



移动阅读

杜春阳, 唐闻强, 杜秋定, 等, 2023. 柴达木盆地冷湖地区侏罗系致密砂岩储层特征与控制因素[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 501-514. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12011

DU C Y, TANG W Q, Du Q D, et al., 2023. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir of the Jurassic strata in the Lenghu region, Northern Qaidam Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 501-514. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12011

柴达木盆地冷湖地区侏罗系致密砂岩储层特征与控制因素

杜春阳¹, 唐闻强^{1,2*}, 杜秋定³, 杨嘉宝⁴, 徐博¹, 火宁²,
泽仁拉姆², 丁晓军⁵

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司, 四川 成都 610051;
3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 4. 核工业二八〇研究所, 四川 广汉 618300; 5. 中
国石油青海油田勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘要: 冷湖地区侏罗系地层油源丰富, 储层致密化程度高, 为查明低孔低渗储层成因机制, 剖析储层发育控制因素, 利用普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、全岩 X 衍射矿物分析、物性分析、核磁共振分析等多种分析测试手段, 对研究区侏罗系储层的岩石学特征、孔隙类型、物性与成岩作用特征进行研究。结果显示: (1) 研究区侏罗系储层主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩, 孔隙类型以次生溶孔为主, 原生孔隙残留少, 微孔隙占比高, 孔隙度平均为 9.96%, 渗透率平均为 $2.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于特低孔、超低渗致密储层。(2) 储层成岩作用类型以压实作用、胶结作用和溶蚀作用为主, 成岩演化主要处于中成岩 A 期, 成岩序列可概括为: 机械压实改造—少量早期方解石胶结—长石、岩屑轻微溶蚀—石英 I 期加大—有机酸流体侵入、长石岩屑强烈溶蚀—黏土矿物广泛出现—石英 II 期加大—长石、岩屑、黏土矿物伊利石化—少量含铁碳酸盐胶结。(3) 多种成岩作用综合制约着致密砂岩储层的发展进程。煤系地层富含水生、陆生动植物遗体, 沉积后至成岩早期有机质分解产生腐殖酸并形成酸性环境, 早期碳酸盐胶结物不甚发育, 碎屑颗粒间欠缺方解石胶结物支撑, 压实作用导致原生孔隙大幅降低; 成岩中期广泛存在的黏土矿物占据孔隙空间, 分割大孔隙为无数微孔隙, 黏土矿物的胶结作用进一步加剧了储层致密化; 有机质热演化过程中释放的有机酸性流体对长石的持续溶蚀形成较多次生孔隙, 有效改善了储层物性。本研究深化了柴北缘致密砂岩储层物性与成岩作用特征的认识, 对开展进一步油气勘探具有指导意义。

关键词: 冷湖地区; 致密砂岩; 成岩作用; 储层物性

中图分类号: P575.2

文献标识码: A

Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir of the Jurassic strata in the Lenghu region, Northern Qaidam Basin

DU Chunyang¹, TANG Wenqiang^{1,2*}, DU Qiuding³, YANG Jiabao⁴, XU Bo¹, HUO Ning², ZEREN Lamu²,
DING Xiaojun⁵

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Petro China Southwest Oil and gas field company, Chengdu 610051, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. No.280 Research Institute of Nuclear Industry, Guanghan 618300, China; 5. CNPC Qinghai

收稿日期: 2020-09-16; 改回日期: 2021-12-13; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 万友利

作者简介: 杜春阳 (1994—), 硕士研究生, 主要从事沉积地质工作。E-mail: 785022346@qq.com

通讯作者: 唐文强 (1988—), 博士研究生, 主要从事油气地质工作。E-mail: 365707690@qq.com

资助项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项基金 (2016E-0104GF)

Oilfield Exploration and Development Research Institute, Dunhuang 736202, China)

Abstract: The Jurassic strata in Lenghu area are rich in oil and gas resources and have a high degree of reservoir densification. In order to find out the genetic mechanism of porous and low permeability reservoirs and to analyze the controlling factors of reservoir development, a variety of experimental methods are used in this work, such as analyses of normal thin-section, cast thin-section and scanning electron microscope, X-ray diffraction of clay minerals and nuclear magnetic resonance. Based on the description of petrology characteristics of reservoir pore structures characterization and physical characteristics, the characteristics of reservoir diagenesis are investigated. The results show the following: (1) The rock types of the Jurassic reservoir rocks in the study area are mainly feldspathic lithic sandstones and lithic sandstones. The main pore types of sandstones are mainly secondary solution pore and the proportion of micro pores are relatively high. The average porosity of sandstone is 9.96% and the average permeability of sandstone is $2.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, belonging to special low porosity-ultra-low permeability reservoirs. (2) The types of diagenesis are mainly compaction, cementation and dissolution. The diagenetic evolution mainly takes place during the mesodiagenetic phase A. The diagenetic sequence can be summarized as follows: compaction - a small amount of calcite cement is formed - feldspar and rock debris are slightly corroded - secondary enlargement of quartz - feldspar and rock debris are strongly corroded due to the formation of a large number of organic acids - clay minerals appear widely - secondary enlarged edges appear again in quartz particles - feldspar, rock debris and clay minerals are gradually transformed into illite - a small amount of iron-bearing calcite cement is formed. (3) Various types of diagenesis had once played important roles in the formation of ultra-low permeability tight sandstone reservoirs. The coal measure strata were rich in the remains of aquatic and terrestrial animals and plants. After the sediment was buried, the organic matter can decompose and produce humic acid, and then form an acidic environment. There were little calcite cements in the clastic reservoir because of the acidic water medium condition of the coal measures strata in the early diagenetic stage. The strong compaction greatly reduced the primary porosity. The widespread clay minerals occupy the pore space and divide the macropores into countless micro pores. The cementation of clay minerals further intensifies the reservoir densification, which intensifies the process of reservoir densification. The continuous dissolution of feldspar and rock debris components by organic acid fluids which came from thermal evolution of organic matter played a key role in improving reservoir physical properties. This study can deepen the understanding of diagenetic evolution of tight sandstone reservoir in the northern margin of Qaidam Basin, which has a guiding significance for further oil and gas exploration.

Key words: Lenghu region; tight sandstone; diagenesis; reservoir physical properties

0 引言

柴达木盆地北缘孕育了一套以侏罗系含煤地层为烃源岩的含油气系统, 该区暗色泥岩、泥页岩厚度巨大, 分布广泛, 源储配置齐全, 具有较高的油气勘探前景(穆剑等, 1999; 高先志等, 2002; 邵龙义等, 2014)。已有众多学者从沉积体系、古气候条件、盆地构造演化等角度探讨了该区烃源岩的成因机制, 从沉积相、物源、岩性组合、成岩作用等方面分析了储层特征及其发育控制因素(陈吉等, 2013; 仵宗涛等, 2016; 刘伟明等, 2018; 王猛等, 2019)。前人的研究表明柴北缘储集岩基本以致密砂岩储层为主, 具有岩性致密、低孔低渗、气藏压力系数低、圈闭幅度低、自然产能低等不利于油气勘探的典型特征(张梦林, 2012; 张杰等, 2014)。近年来, 工业油气流的陆续发现使得柴北缘逐渐成为

热点勘探地区, 但致密储层的广泛发育成为限制该区油气藏进一步勘探开发的首要因素。作为生储盖组合的重要组成部分, 储集岩对油气的运移和赋存具有重要控制作用, 而柴北缘侏罗系地层受高埋深、剥蚀强烈、欠缺钻孔资料以及地震反射特征不明显等不利因素影响, 针对致密砂岩储层的认识仍不够深刻, 有待加强。基于此, 文中选取目前报道较少的柴北缘冷湖地区侏罗系地层钻孔岩心, 通过岩矿测试、薄片鉴定等手段, 从统计学和微观分析的角度, 对柴北缘侏罗系碎屑岩储层的物性特征、岩石学特征、孔隙类型、成岩作用类型等进行研究, 探讨储层发育控制因素, 以期深化柴北缘储集岩研究和油气勘探开发提供基础地质证据。

1 地质背景

柴达木盆地地处青藏高原北部, 为中生代陆相

盆地。盆地以大型断裂为界与周缘构造单元相隔,北邻南祁连褶皱系,南连东昆仑造山带,西缘为塔里木盆地,东接西秦岭造山带,具有构造活动频繁、沉积物源多样等特征(吕宝凤等,2011)。研究区冷湖构造带位于柴达木盆地北缘,沿祁连山走向由一系列雁行排列的背斜构成,呈北西—南东反“S”型,属晚期挤压隆起型构造带,主要发育冷湖三号、冷湖四号、冷湖五号、冷湖六号和冷湖七号5个三级构造单元,与昆特依凹陷、赛什腾凹陷等数个生烃中心相邻,是油气聚集的优势区块(图1;周飞等,2019)。冷湖地区发育侏罗系、古近系、新近系,自南东向北西地层逐渐抬升,出露地层由新变老,油气资源主要产于中、下侏罗统烃源岩地层。受控于原型盆地结构和后期构造活动的叠加改造,侏罗系地层空间分布复杂,呈叠合深埋、抬升剥露等不同赋存状态,下侏罗统广泛分布于冷西—伊北凹陷,中侏罗统主要分布在赛什腾—鱼卡凹陷(闫占冬,2017)。柴北缘侏罗纪时期古气候温暖湿润,物源

供给充足,该区经历了早、中侏罗世的辫状河三角洲-湖泊沉积至晚侏罗世湖泊消亡后代之以辫状河沉积的两大沉积演化阶段,形成了一套以砂砾岩、砂岩、泥岩、页岩夹煤层为主的含煤碎屑岩地层,重要的储集岩类型为辫状河河道与三角洲平原及前缘分流河道的砂砾岩、粗砂岩和中砂岩等(金振奎等,2006;谢庆宾等,2000;杨永泰等,2000)。

