

# 基于米氏旋回的海相碳酸盐岩低级序不整合面识别 ——以鄂尔多斯盆地马家沟组五段为例

张斌弛<sup>1</sup>, 铁木尔巴特<sup>2</sup>, 张月<sup>3</sup>, 邵世国<sup>4</sup>, 王守志<sup>5</sup>, 王林<sup>6</sup>,  
文慧俭<sup>1</sup>, 梅曦<sup>7</sup>, 李润民<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油新疆油田分公司准东采油厂, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中联煤层气有限公司, 北京 100015; 4. 中国石油大庆油田有限责任公司采气分公司, 黑龙江大庆 163453; 5. 中国石油长庆油田分公司长庆实业集团有限公司, 陕西西安 710018; 6. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 陕西西安 710201; 7. 中国石油长庆油田分公司第十二采油厂, 甘肃合水 745400)

**摘要:** 沉积成因的碳酸盐岩低级序不整合面的分布影响岩溶储层的发育, 采用常规方法很难识别和表征。以鄂尔多斯盆地马家沟组五段为例, 提出一种基于米氏旋回理论的定量识别方法, 融合频谱分析、皮尔逊相关因数法、零假设模型及“暴露时间—溶蚀量”动态模型, 结合自然伽马测井曲线与 405 ka 长偏心率周期, 定量表征研究区目的层沉积速率 (2.5~3.0 cm/ka)、低级序不整合面年代 (468.6~460.1 Ma) 及溶蚀强度。结果表明: 研究区识别四期低级序不整合面, 沉积间断总时间为 0.3 Ma, 最大地层缺失厚度为 9 m; 溶蚀强度与相对海平面上升速率呈显著负相关关系, 缓慢上升 (0.7 m/Ma, 历时 1.4 Ma) 发育直径为 0.20~0.40 mm 的溶洞, 快速上升 (1.2 m/Ma, 历时 0.9 Ma) 发育直径为 0.05~0.10 mm 的微孔。米氏旋回驱动的“气候—海平面耦合”模型实现低级序不整合面定量识别, 揭示气候—海平面耦合驱动的滞后响应机制, 修正传统层序模型中“海退不整合面”的长期暴露假设。该结果为高频海平面波动区岩溶储层预测、鄂尔多斯盆地及类似克拉通盆地深层勘探提供指导。

**关键词:** 低级序不整合面; 海相碳酸盐岩; 米氏旋回; 台地; 岩溶储层; 频谱分析; 沉积速率; 海平面变化; 马家沟组; 克拉通盆地; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P534; TE122

文献标识码: A

文章编号: 2095-4107(2025)06-0057-13

## 0 引言

米兰科维奇旋回(米氏旋回)作为天文轨道周期和构造—沉积响应耦合关系的纽带, 根据野外露头、钻井岩心观察和地球物理数据分析, 可以识别高频沉积旋回, 建立六级层序、准层序、准层序组与斜率、短偏心率、长偏心率周期的地日轨道气候旋回关系, 成为层序地层划分和沉积演化分析的重要方法<sup>[1-2]</sup>。不整合面记录构造运动和海平面变化事件, 反映地质作用对前期沉积物不同程度的改造, 碳酸盐岩岩溶储层的发育与不整合面的分布相关<sup>[3-4]</sup>。在古生代克拉通盆地多旋回构造运动中, 鄂尔多斯盆地加里东运动期和海西运动期之间存在长期的沉积间断, 形成多期不整合面<sup>[5-6]</sup>。在鄂尔多斯盆地马家沟组不整合面附近发现优质的碳酸盐岩气藏, 多口探井获得工业气流, 表明鄂尔多斯盆地深层的区域不整合油气藏是天然气勘探的新领域<sup>[7-13]</sup>。构造成因的区域不整合面在岩心、测井和地震资料中表现明显, 通常为不整合面上下岩性差异、测井曲线特征突变或强振幅连续地震反射特征<sup>[14-16]</sup>。沉积成因(海平面升降等)的低级序不整合面缺少明显的角度不整合接触关系和古生物指标, 很难通过常规方法识别和表征, 从而忽略潜在的碳酸盐岩岩溶储层<sup>[17]</sup>。一般采用薄片分析、主微量元素(锶)和碳氧同位素技术识别低级序不整合面<sup>[18]</sup>, 根据高精度取样, 导致成本高且地下剖面连续性差。

米氏旋回理论被广泛应用于古气候—沉积响应研究<sup>[2, 19]</sup>。冯斌等<sup>[2]</sup>揭示等深流强度与海平面波动的关系, 杜威等<sup>[19]</sup>通过高频层序划分建立沉积速率与储层质量模型。这些研究聚焦于构造主导的长期旋回, 对海平面高频波动控制的低级序不整合面缺少分析。田世峰等<sup>[20]</sup>对自然伽马测井曲线进行天文调

收稿日期: 2025-05-09; 编辑: 陆雅玲 任志平

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2024D010)

作者简介: 张斌弛(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要从事沉积学、储层地质学和油藏地质学方面的研究。

谐,得到珠江口盆地韩江组浅海相碳酸盐岩高分辨率天文调谐地质年代表。江青春等<sup>[21]</sup>采用米氏旋回法,计算四川盆地中二叠统茅口组的剥蚀量,恢复海相碳酸盐岩古剥蚀量,对地层部分缺失的地区可以试用地层沉积速率及剥蚀量差异对比与验证,进行碳酸盐岩地层剥蚀量恢复,为识别海相碳酸盐岩低级序不整合面和计算地层剥蚀量提供思路。

以鄂尔多斯盆地马家沟组五段(马五段)为例,基于碳酸盐岩台地的沉积过程和不整合面形成机制,采用傅里叶变换、皮尔逊(演化)相关因数法和零假设模型等方法,厘定碳酸盐岩潜在微不整合面和沉积间断时间,计算碳酸盐岩层段的视沉积速率、优势周期旋回厚度和数量,识别碳酸盐岩台地低级序不整合面并确定沉积间断时间,揭示沉积时期古海平面变化与低级序不整合面形成的关系,探讨低级序不整合面对储层发育的影响,为深层碳酸盐岩低级序不整合面识别、剥蚀定量恢复和储层预测提供指导。

### 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国中西部油气资源最为丰富的大型多旋回克拉通盆地,下古生界奥陶系蕴藏丰富的天然气资源<sup>[7-8]</sup>。根据现今的构造形态特征,鄂尔多斯盆地可以划分为北部伊盟隆起、中部伊陕斜坡、南部渭北隆起、东部晋西褶皱带、西部天环坳陷和西缘冲断带,研究区位于伊陕斜坡的中西部<sup>[18]</sup>(见图1)。鄂尔多斯地区奥陶纪总体呈“三隆、两坳、一古陆”的古构造格局,自西向东依次发育中央古隆起、吕梁隆起和渭北隆起。自早奥陶世至早侏罗世,中央古隆起带发育于伊盟隆起周缘吴起—陇县一带,盆地东部在燕山运动大规模抬升后消失<sup>[19]</sup>。

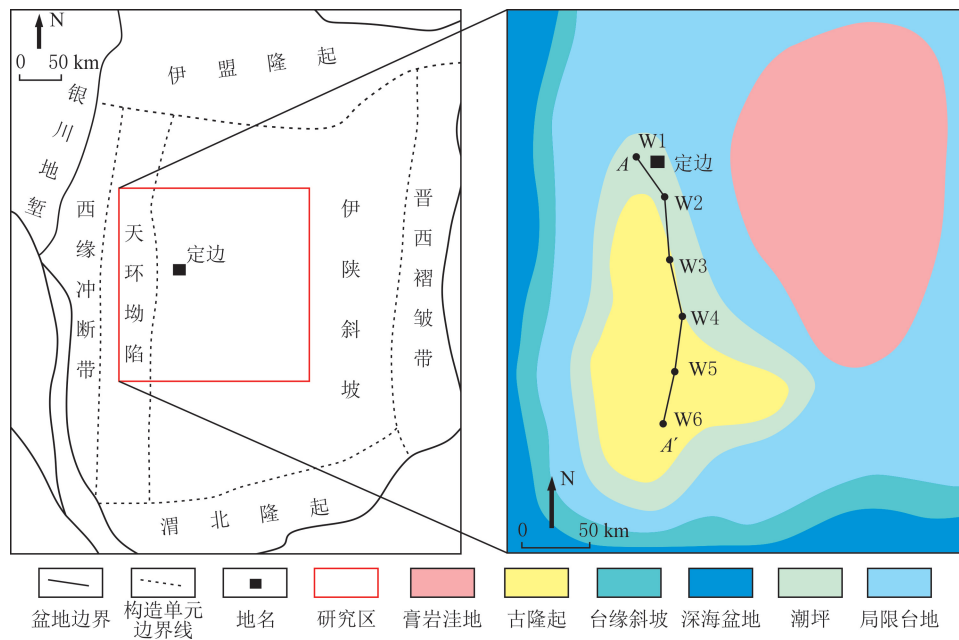


图1 鄂尔多斯盆地中部中央隆起带构造单元划分和马家沟组五段沉积相分布  
Fig. 1 Division of structural units of central uplift in the Middle Ordos Basin and sedimentary facies distribution of member 5 in the Majiagou Formation

