

陆表海环境混积岩发育特征及对台地早期演化的启示： 以鄂尔多斯盆地马一段—马二段为例^{*}

杨梦颖^{1,2} 谭秀成^{1,2} 钟寿康^{1,2} 李 娟³
魏柳斌⁴ 许 杰³ 王前平⁴ 熊 鹰^{1,2}

1 西南石油大学天然气地质四川省重点实验室, 四川成都 610500
2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 四川成都 610500
3 中国石油长庆油田公司第四采气厂, 陕西西安 710018
4 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

摘 要 近期在鄂尔多斯盆地马家沟组底部识别出混合沉积, 这对于马家沟组沉积初期构造古地理背景研究具有重要价值。本研究厘定了马家沟组底部混积岩的宏观、微观岩石学特征及典型沉积序列, 并梳理了其沉积环境; 结合地球化学分析, 综合开展了对该套混积岩成因、地质意义以及地球化学响应等方面的研究。结果表明: (1) 鄂尔多斯盆地马家沟组底部混积岩由碎屑岩、碳酸盐岩及硬石膏岩等 3 种成分混合组成; (2) 该混积岩沉积序列中发现大量冲刷面、正粒序、过渡性层理以及角砾状硬石膏岩等典型的潮坪相沉积标志, 基于此划分出潮汐水道 (F1)、泥/砂—云坪 (F2)、膏云坪 (F3) 以及潮上萨布哈 (F4) 等 4 个亚相; (3) 地球化学分析揭示出混积过程中的元素分异规律, 表现为垂向上随着海平面从升到降, 陆源影响呈现由弱变强的波动特征, 横向上稀土元素较亲陆源元素具有更远的扩散距离。研究认为, 在马家沟组沉积初期海侵背景下, 该套混积岩不仅是乌审旗—靖边古隆起核部出露的长城系砂岩再旋回的产物, 同时也是乌审旗—靖边古隆起发育在奥陶系马家沟组沉积早期的关键证据, 这表明乌审旗—靖边古隆起在马一段—马二段沉积中期一直扮演着水上隆起并持续供给陆源碎屑的角色。

关键词 混积岩 潮坪相 地球化学特征 马家沟组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 杨梦颖, 女, 1997 年生, 博士研究生, 主要从事碳酸盐沉积及碳酸盐岩储集层研究。
E-mail: ymying22@163.com。

通讯作者简介 钟寿康, 男, 1995 年生, 主要从事碳酸盐沉积及碳酸盐岩储集层研究。E-mail: zhongsk95@163.com。

中图分类号: P588.21 文献标志码: A

Characteristics of mixed sedimentation in epicontinental sea and implications for early evolution of platforms: insights from $O_1 m_1$ to $O_1 m_2$ of the Majiagou Formation in Ordos Basin

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金项目 (编号: 42302139), 四川省自然科学基金项目 (编号: 2025ZNSFSC1186) 和西南石油大学研究生科研创新基金项目 (编号: 2022KYCX032) 共同资助。[Co-funded by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 42302139), Sichuan Province Natural Science Foundation for Youths (No. 2025ZNSFSC1186), and Graduate Research and Innovation Fund Project of Southwest Petroleum University (No. 2022KYCX032)]

收稿日期: 2025-03-31 改回日期: 2025-04-18

YANG Mengying^{1,2} TAN Xiucheng^{1,2} ZHONG Shoukang^{1,2} LI Juan³

WEI Liubing⁴ XU Jie³ WANG Qianping⁴ XIONG Ying^{1,2}

¹ Sichuan Key Laboratory of Natural Gas Geology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

² Division of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, China National Petroleum Corporation,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

³ The Fourth Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

⁴ Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract Recently, mixed sedimentation involving clastic, carbonate, and evaporite components has been identified at the base of the Majiagou Formation in the Ordos Basin, offering significant insights into the tectonic-palaeogeographic framework during its early depositional phase. This study systematically examines macroscopic and microscopic petrological features, along with representative depositional sequences, to reconstruct the depositional environment. Integrated geochemical analyses were conducted to investigate the genetic mechanisms, geological significance, and elemental behavior associated with this mixed sedimentary system. Key findings include: (1) The mixed sedimentary assemblage comprises three primary lithological components—clastic rocks, carbonate rocks, and anhydrite. (2) Sedimentary structures indicative of tidal flat environments, including scour surfaces, normal grading, transitional bedding, and brecciated anhydrite, were observed and used to define four subfacies: tidal-dominated channels (F1), muddy/arenaceous dolomitic flat (F2), gypsum-bearing dolomitic flat (F3), and supratidal sabkha (F4). (3) Geochemical data reveal distinct elemental partitioning during sedimentation, with vertical variations reflecting fluctuating terrestrial input driven by sea-level changes. Laterally, rare earth elements exhibit greater mobility compared to terrigenous elements, suggesting longer transport distances. The results indicate that the mixed sedimentation originated from reworking of sandstones derived from the exposed Changcheng System within the central Wushen Banner-Jingbian palaeouplift, triggered by marine transgression during the early stage of Majiagou deposition. This unit thus serves as critical evidence for the existence and persistence of the Wushen Banner-Jingbian palaeouplift during the O_1m_1 to O_1m_2 intervals, which played a critical role in facilitating regional uplift and ensuring sustained supply of terrigenous clastics throughout this period.

Key words mixed sedimentation, tidal flat facies, geochemical characteristics, Majiagou Formation, Ordos Basin

About the first author YANG Mengying, born in 1997, a doctoral candidate, is engaged in research on carbonate deposits and reservoirs. E-mail: ymying22@163.com.

About the corresponding author ZHONG Shoukang, born in 1995, is engaged in research on carbonate deposits and reservoirs. E-mail: zhongsk95@163.com.

0 引言

混积岩的概念最早由 Mount (1984) 提出, 主要是指由 2 种或 2 种以上不同成分、不同结构的沉积物混合形成的岩石, 最常见的是碎屑岩与碳酸盐岩以成分混合或呈互层结构产出。根据混合沉积的形式差异, 常可分为间断混合、相混合、原地混合以及母缘混合 4 种形式 (Mount, 1984)。相混合

常出现在碳酸盐台地发育初期或消亡末期, 例如四川盆地寒武系沧浪铺组—龙王庙组 (李红等, 2021; Li *et al.*, 2021a; 宋金民等, 2021)、奥陶系桐梓组 (Tang *et al.*, 2022) 以及塔里木盆地震旦系奇格布拉克组 (Zhao *et al.*, 2023), 均在台地演化初期发育了大量混积岩; 而塔里木盆地石炭系巴楚组 (杨波等, 2012)、鄂尔多斯盆地二叠系太原

组（黄有根等，2024），则是台地消亡时发育混积岩的典型示例。以相混合形式发育的混积岩往往代表着近岸的边缘相沉积（宋金民等，2021；Tang *et al.*, 2022），是判断台地发育期间是否存在古陆的重要证据（张春林等，2023）。此外，对于混积岩中的碎屑物质进行物源分析，还可以恢复物源供给方向、判识物源构造背景。混积岩的发育受到构造作用（Li *et al.*, 2021b）、海平面升降（Li *et al.*, 2021a）、气候变化（Brito *et al.*, 2024）以及水动力条件（Zecchin and Catuneanu, 2017）等多种因素的影响与控制，因此关于混积岩的沉积记录分析也是开展台地演化期间沉积环境演变等研究的重要媒介。

随着地震、岩心资料的日益丰富，近期通过地震剖面（何发岐等，2023；张春林等，2023）以及钻井取心、测井对比，在鄂尔多斯盆地识别出了马家沟组底部的超覆沉积（钟寿康等，2024）。地层对比以及超覆范围恢复揭示出该超覆沉积持续至马二段上部，而此次海侵被认为是怀远运动之后鄂尔多斯盆地台地环境再次恢复和发育的重要驱动力（钟寿康等，2024）。岩心资料显示，马家沟组底部发育频繁互层的混合沉积，这是台地恢复初期的重要标志，对于周缘构造—地貌格局判识以及沉积环境变化等研究具有重要意义。

基于此，本次研究针对鄂尔多斯盆地马家沟组底部混积地层，开展混积岩岩石学特征描述、序列解译以及沉积环境厘定，明确了台地发育初期混积岩的沉积环境及对混积岩特征的影响；结合地球化学分析，在进一步佐证混合沉积存在的同时分析纵向环境演变对于混合沉积的影响以及地球化学响应，以期为马家沟组发育初期沉积环境研究提供相关借鉴。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部，历经多次构造旋回（何登发等，2021），地层序列记录了其长期复杂的构造—沉积演化。中元古代长城纪，鄂尔多斯盆地发育滨岸相碎屑岩沉积，后遭受长期剥蚀演化为准平原（欧阳征健等，2020；包洪平等，2022）。至寒武纪，鄂尔多斯盆地演化为被动大陆边缘沉积（张春林等，2023），后期受怀远运动影响，乌审旗—靖边一带隆升，张夏组、徐庄组及毛

庄组等地层剥蚀严重，局部出露中新元古界（图 1-a）（李相博等，2021；毛丹凤等，2024）。进入奥陶纪，在全球海平面持续上升的背景下，马家沟组底部发育超覆沉积并持续至马二段上部（钟寿康等，2024），鄂尔多斯盆地再次恢复为陆表海台地沉积环境（陈安清，2010）。

马一段—马三段作为马家沟组下部重要的含盐层系，长期以来岩石地层研究相对薄弱。马一段沉积期，地层自东向西超覆充填，部分井区不发育，测井上表现出底部稳定发育高 GR 值段，向上为箱状低 GR 值段；岩石类型包含混积岩、白云岩、膏质云岩、膏岩以及大量盐岩。至马二段沉积期，稳定发育 3 次间歇性海侵，致使华北海与祁连广海沟通，测井上表现为三低夹两高，即 3 段箱状低 GR 值段被 2 段高 GR 值段区分，并依此划分为 3 个亚段；岩性转以碳酸盐岩为主，含少量混积岩，仅每个亚段上部见少量纹层状云质膏岩或盐岩。马三段沉积期受盆地西缘板块挤压影响，发育隆坳相间地貌格局，测井曲线再次变化为波动幅度较大的高 GR 值段，同时蒸发岩再次大量发育，常见泥粉晶云岩、膏质云岩、云质膏岩及膏岩，东部井区发育块状盐岩（钟寿康等，2024）（图 1-b）。最新的系统取心井证实，马家沟组与下伏地层呈不整合接触，下伏地层包括长城系碎屑岩（图 2-a）、寒武系以及下奥陶统冶里组—亮甲山组。