2 储层岩石学特征

冷湖地区侏罗系储层岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,次为长石石英砂岩、岩屑石英砂岩等(图2)。石英含量为10.2%~88.1%,长石含量为11.8%~78.4%,岩屑含量为7.4%~88.2%。砂岩粒度以中—粗粒者居多,分选中等—差,次棱角—次圆状,碎屑颗粒主要呈线接触或凹凸接触(图3,图4a)。X衍射全岩矿物分析显示,侏罗系砂岩石英含量平均为46.3%,长石含量平均为14%,黏土矿物含量较高,平均为31.7%,主要为高岭石、

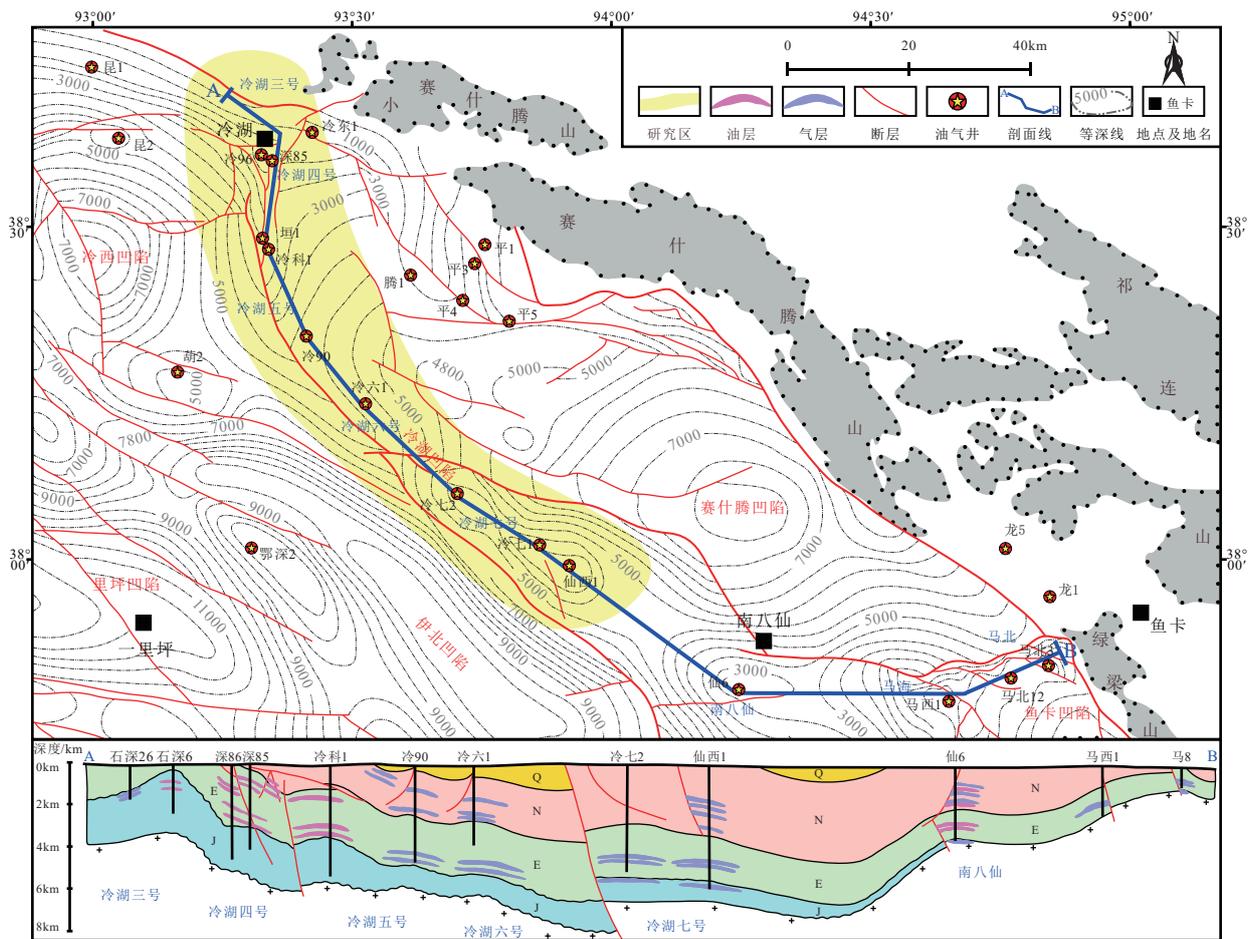


图1 冷湖构造带地理位置与地层油气藏剖面示意

Fig. 1 The diagram of geographical position and reservoir profile in Lenghu tectonic belts

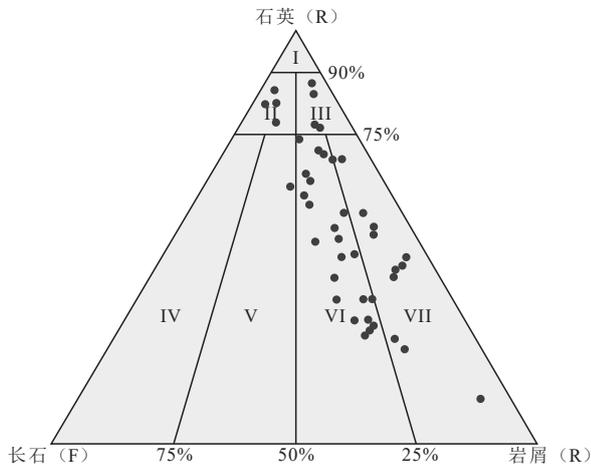
伊蒙混层、伊利石、蒙脱石(图 3)。据薄片观察,砂岩中富含各种岩屑,多为千枚岩、石英岩、片麻

岩等变质岩岩屑(图 4c), 填隙物以泥质为主(图 4d), 次为方解石, 此外尚有白云石、铁白云石、黄铁矿, 都为零星分布。整体来看, 冷湖地区侏罗系砂岩表现为低成分成熟度、中结构成熟度之特征。

3 孔隙类型与孔喉结构

3.1 孔隙类型

铸体薄片与扫描电镜资料显示, 研究区侏罗系砂岩原生孔隙残留少, 仅见少量残余粒间孔(图 4d), 储集空间类型以粒间溶孔、粒内溶孔等次生孔隙为主, 亦见杂基内微孔隙与少量微裂缝。粒间溶孔通常是易溶颗粒边缘或填隙物受溶蚀而形成的孔隙, 具有形状不规则、分布不均匀、孔径大小差异大等特征(图 4d)。粒内溶孔是颗粒内部受溶蚀改造而形成的孔隙, 常见者为千枚岩、片麻岩岩屑中云母等易溶蚀组分选择性溶蚀(图 4e)或长石沿解理缝溶蚀形成的粒内溶孔(图 4f,g)。杂基微孔隙是杂基中由于微小颗粒支撑而保留的大量微孔隙(图 4h), 只在数量上对储集空间起到积极作用, 其对岩石总孔隙度有贡献, 而对渗透率贡献甚



