

“海侵—海退”背景下微生物岩序列组合的差异响应： 以鄂尔多斯盆地中东部马五₆₋₁₀亚段为例^{*}

雍靖康^{1,2} 谭秀成^{1,2} 费肇磊³ 钟寿康^{1,2}
魏柳斌⁴ 任军峰⁴ 熊 鹰^{1,2} 肖 笛²

- 1 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 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 中国石油川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院, 四川成都 610051
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 微生物岩结构复杂, 岩性序列组合多变, 从而使环境解释具有多解性。以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段为例, 利用系统的钻井取心和薄片资料, 精细剖析不同海平面变化背景下的微生物岩序列特征, 以降低沉积环境解释的不确定性。结果表明: (1) 鄂尔多斯盆地中东部马五₆₋₁₀亚段发育叠层石云岩、凝块石云岩和粘结颗粒云岩 3 类微生物碳酸盐岩, 由其构成的微生物岩序列可划分为 2 个大类、6 个小类; (2) 四级海退背景下, 凹凸相间的古地貌格局耦合海水盐度/能量的渐次分异控制了多样化的微生物岩序列, 其岩相组合复杂, 由潟湖—台坪、潟湖—微生物丘—台坪、潟湖—微生物丘、潟湖—微生物丘—蒸发潟湖/台坪 4 种五级 (米级) 变浅旋回构成; (3) 四级海侵背景下形成的微生物岩序列和岩相组合相对简单, 以微生物丘、丘间海—微生物丘 2 种五级变浅旋回为特征, 且较高可容空间促使其单旋回沉积厚度更大。研究成果揭示出不同海平面变化背景下的微生物岩序列构建模式及分布控制因素, 为后续利用微生物岩序列结构反演不同地貌单元和沉积环境演变奠定了基础。

关键词 微生物岩 海平面变化 沉积序列 马家沟组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 雍靖康, 男, 2001 年生, 西南石油大学硕士研究生, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: yongjingkang22@163.com。

通讯作者简介 谭秀成, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积学与储层地质学研究工作。E-mail: tanxiucheng70@163.com。

中图分类号: P531 **文献标志码:** A

Differential response of microbialite sequence assemblages in context of “transgressive-regression”: a case study of the Ma5₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin

YONG Jingkang^{1,2} TAN Xiucheng^{1,2} FEI Zhaolei³ ZHONG Shoukang^{1,2}
WEI Liubin⁴ REN Junfeng⁴ XIONG Ying^{1,2} XIAO Di²

^{*} 四川省自然科学基金项目 (编号: 2025ZNSFSC1186) 资助。[Financially supported by Sichuan Provincial Natural Science Foundation (No. 2025ZNSFSC1186)]

收稿日期: 2025-04-20 改回日期: 2025-05-24

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Research Branch of Southwest Petroleum University, Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu 610500, China

3 Geological Exploration and Development Research Institute of CCDC, CNPC, Chengdu 610051, China

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

Abstract The structural and sequential complexity and variability of microbialites result in multiple interpretations of their depositional environments. This study focuses on the 6th to 10th sub-members of the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation (Ma5₆₋₁₀ sub-member) in the central-eastern Ordos Basin as an example. Based on systematic core and thin-section analyses, this paper presents a detailed characterization of microbialite sequences under varying sea-level conditions, aiming to reduce uncertainties in sedimentary environment interpretation. The results show that: (1) Three types of microbial carbonates, including stromatolites, thrombolites and microbial-bonded granular dolomite, are developed in the study area, forming two major categories and six types of microbialite sedimentary sequences. (2) During a fourth-order sea-level fall, interactions among the concavo-convex paleogeomorphologic pattern, gradual differentiation of seawater salinity, and energy control the formation of diverse microbialite sequences. These sequences exhibit complex lithologic correlations composed of four upward-shallowing fifth-order (meter-scale) cycles: lagoon-tidal flat, lagoon-microbial mound-tidal flat, lagoon-microbial mound and lagoon-microbial mound-evaporite evaporative lagoon/tidal flat. (3) Under a fourth-order sea-level rise, microbialite sequences and lithological assemblages are relatively simple, comprising two fifth-order cycles: microbial mound and intermound sea-microbial mound. The higher accommodation space during this phase contributes to the thicker single-cycle deposition. These findings reveal the construction patterns and controlling factors of microbialite sequences under varying sea level changes, providing a foundation for the subsequent inversion of different geomorphologic units and the sedimentary environmental evolution through the analysis of microbialite sequence structures.

Key words microbialite, sea level change, depositional sequence, Majiagou Formation, Ordos Basin

About the first author YONG Jingkan, born in 2001, is a masteral candidate in Southwest Petroleum University. He majors in sedimentology. E-mail: yongjingkan22@163.com.

About the corresponding author TAN Xiucheng, born in 1970, is a professorat in Southwest Petroleum University. He is engaged in researches of sedimentology and reservoir geology. E-mail: tanxiucheng70@163.com.

0 引言

微生物岩是微生物在生长和新陈代谢活动过程中形成的一类特殊的岩石类型,形成过程包括黏附和捕获碎屑沉积物、表面矿物沉淀以及生物矿化作用(Burne and Moore, 1987)。微生物岩的岩石类型组成多样、种类繁多(Riding, 2000; 熊鹰等, 2016; 范承蒙等, 2024),广泛发育于各个地质历史时期(Kah and Grotzinger, 1992; Riding, 2006; Kershaw *et al.*, 2012),蕴含着丰富的环境信息,常用于古环境和古气候(Bahniuk *et al.*, 2015;

Bourillot *et al.*, 2020; Fogret *et al.* 2024)的研究。前人针对微生物岩已开展了大量研究,涵盖岩石学特征与分类(梅冥相, 2007; 吴亚生, 2023)、沉积特征与主控因素(徐欣等, 2018; 杨梦颖等, 2021; 朱奕璇等, 2022)以及储集性能(宋金民等, 2014; 魏柳斌等, 2021a; 罗垚等, 2022)等诸多方面,但不同类型微生物岩的环境解释尚存争议。已有研究表明,海平面升降(Hofmann *et al.*, 2004; 王文之等, 2016; 樊爱萍等, 2023)及其所引起的水体深度、盐度、水动力强度和沉积速率等环境要素多变,导致微生物岩的类型、结构特征和

岩相组合复杂多样，同时不同环境中又可出现相似的微生物岩结构，更增加了环境解译及模式的多样性。因此，需要开展微生物岩结构特征研究，尤其是需要在海平面变化的背景下去认识微生物岩序列组合特征，进而明确微生物岩发育模式和空间分布，这是利用微生物岩反演沉积环境演变的基础，对于古环境、古气候及生物演化（Riding, 2000；吴亚生等, 2007；Schopf *et al.*, 2017）研究具有重要意义。

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段发育一套巨厚的碳酸盐岩—膏盐岩旋回性沉积（谢锦龙等, 2013；席胜利等, 2017），使得其海平面升降易于识别。该套地层以微生物岩发育为特征，微生物岩种类丰富、形态多样、垂向组合复杂多变（魏柳斌等, 2021b），加之具有丰富的取心资料，因而是探究海平面升降背景下微生物岩序列构建模式及分布控制因素的绝佳材料。鉴于此，本研究开展精细的宏、微观岩石学工作，系统梳理海平面升降背景下的微生物岩序列组合，解析不同序列的沉积过程，进而构建微生物岩发育模式，探讨其分布控制因素，以期为古沉积环境研究提供参考。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部，为一个近矩形的多旋回叠合盆地（贾承造等, 2005），面积约 $3.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。在奥陶纪，盆地呈现凹凸相间的古构造格局（邵东波等, 2019），北部为伊盟隆起，西南部为受贺兰裂谷与秦岭裂谷扩张影响而形成的“L”形隆起带，即中央古隆起（侯方浩等, 2002），中央古隆起西南侧为西南边缘拗陷（图 1-a）。由于盆地中部乌审旗—靖边地区发育的寒武系古隆起的分隔作用，盆地中东部发育靖西次拗和东部拗陷（周进高等, 2020）2 个构造单元，这对奥陶系马家沟组沉积具有一定的影响。研究区位于鄂尔多斯盆地中东部，受古气候、海平面升降和古地理格局控制而发育浅水碳酸盐岩台地沉积（冯增昭等, 1998；侯方浩等, 2002），广泛发育碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积（胡安平, 2022；刘国庆等, 2024）。

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组发育多旋回的海侵—海退沉积（辛勇光等, 2010；席胜利

等, 2017），其中马一、三、五段为海退期沉积旋回，马二、四、六段为海侵期沉积旋回。根据勘探研究实践其被划分为下、中、上 3 个含气组合（杨华和包洪平, 2011），而马家沟组五段包括上、中含气组合，中组合包括马五₁₀~马五₅亚段。在马家沟组中组合沉积期，盆地内海平面变化整体表现为震荡性、韵律式，发育次一级旋回性沉积（谢锦龙等, 2013），即马五₁₀、马五₈、马五₆亚段为海退亚段，以蒸发岩发育为特征；马五₉、马五₇、马五₅为海侵亚段，主要发育粉晶云岩、颗粒云岩和微生物岩等碳酸盐岩（图 1-b）。