鄂尔多斯盆地中部中央隆起带奥陶系自下而上发育冶里组、亮甲山组、马家沟组和峰峰组<sup>[18-19]</sup>。马五段发育10个亚段(马五<sub>10</sub>—马五<sub>1</sub>)(见图2),发育巨厚的海相碳酸盐岩。根据含气性,可以将马家沟组划分为下组合、中组合和上组合。由于海平面阶段性升降和水体盐度频繁变化,中组合包括马五<sub>10</sub>—马五<sub>5</sub>亚段,不同亚段岩性特征具有较大的差异性,马五<sub>10</sub>—马五<sub>7</sub>亚段以厚层白云岩为主,马五<sub>5</sub>亚段以厚层白云岩夹薄层膏岩为主,马五<sub>5</sub>亚段主要发育厚层灰岩<sup>[20]</sup>。

受鄂尔多斯盆地西南部奥陶纪一二叠纪中央古隆起的影响,研究区奥陶系向中央隆起超覆减薄,东侧马五段逐渐增厚,周缘发育相对稳定的海相沉积体系,包括潮坪、膏岩湖、局限台地、台缘斜坡和深海盆地等(见图1、图3)<sup>[19-20]</sup>。

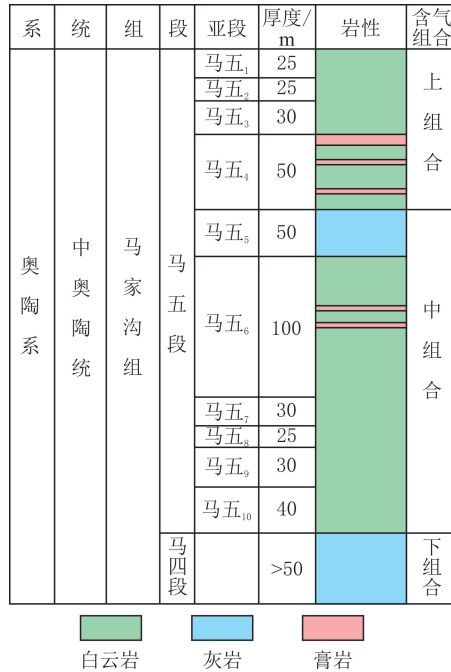


图 2 鄂尔多斯盆地中部中央隆起带马家沟组五段综合地层柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the member 5 of the Majiagou Formation of central uplift in the Middle Ordos Basin

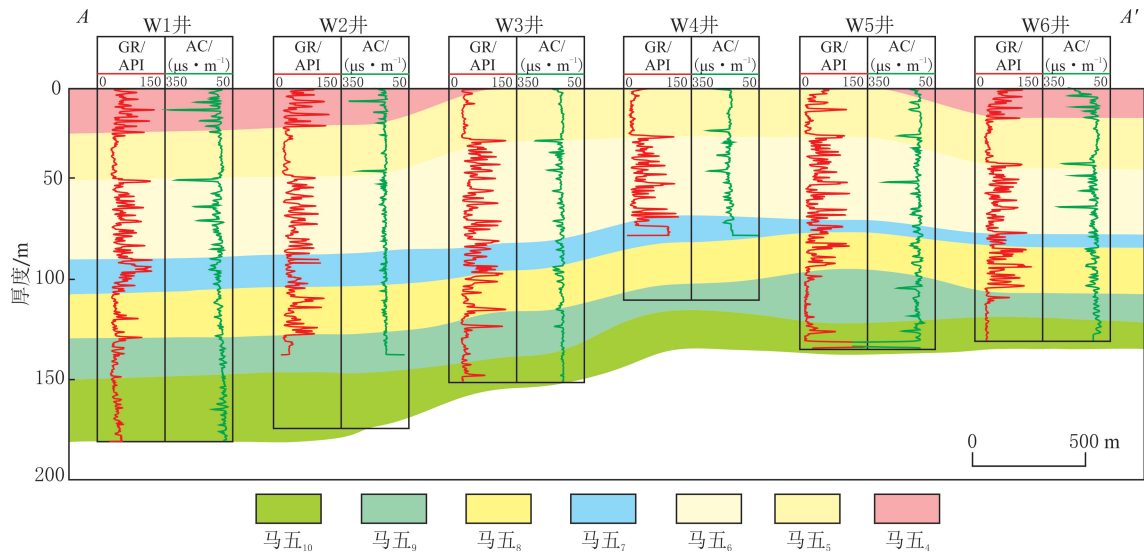


图 3 鄂尔多斯盆地中部中央隆起带马家沟组五段中组合地层分布(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Stratigraphic distribution of the member 5 of the Majiagou Formation in the central uplift in the Middle Ordos Basin(section position as shown in Fig. 1)

## 2 识别表征方法

### 2.1 台地沉积与不整合成因模式

采用古生物、铀系法测年、岩心观察、高分辨率层序地层和地震剖面等方法,表明海平面变化驱动的水体深度波动对碳酸盐岩沉积有重要作用<sup>[18]</sup>。根据海平面与台地之间的位置关系,碳酸盐岩台地沉积过程可以划分生长期、繁盛期和剥蚀期(见图 4)<sup>[19-21]</sup>。

生长期和繁盛期,当沉积物的沉积速率超过海平面的上升速率时,台地被淹没在水下,海平面与台地距离减小,水体可以接受充足的光照,形成暖清浅的沉积环境,碳酸盐岩沉积加速而未露出水面,沉积物连续沉积;当海平面的下降速率超过沉积物的沉积速率时,台地暴露于地表,受风化淋滤作用,前期形成的沉积物遭受剥蚀和破坏而形成不整合面(见图 5)。正常沉积期与沉积间断期之间被不整合面分割<sup>[22]</sup>,正常沉积期的原始沉积厚度与保存沉积厚度相等,沉积间断期的原始沉积厚度大于保存沉积厚度。

## 2.2 不整合面识别和表征方法

### 2.2.1 演化频谱分析

大量古生代、中生代和新生代数据表明,海平面变化与天文轨道周期有关,轨道周期变化驱动的气候变化调制全球海平面周期性波动<sup>[23]</sup>。不同地质历史时期、气候条件和沉积物供给强度,在很大程度上影响天文旋回的厚度,在沉积记录的演化频谱上呈突变特征,可以作为古老碳酸盐岩沉积间断的识别标志,指示潜在的低级序不整合面<sup>[24-25]</sup>。受地球轨道参数的周期性变化影响,全球气候变化驱动的地层沉积过程是复杂的周期运动,由多个单周期的沉积过程叠加而成<sup>[26]</sup>。与岩性剖面对应,测井曲线是由多信号迭加的复合信号,记录沉积岩的颜色、岩性、结构和构造的周期性和叠置性变化,可以作为古气候替代指标<sup>[27]</sup>。

测井曲线分析过程中,基于傅里叶变换的频谱分析是将数据由深度域转化为频率域的方法,将一条复杂的准周期信号分解为一系列不同频率的正弦或余弦信号,寻找与米氏旋回理论旋回周期相近的频率<sup>[28]</sup>。为提高运算速度,采用离散傅里叶变换的快速算法,减少两个数量级的运算量,结合多窗口频谱分析方法,可快速准确确定不同的频率区间,将多窗口频谱分解并投影到深度域<sup>[26-28]</sup>。

