值对应的尺度分别为 27、42、81、163、282 以及 566, 尺度 27 对应的频率为 0.241 cycles/m, 与~125 ka 短偏心率周期有关, 尺度 81 对应的频率为 0.081 cycles/m, 与 405 ka 长偏心率周期有关, 尺度 566 对应的频率为 0.011 cycles/m, 与上述 MTM 频谱分析的~2.4 Ma 超长偏心率周期有关(图 9-a)。综合使用 MTM 频谱分析法和小波变换来综合对研究区各井的三级层序进行划分, 并建立了各个三级层序与奥陶系各组段的对应关系。对于 2691.5~3110.07 m 井段和 3851.2~4000.0 m 井段的 MTM 频谱分析中, ~2.4 Ma 长偏心率周期信号不明显, 2691.5~3110.07 m 井段模极大值对应尺度为 47、73、181、500 和 700,



a—旬探 1 井; b—麟探 1 井

图 7 旬探 1 井 3110.07~3851.2 m 和麟探 1 井 3876.2~4480.0 m 调谐 GR 频谱分析

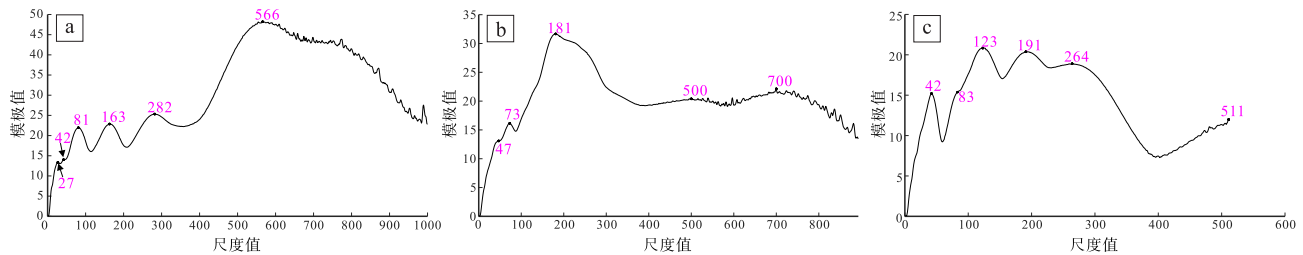
Fig. 7 Spectral analysis of tuned GR from 3110.07 m to 3851.2 m in Well XT1 and from 3876.2 m to 4480.0 m in Well LT1



a 和 b—原始信号以对应频谱; c 和 d—尺度 13 以对应频谱; e 和 f—尺度 26 以对应频谱; g 和 h—尺度 64 以对应频谱; i 和 j—尺度 260 以对应频谱; k—3110.07~3851.2 m 井段模极值曲线; l—2691.5~3110.07 m 井段 MTM 频谱分析图

图 8 旬探 1 井小波变换与 MTM 频谱分析关系

Fig. 8 Relationship between wavelet transform and MTM spectrum analysis of Well XT1



a—3110.07~3851.2 m; b—2691.5~3110.07 m; c—3851.2~4000.0 m

图 9 旬探 1 井奥陶系各井段模极值曲线

Fig. 9 Modular extreme curve of each well section in the Ordovician of Well XT1

其中尺度 73 的频率为 0.09 cycles/m 可能与 405 ka 长偏心率周期有关, 尺度 500 的频率为 0.012, 可能与 ~2.4 Ma 超长偏心率周期有关; 3851.2~4000.0 m 井段模极大值对应的尺度值为 42、83、123、191、264, 其中尺度 83 的频率为 0.078

cycles/m, 可能与 405 ka 长偏心率周期有关, 受沉积序列长度的限制, 该段沉积序列未能识别三级层序的尺度值, 但从模极值曲线变化趋势上看, 尺度在 500 左右会存在一个模极大值, 与 2691.5~3110.07 m 和 3110.07~3851.2 m 这 2 段数据分析

