

文章编号: 1671-1505(2024)04-0911-15 DOI: 10.7605/gdxb.2024.04.062

## 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\*

黄有根<sup>1,2</sup> 许 杰<sup>3,4</sup> 郑小鹏<sup>1,2</sup> 刘 燕<sup>1,2</sup>  
钟寿康<sup>3,4</sup> 李 琳<sup>3,4</sup> 张道锋<sup>1,2</sup> 谭秀成<sup>3,4</sup>

1 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018

3 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500

4 中国石油天然气集团有限公司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

**摘 要** 下二叠统太原组灰岩在鄂尔多斯盆地中东部广泛分布, 已有多口井试气后相继获得了工业气流, 勘探潜力较大, 但目前对该组灰岩沉积微相类型与沉积模式的研究尚不够成熟。基于对鄂尔多斯盆地中东部下二叠统太原组大量钻井岩心、薄片详细描述, 综合测井资料, 从岩石类型、沉积相类型、典型沉积序列、沉积模式等方面, 深入分析了盆地中东部太原组灰岩的沉积特征与沉积过程。结果表明: 鄂尔多斯盆地中东部太原组由海相碳酸盐岩、混积岩及陆源碎屑岩 3 大类 15 小类岩石类型构成, 其中海相碳酸盐岩台地相可进一步划分为生屑滩、滩间海、潮上带(泥坪)、潮间带(泥灰坪)等 7 种沉积微相。依据地层剖面精细刻画, 共识别出海陆过渡环境下的 6 个典型序列, 其中序列 1、2、3 为海相碳酸盐岩沉积序列, 序列 4、5、6 为陆相三角洲沉积序列。综合分析认为, 鄂尔多斯盆地中东部早二叠世太原组沉积时期经历了由陆相三角洲(碎屑沉积)→海陆过渡相(混积沉积)→海相碳酸盐岩台地(碳酸盐沉积)的沉积演化, 受沉积期地貌影响, 整体具有“北砂南灰, 上覆泥煤”的沉积充填模式。研究成果不仅丰富了对鄂尔多斯盆地中东部太原组的沉积地质认识, 也为后续太原组天然气勘探提供了重要的理论依据。

**关键词** 鄂尔多斯盆地 下二叠统 灰岩 沉积特征 沉积模式

**第一作者简介** 黄有根, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油与天然气地质综合研究。  
E-mail: hyg\_cq@petrochina.com.cn。

**通讯作者简介** 谭秀成, 男, 1970 年生, 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: P618.13 文献标志码: A

## Sedimentary characteristics and sedimentary models of the Lower Permian Taiyuan Formation limestone in mid-eastern Ordos Basin

HUANG Yougen<sup>1,2</sup> XU Jie<sup>3,4</sup> ZHENG Xiaopeng<sup>1,2</sup> LIU Yan<sup>1,2</sup>  
ZHONG Shoukang<sup>3,4</sup> LI Lin<sup>3,4</sup> ZHANG Daofeng<sup>1,2</sup> TAN Xiucheng<sup>3,4</sup>

\* 中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(编号: 2020CX010300)和中国石油集团公司上游领域基础性前瞻性项目(编号: 2021DJ0501)共同资助。[Co-funded by the Science and Technology Cooperation Project of PetroChina-Southwest Petroleum University Innovation Consortium (No. 2020CX010300) and China National Petroleum Corporation Upstream Field Basic Forward-Looking Project (No. 2021DJ0501)]

收稿日期: 2024-01-31 改回日期: 2024-02-28

1 *Research institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China*

2 *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China*

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

4 *Research Branch of Southwest Petroleum University, Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC, Chengdu 610500, China*

**Abstract** The Taiyuan Formation limestone is extensively distributed in the central and eastern parts of the Ordos Basin, with successful gas flow tests conducted in several wells. It has significant exploration potential and has gained increasingly attention in recent years. However, research on the sedimentary microfacies types and sedimentary modes of Taiyuan Formation limestone in the central and eastern parts of the basin remains undeveloped. Based on a detailed analysis of numerous drilling cores, thin sections, and well logging data from the Taiyuan Formation limestone in the central and eastern parts of the basin, the sedimentary characteristics and sedimentary processes were examined, including rock types, sedimentary facies, typical sedimentary sequences and sedimentary modes. The results indicate that the rocks of Taiyuan Formation in the central and eastern parts of the Ordos Basin can be classified into three categories: marine carbonates, peperite and terrigenous clastic rocks, which can be further subdivided into 15 types. The marine carbonate platform facies can be further categorized into seven sedimentary microfacies, including clastic beach, interbeach sea, supratidal zone (mud flat) and intertidal zone (mud flat). Six typical sequences in the transition environment from land to sea were identified based on detailed characterization of strata section. Sequences 1, 2 and 3 consist of marine carbonate sedimentary sequences, and sequences 4, 5 and 6 are composed of continental delta sedimentary sequences. The comprehensive analysis indicates that the Lower Permian Taiyuan Formation in the Ordos Basin underwent sedimentary evolution from a continental delta (clastic deposits) to a marine continental transition (mixed deposits) to a marine carbonate platform (carbonate deposits). Influenced by the sedimentary landform, the overall sedimentary filling pattern is characterized by “sandstone in the north and limestone in the south, overlaid with peat”. The research findings not only enhance the understanding of the sedimentary geology of Taiyuan Formation in the central and eastern parts of the Ordos Basin, but also establish an important theoretical foundation for the subsequent exploration of natural gas in the Taiyuan Formation.

**Key words** Ordos Basin, Lower Permian, limestone, sedimentary characteristics, sedimentary model

**About the first author** HUANG Yougen, born in 1980, senior engineer, is mainly engaged in comprehensive research on oil and gas geology. E-mail: hyg\_cq@petrochina.com.cn.

**About the corresponding author** TAN Xiucheng, born in 1970, professor, is mainly engaged in researches on sedimentology and reservoir geology. E-mail: tanxiucheng70@163.com.

鄂尔多斯盆地作为中国陆上三大海相碳酸盐岩盆地之一,其内部的海相碳酸盐岩蕴藏着丰富的天然气资源(周进高等,2021;牟春国等,2023)。自20世纪80年代末期中国首个海相碳酸盐岩整装大气田(靖边气田)在该盆地发现以来,其已发展成为下古生界碳酸盐岩万亿立方米大气区。鄂尔多斯盆地早期勘探多集中在下古生界奥陶系马家沟组(熊鹰等,2016;谢康等,2020),而近年来在持续深化太原组灰岩地质研究的基础上,长庆油田

针对太原组灰岩部署的风险勘探井YT1H井已获得 $54.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,并发现了第1个太原组灰岩气田——横山气田(刘新社等,2023;席胜利等,2023a),由此揭示出下二叠统太原组灰岩具有较大的勘探前景。针对鄂尔多斯盆地太原组灰岩的研究工作主要集中在遗迹化石与沉积环境(胡斌等,2013;宋慧波等,2017;高青松,2018;毛亚辉,2020;郭艳琴等,2021)、层序地层划分(宋慧波等,2020;向念,2020;张月等,2023)

和储集层以及油气成藏 (Wang *et al.*, 2021; 曹晋璐等, 2022; 董国栋等, 2023; 付金华, 2023; 李妍蓉等, 2023; 席胜利等, 2023b) 等方面, 研究区域亦主要位于在盆地东缘、大牛地气田和沁水盆地等。对于鄂尔多斯盆地中东部地区下二叠统太原组灰岩的沉积特征及沉积模式, 迄今鲜有系统报道, 使得该地区仍然存在太原组沉积微相类型及分布规律不清晰等问题, 制约了下一步对有利勘探区带的评价。

鉴于此, 笔者针对鄂尔多斯盆地中东部地区, 以太原组灰岩为研究对象, 依据大量钻井岩心观察描述、岩石薄片鉴定等资料, 阐述太原组灰岩的基本沉积特征, 并结合沉积相与典型沉积序列垂向变化规律等综合分析, 提出盆地中东部太原组的沉积模式。研究成果为该区下一步太原组天然气勘探部署提供新的理论支撑, 也对深化鄂尔多斯盆地中东部太原组灰岩的油气勘探领域具有重要意义。

## 1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西侧, 是一个典型的多旋回克拉通盆地。盆地北起阴山, 南到秦岭, 东临吕梁山, 西达贺兰山, 横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 总面积约  $37 \times 10^4 \text{ km}^2$  (Xiao *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2019; 许杰等, 2022)。本次研究对象位于鄂尔多斯盆地中东部地区(下文简称为“研究区”), 即鄂尔多斯盆地天环坳陷以东的广大区域, 西侧以吴起县为界、东侧以神木市为界、南侧以延安市为界、北侧以鄂托克旗县为界。研究区整体位于陕北斜坡之上, 东部与晋西挠褶带相接, 北部与伊盟古陆相连(图 1)。早二叠世, 受到构造运动与海平面上升影响, 华北古陆海域范围开始向南西扩展, 鄂尔多斯盆地水体加深, 由构造高地演化为陆表海盆地, 华北地块亦从北高南低的古地理格局演变为北西高、南东低, 太原组就是在这种构造与沉积古地理背景下形成的一套海陆交互相沉积(宋慧波等, 2017; Peng and Guo, 2023)。

根据岩性组合与测井响应特征, 太原组可进一步细分为庙沟段、毛儿沟段、斜道段、东大窑段。庙沟段底部自本溪组 8#煤岩(测井曲线特征: 低 GR、低 DEN、高 AC)开始, 向上常发育逆粒序粉细砂岩, 中上部发育正粒序砂砾岩, 顶部发育泥岩+黑色煤岩(8#上煤), 厚度 3.5~12.5 m。毛儿沟

