

河西走廊叠合盆地砂岩储集层成岩演化及控储因素： 以雅布赖盆地侏罗系新河组为例*

冯双奇¹ 季汉成¹ 陈亮² 蒋雪桂³
向鹏飞⁴ 史燕青¹ 刘颖⁵ 李玲⁵

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

3 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011

4 中国石化新星(北京)新能源研究院有限公司, 北京 100083

5 中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552

摘要 河西走廊地区中生代叠合盆地构造演化复杂, 沉积体系多变, 地层经历了多期埋藏和构造抬升, 储集层成岩蚀变多样、非均质性强, 因此研究储集层成岩演化特征及相关的沉积—成岩控储作用对油气勘探至关重要。综合岩心观察描述、岩石薄片鉴定和电子扫描显微镜观察、地球化学测试等分析手段, 明确了雅布赖盆地中侏罗统新河组下段的储集层成岩特征以及成岩演化序列, 深入分析了沉积—成岩对储集层质量的控制。研究表明: 目的层主要发育辫状河三角洲前缘和重力流沉积, 以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主。相带、埋藏成岩作用及构造抬升相关的溶蚀改造的时空特征, 共同决定了储集层的孔隙空间类型及物性差异。具体而言, 中厚层辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体经历了显著的溶蚀作用, 但溶蚀孔隙内次生成岩矿物较少, 孔隙连通性好, 普遍为低孔中渗储集层; 中—薄层河口坝和半深湖—深湖重力流水道砂体具有较高的长石、岩屑含量以及较多的泥质塑性杂基, 溶蚀孔内充填大量钠长石/硅质胶结物和黏土矿物, 导致该类型储集层普遍具有低孔低渗的特点。

关键词 叠合盆地 沉积相带 储集层 主控因素 雅布赖盆地 河西走廊

第一作者简介 冯双奇, 男, 1994年生, 中国石油大学(北京)博士研究生, 主要从事储层地质学研究。
E-mail: feng868919@163.com。

通讯作者简介 季汉成, 男, 1966年生, 中国石油大学(北京)教授, 博士生导师, 主要从事沉积学、储层地质学等研究。E-mail: jhch@cup.edu.cn。

中图分类号: TE122 文献标志码: A

Diagenetic evolutions and controlling factors on sandstone reservoir in superimposed basin, Hexi Corridor: insights from the Jurassic Xinhe Formation of Yabrai Basin

FENG Shuangqi¹ JI Hancheng¹ CHEN Liang² JIANG Xuegui³

* 国家重点研发计划项目(编号: 2019YFB1504101)、中国石油科技创新基金(编号: 2021D002-0102)和中国石油大学(北京)科研启动基金(编号: 2462023BJR011)联合资助。[Co-funded by State's Key Project of Research and Development Plan (No. 2019YFB1504101), Science and Technology Innovation Foundation of China Petroleum (No. 2021D002-0102) and Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462023BJR011)]

收稿日期: 2024-12-11 改回日期: 2025-01-19

XIANG Pengfei⁴ SHI Yanqing¹ LIU Ying⁵ LI Ling⁵

¹ College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

² College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

³ Northwest Oilfield Company, Sinopec, Urumqi 830011, China

⁴ New Energy Research Institute of Sinopec Star Co., LTD, Beijing 100083, China

⁵ Exploration and Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Renqiu 062552, China

Abstract The Mesozoic superimposed basin in the Hexi Corridor is characterized by complex tectonic evolutions and variable sedimentary systems. The stratigraphy of these hydrocarbon-bearing basins has undergone multiple phases of burial and tectonic uplift, and hydrocarbon reservoirs exhibit diverse diagenetic alterations and strong heterogeneity. Therefore, the study of reservoir diagenetic characteristics and the associated sedimentary and diagenetic controls is essential for the successful exploration of oil and gas fields. This study focuses on the diagenetic mineralogical characteristics and evolution of the Middle Jurassic Lower Xinhe Formation, based on a range of analytical techniques, including optical microscopy, scanning electron microscopy, and geochemical tests. Moreover, the impacts of sedimentary and diagenetic characteristics on reservoir quality are investigated. The study demonstrates that the target layers are characterized by braided delta front and gravity flow deposit, which are dominated by arkoses and lithic arkoses. The variations in pore space types and physical properties of sandstone reservoirs are determined by the combined influence of microfacies, burial diagenetic alterations and uplift-related dissolution. In detail, the medium- to thick-bedded sandstones of subaqueous distributary channel facies at the delta front are characterized by strong dissolution modification and limited secondary authigenic precipitations. These reservoirs typically exhibit low porosity and medium permeability. The medium-to thin-bedded sandstones of gravity flow channel and mouth bar facies are characterized by a considerable quantity of detrital feldspar and fragments, as well as high content of ductile clay-rich matrix. Furthermore, the dissolution pores are filled by abundant authigenic albite, silica cements and clay minerals. Consequently, the sandstones exhibit tight reservoir characteristics, with low porosity and low permeability.

Key words superimposed basin, sedimentary facies, reservoirs, controlling factors, Yabrai Basin, Hexi Corridor

About the first author FENG Shuangqi, born in 1994, is a Ph.D. candidate of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in reservoir geology. E-mail: feng868919@163.com.

About the corresponding author JI Hancheng, born in 1966, is a professor and Ph.D. supervisor at China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology. E-mail: jhch@cup.edu.cn.

储集层物性是沉积、成岩等多种因素共同作用的结果 (Worden and Burley, 2003)。层序通过控制沉积砂体的空间展布和早成岩作用影响储集层质量 (Morad *et al.*, 2010)。不同沉积相带内的碎屑颗粒结构 (大小、分选等) 和砂体几何形态迥异, 造成了沉积砂体的原始孔、渗差异显著 (Armitage *et al.*, 2010)。压实、胶结和溶蚀、重结晶等一系列成岩作用控制了埋藏后储集层成岩演化及成岩矿

物类型 (Maast *et al.*, 2011; 罗静兰等, 2020)。而埋藏后的成岩作用又和层序、沉积相带类型、埋藏热史演化等密切相关 (操应长等, 2018)。

河西走廊中生代叠合盆地构造演化复杂, 发育的沉积体系具有物源多样、规模小、空间变化大的特点; 加之, 油气储集层经历的埋藏—热史和成岩作用复杂多样, 非均质性强, 致密—常规储集层常见。因此, 深入研究储集层成岩演化及开展沉积—

成岩控储分析是高效勘探开发河西走廊中生代叠合型含油气盆地的关键。

雅布赖盆地属于河西走廊中段的中生代叠合盆地群之一，盆地整体勘探程度低（黄军平等，2015；杨波等，2018）。前期勘探明确盆地油气资源丰富，其中，小湖次凹北斜坡受后期构造破坏弱，中侏罗统地层一岩性圈闭保存好，是目前的潜在勘探区。前人的研究主要侧重于雅布赖盆地的构造演化、沉积特征和储集层的表征评价方面，但关于主要含油层系中侏罗统新河组下段一亚段的储集层成岩作用及成因机理的研究较少（石英涛等，2015；吴晓智等，2015）。因此，综合利用钻井取心、测井、岩石薄片、地化测试等资料，研究了雅布赖盆地小湖次凹北斜坡新河组下段一亚段沉积相带类型，分析了储集层成岩矿物及成岩演化，综合沉积—成岩作用深入讨论了优质储集层发育的主控因素，以为雅布赖盆地地下步勘探开发提供理论支撑，也可为河西走廊中生代盆地群的油气储集层研究提供参考。

1 地质概况

雅布赖盆地是中生代多旋回叠合盆地（冯益民和吴汉泉，1992；杨波等，2018）。盆地构造背景复杂，经历了多期构造断陷沉降和挤压隆升。早中侏罗世，南部北大山边界正断层强烈活动塑造了雅布赖盆地“南断北超”的格局。晚侏罗世末期，受区域挤压构造背景影响，盆地北部发生大规模抬升，部分中—下侏罗统遭受了剥蚀。早白垩世，盆地整体又处于伸展构造背景，沿着北部北大山发生了强烈沉降，堆积了厚层的白垩系，从而塑造了盆地中生界“跷跷板式”的地层样式（陈发景和汪新文，2000；田涛等，2015a；吴晓智等，2015）。喜山运动时期，盆地南部北大山发生逆冲推覆，陡坡带及原始盆地边界不同程度地被破坏（王建国等，2021）。目前，盆地主要由东部隆起和西部拗陷 2 个一级构造单元构成（图 1）。其中东部隆起大面积出露中生界基岩。西部拗陷主要包括北部的红杉湖凹陷、南部的萨尔台凹陷和黑茨湾低凸起。其中萨尔台凹陷包括两凸起（黑沙、红刺梁）三次凹（盐场、小湖、梭托）（图 1）。小湖次凹处于萨尔台凹陷中部，其南部陡坡带受燕山、喜山期构造作用被破坏改造，北部斜坡区完整保存中侏罗统。