2 微生物岩类型及特征

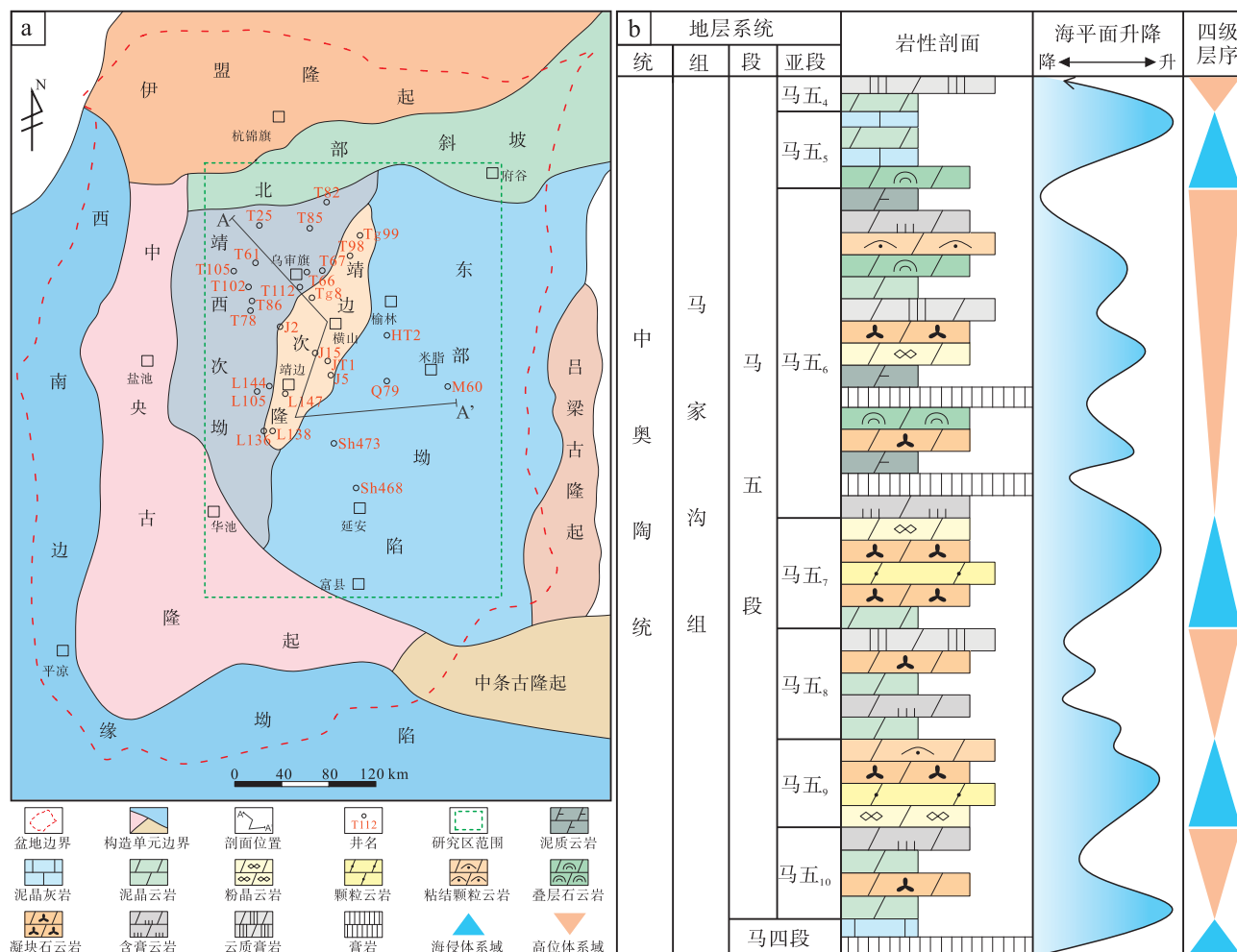
基于大量的岩心薄片观察和统计发现，鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组中组合发育 3 种典型的微生物碳酸盐岩类型，包括叠层石云岩、凝块石云岩和粘结颗粒云岩。

2.1 叠层石云岩

基于叠层石的分类和描述标准（Komar, 1989；Semikhatov and Raaben, 2000）与宏观纹层形态特征，可将其划分为层状和波状 2 种类型（图 2）。岩心尺度上，层状叠层石云岩具有明显的明暗相间的近水平纹层结构，单个纹层厚度不一，介于 0.5~2 mm 之间，纹层横向延续性好（图 2-a）。相比之下，波状叠层石云岩的纹层结构形态更不规则、起伏更大，部分纹层中断（图 2-d）。

在镜下，叠层石形态简单，主要由明暗相间的纹层组成。暗色纹层富含有机质，由微生物组构和泥晶白云石组成，厚度较小；亮层为贫有机质层，主要由褐灰色泥晶白云石组成。不同形态叠层石的纹层接触边缘模糊，横向延续性差异大，高低起伏程度不一，常发生错断变形；纹层间多发育不规则状窗格孔，内部充填亮晶方解石/白云石（图 2-b, 2-f）或硬石膏团块（图 2-c, 2-e）。

不同宏观形态的叠层石所反映出的沉积水动力条件存在差异（Logan *et al.*, 1964；钱迈平, 1991；Khelen *et al.*, 2017）。层状叠层石为相对低水动力环境的产物，常发育于向上变浅序列的中下部；而波状纹层结构反映其形成时水动力相对动荡，在研究区也较为常见，通常发育于序列中上部。



a—中奥陶世鄂尔多斯盆地内部构造单元与位置 (据邵东波等, 2019; 有修改) 及研究区范围; b—奥陶系马家沟组中组合地层柱状示意图

图 1 鄂尔多斯盆地中奥陶世构造单元划分及马家沟组五段6~10亚段综合柱状图

Fig. 1 Delineation of the Middle Ordovician tectonic units in Ordos Basin and comprehensive histogram of the Ma5₆₋₁₀ sub-member of Majiagou Formation

2.2 凝块石云岩

根据凝块组构的形态及排列方式, 可将研究区凝块石云岩分为顺层状 (图 3-a, 3-b, 3-c) 和格架状 (图 3-d, 3-e, 3-f) 2 种类型, 分别反映不同的沉积环境或水体能量。在宏观上, 顺层状凝块石具有和叠层石类似的明暗相间的纹层结构, 纹层形态极不规则, 单纹层厚度更大且不均匀, 横向延续性差, 多出现纹层的连接交叉现象 (图 3-a)。格架状凝块石云岩是以典型的骨架形态为特征, 由凝块相互连接搭建而呈三维网状结构, 内部多形成格架孔洞 (图 3-d)。

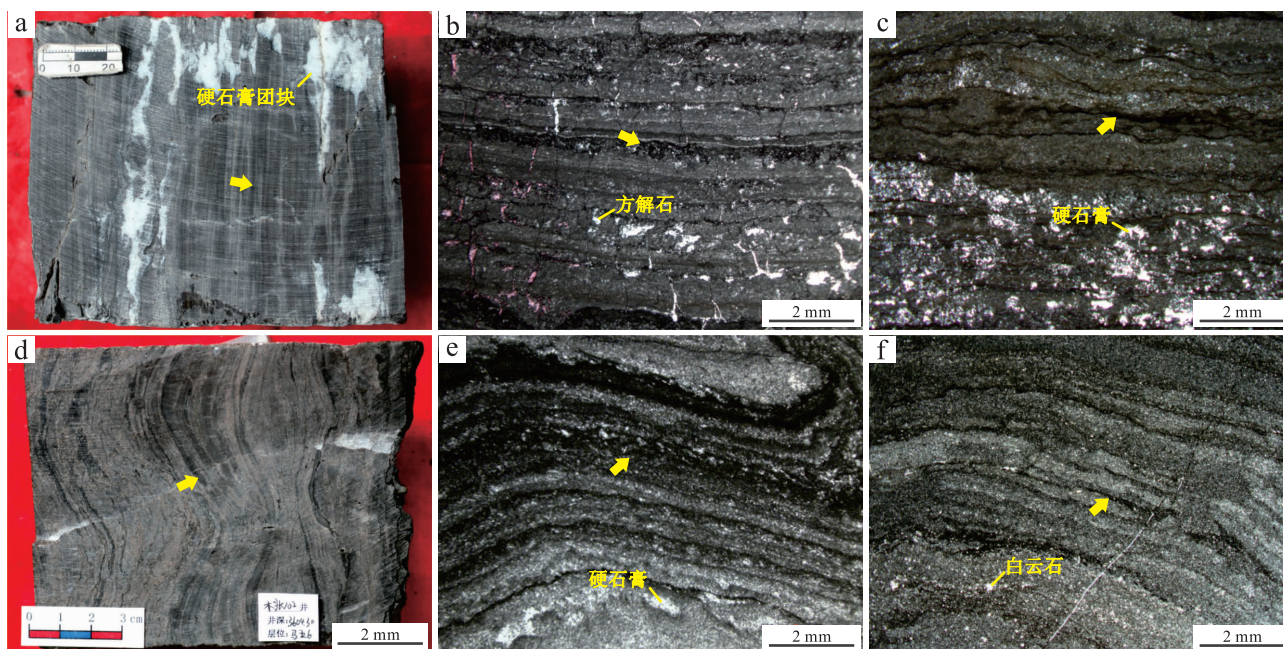
在镜下, 凝块组构颜色较暗, 由泥晶或泥晶团块组成, 形态不规则。顺层状凝块石云岩中的单个

纹层是由多个凝块顺层连接组合而形成的集合体, 具一定的定向性, 层间形成狭长弯曲的近层状孔洞, 后期多被硬石膏 (图 3-b) 或白云石充填 (图 3-c)。格架状凝块生长分布无定向特征, 在三维空间内相互粘结支撑, 形成大量不规则格架孔洞, 部分被多期胶结物充填 (图 3-e, 3-f)。

凝块石云岩在研究区中发育频率最高, 尤以格架状凝块石的发育最为广泛。凝块形态从顺层状向格架状过渡, 指示水体能量逐渐增强, 总体相对较高, 主要发育于序列的中上部。

2.3 粘结颗粒云岩

由微生物群落及其分泌物粘结、裹附粉屑、砂屑和砾屑等内碎屑颗粒生长而成。岩心上, 呈深灰



a—层状叠层石云岩，局部发育硬石膏团块，T60 井，3502.14 m；b—层状叠层石云岩，L46 井，4134.32 m，单偏光；c—层状叠层石云岩，T58 井，3683.71 m，单偏光；d—波状叠层石云岩，T102 井，3604.30 m；e—波状叠层石云岩，T38 井，3617.22 m，单偏光；f—波状叠层石云岩，T61 井，3559.29 m，单偏光。黄色箭头指示微生物组构

图 2 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6 亚段叠层石云岩特征

Fig. 2 Characteristics of stromatolite dolomite within the Ma5₆ sub-member of Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin

褐色，自然断面粗糙，颗粒结构明显（图 3-g）。宏观上与纯净的颗粒云岩难以区分，但镜下微生物粘结颗粒云岩颜色更暗，颗粒边缘模糊，多呈漂浮状散乱分布，颗粒间无明显接触关系，由微生物组构包覆粘结而形成颗粒支撑（图 3-h，3-i）。粘结颗粒多为砂屑，砾屑相对较少，分选差，磨圆较好，颗粒内为暗色泥晶沉积物，颗粒间填隙物多为亮晶方解石、白云石或硬石膏等。

粘结颗粒云岩为较强水动力条件下的产物，沉积水体较浅，多与凝块石云岩伴生，常发育于向上变浅序列的上部。该类岩石在研究区发育频率较高，仅次于凝块石云岩。

3 不同海平面变化背景下微生物岩序列特征

受相对海平面变化的影响，鄂尔多斯盆地中东部马家沟组旋回性沉积特征明显。前人研究表明，马家沟组可划分为 3 个三级层序（黄正良等，2015；王起琮等，2018），其中马五₁₀—马五₆亚段可进一步划分为 3 个四级层序，分别为马四段顶部