段下部发育逆粒序浅灰色生屑灰岩, 向上过渡为深灰色—灰黑色泥灰岩、含生屑泥晶灰岩韵律互层(眼球眼皮构造), 中部往往发育凝灰岩, 顶部常发育泥岩+7#煤岩, 厚度 7.5~14 m。斜道段以灰色生屑灰岩为主, 常发育铸模孔, 孔渗性较好, 顶部发育泥岩+6#煤岩, 厚度 8~13.5 m。东大窑段下部常为深灰色—浅灰色含生屑泥晶灰岩, 向上渐变为泥岩, 顶部至山西组砂岩(测井曲线特征: 中 GR、高 DEN、中 AC)结束, 分布范围小, 厚度 0~6 m; 受山西组分流河道下切影响, 局部地区东大窑灰岩遭受侵蚀(图 1; 图 2)。

## 2 岩石学特征

基于对研究区内 60 余口太原组取心井的岩心和铸体薄片观察与描述分析, 笔者将鄂尔多斯盆地中东部下二叠统太原组的岩石类型划分为海相碳酸盐岩、混积岩及陆源碎屑岩 3 大类。

### 2.1 碳酸盐岩

研究区太原组灰岩类型主要有泥晶灰岩、(含)生屑泥晶灰岩、颗粒灰岩(生屑灰岩)和微生物灰岩(凝块灰岩与粘结生屑灰岩)。

1) 泥晶灰岩。岩心上, 泥晶灰岩常呈灰色—深灰色均质块状产出, 断面细腻平滑, 也可见由于成岩过程中上覆压力作用而形成的缝合线(图 3-a)。镜下可见泥晶灰岩呈棕色—土黄色, 无颗粒沉积, 局部含有少量生屑颗粒, 含量小于 5%(图 3-b)。

2) (含)生屑泥晶灰岩。生屑含量 10%~50%, 碳酸盐岩泥占比大于 50%。岩心上, 呈灰色均质块状产出, 断面较粗糙, 用手触摸有细微颗粒感, 可见生屑呈斑点状分布, 缝合线发育, 发育眼球眼皮构造, 常以灰岩与泥灰岩韵律互层的形式出现(图 2; 图 3-c)。镜下多为棕色—褐色, 生物碎屑大小不一、杂乱分布于灰泥中, 被方解石胶结物和基质碳酸盐岩泥胶结, 常见的是棘皮类、腕足类等生物碎屑。

3) 生屑灰岩。宏观上呈深灰色—褐灰色块状, 逆粒序, 自然断面粗糙, 肉眼可见有孔虫等生屑颗粒轮廓, 裂缝发育(图 3-d)。镜下见大量棘皮类、有孔虫等生屑发育, 颗粒支撑(图 3-e), 生屑多呈点—线接触, 粒径 0.1~0.6 mm, 生屑颗

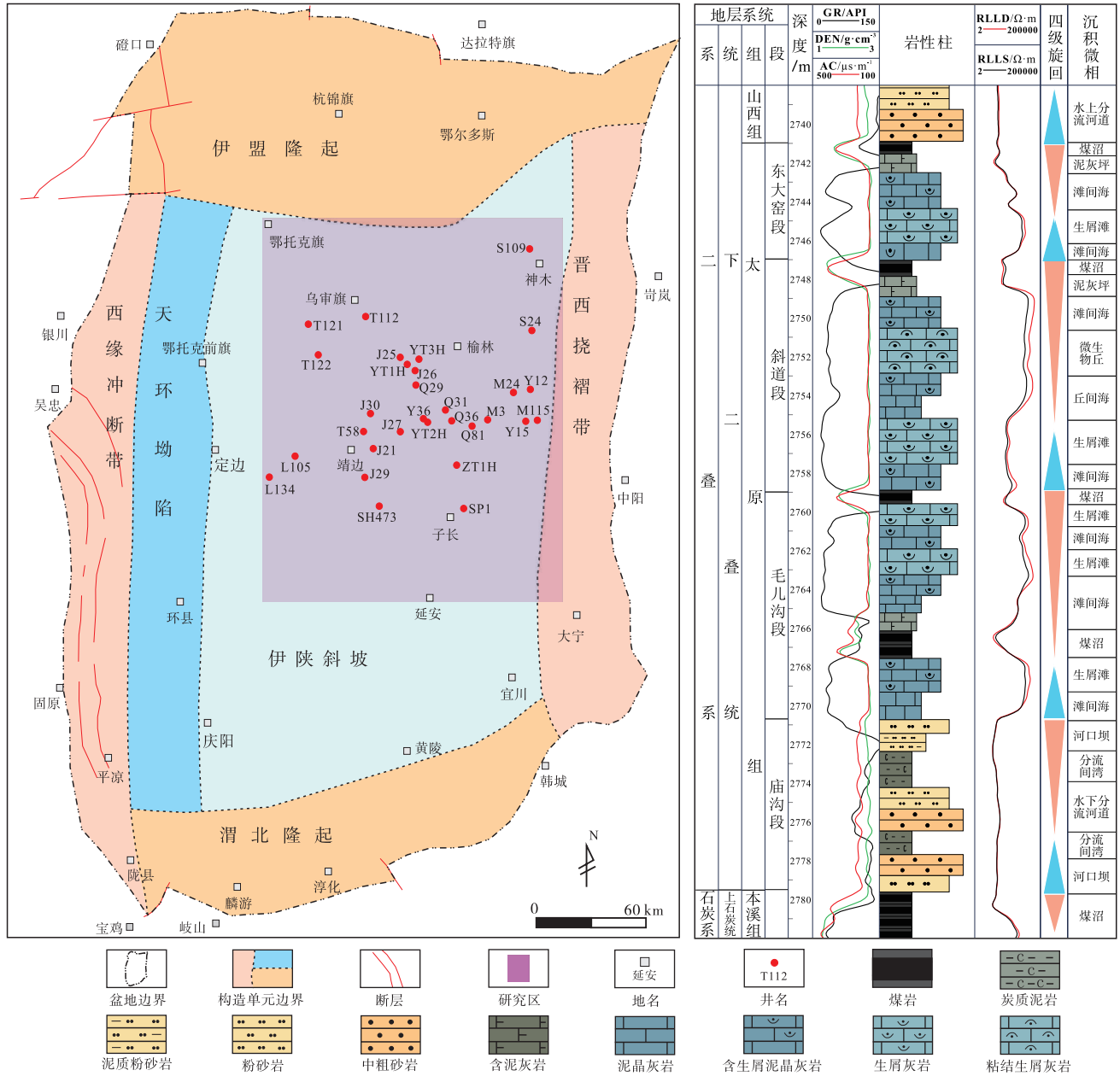


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元分布与 Q81 井太原组地层综合柱状图

Fig. 1 Structure distribution in Ordos Basin and stratigraphic comprehensive column of the Tauyuan Formation from Well Q81

粒之间主要为亮晶方解石胶结物或泥质充填(图 3-f)。该岩石类型研究区出现频率较高。

4) 微生物灰岩。岩心上常呈浅灰色—深灰色, 隐约可见具斑块状(图 3-g)。研究区太原组主要可以识别出微生物粘结生屑灰岩和微生物凝块灰岩 2 种类型。前者镜下可见各种生屑(如有孔虫、介壳等)相互粘结在一起, 生屑铸模孔发育(图 3-h); 后者镜下颜色较深部分为凝块格架, 格架边缘模糊, 明暗相间, 格架间为方解石半充填/全充填, 格架孔

发育(图 3-i)。微生物凝块灰岩厚度多为几十厘米, 规模较小, 发育频率较低。

## 2.2 混积岩

研究区内的混积岩主要是指陆源碎屑与碳酸盐岩(包括异化粒等)在沉积上的混合, 主要识别出(含灰)灰质砂岩、(含砂)砂质灰岩、(含泥)泥质灰岩、(含灰)灰质泥岩 4 种类型。(含灰)灰质砂岩中, 灰质含量较低, 小于 25%, 岩心上多见砂岩呈灰黑色块状(图 4-a), 镜下可见