### 2.2.2 演化相关因数法

奥陶系时代较老,未厘定和统一奥陶纪不同天文轨道参数之间的关系,碳酸盐岩的剥蚀增加地质定年难度,需要估算研究区碳酸盐岩的沉积速率对识别天文旋回厚度的影响。不同时代、区域和沉积环境的碳酸盐岩沉积速率差异较大,现代碳酸盐岩的沉积速率为 50~300 cm/ka,古代碳酸盐岩的沉积速率为 3~8 cm/ka<sup>[19-21]</sup>。采用相关因数法和演化相关因数法,可以估计自然伽马深度序列频谱与对应的天文轨道参数理论频谱之间的相关因数,建立时间域和深度域序列之间的关系并计算沉积速率<sup>[29-30]</sup>。采用皮尔逊相关因数法估算沉积速率,通过量化自然伽马曲线与米氏旋回理论频谱的线性相关关系(-1~1),结合零假设模型筛选可靠结果<sup>[29]</sup>。

为保证相关因数计算的可靠性,采用基于自回归模型的红外噪声背景,保留数据序列指定置信度以上的频谱特征<sup>[30]</sup>。对于奥陶纪(约为 443 Ma 前),岁差周期约为 16 ka,模型采用 0~0.07 周期/m 的频率区

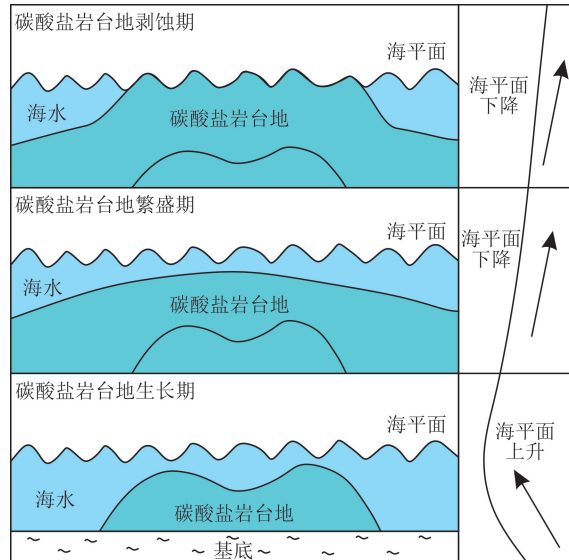


图 4 研究区碳酸盐岩台地沉积模式(据文献[3]修改)  
Fig. 4 Sedimentary model of carbonate platform in the study(modified by reference[3])

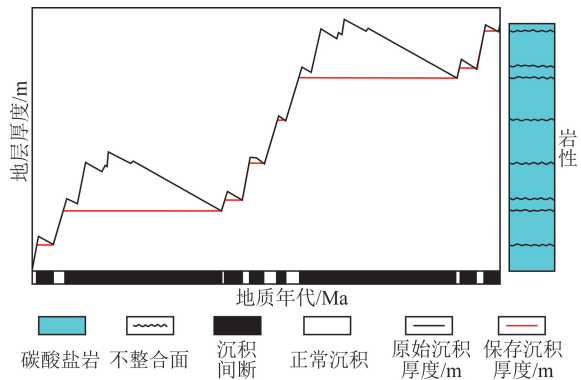


图 5 研究区碳酸盐岩台地不整合面成因模式(据文献[4]修改)  
Fig. 5 Unconformity origin mechanism of carbonate platform in the study(modified by reference [4])

间计算相关因数<sup>[29,31]</sup>。由于奥陶纪暂无理论天文周期,目标序列采用特定叠后的调和函数<sup>[31]</sup>。置信度可以作为衡量沉积速率估算可靠性的标准。采用非参数蒙特卡洛方法,建立无效分布的非关键天文周期的零假设模型,反向计算关键天文参数的置信度<sup>[32]</sup>。为避免少量天文轨道参数计算的假沉积速率,将尽可能多引入关键天文轨道参数。为反映深度域沉积速率的变化,采用快速演化傅里叶变换方法实现沉积速率估算的垂向演化<sup>[33-36]</sup>。

### 3 低级序不整合面识别

W1井马五段直井钻遇马五<sub>10</sub>—马五<sub>4</sub>亚段,地层厚度为160 m,形成于典型的碳酸盐岩台地、潮坪沉积环境,岩性以白云岩、灰岩和泥质云岩为主,构造稳定,未见明显断层成因的地层缺失,存在沉积相关的地层缺失(见图3)。受海平面升降影响,形成的泥质含量增加,放射性增强,自然伽马曲线(采样间距为0.125 m)呈高值,记录米氏旋回理论信号。

确定古老碳酸盐岩潜在低级序不整合面和沉积间断时间:

(1)估算沉积速率。利用相关因数法和零假设模型,得出相关因数最高( $\rho$ 大于0.2)、置信度最高(反向置信度 $eH_0SL$ 小于1%)和关键天文轨道参数参与最多(5~6个)的沉积速率。

(2)确定长偏心率周期。基于最可信的平均沉积速率,利用改进小波变换方法,得到未去趋势化的自然伽马曲线深度域演化频谱,寻找可能的405 ka长偏心率周期。

(3)寻找低级序不整合面。基于平均沉积速率和405 ka长偏心率周期,对原始自然伽马曲线去趋势化,得到自然伽马曲线深度域演化频谱,结合长偏心率周期在深度域上的演化断点,寻找405 ka(三级层序)尺度的碳酸盐岩低级序不整合面。

(4)计算沉积间断时间。利用高斯带通滤波方法,滤出去趋势化的自然伽马曲线中405 ka长偏心率周期信号,计算保存沉积厚度的沉积时间。结合地质年代锚点,原始沉积厚度的沉积时间与保存沉积厚度的沉积时间差为沉积间断总时间。

#### 3.1 沉积速率

根据相关因数、零假设模型置信度和天文轨道参数,马五段的平均最可信沉积速率为2.5~3.0 cm/ka,相关因数为0.2~0.4,反向置信度 $eH_0SL$ 小于1%,参与计算的关键天文轨道参数为5个(见图6)。

#### 3.2 未去趋势化演化频谱

根据未去趋势化自然伽马曲线深度域演化频谱,可以识别多个显著信号,结合沉积速率识别405 ka长偏心率周期。405 ka长偏心率周期的旋回频率为0.10周期/m,旋回厚度约为10 m(见图7)。

#### 3.3 去趋势化演化频谱

根据405 ka长偏心率周期的旋回厚度,设定去趋势化的时窗大于15~20 m。405 ka长偏心率周期信号在深度域上发生4次信号中断,存在4期低级序不整合面,分别为马五<sub>9</sub>亚段4 265.0 m、马五<sub>8</sub>亚段4 235.0 m、马五<sub>6</sub>亚段4 197.0 m和马五<sub>5</sub>亚段4 150.0 m(见图8)。

#### 3.4 年代和沉积间断时间

马五段顶、底界面界线年龄分别为458.4、

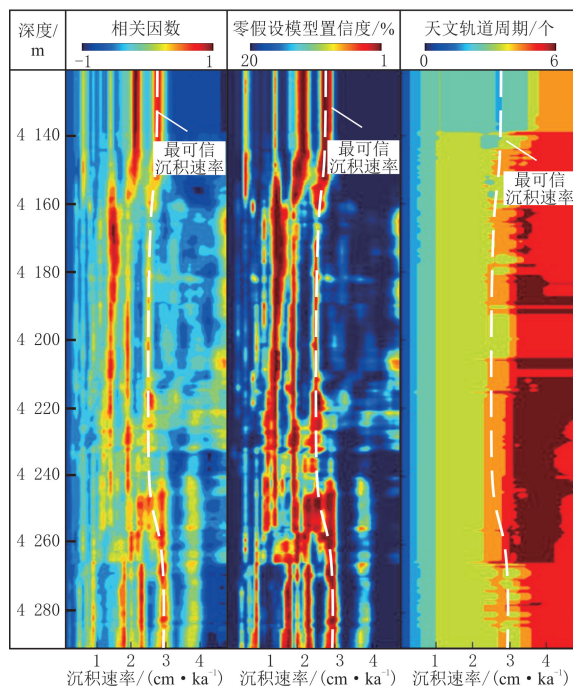


图6 W1井沉积速率相关因数演化频谱分析

Fig. 6 Sedimentation rate evolutionary spectral analysis using correlation coefficient method of well W1