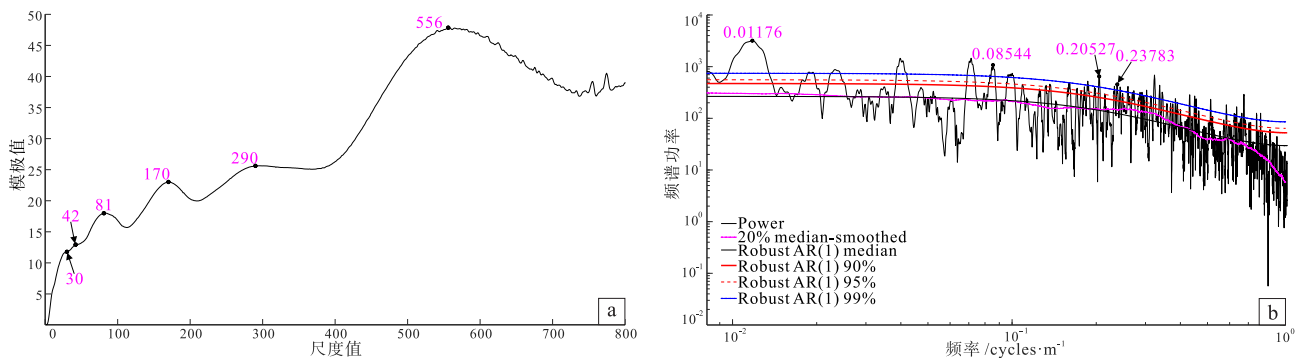
的结果相似(图 9-b, 9-c)。此外对甸探 1 井马家沟组和平凉组—背锅山组 (2691.5~3851.2 m) 进行了模极大值分析和 MTM 频谱分析, 发现模极大值对应尺度值分别为 30、42、81、170、290 和 556, 尺度 556 的频率为 0.011 cycles/m, 与 MTM 频谱分析中的 0.01176 cycles/m 接近(图 10)。综合来看, 甸探 1 三级层序频率值在 0.011 cycles/m 左右变化, 因此使用 0.011 cycles/m 作为该井三级层序的划分依据, 可将甸探 1 井划分为 13 个三级层序。

此外, 从甸探 1 井沉积噪音模型结果中可发现 DYNOT 和 $\rho 1$ 表现出几乎相同的曲线形态 (Li *et al.*, 2018b; Liu *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022), ~ 2.4 Ma 超长偏心率滤波曲线、小波变换尺度 $a = 566$ 曲线的极大值点对应于 DYNOT 和 $\rho 1$ 指示的水深处, 同时测井曲线表现出的现高伽马、低电阻的电性特征, 同时岩石中的泥质含量明显增多 (尤其在 Sq4—Sq8 中), 多种方法表现出较好的一致性, 进一步说明甸探 1 井基于旋回地层学分析划分的三级层序是可靠的。

与杨友运等 (2019) 和付金华等 (2020) 对鄂尔多斯盆地南缘奥陶系三级层序划分的结果相比, 发现 3 种对比方案在多数层序界面识别上吻合性较好, 海侵体系域与和高位体系域分别与 2.4 Ma 超长偏心率的下周期和上周期相对应, 旋回地层学分析结果更加细致并且具有时间属性。就旋回地层学分析结果而言, 冶里组—亮甲山组与三级层序 Sq1 和 Sq2 对应, 整体上为潮坪亚相, Sq1 相当于冶里组, 海侵体系域以白云质灰岩为主, 高