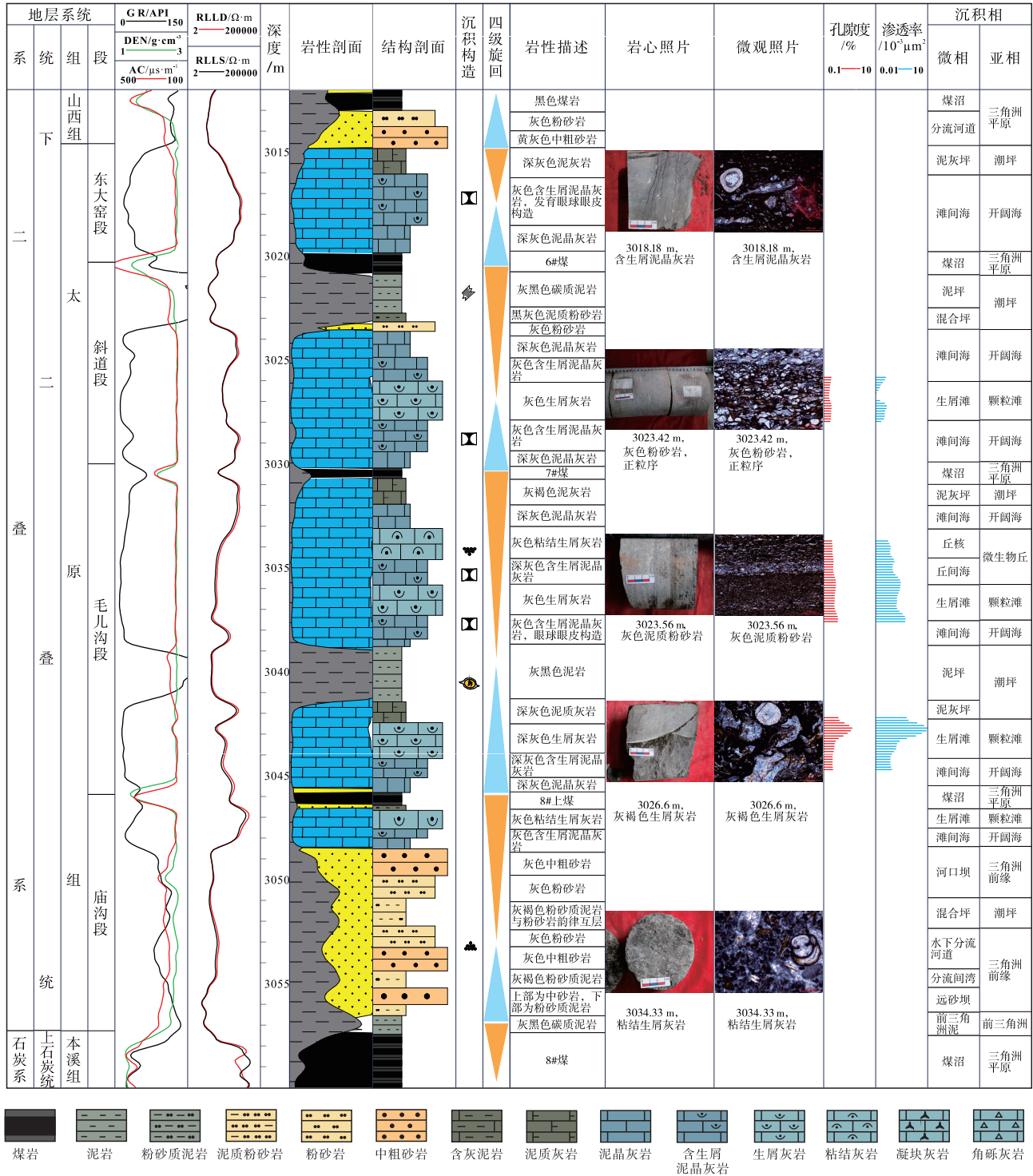
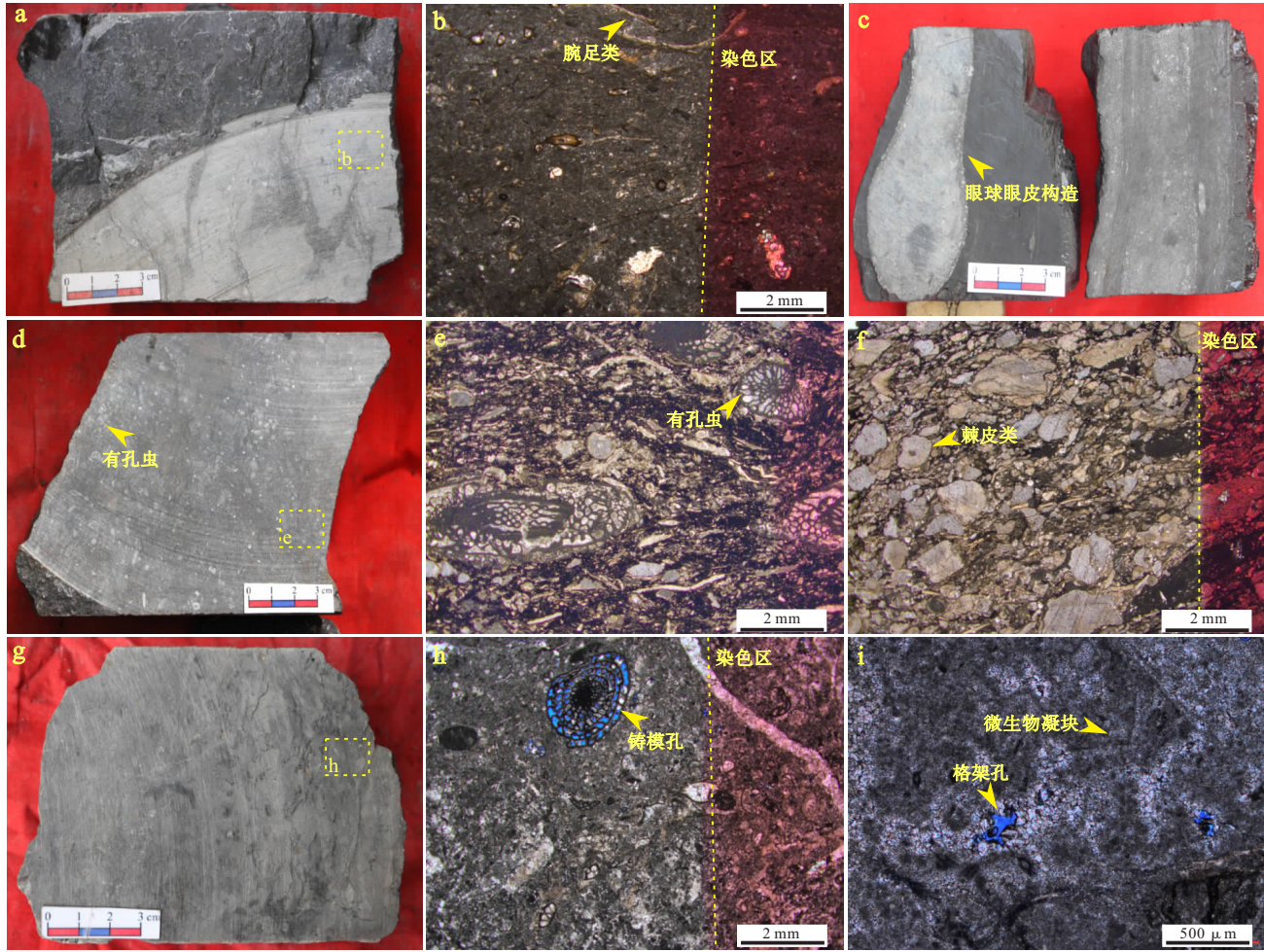


图 2 鄂尔多斯盆地中东部 YT2H 井太原组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of the Taiyuan Formation in Well YT2H, mid-eastern Ordos Basin

大多为石英颗粒，粒间充填残余灰质(图 4-b)。(含砂)砂质灰岩中，砂质含量较低，小于 25%，主要以灰岩为主，镜下石英颗粒分散分布在灰质间(图 4-c)。(含泥)泥质灰岩中，泥质含量较低，

小于 25%，岩心与镜下多见泥质条带发育，生屑颗粒之间充填泥质(图 4-d, 4-e)。(含灰)灰质泥岩中，泥岩为主要成分，镜下多见灰质残余(图 4-f)。



a—泥晶灰岩, 岩心照片, Q36 井, 2822.55 m; b—图 a 局部放大特征, 泥晶灰岩, 单偏光, Q36 井, 2822.55 m; c—含生屑泥晶灰岩, 岩心照片, J21 井, 3416.76 m; d—生屑灰岩, 岩心照片, L134 井, 4035.26 m; e—生屑灰岩, 单偏光, L134 井, 4035.26 m; f—生屑灰岩, 岩心照片, Q31 井, 2901.79 m; g—粘结生屑灰岩, 岩心照片, T58 井, 3414.16 m; h—粘结生屑灰岩, 单偏光, T58 井, 3414.16 m; i—凝块灰岩, 单偏光, Y36 井, 3035.78 m

图 3 鄂尔多斯盆地中东部太原组灰岩特征

Fig. 3 Characteristics of the Taiyuan Formation limestone in mid-eastern Ordos Basin

### 2.3 碎屑岩

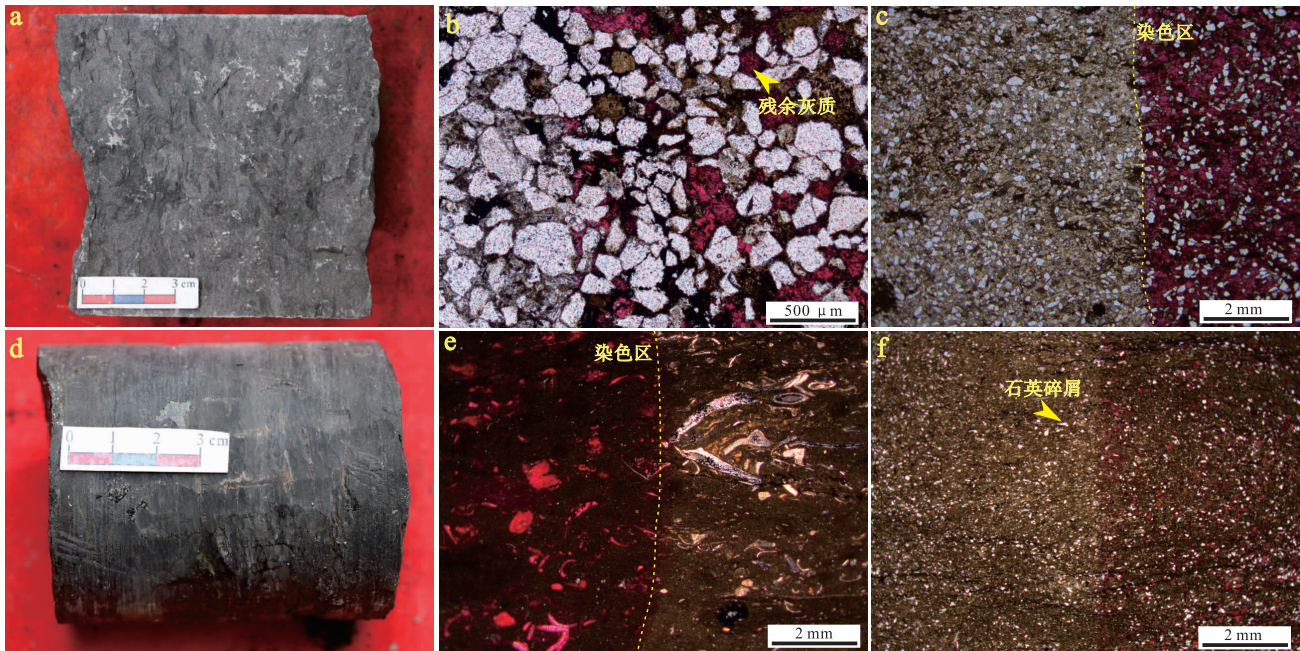
研究区可识别出的碎屑岩主要有砂岩、泥质粉砂岩、泥岩和煤岩, 其中砂岩又可分为粗砂岩、中粗砂岩和细砂岩。粗砂岩和中粗砂岩表现为岩心上多呈灰色块状, 石英颗粒具有油脂光泽, 多发育底冲刷构造(图 5-a), 镜下可见主要由石英颗粒组成, 颗粒间充填泥质及黏土矿物(图 5-b, 5-c)。泥质粉砂岩宏观岩心多发育水平纹层状泥质条带(图 5-d), 镜下主要为泥质与粉砂岩韵律互层(图 5-e)。泥岩脆性较强, 宏观上多呈黑色片状(图 5-f), 常发育黄铁矿(图 5-g), 镜下多表现为土黄色泥岩, 可见少量泥砾(图 5-h)。煤岩岩心主要