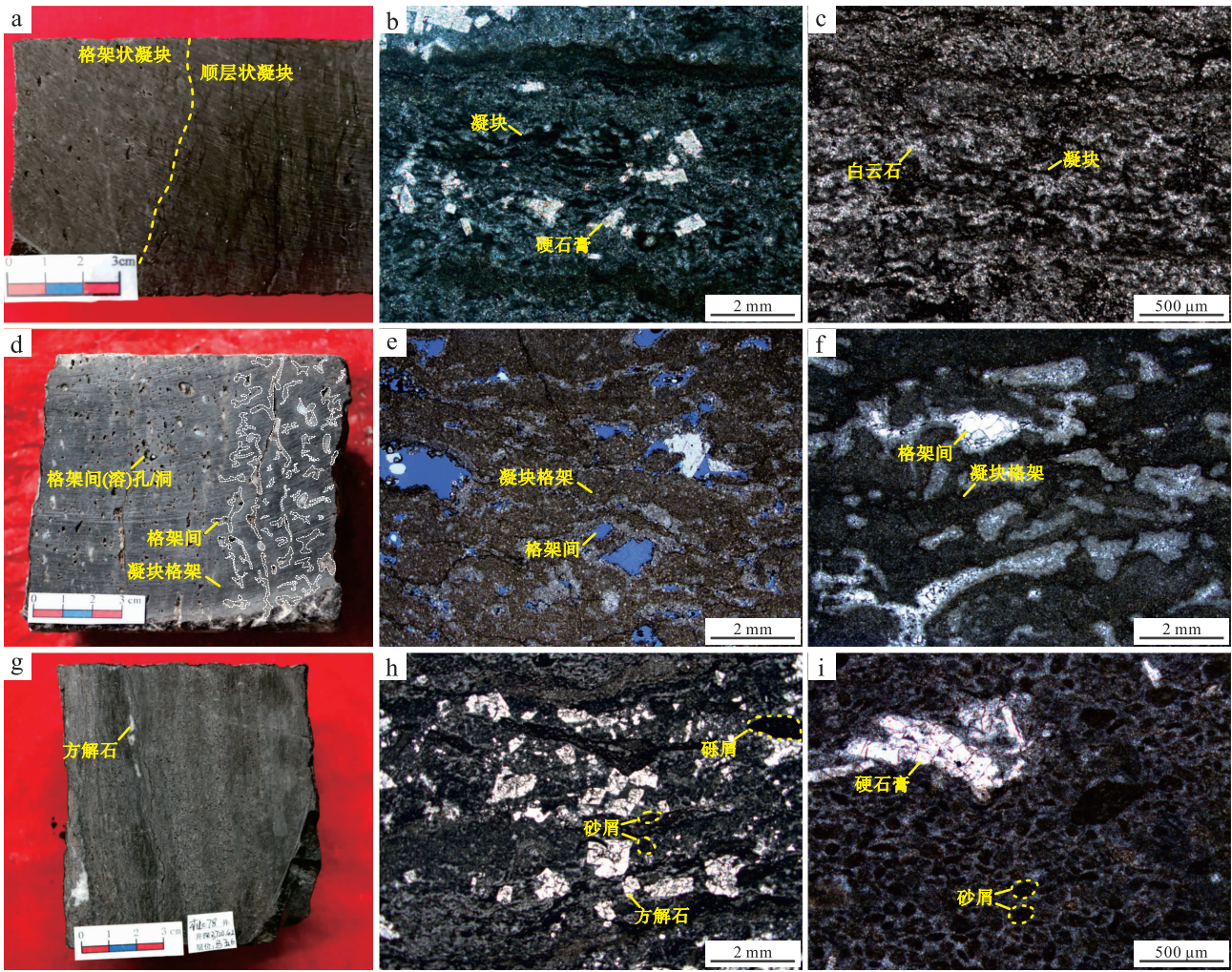
—马五₁₀亚段、马五₉—马五₈亚段和马五₇—马五₆亚段（黄正良等，2015；邵东波等，2019）。据此，本研究以四级海侵—海退旋回（马五₁₀—马五₆）为背景，详细梳理其内部五级旋回尺度的微生物岩序列特征。

3.1 微生物岩序列特征

基于马家沟组五段 6~10 亚段海侵—海退的背景，以研究区 43 口取心井为研究对象，依据沉积间断标志、化学沉积分异、岩溶作用特征以及微生物岩形态特征等沉积序列划分原则，共识别出 204 个与微生物岩相关的五级沉积旋回，系统总结出了 2 大类和 6 小类微生物岩序列（表 1）。

3.1.1 “海退型”序列特征

1) 序列 I：泥质云岩—泥晶云岩—叠层石云岩—岩溶角砾云岩（图 4-a）。旋回下部发育深灰色泥质云岩，厚 0.17 m；向上渐变为泥晶云岩，局部可见弱纹层构造，厚 0.52 m。旋回中部以浅褐灰色层状叠层石向波状叠层石过渡为主，厚 0.38 ~ 0.50 m，向上常发生纹层错断变形。至顶部过渡为深灰色角砾云岩，厚 0.12~0.20 m，以暴露面为界，



a—凝块石云岩，下部为顺层状凝块石，向上过渡为格架状，Sh473 井，3898.46 m，马五₁₀；b—顺层状凝块石云岩，Sh473 井，3898.30 m，马五₁₀，单偏光；c—顺层状凝块石云岩，Tg8 井，3331.32 m，马五₆，单偏光；d—格架状凝块石云岩，发育格架间溶蚀孔洞，T98 井，3177.80 m，马五₇；e—格架状凝块石云岩，发育格架间溶蚀孔洞，蓝色铸体薄片，T67 井，3358.09 m，马五₇，单偏光；f—格架状凝块石云岩，J29 井，3961.62 m，马五₉，单偏光；g—粘结颗粒云岩，T78 井，3720.42 m，马五₆；h—粘结颗粒云岩，T78 井，3720.42 m，马五₆，单偏光；i—粘结颗粒云岩，J23 井，3578.44 m，马五₉，单偏光

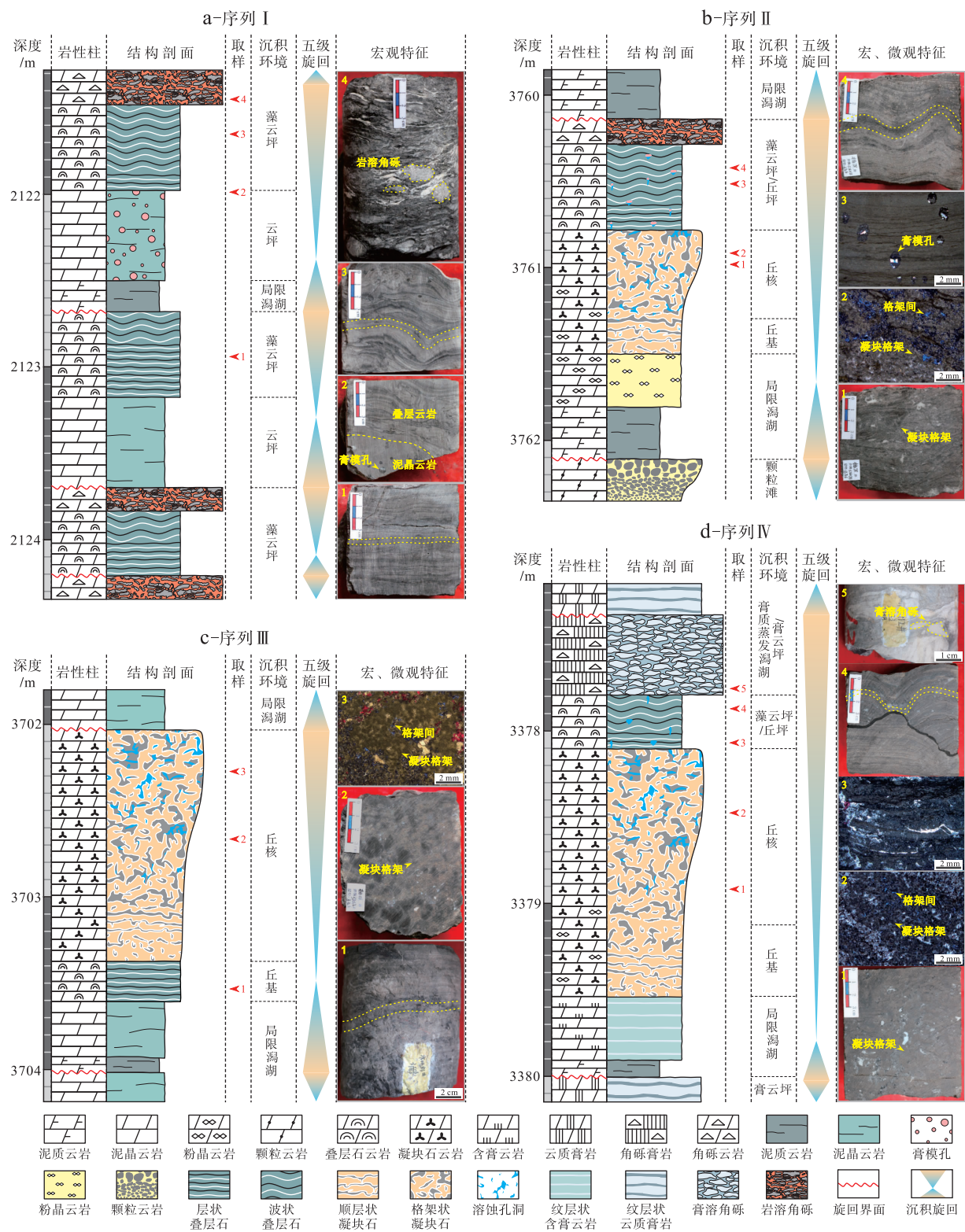
图 3 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段凝块石云岩与粘结颗粒云岩特征

Fig. 3 Characteristics of thrombolites and microbial bonded granular dolomite within the Ma5₆ to Ma5₁₀ sub-members of Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组五段 6~10 亚段微生物岩序列发育统计
Table 1 Statistics on microbialite sequences within the Ma5₆ to Ma5₁₀ sub-members of Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin

大类	小类	结构特征	频数/个	平均厚度/m	发育层位	图示
海退型	序列 I	叠层石主导	20	0.86	马五 ₆	图 4-a
	序列 II	凝块石/粘结颗粒岩—叠层石	52	1.39	马五 ₆ 、马五 ₈	图 4-b
	序列 III	叠层石—凝块石/粘结颗粒岩	11	1.29	马五 ₆ 、马五 ₁₀	图 4-c
	序列 IV	微生物岩—膏岩共生	38	1.42	马五 ₆ 、马五 ₈ 、马五 ₁₀	图 4-d
海侵型	序列 V	凝块石—粘结颗粒岩	37	1.53	马五 ₇ 、马五 ₉	图 5-a
	序列 VI	凝块石—粘结颗粒岩互层	46	1.25	马五 ₇ 、马五 ₉	图 5-b

注：厚度的统计不包括取心不完整段的序列（共 42 个）。



a—序列 I, T98 井, 井段 2121.28~2124.22 m, 马五₆; b—序列 II, T78 井, 井段 3760.14~3762.11 m, 马五₆;

c—序列 III, T86 井, 井段 3702.03~3704.02 m, 马五₆; d—序列 IV, T112 井, 井段 3377.32~3380.02 m, 马五₆。