位体系域以泥质白云岩为主, Sq2 缺失高位体系域, 相当于亮甲山组下部, 岩性以灰质云岩为主。马家沟组包括 Sq3—Sq9 这 7 个三级层序, 其中 Sq3 与马一段对应, 受水体变浅及蒸发作用影响, 马一段岩性由底部的泥岩、泥质白云岩向上变为云质灰岩、云岩和膏岩, 为潮坪亚相; Sq4 相当于马二段, 海侵体系域主要发育泥质灰岩和泥岩, 高位体系域以云质泥岩、泥质灰岩和含灰云岩为主, 为潮坪亚相; Sq5 相当于马三段, 海侵体系域主要发育含灰云岩, 高位体系域以泥质白云岩为主, 并见膏岩, 为潮坪亚相; Sq6 相当于马四段, 海侵体系域主要发育泥质云岩和白云岩, 高位体系域以白云岩、灰质云岩为主, 为局限—开阔台地亚相; Sq7 相当于马五段, 海侵体系域主要发育灰岩、白云岩及含灰云岩, 高位体系域以云质灰岩、灰岩和白云岩为主, 为局限—开阔台地亚相; 马六段包括三级层序 Sq8 和 Sq9, 主要发育云质灰岩、泥质云岩、白云岩和灰质云岩, 为局限—开阔台地亚相; Sq5 相当于平凉组, 海侵体系域主要发育白云岩和灰质云岩, 高位体系域以灰岩为主, 为局限台地—台地边缘亚相; 背锅山组包括三级层序 Sq11、Sq12 以及 Sq13, 岩性以灰岩和云质灰岩为主, 为台地边缘亚相。考虑到奥陶系顶面曾遭受长达 ~ 140 Ma 的风化壳岩溶作用, 甸探 1 井奥陶系顶部被剥蚀, 因此背锅山组会缺失部分三级层序 (周进高等, 2020) (图 9)。

鄂尔多斯盆地南缘奥陶系的三级层序划分在该区油气勘探中具有重要的指导意义。三级层序的识别与划分能够为沉积相带的识别提供精确的地质框



a—模极大值曲线; b—MTM 频谱分析图

图 10 甸探 1 井马家沟组和平凉组—背锅山组 (2691.5~3851.2 m) 模极大值曲线和 MTM 频谱分析

Fig. 10 Modular extreme curve and MTM spectrum analysis of the Majiagou Formation and Pingliang-Beiguoshan Formations (2691.5~3851.2 m) of Well XT1