2 样品与方法

本研究对鄂尔多斯盆地钻遇马一段—马二段的 19 口钻井共计 600 余米岩心、430 余张薄片资料进行了详细观察与解译，厘定了岩石类型、沉积构造以及典型序列。地球化学分析方面，在 T112 井、J1 井以及 YY1 井的马二段等时地层格架内分别采集 15 件、8 件、11 件岩心样品，共计 34 件岩心样品的全岩主、微量元素含量测试在西南石油大学碳酸盐岩沉积—成岩地球化学实验室完成，使用仪器为电感耦合等离子质谱仪 Agilent 7700e ICP-MS。测试流程如下：称取 50 ± 1 mg 粉末样品置于溶样弹中，依次加入 1 mL H_2O 、1 mL HNO_3 、0.5 mL HF ；将溶样弹放入钢套中，拧紧后放入烘箱，190 °C 加热 48 h；待溶样弹冷却后取出，在电热板上 115 °C 将样品蒸干；然后加入 1 mL HNO_3 再次蒸干。随后

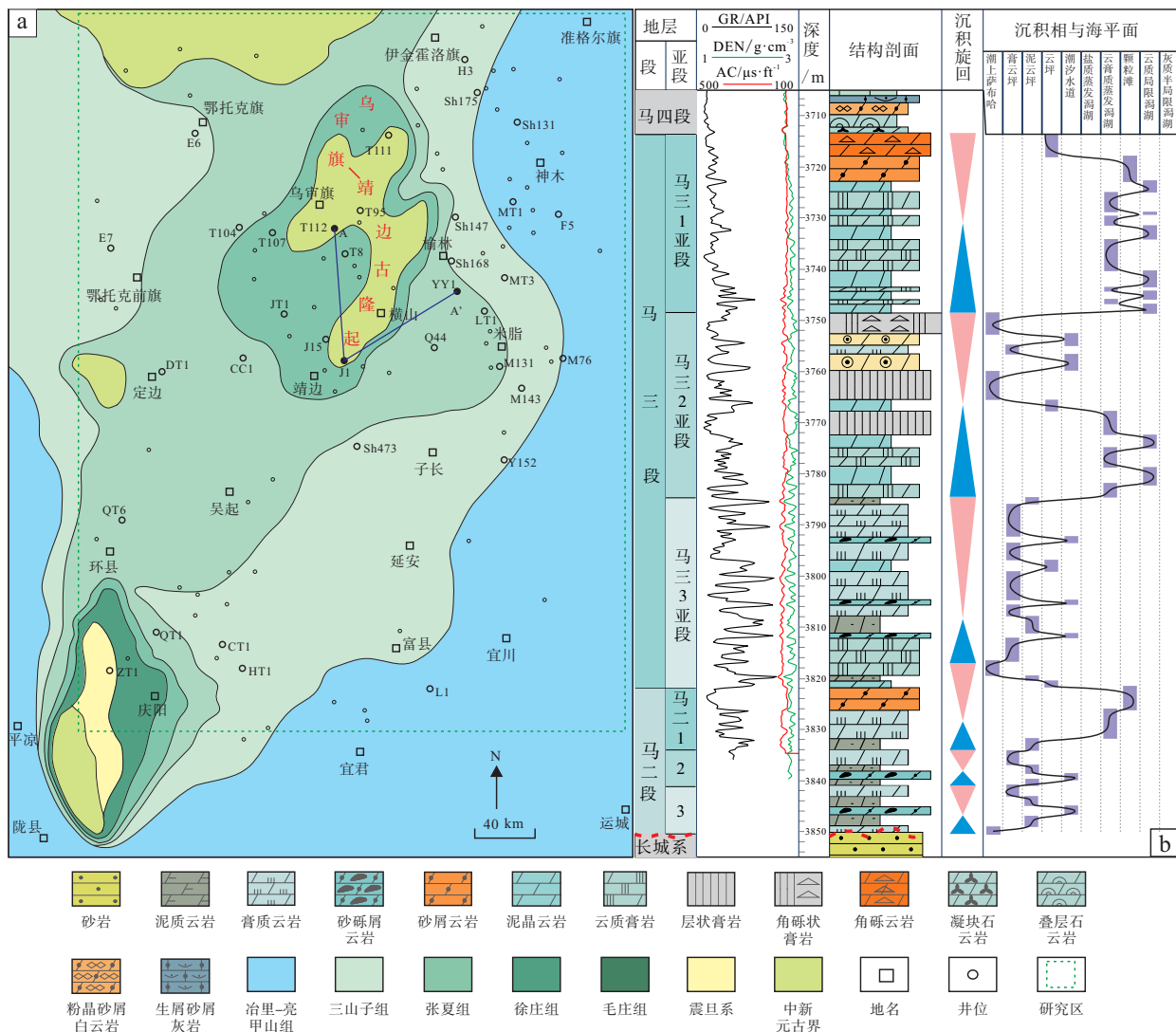


图 1 鄂尔多斯盆地前马家沟组古地质图 (a, 改编自李相博等, 2021) 和 T112 井沉积综合柱状图 (b)

Fig. 1 Palaeogeological map before the depositional period of Majiagou Formation in Ordos Basin (a, modified from Li *et al.*, 2021) and sedimentary integrated histogram of Well T112 (b)

再依次加入 1 mL HNO_3 、1 mL 超纯水和 1 mL 的 $1 \mu\text{g/g}$ In, 并再次将溶样弹放入钢套, 拧紧后放入烘箱, 190°C 加热 12 h。待溶样弹冷却后将溶液转入定容瓶中, 用浓度 2% 的 HNO_3 稀释至 100 g (对应的稀释倍数为 2000), 使用 ICP-MS 测试。测试中使用了美国地质调查局系列标样 USGS AGV-2、BHVO-2、GSP-2、BIR-1a, 主量与微量元素测试精度均小于 5%。

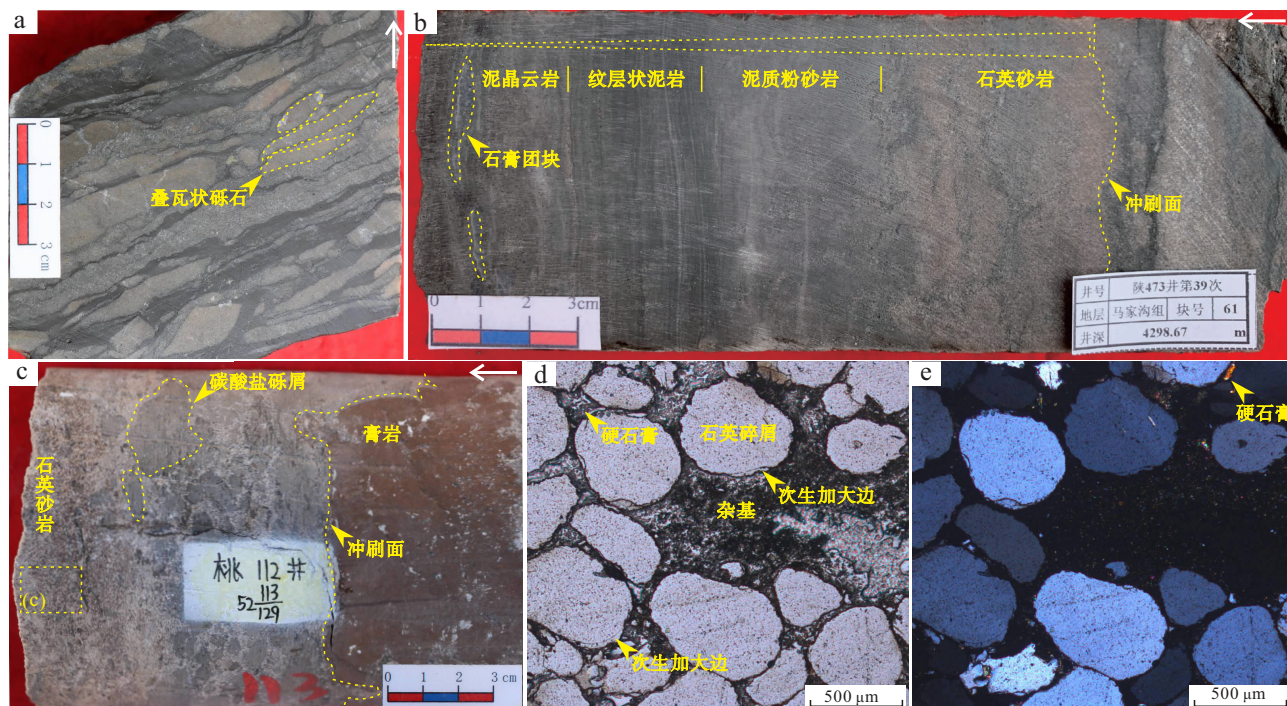
3 混积岩沉积特征与分析

3.1 岩石学特征

由于混合沉积的成分、结构类型多样, 导致混

积岩定名体系极为复杂, 因此目前关于混积岩的分类方案仍有争议 (Mount, 1984; 董桂玉等, 2007)。鄂尔多斯盆地马家沟组底部存在碎屑岩、碳酸盐岩以及蒸发岩 3 种岩石类型, 进一步加大了研究区内混积岩的定名难度。本研究参考董桂玉等 (2007) 提出的两端元划分方案, 将主成分为石英砂岩等碎屑岩且与海相碳酸盐岩或硬石膏岩混杂沉积的岩石划分为 (含) 云质/膏质砂岩, 而主成分为白云岩且与部分陆源碎屑物质混合沉积的岩石定义为 (含) 砂质白云岩或 (含) 泥质白云岩。

1) (含) 云质/膏质砂岩。马家沟组底部的云质/膏质砂岩多为灰褐色—褐色 (图 2-b, 2-c), 这是典型的氧化色, 暗示沉积期水体极浅。在云



a—泥质石英砂岩，发育叠瓦状构造，T112井，3852.58 m，长城系；b—黄褐色云质石英砂岩，底部见冲刷面，向上渐变为灰色泥质石英粉砂岩、深灰色纹层状泥岩、褐灰色泥晶云岩，见扁平状硬石膏团块，Sh473井，4298.67 m，马一段；c—膏岩之上发育冲刷面，底部见碳酸盐砾屑和石英砂岩，T112井，3841.56 m，马二3亚段；d—图c镜下微观特征，石英细—中砂岩，石英碎屑磨圆度极好，分选一般，颗粒间见暗色泥质填隙物，单偏光，T112井，3841.56 m，马二3亚段；e—图d同视域，正交光。图b和c上的白色箭头代表岩心向上方向