图 4 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组五段 6~10 亚段“海退型”微生物岩序列特征

Fig. 4 Characteristics of “Regression type” microbialite sequences within the Ma5₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin

上覆层为下一旋回泥质云岩或叠层石云岩。

2) 序列Ⅱ: 泥质云岩—泥/粉晶云岩—凝块/粘结颗粒云岩—叠层石云岩—岩溶角砾云岩(图 4-b)。旋回下部为深灰色弱纹层状泥质云岩, 厚 0.30 m, 常以暴露面或岩性界面为界上覆于岩溶角砾岩或颗粒云岩之上; 向上过渡为深灰色泥(粉)晶白云岩, 厚 0.31 m。旋回中部发育灰褐色凝块石云岩, 厚 0.72 m, 向上凝块组构增多, 表现为由顺层状凝块向格架状凝块转变。旋回上部常遭受大气淡水淋滤(张建勇等, 2013)发生溶蚀, 形成格架溶蚀孔/洞。叠层石常发育于序列上部, 多见膏模孔切断纹层, 厚 0.50 m, 与下伏凝块石云岩突变接触。旋回顶部发育深灰色岩溶角砾云岩, 厚 0.14 m。

3) 序列Ⅲ: 泥质云岩—泥晶云岩—叠层石云岩—凝块/粘结颗粒云岩(图 4-c)。旋回下部为深灰色泥质云岩和泥晶云岩, 总体厚度小于 0.50 m; 向上发育浅褐灰色层状叠层石云岩, 总体厚度不大, 约 0.20 m, 单纹层起伏不大、厚度较小。旋回中上部发育褐灰色凝块石云岩, 自下而上凝块由顺层状向格架状过渡, 常见格架间溶蚀孔/洞伴生, 厚度达 1.35 m。

4) 序列Ⅳ: 泥质云岩—含膏/泥晶云岩—凝块/粘结颗粒云岩—叠层石云岩—膏岩(图 4-d)。旋回底部发育深灰色泥质云岩, 厚度小于 0.10 m; 向上过渡为浅灰色纹层状(含膏)泥晶云岩, 厚 0.37 m。旋回中部为顺层状向格架状过渡的凝块石, 厚 1.44 m; 叠层石在其下伏凝块石云岩基础上继承性沉积, 下部纹层形态较平直, 向上逐渐过渡为波状, 且纹层多发生错断变形, 厚 0.31 m。旋回顶部为灰白色膏溶角砾岩, 向上膏质增多、颜色变浅, 与下伏叠层石云岩渐变过渡, 厚 0.43 m。

3.1.2 “海侵型”序列特征

1) 序列Ⅴ: 泥/粉晶云岩—凝块石云岩—粘结颗粒云岩(图 5-a)。序列下部为浅灰褐色泥(粉)晶云岩, 厚 0.38~0.65 m。向上微生物组构增多, 过渡为凝块石云岩, 凝块多为格架状, 格架向上增大, 厚 0.78~1.4 m。顶部发育浅灰褐色粘结颗粒云岩, 颗粒结构明显, 厚 0.45 m。

2) 序列Ⅵ: 凝块/粘结颗粒云岩—凝块/粘结颗粒云岩(图 5-b)。该序列岩石组合简单, 为多个微生物岩纵向叠置组合, 单旋回内部由下至上,

凝块格架逐渐变大、格架间溶蚀孔/洞越发育, 厚度不大, 多介于 0.6~1.3 m 之间。在旋回顶部, 常见明显的暴露面。

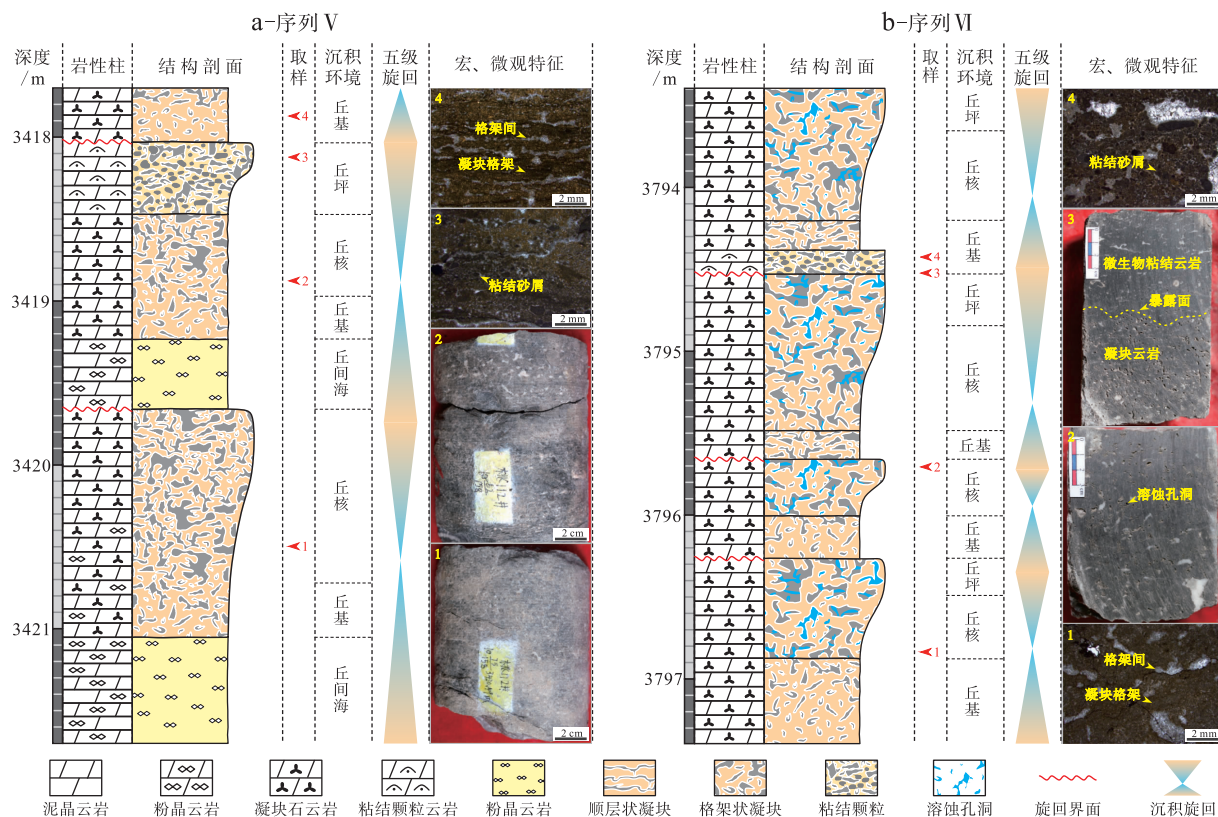
3.2 “海退型”、“海侵型”序列结构差异

上述序列均是理想条件下发育完整的“海退型”或“海侵型”微生物岩序列。受相对海平面波动频率和水动力强弱的影响, 在单个微生物岩序列中的岩石组合并不完整, 可能缺失某种岩石单元, 如“海退型”序列中的泥晶云岩—叠层石云岩、叠层石云岩—角砾云岩、泥晶云岩—粘结颗粒云岩或凝块石云岩、叠层石云岩—膏岩、凝块石云岩—膏岩等, 以及“海侵型”序列中的粉晶云岩—凝块石云岩、粉晶云岩—粘结颗粒云岩等岩石组合。

对比“海退型”和“海侵型”序列内部岩石单元特征和组合关系, 发现二者存在一些共性和差异。共性体现在“海退型”序列和“海侵型”序列底部都常以暴露面或岩性突变面为界, 中上部凝块石内部均具有产状或规模的规律性变化(如凝块格架向上逐渐变大)(图 4; 图 5)。差异性表现为: (1) 组合关系上, “海退型”序列中岩石单元与组合类型多样, 底部多以泥质云岩或泥晶云岩为主, 中上部常出现微生物岩—蒸发岩的组合类型(图 4-d); 而“海侵型”序列中岩石单元垂向组合关系简单, 多以微生物岩产状不同而纵向叠置。(2) 形态结构上, “海退型”序列中叠层石自下而上多由水平状向波状过渡, 凝块由顺层状向格架状转变(图 4); 而“海侵型”序列以格架状凝块为主(图 5)。(3) 纵向规模上, 总体上“海退型”和“海侵型”单序列厚度均属米级, 但“海侵型”序列厚度相对较大, 平均 1.39 m, 其中序列Ⅴ平均厚度最大, 但微生物岩厚度较序列Ⅵ小; 而“海退型”序列厚度较小, 平均 1.24 m, 且微生物岩厚度也均小于“海侵型”序列(图 6; 表 1)。(4) 发育频率上, “海退型”中序列Ⅱ发育频率最高, 其次为序列Ⅳ、Ⅰ, 序列Ⅲ发育频率最低; 而在“海侵型”序列中, 序列Ⅵ发育频率相对较高(表 1)。

4 微生物岩序列的沉积过程解译

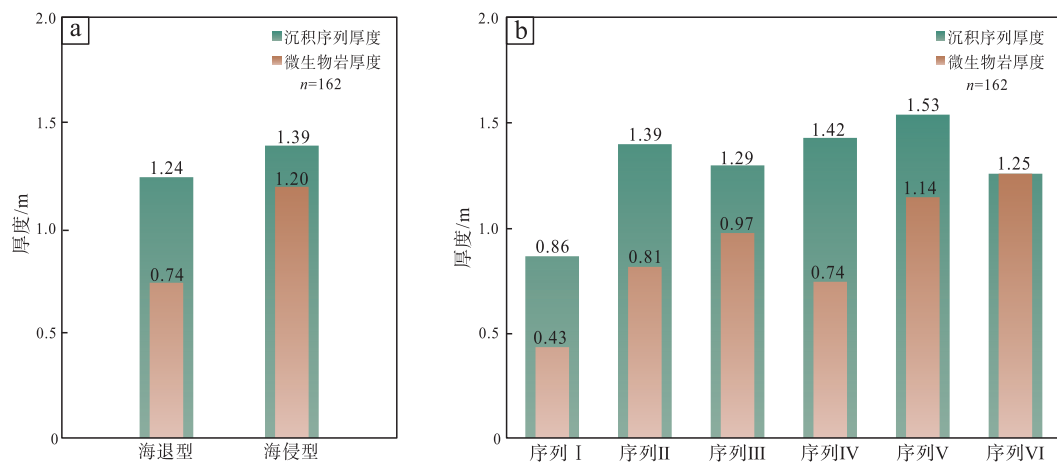
要揭示各类型微生物岩序列的沉积演化特征,



a—序列 V，T112 井，3417.70~3421.70 m 井段，马五₇；b—序列 VI，L144 井，3493.39~3797.39 m 井段，马五₇

图 5 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组五段 6~10 亚段“海侵型”微生物岩序列特征