I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩。

图 2 研究区侏罗系砂岩三角分类图

Fig. 2 Classification map of Jurassic sandstone triangle in the research area

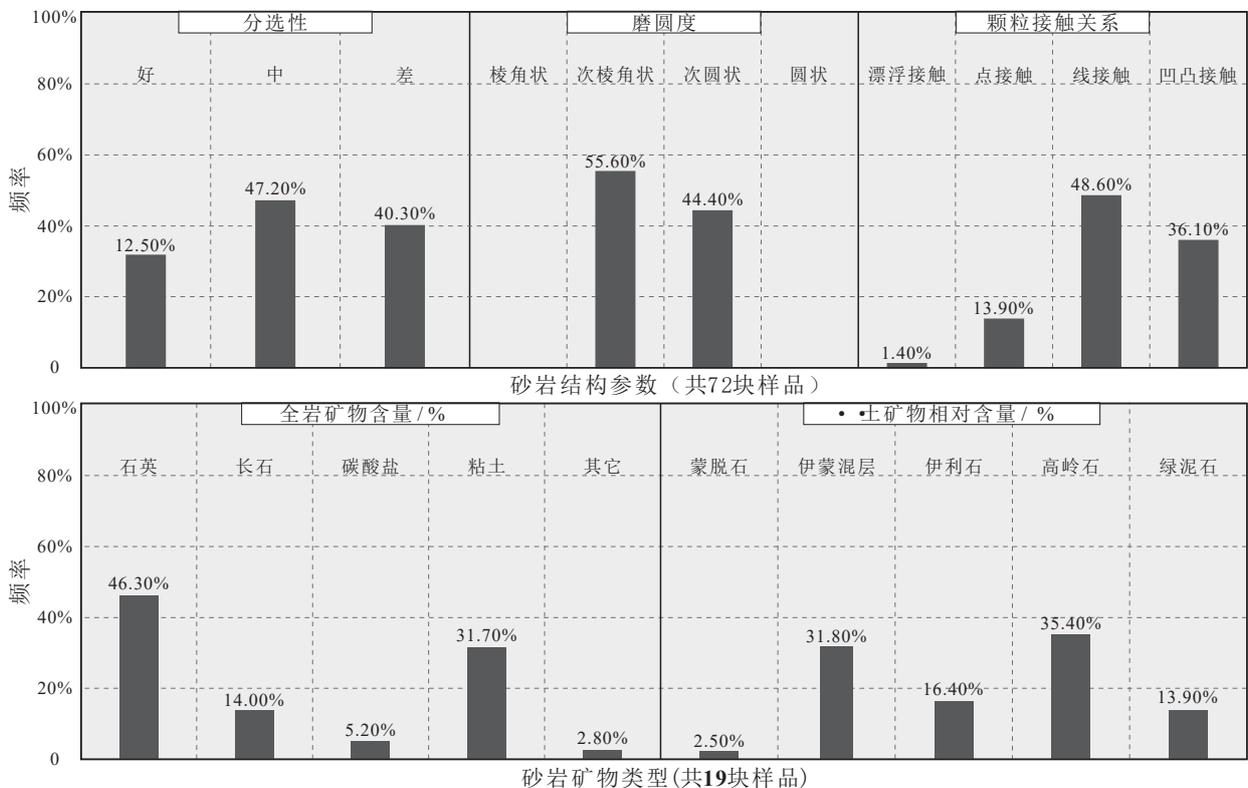
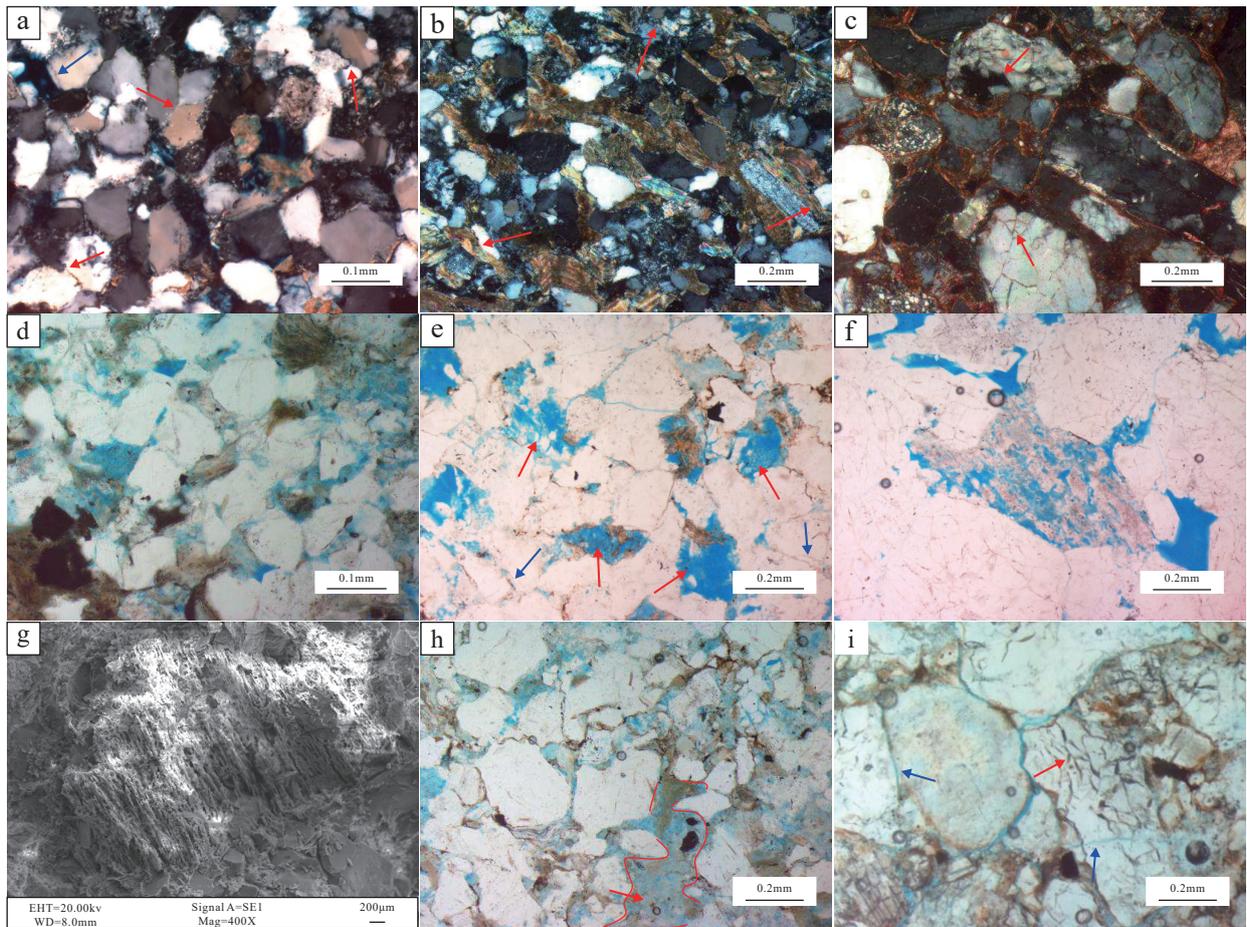


图 3 研究区侏罗系砂岩结构参数与 X 衍射矿物成分含量分布直方图

Fig. 3 Histogram of structural parameters and X-diffraction mineral composition distribution of Jurassic sandstone in the research area



a. 冷科 1 井, 4307.92 m, 细粒长石石英砂岩, 颗粒紧密排列, 线接触或凹凸接触 (红色箭头), 石英颗粒发育次生加大边 (蓝色箭头); b. 冷 95 井, 3357.89 m, 细粒岩屑砂岩, 片状颗粒略具定向排列, 塑性颗粒弯曲变形 (红色箭头); c. 深 85 井, 3204.00 m, 中粒岩屑砂岩, 基底式胶结, 杂基含量高, 刚性颗粒破裂 (红色箭头); d. 冷 95 井, 3357.89 m, 残余粒间孔, 叠加次生粒间溶孔, 孔隙大小不一、形态各异; e. 冷科 1 井, 4311.63 m, 粒内溶孔 (红色箭头), 石英次生加大边发育, 加大边与石英颗粒间见尘线 (蓝色箭头); f. 冷科 1 井, 4315.56 m, 长石沿解理发生选择性溶蚀, 形成粒内孔 (红色箭头); g. 冷科 1 井, 4307.58 m, 扫描电镜, 粒内溶孔, 长石溶蚀成蜂窝状; h. 深 85 井, 3051.25 m, 杂基内微孔隙 (红色虚线内染蓝色部分); i. 深 85 井, 3204 m, 微裂缝, 未充填 (蓝色箭头) 或褐色泥质充填 (红色箭头)。

图 4 侏罗系储层岩石类型与孔隙特征显微照片

Fig. 4 Micrograph of rock types and pore characteristics of Jurassic reservoir

微。裂缝类型多为构造应力、上覆地层压力等作用形成的微裂缝, 分布较少, 一般沿粒间形成, 个别可切穿石英、长石等刚性颗粒, 部分被泥质充填 (图 4i)。

3.2 孔喉结构与物性特征

据冷科 1 井、冷 95 井、深 85 井侏罗系的 37 块砂岩的物性测试数据, 储层孔隙度介于 3%~16.9%, 平均为 8.99%, 其中 89.19% 的样品孔隙度介于 5%~15%; 渗透率介于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其中 86.49% 的样品渗透率低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 基本属于低或特低孔、超低渗致密储层 (图 5a,b)。储层孔隙度与渗透率

相关性不明显 (图 6a), 推测存在两点原因: 一是砂岩中各孔隙相对孤立, 连通孔隙的喉道不规则, 多呈细片状或弯片状, 彼此连通性较差, 未能形成良好的渗流网络; 二是广泛存在的黏土矿物将大量粒间孔隙分隔, 岩石渗流能力降低, 因而砂岩虽具有相对高的孔隙度, 但渗透率偏低。

岩石压汞分析是研究储层孔喉结构的常用手段之一, 通过压汞分析可以计算岩石孔喉大小及分布情况 (Torabi et al., 2013; 窦文超等, 2016)。反映岩石孔喉大小的参数包括最大连通喉道半径、主流喉道半径、平均孔喉半径与饱和度中值孔喉半