图 2 鄂尔多斯盆地马一段—马二段云质/膏质砂岩特征

Fig. 2 Characteristics of dolomitic/gypsiferous sandstones of the O_1m_1 to O_1m_2 of Majiagou Formation in Ordos Basin

质/膏质砂岩发育的区域，岩心上均可见十分明显的冲刷面构造，冲刷面之下多为白云岩（图 2-b）或硬石膏岩（图 2-c），且顶部被冲刷面侵蚀破坏，结构不完整，而冲刷面之上见正粒序构造以及底砾岩，向上与多种岩石类型依次组合（图 2-b，2-c），分别是碳酸盐岩砾屑、灰褐色石英砂岩、灰色泥质粉砂岩、深灰色纹层状泥岩、夹硬石膏团块的泥晶白云岩等。镜下见石英碎屑磨圆度极好，部分颗粒具次生加大边，以细—中砂为主，局部含有粗砂，分选一般（图 2-d，2-e），未见明显的固相包裹体、波状消光以及破裂纹等，推测其是再旋回沉积石英。颗粒间充填暗色杂基以及少量针状硬石膏单晶（图 2-d，2-e），表明石英颗粒沉积时周缘水体或孔隙流体的盐度上升，开始析出硬石膏。

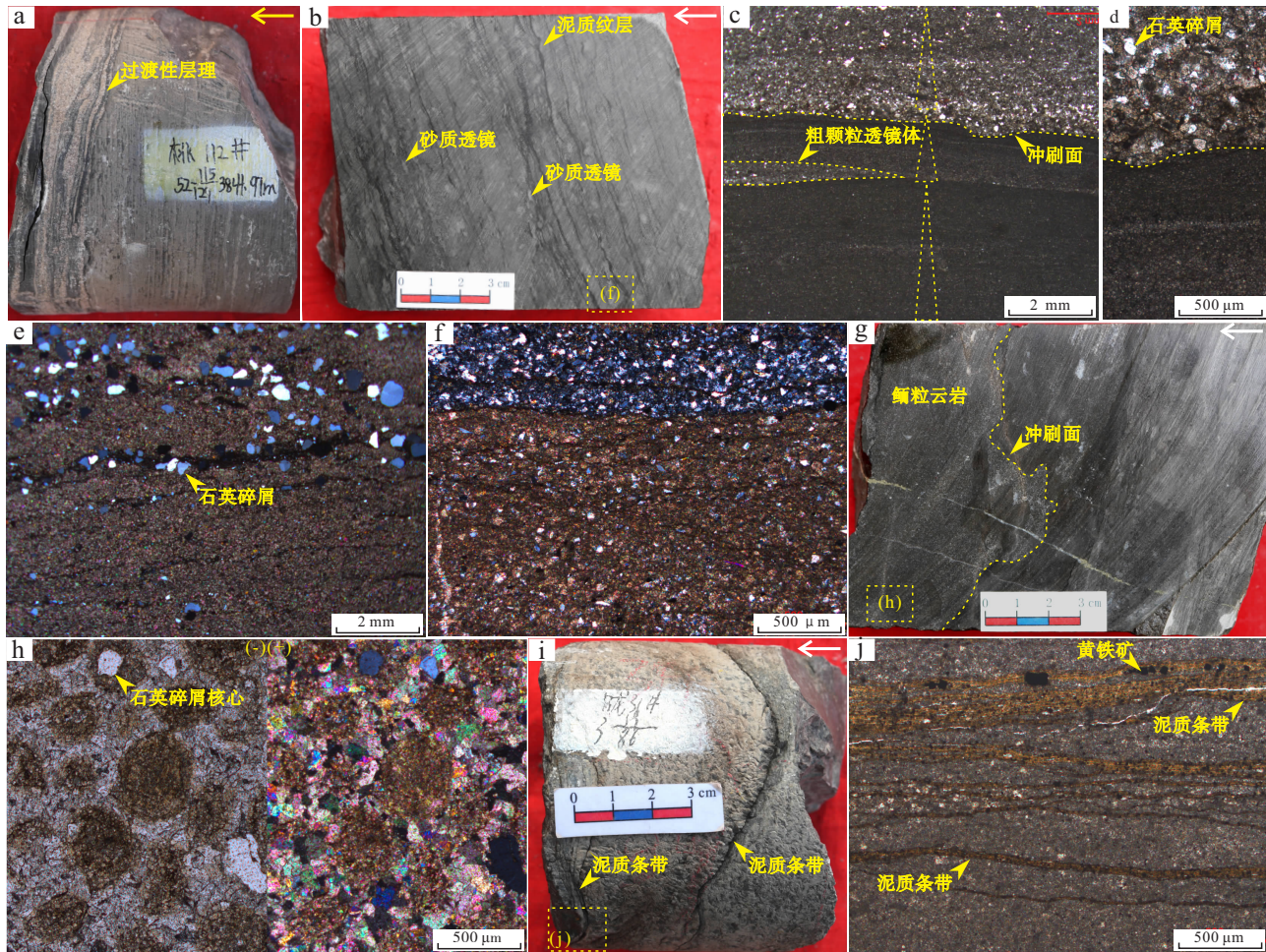
2) (含) 砂质白云岩。岩心上呈灰色—灰褐色，常发育过渡性层理（图 3-a），或泥砂质夹层与白云岩呈韵律互层（图 3-b）。镜下见微型粗颗粒透镜体和冲刷面，冲刷面之下为泥晶白云岩，之上为石英碎屑与泥晶白云岩混合沉积（图 3-c，3-

d）。基质普遍为泥晶云岩，石英碎屑离散状分布于基质之中（图 3-e），或集中分布于砂质条带中（图 3-f）。与（含）云质/膏质砂岩类似，（含）砂质白云岩中石英颗粒磨圆度极好，但粒度普遍略小。此外，研究区内还常见到一类混积岩，其岩心底部见明显冲刷面，冲刷面之上为鲕粒白云岩（图 3-g），部分鲕粒核心为石英碎屑（图 3-h）。

3) (含) 泥质白云岩。岩心上以灰色—深灰色泥质呈纹层状或断续纹层状分布为特征（图 3-b，3-i），局部见少量硬石膏纹层。基质为泥晶灰岩，可见灰褐色泥质纹层，与黄铁矿伴生（图 3-j）。而与硬石膏相伴生的混积碳酸盐岩，可见泥质条纹、针状硬石膏与泥晶白云岩韵律互层。

3.2 沉积序列特征解译

第 1 个典型序列组合来自 Sh473 井马一段，位于马家沟组底部的高 GR 值段内，共识别出 6 个顶底界面清晰的沉积序列（S1-S6）（图 4-a）。S1 序列底部可见明显的冲刷面构造，下部发育正粒序



a—含石英粉砂泥晶白云岩，碎屑夹层内发育过渡性层理，T112井，3841.97 m，马二3亚段；b—纹层状泥晶白云岩，见暗色泥质纹层与小型砂质透镜，T112井，3849.56 m，马二3亚段；c—纹层状含砂泥晶白云岩，见微透镜状层理，XQ1井，499.40 m，马一段；d—图c局部放大；e—图b镜下微观特征，见石英碎屑，单偏光；f—含石英粉砂泥晶白云岩，见纹层状分布的石英粉砂岩夹层，正交光，L104井，3879.80 m，马二1亚段；g—下部岩性为泥晶白云岩，向上发育冲刷面，充填鲕粒云岩，T112井，3847.44 m，马二3亚段；h—图f镜下微观特征，鲕粒云岩，部分鲕粒核心为石英碎屑，单偏光与正交光，3847.44 m，马二3亚段；i—泥晶云岩，发育暗色泥质条带，L31井，3976.66 m，马二1亚段；j—图g镜下微观特征，泥晶云岩，见纹层状褐色泥质条纹，单偏光，L31井，3976.66 m，马二1亚段。图a、b、g和i上的白色箭头代表岩心向上方向

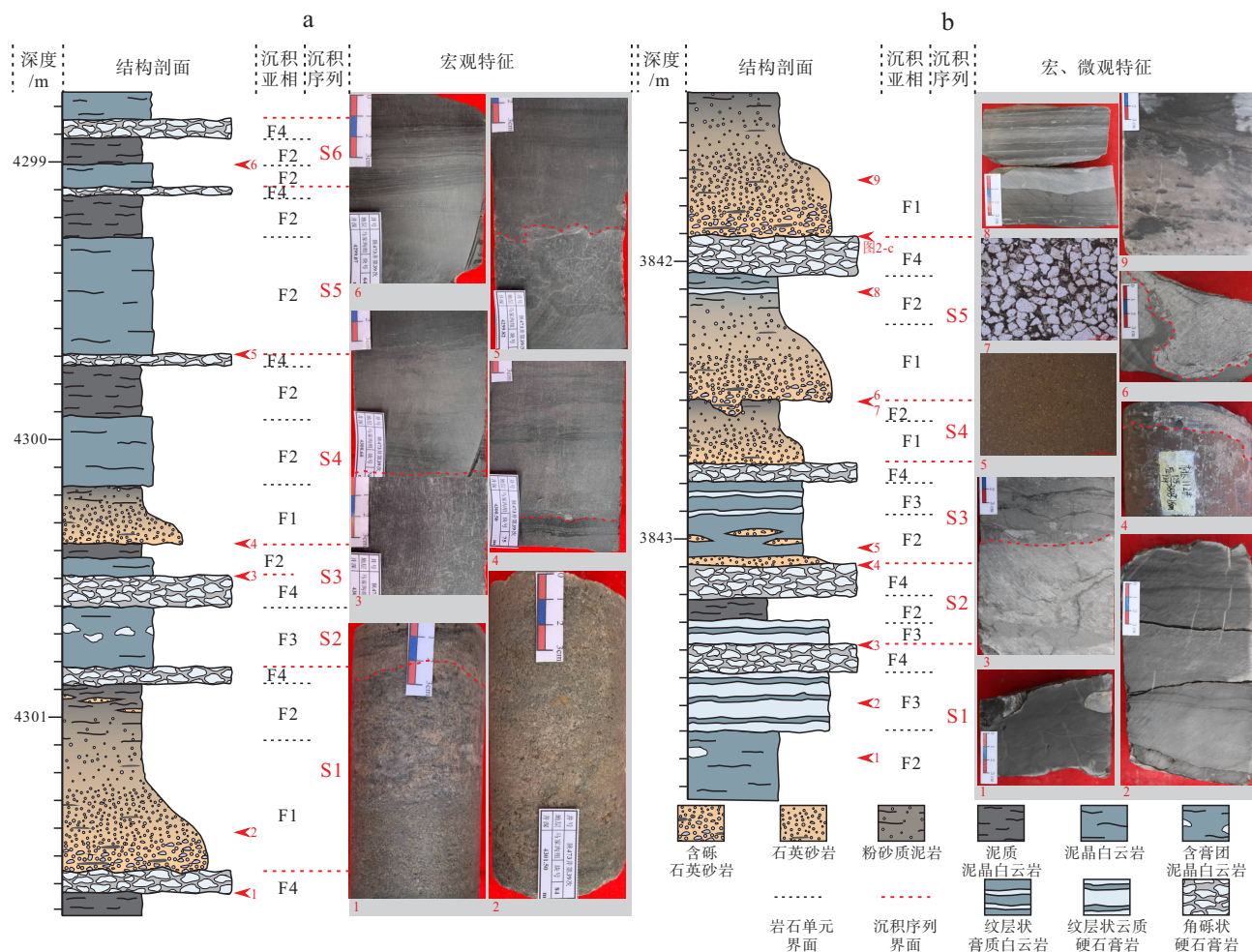
图3 鄂尔多斯盆地马一段—马二段砂质碳酸盐岩特征

Fig. 3 Characteristics of sandy carbonate rocks from the O_1m_1 to O_1m_2 of Majiagou Formation in Ordos Basin