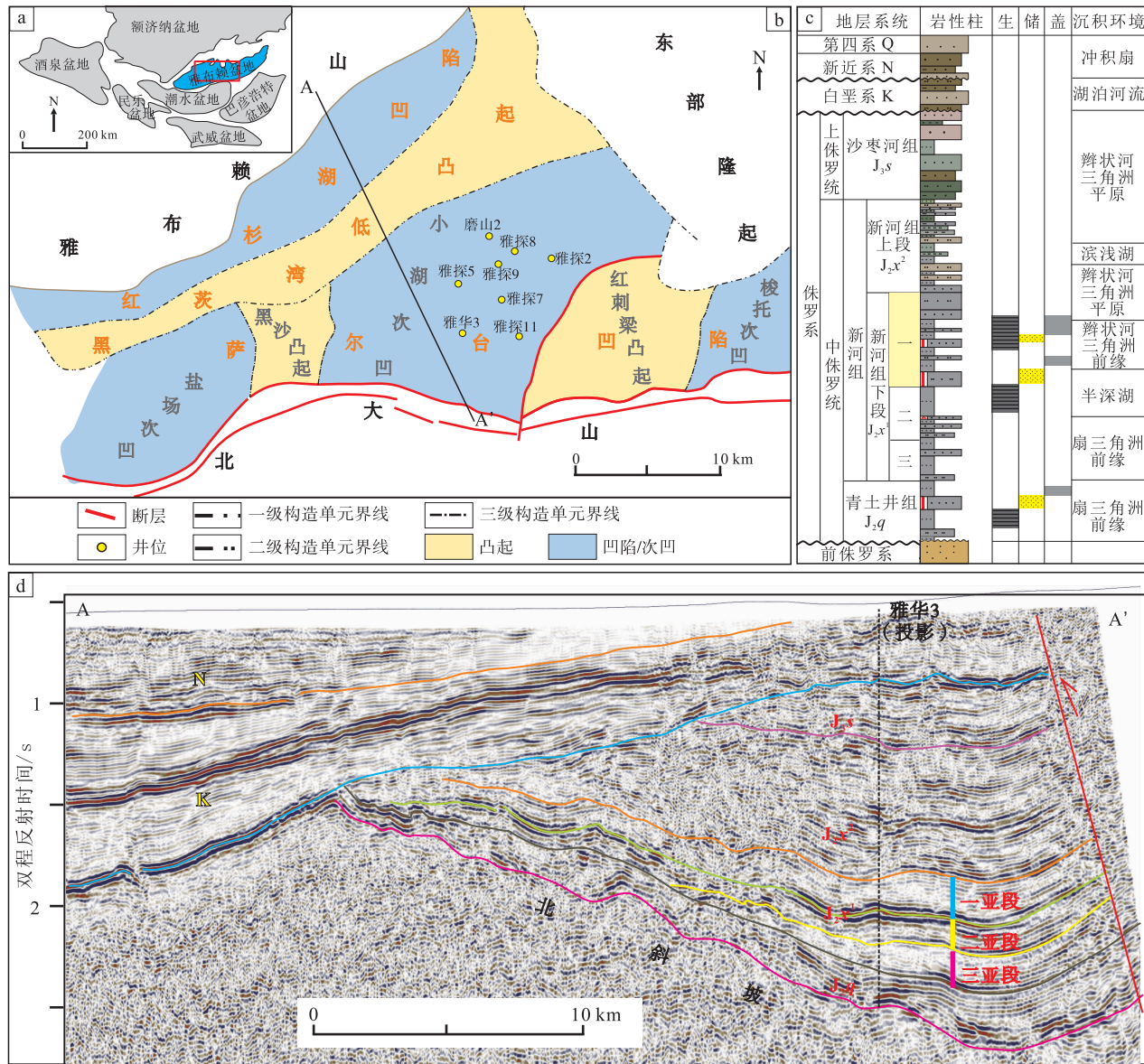
加之，中侏罗统新河组下段沉积时处于盆地主断陷期，烃源岩条件优越（都鹏燕等，2018），而且发育厚层砂岩，整体成藏条件好。热史模拟分析也显示小湖次凹存在前后 2 期油气充注，且主要以早白垩世晚期为主（田涛等，2015b）。一亚段位于新河组下段顶部，整体为湖泛后以进积为主的层系，砂体厚，侧向展布范围大。

2 沉积特征

综合前人研究成果（吴茂炳等，2007；张少敏等，2016）和区域地质背景，基于岩心、测井资料等观察分析，小湖次凹北斜坡新河组下段一亚段主要发育辫状河三角洲前缘和湖相重力流沉积。

辫状河三角洲前缘亚相主要包括水下分流河道、河口坝和分流间湾微相。水下分流河道由浅灰色中厚层、分选好、槽状交错层理和块状的中砂岩、中粗砂岩构成，常夹浅灰色、灰绿色泥岩和碳质泥岩（图 2-a），碳质泥岩可见较完整的植物碎屑；单砂体厚 8~12 m，底部存在冲刷构造及泥砾，整体呈正粒序；测井曲线 GR 呈钟状和箱状，测井综合解释为油层。河口坝砂体主要是分选较差的、小型板状交错层理发育的中细砂岩，常夹灰黑色泥岩（图 2-b）；单砂体厚 2~6 m，显示微弱反粒序的特征，顶部细粒可见顺层的炭屑等；GR 测井曲线呈现中等幅度的漏斗状，测井综合解释为差油层。分流间湾微相主要是灰色、灰绿色泥岩，发育水平层理，局部可见薄层煤层或者碳质纹层，GR 曲线呈现低幅度锯齿状（图 2-d, 2-e）。

重力流沉积包括水道、堤岸、朵叶等沉积微相。其中水道沉积主要是中层的块状中砂岩、细中砂岩，微弱正粒序，底部偶见侵蚀冲刷及黑色泥岩撕裂屑，顶底与黑色泥岩突变接触；整体上为高密度浊流形成，类似鲍马序列 Ta 段。堤岸沉积主要是中薄层（3~7 cm）中细砂岩夹薄层的泥质粉砂岩，砂体主要显示波状交错层理、平行层理，整体为高/低密度浊流成因，沉积特征类似鲍马序列 Tc, Td 段。末端朵叶沉积主要是多期低密度浊流成因的薄互层砂泥岩，显示微弱正粒序特征（细砂岩到粉砂岩渐变）的不完整鲍马序列，且薄砂层底部可见火焰状构造（图 2-c）。水道沉积 GR 曲线一般显示高幅的钟状—箱状，水道侧缘一般显示中幅的锯齿钟状，朵叶沉积主要显示叠置的指状（图 2-f）。



a—河西走廊盆地群分布图；b—雅布赖盆地构造单元；c—雅布赖盆地地层柱状图；d—雅布赖盆地小湖次凹 NW 向地震剖面图

图 1 雅布赖盆地构造单元划分 (据周晓峰等, 2020; 有修改) 及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural units of the Yabrai Basin (modified from Zhou *et al.*, 2020), and comprehensive stratigraphic column chart

3 储集层特征

3.1 岩石组分和结构

基于铸体薄片观察统计分析, 雅布赖盆地北部斜坡带主要是中粒、中细粒的长石砂岩和岩屑长石砂岩(图 3-a), 全岩矿物分析结果见图 3-b。其中碎屑石英相对含量 32%~75%, 平均 44.6%, 主要是单晶石英; 长石相对含量 23%~56.5%, 平均 45%, 主要为斜长石, 少量钾长石, 长石表面可观察到部分的绢云母化等蚀变现象; 岩屑主要是变质岩岩屑,

包括石英岩、千枚岩等, 相对含量 2%~27%, 平均 10.6%, 少量火山岩岩屑。砂岩碎屑颗粒次棱角状, 分选中等到差, 颗粒支撑为主, 整体上成熟度中等偏低。碎屑颗粒间可见少量泥质杂基 (1%~5%)、云母碎屑等, 胶结物平均含量 3%~23%。

3.2 孔渗特征

雅布赖盆地小湖次凹北斜坡带储集层非均质性强, 孔隙度 2.5%~13.7%, 平均 7.6%, 84% 的样品点孔隙度小于 10%; 空气渗透率 $0.008 \times 10^{-3} \sim 102 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 85% 的样品渗透

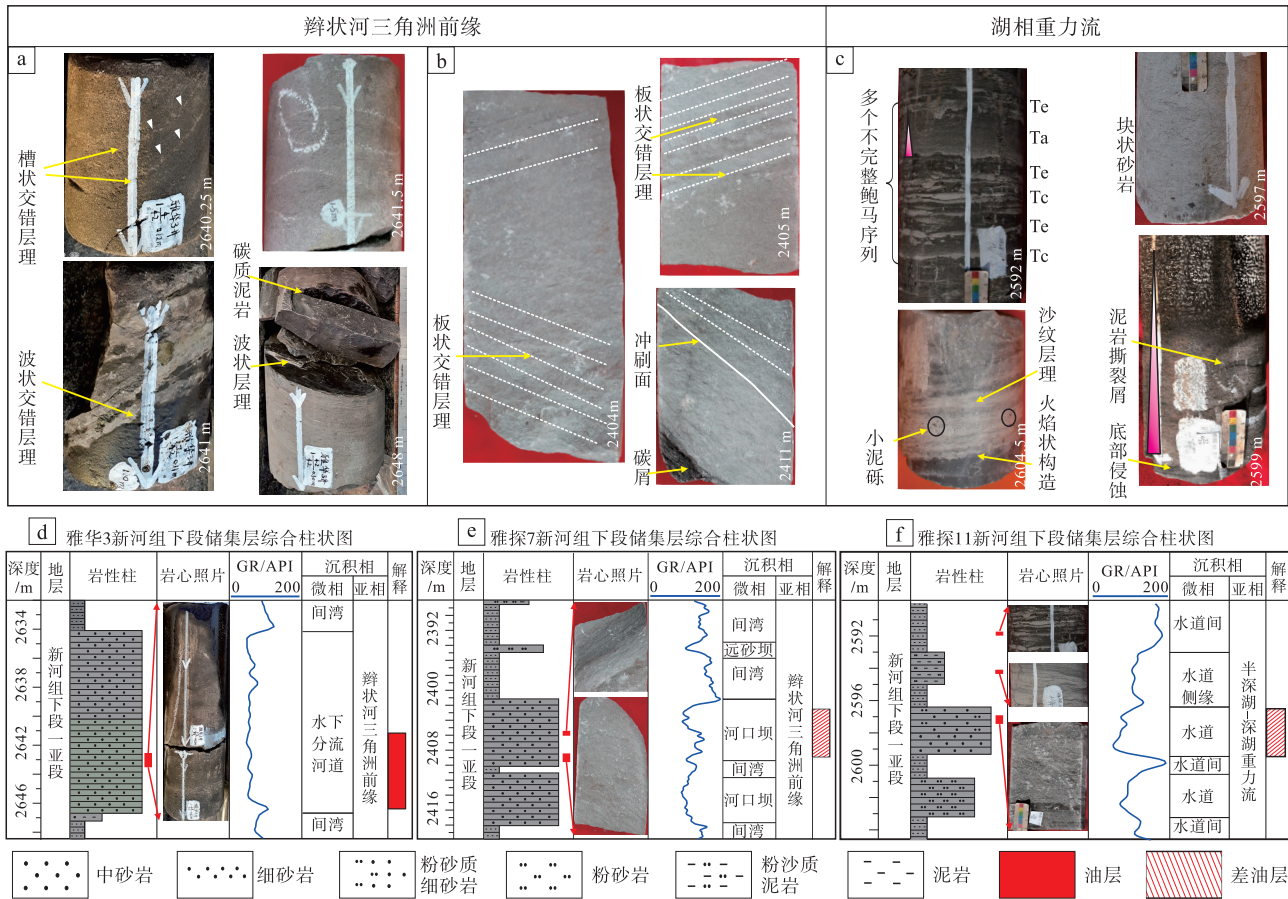


图 2 雅布赖盆地小湖次凹北斜坡中侏罗统新河组下段主要沉积相类型

Fig. 2 Major types of sedimentary facies of the Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in gentle slope of Xiaohu sub-sag, Yabrai Basin