为黑色块状, 密度小, 质量轻, 局部可见炭屑(图 5-i)。

## 3 沉积学特征

### 3.1 沉积相类型及特征

太原组沉积期, 受北部伊盟古陆影响, 研究区的北部以滨浅海三角洲陆源碎屑沉积为主, 南部以海相碳酸盐岩台地沉积为主。根据实际岩心和薄片观察, 将太原组划分为颗粒滩、微生物丘、潮坪、三角洲平原、三角洲前缘、前三三角洲 6 个沉积亚相, 其中海相碳酸盐岩台地进一步划分为生屑滩、滩间海、丘基(丘间海)、丘核、开阔海、潮间带



a—灰质砂岩，岩心照片，Y12 井，1936.38 m；b—灰质砂岩，单偏光，J26 井，3078.95 m；c—砂质灰岩，Y15 井，2109.70 m；d—泥质灰岩，岩心照片，S24 井，2018.80 m；e—泥质灰岩，单偏光，M3 井，2332.3 m；f—灰质泥岩，单偏光，M24 井，2282.26 m

图 4 鄂尔多斯盆地中东部太原组混积岩特征

Fig. 4 Characteristics of mixed sedimentary rocks of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

(泥灰坪)、潮上带(泥坪)等 7 种沉积微相(表 1)。

1) 开阔海(滩间海、丘间海)。通常指海水循环较好、盐度基本正常的浅海，其水体能量一般较低，岩石类型以泥晶灰岩和含生屑泥晶灰岩(图 3-a, 3-b) 为主，颗粒含量较少，岩石多呈灰色、深灰色，中厚层至块状，区内多以块状、眼球眼皮灰岩的形式呈现(图 3-c)。沉积构造包括生物扰动构造，缺乏层理构造，此外，盆地东缘露头剖面常发育丘状交错层理，偶尔可见部分风暴碎屑夹于正常的碳酸盐岩沉积之中(郭艳琴等，2021；宋慧波等，2023)。自然伽马曲线多为低幅度箱形(图 1；图 2)。

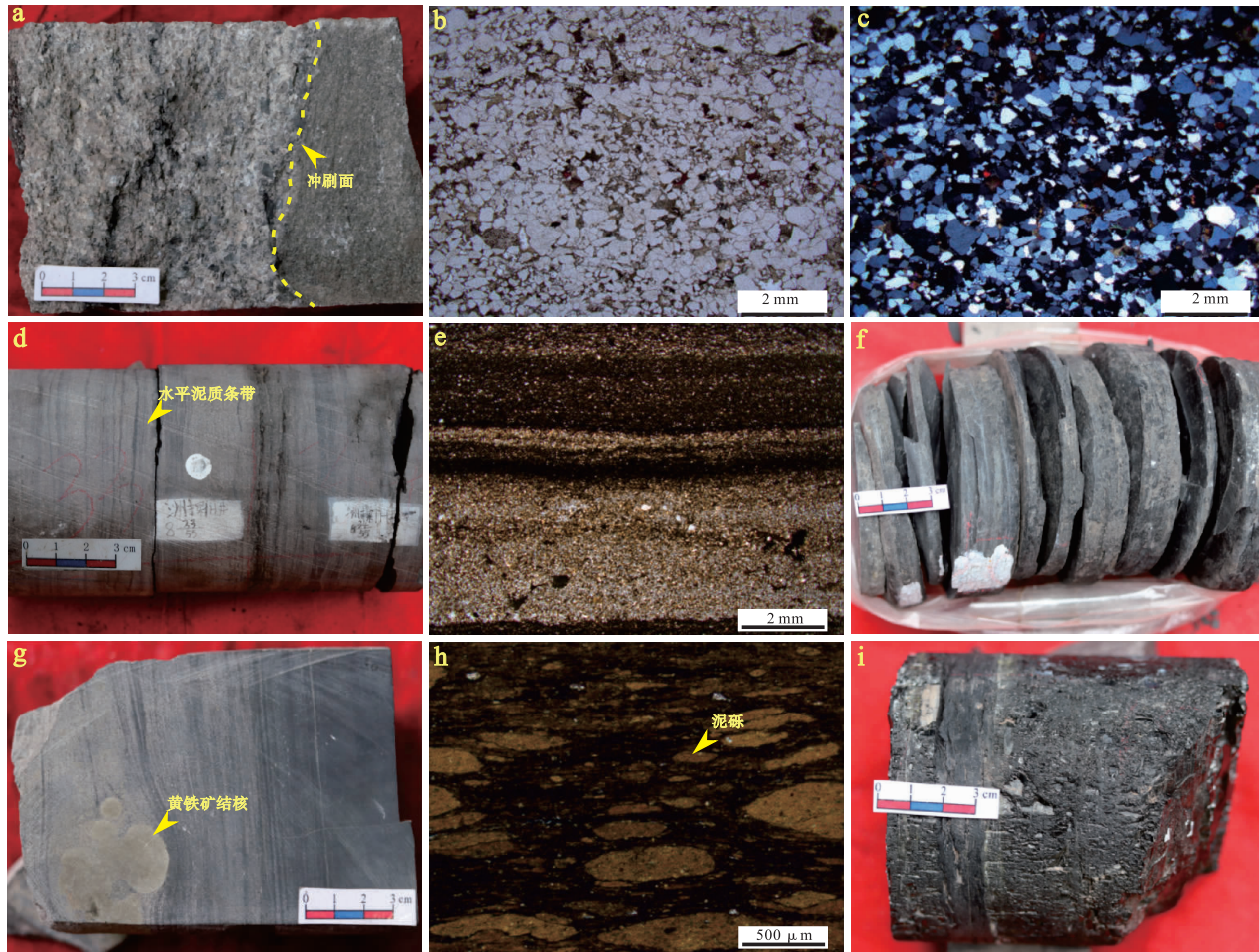
2) 颗粒滩。区内颗粒滩类型主要为生屑滩，多发育于局部微地貌高地，常位于浪基面附近或之上，沉积水体能量较高，为有孔虫、棘皮类、腕足类等生物碎屑原地堆积而成。岩石类型主要为灰色—灰褐色块状生屑灰岩和含泥生屑灰岩(图 3-d)，生屑颗粒间被泥质或不溶残余物充填(图 3-e)，垂向上常以下细上粗(逆粒序)的形式出现。自然伽马曲线多表现为低幅箱形或中低幅度漏斗形(图 1；图 2)。

3) 微生物丘。是指由蓝细菌等微生物通过物

理化学作用沉淀灰泥并固结成岩而形成的碳酸盐岩建造((Flügel, 2010；席胜利等，2017)。研究区内多表现为台地内部正常浪基面至平均低潮线之间的主要由微生物建造形成的丘状碳酸盐岩建隆。岩石类型主要以深灰色—灰褐色微生物凝块灰岩和粘结生屑灰岩(图 3-g) 为主，多发育微生物格架，格架孔发育(图 3-i)，逆粒序。自然伽马曲线常呈中低幅度漏斗形(图 1；图 2)。

4) 潮坪。通常处于台地内部平均低潮线至平均高潮线这一区间，研究区内主要发育潮间带和潮上带。潮间带至潮上带波浪作用较弱，多受潮汐作用控制，向上部碳酸盐矿物含量减少，植被逐渐发育。岩石类型以含生屑泥灰岩(图 4-d, 4-e) 和碳质泥岩为主，常见泥灰混杂、碳屑和铁质结核(图 5-g)。自然伽马曲线呈低幅度线形、齿形(图 1；图 2)。

5) 三角洲平原。区内以水上分流河道和堤岸沉积为主，部分地区沼泽化。水上分流河道和堤岸的主要岩石类型为砾岩、砂岩、粉砂岩和粉砂质泥岩，沼泽以碳质泥岩和黑色煤岩为主，常见的沉积构造包括板状交错层理、冲刷—充填构造(图 5-a)、正粒序、铁质结核(图 5-g) 等。水上分流河



a—砾岩/粗砂岩，岩心照片，S109 井，2068.59 m；b—中粗砂岩，单偏光，T121 井，2473.22 m；c—中粗砂岩，正交偏光，T121 井，2473.22 m；d—泥质粉砂岩，岩心照片，ZT1H 井，2520.49 m；e—泥质粉砂岩，单偏光，J26 井，3086.54 m；f—泥岩，岩心照片，SP1 井，2566.83 m；g—泥岩，岩心照片，Y36 井，3034.29 m；h—泥岩，单偏光，M115 井，2055.10 m；i—煤岩，岩心照片，SP1 井，2561.15 m