的细—粗砂岩，向上渐变为暗色粉砂质泥岩，局部见砂岩透镜体，顶部见浅灰色角砾状硬石膏岩。S2序列下部为灰色泥晶白云岩，见水平分布的团块状硬石膏岩，上部为浅灰色角砾状硬石膏岩。S3序列极短，内部见泥晶白云岩和暗色泥质白云岩，结合S4序列底部发育底冲刷面构造，推测该序列存在被冲刷、破坏的可能。S4序列下部发育浅灰色细砂岩，向上渐变为泥晶白云岩与暗色泥质白云岩，顶部见角砾状硬石膏岩。S5序列与S6序列岩石单元构成与S4序列上部较为相似，仅底部未发

育具有冲刷面的砂岩段。

第2个典型沉积序列组合来自T112井的马二3和马二2亚段，其中硬石膏岩发育段为马二3亚段顶部高GR值段，之上砂岩属于马二2亚段(图1-b)。共识别出5个顶底界面清晰的沉积序列(S1—S5)(图4-b)。S1序列下部为灰色泥晶白云岩，局部见团块状硬石膏岩，向上硬石膏岩含量增多，以纹层状产出，之后演变为纯硬石膏岩，呈角砾状产出。S2序列底部膏质含量降低，发育纹层状云质膏岩，中部见薄层泥质白云岩，顶部再



a—Sh473 井, 4298.50~4301.72 m, 马一段; b—T112 井, 3843.93~3841.40 m, 马二 3 和马二 2 亚段。

F1: 潮汐水道亚相; F2: 泥/砂—云坪亚相; F3: 膏云坪亚相; F4: 潮上萨布哈亚相

图 4 鄂尔多斯盆地马家沟组底部含混积岩的典型沉积序列

Fig. 4 Typical sedimentary sequence of diamictites at the base of Majiagou Formation in Ordos Basin

次发育角砾状硬石膏岩。S3 序列底部发育冲刷面构造, 且 S2 顶部硬石膏岩具被侵蚀的特征, 冲刷面之上发育含砂质透镜体以及纹层状硬石膏岩, 顶部为角砾状硬石膏。S4 序列岩性单一, 自下而上由具底冲刷的细砂岩过渡为粉砂质泥岩。S5 序列底部再次发育具有底冲刷的砂岩, 向上渐变为泥晶白云岩, 局部见膏质纹层, 顶部发育角砾状硬石膏岩。

对比来看, T112 井中砂岩层占比相对更高。上述 2 口井的混积岩沉积序列均表现出发育大量的底冲刷构造以及角砾状硬石膏岩, 同时单个沉积序列厚度较小, 普遍小于 1 m。

3.3 沉积环境分析

基于上述沉积序列分析, 结合各类钻井、取心

资料中的相标志进行沉积相分析与厘定, 认为鄂尔多斯盆地马家沟组底部混积岩发育于潮坪沉积体系, 可细分为 4 个亚相(表 1)。

1) 潮汐水道亚相 (F1)。潮汐水道分布在潮间带中下部, 主要是退潮过程中海水集中流动而在泥云坪、云坪亚相中形成下切水道, 常会对已形成的沉积物产生侵蚀破坏作用 (Hazard *et al.*, 2017)。潮汐水道亚相的岩石类型取决于母岩供给的差异: 碎屑岩母岩区物源供给充足时, 常发育磨圆度极好的石英砂岩(图 2-b 至 2-e); 陆源影响较弱时, 则可能因为水动力极强且周而复始而发育鲕粒白云岩(图 3-g, 3-h)。该亚相的典型相标志是岩心上具正粒序, 部分碎屑岩底部见冲刷面, 且与泥质白云岩或砂质白云岩共生。该亚相在整个潮

表 1 鄂尔多斯盆地马家沟组底部沉积相特征
Table 1 Sedimentary characteristics at the base of Majiagou Formation in Ordos Basin

沉积相	亚相	典型岩石类型	相标志	混积岩特征与成因 (Type1-Type6)
潮坪相	潮上萨布哈亚相 (F4)	角砾状硬石膏岩	鸡笼铁丝构造、膏质角砾	Type1: 泥质、砂质充填于团块状/角砾状硬石膏间 (图 4-a 中的 S1); 萨布哈环境导致砂岩孔隙流体盐度升高进而析出蒸发矿物
	膏云坪亚相 (F3)	含膏团泥晶白云岩、纹层状膏质白云岩、云质硬石膏岩	膏质团块, 揉皱变形构造	Type2: 云膏砂泥韵律互层, 可见泥质条带或砂质透镜体 (图 4-b 中的 S5); 潮汐水动力强弱交替, 导致泥、砂质以过渡性层理的形式发育在泥晶白云岩之中
	泥/砂—云坪亚相 (F2)	泥/砂质白云岩、纹层状泥晶白云岩	泥砂质夹层、过渡性层理	
	潮汐水道亚相 (F1)	云质/膏质石英砂岩、鲕粒白云岩	正粒序、底冲刷构造	Type3: 石英砂岩混杂硬石膏岩、碳酸盐岩砾屑 (图 2-c); 潮汐水道下切而破碎形成的碳酸盐岩砾屑或硬石膏岩砾屑; Type4: 石英砂岩粒间充填硬石膏 (图 2-d, 2-e); 潮汐水道石英砂岩孔隙中重卤水回流导致粒间沉淀出硬石膏; Type5: 泥晶白云岩含量增多而渐变为砂质泥晶白云岩或砂质泥晶白云岩 (图 2-b); 伴随潮汐水道衰竭或变道过程导致岩性混合; Type6: 夹杂在颗粒白云岩之中, 例如作为鲕粒核心 (图 3-h); 远离物源区的区域少量石英碎屑作为鲕粒核心

坪环境中水动力条件最强, 是各类颗粒岩最常发育的场所 (彭旸等, 2023)。

2) 泥/砂—云坪亚相 (F2)。泥/砂—云坪亚相是受潮汐作用影响最为明显的极浅水沉积, 常发育在潮间带, 空间上具有环古陆分布的特征 (冯增昭 and 鲍志东, 1999), 同时也是海陆过渡的边缘相区 (张春林等, 2023)。由于受陆源输入影响, 常见泥/砂质云岩、纹层状泥晶云岩, 因此该亚相最为典型的特征是泥晶白云岩与富泥质泥晶白云岩呈韵律互层, 常见砂质透镜体及过渡性层理等潮坪环境标志性层理 (图 3) (彭旸等, 2023; Brito *et al.*, 2024)。

3) 膏云坪亚相 (F3) 与潮上萨布哈亚相 (F4)。在一些干旱的潮间带上部以及潮上带环境中, 持续的蒸发作用使孔隙之间的原生海水被不断消耗, 同时又通过毛细管浓缩作用不断补给, 周而复始, 导致孔隙水盐度升高到石膏沉淀的盐度范围, 最终析出石膏并交代围岩 (West *et al.*, 1979)。膏云坪亚相形成的膏岩常以团块状或揉皱变形的纹层状云质膏岩或膏质云岩为主 (图 2-a) (Riley and Byrne, 1961), 向岸方向过渡为潮上萨布哈亚相, 同时膏团增多并形成网格状膏岩 (图 4-a, 4-b) (Aleali *et al.*, 2013; Andreeva, 2015)。

综上, 鄂尔多斯盆地马家沟组底部混积岩形成于海陆过渡环境, 属于典型的相混合成因 (Mount, 1984)。在由海向陆过渡演化的过程中, 碎屑沉积物占比逐渐减小, 沉积环境由潮汐水道向

云坪、泥云坪、膏云坪以及潮上萨布哈过渡演化。与此同时, 发育碎屑岩、碳酸盐岩以及蒸发岩等 3 种成分的混合沉积, 形成了研究区内产状类型多样的混积形式 (表 1)。马家沟组底部的混积岩在多口钻井普遍发育 (图 2; 图 3), 表明马家沟组底部的超覆沉积造成了边缘相大范围围岩时分布 (钟寿康等, 2024)。

4 混积岩地球化学特征

4.1 陆源输入

针对马家沟组底部的混积现象, 进一步利用地球化学方法对陆源输入影响进行评价, 评价时主要采用 Al、Ti、Sc、Th、Zr 等亲陆源元素 (Turekian and Wedepohl, 1961; Algeo and Maynard, 2004; Tribovillard *et al.*, 2006)。考虑到研究区内主要为混积岩, 且碳酸盐岩组分明显居多, 因此首先利用 Si 含量来简单评价陆源影响强弱, 其中 $w(\text{SiO}_2) < 3\%$ 定义为陆源影响较弱, 反之则较强。交汇图版显示, 陆源影响较强的混积岩样品中, Al_2O_3 含量与 TiO_2 、Zr 含量呈较强的正相关, 相关系数均大于 0.7, 与 Sc、Th 含量呈弱的正相关 (图 5-a 至 5-d), 这表明上述元素主要来自陆源碎屑 (于冬冬等, 2018)。在陆源影响较弱的样品中, 上述元素之间相关性较弱, 或不具相关性。