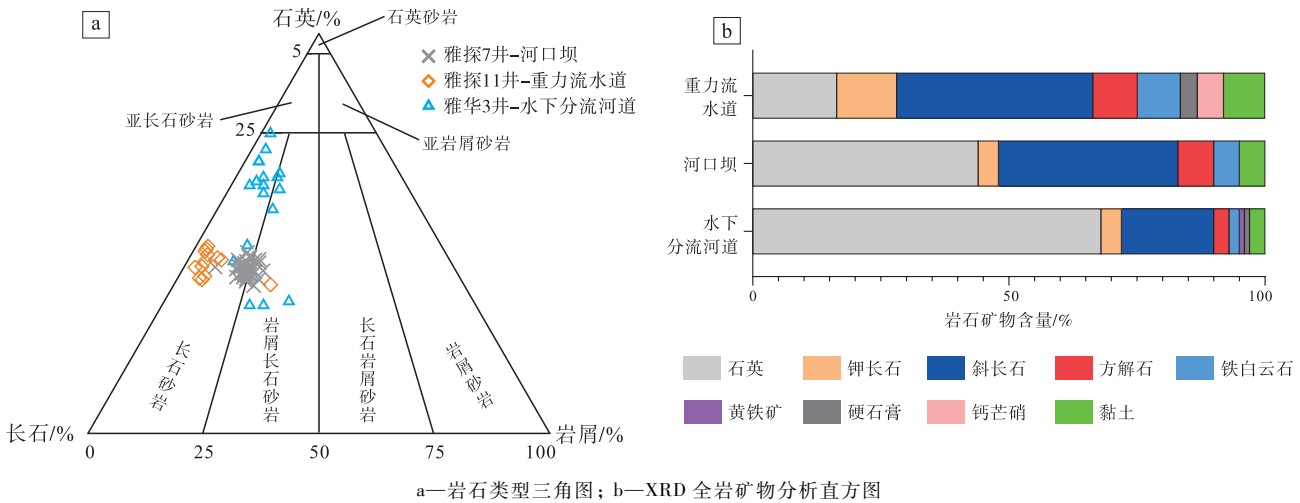
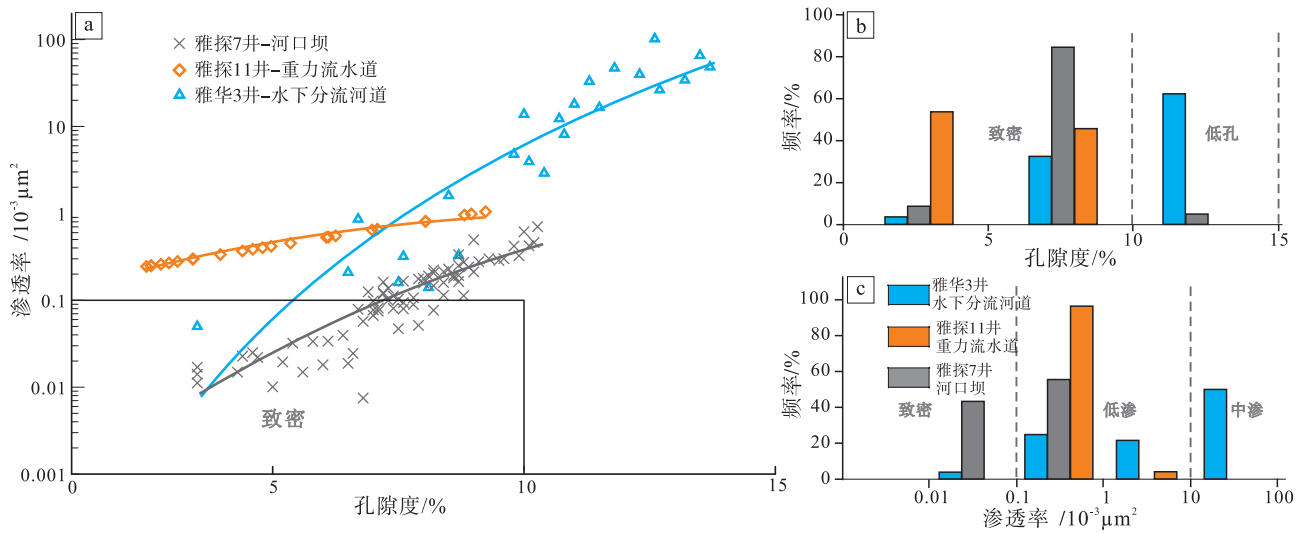


图 3 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段砂岩组分图

Fig. 3 Detrital composition of the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，整体上物性差，且不同沉积微相的孔、渗性差异较大(图 4-a)。河口坝、重力水道沉积砂体发育低孔低渗储集层，甚至致密

储集层；水下分流河道砂中主要发育中孔低渗储集层，少量属于低孔低渗一致密储集层(图 4-b, 4-c)。尤其是，相较于三角洲前缘河口坝、水下分



a—孔隙度—渗透率交会散点图；b—孔隙度分布图；c—渗透率分布图

图 4 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段储集层物性特征

Fig. 4 Characteristic of reservoir porosity and permeability for the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

流河道微相储集层，重力流水道储集层孔隙度显著增加时渗透率变化小(图 4-a)。

3.3 储集空间及特征

根据铸体薄片、扫描电镜观察分析，新河组下段一亚段储集空间主要是原生孔、粒间溶蚀(扩大)孔、粒内溶蚀孔，少量铸模孔(图 5)。溶蚀孔主要是火山岩岩屑和长石碎屑溶蚀孔。不同沉积微相的储集空间类型存在明显差异。辫状河三角洲前缘的水下分流河道微相主要是原生粒间孔及大量的粒间扩大孔、粒内溶蚀孔；河口坝微相保存少量原生粒间孔，溶蚀孔欠发育；重力流水道沉积广泛发育粒间、粒内溶蚀孔，少量铸模孔，未见原生孔。

4 成岩作用

沉积物埋藏后，一方面受埋藏压实作用减孔；另一方面，随着温度和压力的增加，孔隙流体和碎屑矿物间开始发生复杂的成岩反应，形成次生矿物及次生孔而影响储集层孔渗。其中，最主要的成岩作用包括压实作用、胶结作用及溶蚀作用。

4.1 压实作用

新河组下段一亚段埋深中等(2800~3000 m)，整体上压实作用中等。颗粒间点一线、线接触为主，少量点接触、凹凸接触(图 5)，少量碎屑颗粒

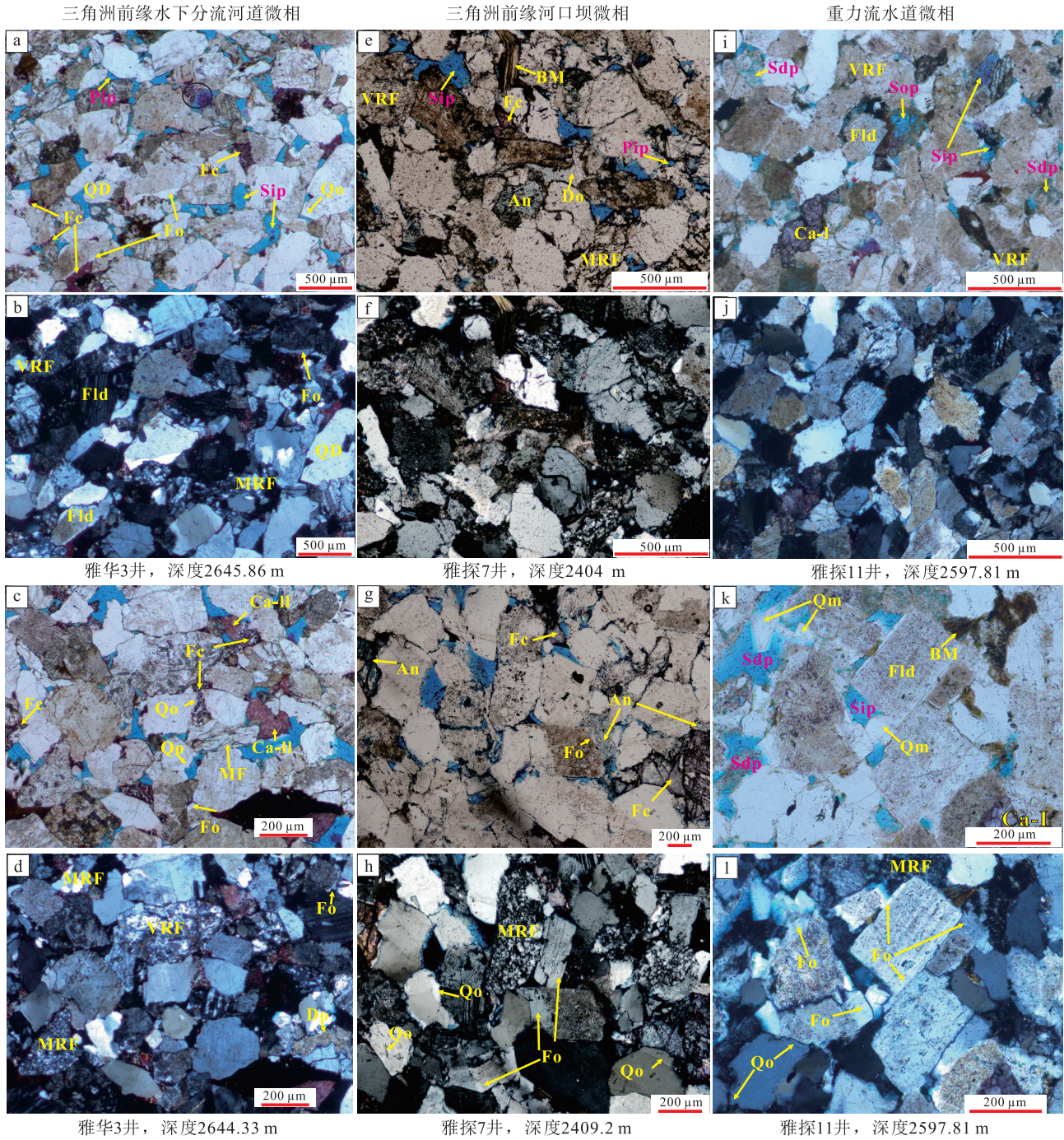
发生破碎(图 5-c)，刚性碎屑颗粒间充填的云母等塑性矿物发生弯曲变形(图 5-e)，部分泥质碎屑发生假杂基化(图 5-i, 5-k)，表明压实减孔对储集层孔渗降低影响大。