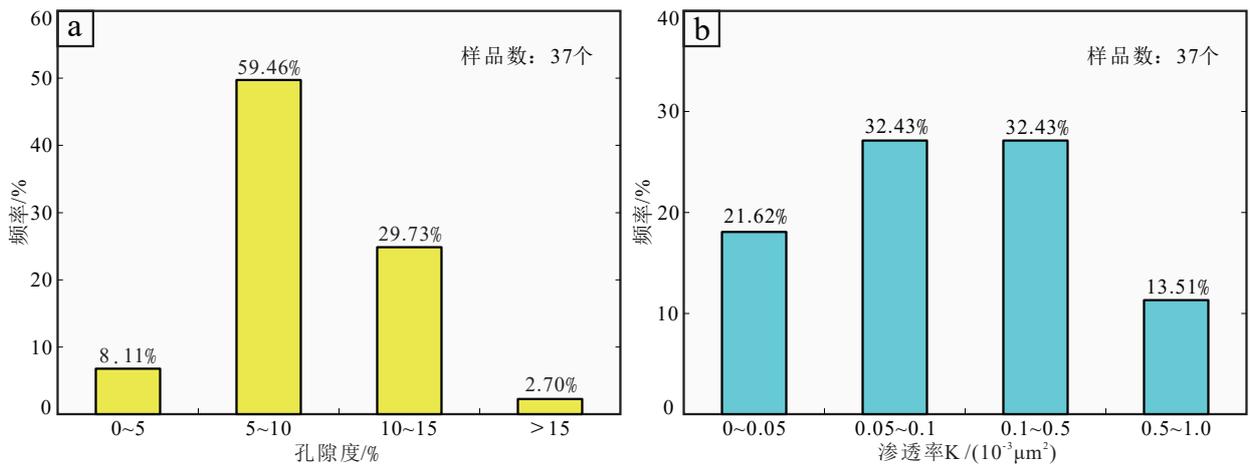
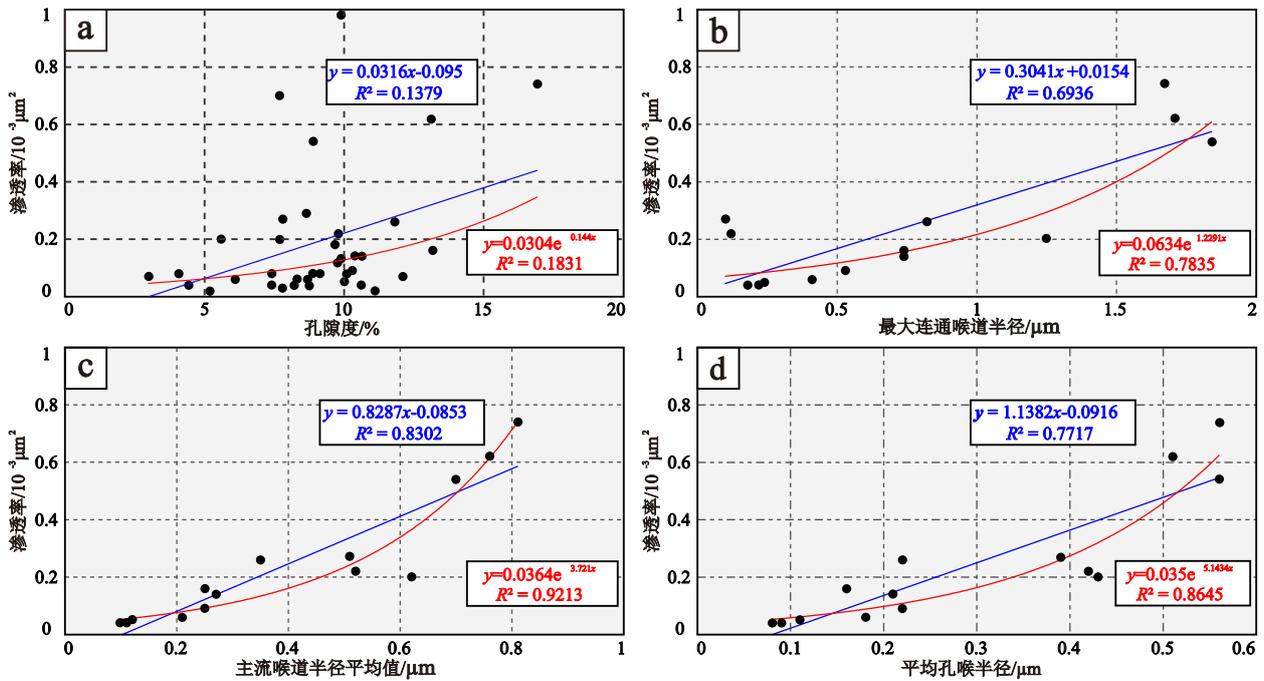


图 5 冷湖地区侏罗系砂岩孔隙度 (a) 和渗透率 (b) 特征

Fig. 5 Porosity(a) and permeability(b) of Jurassic sandstone reservoirs in Lenghu Area



a. 孔隙度与渗透率相关性; b. 最大联通喉道半径与渗透率相关性; c. 主流喉道半径平均值与渗透率相关性; d. 平均孔喉半径与渗透率相关性。

图 6 砂岩储层渗透率与孔隙度和各类孔喉半径相关性关系图

Fig. 6 Correlation between permeability and porosity of porous sandstone and various pore throat radius of sandstone reservoir

径等, 本文主流喉道半径平均值取渗透率贡献达 99.5% 对应喉道半径的平均值。据冷湖地区 14 块侏罗系砂岩的压汞分析数据, 储层平均孔喉半径介于 0.09~0.56 μm, 平均为 0.30 μm; 饱和度中值半径介于 0.01~0.32 μm, 平均 0.12 μm; 主流喉道半径平均值介于 0.10~0.81 μm, 平均为 0.40 μm; 最大连通喉道半径介于 0.10~1.84 μm, 平均为 0.87 μm, 孔喉

整体偏细(表 1)。储层压汞曲线排驱压力平均为 2.26 MPa, 进汞曲线平台不明显, 部分曲线略具粗歪度特征(图 7a), 孔喉半径分布图显示大孔喉占有一定比例(图 7b), 这说明致密砂岩储层中也存在少量孔喉结构较好的样品。这种大孔喉的存在可能是长石或岩屑颗粒溶蚀后形成的粒内孔彼此联系贯通所致。

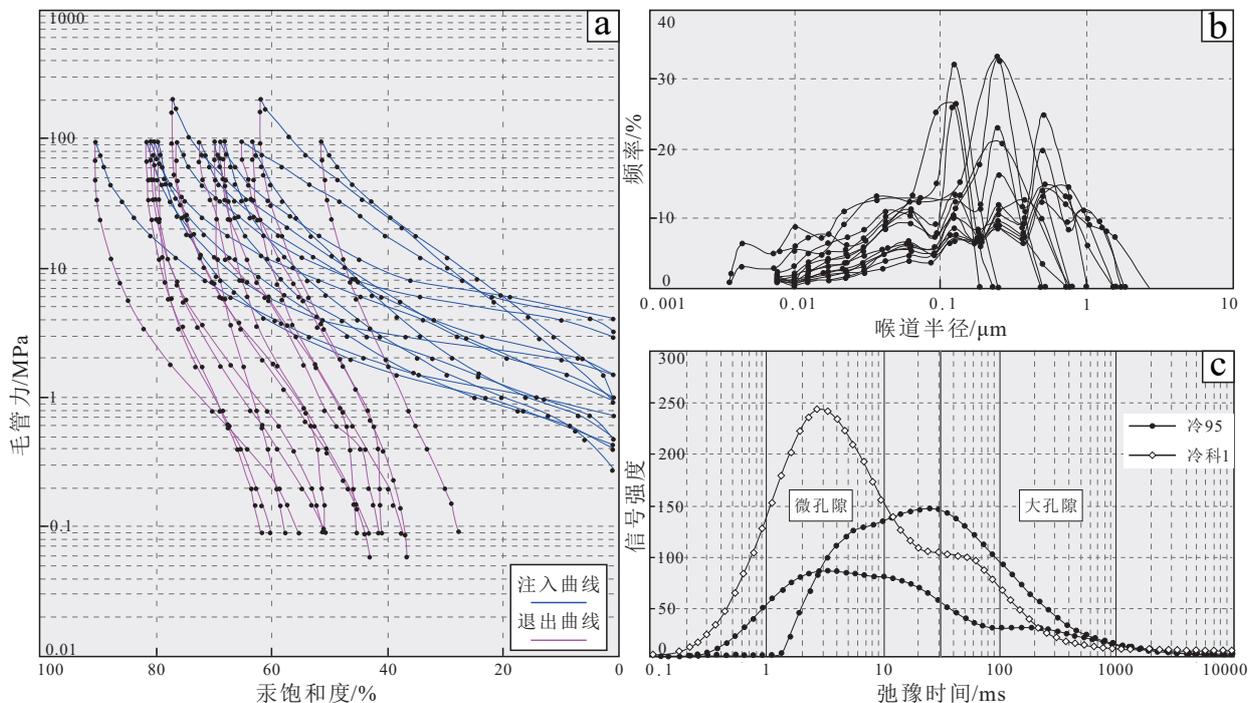
孔喉的基本特征与岩石渗透率密切相关 (Ehrlich and Crabtree, 1991)。从储层样品的渗透率与孔喉参数相关性曲线来看,渗透率与主流喉道半径平均值相关性最好(图 6b-d),其相关系数的平方达 0.83 以上,意味着以主流喉道半径平均值表征

岩石孔喉大小更为合理。这是因为对于低渗储层样品,微细孔喉在储层空间中占比虽大,却只有很小甚至并无渗流能力;而较大的孔喉虽然占据小部分孔隙空间,却贡献了绝大多数渗透率。主流喉道半径平均值别除了对渗透率贡献非常小的微细孔

表 1 冷湖地区侏罗系储层压汞参数统计表

Table 1 Statistical table of mercury parameters of Jurassic reservoirs in the research area