图 5 鄂尔多斯盆地中东部太原组碎屑岩特征

Fig. 5 Characteristics of elastic rocks of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地中东部太原组沉积相划分

Table 1 Division of sedimentary facies units of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

沉积相类型	亚相	微相	发育岩性	相标志	测井相
碳酸盐岩台地相	颗粒滩	生屑滩、滩间海	灰色含泥生屑质灰岩、生屑灰岩	下细上粗(逆粒序)	低幅箱形、中低幅漏斗形
	微生物丘	丘基(丘间海)、丘核	深灰色凝块灰岩、粘结生屑灰岩	微生物格架、格架孔	低幅箱形、中低幅漏斗形
	开阔海		深灰色泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩	块状、眼球眼皮构造	低幅箱形
	潮坪	潮间带(泥灰坪)、潮上带(泥坪)	深灰色泥灰岩、灰黑色泥岩	泥灰混杂、碳屑、铁质结核	低幅线形、齿形
三角洲相	三角洲平原	水上分流河道、堤岸、沼泽	黄灰色砾岩、灰色砂岩、泥灰黑色岩、黑色煤岩	底冲刷面、下粗上细(正粒序)、碳屑、铁质结核、板状交错层理	中幅箱形、中低幅齿形
	三角洲前缘	水下分流河道、分流间湾、远砂坝	灰白色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	正粒序、逆粒序、波状交错层理	中幅箱形、钟形、低幅线形、中幅漏斗形
	前三角洲	前三角洲泥	灰黑色粉砂质泥岩、泥岩	水平层理	低幅线形

道自然伽马曲线呈中幅度箱形、钟形,堤岸自然伽马曲线呈中低幅度齿形(图1;图2)。

6) 三角洲前缘。以水下分流河道、分流间湾和远砂坝沉积为主。水下分流河道和分流间湾为水上分流河道的水下延伸部分,以中粗砂岩、粉砂岩和泥岩为主(图5-d, 5-e) (侯明才等, 2011)。远砂坝位于三角洲前缘以外,以波浪作用为主,由砂体卸载堆积而成,垂向上常以下细上粗的形式出现,岩石类型主要以泥岩、泥质粉砂岩、细粉砂岩、钙质粉砂岩(图4-a, 4-b)为主,沉积构造包括波状交错层理、脉状层理、逆粒序等。水下分流河道自然伽马曲线多呈中幅度钟形,分流间湾呈低幅线形,远砂坝则呈中幅漏斗形(图1;图2)。

7) 前三角洲。大部分沉积物是形成于浪基面之下,基本上不受波浪影响。沉积物主要为黑色泥岩(图5-f)和粉砂质泥岩,常富含有机质,发育水平层理。自然伽马曲线常呈中低幅度线形(图1;图2)。

### 3.2 典型沉积序列特征

通过对鄂尔多斯盆地中东部太原组大量岩心的宏微观特征精细观察与描述发现,研究区内多种岩石类型构成了类型丰富的多种向上变浅沉积序列。结合沉积相分析,在太原组内识别出6种不同类型的典型沉积序列。

1) 序列1: 开阔海—生屑滩。岩性构成由下至上依次为: 含生屑泥灰岩→泥晶灰岩→含生屑泥晶灰岩→泥灰岩→含生屑泥晶灰岩→生屑灰岩(图6-a)。序列底部为灰黑色薄层含生屑泥灰岩,厚度0.15 m; 中下部由深灰色泥晶灰岩演变为中层状发育眼球眼皮构造的含生屑泥晶灰岩,厚度1.92 m; 向上为薄层泥灰岩,与下伏含生屑泥晶灰岩构成不平整的岩性突变面; 中上部由含生屑泥晶灰岩(厚度0.75 m) 向生屑灰岩转变; 顶部见暴露面,暴露面之下为灰褐色生屑灰岩,厚度0.68 m; 之上为灰色泥晶灰岩(图6-a)。结合沉积相分析(表1),认为其构成开阔海—生屑滩的典型沉积序列。

2) 序列2: 生屑滩—微生物丘。以发育生屑滩与微生物丘叠置为特征,由下至上依次由深灰色含生屑泥晶灰岩→灰褐色生屑灰岩→灰色含生屑泥晶灰岩→灰褐色粘结生屑灰岩。序列底部为深灰色块状含生屑泥晶灰岩,厚度0.36 m; 向上生屑含

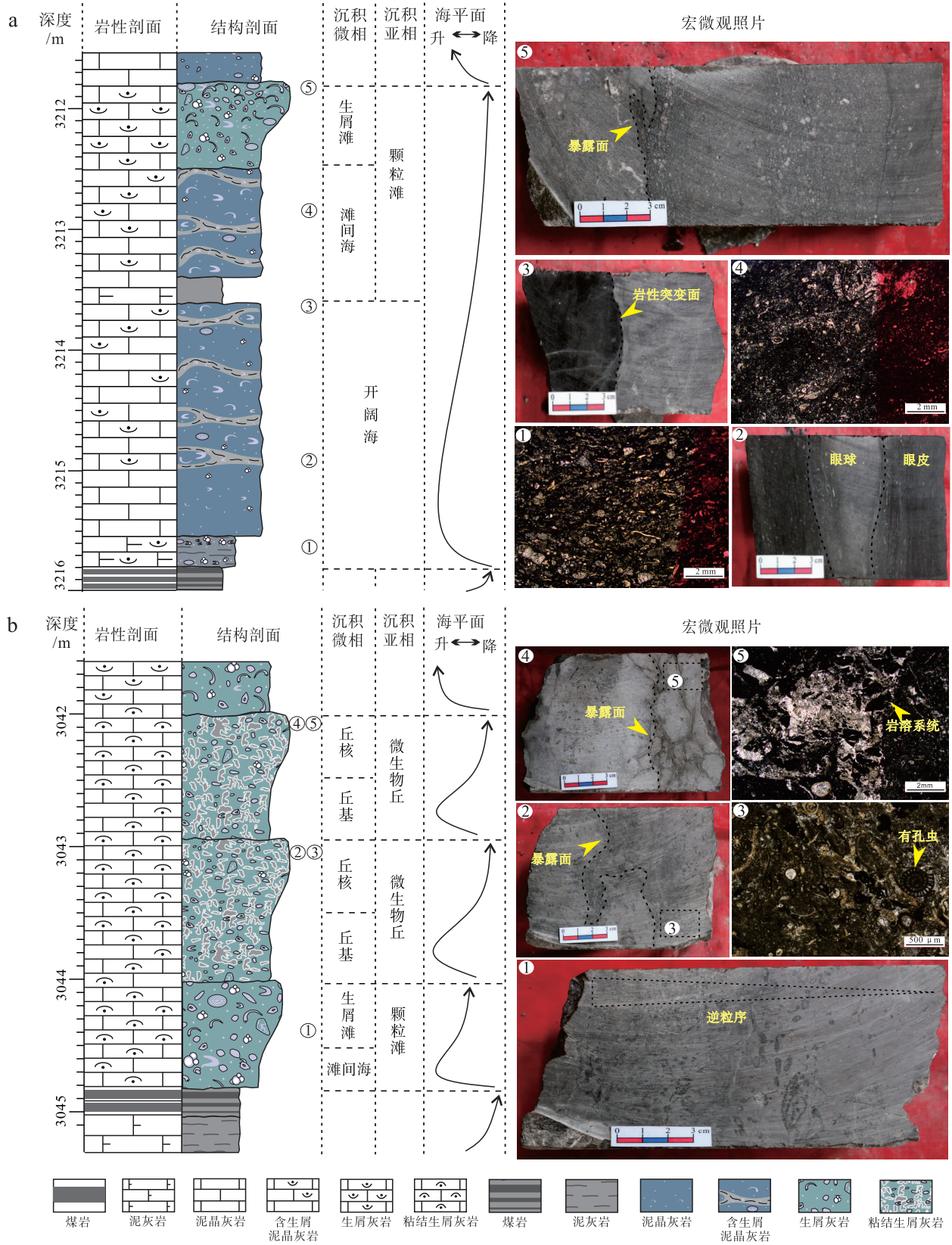
量逐渐增多,演变为灰褐色生屑灰岩,厚度0.44 m,逆粒序; 序列中部和上部发育2套微生物灰岩,均表现为下部含生屑泥晶灰岩、上部灰褐色粘结生屑灰岩,厚度分别为0.90 m和0.85 m; 微生物灰岩顶部常见不规则暴露面,具有近原地角砾化特征(图6-b)。结合沉积相分析(表1),认为其构成生屑滩—微生物丘的典型沉积序列。

3) 序列3: 开阔海—泥灰坪—泥坪—煤沼。岩性构成较为复杂,依次为灰色含生屑泥晶灰岩→灰黑色泥灰岩→灰黑色泥岩→黑色煤岩。序列底部为灰色块状含生屑泥晶灰岩,厚度0.37 m; 中下部为灰黑色泥灰岩,局部可见少量生屑,厚度0.58 m; 向上泥质含量增多,灰质含量减少,逐渐过渡为灰黑色含碳屑泥岩,厚度0.50 m; 序列顶部为一套黑色煤岩,厚度0.33 m(图7-a)。结合沉积相分析(表1),认为其构成开阔海—泥灰坪—泥坪—煤沼的典型沉积序列。

4) 序列4: 分流间湾—远砂坝。一般单个序列厚度较小,垂向岩性组合为灰黑色粉砂质泥岩→灰色粉砂岩→灰色中粗砂岩。序列下部主要由黑色泥岩与灰黑色粉砂质泥岩韵律互层构成,厚度0.35 m; 序列中部为灰色含泥粉砂岩,厚度0.32 m; 向上泥质含量减少,颗粒粒径逐渐增大,变为灰色中粗砂岩沉积,逆粒序,厚度0.34 m(图7-b)。结合沉积相分析(表1),认为其构成分流间湾—远砂坝的典型沉积序列。