4.2 胶结作用

胶结作用对储集层的影响随着胶结物类型、含量和时空配置关系而不同。研究区主要的胶结类型包括硅质胶结、长石胶结、碳酸盐胶结和自生黏土矿物胶结。

硅质胶结主要以石英次生加大形式存在，少量微晶石英。石英次生加大使得颗粒紧密接触(图 5)。沿碎屑石英颗粒边缘窄的次生加大边，整体上含量较低，介于 1%~2% 之间(图 5；图 6)。同时，扫描电镜下可观察到沿着孔隙壁的微晶石英(图 6-d, 6-e, 6-h, 6-j)。考虑到研究区的最大埋深约 2800 m，石英的凹凸、缝合接触少见；同时，自生微晶石英常和黏土矿物(蒙脱石、伊蒙混层等)、长石等溶蚀孔伴生；石英次生加大流体包裹体均一温度为 80~110 °C (田涛等, 2015b)，此温度正好对应有机质排酸的窗口温度。因此，硅主要来自长石溶蚀和黏土矿物转化 (Worden and Morad, 2000)。

长石胶结物主要以 2 种形式出现：(1) 钠长石以次生加大边的形式沿着碎屑长石颗粒边缘朝粒间



a, b, c, d—水下分流河道粗中粒长石砂岩，岩屑主要是火山岩和变质岩岩屑，大量粒间溶蚀扩大孔；少量石英次生加大、碳酸盐胶结物，铁方解石胶结物交代石英次生加大，溶蚀孔内局部可见充填状绿泥石和钠长石晶体以及少量斑块状方解石胶结物 Ca-Ⅱ；e, f, g, h—河口坝微相中细砂岩，粒间少量残余粒间孔和溶蚀孔，大量的黑云母弯折变形，早期白云石被晚期铁白云石胶结物交代；局部可见铁方解石及铁白云石胶结，长石溶蚀及长石次生加大现象；i, j, k, l—重力流水道中砂岩，粒间和粒内溶蚀孔为主，长石蚀变和次生加大显著，溶蚀孔内发育石英加大等。Pip-原生粒间孔，Sop-铸模孔，MF-微裂缝，Sdp-粒内溶蚀孔，Sip-粒间溶蚀孔；Fld-长石，QD-碎屑石英，VRF-火山岩岩屑，MRF-变质岩岩屑，BM-黑云母；Qo-石英次生加大，Qm-微晶石英，Fo-长石次生加大，An-铁白云石胶结物，Do-白云石，Ca-I-第Ⅰ期方解石胶结物，Ca-II-第Ⅱ期方解石胶结物，Fc-铁方解石胶结物

图 5 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段储集层微观特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of reservoir in the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

孔内生长,薄片中长石次生加大表面光洁无蚀变,且和长石碎屑消光位不一致(图 5);(2)长石以柱状自生晶体形式充填长石溶蚀孔、粒间孔(图 6-c, 6-e, 6-g)。一般钠长石的形成主要开始于早成岩晚期或中成岩阶段埋藏条件下,随着地层温度升高,酸性成岩背景中,在孔隙水中 Na^+ 参与下,碎屑斜长石和钾长石转化为热力学上更稳定的钠长石(Larsen, 2008; Mu *et al.*, 2016)。钠长石化的 Na^+ 主要来自于早期沉积水体、蒙皂石等黏土矿物转化、碳酸盐胶结物交代钠斜长石等(Pe-Piper and Piper, 2022)。岩石薄片及扫描电镜观察,重力流水道微相碎屑颗粒边缘及溶蚀孔内大量的长石、硅质胶结物(图 5-k; 图 6-k),而水下分流河道及河口坝孔隙内次生加大边较窄且少见。

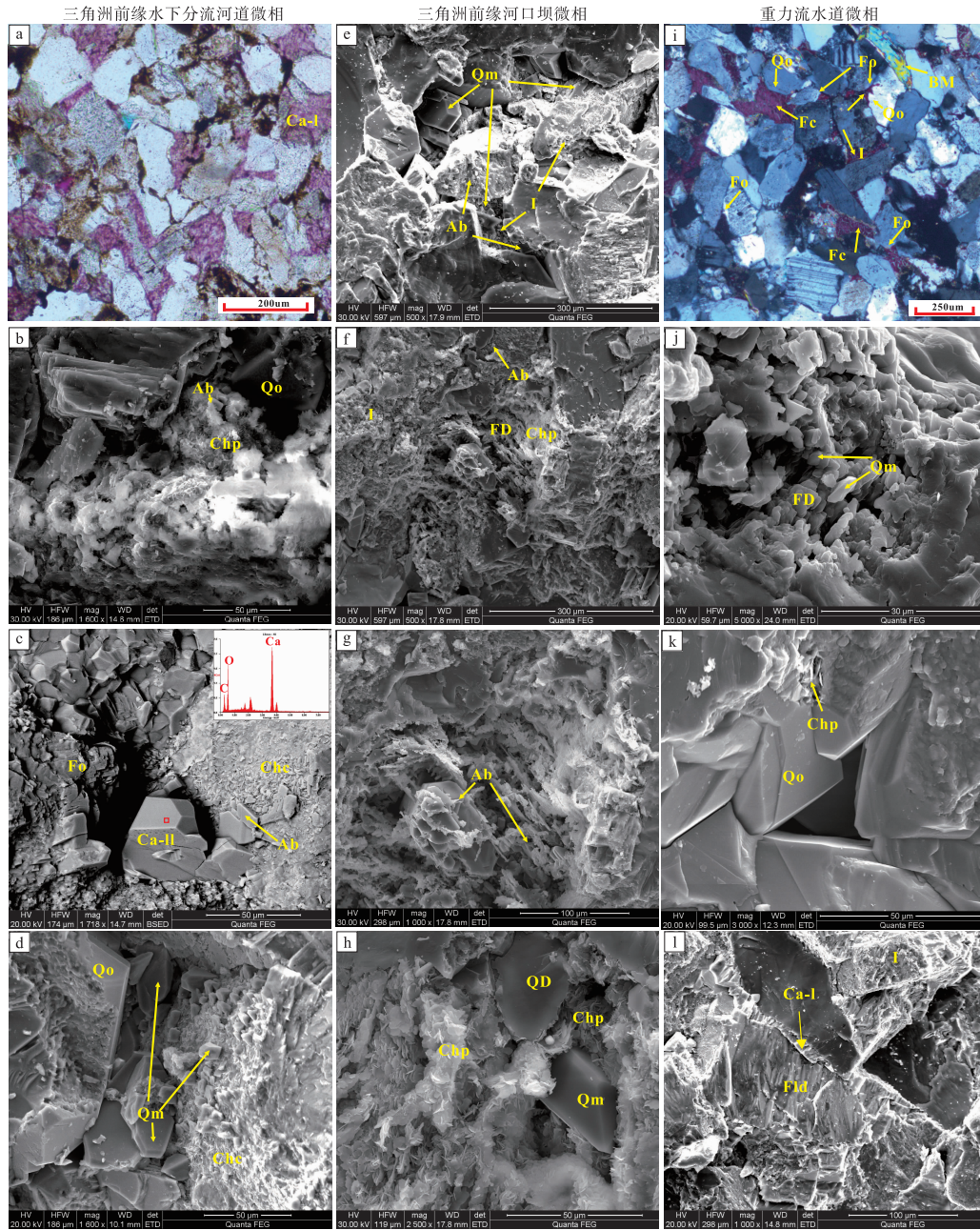
碳酸盐胶结物是目的层最常见的胶结物之一。基于茜素红—铁氰化钾染色薄片及扫描电镜观察发现,其主要包括方解石、铁方解石和铁白云石,少量白云石。其中,方解石胶结物染色呈红色,且可细分为 2 期:第 I 期方解石(Ca-I),主要以基底胶结为主,粗晶,整体呈现晶粒状集合体,大部分碎屑颗粒点接触甚至悬浮状(图 6-a, 6-l);第 II 期方解石胶结物(Ca-II)以孤立、分散斑块状,偶见于粒间溶蚀扩大孔内,含量极低(图 5-c; 图 6-c)。局部可见少量未染色的微晶白云石,且其被铁白云石部分交代(图 5-d, 5-e)。铁方解石染色呈紫红色,孔隙式胶结,斑块状,交代部分碎屑颗粒和石英/长石次生加大(图 5-a, 5-c, 5-g; 图 6-i);淡蓝色的铁白云石胶结物呈现菱形晶体,斑块状集合体(图 5-e, 5-g)。基底—孔隙式胶结的碳酸盐胶结物(Ca-I, Do)沉淀在弱接触的碎屑颗粒间,且未见交代碎屑次生加大等胶结物,说明其形成时压实作用弱,主要于初始埋藏期对碳酸钙饱和的孔隙水体中沉淀,形成过程与碱性沉积水及早成岩期的细菌等微生物作用等相关(张青青等, 2021)。铁方解石(铁白云石)交代部分早期碳酸盐胶结物(方解石 Ca-I、白云石 Do)及石英和长石次生加大,长石和岩屑的溶蚀孔可见,因此其形成晚于有机酸相关的溶蚀作用和次生矿物沉淀。加之,含铁碳酸盐胶结物在靠近砂泥岩界面的位置较多,这可能意味着形成铁方解石(Fc)、铁白云石(An)的碳主要来自于邻近泥岩夹层,即与中成岩晚期发生的有机质热脱羧($>100\text{ }^\circ\text{C}$)