除亲陆源元素之外, 陆源物质中诸如长石、黏土等矿物的加入, 使得混积岩中 REE 含量往往较

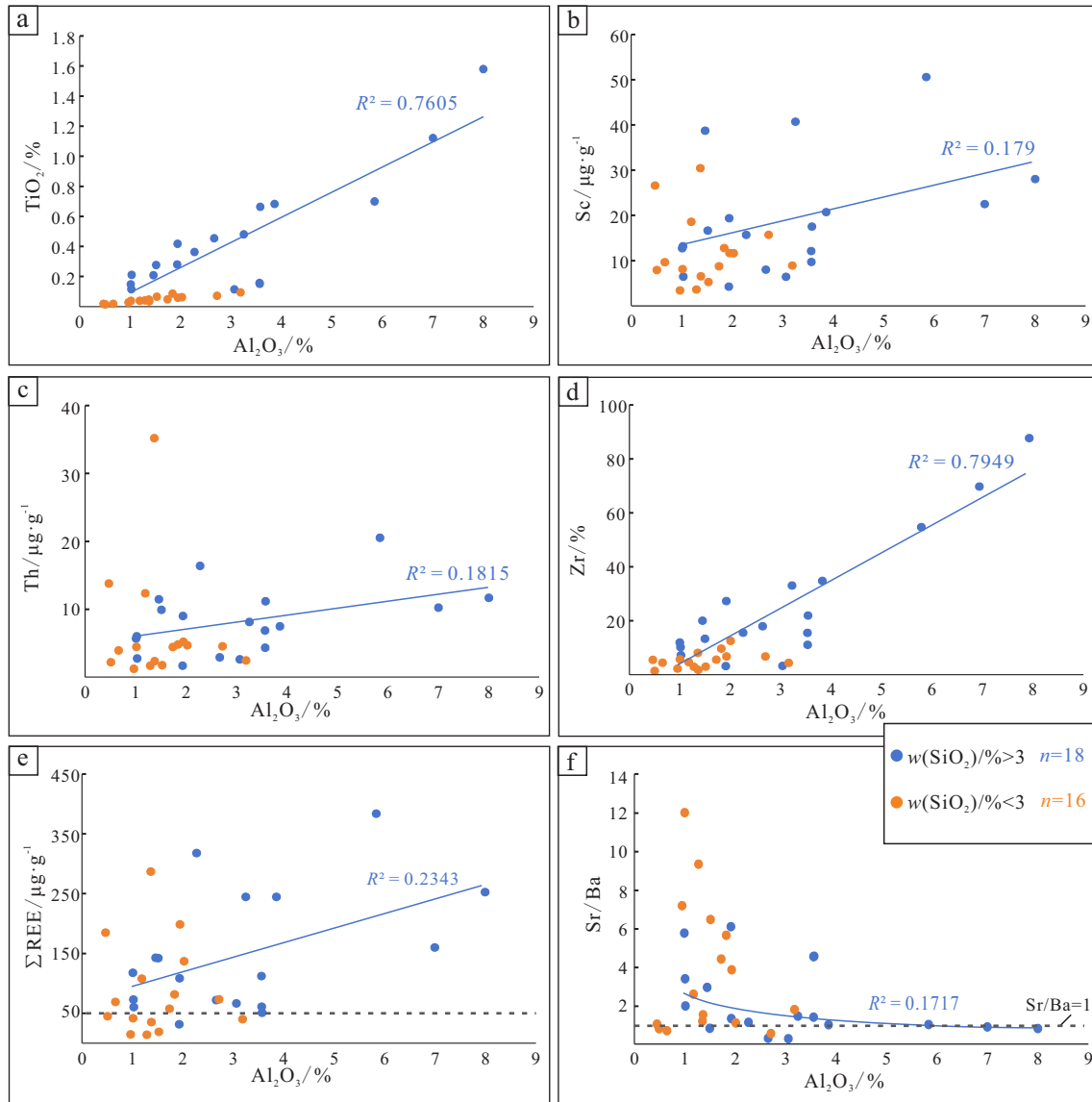


图 5 鄂尔多斯盆地马家沟组底部混积地层亲陆源元素地球化学特征

Fig. 5 Geochemical characteristics of terrigenous elements in mixed strata at the base of Majiagou Formation in Ordos Basin

高 (Webb and Kamber, 2000; Nothdurft *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2021)。反之, 纯净海水中析出的碳酸盐矿物 REE 含量往往较低, 通常小于 $50 \mu\text{g/g}$ (Kawabe *et al.*, 1998)。 Al_2O_3 vs. REE 交汇图显示两者之间存在较弱的正相关性, 且研究区中多数样品的 REE 含量较高, 亦表明受到了陆源物质混入的影响 (图 5-e)。

沉积物风化过程中, Sr 的释放速率显著快于 Ba, 造成陆相淡水环境中的沉积物 Sr/Ba 值显著低于海水环境 (Garzanti *et al.*, 2014)。基于该特征, Sr/Ba 值常被用于判断沉积水体是否受到陆相水体的混入影响, 通常认为 $\text{Sr/Ba} > 1$ 为海相咸水

沉积环境, 反之则为陆相或海陆过渡相的淡水环境 (Chen *et al.*, 2020; Wei and Algeo, 2020)。 Al_2O_3 vs. Sr/Ba 交汇图显示 Al_2O_3 和 Sr/Ba 值之间存在负相关性, 其中陆源物质影响较大的样品中, 几乎一半以上样品的 Sr/Ba 值为 1 左右或小于 1, 而陆源物质影响较小的样品 Sr/Ba 值基本大于 1, 最大可达 10 以上 (图 5-f)。 Al_2O_3 vs. Sr/Ba 图版 (5-f) 从水体性质变化的角度再次佐证了陆源输入的强弱存在差异明显的地球化学响应。

基于上述元素含量或比值的相关性分析, 证实本次研究样品中存在陆源混染, 同时部分元素含量或比值随混积程度变化存在明显波动响应。

4.2 碎屑岩—碳酸盐岩分异

通过 Al_2O_3 vs. Sr/Ba 交汇图版 (图 5-f) 证实了混合沉积中亲陆源元素来自陆源碎屑。在此基础上, 进一步在马家沟组沉积早期的超覆沉积背景下, 从纵向与横向 2 个方面开展混合沉积过程中元素地球化学响应研究。

纵向上, 众多研究实例表明相对海平面升降控制着陆源供给速率和碳酸盐沉淀速率的相对大小 (董桂玉等, 2007), 是影响混积岩发育的关键因素之一 (Zecchin and Catuneanu, 2017; Li *et al.*, 2021a; Brito *et al.*, 2024)。例如在晚古生代冰期, 由于受到多个离散的冰期和间冰期动态变化的影响, 全球海平面高频波动, 且处于显生宙海平面最低水平, 导致石炭纪—二叠纪盘古 (Pangea) 超大陆低纬度地区以及环古特提斯洋发育大量碳酸盐岩—碎屑岩层间混积地层 (Fielding, 2021; Brito *et al.*, 2024)。相反, 由于受到寒武纪海侵的影响, 全球多个地区仅在碳酸盐台地发育初期沉积混积岩, 随后向上过渡为碳酸盐岩地层, 这在中国西部三大盆均有响应 (金值民等, 2020; 宋金民等, 2021; 张春林等, 2023)。

依据沉积环境演化与海平面升降分析 (图 1-b), 认为马二段纵向上存在 3 次较为完整的海侵—海退沉积过程。元素含量对比发现, 相对海平面的升降明显影响着马家沟组底部地层在陆源混合沉积过程中的元素地球化学响应, 其与 Si、Al、Ti 等亲陆源元素以及 REE 含量之间存在反向关联 (图 6), 即当处于初始海泛或者高位晚期, 海平面相对较低, 此时陆源输入的影响快速增大, 而当位于最大海泛时, 海平面相对较高, 广阔的海水稀释了陆源输入物质的浓度, 进而导致地球化学响应减弱 (Algeo and Maynard, 2004; Tribouillard *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2021a)。而 Ca 含量所代表的亲海源元素与海平面升降之间则存在正向关联 (图 6), 即当处于初始海泛或者是高位晚期, Ca 含量通常维持在较低的水平, 但随着最大海泛的到来, 明显呈上升趋势。

陆源输入的影响在横向上也存在差异。图 7-a 中的 3 口井显示由西向东水体逐渐加深, 但相对海平面波动对于各元素含量的影响依然存在, 区别在于沉积水体越深, 各元素含量的波动程度越微弱。这可能与 2 个方面的原因相关: 首先是与海平面升降对于陆源影响的原理一致, 东侧较大的水深会稀