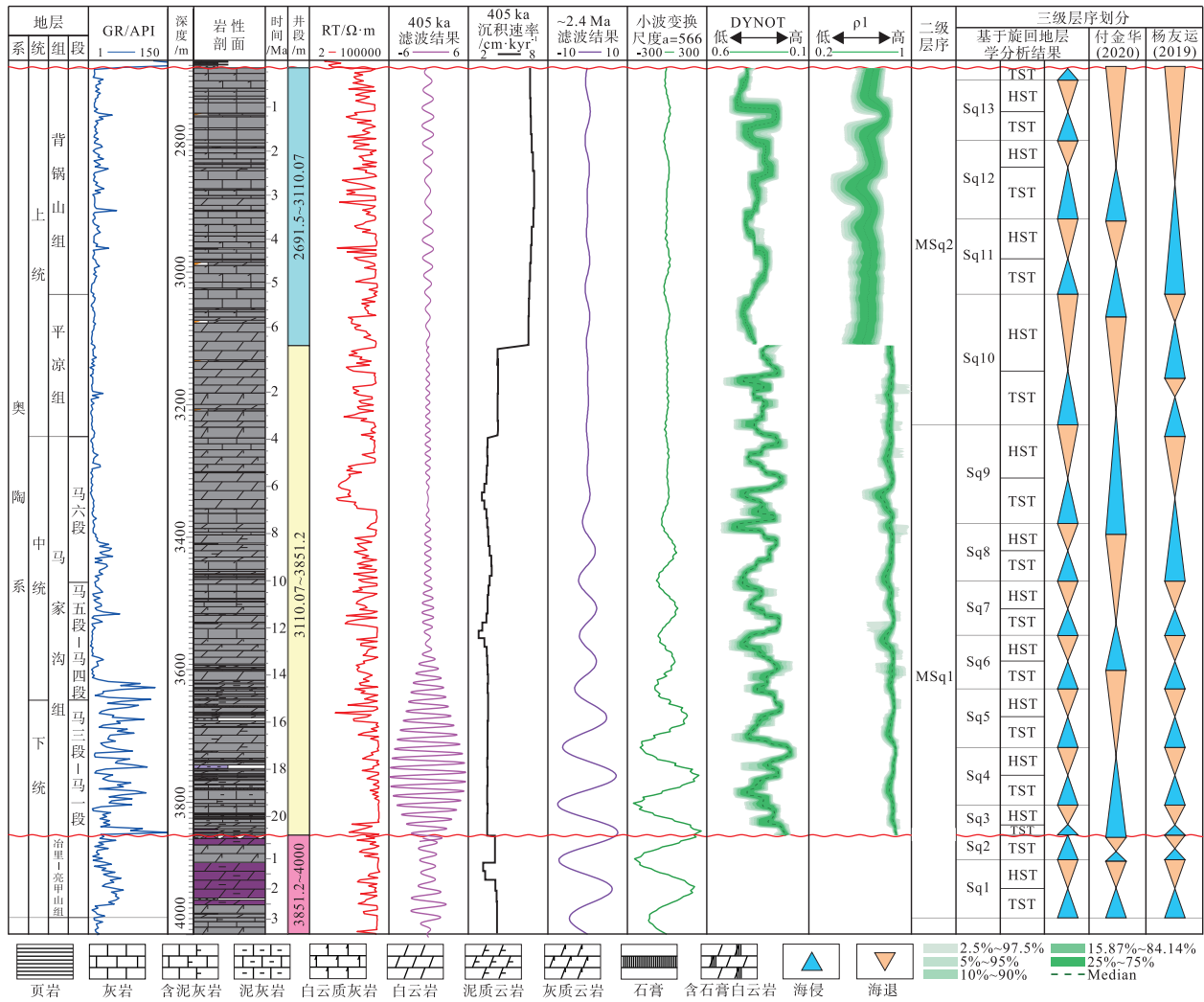


图 11 旬探 1 井奥陶系三级层序划分柱状图

Fig. 11 Column diagram of the third-order sequence division of Ordovician in Well XT1

架，尤其是在碳酸盐岩台地环境中，各层序体系域内相带的发育特征可以有效推断储集层的空间分布。层序界面通常伴随显著的岩性变化，这些变化可能形成有效的岩性圈闭结构，此外，三级层序界面的连通性和裂缝系统为油气的运移提供了关键通道，通过三级层序的精细划分，识别层序界面，可以预测油气的运移路径及其聚集区并且能够更加准确地预测储集层的位置，为钻探工作提供有力支持。总体而言，三级层序的划分不仅有助于揭示沉积环境的演变，还为油气勘探提供了关键的地质信息，从而显著提高勘探的成功率和经济效益。

4 结论

1) 奥陶系中存在显著的米兰科维奇信号，

405 ka、125 ka 和 ~33 ka 的显著周期分别代表长偏心率、短偏心率和斜率，这些旋回信号表明奥陶系的沉积过程受到天文轨道力的影响，体现了气候变化对沉积环境的周期性控制。

2) 马家沟期沉积速率相对较慢，在 2.2 ~ 5.5 cm/ka 之间变化；平凉期—背锅山期为前陆盆地快速沉降和充填阶段，沉积速率变快，在 4.3 ~ 9.3 cm/ka 之间变化；使用 405 ka 长偏心率旋回周期建立年龄模型，进行天文调谐，分别建立了冶里—亮甲山组和马家沟组—背锅山组的浮动天文标尺，沉积时限分别为 ~3.25 Ma 和 ~27.4 Ma。

3) 结合小波变换模极大值对应尺度的频率分析，发现旬探 1 井的三级层序可能与 ~2.4 Ma 超长偏心率周期相关，其频率约为 0.011 cycles/m，并以此作为划分三级层序的依据，奥陶系的三级层序

划分受到超长周期天文轨道变化的控制,为理解奥陶系的沉积规律提供了新的视角。

参考文献 (References)