生成 CO_2 有关(Irwin *et al.*, 1977)。

自生黏土矿物主要是绿泥石、伊利石和伊蒙混层,高岭石较少。扫描电镜下存在 2 种形式的绿泥石,颗粒包膜/孔隙衬里形式(Chc)的、弱结晶的片状绿泥石膜,包裹碎屑颗粒(图 6-c, 6-d),主要见于三角洲前缘分流河道沉积,河口坝砂中较少;充填孔隙式的分散片状绿泥石(Chp),常在溶蚀孔中和自生石英、钠长石等共生(图 6-f, 6-h),主要见于三角洲前缘河口坝。前人研究认为:同生期,水动力强的、渗透性好的水下分流河道中粗砂颗粒表面容易吸附形成黏土包膜,在早成岩 A 阶段含 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的流体作用下可转化为早期绿泥石膜;早成岩 B 阶段,中—基性火山岩碎屑、黑云母等蚀变作用也可释放 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} ,使得孔隙水中直接沉淀孔隙衬里绿泥石。中成岩阶段,则受到有机酸溶蚀作用,火山碎屑等溶蚀会释放大量的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等,随着有机酸逐步消耗,逐步转化为碱性环境时,从孔隙水中直接结晶形成大量高度自形的孔隙充填状绿泥石(Worden and Morad, 2003; 姚泾利等, 2011; Chen *et al.*, 2024)。伊利石和伊蒙混层覆盖在碎屑颗粒表面可见(图 6-e, 6-f, 6-l),呈现蜂巢状、片状、弯片状,主要由埋藏早期的蒙脱石黏土进入早成岩晚期以后伊利石化作用形成(蔡来星等, 2023)。

4.3 溶蚀作用

除了胶结作用,研究区目的层广泛存在溶蚀现象。溶蚀作用主要是长石颗粒、火山岩碎屑的溶蚀,以及碳酸盐胶结物溶蚀。长石碎屑沿着颗粒边缘的溶蚀形成粒间溶蚀孔,少量长石碎屑沿着解理缝发生粒内溶蚀,甚至形成铸模孔(图 5-i),溶蚀孔内可见自生硅质胶结、钠长石及黏土矿物(图 5-k; 图 6-c, 6-g, 6-h, 6-j, 6-k)。基于岩石薄片和扫描电镜观察,和长石溶蚀密切相关的石英(长石)次生加大被中成岩阶段的含铁碳酸盐胶结物交代;此外,少量晚期含铁碳酸盐胶结物本身也遭受溶蚀,但第 II 期方解石胶结物较少溶蚀。加之,前人研究也认为大规模烃类侵入会抑制碳酸盐胶结物、硅质的沉淀及长石的溶蚀(Wang *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2020)。因此,目的层主要经历了侏罗纪埋藏期的有机酸溶蚀和开始于晚侏罗世末期的构造抬升相关的溶蚀作用。



a—早期孔隙—基底式胶结方解石 (Ca-I)，雅华 3 井，井深 2682.6 m；b—石英次生加大及粒间溶蚀孔内充填状绿泥石及钠长石晶体，雅华 3 井，井深 2641.4 m；c、d—粒间溶蚀孔内孔隙衬垫绿泥石膜，绿泥石膜不发育位置可见微晶石英、钠长石，局部可见长石溶蚀及石英/长石次生加大，溶蚀孔内可见晚期方解石胶结物 (Ca-II)，雅华 3 井，井深 2641.7 m；e—粒间孔被微晶石英、黏土矿物等完全充填，部分碎屑长石溶蚀表面发育片状伊利石，雅探 7 井，井深 2408.48 m；f、g—长石溶蚀及溶蚀孔内的自形钠长石、微晶石英，碎屑颗粒表面可见片状伊利石，雅探 7 井，井深 2408.48 m；h—粒间溶蚀孔被片状绿泥石及微晶石英充填，雅探 7 井，井深 2408.48 m；i—溶蚀孔被铁方解石胶结，部分的石英次生加大和碎屑颗粒被交代，雅探 11 井，井深 2568.81 m；j—长石溶蚀及溶蚀孔内的微晶石英等，雅探 11 井，井深 2611.7 m；k—孔隙被石英次生加大、绿泥石等充填封闭，雅探 11 井，井深 2628 m；l—碎屑颗粒间的早期弱压实形成的方解石胶结物 (Ca-I)，碎屑颗粒点接触，弱溶蚀的长石碎屑表面可见片状伊利石，雅探 11 井，井深 2570.1 m。Fld—长石，QD—碎屑石英，BM—黑云母；Qo—石英次生加大，Qm—微晶石英，FD—长石溶蚀，Fo—长石次生加大，Ab—钠长石，I—伊利石，Ca-I—第 I 期方解石胶结物，Ca-II—第 II 期方解石胶结物，Fc—铁方解石胶结物，Chc—颗粒包膜绿泥石，Chp—孔隙衬里绿泥石

图 6 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段不同相带储集层成岩特征

Fig. 6 Diagenetic characteristics of reservoir among different sedimentary micro-facies of the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

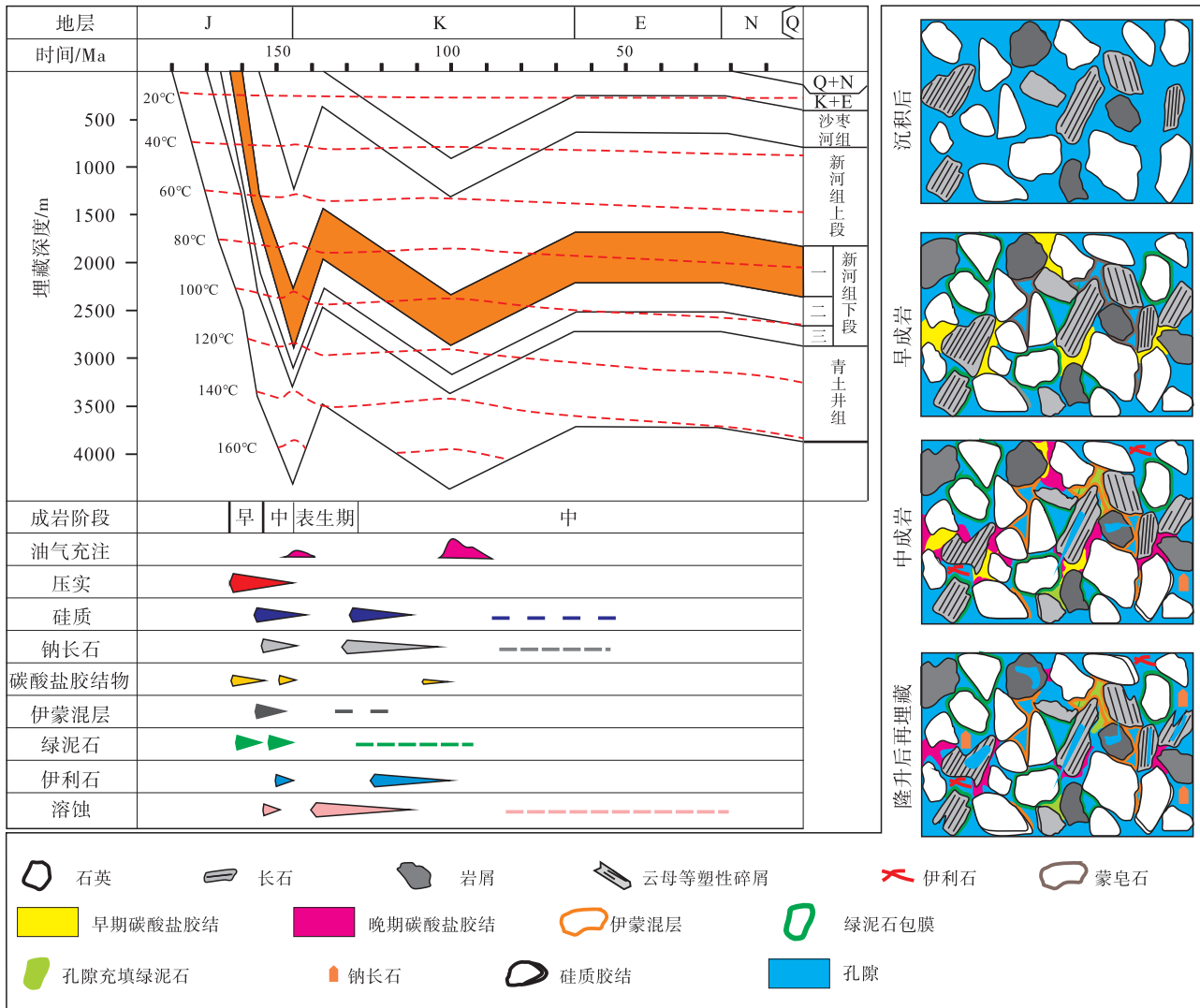


图 7 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段储集层成岩演化序列
 Fig. 7 Paragenetic sequence of main diagenetic minerals in the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