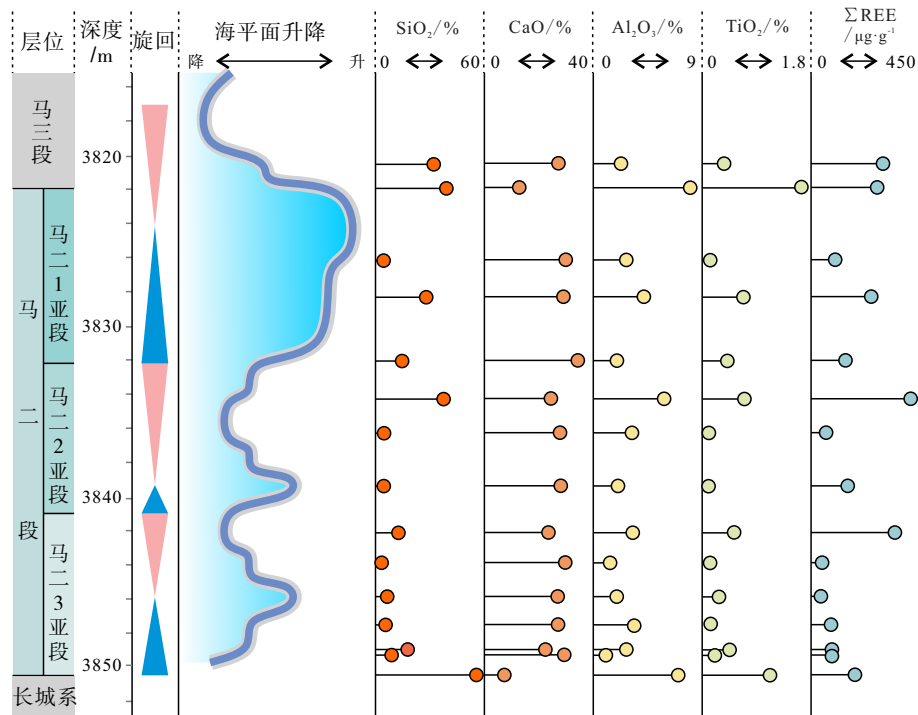
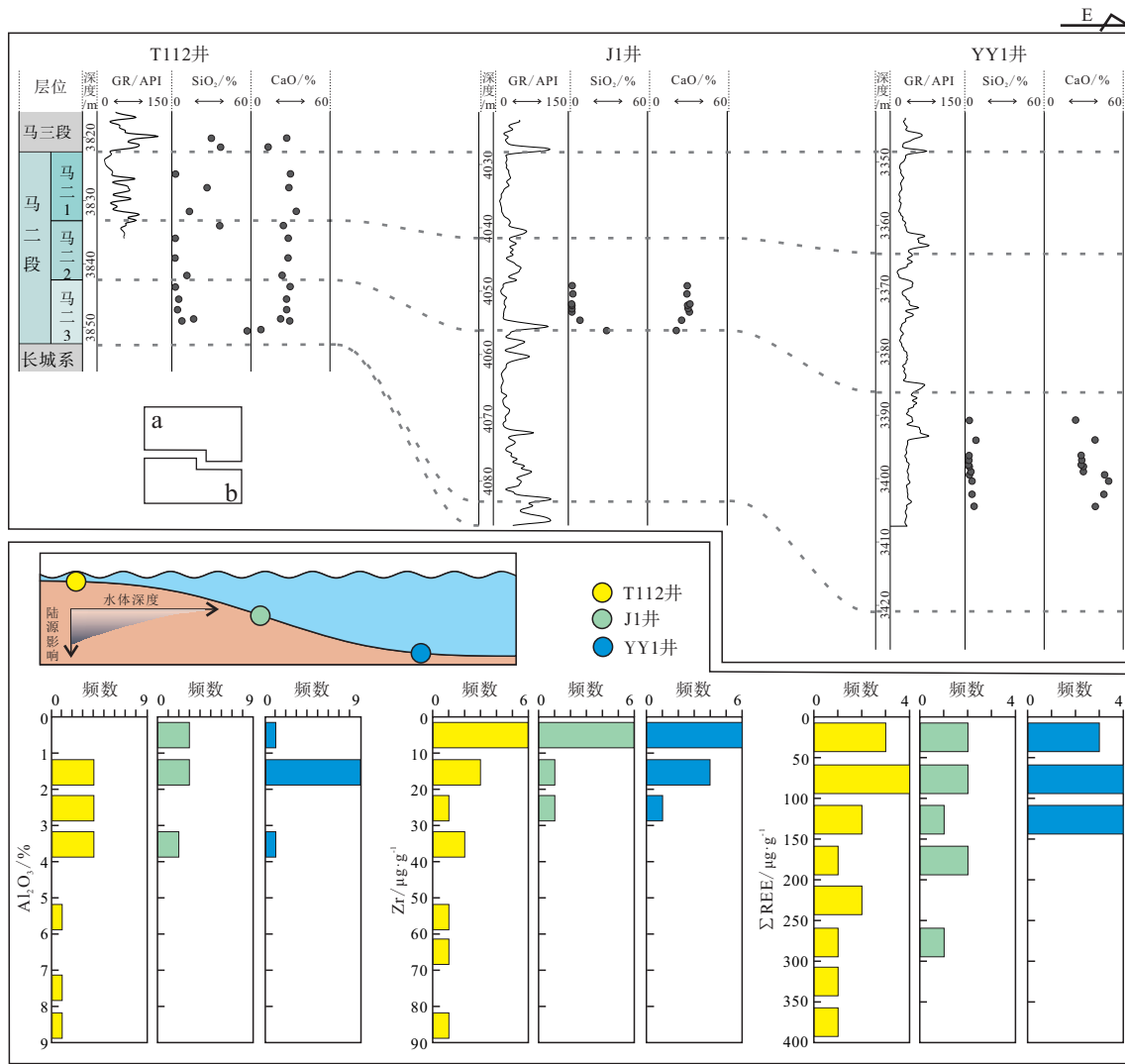


图 6 鄂尔多斯盆地 T112 井马家沟组二段海平面升降与元素含量及比值纵向分布

Fig. 6 Sea level fluctuation and vertical distribution of elemental contents and ratios in the O_1m_2 of Majiagou Formation from Well T112 in Ordos Basin



a—T112、J1 和 YY1 井主量元素含量的纵向分布；b—T112、J1 和 YY1 井 Al₂O₃、Zr 及 ΣREE 含量分布直方图

图 7 鄂尔多斯盆地马家沟组二段主量元素含量与陆源影响 (井位位置见图 1)

Fig. 7 Distribution of major element content and evolution of terrestrial sources of the O₁m₂ of Majiagou Formation in Ordos Basin (wells location shown in Fig. 1)

释陆源的输入物质浓度, 导致地球化学响应较弱; 其次, 3 口井的地层接触关系中, T112 井马二段下伏地层为长城系砂岩, J1 井虽然也与长城系呈不整合接触, 但马二段沉积时长城系已被马一段覆盖, 其无法提供物源, 而 YY1 井马家沟组未钻穿, 但根据马家沟组前古地质图 (图 1-a) 推断, YY1 井可能与寒武系或下奥陶统冶里组、亮甲山组接触 (李相博等, 2021; 魏柳斌等, 2021), 而该地层提供物源的可能性不大。因此, 与陆源碎屑的物源区距离远近, 也是造成陆源元素含量波动程度强弱的原因, 同时也进一步佐证了马家沟组沉积初期陆源碎屑的物源区处于研究区西侧。

与物源区的距离远近, 在影响陆源混积信号强弱的同时, 不同元素的响应也存在差异。从 3 口井的 Al、Zr 和 REE 含量分布频数统计图 (图 7-b) 来看, Al、Zr 等亲陆源元素在靠近物源区的钻井中数值较为分散, 而远离物源的区域含量快速下降并集中分布在较小的范围内; REE 的含量虽然也具有类似的变化, 但在远离物源的井区中其含量仍可以维持相对较高的水平。以上现象说明, Al、Zr 等亲陆源元素扩散距离相对较近, 而 REE 扩散距离则相对变远。

混积岩中的 Si、Al、Ti、Zr 等亲陆源元素主要富集在岩屑或重矿物中 (Webb and Kamber,

2000)。在混合沉积过程中,受到水动力变化的影响,粗颗粒沉积物或重矿物快速沉降,搬运距离较短。由于众多重矿物具有近岸富集的特点(李红等, 2021),因此会造成亲陆源元素的扩散距离较短。而 REE 元素扩散距离明显增加,且浅水、深水井区的影响都比较大,推测在马二段沉积过程中,REE 元素多富集在黏土矿物等细粒沉积物中(Nothdurft *et al.*, 2004),搬运距离较大并影响到更为广泛的区域。

5 讨论

5.1 混积岩的地质意义

混积岩所代表的边缘相沉积,是判断沉积期是否发育古隆起的重要证据(张春林等, 2023)。前人通过寒武系的地层厚度、地震剖面、连井地层对比等,从多角度揭示了乌审旗—靖边古隆起在寒武系发育的事实(魏柳斌等, 2021),但该古隆起在奥陶系是否发育尚存在较大争议。目前主要有 3 种观点:(1) 马家沟组沉积期乌审旗—靖边古隆起逐渐消隐,不再活跃(包洪平等, 2022; 张春林等, 2023);(2) 利用地震剖面揭示了古隆起区马三段超覆至马一段—马二段,认为马三段沉积期乌审旗—靖边古隆起发生继承性活动,但面积减小,至马家沟组沉积中后期不再活跃(毛丹凤等, 2023);(3) 马一段—马二段超覆于乌审旗—靖边古隆起之上,其早期为水上古陆,后期演变为水下低隆(何发岐等, 2023; 钟寿康等, 2024),并且该古隆起在整个马家沟组沉积期间歇性发育,对米脂地区盐洼的发育具有明显的控制作用(魏柳斌等, 2021; 钟寿康等, 2022)。本研究基于沉积学与地球化学分析,认为马家沟组底部的混积岩形成可能与此时的乌审旗—靖边古隆起相关。同时,混积岩的发育对于马家沟组沉积初期的古地理格局也具有重要的指示意义。

首先,结合前马家沟组古地质图(图 1-a)来看,在整个台地范围内,以中部乌审旗—靖边一带为轴线,连接南北两侧,核部出露地层皆为长城系砂岩(李相博等, 2021; 魏柳斌等, 2021)。研究区内多口钻井均分布在乌审旗—靖边古隆起区与剥蚀窗的叠合区域内(何发岐等, 2023; 毛丹凤等, 2023; 张春林等, 2023),诸如 T112、J1 等钻井。

地层接触关系也揭示出同样的规律,如 T112 井处表现为多次构造运动叠加形成的角度不整合面,不整合面之下的长城系滨岸相石英砂岩(欧阳征健等, 2020)可作为研究区重要的碎屑物质来源(图 8)。微观特征揭示,长城系砂岩基本为单晶石英,未见石英砂岩等岩屑颗粒(刘恒宇等, 2024),这与马家沟组中的单晶再旋回石英碎屑较为相似(图 2-d);且马家沟组石英碎屑以细—中砂为主,局部含有粗砂(图 2-d),分选较为一般,进一步说明可能距离物源区并不是很远。上述地质背景以及岩石学特征表明,马家沟组下部混合沉积的陆源碎屑极可能来自于长城系。

其次,体现在碎屑物质的沉积分异规律方面。马家沟组存在一套穿时分布的边缘相高 GR 值沉积物(钟寿康等, 2024)。对 T112 井、Sh473 井和 XQ1 井混积岩沉积序列的梳理与对比表明,随着与物源区距离的增大,沉积序列中碎屑物质占比越低,粒度越细(图 8)。例如 T112 井碎屑岩不仅发育在马家沟组底部的边缘相高 GR 值段内,马二段依然发育(图 4-b),且石英砂岩普遍可以达到中砂级(图 2-d; 图 3-e)。向东侧 Sh473 井和 XQ1 井,混积岩仅发育在马家沟组底部,石英颗粒粒径明显减小(图 3-c, 3-d),混合沉积则转而以泥岩为主,见少量石英粉砂岩混合碳酸盐岩与膏盐岩。