5) 序列5: 分流河道—堤岸—泥沼—煤沼。由下至上岩性依次为: 灰色中粗砂岩→灰色粉砂岩→灰黑色泥质粉砂岩→黑色泥岩→黑色煤岩。序列下部为厚层灰色含岩屑中粗砂岩,常见低冲刷面,厚度1.71 m; 向上颗粒粒径减小,演变为灰色粉砂岩和灰黑色泥质粉砂岩,厚度分别为0.42 m和0.27 m; 顶部由黑色泥岩与煤岩组成,厚度1.20 m(图8-a)。结合沉积相分析(表1),认为其构成分流河道—堤岸—泥沼—煤沼的典型沉积序列。

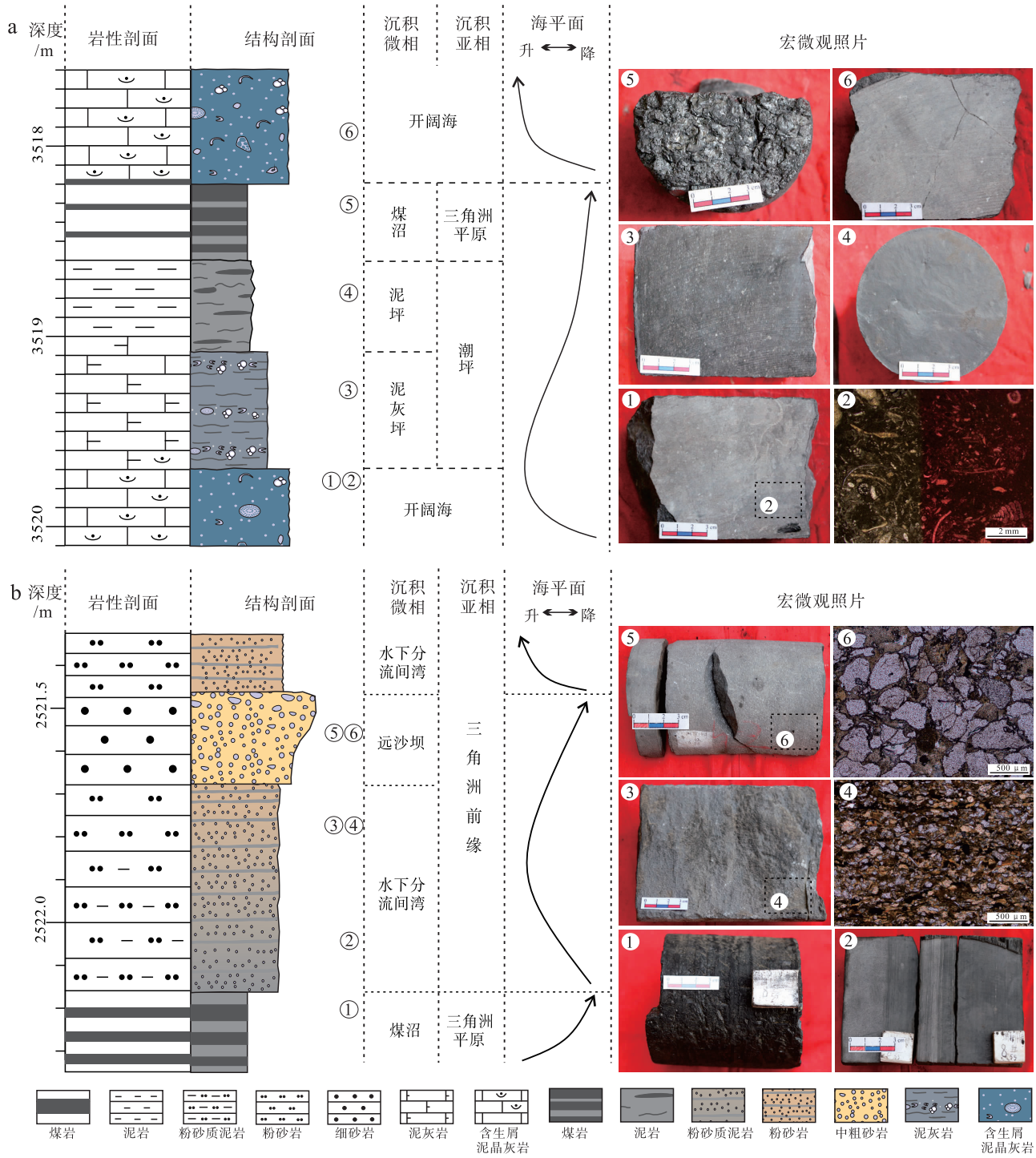
6) 序列6: 泥沼—煤沼。岩性构成最为单一,主要以煤岩发育为主。仅底部发育薄层黑色泥岩,常见植物化石,厚度0.05~0.21 m; 向上演变为块状中厚层黑色煤岩,厚度0.35~1.46 m(图8-b)。结合沉积相分析(表1),认为其构成泥沼—煤沼的典型沉积序列。



a—典型沉积序列 1 (J30 井, 3211.80~3215.60 m); b—典型沉积序列 2 (J25 井, 3042.00~3044.85 m)

图 6 鄂尔多斯盆地中东部太原组典型沉积序列类型 1 和类型 2

Fig. 6 Typical sedimentary sequence types 1 and 2 of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin



a—典型沉积序列 3 (T122 井, 3517.60~3520.08 m); b—典型沉积序列 4 (ZT1H 井, 2521.34~2522.53 m)

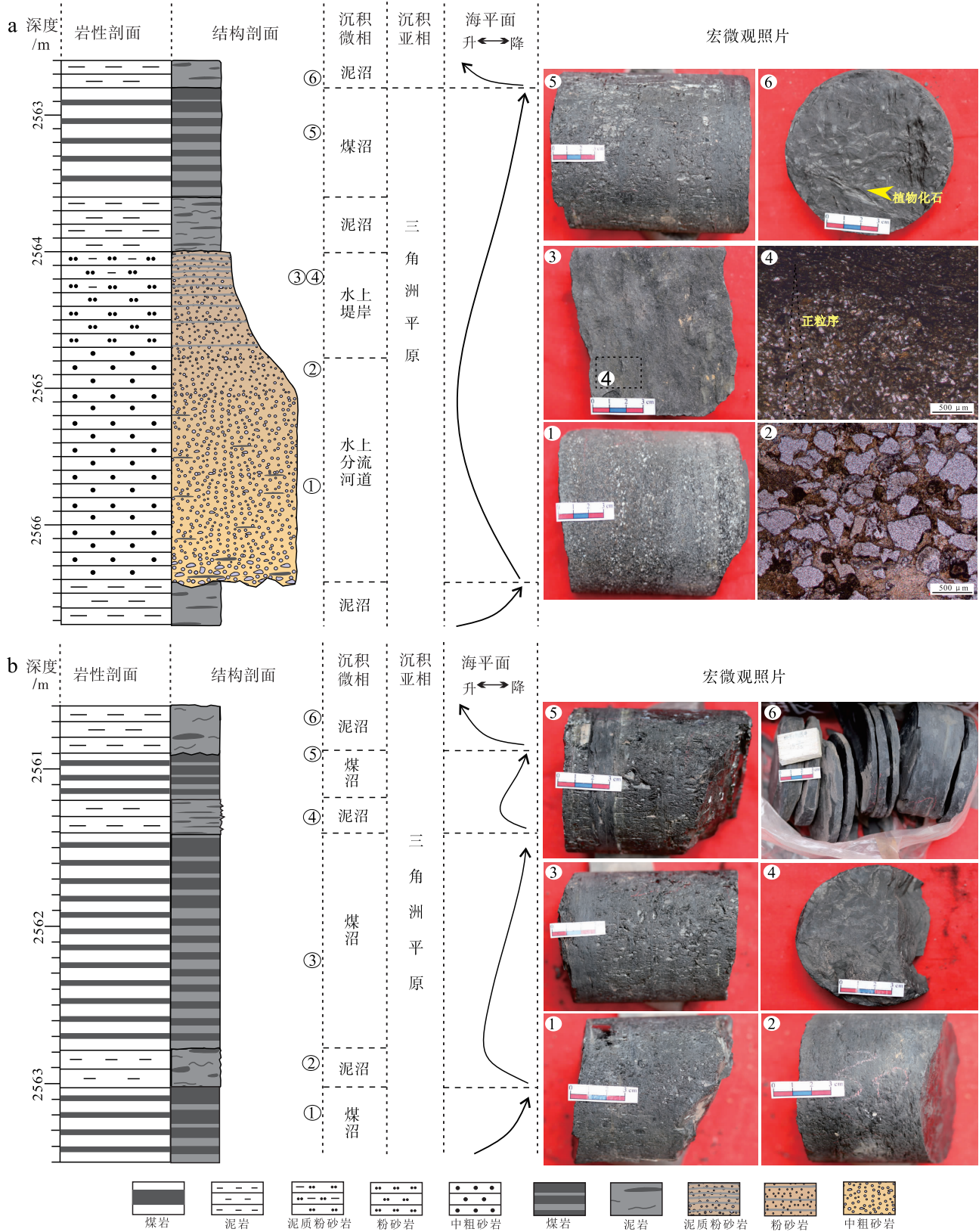
图 7 鄂尔多斯盆地中东部太原组典型沉积序列类型 3 和类型 4

Fig. 7 Typical sedimentary sequence types 3 and 4 of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