井号	深度 /m	孔隙度 /%	渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	SHg _{max} /%	退汞效率 /%	排驱压力 /MPa	最大连通喉道半径/ μm	平均孔喉半径/ μm	主流喉道半径平均值/ μm	饱和度中值半径/ μm
冷科1	3 482.60	16.90	0.74	67.16	37.13	0.44	1.67	0.56	0.81	0.12
冷科1	4 307.74	10.00	0.05	75.23	34.07	3.10	0.24	0.11	0.12	0.07
冷科1	4 310.77	7.80	0.27	89.27	39.08	7.10	1.05	0.39	0.51	0.31
冷科1	4 311.45	7.40	0.04	64.01	37.63	3.30	0.22	0.08	0.11	0.02
冷科1	4 312.33	7.70	0.20	62.27	41.62	0.59	1.25	0.43	0.62	0.06
冷科1	4 314.08	10.60	0.04	67.82	34.87	4.05	0.18	0.09	0.10	0.04
冷科1	4 314.55	10.30	0.09	80.52	24.79	1.40	0.53	0.22	0.25	0.18
冷科1	4 315.36	9.80	0.22	68.75	17.67	6.10	0.89	0.42	0.52	0.15
冷科1	4 318.74	8.70	0.06	71.45	43.41	1.80	0.41	0.18	0.21	0.07
冷科1	3 482.90	13.10	0.62	79.37	36.83	0.43	1.71	0.51	0.76	0.18
冷科1	4 315.41	10.40	0.14	79.92	37.39	1.00	0.74	0.21	0.27	0.10
冷科1	4 320.26	8.90	0.54	78.87	25.00	0.40	1.84	0.56	0.70	0.32
冷95	3 358.00	11.80	0.26	76.15	45.08	0.90	0.82	0.22	0.35	0.06
冷95	3 358.45	13.20	0.16	61.03	41.71	0.99	0.74	0.16	0.25	0.01
平均值		9.96	0.26	72.99	35.45	2.26	0.87	0.30	0.40	0.12



a. 储层压汞曲线; b. 储层喉道半径分布; c. 储层核磁共振 T2 谱图。

图 7 砂岩储层物性参数综合曲线图

Fig. 7 Comprehensive curves of physical parameters of sandstone reservoir

喉,故其与渗透率的相关性更好。

核磁共振分析是研究储层孔隙结构的有效方法,可获取岩石可动水饱和度与束缚水饱和度,二者与岩石的渗流能力密切相关(王学武等,2010)。文中选取3块侏罗系砂岩储层样品进行核磁共振分析,根据核磁 T_2 谱图,储层中微孔隙占比较大(图7c),束缚水剪和度高,平均为70.69%(表2),这可能与砂岩中黏土矿物的含量及分布有关。冷湖地区侏罗系砂岩填隙物以自生黏土矿物为主,丝发状伊利石、书页状高岭石等广泛分布,充填粒间,将储集空间分割为无数微孔隙,微孔隙占比增加,束缚水饱和度升高,因而储层呈现相对高孔低渗之特征。

4 砂岩储层成岩作用

4.1 成岩作用类型

储集岩的一系列成岩变化控制着孔隙的形成与保存,对储层物性优劣起决定性作用(王凤琴等,2006)。综合普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、X-衍射等资料认为,冷湖地区侏罗系地层埋深大,成岩作用复杂,成岩类型以压实作用、溶蚀作用、胶结作用为主。

4.1.1 压实作用

沉积物埋藏早期阶段,地层埋深低于2000m时,压实作用占据主导地位,受上覆地层增厚和静水压力影响,沉积物体积缩小并发生排水、脱水作用,如果欠缺早期胶结物,机械压实可大幅降低原生粒间孔隙,且此过程是不可逆的(郑浚茂等,1997)。研究区侏罗系砂岩机械压实作用强烈,表现为:①碎屑颗粒呈线状或凹凸状接触(图4a,图8a);②片状颗粒定向排列(图4b);③云母、泥砾、千枚岩岩屑等塑性组分弯曲变形(图4b,图8b);④石英、长石等刚性颗粒破裂(图4c,图8c)。

4.1.2 溶蚀作用

研究区侏罗系砂岩的溶蚀作用主要表现为长石、岩屑等颗粒的不完全溶解,常见者为长石沿颗

粒边缘或解理发生溶蚀,形成较多粒间溶孔或粒内溶孔(图4d-g)。长石的溶蚀作用从风化剥蚀阶段开始,到进入盆地沉积,直至整个成岩阶段都可持续进行,其溶蚀一般从颗粒内部开始,酸性流体沿解理缝或双晶面的机械破裂缝渗透,形成粒内微孔,粒内微孔进一步溶蚀,最终发展成为较大的溶蚀孔或铸模孔(Walderhaug,1994)。长石溶蚀是改善本区储层物性的关键成岩作用,其形成的粒间溶孔与粒内溶孔是侏罗系砂岩最主要的孔隙空间类型。

4.1.3 胶结作用

镜下观察表明侏罗系砂岩发育多期胶结作用,胶结物类型丰富,以黏土矿物胶结为主,次为硅质胶结,碳酸盐胶结作用相对较弱。

(1)黏土胶结作用

黏土胶结物以高岭石和伊蒙混层为主,其次为伊利石和绿泥石。高岭石相对含量平均为35.4%,一般认为其主要形成于酸性环境,孔隙水与黏土矿物转变释放的 SiO_2 和 Al^{3+} 可为高岭石的形成提供物质基础(张杰等,2014),扫描电镜下多呈蠕虫状、书页状贴附于石英颗粒边缘或充填粒间孔隙(图8e-f);伊蒙混层相对含量平均为31.8%,属于蒙脱石向伊利石转化的中间产物,多呈蜂窝状或絮状充填粒间(图8h);伊利石相对含量平均为16.4%,可在富 K^+ 弱碱性流体环境中由高岭石或蒙脱石转变而成(王猛等,2021),多呈片状、丝发状贴附于石英、高岭石、绿泥石、伊蒙混层等颗粒表面(图8g、h),考虑到研究区伊蒙混层广泛存在,加之蒙脱石含量已显著降低,推测伊利石更可能来自于蒙脱石的伊利石化过程;绿泥石相对含量平均为13.9%,呈柳叶状、板片状或薄膜状附着于碎屑颗粒表面。

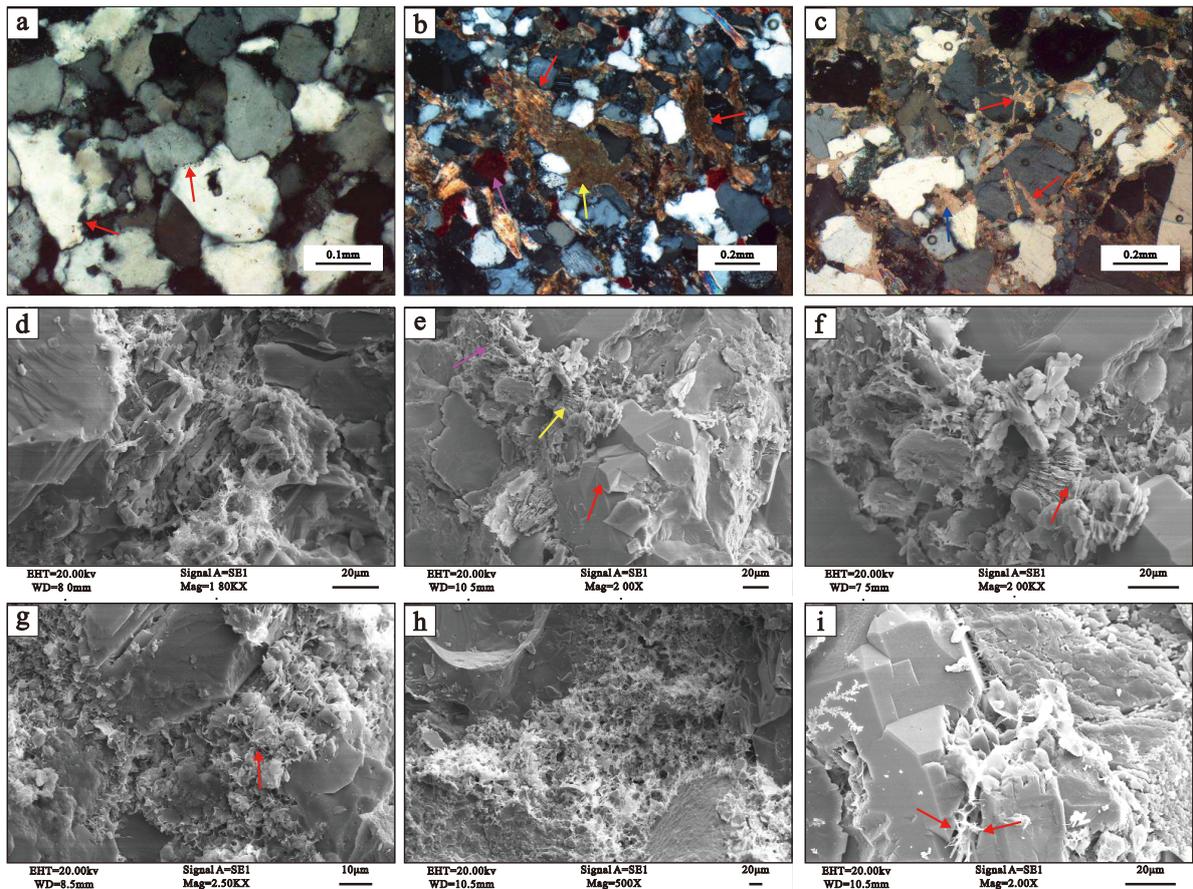
(2)硅质胶结作用

硅质胶结物常以石英次生加大的形式产出,含少量微晶石英,加大边一般为II~III级加大,环绕于石英颗粒周围,形成致密硅质胶结(图4a,e,图8e-f),部分石英次生加大边与石英颗粒间可见尘边及