470.4 Ma, 马五段沉积时间为 12.0 Ma<sup>[37-38]</sup>。以 470.4 Ma 为锚点, 结合沉积速率, 马五<sub>9</sub> 亚段 4 265.0 m、马五<sub>8</sub> 亚段 4 235.0 m、马五<sub>6</sub> 亚段 4 197.0 m 和马五<sub>5</sub> 亚段 4 150.0 m 低级序不整合面, 分别对应 468.6、466.4、463.3 和 460.1 Ma (见图 8), 与 Laskar 轨道参数模型<sup>[29]</sup> 的误差范围 ( $\pm 0.1$  Ma) 一致, 表明米氏旋回分析的可靠性。

结合 405 ka 长偏心率周期滤波信号, 识别 29 个长偏心率周期, 马五段保存沉积厚度的沉积时间为 11.7 Ma (见图 8), 沉积间断总时间为 0.3 Ma。另外, 沉积速率为 2.5~3.0 cm/ka, 地层缺失厚度为 7.5~9.0 m。与区域构造成因的不整合面相比, 低级序不整合面的形成时间较短。

## 4 低级序不整合面影响

### 4.1 相对海平面变化

奥陶纪, 华北地台北北两侧秦祁海槽和兴蒙海槽相向俯冲, 形成加里东褶皱带<sup>[39]</sup>。在全球海平面大幅上升的背景下, 鄂尔多斯盆地中部中央隆起带马家沟组沉积时期经历 4 次区域性海侵—海退事件, 海侵时期主要发育灰坪和灰云坪, 海退时期主要发育膏岩洼地和云坪<sup>[40]</sup>。

470.4 Ma, 马五段沉积初期, 海平面第一次大幅下降, 水体相对闭塞且能量较低, 马五<sub>10</sub> 亚段主要发育潮间云坪, 岩性以粉晶白云岩为主。马五<sub>10</sub> 亚段沉积中期, 海平面最低并于 468.6 Ma 开始回升, 粉晶白云岩发育溶洞且被方解石胶结, 指示第一期低级序不整合面的形成 (见图 8、图 9(a))。马五<sub>9</sub> 亚段沉积时期为第一次小规模海侵时期, 沉积环境以潮间云坪为主。马五<sub>8</sub> 亚段整体沉积环境与马五<sub>10</sub> 亚段的相似, 是第二次小规模海退沉积的产物, 主要发育粉晶白云岩。马五<sub>8</sub> 亚段沉积早期, 海平面最低并于 466.4 Ma 开始大幅回升, 形成第二期低级序不整合面, 可见粉晶白云岩溶洞被方解石充填 (见图 8、图 9(b))。马五<sub>7</sub> 亚段沉积时期, 海平面第三次大幅上升, 是马五段沉积时期以来最大的海侵事件, 沉积环境以潮间灰云坪和潮间泥云坪为主, 主要发育泥质云岩和云质灰岩。马五<sub>6</sub> 亚段沉积时期, 海平面第三次大规模迅速下降, 主要发育潮间云坪, 岩性以微晶白云岩为主。马五<sub>6</sub> 亚段沉积早期, 海平面最低并于 463.3 Ma 开始回升, 微晶白云岩发育大量溶蚀孔并被方解石胶结, 形成第三期低级序不整合面 (见图 8、图 9(c))。马五<sub>5</sub> 和 马五<sub>4</sub> 亚段分别对应第四次海侵和海退时期, 马五<sub>5</sub> 亚段沉积中期, 海平面最低并于 460.1 Ma 开始回升, 形成第四期低级序不整合面, 周缘粉晶白云岩溶洞被方解石充填且有沥青充注 (见图 8、图 9(d))。不发育低级序不整合面的区域内, 白云岩原生孔隙不发育或只发育原生晶间孔, 次生孔隙不发育 (见图 8、图 9(e-f))。

对暴露时间和溶蚀量进行定量表征<sup>[44-46]</sup>, 第一期和第二期不整合面形成后, 海平面缓慢上升 (0.7 m/Ma), 历时 1.4 Ma 达到最大海泛面, 白云岩发育直径为 0.20~0.40 mm 的溶洞 (溶蚀量约为 0.21 mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>), 与实测结果吻合; 第三期不整合面形成后, 海平面快速上升 (1.2 m/Ma), 暴露时间缩短至 0.9 Ma, 形成直径为 0.05~0.10 mm 的微孔 (溶蚀量约为 0.14 mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>) (见图 8、图 9(a-c))。

四期低级序不整合面与海退事件有关, 形成于海平面初步回升期 (见图 10)。这种滞后响应机制的关键在于气候转型期的水—岩相互作用: 当气候由干旱转为湿润时, 海平面上升初期, 大气淡水补给量骤

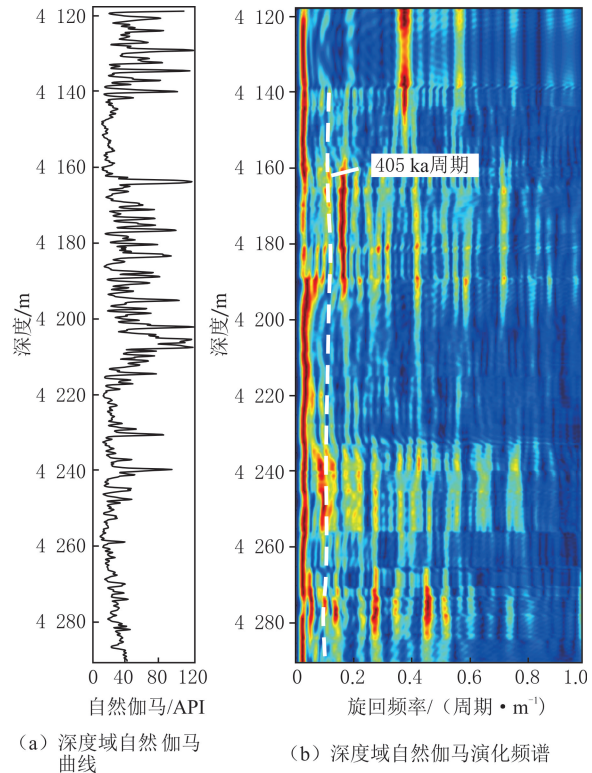


图7 W1井未去趋势演化频谱分析  
Fig. 7 Evolutionary spectral analysis of undetrended series of well W1

增<sup>[22]</sup>, 叠加地表径流对下降半旋回晚期至上升半旋回早期暴露的(灰)云坪持续淋滤, 导致碳酸盐岩溶蚀强度显著高于海退末期的(见图 9(a-d)、图 10)。这种过程与“海退不整合面”模型<sup>[5]</sup>存在本质差异, 后者强调构造抬升主导的长期暴露, 文中的滞后响应更多受控于短周期气候波动与海平面升降速率的耦合效应。类似河流回春作用中基准面下降驱动的滞后侵蚀响应, 海平面初步回升期(气候由干旱转为湿润), 大气淡水淋滤增强, 成为低级序不整合面形成的关键阶段, 验证气候—海平面耦合作用对沉积间断的调制机制(见图 10)。