4.4 成岩序列及埋藏成岩作用

结合中国油气行业标准《碎屑岩成岩阶段划分》(SY/T5477-2003), 利用目的层有机质镜质组反射率 R_0 为 0.7~1.1, 最大热解峰 T_{max} 为 437~444 °C, 结合其他自生矿物特征, 判断目的层新河组下段一亚段在晚侏罗世末期最大埋深时期达到了中成岩 A 期, 后期经历了构造抬升相关的溶蚀改造。

总结分析新河组下段一亚段砂岩储集层主要经历了如下的成岩演化 (图 7): 中侏罗世沉积时期, 雅布赖盆地处于温暖、湿润一半干旱气候环境, 湖盆沉积水介质整体为半咸水环境 (吴晓智等,

2015), 因此, 在同生成岩阶段, 大气淡水的淋滤作用弱, 洪水容易携带大量的陆源成因的、机械渗滤的黏土颗粒沉淀在碎屑颗粒间 (Morad *et al.*, 2010)。

早成岩阶段, 湖盆断陷作用使得新河组下段一亚段快速埋藏压实, 形成了早期碳酸盐矿物胶结和绿泥石包膜; 随着地层温度逐步升高, 蒙皂石开始逐步转化为伊蒙混层, 同时火山岩岩屑等蚀变提供了 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} , 也促使了孔隙衬垫形式的绿泥石的沉淀。进入中成岩阶段 (大于 70 °C) 后, 有机质成熟后大量排酸溶蚀长石、火山岩岩屑, 同时诱发了钠长石化与自生黏土矿物转化和沉淀 (伊蒙混

层、伊利石等)，以及自生石英胶结，且随着长石溶蚀等持续消耗有机酸，成岩环境逐步转变为弱碱性， Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等从孔隙水中以充填状绿泥石形式析出；当温度进一步升高（大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），有机质开始生成 CO_2 ，晚期碳酸盐胶结物开始沉淀。

晚侏罗世末期达到最大埋深后，随着成熟烃源岩大量生成油气以及第 1 次大规模构造活动，发生了第 I 期油气充注，构造抬升也使得目的层重新进入有机酸生成窗口，溶蚀长石/岩屑和碳酸盐矿物；早白垩世初期构造背景再由挤压转为拉张，目的层再埋藏，同时伴随着钠长石、自生石英胶结物、黏土矿物沉淀和方解石胶结物沉淀（Ca-II）；在早白垩世晚期，发生了第 II 期大规模构造抬升，同时伴随着大规模的油气充注等，之后的成岩蚀变等较弱。

5 储集层控制因素

储集层孔渗特性是一系列地质因素共同作用的结果，其中主要的控制因素包括层序、沉积环境、成岩作用、埋藏史等（Morad *et al.*, 2010）。研究层位处于北部斜坡带最大湖泛面后的高位域层序内，埋深差异小，埋藏史基本一致。因此，考虑造成储集层非均质性的主要因素是沉积相带和成岩作用差异。但由于雅布赖盆地属于典型的叠合盆地，构造演化复杂，经历了多期溶蚀，因此溶蚀作用是最关键的成岩作用之一。

5.1 沉积对储集层的控制作用

沉积作用主要通过控制沉积期原始碎屑组分、粒度、分选、磨圆、杂基含量和砂体规模和叠置样式等决定储集层孔渗性质，并间接影响储集层成岩过程（Morad *et al.*, 2000；Bjørlykke, 2014；Saiag *et al.*, 2016）。中侏罗世时期雅布赖盆地属于小型陆内断陷湖盆，物源多样，沉积体系规模小，侧向变化大，因此，各个微相间的碎屑成分差异大。刚性石英不仅能够抑制快速埋藏阶段储集层的压实减孔，又难以和孔隙流体发生物质交换形成次生矿物，目的层埋藏浅，压溶缝合接触的石英碎屑少见，石英次生加大主要和长石溶蚀相关。正如定量统计结果显示，当储集层的碎屑石英组分相对含量大于 40% 时，储集层的孔、渗和碎屑石英含量正相关（图 8-a, 8-b）。因此相对于三角洲前缘分流

河道砂（ $\text{Q}_{57}\text{F}_{34}\text{R}_9$ ），石英含量较少的河口坝（ $\text{Q}_{42}\text{F}_{53}\text{R}_5$ ）和重力流水道微相（ $\text{Q}_{40}\text{F}_{45}\text{R}_{15}$ ）孔渗明显偏低。

河口坝沉积水动力强度较弱，碎屑颗粒粗细混合、分选差、粒度中细，则意味着原始孔隙度较小（Beard and Weyl, 1973），最终经历早期快速埋藏压实后的孔隙度亦小（图 8-c, 8-d）；而相较于牵引流主导的、水动力强的水下分流河道，事件性的、以高密度浊流及碎屑流主导的重力流水道和水动力微弱的河口坝砂在沉积过程也容易夹杂大量塑性泥质杂基等，统计分析显示塑性杂基较高时主要为低孔低渗一致密储集层（图 8-e, 8-f）。因此，河口坝微相和重力流水道微相砂体经历快速埋藏压实后剩余的原生孔隙明显较少，孔隙连通性更差。沉积碎屑组分、分选、粒度、沉积过程相关的塑性杂基含量等的差异，造成了早期快速深埋过程中强压实后原生粒间孔保存的差异性。碎屑组分和孔、渗的定量统计也发现，储集层的孔渗亦和成岩溶蚀及胶结物的沉淀密切相关（图 8）。

5.2 成岩对储集层的影响

埋藏成岩蚀变主要通过控制压实程度、胶结物的类型和含量、溶蚀等成岩作用及成岩演化序列控制储集层的孔渗。为了定量评估沉积一成岩控储作用，根据 Ehrenberg（1989）提出的方法，计算了压实和胶结作用的相对减孔量（图 9）。根据结果，压实作用和胶结作用造成的孔隙损失分别是 21% 和 8%。压实作用造成的减孔更显著，但由于小湖次凹北部斜坡所经历的构造事件相对一致，所选样品的埋藏深度差异较小，因此，不同沉积相带间压实作用减孔的影响变化不大，约为 50%~55%。但不同沉积相带孔隙减少受胶结作用影响差异较大，其中三角洲水下分流河道受到胶结作用减孔作用最弱，减孔率约为 16%；河口坝中等，减孔率约为 26%；重力流水道受胶结作用的减孔率最高，减孔率约为 34%。整体上，新河组下段一亚段不同微相间储集层成岩作用差异性主要体现在黏土矿物、碳酸盐胶结物及埋藏相关的溶蚀—沉淀作用 3 个方面。

黏土矿物类型和胶结形式是造成新河组下段储集层差异性最重要的因素之一。河口坝和重力流水道微相主要发育孔隙充填式的绿泥石、伊蒙混层/

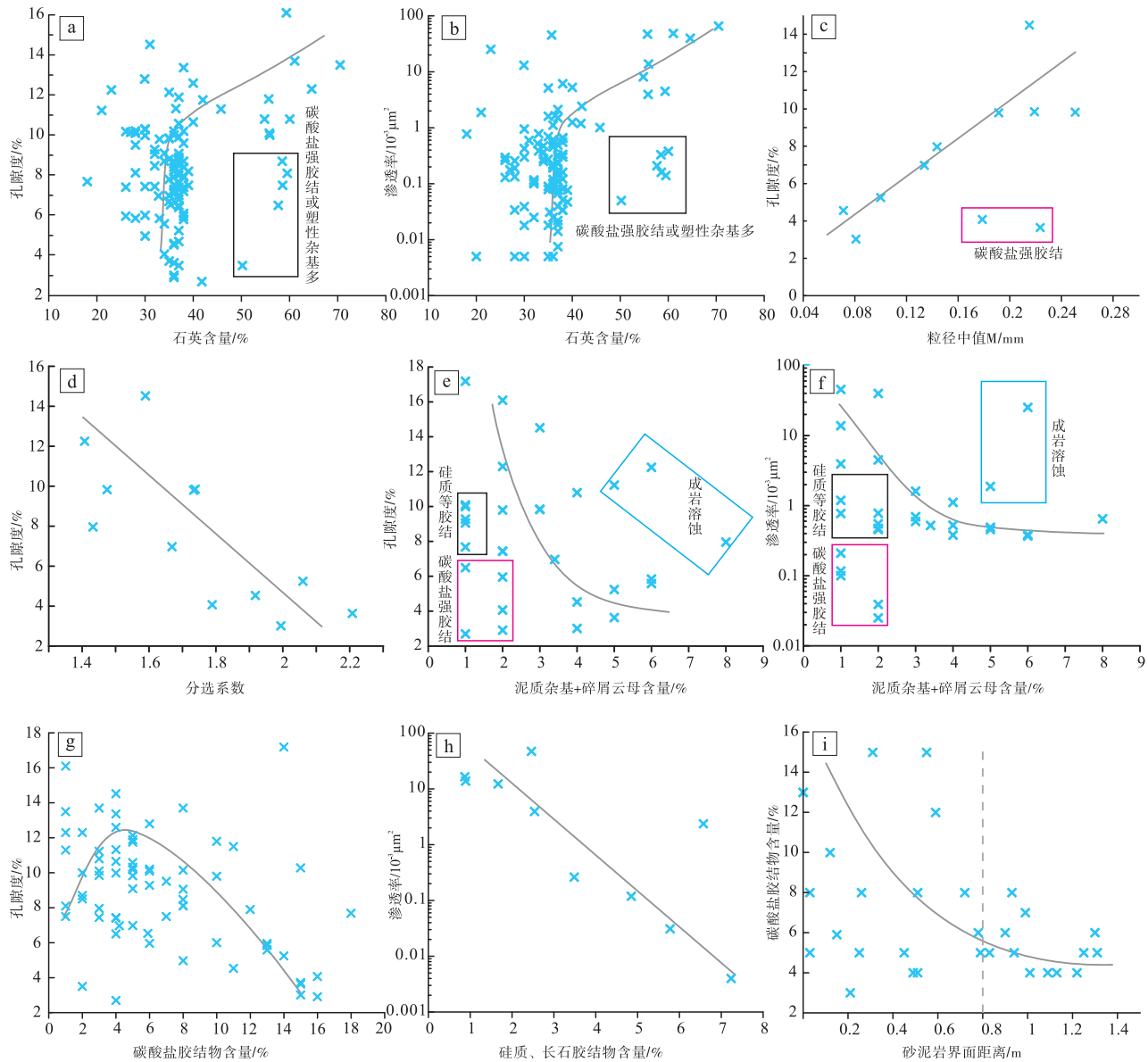


图 8 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段储集层孔、渗与碎屑成分、结构、胶结物及杂基含量的关系
 Fig. 8 Relationship among reservoir quality (permeability and porosity) and detrital components, textures, content of cements and detrital clay matrix of the Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin

伊利石(图 6-g, 6-h, 6-l), 水下分流河道微相则发育大量的颗粒包膜绿泥石(图 6-c, 6-d)。前人研究认为水动力强、分选好、渗滤能力强的水下分流河道粗中砂颗粒表面更容易吸附 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 黏土颗粒而在埋藏早期形成绿泥石膜 (Worden *et al.*, 2020)。早期绿泥石膜可通过增强抗压实性保护原生孔或通过抢占生长空间的方式抑制石英/长石次生加大, 进而保护储集层的孔隙。而大量的充填状的绿泥石及伊蒙混层/伊利石及其由蒙皂石转化过程中伴生沉淀的微晶石英更多表现为封堵孔喉, 降

低了储集层的孔渗 (马鹏杰等, 2017)。

碳酸盐胶结物也是影响优质储集层物性的次生矿物之一。夹层泥岩是碳酸盐胶结物形成的主要碳源之一, 因此碳酸盐胶结物靠近砂泥层界面分布更多。统计发现, 离砂泥岩界面越近 (0.8 m 以内), 碳酸盐胶结物的含量显著增加, 这意味着厚层砂体中部碳酸盐胶结物较少, 而薄层砂体及厚层砂体边缘被强胶结(图 5-e; 图 6-a, 6-i, 6-l)。加之, 根据碳酸盐胶结物和孔隙度量统计发现, 少量的碳酸盐胶结物有利于保存孔隙, 孔隙度较大; 而当

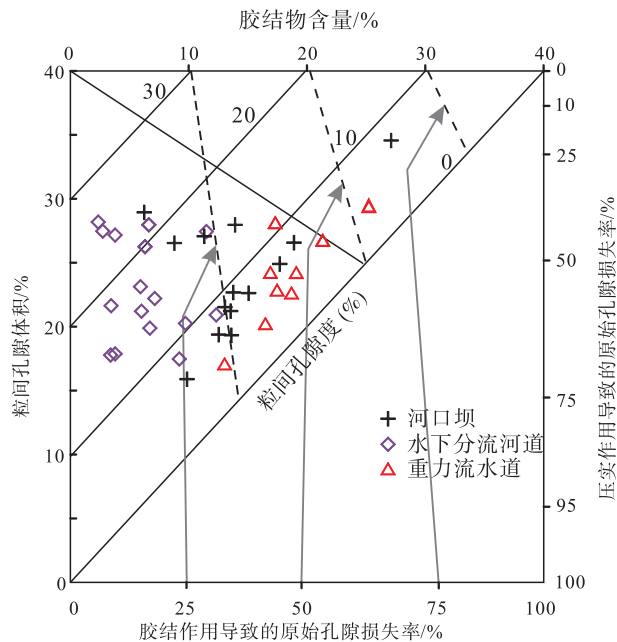


图 9 雅布赖盆地中侏罗统新河组下段一亚段压实和胶结减孔效果分析交会图

Fig. 9 Cross-plot showing original porosity reductions of the first sub-member of Middle Jurassic Lower Xinhe Formation in Yabrai Basin by compaction or cementation

碳酸盐胶结物过多（约大于 10%）时，孔隙度明显减少。因此含少量碳酸盐胶结物的厚层水下分流河道砂体中部更容易保存孔隙；而中一薄层河口坝和水下分流河道砂，容易被碳酸盐强胶结，后期溶蚀流体也难以进入，因此致密储集层常见。

由于盆地构造改造强，不仅中晚侏罗世深埋经历了一定程度的酸性流体的改造，而且晚侏罗世末期后盆地又经历了抬升，使得小湖次凹目的层重新进入大量排酸的深度（温度 80~100℃，Ronald *et al.*, 1989）区间内。因此，有机酸相关的溶蚀作用对优质储集层形成至关重要。目的层不同相带的砂体由于水动力、沉积环境等差异，经历了差异化的成岩溶蚀及沉淀。水下分流河道石英含量高，粒度粗，厚度大，这使得砂体中部保存的粒间孔多，孔隙连通性更好，地层流体的流动更为活跃，有机酸与不稳定的碎屑颗粒及碳酸盐胶结物更充分地反应，且溶蚀产物能被及时排出砂体。同时，河口位置的水下分流河道砂体容易形成早期绿泥石膜，绿泥石也会抑制次生矿物的沉淀（Baker *et al.*, 2000）。因此薄片仅见部分的碳酸盐胶结物残余及大量的粒间溶蚀扩大孔，大部分溶蚀孔未被石英等

次生矿物强胶结（图 5-a, 5-c, 5-d）。河口坝、重力水道微相砂体也经历了不同程度的溶蚀，但溶蚀孔内原地沉淀了大量次生产物。这主要是因为其内部的长石、岩屑含量高，分选较差，加之沉积时期夹杂的塑性泥质杂基等相对较多，且碎屑颗粒表面主要以蒙脱石等黏土矿物为主。因此，埋藏初期保存的孔隙空间有限，经历压实后塑性杂基等使得孔隙喉道大量损失，孔隙连通性差。而进入生酸窗口后，虽然溶蚀形成铸模孔、粒间溶孔及粒内溶孔（图 5-i, 5-k）。但由于砂体本身孔隙连通性差，地层流体流动性弱，长石溶蚀的产物难以及时运移出成岩体系，加之溶蚀的产物 K^+ 、 Na^+ 等离子又容易与已大量存在的蒙皂石和碎屑钾长石等进一步发生成岩蚀变，在孔隙内就近沉淀产生伊蒙混层、充填状绿泥石、钠长石及硅质胶结物（图 5-k；图 6-e, 6-k），堵塞了喉道，储集层渗透率低。

6 结论

1) 雅布赖盆地小湖次凹北斜坡中侏罗统新河组下段一亚段是辫状河三角洲前缘和湖相重力流沉积，主要发育低孔中渗一致密的长石砂岩储集层。

2) 不同沉积相带储集层的储集空间类型及物性差异大。中厚层的三角洲前缘河道粗中粒砂岩 ($Q_{57}F_{34}R_9$) 以绿泥石包膜发育，后期溶蚀改造强为特征；储集空间以溶蚀孔、原生孔为主，储集层质量最好。中层状重力水道中粒砂岩 ($Q_{40}F_{45}R_{15}$) 溶蚀广泛，储集层粒内、粒间溶蚀孔发育，但溶蚀孔内充填大量钠长石、硅质胶结物，低渗储集层为主。中一薄层河口坝中细砂岩 ($Q_{42}F_{53}R_5$) 保存少量原生粒间孔，塑性杂基和晚期碳酸盐胶结物多，溶蚀作用弱，储集层致密。

3) 作为中生代叠合盆地雅布赖盆地油气储集层受沉积相带变化、成岩演化以及多期构造活动相关的溶蚀改造综合控制，特别是溶蚀及相关的次生成岩矿物是否就近沉淀是影响储集层孔、渗的关键。其中，砂体厚、成熟度高、粒度粗、分选好是保存原生孔和形成早期绿泥石膜的基础，而原生孔不仅提供了外部流体进入叠合盆地砂岩储集层而发生溶蚀的通道，更决定了地层流体的流动性及溶蚀产物被及时带出砂体。

参考文献 (References)