- 陈留勤. 2008. 从准层序到米级旋回: 层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带. 地层学杂志, 32(4): 447-454. [Chen L Q. 2008. From parasequences to meter-scale cycles: the connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 32(4): 447-454]
- 杜金虎, 李相博, 包洪平, 徐旺林, 王雅婷, 黄军平, 王宏波, 完颜容, 王菁. 2019. 鄂尔多斯盆地中新元古界—下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域. 石油勘探与开发, 46(5): 820-835. [Du J H, Li X B, Bao H P, Xu W L, Wang Y T, Huang J P, Wang H B, Wan Y R, Wang J. 2019. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 820-835]
- 付金华, 郭彦如, 赵振宇, 张月巧. 2020. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理. 北京: 石油工业出版社. [Fu J H, Guo Y R, Zhao Z Y, Zhang Y Q. 2020. Ordovician Sequence Lithofacies Paleogeography of the Ordos Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 郭彦如, 赵振宇, 付金华, 徐旺林, 史晓颖, 孙六一, 高建荣, 张延玲, 张月巧, 刘俊榜, 刘虹. 2012. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理. 石油学报, 33(S2): 95-109. [Guo Y R, Zhao Z Y, Fu J H, Xu W L, Shi X Y, Sun L Y, Gao J R, Zhang Y L, Zhang Y Q, Liu J B, Liu H. 2012. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(S2): 95-109]
- 李文厚, 张倩, 李克永, 陈强, 郭艳琴, 马瑶, 冯娟萍, 张道锋. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化. 古地理学报, 23(1): 39-52. [Li W H, Zhang Q, Li K Y, Chen Q, Guo Y Q, Ma Y, Feng J P, Zhang D F. 2021. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(1): 39-52]
- 刘冬洋. 2021. 华南中三叠统旋回地层学研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Liu D Y. 2021. Cyclostratigraphic study of the Middle Triassic Series in South China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan)]
- 刘天娇, 张妍超, 赵迪斐. 2022. 四川盆地焦石坝地区五峰组龙马溪组页岩层序地层划分及含气性预测: 以 JY2 井为例. 非常规油气, 9(2): 34-41. [Liu T J, Zhang Y Y, Zhao D F. 2022. Sequence stratigraphic division and gas bearing prediction of the Wufeng-Longmaxi Formation shale strata in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin: taking Well JY-2 as an example. *Unconventional Oil & Gas*, 9(2): 34-41]
- 梅冥相. 2015. 从沉积层序到海平面变化层序: 层序地层学一个新进展. 地层学杂志, 39(1): 58-73. [Mei M X. 2015. From parasequences to meter-scale cycles: the connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 39(1): 58-73]
- 孟卫工, 李晓光, 吴炳伟, 宫振超, 董德胜, 刘媛媛, 咸秀明. 2021. 鄂尔多斯盆地宁古 3 井太原组铝岩系天然气成藏特征及地质意义. 中国石油勘探, 26(3): 79-87. [Meng W G, Li X G, Wu B W, Gong Z C, Dong D S, Liu Y Y, Xian X M. 2021. Research on gas accumulation characteristics of aluminiferous rock series of Taiyuan Formation in Well Ninggu 3 and its geological significance, Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(3): 79-87]
- 孟祥化, 葛铭. 2002. 中朝板块旋回层序、事件和形成演化的探索. 地学前缘, 9(3): 125-140. [Meng X H, Ge M. 2002. Research on cyclic sequence events and formational evolution of the Sino-Korea Plate. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 125-140]
- 任传真. 2020. 华南宜昌地区中一晚奥陶世地层旋回地层学研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Ren C Z. 2020. Cyclostratigraphy study of the Middle-Late Ordovician in Yichang, South China. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 师平平. 2022. 鄂尔多斯地块南缘奥陶纪前陆盆地结构与演化. 浙江大学硕士学位论文. [Shi P P. 2022. Structure and evolution of Ordovician foreland basin on the southern margin of Ordos block. Masteral dissertation of Zhejiang University]
- 师平平, 肖安成, 付金华, 吴磊, 周义军, 王依平, 覃素华, 张万福. 2021. 鄂尔多斯地块南缘奥陶纪前陆盆地的沉积大地构造格架与演化. 岩石学报, 37(8): 2531-2546. [Shi P P, Xiao A C, Fu J H, Wu L, Zhou Y J, Wang Y P, Qin S H, Zhang W F. 2021. The sedimentary and tectonic framework of the Ordovician foreland basin in the southern margin of the Ordos Block and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2531-2546]
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 黄振凯, 张瑞. 2019. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分. 石油与天然气地质, 40(6): 1205-1214. [Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, Huang Z K, Zhang R. 2019. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1205-1214]
- 史晓颖. 1996. 35 Ma 地质历史上一个重要的自然周期. 地球科学, 31(3): 3-10. [Shi X Y. 1996. 35 Ma: an important natural periodicity in geological history: concept and causes of natural crisis. *Earth Science*, 31(3): 3-10]
- 田军, 吴怀春, 黄春菊, 李明松, 马超, 汪品先. 2022. 从 40 万年长偏心率周期看米兰科维奇理论. 地球科学, 47(10): 3543-3568. [Tian J, Wu H C, Huang C J, Li M S, Ma C, Wang P X. 2022. Revisiting the Milankovitch Theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle. *Earth Science*, 47(10): 3543-3568]
- 王浩. 2020. 小波变换在测井曲线地层划分对比中的应用. 中国石油大学(北京)硕士学位论文. [Wang H. 2020. Application of wavelet transform in the stratigraphic division and correlation of well logs. Masteral dissertation of China University of petroleum (Beijing)]
- 王龙, 梅朝佳, 李屹尧, 赵静. 2018. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组层序地层特征及控藏作用. 东北石油大学学报, 42(3): 26-36. [Wang L, Mei C J, Li Y Y, Zhao J. 2018. Sequence stratigraphic features and their control over hydrocarbon accumulation of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin. *Journal of Northeast*