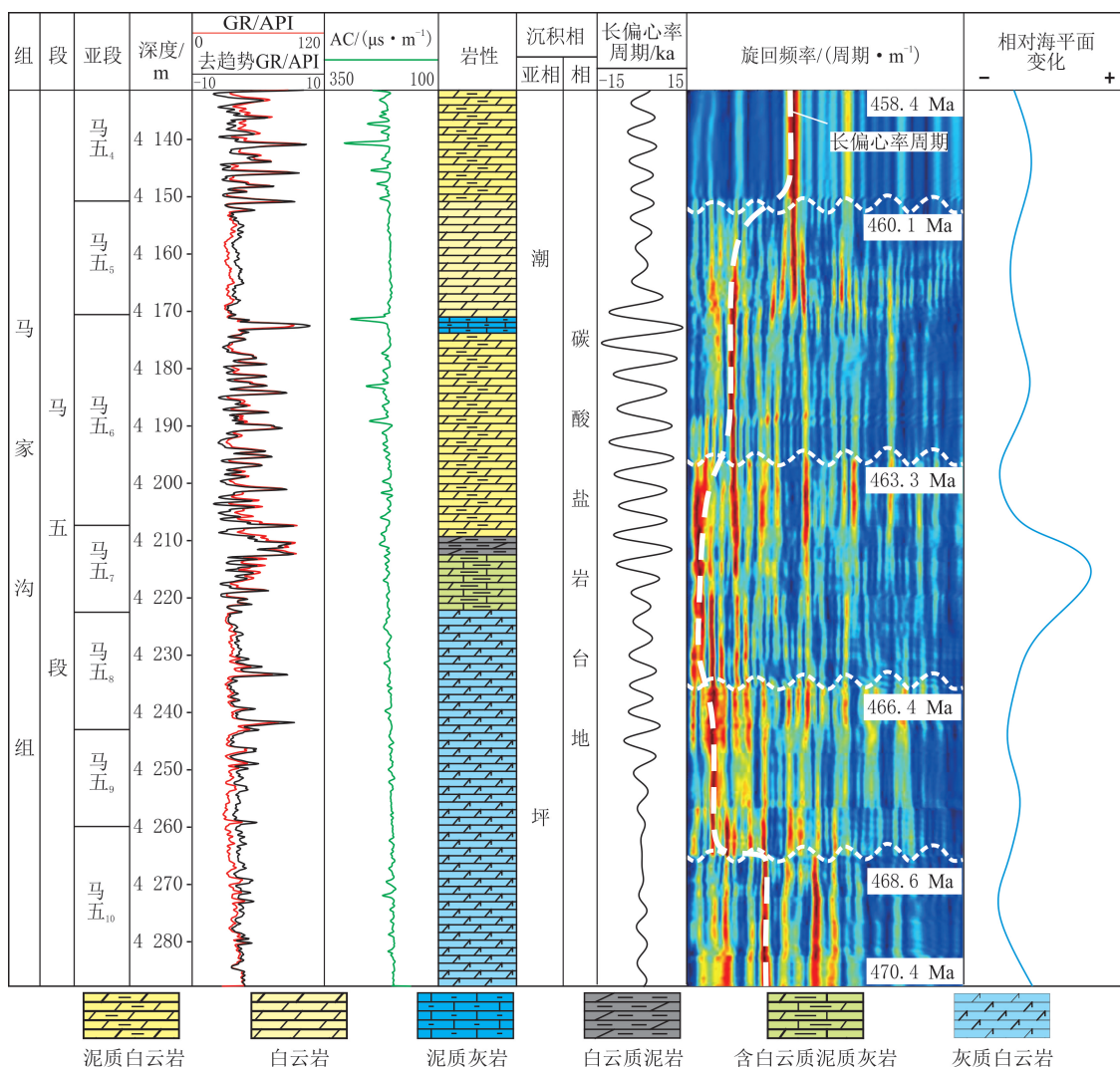
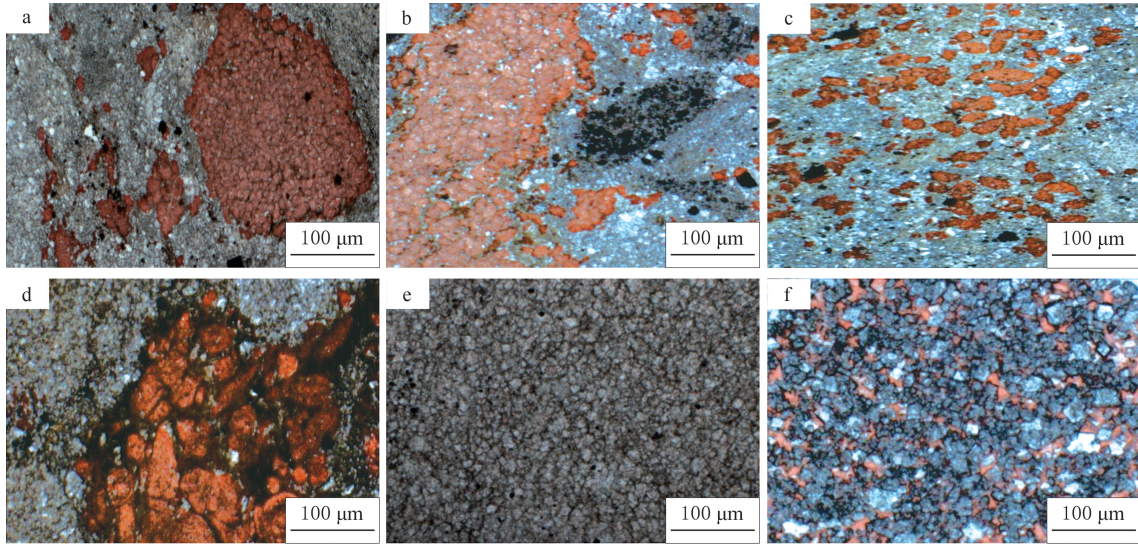


图 8 W1 井去趋势化演化频谱分析  
Fig. 8 Evolutionary spectral analysis of detrended series of well W1

#### 4.2 储层物性

分析 W1 井测井解释的孔隙度和渗透率, W1 井共识别 6 个气层, 其中 3 个与低级序不整合面有关, 分别为 1、4、6 号气层, 平均孔隙度约为 2.35%, 平均渗透率约为  $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属于低孔低渗天然气储层(见图 11)。第一期不整合面(4 264.0 m、468.6 Ma)未解释出天然气储层(见图 8)。对于 1、4、6 号气层, 4 号气层物性好于 1 号和 6 号气层的(见图 11), 与第三期低级序不整合面(463.3 Ma)相关, 暴露时间为 0.9 Ma, 溶蚀孔隙直径为 0.05~0.10 mm, 小于 1 号和 6 号气层的。分析低级序不整合面的暴露时间、最大孔隙直径和测井孔隙度的关系, 低级序不整合面的暴露时间越长, 最大孔隙直径越大, 测井孔隙度越小, 说明长期暴露有利于白云岩溶蚀, 为方解石充填提供空间, 不利于储层保存(见图 12)。海平面上升速率越慢, 不整合面暴露越久, 溶蚀量越大, 方解石充填越剧烈, 进而形成低孔低渗储层。W1 井马五段多数气层发育于低级序不整合面附近, 且在海平面快速上升(暴露时间短)背景下, 低级序不整合面形成的天然

气储层物性更好。



(a) 粉晶灰质白云岩, 溶洞被方解石胶结, 4 264.3 m, 染色薄片, 红色为方解石, 单偏光, 马五<sub>10</sub>亚段; (b) 粉晶灰质白云岩, 溶洞被方解石胶结, 4 236.2 m, 染色薄片, 红色为方解石, 单偏光, 马五<sub>8</sub>亚段; (c) 微晶泥质白云岩, 溶洞被方解石胶结, 4 196.2 m, 染色薄片, 红色为方解石, 单偏光, 马五<sub>6</sub>亚段; (d) 粉晶白云岩, 溶洞被方解石胶结, 可见沥青充注, 4 152.1 m, 染色薄片, 红色为方解石, 单偏光, 马五<sub>5</sub>亚段; (e) 粉晶泥质白云岩, 原生孔隙不发育, 4 178.5 m, 铸体薄片, 单偏光, 马五<sub>6</sub>亚段; (f) 细晶灰质白云岩, 发育原生晶间孔, 4 251.6 m, 铸体薄片, 单偏光, 马五<sub>9</sub>亚段

图 9 W1 井碳酸盐岩台地微观特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of carbonate platform in well W1