Fig. 5 Characteristics of “Transgression type” microbialite sequences within the Ma5₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin



a—2 大类微生物岩序列平均厚度与微生物岩厚度统计；b—6 小类微生物岩序列平均厚度与微生物岩厚度统计

图 6 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组五段 6~10 亚段微生物岩序列厚度及微生物岩发育规模统计

Fig. 6 Statistics of microbialite sequence thickness and microbialite scale within the Ma5₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin

需系统梳理研究区整体沉积环境特征。前人研究表明，鄂尔多斯盆地中东部马五段沉积期广泛发育碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积，古地理背景主要以

局限—蒸发台地为主（胡安平，2022；刘国庆等，2024）。根据其沉积环境特征，进一步划分出潟湖/丘（滩）间海、颗粒滩、微生物丘和台坪 4

类亚相，并依据区内岩石矿物成分、结构构造及其组合特征等相标志，将其细分为 11 种微相(表 2)。基于表 2 的沉积环境划分，结合四级海侵—海退背景，依据相序定律以及次一级（五级）海平面变化特征，对各类型微生物岩序列的沉积过程进行系统解释。

4.1 “海退型”微生物岩序列沉积演化

1) 序列 I：下部发育局限潟湖沉积，岩性以泥质云岩为主。在向上变浅过程中，伴随局部海水封隔浓缩、水体盐度升高而发生石膏等蒸发矿物的沉淀，序列中部的泥晶云岩中常见离散状分布的膏模孔构造(图 4-a 中照片 2)，该岩相可定义为云坪。向上逐渐过渡为叠层石云岩，自下而上叠层石由层状转变为波状，指示水体能量逐渐变强，环境向藻云坪演化。由于海平面周期性变化导致其频繁暴露，叠层石常见纹层错断变形和似角砾化(图 4-a 中照片 3)，且其上部多发育岩溶角砾岩，也表明水体变浅而遭受岩溶改造。因此，该序列自下而上的特征为：局限潟湖—云坪—藻云坪。

2) 序列 II：同序列 I 相比，整体沉积水体稍加深。下部发育泥质云岩和泥（粉）晶云岩，厚度稳定，呈均质块状产出，指示局限潟湖环境。随着水体向上变浅，微生物开始发育，形成微生物丘

生长的基底—丘基，岩性以凝块石云岩为主。伴随微生物大量繁殖，逐渐生长成具一定抗浪能力的凝块格架(图 4-b 中照片 1，照片 2)，当水体变浅至浪基面附近，则以发育粘结颗粒为主，二者可构成微生物丘的主体部分——丘核。受丘滩体建隆和海平面降低的影响，环境演变为藻云坪或丘坪，发育叠层石云岩，顶部也常遭受岩溶改造而形成岩溶角砾。因此，该序列自下而上特征为：局限潟湖—丘基—丘核—藻云坪/丘坪。

3) 序列 III：该类型序列中，叠层石发育于凝块石或粘结颗粒岩之下(图 4-c)。相较于序列 II，底部同为局限潟湖沉积，但其地貌更低，海水和能量交换更为受限，迫使微生物群落向更浅水区迁移，至浪基面波动带发育层状叠层石，该环境定义为丘基。以叠层石为基底，向上生长形成凝块格架，当变浅至恒定的浪基面—海平面时，凝块石之上常发育粘结颗粒岩，二者共同构成丘核。因此，该序列自下而上的特征为：局限潟湖—丘基—丘核。

4) 序列 IV：同上述序列相比，该类型反映其沉积期地貌更低，水体环境更为受限。底部为初始海侵的泥质云岩，向上水体循环受限，伴生蒸发矿物的低能沉积。随着水体变浅、盐度增大，嗜盐微生物大量繁殖，形成凝块石格架，构建丘基和丘

表 2 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组五段 6~10 亚段沉积环境划分（据黄道军等，2021；有修改）
Table 2 Classification of depositional environments within the Ma5₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin
(modified from Huang *et al.*, 2021)

沉积相			主要岩性	典型相标志	典型序列	图示
相	亚相	微相				
局限— 蒸发台地	潟湖/丘 (滩)间海	半局限潟湖	灰质云岩、泥(粉)晶云岩	生物潜穴	/	/
		局限潟湖/丘(滩)间海	泥质云岩、泥(粉)晶云岩	水平层理 生物潜穴	I ~ IV	图 4
		膏质蒸发潟湖	云质膏岩、含云膏岩、膏岩	块状层理 铁丝鸡笼构造		
		盐质蒸发潟湖	盐质膏岩、膏质盐岩、盐岩	块状层理		
	颗粒滩	颗粒滩	砂(砾)屑云岩、生屑云岩	递变层理	/	/
	微生物丘	丘基	叠层石云岩、凝块石云岩、粘结颗粒云岩	叠层构造 生物格架	II ~ VI	图 4 图 5
		丘核	凝块石云岩、粘结颗粒云岩	生物格架		
		丘坪	叠层石云岩、凝块石云岩、粘结颗粒云岩	叠层构造 生物格架		
	台坪	云坪	泥质云岩、泥晶云岩、含膏云岩	水平层理	I、II、IV	图 4-a, 4-b, 4-d
		藻云坪	叠层石云岩、角砾云岩	叠层构造		
		膏云坪	膏质云岩、云质膏岩、膏岩	块状层理 铁丝鸡笼构造		

核。若水动力较强，丘体发育以粘结颗粒岩为主；水体进一步变浅，叠层石普遍发育，环境演变为藻云坪或丘坪。海退后期，水体受限程度更高，伴随台地的强蒸发作用，水体盐度超过微生物的忍耐范围，其活动受到抑制而停止发育，同时石膏等蒸发盐矿物大量沉淀，形成块状岩层，环境演变为膏质蒸发潟湖或膏云坪(图 4-d)。因此，此序列自下而上的特征为：局限潟湖—丘基—丘核—丘坪/藻云坪—膏质蒸发潟湖/膏云坪。

综上所述，“海退型”序列类型多样，从类型 I 至 IV 展现出多种岩性岩相的变化，揭示出不同沉积环境的演变特征，由潟湖—台坪、潟湖—微生物丘—台坪、潟湖—微生物丘、潟湖—微生物丘—蒸发潟湖/台坪 4 种典型的向上变浅沉积序列构成。

4.2 “海侵型”微生物岩序列沉积演化

1) 序列 V：代表海平面上升速率小于微生物丘生长速率，因沉积可容空间不足导致微生物丘侧向迁移而与丘间海构成向上变浅序列(图 5-a)。序列下部为丘/滩间海沉积，发育泥(粉)晶云岩。向上水体变浅，微生物组构逐渐增多，主体岩性转变为凝块石云岩，定义为丘基。随着微生物格架的生长，丘核部分逐渐形成。当水体进一步变浅处于浪基面之上，沉积水体能量增大，部分碎屑颗粒被微生物捕获粘结，形成粘结颗粒云岩，定义为丘坪。由于丘滩体建隆导致相对海平面降低，水体动荡，微生物难以生存，且沉积可容空间不足，微生物丘生长趋于停滞，迫使其向丘间迁移，因此该序列自下而上的特征为：丘间海—丘基—丘核—丘坪。

2) 序列 VI：代表海平面上升速率大于微生物丘生长速率，沉积可容空间充足，海水整体处于稳定浪基面之上，沉积古地貌相对较高，以微生物丘垂向加积为主(图 5-b)。海侵期沉积水体相对较深，水动力强度小，凝块格架发育规模小，定义为丘基。随着微生物的生长发育，丘体向上建隆，主体格架——丘核逐渐形成。伴随微生物丘向上加积变浅常遭受大气淡水淋滤改造，顶部形成暴露面(图 5-b 中照片 3)，环境演变为丘坪。接着下一阶段海侵开始，水体较浅、能量较强，发育粘结颗粒云岩作为丘基，水体加深又转而以凝块石沉积为主。因此，垂向上多个丘滩体叠置发育，一个旋回

的丘坪可成为下一旋回的丘基，序列自下而上的特征为：丘基—丘核—丘坪。

综上所述，“海侵型”序列揭示的沉积环境相对简单，表现为微生物丘纵向叠置，或侧向迁移与丘间海构成向上变浅的沉积序列。

4.3 不同微生物岩序列的分布差异

本研究系统梳理了鄂尔多斯盆地中东部 T112 井奥陶系中组合沉积环境以及有关微生物岩序列(图 7)，发现各类型微生物岩序列在纵向上的分布发育有较大差异。(1)“海退型”中序列 I 主要发育于马五₆亚段顶部和中部的台坪环境，以叠层石和岩溶角砾共生为特征(图 7 中序列 a)；序列 II 主要发育于马五₆亚段中上部和马五₈亚段，形成于台坪—局限潟湖的过渡环境，主要由叠层石和凝块石组成(图 7 中序列 b)；相比而言，序列 III 沉积地貌相对更低、水体更深，岩溶角砾不发育(图 7 中序列 c)，处于局限潟湖环境，主要发育于马五₁₀亚段和马五₆亚段中下部；序列 IV 主要发育于马五₆亚段中下部，整体处于台坪或蒸发潟湖环境，垂向上与蒸发岩共生(图 7 中序列 d)；(2)“海侵型”序列主要发育于马五₇亚段，发育凝块石和粘结颗粒岩，由多个丘体叠置及丘间沉积组成(图 7 中序列 e 和序列 f)。

岩性岩相垂向上的改变反映了海平面的升降和沉积环境的纵向演化。以 T112 井为例(图 7)，在四级海退亚段特别是马五₆沉积期，海水循环受限，沉积相带范围大，沉积分异明显，台坪、局限潟湖和膏质蒸发潟湖及其过渡环境皆是微生物岩序列构建的有利环境；而四级海退背景下(马五₇亚段)海水交换较好、能量较高，沉积水体相对较深，发育丘滩体及其间洼地(丘/滩间海)的旋回。

5 微生物岩序列构建模式与分布控制因素

前人研究表明，微生物的发育受控于盐度、水动力和温度等环境条件(Baskin *et al.*, 2022; 樊爱萍等, 2023)，相对海平面变化可通过改变水体性质来影响微生物活动及其岩石形成过程。基于研究区古地理格局(邵东波等, 2019; 周进高等, 2020; 钟寿康等, 2022)和沉积特征(席胜利等,