最后,地球化学分析指出,自 T112 井向东,陆源碎屑的地球化学信号逐渐减弱(图 7-a)。这说明在马家沟组沉积初期海侵超覆背景下,物源主要来自中西部地区。

以上多角度的证据均表明,造成马家沟组沉积初期大量发育混积岩的原因是乌审旗—靖边古隆起核部出露的长城系砂岩再旋回沉积。同时,马一段—马二段混积岩的发育,也充分证明了乌审旗—靖边古隆起在奥陶纪马家沟组沉积早期是存在的,并在较长的时间段(马一段—马二段沉积中期)为水上隆起,出露的长城系作为物源区持续供给陆源碎屑,从而参与到马家沟组底部地层的沉积过程中(图 8)。

5.2 混积过程中的元素地球化学响应

马二段等时地层格架内样品的地球化学特征对比表明,在混积过程中地球化学响应受控于 3 个方面因素的影响(图 8)。首先是海平面升降的影响,

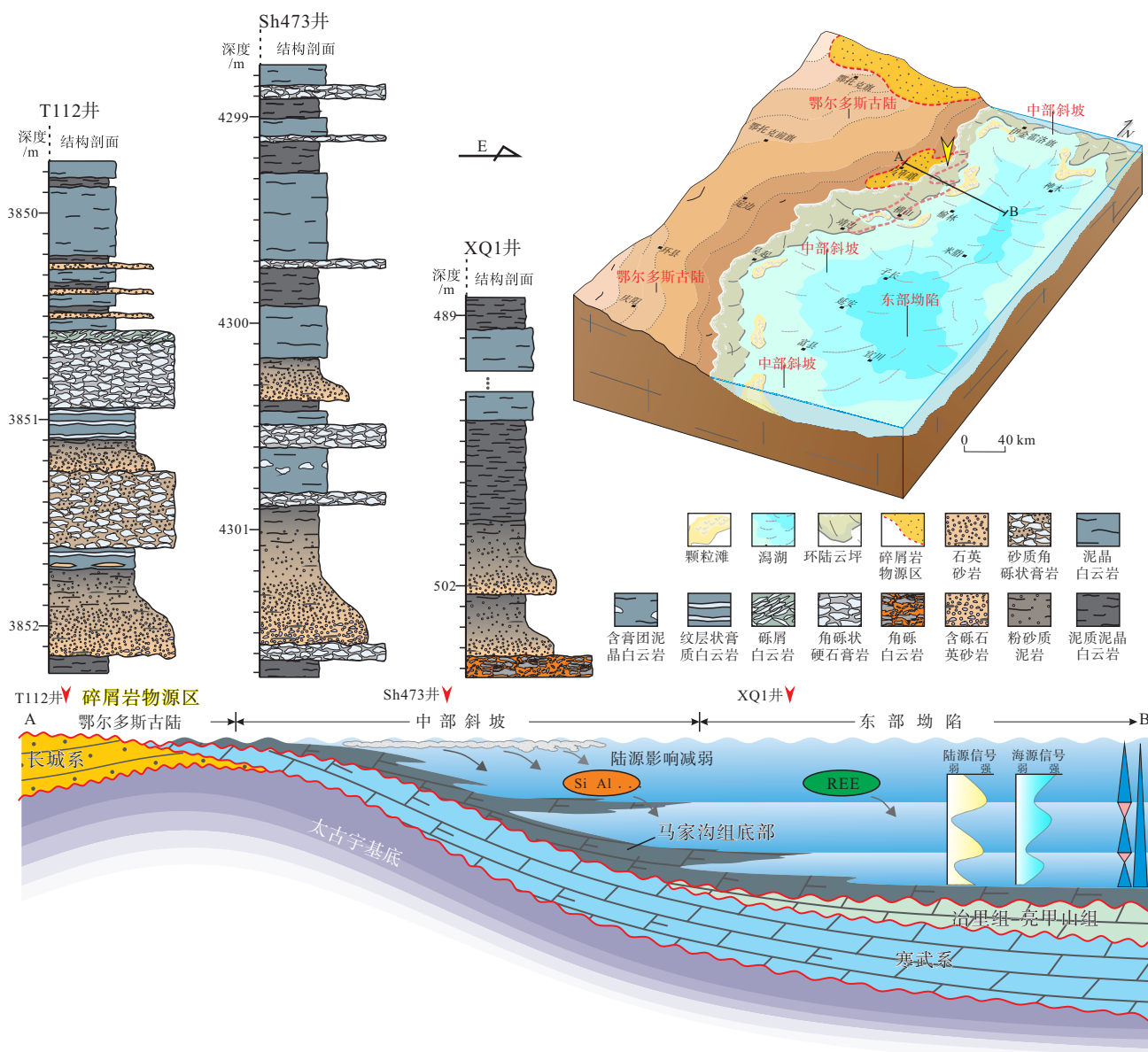


图 8 鄂尔多斯盆地马一段—马二段碎屑岩/碳酸盐沉积分异模式

Fig. 8 Sedimentary differentiation pattern of clastic-carbonate rocks of the O_1m_1 and O_1m_2 of Majiagou Formation in Ordos Basin

即研究区内沉积物、元素含量及水体性质表现出随海平面升降波动而协同演变的特点，在相对海平面较低时，亲陆源元素信号增强，亲海源元素信号减弱，而相对海平面较高时则反之。其次，与物源区距离的增加以及在沉积水体逐渐变深的过程中，混合沉积的陆源元素信号逐渐减弱，但依然会受到海平面升降的控制。最后，在陆源碎屑搬运过程中，Si、Al、Ti、Zr 等亲陆源元素主要是富集在岩屑或重矿物等颗粒组构中，因此具有搬运距离短、沉降速率快的特点，导致此类元素在混合沉积过程中扩散距离短，仅在物源区周缘维持较高水平；而 REE

多富集在黏土矿物等细粒沉积物中，搬运距离大大提高，并影响到更为广泛的区域(图 8)。因此，在有混积背景下的碳酸盐岩地球化学分析工作中，即使距离物源区很远，依然需注意对陆源影响的评估和判识，尤其是以黏土矿物为主要载体的稀土元素等。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地马家沟组底部马一段—马二段发育碳酸盐岩、蒸发岩及碎屑岩等成分组成的混

积岩,可划分为(含)云质/膏质砂岩、(含)砂质白云岩以及(含)泥质白云岩等岩石类型。

2) 马一段—马二段发育细—粗砂岩→粉砂质泥岩→泥岩/泥晶白云岩→角砾状硬石膏岩及细砂岩→泥晶白云岩→泥质白云岩→角砾状硬石膏岩等典型沉积序列,见大量底冲刷构造、正粒序、过渡性层理以及角砾状硬石膏岩等典型的潮坪相标志。推测马家沟组底部混积岩形成于海陆过渡环境,属于典型的相混合成因类型。

3) 相较于陆源影响较弱的样品,陆源影响较强的样品中亲陆源元素及REE含量较高,且 Al_2O_3 与 TiO_2 、Zr及REE含量具强的正相关性。此外,初始海泛或高位晚期亲陆源元素以及REE含量快速增大,但随着海平面持续上升或远离物源区,亲陆源元素含量响应减弱。地球化学分析揭示了混积过程中的元素分异规律,即垂向上陆源影响随海平面升降而产生由弱变强的波动,而横向上稀土元素较亲陆源元素具有更远的扩散距离。

4) 马一段—马二段沉积期,沉积物渐次超覆鄂尔多斯古陆,乌审旗—靖边古隆起核部的长城系砂岩为马家沟组底部混积岩中陆源碎屑的物源区。

参考文献 (References)

- 包洪平,何登发,王前平,张雷,张建伍,严婷,闫伟. 2022. 鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及其油气控藏意义的差异. 古地理学报, 24(5): 951–969. [Bao H P, He D F, Wang Q P, Zhang L, Zhang J W, Yan T, Yan W. 2022. Four main paleouplifts evolution in Ordos Basin and their differences in significance of oil and gas reservoir control. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 24(5): 951–969]
- 陈安清. 2010. 鄂尔多斯地块早古生代盆地演化与物质聚集规律. 成都理工大学博士学位论文: 1–147. [Chen A Q. 2010. Basin evolution and sediments accumulation during Eopaleozoic in Ordos continental Block. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology: 1–147]
- 董桂玉,陈洪德,何幼斌,秦志勇,罗进雄,辛长静. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考. 地球科学进展, 22(9): 931–939. [Dong G Y, Chen H D, He Y B, Qin Z Y, Luo J X, Xin C J. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments. *Advances in Earth Science*, 22(9): 931–939]
- 冯增昭,鲍志东. 1999. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理. 沉积学报, 17(1): 1–8. [Feng Z Z, Bao Z D. 1999. Lithofacies paleogeography of Majiagou Age of Ordovician in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 1–8]
- 何登发,包洪平,开百泽,魏柳斌,许艳华,马静辉,成祥. 2021. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征. 石油学报, 42(10): 1255–1269. [He D F, Bao H P, Kai B Z, Wei L B, Xu Y H, Ma J H, Cheng X. 2021. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 42(10): 1255–1269]
- 何发岐,张威,丁晓琪,祁壮壮,李春堂,孙涵静. 2023. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起对岩溶气藏的控制机理. 石油与天然气地质, 44(2): 276–291. [He F Q, Zhang W, Ding X Q, Qi Z Z, Li C T, Sun H J. 2023. Controlling mechanism of Wushenqi paleo-uplift on paleo-karst gas reservoirs in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 276–291]
- 黄有根,许杰,郑小鹏,刘燕,钟寿康,李琳,张道锋,谭秀成. 2024. 鄂尔多斯盆地中东部下二叠统太原组灰岩沉积特征与沉积模式. 古地理学报, 26(4): 911–925. [Huang Y G, Xu J, Zheng X P, Liu Y, Zhong S K, Li L, Zhang D F, Tan X C. 2024. Sedimentary characteristics and sedimentary models of the Lower Permian Taiyuan Formation limestone in mid-eastern Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 26(4): 911–925]
- 金值民,谭秀成,唐浩,沈安江,乔占峰,郑剑锋,李飞,张世轩,陈雷,周成刚. 2020. 浅水超覆沉积富有机质细粒沉积物沉积环境与岩石学特征: 以塔里木盆地西北部寒武系玉尔吐斯组为例. 石油勘探与开发, 47(3): 476–489. [Jin Z M, Tan X C, Tang H, Shen A J, Qiao Z F, Zheng J F, Li F, Zhang S X, Chen L, Zhou C G. 2020. Sedimentary environment and petrological features of organic-rich fine sediments in shallow water overlapping deposits: a case study of Cambrian Yuertus Formation in northwestern Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 476–489]
- 李红,李飞,龚桥林,曾楷,邓嘉婷,王浩铮,苏成鹏. 2021. 混积岩中重矿物形貌学特征及物源意义: 以川北寒武系第二统仙女洞组为例. 沉积学报, 39(3): 525–539. [Li H, Li F, Gong Q L, Zeng K, Deng J T, Wang H Z, Su C P. 2021. Morphological characteristics and provenance significance of heavy minerals in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentation: a case study from the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2), northern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 525–539]
- 李相博,王宏波,黄军平,张才利,张艳,王雅婷,张雷,王菁,刘化清. 2021. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义. 石油与天然气地质, 42(5): 1043–1055. [Li X B, Wang H B, Huang J P, Zhang C L, Zhang Y, Wang Y T, Zhang L, Wang J, Liu H Q. 2021. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration. *Oil & Gas Geology*, 42(5): 1043–1055]
- 刘恒宇,刘明洁,郝志磊,任茵,吴恩郁,许哈,钟寿康,谭秀成,曾伟,连承波,戴鸿鸣. 2024. 古老深层致密砂岩储集层孔隙形成与保存机制: 以鄂尔多斯盆地长城系为例. 古地理学报, 26(6): 1435–1451. [Liu H Y, Liu M J, Hao Z L, Ren Y, Wu E Y, Xu H, Zhong S K, Tan X C, Zeng W, Lian C B, Dai H M. 2024. Pore formation and preservation mechanisms of ancient deep tight sandstone reservoirs: a case study of the Mesoproterozoic Changcheng System in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition),