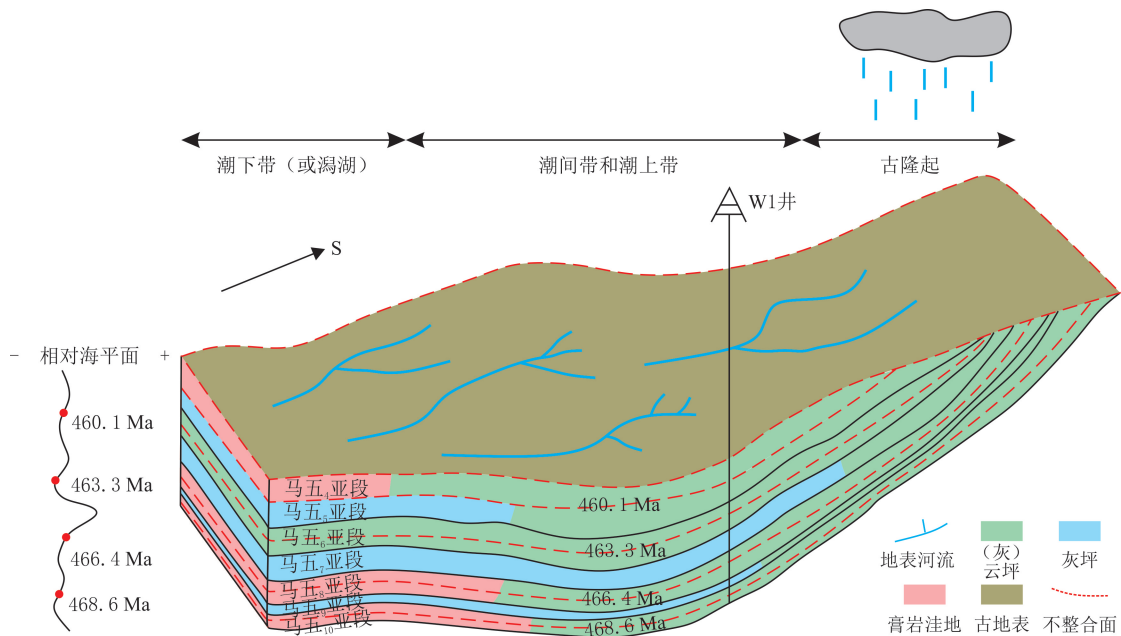


图 10 鄂尔多斯盆地中部中央隆起带碳酸盐岩台地对米氏旋回海平面变化的响应

Fig. 10 The response of carbonate platform to sea level changes within the central uplift in the Middle Ordos Basin based on Milankovitch cycles

以 W1 井为中心, 分析 W1—W2—W3 井的气藏连井剖面(见图 13)。W2 和 W3 井马五<sub>5</sub>、马五<sub>6</sub> 和马五<sub>8</sub> 亚段发育同期低级序不整合面及气层, 与演化频谱中识别的轨道信号突变一致。文中方法适用于受天文轨道周期控制的碳酸盐岩沉积体系, 对构造成因(厚层石膏岩)和后期成岩作用相关的碳酸盐岩层系不具有参考性。

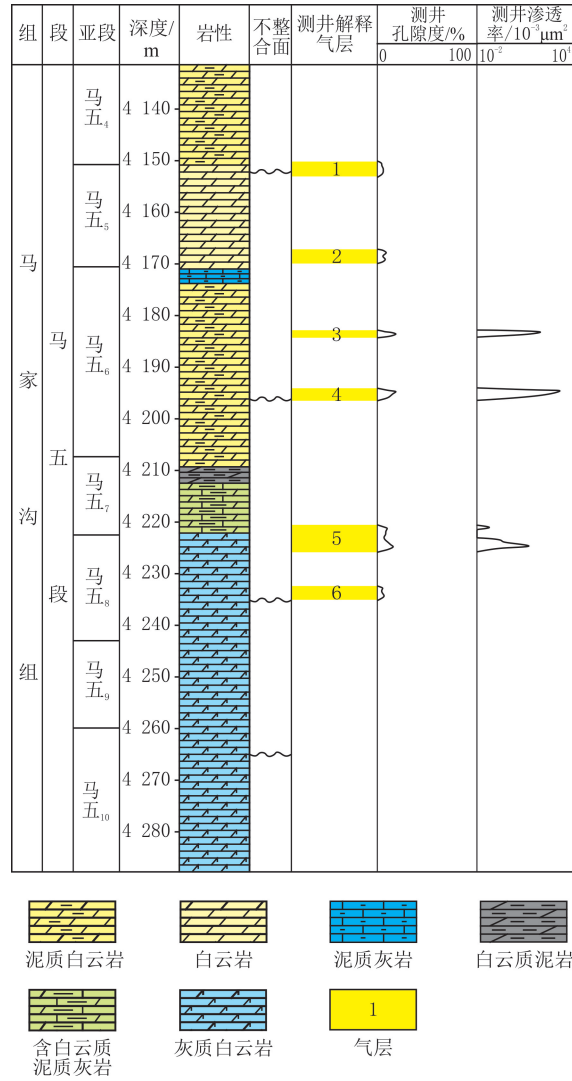


图 11 W1 井气层分布和物性特征  
Fig. 11 Gas layer distribution and petro-physical features of well W1

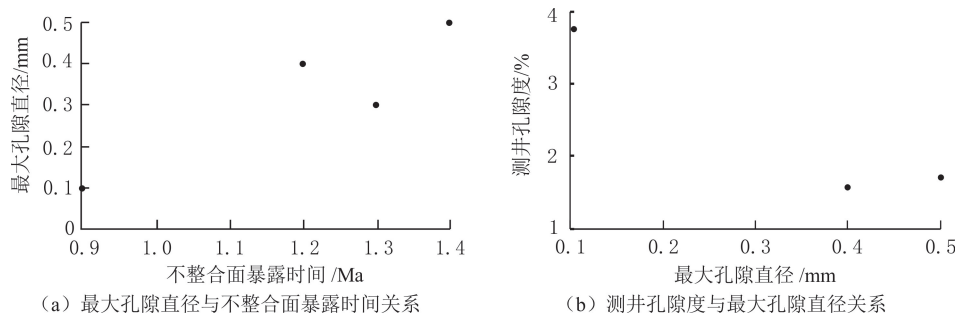


图 12 W1 井低级序不整合面对碳酸盐岩储层物性的影响  
Fig. 12 The impact of low-order unconformities on the petro-physical properties of carbonate reservoirs in well W1