表2 砂岩核磁共振参数统计表

Table 2 Statistical table of nuclear magnetic resonance parameters

井号	样号	深度/m	层位	核磁孔隙度/%	核磁渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	束缚水饱和度/%	可动水饱和度/%
冷科1	7	4307.92	J	7.17	2.54	58.55	41.45
冷科1	14	4318.01	J	4.59	1.06	73.61	26.39
冷95	4	3357.89	J	11.12	0.20	79.92	20.08
	平均值			7.63	1.27	70.69	29.31



a. 颗粒呈线状-凹凸状接触，部分碎屑石英发生压溶，颗粒间呈锯齿状或缝合线状接触（红色箭头），冷科1井，3482.10 m；b. 千枚岩岩屑、云母等塑性颗粒被刚性颗粒压弯变形（红色箭头），泥砾呈假杂基充填粒间（黄色箭头），染红色物质为方解石胶结物（紫色箭头），冷95井，3357.89 m；c. 方解石胶结物呈嵌晶，长石破裂后充填方解石胶结物（红色箭头），冷四1井，2832.10 m；d. 长石颗粒内部溶蚀，呈筛网状，冷科1井，4307.58 m，扫描电镜；e. 石英次生加大（红色箭头），书页状高岭石附着石英颗粒表面（黄色箭头），片丝状伊利石充填粒间（紫色箭头），冷科1井，3482.25 m，扫描电镜；f. 书页状高岭石（红色箭头），冷科1井，3482.25 m，扫描电镜；g. 叶片状伊利石（红色箭头），冷科1井，3482.25 m，扫描电镜；h. 伊蒙混层为主，表面发育丝状伊利石，冷科1井，4317.91 m，扫描电镜；i. 石英次生加大，加大边处见黏土矿物（红色箭头）冷科1井，4315.56 m，扫描电镜。

图8 研究区侏罗系砂岩成岩作用显微照片

Fig. 8 Typical diagenesis of Jurassic Sandstone in research area

黏土矿物(图8i)。石英次生加大通常始于70℃左右,当成岩温度增至100℃、孔隙水中 SiO_2 达到饱和条件且pH增至9~9.8时,石英可进一步次生加大至Ⅲ级(张杰等,2014),长石溶蚀、石英压溶、硅酸盐矿物溶解以及黏土矿物转化等释放的 SiO_2 是硅质胶结物的主要物质来源(张大智等,2021)。

(3) 碳酸盐胶结作用

碳酸盐胶结物含量相对低,平均为5.25%,分布不均(图8b),类型包括方解石、铁方解石、铁白云石等,其胶结方式主要分为2种:一是呈粉晶、微晶或基底式胶结,为准同生至成岩早期阶段产物(图8c);二是呈嵌晶、连晶状充填于孔隙或交代碎

屑颗粒的(含铁)碳酸盐,镜下可见其充填于长石裂缝或港湾状颗粒边缘(图8c),表明碳酸盐胶结发生于长石挤压破裂、溶蚀作用之后,属早成岩末期至中成岩阶段产物。

4.2 成岩演化阶段与成岩演化序列

基于冷湖地区侏罗系砂岩的骨架颗粒接触关系、孔隙类型、成岩作用特征、自生矿物组合以及泥岩镜质体反射率等标志,对其成岩阶段进行划分。砂岩碎屑颗粒多呈线接触或凹凸接触,压实作用强烈;孔隙类型主要为粒间溶孔和粒内溶孔;胶结作用表现为黏土胶结与硅质胶结;黏土矿物以高岭石、伊蒙混层、伊利石和绿泥石为主;石英发育Ⅱ-Ⅲ级

次生加大;泥岩镜质体反射率(R_o 值)介于0.54%~1.65%,平均为1%(图9)。根据石油行业碎屑岩成岩阶段划分标准(SY/T5477-2003),判断研究区侏罗系储层目前主要处于中成岩阶段A期。在此基础上,依据侏罗系砂岩沉淀矿物的世代期次及其接触关系,结合成岩作用特征,建立起成岩演化序列(图9)。(1)同沉积阶段,沉积物原始孔隙度高,成岩作用主要为机械压实作用,造成原生孔隙降低。(2)早成岩A期:古低温低于65°C,镜质体反射率(R_o)低于0.35%,有机质未成熟,孔隙水介质偏酸性,机械压实作用使得原生孔隙进一步降低,长石轻微溶蚀并有少量自生高岭石生成,颗粒边缘出现黏土膜,孔隙类型以原生孔隙为主,少量无铁碳酸盐胶结物呈基底式充填孔隙。(3)早成岩B期:古地温65~85°C, R_o 为0.35%~0.5%,有机质半成熟,埋深持续增加,强烈的压实作用致使原生孔隙大幅降低,碎屑颗粒呈点-线接触,石英颗粒发育I级加大,长石开始溶蚀形成次生溶孔,书页状高岭石普

遍存在,孔隙类型主要为残余粒间孔和次生溶孔。(4)中成岩A期:古地温85~130°C, R_o 为0.5%~1.3%,有机质成熟并处于生烃高峰,孔隙水介质呈酸性,长石及岩屑等碎屑组分的第二期溶蚀作用大规模发生,蒙脱石向伊利石转化加快,形成中间产物伊蒙混层,高岭石、伊利石、绿泥石等黏土矿物广泛存在,出现少量含铁碳酸盐类胶结物,成岩流体中过饱和的 SiO_2 沉淀形成石英II级加大,孔隙类型以次生溶孔为主。上述储层的成岩演化序列可概括性地总结为:机械压实改造—少量早期方解石胶结—长石、岩屑轻微溶蚀—石英I期加大—有机酸流体侵入、长石岩屑强烈溶蚀—黏土矿物广泛出现—石英II期加大—长石、岩屑、黏土矿物伊利石化—少量含铁碳酸盐胶结物。

5 致密砂岩储层物性控制因素

5.1 压实作用对储层物性的影响

压实作用是造成冷湖地区侏罗系砂岩储层致

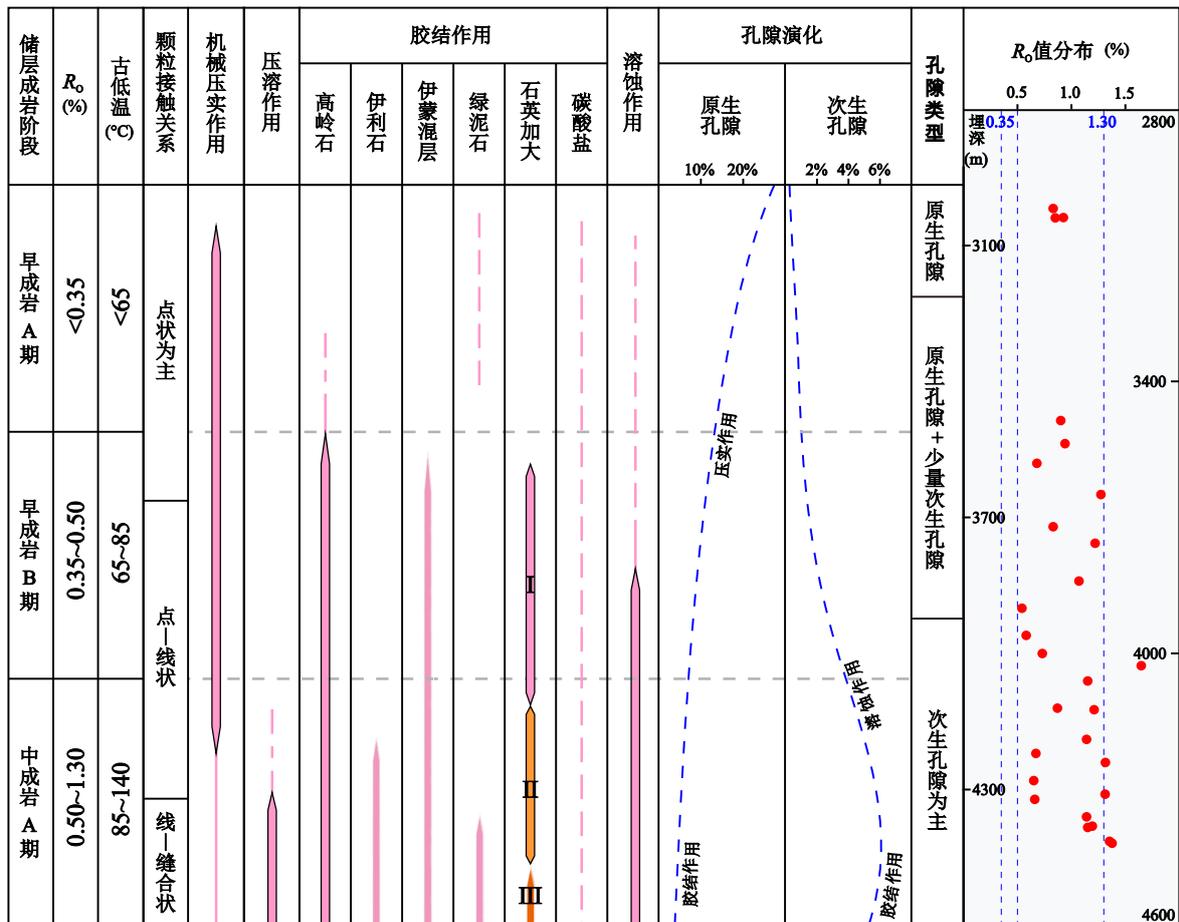


图9 冷湖地区侏罗系成岩序列图

Fig. 9 Diagenetic sequences of the Jurassic reservoir rocks in the Lenghu area

密化的主要因素。已有研究表明,柴达木盆地侏罗纪古气候温暖潮湿,植被茂盛,形成一套软质煤系地层(胡俊杰等,2017;杜建军等,2017)。煤系地层中富含水生、陆生植物遗体,埋藏后易产生腐植酸,成岩早期的酸性水介质条件不利于方解石结晶沉淀,碳酸盐胶结不甚发育,碎屑组分缺乏粒间支撑,加之砂岩中富含千枚岩、泥质岩等软质岩屑与较多云母及泥砾,颗粒分选一般,抗挤压能力弱,因而成岩早期压实作用十分发育。受压实作用影响,碎屑颗粒彼此间多呈线接触或凹凸接触,塑性岩屑、云母等碎屑组分被压扁变形,泥砾呈假杂基充填粒间,长石、石英等刚性颗粒挤压破裂,裂缝被后期泥质或钙质胶结物充填,原生孔隙损失严重。