- 26(6): 1435–1451]
- 毛丹凤,何登发,包洪平,魏柳斌,许艳华,成祥,苟钧壹,武赛军. 2023. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起的分布、演化及构造属性. 石油勘探与开发,50(4): 755–766. [Mao D F, He D F, Bao H P, Wei L B, Xu Y H, Cheng X, Gou J Y, Wu S J. 2023. Distribution, evolution and structural properties of Wushenqi paleo-uplift in Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 755–766]
- 毛丹凤,何登发,包洪平,魏柳斌,成祥,苟钧壹,石婧,许艳华. 2024. 鄂尔多斯盆地怀远运动期不整合类型及其分布特征. 古地理学报, 26(1): 119–131. [Mao D F, He D F, Bao H P, Wei L B, Cheng X, Gou J Y, Shi J, Xu Y H. 2024. Distribution characteristics of different Huaiyuan unconformities in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 119–131]
- 欧阳征健,冯娟萍,马海勇,李文厚. 2020. 鄂尔多斯地区中元古界长城系沉积特征研究. 西北大学学报(自然科学版), 50(1): 105–112. [Ouyang Z J, Feng J P, Ma H Y, Li W H. 2020. The sedimentary characteristics of the Middle Proterozoic Changchengian System in Ordos area. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(1): 105–112]
- 彭咏, Ronald J. Steel, 龚承林, 魏小洁, 盛莉娜. 2023. 潮汐沉积过程及沉积特征研究综述. 古地理学报, 25(5): 1069–1089. [Peng Y, Steel R J, Gong C L, Wei X J, Sheng L N. 2023. A review on tidal depositional processes and characteristics. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1069–1089]
- 宋金民, 张亚雄, 尹柯惟, 刘树根, 陈宗于, 李智武, 田艳红, 孙玮, 刘颖, 金鑫, 赵玲丽. 2021. 四川盆地中部地区下寒武统龙王庙组混积特征及其地质意义. 石油与天然气地质, 42(3): 627–638, 701. [Song J M, Zhang Y X, Yin K W, Liu S G, Chen Z Y, Li Z W, Tian Y H, Sun W, Liu Y, Jin X, Zhao L L. 2021. Characteristics and geological significance of mixed sediments in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation, central Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(3): 627–638, 701]
- 魏柳斌, 赵俊兴, 苏中堂, 魏新善, 任军峰, 黄正良, 武春英. 2021. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合微生物碳酸盐岩分布规律及沉积模式. 石油勘探与开发, 48(6): 1162–1174. [Wei L B, Zhao J X, Su Z T, Wei X S, Ren J F, Huang Z L, Wu C Y. 2021. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblage, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1162–1174]
- 杨波, 辛仁臣, 贾进华. 2012. 塔里木盆地巴楚组层序地层及沉积演化. 中国矿业大学学报, 41(2): 242–255, 261. [Yang B, Xin R C, Jia J H. 2012. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Bachu Formation in Tarim Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 41(2): 242–255, 261]
- 于冬冬, 张永生, 邢恩袁, 王琳霖, 李凯, 黄囿霖. 2018. 柴西南翼山构造上新统狮子沟组混积岩地球化学特征及物源指示意义. 地学前缘, 25(4): 65–75. [Yu D D, Zhang Y S, Xing E Y, Wang L L, Li K, Huang Y L. 2018. Geochemical characteristics and implication for provenance of mixed rocks from the Pliocene Shizigou Formation in the Nanyishan structure of the western Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 65–75]
- 张春林, 邢凤存, 张月巧, 姜福杰, 徐旺林, 张阿敏. 2023. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制. 石油与天然气地质, 44(1): 89–100. [Zhang C L, Xing F C, Zhang Y Q, Jiang F J, Xu W L, Zhang A M. 2023. Tectonic evolution of Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts during the Early Paleozoic and its control on Cambrian lithofacies paleogeography in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 89–100]
- 钟寿康, 谭秀成, 胡广, 聂万才, 杨梦颖, 张道锋, 郑剑锋, 许杰, 董国栋, 肖笛, 卢子兴. 2022. 古地理格局对膏盐岩—碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制: 以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6 亚段为例. 石油勘探与开发, 49(4): 728–740. [Zhong S K, Tan X C, Hu G, Nie W C, Yang M Y, Zhang D F, Zheng J F, Xu J, Dong G D, Xiao D, Lu Z X. 2022. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: a case study of the sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 Member in central-eastern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 728–740]
- 钟寿康, 谭秀成, 魏柳斌, 许杰, 王前平, 熊鹰, 武春英, 杜健笙. 2024. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组一段—三段构造沉积演化及其油气地质意义. 石油勘探与开发, 51(5): 1040–1052. [Zhong S K, Tan X C, Wei L B, Xu J, Wang Q P, Xiong Y, Wu C Y, Du J S. 2024. Tectono-sedimentary evolution and oil-gas geological significance of first to third member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1040–1052]
- Aleali M, Rahimpour-Bonab H, Moussavi-Harami R, Jahani D. 2013. Environmental and sequence stratigraphic implications of anhydrite textures: a case from the Lower Triassic of the Central Persian Gulf. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 110–125.
- Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*, 206(3–4): 289–318.
- Andreeva P V. 2015. Middle Devonian (Givetian) supratidal sabkha anhydrites from the Moesian Platform (Northeastern Bulgaria). *Carbonates and Evaporites*, 30: 439–449.
- Brito A S, Nogueira A C R, Dos Santos R F, Angélica R S, Rodrigues R. 2024. High-frequency palaeoenvironmental changes in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary system from a Lower Permian restricted basin (West Gondwana, southern Brazil). *Sedimentology*, 71(5): 1515–1557.
- Chen G, Gang W Z, Chang X C, Wang N, Zhang P F, Cao Q Y, Xu J B. 2020. Paleoproductivity of the Chang 7 unit in the Ordos Basin (North China) and its controlling factors. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 551: 109741.
- Chen Y X, Liu J B, Shen B, Wang Y N, Wu R C, Zhan R B. 2021. Geochemistry of lower Ordovician microbialites on the Yangtze Platform, South China: implications for oceanic oxygenation at the onset of the GOBE. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 578:

- 110564.
- Hazard C S, Ritter S M, McBride J H, Tingey D G, William K li R. 2017. Ground-penetrating-radar characterization and porosity evolution of an upper Pleistocene oolite-capped depositional cycle, red bays, northwest Andros Island, Great Bahama Bank. *Journal of Sedimentary Research*, 87(5): 523–545.
- Fielding C R. 2021. Late Palaeozoic cyclothems: a review of their stratigraphy and sedimentology. *Earth-Science Reviews*, 217: 103612.
- Garzanti E, Padoan M, Setti M, López-Galindo A, Villa I M. 2014. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud(southern Africa). *Chemical Geology*, 366: 61–74.
- Kawabe I, Toriumi T, Ohta A, Miura N. 1998. Monoisotopic REE abundances in seawater and the origin of seawater tetrad effect. *Geochemical Journal*, 32(4): 213–229.
- Li H, Li F, Li X, Zeng K, Gong Q L, Yi C H, Wang Z J. 2021a. Development and collapse of the early Cambrian shallow-water carbonate factories in the Hannan-Micangshan area, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 583: 110665.
- Li L, Ambrose W A, Lawton T F, Stockli D F. 2021b. Tectonic controls on the evolution of mixed carbonate-siliciclastic systems: insights from the late Palaeozoic Ouachita-Marathon Foreland, United States. *Basin Research*, 33(4): 2281–2302.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. *Geology*, 12: 432–435.
- Nothdurft L D, Webb G E, Kamber B S. 2004. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(2): 263–283.
- Riley C M, Byrne J V. 1961. Genesis of primary structures in anhydrite. *Journal of Sedimentary Research*, 31(4): 553–559.
- Tang H, Xu Q, Li S J, Li L, Wang X F, Tan X C, Zheng J F, Kershaw S, Yang X F. 2022. The Ordovician retroarc foreland basin on the Yangtze Block linked to the final assemblage of Gondwana. *Lithosphere*, (1): 8698933.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32.
- Turekian K K, Wedepohl K H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2): 175–192.
- Webb G E, Kamber B S. 2000. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(9): 1557–1565.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341–366.
- West I M, Ali Y A, Hilmy M E. 1979. Primary gypsum nodules in a modern sabkha on the Mediterranean coast of Egypt. *Geology*, 7(7): 354–358.
- Zecchin M, Catuneanu O. 2017. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves VI: mixed siliciclastic-carbonate systems. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 712–723.
- Zhao D F, Zeng J J, Tan X C, Wang X F, Qiao Z F, Luo S C. 2023. The coupled evolution of depositional systems and paleo-redox conditions was recorded in terminal Ediacaran sedimentary succession in the Tarim Block, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 249: 105623.

(责任编辑 张西娟)