- 蔡来星, 杨田, 田景春, 易娟子, 任启强. 2023. 致密砂岩储集层中黏土矿物发育特征及其生长机理研究进展. 沉积学报, 41(6): 1859-1889. [Cai L X, Yang T, Tian J C, Yi J Z, Ren Q Q. 2023. Advances in studies of development and growth mechanisms of clay minerals in tight sandstone reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1859-1889]
- 操应长, 意克来, 刘可禹, 朱如凯, 远光辉, 张响响, 宋明水. 2018. 陆相湖盆致密砂岩油气储集层储集性能表征与成储机制: 以松辽盆地南部下白垩统泉台组四段为例. 石油学报, 39(3): 247-265. [Cao Y C, Xi K L, Liu K Y, Zhu R K, Yuan G H, Zhang S S, Song M S. 2018. Reservoir properties characterization and its genetic mechanism for tight sandstone oil and gas reservoir in lacustrine basin: the case of the fourth Member of Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(3): 247-265]
- 陈发景, 汪新文. 2000. 中国西北地区早—中侏罗世盆地原型分析. 地学前缘, 7(4): 459-469. [Chen F J, Wang X W. 2020. Prototype analysis of Early-Middle Jurassic basins in northwestern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 459-469]
- 都鹏燕, 高岗, 魏涛, 赵乐义, 杨军, 李涛, 王建国. 2018. 雅布赖盆地萨尔台凹陷侏罗系新河组有效烃源岩研究. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 29-38. [Du P Y, Gao G, Wei T, Zhao L Y, Yang J, Li T, Wang J G. 2018. Effective source rocks in Jurassic Xinhe Formation in Sartai Sag, Yabrai Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 29-38]
- 冯益民, 吴汉泉. 1992. 北祁连山及其邻区古生代以来的大地构造演化初探. 西北地质科学, 13(2): 61-73. [Feng Y M, Wu H Q. 1992. Tectonic evolution of north Qilian mountains and its neighborhood since Paleozoic. *Northwest Geoscience*, 13(2): 61-73]
- 黄军平, 杨占龙, 马国福, 李涛, 邸俊, 朱俊杰, 李智勇, 黄成刚. 2015. 中国小型断陷湖盆致密油地质特征及勘探潜力分析. 天然气地球科学, 26(9): 1763-1772. [Huang J P, Yang Z L, Ma G F, Li T, Di J, Zhu J J, Li Z Y, Huang C G. 2015. The geological characteristics and exploration potential of tight oil in small fault-subsided lake basins, China. *Natural Gas Geoscience*, 26(9): 1763-1772]
- 罗静兰, 李弛, 雷川, 曹江骏, 宋昆鹏. 2020. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与热点问题讨论. 古地理学报, 22(6): 1021-1040. [Luo J L, Li C, Lei C, Cao J J, Song K P. 2020. Discussion on research advances and hot issues in diagenesis of clastic-rock reservoirs. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(6): 1021-1040]
- 马鹏杰, 林承焰, 张世奇, 董春梅, 魏孟吉. 2017. 碎屑岩储集层中绿泥石包膜的研究现状. 古地理学报, 19(1): 147-159. [Ma P J, Lin C Y, Zhang S Q, Dong C M, Wei M J. 2017. An overview on study of chlorite films in clastic reservoirs. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(1): 147-159]
- 石英涛, 廖远涛, 汤建荣, 魏军, 曹海洋, 章诚. 2015. 雅布赖盆地小湖次凹新河组下段层序及沉积相特征. 地质科技情报, 34(5): 38-45. [Shi Y T, Liao Y T, Tang J R, Wei J, Cao H Y, Zhang C C. 2015. Characteristics of sequence stratigraphy and sedimentary facies in the Lower Xinhe Formation of Xiaohu Sub-sag, Yabrai Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 34(5): 38-45]
- 田涛, 任战利, 吴晓青, 马国福, 张睿胜, 杨智明, 王维, 王锦. 2015a. 雅布赖盆地萨尔台凹陷中—新生代构造热事件的磷灰石裂变径迹分析. 中南大学学报(自然科学版), 46(8): 2974-2982. [Tian T, Ren Z L, Wu X Q, Ma G F, Zhang R S, Yang Z M, Wang W, Wang J. 2015a. Apatite fission track analysis of Meso-Cenozoic tectonic-thermal history in Sartai Depression, Yabrai Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(8): 2974-2982]
- 田涛, 任战利, 吴晓青, 马国福, 张睿胜, 杨智明, 郭科. 2015b. 雅布赖盆地萨尔台凹陷古地温场与油气成藏期次. 沉积学报, 33(4): 836-844. [Tian T, Ren Z L, Wu X Q, Ma G F, Zhang R S, Yang Z M, Guo K. 2015b. The paleogeothermal field and hydrocarbon accumulation period in Sartai Depression, Yabrai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4): 836-844]
- 王建国, 周晓峰, 唐海忠, 魏军, 韩小松, 郭伟. 2021. 基于星点状方解石胶结与溶解的识别查明砂岩粒间孔隙类型: 以雅布赖盆地新河组砂岩为例. 地质力学学报, 27(4): 652-661. [Wang J G, Zhou X F, Tang H Z, Wei J, Han X S, Guo W. 2021. Identifying intergranular pore types by distinguishing between cementation and dissolution of dotted calcite: a case study of the Xinhe Formation sandstones in the Yabrai Basin, China. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 652-661]
- 吴茂炳, 刘春燕, 郑孟林, 云金表. 2007. 内蒙古西部雅布赖盆地侏罗纪沉积—构造演化及油气勘探方向. 地质通报, 26(7): 857-863. [Wu M B, Liu C Y, Zheng M L, Yun J B. 2007. Jurassic depositional-tectonic evolution in the Yabulai Basin, western Inner Mongolia, China and direction of petroleum exploration. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 857-863]
- 吴晓智, 王桂君, 郑民, 郑曼. 2015. 雅布赖盆地构造演化与油气聚集. 地质科学, 50(1): 74-87. [Wu X Z, Wang G J, Zheng M, Zheng M. 2015. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in Yabrai Basin. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 74-87]
- 杨波, 侯军, 陈海清, 张宝权, 曹强, 孙学栋. 2018. 雅布赖中生代叠合盆地特征及勘探方向. 石油地球物理勘探, 53(S2): 314-320. [Yang B, Hou J, Chen H Q, Zhang B Q, Cao Q, Sun X D. 2018. Characteristics of the Yabrai Mesozoic Basin and its exploration strategy. *Oil Geophysical Prospecting*, 53(S2): 314-320]
- 姚泾利, 王琪, 张瑞, 李树同. 2011. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长6砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义. 沉积学报, 29(1): 72-79. [Yao J L, Wang Q, Zhang R, Li S T. 2011. Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing Area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 72-79]
- 张青青, 刘可禹, 刘太勋, 孙润平, 孟阳. 2021. 碎屑岩储集层碳酸盐胶结物成因研究进展. 海相油气地质, 26(3): 231-244. [Zhang Q Q, Liu K Y, Liu T X, Sun R M, Meng Y. 2021. Research status of

- the genesis of carbonate cementation in clastic reservoirs. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(3): 231–244]
- 张少敏, 操应长, 朱如凯, 王尉, 涂建琪, 毛治国, 白斌. 2016. 雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探. *天然气地球科学*, 27(2): 309–319. [Zhang S M, Cao Y C, Zhu R K, Wang W, Tu J Q, Mao Z G, Bai B. 2016. The lithofacies and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu Sub-sag in Yabulai Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(2): 309–319]
- 周晓峰, 唐海忠, 魏军, 杜文博, 肖文华, 周在华, 孙成田, 赵乐义. 2020. 雅布赖盆地新河组砂岩颗粒包膜特征. *东北石油大学学报*, 44(3): 26–35. [Zhou X F, Tang H Z, Wei J, Du W B, Xiao W H, Zhou Z H, Sun C T, Zhao L Y. 2020. Characteristics of grain coats in sandstones from Xinhe Formation, Yabrai Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 44(3): 26–35]
- Armitage P J, Worden R H, Faulkner D R, Aplin A C, Butcher A R, Iliffe J. 2010. Diagenetic and sedimentary controls on porosity in Lower Carboniferous fine-grained lithologies, Krechba Field, Algeria: a petrological study of a caprock to a carbon capture site. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 1395–1410.
- Baker J C, Havord P J, Martin K R, Ghorri K A R. 2000. Diagenesis and petrophysics of the Early Permian Moogooloo Sandstone, Southern Carnarvon Basin, Western Australia. *AAPG Bulletin*, 84: 250–265.
- Beard D C, Weyl P K. 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *AAPG Bulletin*, 57: 349–369.
- Bjørlykke K. 2014. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties: some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301: 1–14.
- Chen J F, Li Q, Zhu R K, Mao Z G, Chen H H. 2024. Crystal chemistry and formation of authigenic chlorite: influence on tight sandstone reservoir in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 165: 106874.
- Ehrenberg S N. 1989. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: discussion; compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura Basin, California; Discussion I. *AAPG Bulletin*, 73: 1274–1276.
- Irwin H, Curtis C, Coleman M. 1977. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments. *Nature*, 269: 209–213.
- Larsen D. 2008. Revisiting silicate authigenesis in the Pliocene-Pleistocene Lake Tecopa Beds, southeastern California: depositional and hydrological controls. *Geosphere*, 4: 612–639.
- Maast T E, Jahren J, Bjørlykke K. 2011. Diagenetic controls on reservoir quality in Middle to Upper Jurassic sandstones in the South Viking Graben, North Sea. *AAPG Bulletin*, 95: 1883–1905.
- Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47: 95–120.
- Morad S, Al-Ramadan K, Ketzer J M, De Ros L F. 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 94: 1267–1309.
- Mu N, Fu Y, Schulz H, van Berk W. 2016. Authigenic albite formation due to water-rock interactions: case study: Magnus Oilfield (UK, Northern North Sea). *Sedimentary Geology*, 331: 30–41.
- Pe-Piper G, Piper D J W. 2022. Temperature and basinal fluid controls on feldspar diagenesis, Lower Cretaceous sandstones, Scotian Basin, Canada. *Marine and Petroleum Geology*, 141: 105704.
- Ronald C S, Crossey L J, Hagen E S, Heasler H P. 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73: 1–23.
- Saïag J, Brigaud B, Portier É, Desaubliaux G, Bucherie A, Miska S, Pagel M. 2016. Sedimentological control on the diagenesis and reservoir quality of tidal sandstones of the Upper Cape Hay Formation (Permian, Bonaparte Basin, Australia). *Marine and Petroleum Geology*, 77: 597–624.
- Wang Z Y, Xie Q W, Cao Y C, Miruo L, Wang Y S, Li Y Z, Wang X, Xi K L, Mi L S, Guo Y C, Du Y J. 2020. Influence of multistage oil emplacement on carbonate cementation in the Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 112: 104063.
- Worden R H, Morad S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. In: Worden R, Morad S (eds). *Quartz cementation in sandstones*. Oxford, United Kingdom, Blackwell Publishing, 29: 1–20.
- Worden R H, Burley S D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution from sand to stone. In: Burley S D, Worden R H (eds). *Sandstone diagenesis: recent and ancient*. Gent, Belgium, International Association of Sedimentologists Reprint Series, 4: 3–44.
- Worden R H, Morad S. 2003. Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution. In: Worden R H, Morad S (eds). *Clay mineral cements in sandstones*. John Wiley & Sons, Ltd., 34: 3–41.
- Worden R H, Griffiths J, Wooldridge L J, Utley J E P, Lawan A Y, Muhammed D D, Simon N, Armitage P J. 2020. Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, 204: 103105.
- Xia C, Wilkinson M, Haszeldine S. 2020. Petroleum emplacement inhibits quartz cementation and feldspar dissolution in a deeply buried sandstone. *Marine and Petroleum Geology*, 118: 104449.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)