理论上,砂质沉积物沉积初期,初始孔隙度可达40%左右(Beard and Weyl, 1973),冷湖地区侏罗系砂岩分选性相对较差,初始孔隙度有所降低。利用Scherer(1987)初始孔隙度恢复方法,通过特拉斯克分选系数对砂岩原始孔隙度进行估算,公式如下:

$$POR_{原始} = 20.91 + 22.9/S_0$$

式中: $POR_{原始}$ 为砂岩原始孔隙度; S_0 为特拉斯克分选系数。

不同类型的砂岩由于自身分选性的差异,其初始孔隙度有所差异。冷湖地区侏罗系砂岩分选系数介于1.37~4.86,平均为2.81,恢复初始孔隙度为37.62%~25.62%,平均29.14%。压实作用的减孔规律较为复杂,受沉积物组分、分选性、上覆地层压力等多种因素控制(寿建峰等,2006)。研究表明,相同粒度条件下,砂岩中塑性岩屑含量越高,可塑性越强,压实作用减孔速度越快,减孔量越高,当砂岩约含10%~25%塑性岩屑时,压实作用主要影响1500~2000 m地层埋深范围,减孔量一般为10%~15%,后期压实作用对孔隙的破坏有所降低,最终减孔量介于13%~20%(Pittman et al., 1991)。本区侏罗系砂岩富含塑性岩屑,早期方解石胶结发育不良,为压实作用的持续进行奠定了物质基础。据镜下观察与压实率计算,砂岩粒间体积(孔隙体积、填隙物体积与胶结物体积)约为4.8%~20.6%,平均为12.46%,压实作用对原始孔隙的平均减孔量约为21%。

5.2 胶结作用对储层物性的影响

冷湖地区侏罗系砂岩以黏土胶结为主,次为硅质胶结和碳酸盐胶结,多种类型的胶结作用同样是加剧储层孔隙度及渗透率降低的因素之一。黏土矿物中高岭石、伊蒙混层、伊利石与绿泥石较为普

遍,由于自身结构差异,对储层物性的影响各不相同。伊利石多呈片丝状、针状、搭桥状或集合体形态充填于孔隙或贴附于颗粒边缘生长,可在孔隙中构成丝缕状网络,易受流体冲移而堵塞喉道,减少粒间孔隙,致使砂岩渗透率降低,随着地层埋深增加,伊利石结晶程度不断提高,最终可转化为绢云母矿物(陈登钱等,2014)。高岭石呈书页状集合体贴附于孔隙壁或充填粒间,减少孔隙与喉道半径,但其晶间结构较疏松,晶间微空隙可作为天然气的有效储集空间(闫建萍等,2010)。叶片状或绒球状绿泥石对孔隙的充填往往导致部分孔隙与喉道堵塞,减少储层孔隙度,而当其以孔隙薄膜或孔隙衬边的形式存在碎屑颗粒边缘时,则能通过抑制压实压溶作用和石英加大以及促进溶蚀作用等起到建设性作用,进而使得部分粒间孔隙免于破坏(黄鑫等,2021)。整体而言,本区侏罗系砂岩中黏土矿物的胶结作用主要是以破坏性成岩作用为主的,高岭石、伊利石、绿泥石等不同产状的黏土矿物广泛充填并分割孔隙空间,致使孔隙喉道迂回曲折,孔隙间连通性降低,渗流能力减弱。核磁共振分析显示微孔隙占比很高,且储层渗透率与孔隙度相关性差,而与主流喉道半径相关性好,显然与黏土矿物的普遍存在有关。

硅质胶结主要表现为石英次生加大,尤其在石英含量较高、颗粒分选相对较好的砂岩中更为发育。硅质胶结发育的时间跨度较大,自早成岩阶段开始,可持续至晚成岩阶段。早期的硅质胶结可在一定程度上增加砂岩的抗压实能力,对原生孔隙的保存起到建设性作用。本区石英次生加大可达Ⅱ~Ⅲ级,主要形成于压实作用对孔隙的破坏减弱之后;中成岩阶段,泥岩中黏土矿物蒙脱石开始大量向伊利石转化,可提供较好的活性硅质作为硅质胶结物来源(Towe, 1962; Boles et al., 1979)。这些活性硅质易于在纯净的、分选好的、渗透性强的富石英砂岩中沉淀,形成石英次生加大边(Westcott, 1983),造成硅质胶结物含量显著增加并占据粒间孔隙,加剧储层致密化,对储层物性而言,整体上是一种破坏性成岩作用。

碳酸盐胶结物类型丰富,但含量相对较低。成岩早期适量的方解石沉淀,对压实作用起抵挡作用,有利于原生粒间孔的保存;如果存在较多早期方解石胶结物,随着地层埋深增加、成岩温度和压力的上升,方解石易于溶蚀,则有助于形成有意义的溶蚀孔隙(梁卫等,1994;王安发等,1995)。本区早期

方解石胶结物数量稀少,镜下识别较为困难,可归因于侏罗系属含煤地层,沉积物埋藏初期,水生、陆生植物产生的腐植酸令地层水介质呈酸性,抑制了方解石的沉淀。早期方解石胶结物的欠缺致使侏罗系砂岩抗压实能力降低,原生孔隙破坏显著;而较晚阶段由于岩屑溶解、粒间水过饱和析出的碳酸盐沉淀物以孔隙式胶结为主,常充填石英、长石等刚性颗粒的破裂缝,占据孔隙空间。整体而言,含量较低的碳酸盐胶结物对储层物性影响不大,但由于其空间分布不均,加剧了储层的非均质性。

5.3 溶蚀作用对储层物性的影响

碎屑岩储层内的任何组分,在一定的流体介质环境和温压条件下,均会发生不同程度的溶蚀作用(陈波等,2015)。冷湖地区侏罗系储层溶蚀作用较为强烈,长石、岩屑等碎屑颗粒与部分杂基的溶蚀使得砂岩中形成了数量可观的次生孔隙,是改善储层物性的建设性成岩作用。溶蚀作用的大规模发生得益于砂岩中存在较高含量的碎屑长石,这与其所处沉积环境关系密切。冷湖地区侏罗系储层主要为辫状河或辫状河三角洲砂体,属短程陆相沉积体系,沉积区靠近物源,原始沉积物成分成熟度低,长石、岩屑等不稳定组分含量占比高,为成岩阶段溶蚀作用的发生奠定了物质基础,成岩早期保留的部分粒间孔隙也能为溶蚀流体的运移交换提供通道。煤系地层沉积物埋藏初期的酸性地层水条件促成了长石、岩屑等易溶颗粒的第一期溶蚀作用。酸性流体在沉积物沉积之后不久即可由腐植型有机质氧化反应产生,而后在相对浅埋藏条件下,受成岩过程中压实作用的影响继续释放出酸性流体,从而造成相邻砂岩地层中长石等铝硅酸盐矿物的溶解(Manning, 1997; Manning and Bewsher, 1997)。本区内该期溶蚀程度轻微,未形成具规模的次生孔隙,对储层物性影响甚微。而在早成岩后期与中成岩阶段,有机质热演化趋于成熟,其释放的有机酸组分与富有机酸流体开始大量进入尚未被胶结物充满的残余粒间孔隙,使岩石中易溶矿物发生选择性溶蚀,形成较多粒内溶孔和粒间溶孔,经长石溶蚀产生的高岭石等黏土矿物及黏土矿物间的转化也为后期胶结作用的发生提供了物质来源。在有机酸排放阶段,含少量钙质的酸性流体可在靠近泥岩的富长石砂岩中发生方解石胶结和交代,而在远离泥岩的富长石砂岩中则主要发生长石溶蚀(张莉等,2019)。本区侏罗系成岩阶段主要处于中成岩A期,恰为有机质热演化大量释放富有机酸流体的

关键时期,以次生溶孔为主的侏罗系砂岩中常见长石、岩屑等被溶蚀改造后的残余结构,扫描电镜下碎屑长石可呈筛网状出现,无不反映溶蚀作用广泛而强烈。考虑到本区砂岩中长石、岩屑含量较高,溶蚀现象明显,已形成众多次生孔隙,可认为溶蚀作用是增加储集空间、改善储层物性的关键因素,一定程度上减缓了储层致密化进程。

6 结论

(1)研究区侏罗系储层主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,储层孔隙度平均9.96%,渗透率平均为 $0.26 \text{ m} \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低—特低孔、超低渗致密储层,渗透率与孔隙度相关性差,与主流喉道半径相关性好;孔隙类型以次生溶孔为主,原生孔隙残留较少,微孔隙所占比大。

(2)研究区侏罗系砂岩成岩作用较强,整体处于中成岩阶段A期,成岩作用类型包括压实作用、溶蚀作用和胶结作用;机械压实作用和以黏土胶结、硅质胶结为代表的胶结作用为破坏性成岩作用,溶蚀作用为建设性成岩作用。

(3)煤系地层的酸性水介质条件不利于早期方解石胶结物沉淀,碎屑颗粒欠缺粒间支撑,压实作用导致原生孔隙大幅损失;广泛存在的黏土矿物占据孔隙空间,分割大孔隙为无数微孔隙,黏土矿物的胶结作用进一步加剧了储层致密化;有机质热演化过程中释放的有机酸性流体对长石的持续溶蚀形成较多次生孔隙,有效改善了储层物性。在多种类型成岩作用的综合控制下,形成了冷湖地区侏罗系如今以次生溶孔为主要储集空间的致密砂岩储层。

References

- Beard D C, Weyl P K., 1973. Influence of Texture on Porosity and Permeability of Unconsolidated Sand[J]. AAPG Bulletin, 57 (2) : 349 - 369 .
- Boles J R, Franks S G, 1979. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation[J]. Journal of Sedimentary Petroleum, 49 (1) : 55 - 70 .
- Chen J, Shi J A, Long G H, et al., 2013. Sedimentary facies and models for the Palaeogene — Neogene deposits on the northern margin of the Qaidam Basin, Qinghai[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 33 (3) : 16 - 26 (in Chinese with English abstract) .
- Chen D Q, Long A L, Zhao G Z, et al., 2014. Characterization of Jurassic reservoirs in the Jiulongshan area of the Qaidam Basin[J]. Qinghai Petroleum, 32 (2) : 20 - 27 (in Chinese with English abstract) .