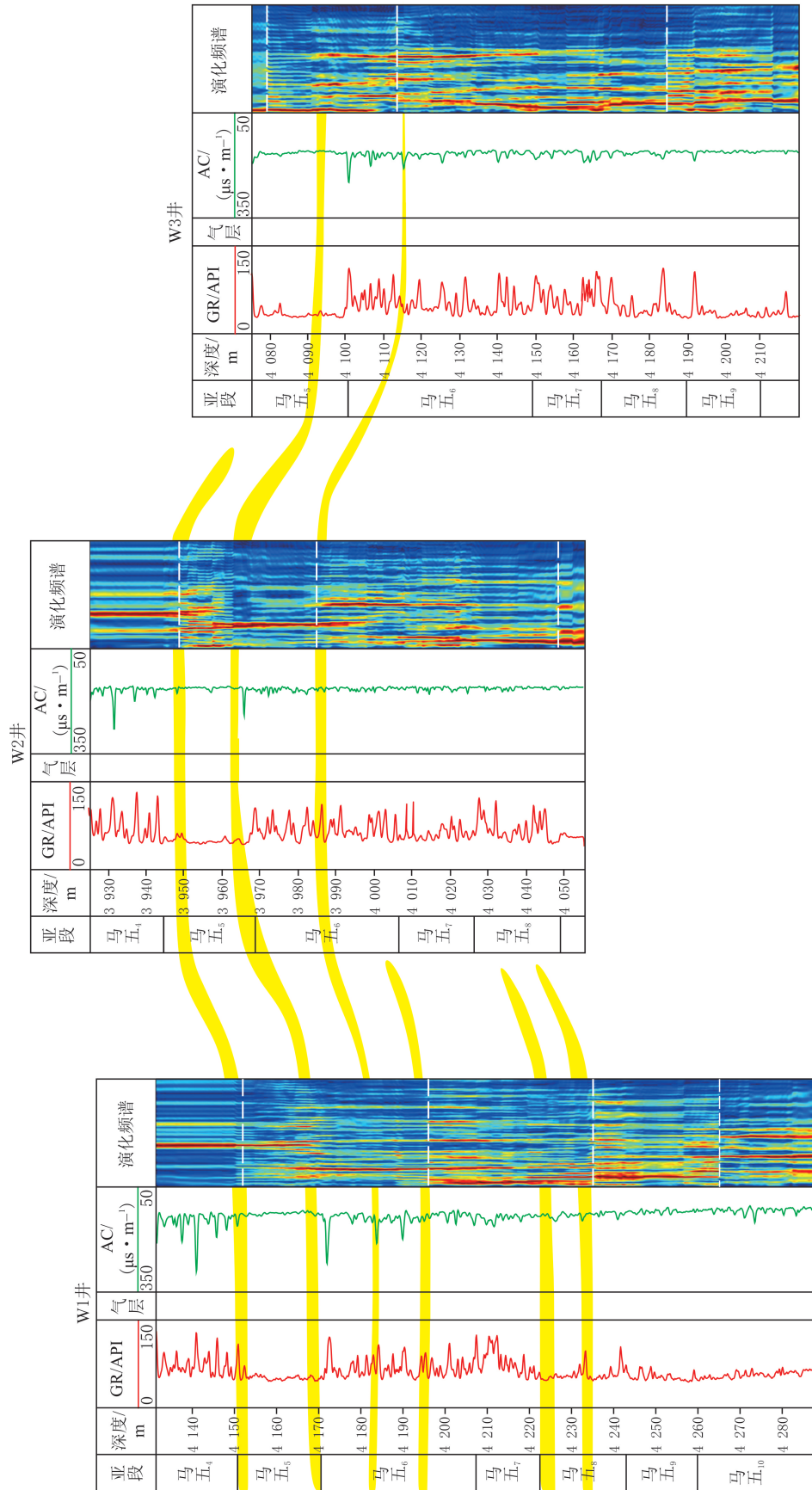


图 13 W1—W2—W3 连井气藏剖面分析  
Fig. 13 Gas profile analysis of the W1-W2-W3 well section

## 5 结论

(1)鄂尔多斯盆地中部马五段中组合碳酸盐岩平均沉积速率为 2.5~3.0 cm/ka,受控于 405 ka 长偏心率周期,旋回厚度约为 10 m,累计识别 29 个完整旋回,沉积间断总时间为 0.3 Ma。

(2)马五段中组合发育四期低级序不整合面,分别位于马五<sub>9</sub>、马五<sub>8</sub>、马五<sub>6</sub> 和马五<sub>5</sub> 亚段,分别对应 468.6、466.4、463.3 和 460.1 Ma。四期低级序不整合面的形成与气候—海平面耦合作用密切相关,海平面初步回升期(气候由干旱转变为湿润)的大气淡水淋滤导致滞后响应,是储层溶蚀的主要时期。

(3)马五段中组合溶蚀强度与相对海平面上升速率呈显著负相关关系。海平面缓慢上升期(0.7 m/Ma,历时 1.4 Ma)发育直径为 0.20~0.40 mm 的溶洞,海平面快速上升期(1.2 m/Ma,历时 0.9 Ma)发育直径为 0.05~0.10 mm 的微孔。低级序不整合面的长期暴露有利于白云岩的溶蚀,为后期方解石胶结提供空间,不利于储层保存,形成低孔低渗储层。

## 参考文献(References):

- [1] 杜威,纪友亮,季梦瑶,等.渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(4):142-151.  
DU Wei, JI Youliang, JI Mengyao, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(4): 142-151.
- [2] 冯斌,李华,何幼斌,等.深水等深流沉积中记录的米兰科维奇特性:以陕西富平地区上奥陶统赵老峪组为例[J].地球科学与环境学报,2019,41(1):69-82.  
FENG Bin, LI Hua, HE Youbin, et al. Characteristics of Milankovitch cycles in deep water contourites: a case study of Upper Ordovician Zhaolaoyu Formation in Fuping Area of Shaanxi, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(1): 69-82.
- [3] 金强,程付启,田飞.岩溶型碳酸盐岩储层中缝洞复合体及其油气地质意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):49-55.  
JIN Qiang, CHENG Fuqi, TIAN Fei. Identification of fracture-vug complex from karsted carbonates and its significance in petroleum geology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 49-55.
- [4] 何江,冯春强,马岚,等.风化壳古岩溶型碳酸盐岩储层成岩作用与成岩相[J].石油实验地质,2015,37(1):8-16.  
HE Jiang, FENG Chunqiang, MA Lan, et al. Diagenesis and diagenetic facies of crust-weathered ancient karst carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 8-16.
- [5] 苏中堂,柳娜,杨文敬,等.鄂尔多斯盆地奥陶系表生期岩溶类型、发育模式及储层特征[J].中国岩溶,2015,34(2):109-114.  
SU Zhongtang, LIU Na, YANG Wenjing, et al. Types and models of supergene karst of Ordovician and reservoir characteristics in Ordos Basin[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 109-114.
- [6] 周亚军,杨遂正,王欣.鄂尔多斯盆地奥陶系顶面演化与岩溶储层[J].石油物探,2006,45(3):304-310.  
ZHOU Yijun, YANG Suizheng, WANG Xin, et al. The structural-interface evolution in Ordovician and karst reservoir in Ordos Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 304-310.
- [7] 周雁,付斯一,张涛,等.鄂尔多斯盆地古生界构造—沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J].石油与天然气地质,2023,44(2):264-275.  
ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 264-275.
- [8] 张军涛,张玉银,谷宁,等.鄂尔多斯盆地乌审旗隆起东北侧怀远运动不整合特征及其对岩溶储层形成的意义[J].石油与天然气地质,2023,44(1):101-109.  
ZHANG Juntao, ZHANG Yuyin, GU Ning, et al. Unconformity characteristics of Huaiyuan movement in the northeast of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin and its implications for karst reservoir generation[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 101-109.
- [9] 魏新善,陈洪德,张道锋,等.致密碳酸盐岩储集层特征与天然气勘探潜力:以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例[J].石油勘探与开发,2017,44(3):319-329.  
WEI Xinshan, CHEN Hongde, ZHANG Daofeng, et al. Gas exploration potential of tight carbonate reservoirs: a case study of Ordovician Majiagou Formation in the Eastern Yi-Shan Slope, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 319-329.
- [10] 付金华,吴兴宁,孙六一,等.鄂尔多斯盆地马家沟组中组合岩相古地理新认识及油气勘探意义[J].天然气工业,2017,37(3):9-16.  
FU Jinhua, WU Xingning, SUN Liuyi, et al. New understandings of the lithofacies paleogeography of the middle assemblage of Majiagou Formation in the Ordos Basin and its exploration significance[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 9-16.