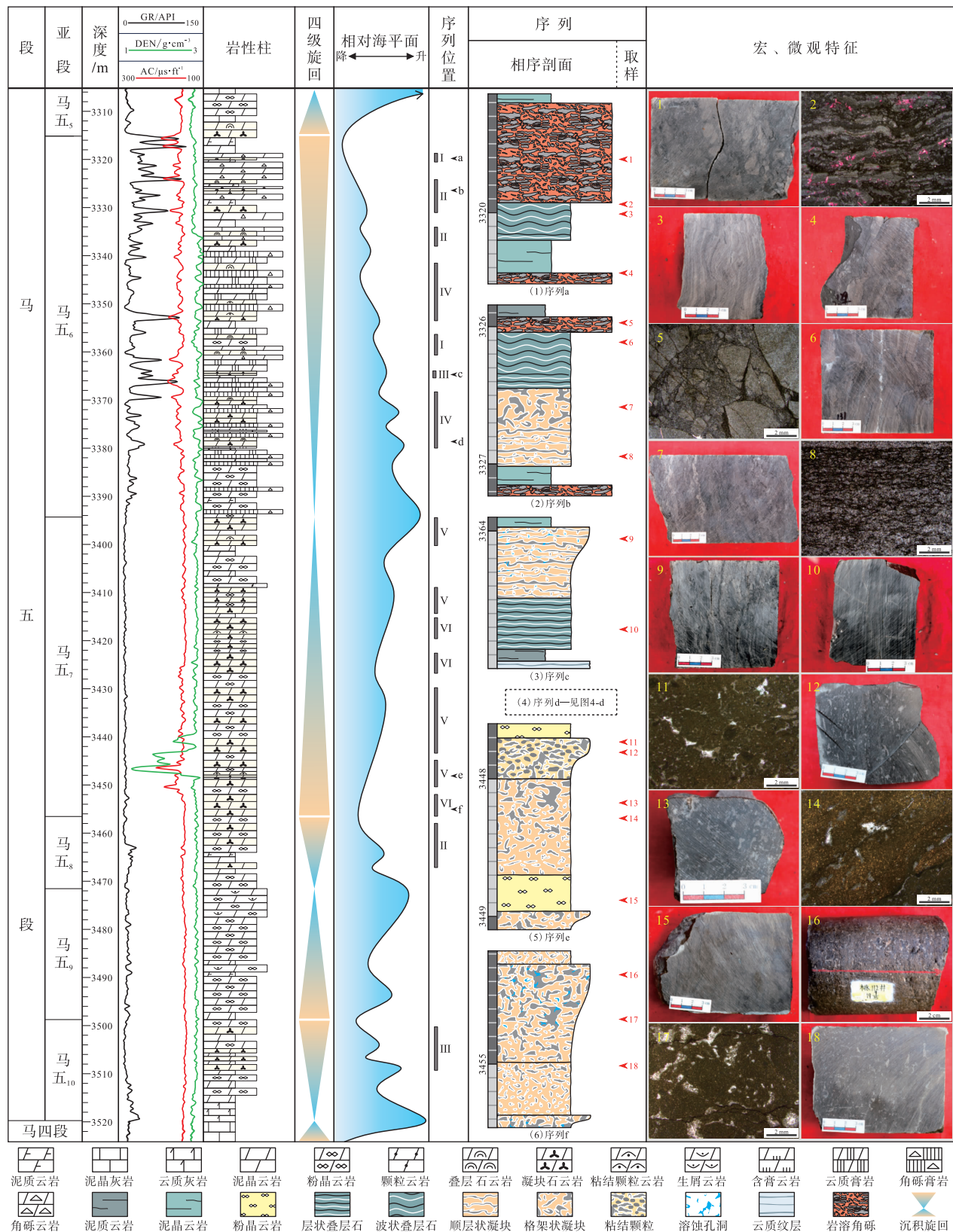
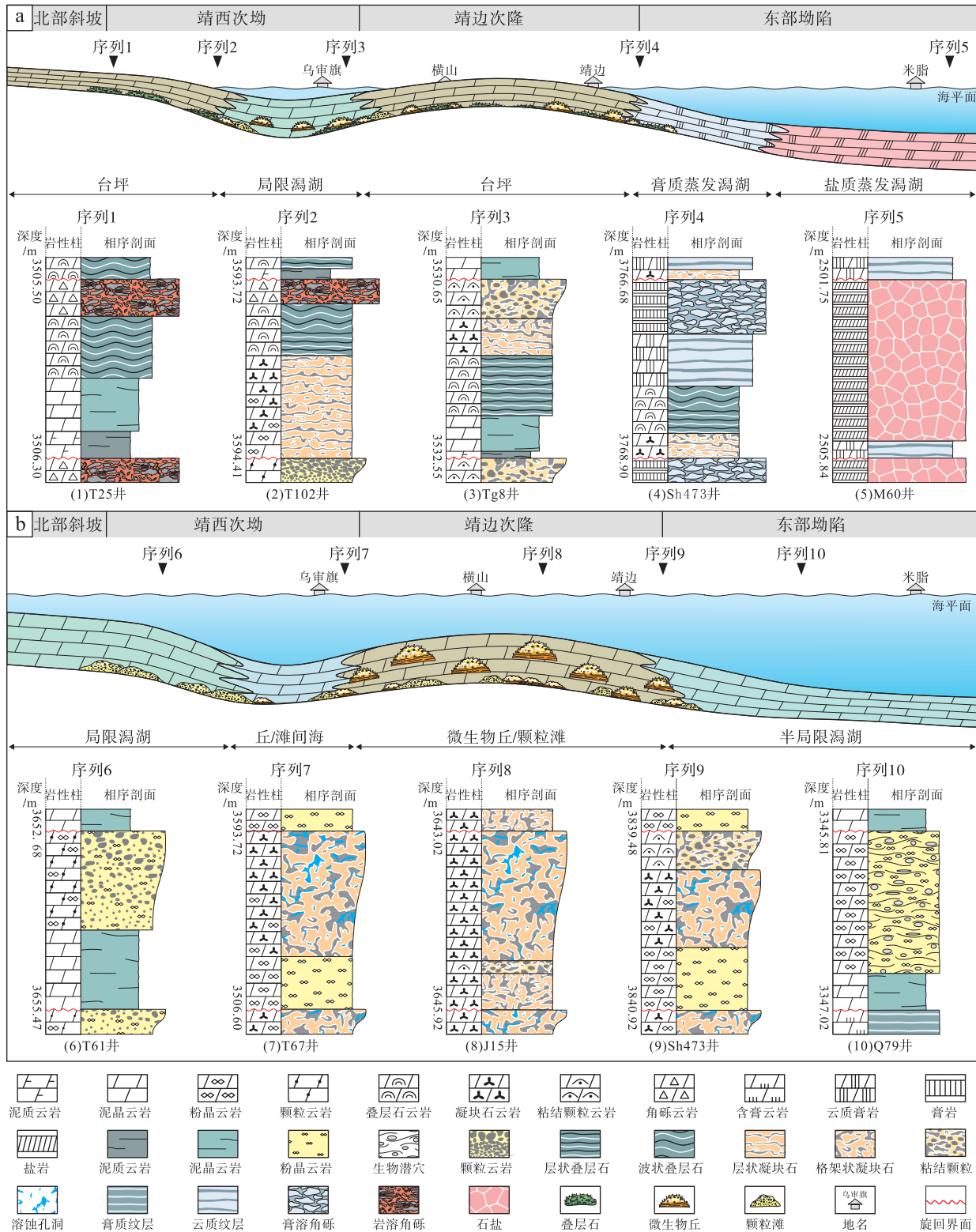


图 7 鄂尔多斯盆地中东部 T112 井奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段综合柱状图及微生物岩序列分布

Fig. 7 Comprehensive histogram and microbialite sequence distribution within the Ma₅₆₋₁₀ sub-members

in Well T112, central-eastern Ordos Basin



a—“海退型”微生物岩序列分布发育模式；b—“海侵型”微生物岩序列分布发育模式

图 8 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段微生物岩序列分布发育模式（剖面位置见图 1-a）

Fig. 8 Distribution and development patterns of microbialite sequences of the Ma₅₆₋₁₀ sub-members in central-eastern Ordos Basin (location is shown in Fig. 1-a)

2017; 于洲等, 2022), 结合微生物岩的岩相类型与分布(图 4; 图 5; 图 7) 及其与沉积古地貌、海水性质变化的响应关系(徐欣等, 2018; 魏柳斌等, 2021b; 樊爱萍等, 2023), 建立了鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组中组合微生物岩序列发育模式(图 8)。

在四级海退旋回亚段, 相对海平面降低, 研究区海水分异受古隆起封隔作用影响较大, 海水交换受限, 沉积分异明显, 微生物岩序列类型多、分布广(图 8-a)。序列 I 发育于北部斜坡环陆外缘, 地势相对平缓, 广泛发育台坪沉积, 其水动力主要来自潮汐作用, 微生物岩类型以叠层石为主(图 8-a 中(1))。向东南靖西次坳中部水体逐渐加深, 沉积环境逐渐演化为局限潟湖, 由于短期相对海平面降低, 水体循环受限, 盐度增加, 局部微地貌高地发育丘滩体的沉积, 微生物岩以序列 II 和序列 III 为主(图 8-a 中(2, 3))。靖边次隆—东部坳陷古地理条件特殊, 强蒸发作用和乌审旗—靖边隆起、中央古隆起以及吕梁隆起的共同障壁作用, 导致该区域发育蒸发台地沉积(魏柳斌等, 2021c; 钟寿康等, 2022), 古隆起及两侧地貌较高, 受潮汐作用影响而发育台坪亚相, 且远离广海水体循环不畅, 海水蒸发浓缩, 水体盐度升高, 嗜盐微生物大量繁殖, 形成规模性微生物丘, 垂向上以发育微生物岩和蒸发岩共生的序列 IV 为主(图 8-a 中(4))。至东部坳陷, 水体盐度极大, 微生物难以生存, 转而沉积厚层膏岩和盐岩, 以发育蒸发岩序列为主(图 8-a 中(5))。

四级海侵旋回亚段相对海平面较高, 古地貌障壁作用减弱, 海水交换通畅, 微生物丘构建主要受控于沉积可容空间的变化, 发育类型较少、组合单一(图 8-b)。由于海平面上升, 盆地内周缘古地貌格局对海水的阻隔作用减弱, 盆地中东部海水与华北广海和祁连广海的循环通畅, 水动力增强, 盐度正常, 盆地中东部地区整体转变为局限台地沉积。研究区西侧较高但靠近广海, 发育潟湖与颗粒滩的旋回(图 8-b 中(6)), 东部凹陷水体较深, 以潟湖沉积为主(图 8-b 中(10))。而靖边次隆及其两侧具有较高的古地貌, 水体能量较高, 利于丘滩体的发育, 沉积规模性的微生物岩(图 8-b 中(8))。微生物丘具水下正向地貌特征, 导致可容空间降低, 迫使其发生侧向迁移, 形成丘与丘间组