### 3.3 沉积模式

对上述岩石学特征及沉积相综合分析发现，鄂尔多斯盆地中东部下二叠统太原组经历了由陆相三

角洲（碎屑沉积）→海陆过渡相（混积）→海相碳酸盐台地（碳酸盐岩沉积）的沉积演化。太原组沉积期，沉积水体为微咸水—淡水、氧化—还原至还原的过渡环境，古气候持续温暖潮湿，是重要的成煤



a—典型沉积序列 5 (SP1 井, 2562.60~2566.90 m); b—典型沉积序列 6 (SP1 井, 2559.56~2562.50 m)

图 8 鄂尔多斯盆地中东部太原组典型沉积序列类型 5 和类型 6

Fig. 8 Typical sedimentary sequence types 5 and 6 of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

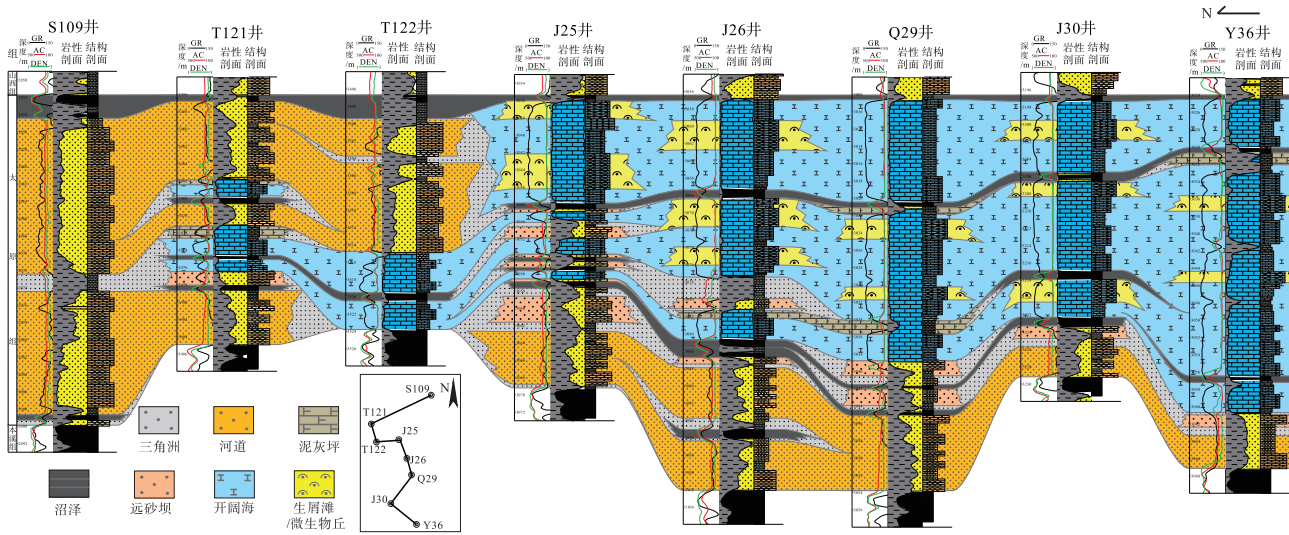


图 9 鄂尔多斯盆地中东部太原组沉积相横向对比剖面

Fig. 9 Cross section comparison of sedimentary facies of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

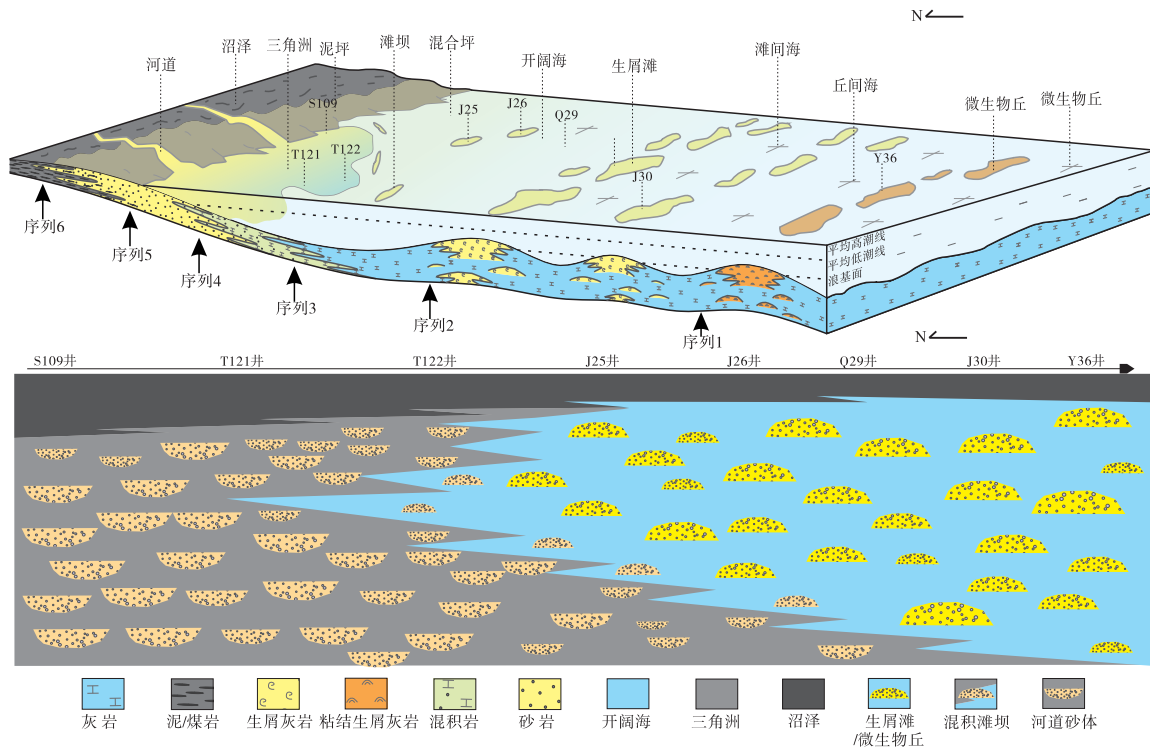


图 10 鄂尔多斯盆地中东部太原组沉积模式

Fig. 10 Sedimentary model of the Taiyuan Formation in mid-eastern Ordos Basin

期（赵剑，2021）。之后受到鄂尔多斯盆地西北部隆升和海西运动的影响，盆地东南地区的相对拗陷区域汇入来自北部高地的大量物源，在陆表海的共同作用下，研究区北部靠陆一侧，由陆向海依次发育沼泽→分流河道→泥坪→泥灰坪→远砂坝沉积；而南部向海方向，随着陆源影响逐渐减弱，开始沉

积碳酸盐岩。开阔海域等位于浪基面之下的低能环境主要沉积泥晶灰岩或含生屑泥晶灰岩，局部位于浪基面之上的微地貌高地以发育生屑灰岩和粘结生屑灰岩为主，为生屑滩/微生物丘沉积(图 9)。由此形成了一套陆相三角洲—海相碳酸盐台地混合沉积体系（台地过渡沉积体系），整体具有“北砂南

灰,上覆泥煤”的沉积充填模式(图10)。

## 4 结论

1) 鄂尔多斯盆地中东部太原组发育海相碳酸盐岩、混积岩及陆源碎屑岩3大类岩石,并可进一步细分为泥晶灰岩、(含)生屑泥晶灰岩、生屑灰岩、凝块灰岩、灰质砂岩、(含砂)砂质灰岩、(含泥)泥质灰岩、中粗砂岩、泥质粉砂岩、泥岩、煤岩等岩石类型。

2) 鄂尔多斯盆地中东部太原组发育6种不同类型的典型沉积序列,揭示了由陆向海过渡环境下,陆相三角洲主要发育沼泽、分流河道、分流间湾、远砂坝等6种沉积微相,海相碳酸盐台地发育生屑滩、滩间海、微生物丘、潮上带(泥坪)、潮间带(泥灰坪)等7种沉积微相。

3) 鄂尔多斯盆地中东部太原组经历了由陆相三角洲相向海相碳酸盐台地的沉积演化。受沉积期地貌影响,由南向北沉积环境依次表现为:开阔海→生屑滩/微生物丘→泥灰坪/远沙坝→泥坪/分流间湾→分流河道→堤岸→沼泽,整体具有“北砂南灰,上覆泥煤”的沉积充填模式。

## 参考文献 (References)

曹晋璐,刘之的,何福文,刘晓鹏,邓卫斌. 2022. 鄂尔多斯盆地中东部太原组灰岩成藏地质条件分析. 石油地质与工程, 36(2): 41-47, 53. [Cao J L, Liu Z D, He F W, Liu X P, Deng W B. 2022. Analysis of limestone reservoir forming geological conditions of Taiyuan Formation in central and eastern Ordos Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 36(2): 41-47, 53]

董国栋,刘新社,裴文超,付勋勋,曾旭,张道锋,赵小会. 2023. 鄂尔多斯盆地二叠系太原组致密灰岩储层特征及主控因素. 天然气地球科学, 34(6): 1018-1027. [Dong G D, Liu X S, Pei W C, Fu X X, Zeng X, Zhang D F, Zhao X H. 2023. Characteristics and main controlling factors of tight limestone reservoir in Taiyuan Formation of Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(6): 1018-1027]

付金华. 2023. 鄂尔多斯盆地太原组致密灰岩天然气成藏地质特征与勘探潜力. 地学前缘, 30(1): 20-29. [Fu J H. 2023. Accumulation characteristics and exploration potential of tight limestone gas in the Taiyuan Formation of the Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 20-29]

高青松. 2018. 大牛地气田石炭系太原组沉积相类型再分析. 石油地质与工程, 32(6): 1-5, 11, 116. [Gao Q S. 2018. Reanalysis of sedimentary facies types of Carboniferous Taiyuan formation in Daniudi gas field. *Petroleum Geology and Engineering*, 32(6): 1-5, 11, 116]