- Petroleum University, 42(3): 26-36]
- 王翔, 冯永超. 2024. 鄂尔多斯盆地南缘华北探区页岩油储层岩石力学特性实验研究. 非常规油气, 11(1): 110-118. [Wang X, Feng Y C. 2024. Study on rock mechanical properties of shale oil reservoir in North China exploration, southern Ordos Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 11(1): 110-118]
- 王香增, 曹红霞, 曹军, 高潮. 2022. 鄂尔多斯盆地延安地区下古生界天然气气源分析. 非常规油气, 9(6): 9-13. [Wang X Z, Cao H X, Cao J, Gao C. 2022. Analysis of natural gas source of Lower Paleozoic in Yan'an Area, Ordos Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 9(6): 9-13]
- 吴怀春, 钟阳阳, 房强, 杨天水, 李海燕, 张世红. 2017. 古生代旋回地层学与天文地质年代表. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 750-770. [Wu H C, Zhong Y Y, Fang Q, Yang T S, Li H Y, Zhang S H. 2017. Paleozoic cyclostratigraphy and astronomical time scale. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 750-770]
- 许可. 2021. 南襄盆地古近系湖盆旋回地层学研究及其在油气地质上的意义. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Xu K. 2021. Cyclostratigraphy and its implications for petroleum geology in the Paleogene lacustrine strata from the Nanxiang Basin: the case study of Biyang sag. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(WuHan)]
- 闫建平, 言语, 彭军, 李尊芝, 耿斌, 赖富强. 2017. 天文地层学与旋回地层学的关系、研究进展及其意义. 岩性油气藏, 29(1): 147-156. [Yan J P, Yan Y, Peng J, Li Z Z, Geng B, Lai F Q. 2017. The research progress, significance and relationship of astrostratigraphy with cyclostratigraphy. *Lithologic Reservoirs*, 29(1): 147-156]
- 杨华, 付金华, 陈洪德. 2021. 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩沉积地质与油气勘探新领域. 北京: 科学出版社. [Yang H, Fu J H, Chen H D. 2021. *New Frontiers in Sedimentary Geology of Carbonates and Oil & Gas Exploration in the Ordos Basin*. Beijing: Science Press]
- 杨伟利, 王起琮, 刘佳玮, 石堃, 魏巍. 2017. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组标准化层序地层学研究. 西安科技大学学报, 37(2): 234-241. [Yang W L, Wang Q C, Liu J W, Shi K, Wei W. 2017. Standardization of sequence stratigraphy in Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 37(2): 234-241]
- 杨友运, 赵永刚, 陈朝兵. 2019. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系生物礁滩分布与油气地质意义. 北京: 科学出版社. [Yang Y Y, Zhao Y G, Chen Z B. 2019. Distribution of Biostromes in the Ordovician of Southern Ordos Basin and Its Geological Significance for Oil and Gas. Beijing: Science Press]
- 于春勇. 2019. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡吴起—甘泉奥陶系马家沟组中下组合白云岩成因及其主控因素. 西北大学博士学位论文. [Yu C Y. 2019. Genesis and main controlling factors of the middle and lower dolomite of the Majiagou Formation in the Wuqi-Ganquan Ordovician, Yishan Slope, Ordos Basin. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 张家家, 刘东悦, 张妍煜, 刘天娇, 汪生秀, 焦伟伟, 赵迪斐, 郭英海. 2023. 深层页岩高分辨率层序地层控制的非均质性特征及其与含气性的关系: 以渝西地区 Z203 井为例. 非常规油气, 10(1): 52-60. [Zhang J M, Liu D Y, Zhang Y Y, Liu T J, Wang S X, Jiao W W, Zhao D F, Guo Y H. 2023. Heterogeneity characteristics of high-resolution sequence stratigraphic control in deep shale and its relationship with gas-bearing: a case study of the Well Z203 in western Chongqing Area. *Unconventional Oil & Gas*, 10(1): 52-60]