- [11] 刘全有,金之钧,王毅,等.鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J].岩石学报,2012,28(3):847-858.  
LIU Quanyou, JIN Zhijun, WANG Yi, et al. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012,28(3):847-858.
- [12] 黎瑶,张占松,张超谟,等.靖西地区马家沟组高阻水层影响因素分析与识别方法[J].科学技术与工程,2022,22(17):6857-6868.  
LI Yao, ZHANG Zhansong, ZHANG Chaomo, et al. Analysis and identification method of high-resistivity water layer in Majiagou Formation of Jingxi Area[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(17):6857-6868.
- [13] 邓光校,马永强,谢玮.碳酸盐岩小缝洞群储集体地震表征方法[J].科学技术与工程,2022,22(8):3038-3042.  
DENG Guangxiao, MA Yongqiang, XIE Wei, et al. Seismic attribute detection method for small scale fracture-cave of carbonate reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(8):3038-3042.
- [14] 常少英,李世银,乔占峰,等.碳酸盐岩风化壳岩溶地震弱振幅储层识别技术的应用:以塔里木盆地TZ62井区为例[J].海相油气地质,2019,24(3):91-96.  
CHANG Shaoying, LI Shiyin, QIAO Zhanfeng, et al. Application of weak amplitude reservoir identification technology in karst reservoir of carbonate weathered crust: an example study of TZ62 well area in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019,24(3):91-96.
- [15] 何治亮,魏修成,钱一雄,等.海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J].石油与天然气地质,2011,32(4):489-498.  
HE Zhiliang, WEI Xiucheng, QIAN Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2011,32(4):489-498.
- [16] 龚大兴,周家云,陈科贵,等.海相碳酸盐台地含钾层段旋回地层学响应和识别:以川中广安地区三叠系为例[J].高校地质学报,2014,20(2):230-238.  
GONG Daxing, ZHOU Jiayun, CHEN Kegui, et al. Identification of the potassium-rich member in carbonate platform and its response to the gamma ray well logging from the perspective of cyclostratigraphy: a case study in Triassic of Guangan Area, in the Central Sichuan Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2014,20(2):230-238.
- [17] 陈洪德,胡思涵,陈安清,等.鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧非岩溶白云岩储层成因[J].天然气工业,2013,33(10):18-24.  
CHEN Hongde, HU Sihan, CHEN Anqing, et al. Genesis of non-karst dolomite reservoirs in the eastern central paleo-uplift in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(10):18-24.
- [18] 杨华,王宝清,孙六一,等.鄂尔多斯盆地古隆起周边地区奥陶系马家沟组储层影响因素[J].岩性油气藏,2013,25(3):9-16.  
YANG Hua, WANG Baoqing, SUN Liuyi, et al. Influencing factors of reservoirs for Ordovician Majiagou Formation in the surrounding area of paleo-uplift in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013,25(3):9-16.
- [19] 杜威,纪友亮,张艺楼,等.湖相混积层系沉积特征和高频层序定量划分:以饶阳凹陷肃宁一大王庄构造带沙一下亚段为例[J].科学技术与工程,2021,21(29):12415-12421.  
DU Wei, JI Youliang, ZHANG Yilou, et al. Sedimentary characteristics and quantitative high-frequency sequence division of lacustrine mixed depositional systems: a case study from the lower member of the Shahejie Formation in the Suning-Dawangzhuang structural unit of the Raoyang Sag[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(29):12415-12421.
- [20] 田世峰,陈中强,查明.珠江口盆地中新世韩江组天文调谐地质年代代表[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):27-32.  
TIAN Shifeng, CHEN Zhongqiang, ZHA Ming. Astronomical time scale of Middle Miocene Hanjiang Formation in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012,36(1):27-32.
- [21] 江青春,胡素云,姜华,等.四川盆地中二叠统茅口组地层缺失量计算及成因探讨[J].天然气工业,2018,38(1):21-29.  
JIANG Qingchun, HU Suyun, JIANG Hua, et al. Calculation and inducement of lacuna in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(1):21-29.
- [22] 李红俊,张廷山,张喜,等.天文轨道周期调制的海平面变化对生物礁发育的影响:以川东北地区晚二叠世长时期为例[J].断块油气田,2023,30(1):52-59.  
LI Hongjiao, ZHANG Tingshan, ZHANG Xi, et al. Effects of sea level change modulated by astronomical orbital period on organic reefs development: a case study of Late Permian Changxing in Northeast Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023,30(1):52-59.
- [23] 王宏,陈永胜,田立柱,等.渤海湾全新世贝壳堤与牡蛎礁:古气候与海面变化[J].地质通报,2011,31(9):1405-1411.  
WANG Hong, CHEN Yongsheng, TIAN Lizhu, et al. Holocene cheniers and oyster reefs in Bohai Bay: palaeoclimate and sea level changes[J]. Geological Bulletin of China, 2011,31(9):1405-1411.
- [24] 鲁毅,崔宇驰,刘新宇,等.中国南海西沙碳酸盐岩台地形成过程及控制因素:来自西科1井的地球化学证据[J].古地理学报,2020,22(6):1197-1208.  
LU Yi, CUI Yuchi, LIU Xinyu, et al. Formation process and controlling factors of carbonate platform in Xisha Area, South China Sea: based on geochemical evidences from well Xike-1[J]. Journal of Palaeogeography, 2020,22(6):1197-1208.
- [25] 穆财能,侯明才,刘欣春,等.基于高精度碳酸盐岩微相的海平面变化曲线分析:以塔里木盆地柯坪大湾沟剖面上奥陶统坎岭组一印干组为例[J].沉积学报,2021,39(6):1357-1370.

- MU Caineng, HOU Mingcai, LIU Xinchun, et al. Analyses of the sea level curve based on high-precision carbonate microfacies[J]. *Acta Sedimentologica Sciences*, 2021,39(6):1357-1370.
- [26] 冯磊,刘宏,谭磊,等.岩溶古地貌恢复及油气地质意义;以四川盆地泸州地区中二叠统茅口组为例[J]. *断块油气田*, 2023,30(1):60-69.
- FENG Lei, LIU Hong, TAN Lei, et al. Karst paleogeomorphology restoration and hydrocarbon geological significance: a case study of Middle Permian Maokou Formation in Luzhou Area of Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023,30(1):60-69.
- [27] SHERIF F, FADHIL A L, AHMED A, et al. Astronomical time scale of the Lower Miocene depositional sequences(Aquitania-Burdigalian) in the Jambour Field, Northern Iraq[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023,151:106182.
- [28] 刘建良,刘可禹.碳酸盐岩地层完整性分析及其影响因素定量评价:来自地层正演模拟的启示[J]. *中国科学:地球科学*, 2021,51(1):150-158.
- LIU Jianliang, LIU Keyu. Estimating stratal completeness of carbonate deposition via process-based stratigraphic forward modeling[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021,51(1):150-158.
- [29] 赵军,曹强,付宪弟,等.基于米兰科维奇天文旋回恢复地层剥蚀厚度:以松辽盆地X油田青山口组为例[J]. *石油实验地质*, 2018,40(2):260-267.
- ZHAO Jun, CAO Qiang, FU Xiandi, et al. Recovery of denuded strata thickness based on Milankovitch astronomical cycles: a case study of Qingshankou Formation in X Oilfield, Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018,40(2):260-267.
- [30] 宋翠玉,吕大炜.米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. *沉积学报*, 2022,40(2):380-395.
- SONG Cuiyu, LYU Dawei. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022,40(2):380-395.
- [31] WEI Xiaosong, DENG Yong, YAN Detian, et al. Organic matter enrichment in Asia's palaeolake controlled by the Early and Middle Eocene global warming and astronomically driven precessional climate[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023,154:106342.
- [32] 张运波,赵宗举,袁圣强,等.频谱分析法在识别米兰科维奇旋回及高频层序中的应用:以塔里木盆地塔中—巴楚地区下奥陶统鹰山组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011,41(2):400-410.
- ZHANG Yunbo, ZHAO Zongju, YUAN Shengqiang, et al. Application of spectral analysis to identify Milankovitch cycles and high-frequency sequences: take the Lower Ordovician Yingshan Formation of Mid-Tarim Basin as an example[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011,41(2):400-410.
- [33] LI Mingsong, KUMP L R, HINNOV L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018,501:165-179.
- [34] MANN M E, LEES J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. *Climatic Change*, 1996,33:409-445.
- [35] ZEEDEN C, MEYERS S R, LOURENS L J, et al. Testing astronomically tuned age models[J]. *Paleoceanography*, 2015,30:369-383.
- [36] KEMP D B. Optimizing significance testing of astronomical forcing in cyclostratigraphy[J]. *Paleoceanography*, 2016,31:1516-1531.
- [37] WU Huaichun, FANG Qiang, LINDA A H, et al. Astronomical time scale for the Paleozoic Era[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023,12:104510.
- [38] LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M, et al. La 2010: a new orbital solution for the long-term motion of the earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011,532:A89.
- [39] 毛丹凤,何登发,包洪平,等.鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起的分布、演化及构造属性[J]. *石油勘探与开发*, 2023,50(4):755-766.
- MAO Danfeng, HE Dengfa, BAO Hongping, et al. Distribution, evolution and structural properties of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023,50(4):755-766.
- [40] 席胜利,熊鹰,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五盐下沉积环境与海平面变化[J]. *古地理学报*, 2017,19(5):773-790.
- XI Shengli, XIONG Ying, LIU Xianyang, et al. Sedimentary environment and sea level change of the subsalt interval of member 5 of Ordovician Majiagou Formation in Central Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017,19(5):773-790.
- [41] PALMER A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. *GSA Bulletin*, 1991,103(1):1-21.
- [42] 薛学亚,林杨松,韩剑发,等.塔中隆起北斜坡鹰山组碳酸盐岩古岩溶结构特征[J]. *东北石油大学学报*, 2017,41(5):1-12.
- XUE Xueya, LIN Changsong, HAN Jianfa, et al. Characteristics of paleokarst structure of Yingshan Formation carbonate rocks on the northern slope of Tazhong Uplift[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017,41(5):1-12.
- [43] 李峰峰,李蕾,陈昊卫,等.伊拉克东南部塞诺曼阶—早土伦阶储层类型、特征及主控因素[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(4):16-28.
- LI Fengfeng, LI Lei, CHEN Haowei, et al. Reservoirs types, characteristics and main controlling factors of Cenomanian-Early Turonian in the Southeastern Iraq[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(4):16-28.

(下转第84页)