郭艳琴,赵灵生,郭彬程,费世祥,李文厚,张倩,袁珍,马瑶,何子琼,

李百强. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区下二叠统沉积特征. 古地理学报, 23(1): 65-80. [Guo Y Q, Zhao L S, Guo B C, Fei S X, Li W H, Zhang Q, Yuan Z, Ma Y, He Z Q, Li B Q. 2021. Sedimentary characteristics of the Lower Permian in Ordos Basin and its adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(1): 65-80]

侯明才,李旭,邓敏. 2011. 鄂尔多斯盆地环县地区三叠系长8-长6油层组沉积相特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(3): 241-248. [Hou M C, Li X, Deng M. 2011. Study on the sedimentary environment of Chang 8-6 oil-bearing formations of Yanchang Formation in Huanxian area, Ordos Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(3): 241-248]

胡斌,胡磊,宋慧波,杨连超. 2013. 晋东南上石炭统一二叠统太原组灰岩中遗迹组合及其沉积环境. 古地理学报, 15(6): 809-818. [Hu B, Hu L, Song H B, Yang L C. 2013. Lchnoassemblages and their sedimentary environments in limestone of the Upper Carboniferous-Lower Permian Taiyuan Formation, southeastern Shanxi Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(6): 809-818]

李妍蓉,李靖,苏文杰,石磊,孙睿,朱玉双. 2023. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡太原组碳酸盐岩气藏富集规律. 新疆石油地质, 44(5): 509-516. [Li Y R, Li J, Su W J, Shi L, Sun R, Zhu Y S. 2023. Natural gas enrichment in carbonate gas reservoirs of Taiyuan Formation in Yishaan slope, Ordos Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 44(5): 509-516]

刘新社,张涛,黄道军,董国栋,王康乐,付勋勋,赵小会,卢子兴,于洲,荆雪媛,张君莹. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部太原组石灰岩天然气勘探新突破及勘探方向. 天然气工业, 43(5): 1-11. [Liu X S, Zhang T, Huang D J, Dong G D, Wang K L, Fu X X, Zhao X H, Lu Z X, Yu Z, Jing X Y, Zhang J Y. 2023. New breakthrough in and direction of natural gas exploration in Taiyuan Formation limestone in the central and eastern Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 43(5): 1-11]

毛亚辉. 2020. 鄂尔多斯盆地东缘早二叠世太原组沉积特征及岩相古地理研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Mao Y H. 2020. Study on sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of Early Permian Taiyuan Formation in the eastern Ordos Basin. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]

牟春国,许杰,古永红,贾建鹏,王文雄,谭秀成. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组四段储层特征及主控因素. 石油实验地质, 45(4): 780-790. [Mou C G, Xu J, Gu Y H, Jia J P, Wang W X, Tan X C. 2023. Reservoir characteristics and main controlling factors of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in the central and eastern Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(4): 780-790]

宋慧波,毕瑜珺,胡斌. 2017. 豫西下二叠统太原组遗迹化石与古氧相的响应特征. 古地理学报, 19(4): 653-662. [Song H B, Bi Y J, Hu B. 2017. Responding characteristics between ichnofossils and palaeo-oxygen facies in the Lower Permian Taiyuan Formation of western Henan Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(4): 653-662]

- 宋慧波,黄志伟,胡斌,李娟,郑锋利,安红亮. 2020. 豫西禹州地区太原组旋回沉积与海平面变化特征. *地质学报*, 94(12): 3790-3802. [Song H B, Huang Z W, Hu B, Li J, Zheng F L, An H L. 2020. Characteristics of cyclic deposition and sea level changes of the Taiyuan Formation in Yuzhou City of western Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3790-3802]
- 宋慧波,张彬,于振锋,金毅,胡斌,牛永斌,张立军. 2023. 鄂尔多斯盆地东缘太原组风暴沉积特征及环境模式. *沉积学报*: 1-19. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.020>. [Song H B, Zhang B, Yu Z F, Jin Y, Hu B, Niu Y B, Zhang L J. 2023. Storm Deposit Characteristics and their Environmental Model in the Taiyuan Formation on the Eastern Margin of the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-19. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.020>]
- 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. *古地理学报*, 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]
- 席胜利,李明瑞,赵伟波,付勋勋,祖凯,赵小会,刘晓鹏,裴文超,高星,周国晓,陈娟萍. 2023a. 鄂尔多斯盆地横山大型气田成藏条件及勘探开发关键技术. *石油学报*, 44(6): 1015-1028. [Xi S L, Li M R, Zhao W B, Fu X X, Zu K, Zhao X H, Liu X P, Pei W C, Gao X, Zhou G X, Chen J P. 2023a. Accumulation conditions, key exploration and development technologies of large-scale Hengshan gas field in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(6): 1015-1028]
- 席胜利,刘新社,任军峰,刘刚,张才利,惠潇,赵伟波,王红伟,井向辉,董国栋,魏嘉怡,李涵. 2023b. 鄂尔多斯盆地风险勘探领域油气成藏认识新进展与勘探潜力. *中国石油勘探*, 28(3): 34-48. [Xi S L, Liu X S, Ren J F, Liu G, Zhang C L, Hui X, Zhao W B, Wang H W, Jing X H, Dong G D, Wei J Y, Li H. 2023b. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(3): 34-48]
- 向念. 2020. 鄂尔多斯盆地东缘康宁区太原组层序地层划分方案. *石化技术*, 27(3): 87, 93. [Xiang N. 2020. Sequence stratigraphic division scheme of Taiyuan Formation in Kangning District, eastern margin of Ordos Basin. *Petrochemical Industry Technology*, 27(3): 87, 93]
- 谢康,谭秀成,冯敏,王保保,钟寿康,杨梦颖,聂万才,乔占峰,曾伟. 2020. 鄂尔多斯盆地苏里格气田东区奥陶系马家沟组早成岩期岩溶及其控储效应. *石油勘探与开发*, 47(6): 1159-1173. [Xie K, Tan X C, Feng M, Wang B B, Zhong S K, Yang M Y, Nie W C, Qiao Z F, Zeng W. 2020. Eogenetic karst and its control on reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, eastern Sulige gas field, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1159-1173]
- 熊鹰,李凌,文彩霞,侯云东,肖笛,钟原,聂万才,曹剑,谭秀成. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五<sup>1+2</sup>储层特征及成因. *石油与天然气地质*, 37(5): 691-701. [Xiong Y, Li L, Wen C X, Hou Y D, Xiao D, Zhong Y, Nie W C, Cao J, Tan X C. 2016. Characteristics and genesis of Ordovician Ma5<sup>1+2</sup> sub-member reservoir in northeastern Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 691-701]
- 许杰,肖笛,苏文杰,晏巍,钟寿康,杨鸣一,杨梦颖,谭秀成. 2022. 鄂尔多斯盆地东缘奥陶系马家沟组四段豹斑状云质灰岩特征及成因: 以关家崖剖面为例. *古地理学报*, 24(2): 261-277. [Xu J, Xiao D, Su W J, Yan W, Zhong S K, Yang M Y, Yang M Y, Tan X C. 2022. Characteristics and genesis of leopard-spotted dolomitic limestone in the Member 4 of Ordovician Majiagou Formation: a case study from Guanjiaya section in eastern margin of Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 261-277]
- 张月,祝彦贺,邵龙义,王存武,朱学申,刘芬,康世龙,郑丽婧,陈思路,陈朝晖. 2023. 陆表海高分辨率层序地层格架下的聚煤模式: 以沁水盆地南部柿庄地区太原组为例. *东北石油大学学报*, 47(4): 82-94, 10. [Zhang Y, Zhu Y H, Shao L Y, Wang C W, Zhu X S, Liu F, Kang S L, Zheng L J, Chen S L, Chen Z H. 2023. Coal accumulation model of epicontinental sea in high-resolution sequence stratigraphic framework: a case study of Taiyuan Formation in southern Qinshui Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 47(4): 82-94, 10]
- 赵剑. 2021. 鄂尔多斯盆地西缘太原组沉积特征. *石化技术*, 28(10): 138-139. [Zhao J. 2021. Sedimentary characteristics of Taiyuan Formation in the western margin of Ordos Basin. *Petrochemical Industry Technology*, 28(10): 138-139]
- 周进高,席胜利,任军峰,尹陈,吴东旭,丁振纯,李维岭,刘雨昕. 2021. 鄂尔多斯盆地米脂地区奥陶系马四段沉积新认识与有利储集带. *天然气工业*, 41(12): 28-37. [Zhou J G, Xi S L, Ren J F, Yin C, Wu D X, Ding Z C, Li W L, Liu Y X. 2021. New understanding of the sedimentation of the 4<sup>th</sup> Member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin and its favorable reservoir facies belts. *Natural Gas Industry*, 41(12): 28-37]
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Beilin, Heidelberg: Springer Verlag, 1-976.
- Peng Y X, Guo S B. 2023. Lithofacies analysis and paleosedimentary evolution of Taiyuan Formation in Southern North China Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 220: 111127.
- Wang H, Zhang L, Zhao Q, Qiu Z, Liu D, Zhang Q, Wang Y, Dong D. 2021. Reservoir characteristics of the Lower Permian marine-continental transitional shales: example from the Shanxi Formation and Taiyuan Formation in the Ordos Basin. *Geofluids*, 2021: 9373948.
- Xiao D, Tan X C, Zhang D F, He W, Li L, Shi Y H, Chen J P, Cao J. 2019. Discovery of syngenetic and eogenetic karsts in the Middle Ordovician gypsum-bearing dolomites of the eastern Ordos Basin (central China) and their heterogeneous impact on reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 99: 190-207.
- Xiong Y, Tan X C, Zuo Z F, Zou G L, Liu M J, Liu Y, Liu L, Xiao D, Zhang J. 2019. Middle Ordovician multi-stage penecontemporaneous karstification in North China: implications for reservoir genesis and sea level fluctuations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 183: 103969.