- 赵航, 罗腾跃, 贺沛, 孙建峰, 李涛. 2024. 鄂尔多斯盆地南部山西组致密储层的分形特征及其影响因素分析. 非常规油气, 11(2): 37-45. [Zhao H, Luo T Y, He P, Sun J F, Li T. 2024. Fractal characteristics and influencing factors of tight reservoirs in Shanxi Formation in southern Ordos Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 11(2): 37-45]
- 钟阳阳. 2019. 华南晚奥陶世米兰科维奇记录及其对太阳系行为的指示意义. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Zhong Y Y. 2019. Late Ordovician Milankovitch records in South China and their implications for Solar System behavior. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 周进高, 付金华, 于洲, 吴东旭, 丁振纯, 李维岭, 唐瑾. 2020. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要储层类型及其形成机制. 天然气工业, 40(11): 20-30. [Zhou J G, Fu J H, Yu Z, Wu D X, Ding Z C, Li W L, Tang J. 2020. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(11): 20-30]
- Berger A. 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics*, 26(4): 624-657.
- Berger A. 2013. *Milankovitch and Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing*. Springer Science & Business Media.
- Berger A. 2021. Milankovitch, the Father of paleoclimate modeling. *Climate of the Past*, 17(4): 1727-1733.
- Boulila S, Galbrun B, Miller K G, Pekar S F, Browning J V, Laskar J, Wright J D. 2011. On the Origin of Cenozoic and Mesozoic "third-order" eustatic sequences. *Earth-Science Reviews*, 109(3): 94-112.
- Boulila S, Galbrun B, Huret E, Hinnov L A, Rouget I, Gardin S, Bartolini A. 2014. Astronomical Calibration of the Toarcian Stage: implications for sequence stratigraphy and duration of the Early Toarcian Oae. *Earth and Planetary Science Letters*, 386: 98-111.
- Boulila S, Laskar J, Haq B U, Galbrun B, Hara N. 2018. Long-term cyclicities in Phanerozoic sea-level sedimentary record and their potential drivers. *Global and Planetary Change*, 165: 128-136.
- Boulila S, Brange C, Cruz A M, Laskar J, Gorini C, Dos Reis T, Silva C G. 2020. Astronomical pacing of Late Cretaceous third- and second-order sea-level sequences in the Foz Do Amazonas Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104382.
- Cong F, Zhu F, Cai Z, Chen H, Li J, Wang Y, Wang L. 2019. Orbitally forced glacio-eustatic origin of third-order sequences and parasequences in the Middle Permian Maokou Formation, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 99: 237-251.
- Fang Q, Wu H, Hinnov L A, Jing X, Wang X, Jiang Q. 2015. Geologic evidence for chaotic behavior of the planets and its constraints on the third-