合的相序特征(图 8-b 中(7, 9))。

此外, 从“海侵型”和“海退型”序列微生物岩厚度(图 6) 的统计对比可以看出, 海侵沉积背景更有利于微生物岩发育, 形成较大规模的丘滩沉积旋回; 同时, 不同类型的序列组合中的微生物岩厚度也有一定的差异, 反映出由于古地貌封隔而导致海水能量/盐度的分异对于丘滩体规模的影响。结合上述模式(图 8) 认为, 纵向上多个次一级海平面升降控制着多期垂向微生物岩序列的形成, 横向上凹凸相间的古地貌格局控制着丘滩体的差异性展布。总体而言, 相对海平面变化与古地貌格局耦合控制了微生物岩的发育和分布, 表现为: 四级海侵背景下, 整体水体较深, 可容空间变化导致丘滩体的垂向加积与侧向迁移, 构成了组合单一的微生物岩序列; 四级海退背景下, 凹凸相间的古地貌格局控制海水盐度与能量的渐次分异, 进而控制了岩性岩相的差异变化, 形成了多样化的微生物岩序列。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6~10 亚段发育叠层石云岩、凝块石云岩和粘结颗粒云岩 3 类微生物岩, 基于四级海侵—海退沉积背景进一步梳理出“海退型”和“海侵型”共 2 大类、6 小类微生物岩序列。

2) “海退型”序列岩相组合复杂, 由潟湖—台坪、潟湖—微生物丘—台坪、潟湖—微生物丘、潟湖—微生物丘—蒸发潟湖/台坪 4 种五级(米级) 变浅沉积序列构成, 发育频率较高; “海侵型”序列主要由微生物丘、丘间海—微生物丘 2 种五级变浅序列构成, 其岩相组合简单, 单旋回厚度相对更大。

3) 相对海平面变化与古地貌格局耦合控制了微生物岩的发育和分布, 表现为: 四级海退背景下凹凸相间古地貌格局控制海水盐度和能量渐次分异, 形成多样化的微生物岩序列; 四级海侵背景下微生物岩序列的构建受控于沉积可容空间的变化。

参考文献 (References)

- 樊爱萍, 李诚, 杨仁超, 韩作振, 吴祥生. 2023. 岩相特征对海平面升降的响应: 以山东苍山寒武系为例. 沉积学报, 41(4): 1040-1053. [Fan A P, Li C, Yang R C, Han Z Z, Wu X S. 2023. Re-

- sponse of lithofacies characteristics to sea-level fluctuations: a case study from the Cambrian Cangshan profile, Shandong Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(4): 1040–1053]
- 范承蒙, 杨海林, 杨洋, 温汉捷, 樊海峰, 张洪杰, 李方会, 肖蛟龙, 周煜. 2024. 湖北三峡地区黄陵隆起北缘灯影组微生物碳酸盐岩类型及古环境演化. *古地理学报*, 26(5): 1256–1270. [Fan C M, Yang H L, Yang Y, Wen H J, Fan H F, Zhang H J, Li F H, Xiao J L, Zhou Y. 2024. Calcimicrolith types and paleoenvironment evolution of the Sinian Dengying Formation in northern margin of Huangling Uplift, Three Gorges of Hubei Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(5): 1256–1270]
- 冯增昭, 鲍志东, 张永生, 谭健, 康祺发, 韩征, 王玉新, 张传录, 韩宇春. 1998. 鄂尔多斯地区奥陶纪地层岩石岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1–144. [Feng Z Z, Bao Z D, Zhang Y S, Tan J, Kang Q F, Han Z, Wang Y X, Zhang C L, Han Y C. 1998. *Stratigraphy Petrology Lithofacies Paleogeography of Ordovician in Ordos*. Beijing: Geological Publishing House, 1–144]
- 侯方浩, 方少仙, 赵敬松, 董兆雄, 李凌, 吴治, 陈娅娜. 2002. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式. *海相油气地质*, 7(1): 38–46, 5. [Hou F H, Fang S X, Zhao J S, Dong Z X, Li L, Wu Y, Chen Y N. 2002. Depositional environment model of Middle Ordovician Majiagou formation in Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 7(1): 38–46, 5]
- 胡安平, 沈安江, 张杰, 吴东旭, 付小东, 蒙绍兴. 2022. 碳酸盐岩—膏盐岩高频沉积旋回组合—一储特征: 以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中一下组合为例. *石油与天然气地质*, 43(4): 943–956. [Hu A P, Shen A J, Zhang J, Wu D X, Fu X D, Meng S X. 2022. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: a case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 943–956]
- 黄道军, 钟寿康, 张道锋, 王保保, 廖建初, 谢康, 卢子兴, 谭秀成. 2021. 蒸发背景沉积序列精细刻画及沉积学解释: 以鄂尔多斯盆地中部中奥陶统马五₆亚段为例. *古地理学报*, 23(4): 735–755. [Huang D J, Zhong S K, Zhang D F, Wang B B, Liao J C, Xie K, Lu Z X, Tan X C. 2021. Detailed characterization and interpretation of sedimentary sequences under evaporitic environments: a case from the Ma5₆ submember of Middle Ordovician in central Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(4): 735–755]
- 黄正良, 武春英, 马占荣, 任军峰, 包洪平. 2015. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积层序及其对储层发育的控制作用. *中国石油勘探*, 20(5): 20–29. [Huang Z L, Wu C Y, Ma Z R, Ren J F, Bao H P. 2015. Sedimentary sequence of Ordovician Majiagou Formation in central and eastern part of Ordos Basin and its control over reservoir development. *China Petroleum Exploration*, 20(5): 20–29]
- 贾承造, 魏国齐, 李本亮. 2005. 中国中西部小型克拉通盆地群的叠合复合性质及其含油气系统. *高校地质学报*, 11(4): 479–492. [Jia C Z, Wei G Q, Li B L. 2005. Superimposed-composite characteristics of micro-craton basins and its bearing petroleum systems, central-western China. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 479–492]
- 刘国庆, 苏中堂, 郝志磊, 魏柳斌, 任军锋, 廖慧鸿, 吴浩文. 2024. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积微相与沉积模式. *古地理学报*, 26(2): 279–295. [Liu G Q, Su Z T, Hao Z L, Wei L B, Ren J F, Liao H H, Wu H W. 2024. Microfacies and depositional model of a carbonate-evaporite symbiotic system of the Majiagou Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(2): 279–295]
- 罗垚, 谭秀成, 赵东方, 罗文军, 刘耘, 肖笛, 乔占峰, 曾伟. 2022. 埃迪卡拉系微生物碳酸盐岩沉积特征及其地质意义: 以川中磨溪 8 井区灯影组四段为例. *古地理学报*, 24(2): 278–291. [Luo Y, Tan X C, Zhao D F, Luo W J, Liu Y, Xiao D, Qiao Z F, Zeng W. 2022. Sedimentary characteristics of the Ediacaran microbial carbonates and their geological implications: a case study of the Member 4 of Dengying Formation from Wellblock MX8 in central Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 278–291]
- 梅冥相. 2007. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充. *地质前缘*, 14(5): 222–234. [Mei M X. 2007. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222–234]
- 钱迈平. 1991. 苏、皖北部震旦纪叠层石及其沉积环境学意义. *古生物学报*, 30(5): 616–629. [Qian M P. 1991. Sinian stromatolites in northern Jiangsu and Anhui Province and its sedimentary environmental significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 30(5): 616–629]
- 邵东波, 包洪平, 魏柳斌, 蔡郑红, 武春英, 周黎霞, 曹岩刚. 2019. 鄂尔多斯地区奥陶纪构造古地理演化与沉积充填特征. *古地理学报*, 21(4): 537–556. [Shao D B, Bao H P, Wei L B, Cai Z H, Wu C Y, Zhou L X, Cao Y G. 2019. Tectonic palaeogeography evolution and sedimentary filling characteristics of the Ordovician in the Ordos area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(4): 537–556]
- 宋金民, 罗平, 杨式升, 杨迪, 周川闽, 李朋威, 翟秀芬. 2014. 塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征. *石油勘探与开发*, 41(4): 404–413, 437. [Song J M, Luo P, Yang S S, Yang D, Zhou C M, Li P W, Zhai X F. 2014. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(4): 404–413, 437]
- 王起琮, 张宇, 杨奕华, 杨伟利, 李洁. 2018. 鄂尔多斯盆地马家沟组层序地层与岩相分布. *西北大学学报(自然科学版)*, 48(4): 568–577. [Wang Q C, Zhang Y, Yang Y H, Yang W L, Li J. 2018. Sequence stratigraphic and lithofacies distributions of Majiagou Formation in Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 48(4): 568–577]
- 王文之, 杨跃明, 文龙, 罗冰, 罗文军, 夏茂龙, 孙赛男. 2016. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究: 以四川盆地高磨地区灯影组为例. 中