- order eustatic sequences at the end of the Late Paleozoic Ice Age. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 440: 848–859.
- Fang Q, Wu H, Hinnov L A, Jing X, Wang X, Yang T, Li H, Zhang S. 2017. Astronomical cycles of Middle Permian Maokou Formation in South China and their implications for sequence stratigraphy and paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 130–139.
- Fang Q, Wu H, Hinnov L A, Tian W, Wang X, Yang T, Li H, Zhang S. 2018. Abiotic and biotic responses to milankovitch-forced megamonsoon and glacial cycles recorded in South China at the end of the Late Paleozoic Ice Age. *Global and Planetary Change*, 163: 97–108.
- Fang Q, Wu H, Hinnov L A, Wang X, Yang T, Li H, Zhang S. 2016. A record of astronomically forced climate change in a Late Ordovician (Sandbian) deep marine sequence, Ordos Basin, North China. *Sedimentary Geology*, 341: 163–174.
- Fischer A G. 1988. Cyclostratigraphy. In: *Global Sedimentary Geology Program-Cretaceous Resources. Events, Rhythms*, Beaudoin B, Ginsburg R (eds). Nato International Exchange Program, Digne, France.
- Gibbs M T, Bice K L, Barron E J, Kump L R. 1999. Glaciation in the Early Paleozoic ‘Greenhouse’: The Roles of Paleogeography and Atmospheric CO₂. In: Huber B T, Macleod K G, Wing S L (eds). Cambridge: Cambridge University Press, 386–422.
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. 1976. 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. *Science*, 194(4270): 1121–1132.
- Hilgen F, Schwarzscher W, Strasser A. 2004. Concept and Definitions in Cyclostratigraphy (Second Report of the Cyclostratigraphy Working Group): International Subcommittee on Stratigraphic Nomenclature of the Iugs Commission on Stratigraphy.
- Kodama K P, Hinnov L A. 2014. *Rock Magnetic Cyclostratigraphy*. John Wiley & Sons.
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261–285.
- Li M, Kump L R, Hinnov L A, Mann M E. 2018a. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing. *Earth and Planetary Science Letters*, 501: 165–179.
- Li M, Hinnov L A, Huang C, Ogg J G. 2018b. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing. *Nature Communications*, 9(1): 1004.
- Li M, Hinnov L, Kump L. 2019. Acycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers & Geosciences*, 127: 12–22.
- Liu D, Huang C, Kemp D B, Li M, Ogg J G, Yu M, Foster W J. 2021. Paleoclimate and sea level response to orbital forcing in the Middle Triassic of the Eastern Tethys. *Global and Planetary Change*, 199: 103454.
- Longman J, Mills B J W, Manners H R, Geron T M, Palmer M R. 2021. Late Ordovician climate change and extinctions driven by elevated volcanic nutrient supply. *Nature Geoscience*, 14(12): 924–929.
- Mann M E, Lees J M. 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, 33(3): 409–445.
- Meyers S R. 2015. The evaluation of eccentricity-related amplitude modulation and bundling in paleoclimate data: an inverse approach for astrochronologic testing and time scale optimization. *Paleoceanography*, 30(12): 1625–1640.
- Meyers S R, Sageman B B. 2007. Quantification of deep-time orbital forcing by average spectral misfit. *American Journal of Science*, 307(5): 773–792.
- Villas E, Vennin E, Álvaro J J, Hammann W, Herrera Z A, Piovano E L. 2002. The Late Ordovician carbonate sedimentation as a major triggering factor of the hirmantian glaciation. *Bulletin De La Société Géologique De France*, 173(6): 569–578.
- Waltham D. 2015. Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*, 85(8): 990–998.
- Weedon G P. 2003. *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles*. Cambridge University Press.
- Wu H, Fang Q, Hinnov L A, Zhang S, Yang T, Shi M, Li H. 2023. Astronomical time scale for the Paleozoic Era. *Earth-Science Reviews*, 244: 104510.
- Zhang T, Li Y, Fan T, Da Silva A, Shi J, Gao Q, Kuang M, Liu W, Gao Z, Li M. 2022. Orbitally-paced climate change in the Early Cambrian and its implications for the history of the Solar System. *Earth and Planetary Science Letters*, 583: 117420.
- Zhong Y, Wu H, Zhang Y, Zhang S, Yang T, Li H, Cao L. 2018. Astronomical calibration of the Middle Ordovician of the Yangtze Block, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 505: 86–99.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 赖 锦)