- 国地质, 43(1): 306–318. [Wang W Z, Yang Y M, Wen L, Luo B, Luo W J, Xia M L, Sun S N. 2016. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: a case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan basin. *Geology in China*, 43(1): 306–318]
- 魏柳斌, 包洪平, 严婷, 郭玮, 周黎霞, 井向辉. 2021a. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段 5 亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义. *石油学报*, 42(8): 1015–1025. [Wei L B, Bao H P, Yan T, Guo W, Zhou L X, Jing X H. 2021a. Development characteristics and significance of microbial carbonate reservoirs in the fifth sub-member of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(8): 1015–1025]
- 魏柳斌, 赵俊兴, 苏中堂, 魏新善, 任军峰, 黄正良, 武春英. 2021b. 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. 2021b. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblage, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1162–1174]
- 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 严婷, 蔡郑红, 周黎霞. 2021c. 鄂尔多斯盆地乌审旗—靖边古隆起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用. *石油与天然气地质*, 42(2): 391–400, 521. [Wei L B, Chen H D, Guo W, Yan T, Cai Z H, Zhou L X. 2021c. Wushen-Jingbian Paleouplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(2): 391–400, 521]
- 吴亚生, 姜红霞, Yang Wan, 范嘉松. 2007. 二叠纪—三叠纪之交缺氧环境的微生物和微生物岩. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 37(5): 618–628. [Wu Y S, Jiang H X, Yang W, Fan J S. 2007. Microorganisms and microbial rocks of hypoxia environment across the Permian–Triassic boundary. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 37(5): 618–628]
- 吴亚生. 2023. 生物岩的分类. *古地理论*, 25(3): 511–523. [Wu Y S. 2023. Classification of biolith (biogenic rocks). *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 511–523]
- 席胜利, 熊鹰, 刘显阳, 雷晶超, 刘明洁, 刘灵, 刘耘, 文汇博, 谭秀成. 2017. 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. *古地理论*, 19(5): 773–790. [Xi S L, Xiong Y, Liu X Y, Lei J C, Liu M J, Liu L, Liu Y, Wen H B, Tan X C. 2017. Sedimentary environment and sea level change of the subsalt interval of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in central Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5): 773–790]
- 谢锦龙, 吴兴宁, 孙六一, 于洲, 王少依. 2013. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段岩相古地理及有利区带预测. *海相油气地质*, 18(4): 23–32. [Xie J L, Wu X N, Sun L Y, Yu Z, Wang S Y. 2013. Lithofacies palaeogeography and potential zone prediction of Ordovician Majiagou Member–5 in Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(4): 23–32]
- 辛勇光, 周进高, 邓红婴. 2010. 鄂尔多斯盆地南部下奥陶统马家沟组沉积特征. *海相油气地质*, 15(4): 1–5. [Xin Y G, Zhou J G, Deng H Y. 2010. Sedimentary features of Lower Ordovician Majiagou Formation in the southern part of Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(4): 1–5]
- 熊鹰, 姚涇利, 李凌, 侯云东, 肖笛, 聂万才, 赵东方, 谭秀成. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五₁₊₂微生物碳酸盐岩沉积特征及储集意义. *沉积学报*, 34(5): 963–972. [Xiong Y, Yao J L, Li L, Hou Y D, Xiao D, Nie W C, Zhao D F, Tan X C. 2016. Sedimentary characteristics and reservoir significance of microbial carbonate in Ma₅₍₁₊₂₎ Member of Ordovician in northeastern Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(5): 963–972]
- 徐欣, 胡明毅, 高达. 2018. 磨溪—高石梯地区灯影组四段微生物岩沉积特征及主控因素. *中国海上油气*, 30(2): 25–34. [Xu X, Hu M Y, Gao D. 2018. Sedimentary characteristics and main control factors for microbialite of the fourth Member of Dengying Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan basin. *China Offshore Oil and Gas*, 30(2): 25–34]
- 杨华, 包洪平. 2011. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示. *天然气工业*, 31(12): 11–20, 124. [Yang H, Bao H P. 2011. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the Middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 31(12): 11–20, 124]
- 杨梦颖, 谭秀成, 杨鸣一, 许玉青, 晏巍, 苏文杰, 钟寿康, 熊鹰, 郭木石. 2021. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五₅亚段微生物岩盆地尺度分布特征及主控因素. *古地理论*, 23(6): 1125–1139. [Yang M Y, Tan X C, Yang M Y, Xu Y Q, Yan W, Su W J, Zhong S K, Xiong Y, Guo M S. 2021. Basin-scale distribution and dominant controlling factors of microbialites of the Ma₅ sub-member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(6): 1125–1139]
- 于洲, 张道锋, 王维斌, 李鹏, 魏柳斌, 吴东旭, 刘雨昕. 2022. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积特征与有利储集相带. *海相油气地质*, 27(4): 371–382. [Yu Z, Zhang D F, Wang W B, Li P, Wei L B, Wu D X, Liu Y X. 2022. Sedimentary characteristics and favorable facies of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 27(4): 371–382]
- 张建勇, 周进高, 潘立银, 王小芳, 王芳, 郝毅, 谷明峰, 张润合, 陈薇, 吕玉珍. 2013. 川东北地区孤立台地飞仙关组优质储层形成主控因素: 大气淡水淋滤及渗透回流白云石化. *天然气地球科学*, 24(1): 9–18. [Zhang J Y, Zhou J G, Pan L Y, Wang X F, Wang F, Hao Y, Gu M F, Zhang R H, Chen W, Lü Y Z. 2013. The main origins of high quality reservoir in Feixianguan Formation in Northeast Sichuan Basin: atmospheric water eluviation and seepage-reflux dolomitization. *Natural Gas Geoscience*, 24(1): 9–18]
- 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 Majia-

- gou Formation M5 Member in central-eastern Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 728–740]
- 周进高, 席胜利, 邓红婴, 于洲, 刘新社, 丁振纯, 李维岭, 唐瑾. 2020. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征. *天然气工业*, 40(2): 41–53. [Zhou J G, Xi S L, Deng H Y, Yu Z, Liu X S, Ding Z C, Li W L, Tang J. 2020. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(2): 41–53]
- 朱奕璇, 张忠民, 张德民. 2022. 巴西桑托斯盆地早白垩世微生物碳酸盐岩沉积环境与成因. *岩石学报*, 38(9): 2619–2633. [Zhu Y X, Zhang Z M, Zhang D M. 2022. Sedimentary environment and genesis of the Early Cretaceous microbial carbonates in Santos Basin, Brazil. *Acta Petrologica Sinica*, 38(9): 2619–2633]
- Bahniuk A M, Anjos S, França A B, Matsuda N, Eiler J, Mckenzie J A, Vasconcelos C. 2015. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions. *Sedimentology*, 62(1): 155–181.
- Baskin R L, Della Porta G, Wright V P. 2022. Characteristics and controls on the distribution of sublittoral microbial bioherms in Great Salt Lake, Utah: Implications for understanding microbialite development. *The Depositional Record*, 8(1): 39–66.
- Bourillot R, Vennin E, Dupraz C, Pace A, Foubert A, Rouchy J M, Patrier P, Blanc P, Bernard D, Lesseur J, Visscher P T. 2020. The record of environmental and microbial signatures in ancient microbialites: the terminal carbonate complex from the Neogene basins of southeastern Spain. *Minerals*, 10(3): 276.
- Burne R V, Moore L S. 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaos*, 2(3): 241–254.
- Fogret L, Sansjofre P, Lalonde S V. 2024. Geochemistry of carbonate microbialites through time and space: insights from the microbialite collection of the Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), France. *Chemical Geology*, 662: 122239.
- Hofmann A, Dirks P H G M, Jelsma H A. 2004. Shallowing-upward carbonate cycles in the Belingwe Greenstone Belt, Zimbabwe: a record of Archean sea-level oscillations. *Journal of Sedimentary Research*, 74(1): 64–81.
- Kah L C, Grotzinger J P. 1992. Early Proterozoic (1.9 Ga) thrombolites of the Rocknest Formation, Northwest Territories, Canada. *Palaos*, 7(3): 305–315.
- Kershaw S, Crasquin S, Li Y, Collin P Y, Forel M B, Mu X, Baud A, Wang Y, Xie S, Maurer F, Guo L. 2012. Microbialites and global environmental change across the Permian–Triassic boundary: a synthesis. *Geobiology*, 10(1): 25–47.
- Khelen A C, Manikyamba C, Ganguly S, Singh T D, Subramanyam K S V, Ahmad S M, Reddy M R. 2017. Geochemical and stable isotope signatures of Proterozoic stromatolitic carbonates from the Vempalle and Tadpatri Formations, Cuddapah Supergroup, India: Implications on paleoenvironment and depositional conditions. *Precambrian Research*, 298: 365–384.
- Komar V A. 1989. Classification of the microstructures of the Upper Precambrian stromatolites. *Himalayan Geology*, 13: 229–238.
- Logan B W, Rezak R, Ginsburg R N. 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology*, 72(1): 68–83.
- Riding R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47: 179–214.
- Riding R. 2006. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time. *Sedimentary Geology*, 185: 229–238.
- Schopf J W, Kudryavtsev A B, Osterhout J T, Williford K H, Kitajima K, Valley J W, Sugitani K. 2017. An anaerobic ~3400 Ma shallow-water microbial consortium: Presumptive evidence of Earth's Paleoproterozoic anoxic atmosphere. *Precambrian Research*, 299: 309–318.
- Semikhatov M A, Raaben M E. 2000. Proterozoic stromatolite taxonomy and biostratigraphy. *Microbial Sediments*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 295–306.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)

第十八届全国古地理学及沉积学学术会议 在中国石油大学(北京)克拉玛依校区 成功举办

2025 年 8 月 21 日,第十八届全国古地理学及沉积学学术会议在中国石油大学(北京)克拉玛依校区召开,并于 25 日顺利完成各项议程后,圆满落下帷幕。

本次大会以“迈进数智化时代的古地理学与沉积学”为主题,聚焦新时期学科发展的新方向、新挑战,深入探讨了古地理学与沉积学在数智化时代的发展方向,交流近年来中国在该领域取得的重要研究成果,研讨了如何更好地服务国家新质生产力发展,为能源矿产勘探开发、环境保护和资源利用提供数智化转型的理论和技术支撑。

大会报告环节汇聚了中国古地理学与沉积学领域的顶尖专家学者,呈现了一场精彩纷呈的学术盛宴。朱筱敏教授以《迈进数智化时代的古地理学与沉积学:赋能中国非常规能源创新勘探》为题,深刻阐述了数智化技术对古地理学的重塑作用,为非常规能源勘探提供了新范式。柳永清教授系统重建了温室气候背景下中国北方中生代陆相沉积—古地理演化过程,为深时气候—沉积响应研究提供了重要依据。吴胜和教授在《多尺度的古地理学:思考与展望》中,从理论层面拓宽了学科研究的维度和视野。

在能源地质与非常规油气研究领域,众多专家带来了创新性成果:朱如凯与刘显阳教授团队分享了陆相页岩沉积学—岩相古地理研究的新认识;刘树根教授揭示了四川盆地中二叠统含海泡石层系的特殊沉积特征与古地理意义;胡宗全教授深入探讨了五峰组—龙马溪组海相细粒沉积与页岩气勘探的成因联系;邵龙义教授阐释了煤中惰质组的深时生态系统意义;匡立春教授提出了煤岩气作为新兴油气资源的重要价值;唐勇教授分析了玛湖风城组全粒序沉积与油气藏有序共生机制;曾联波教授揭示了塔里木盆地超深层走滑断裂对缝洞储集层的差异控储机理;操应长教授探讨了含油气盆地物质调配与超深油气储集层形成机制;许红教授解析了东海沟弧槽盆地动力学与油气—天然气水合物资源成藏规律。在矿产资源研究方面,余文超教授阐述了中国铝土矿成矿环境与物质来源,拓展了沉积矿床的研究深度。在大地构造古地理领域,何登发教授重建了中亚含油气盆地的构造—古地理演化过程。在沉积学理论方面,何幼斌教授对深水沉积研究中的关键问题进行了深刻思考,屈红军教授揭示了陆架边缘迁移轨迹、斜坡地形与海底扇类型耦合关系。特别值得关注的是,赵晓明教授在《人工智能驱动下的沉积地质研究:前沿进展与挑战》中,系统阐述了人工智能技术在沉积地质研究中的最新进展和未来发展方向,为学科的数智化转型提供了重要指引。

大会设立了 15 个专题研讨会,涵盖了沉积学进展及岩相古地理、沉积相与环境、沉积地球化学、生物古地理、构造古地理等多个传统优势领域,同时重点关注了深层、深水、非常规储集层等前沿方向。特别是在数智化技术应用方面,地震沉积学、测井沉积学、沉积构型表征与建模技术、大数据与人工智能技术等专题讨论尤为热烈,展现了现代科技与传统地质学的深度融合与创新应用。

作为本次会议承办单位的中国石油大学(北京)克拉玛依校区,为所有远道而来的专家学者、积极提交论文摘要的作者、各位专题召集人和主持人提供了非常好服务。特向会务团队与学生志愿者们表示最衷心的感谢!也特别感谢各合作单位在承办过程中所给予的大力协助!

第十九届全国古地理学及沉积学大会将由云南大学古生物研究院承办。2027 年,让我们相约祖国的春城昆明,相见美丽的云南大学!

第十八届全国古地理学及沉积学学术会议组委会
2025 年 9 月