- Chen B, Chen F J, Wu Z X, et al., 2015. Diagenesis and Favorable Diagenetic Facies of Paleogene Lulehe Formation Sandstone in Lenghu Region[J]. Geological Science and Technology Information, 34 (4) : 20 – 27 (in Chinese with English abstract) .
- Dou W C, Liu L F, Wu K J, et al., 2016. Pore Structure Characteristics and Its Effect on Permeability by Mercury Injection Measurement: An Example from Triassic Chang-7 Reservoir, Southwest Ordos Basin[J]. Geological Review, 62 (2) : 502 – 511 (in Chinese with English abstract) .
- Du J J, Zhang S A, Xiao W F, et al., 2017. Geochemistry Characteristics of Middle — Lower Jurassic Clastic Rocks in the Northern Margin of Qaidam Basin and Their Geological Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39 (6) : 721 – 734 (in Chinese with English abstract) .
- Ehrlich R, Crabtree S J, Horkowitz K O, et al., 1991. Petrography and reservoir physics I: Objective classification of reservoir porosity[J]. AAPG Bulletin, 75 (10) : 1547 – 1562 .
- Gao X Z, Chen F J., 2002. Accumulation Model of Petroleum in the Tertiary System of the Northwestern Qaidam Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 27 (6) : 757 – 76 (in Chinese with English abstract) .
- Hu J J, Ma Y S, Wang Z X, et al., 2017. Palaeoenvironment and palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 19 (3) : 480 – 490 (in Chinese with English abstract) .
- Huang X, Duan D P, Liu B B, et al., 2021. Origin Mechanism of Chlorite and Its Impact on Reservoir Properties in Huangang Formation[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 19 (3) : 480 – 490 (in Chinese with English abstract) .
- Jin Z K, Qi C W, Xue J Q, et al., 2006. Sedimentary facies of the Jurassic in northern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 19 (3) : 480 – 490 (in Chinese with English abstract) .
- Liang W, Zhang X Y., 1994. Generation Mechanism of Secondary Porosity in Sandstone Hydrocarbon Reservoirs of Upper Jurassic Tieling — Changtu Basin[J]. Mineralogy and Petrology, 14 (3) : 62 – 68 (in Chinese with English abstract) .
- Liu W M, Sun G Q, Guo J J, et al., 2018. Provenance analysis of the Palaeogene clastic rocks in the western part of northern Qaidam Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 38 (1) : 53 – 61 (in Chinese with English abstract) .
- Lü B F, Zhang Y Q, Yang S Y. Characteristics of Structural System and Its Implication for Formation Dynamics in Qaidam Basin[J]. Geological Review, 57 (2) : 167-174 (in Chinese with English abstract) .
- Manning D A C, 1997. Acetate and propionate in landfill leachates : Implications for the recognition of microbiological influences on the composition of waters in sedimentary systems[J]. Geology, 25 (3) : 279 – 281 .
- Manning D A C, Bewsher A., 1997. Determination of anions in landfill leachates by ion chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 770 (1) : 203 – 210 .
- Mu J, Wang L Q. 1999. Petroliferous prospect of Lenghu-Nanbaxian structure belt in Qaidam Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 20 (2) : 18-22 (in Chinese with English abstract) .
- Pittman E D, Larese R E, 1991. Compaction of lithic sands : Experimental results and applications[J]. AAPG Bulletin, 75 (8) : 1279 – 1299 .
- Scherer M, 1987. Parameters Influencing Porosity in Sandstones : A Model for Sandstone Porosity Prediction[J]. AAPG Bulletin, 71 (5) : 485 – 491 .
- Shao L Y, Li M, Li Y H, et al., 2014. Geological characteristics and controlling factors of shale gas in the Jurassic of the northern Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 21 (4) : 311 – 322 (in Chinese with English abstract) .
- Shou J F, Zhang H L, Shen Yang, et al., 2006. Diagenetic Mechanisms of Sandstone Reservoirs in China Oil and Gas — Bearing Basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 22 (8) : 2165 – 2170 (in Chinese with English abstract) .
- Towe K M, 1962. Clay mineral diagenesis of a possible source of silica cement in sedimentary rocks[J]. Journal of Sedimentary Petroleum, 32 (1) : 26 – 28 .
- Torabi A, Fossen H, Braathen A., 2013. Insight into petrophysical properties of deformed sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 97 (4) : 619 – 637 .
- Walderhaug O, 1994. Precipitation rates for quartz cement in sandstones determined by fluid-inclusion microthermometry and temperature-history modeling[J]. Journal of Sedimentary Research, 64 (2a) : 324 – 333 .
- Wang A F, You Z L. 1995. Diagenetic Factors Controlling Development of the Pores in Sandstone From Xiangxi Group in The North Part of Eastern Sichuan[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 22 (2) : 79-83 (in Chinese with English abstract) .
- Wang F Q, Wang B Q. 2006. Diagenesis of reservoir rocks of the Lower Jurassic and its influence on porosity modification in North Qaidam Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 42 (5) : 1-6 (in Chinese with English abstract) .
- Wang X W, Yang Z M, Li H B, et al., 2010. Experimental study on pore structure of low permeability core with NMR spectra[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 32 (2) : 69 – 72 (in Chinese with English abstract) .
- Wang M, Yang Y H, Wang Y T, et al., 2019. The Jurassic clastic reservoirs in the Jiulongshan area, northern Qaidam Basin, Qinghai[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39 (2) : 94 – 102 (in Chinese with English abstract) .
- Wang M, Geng R Y, Ma F Q, et al., 2021. Diagenesis Characteristics of Jurassic in Jiulongshan area, Northern Qaidam Basin[J]. Science Technology and Engineering, 21 (15) : 6175 – 6184 (in Chinese with English abstract) .
- Westcott, W. A., 1983. Diagenesis of Cotton Valley sandstone (Upper Jurassic), East Texas: implications for tight gas formation pay recognition[J]. AAPG Bulletin, 67 (6) : 1002 – 1013 .
- Wu Z T, Sun G Q, Wang F, et al., 2016. Characteristics and Significance of the Carbonate Cements in the Lower member of the Palaeogene Xiaganchaigou Formation in the Pingtai region, northern Qaidam Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 36 (4) : 30 – 36 (in Chinese with English abstract) .
- Xie Q B, Guan S Y. 2000. Sedimentary Facies Type and Reservoir Evaluation for the Northern Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 27 (2) : 40 – 44 (in Chinese with English abstract) .

- Yang Y T, Zhang B M, Li W, et al., 2000. Study of Jurassic Stratigraphic Sequence and Sedimentary Facies in North of Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 7 (3) : 145 - 151 (in Chinese with English abstract) .
- Yan J P, Liu C Y, Zhang W G, et al., 2010. Diagenetic Characteristics of the Lower Porosity and Permeability Sandstones of the Upper Paleozoic in the South of Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (2) : 272 - 279 (in Chinese with English abstract) .
- Yan Z D. 2017. Study on the Jurassic Prototype Basin in the Western Part of the Northern Qaidam Basin[D], Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract) .
- Zhang M L. 2012. A Study on the Distribution Regularity of Mesozoic Strata Within Oil Source Lithologic Hydrocarbon Reservoir of Suganhu Depression in North Qaidam[D], Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract) .
- Zhang J, Xia W M, Xu L, et al., 2014. Genesis of Jurassic Tight Sandstone Reservoirs of Jiulongshan Region in the Northern Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25 (S1) : 71 - 78 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang L, Wang W, Shu Z G, et al., 2019. Distribution and Genesis of Calcite — Replaced and Calcite — Cemented Tight Reservoirs in Xujiache Formation, Yuanba Area, Northeast Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40 (6) : 692 - 705 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang D Z, Chu L L, Zhou X, et al., 2021. Diagenesis and Diagenetic Facies of Tight Gas Reservoir of Shahezi Formation, in Xujiaweizi Fault Depression of North Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51 (1) : 22 - 34 (in Chinese with English abstract) .
- Zheng J M, Ying F X. 1997 ZHENG Reservoir Characteristics and Diagenetic Model of Sandstone Inter-calated in Coal-bearing Strata (Acid Water Medium) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (4) : 19 - 24 (in Chinese with English abstract) .
- Zhou F, Wang B, Li Z X, et al., 2019. Geochemical Characteristics and Accumulation Elements Controlling the Natural Gas in Lenghu Tectonic Belts of Qaidam Basin[J], *Natural Gas Geoscience*. 30 (10) : 1496 - 1507 (in Chinese with English abstract) .
- 19 (3) : 480 - 490.
- 黄鑫, 段冬平, 刘彬彬, 等, 2021. 西湖凹陷花港组绿泥石成因及其对储层物性的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 51 (3) : 69 - 679.
- 金振奎, 齐聪伟, 薛建勤, 等, 2006. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积相[J]. *古地理学报*, 8 (2) : 199 - 210.
- 梁卫, 张晓宇, 1994. 铁岭—昌图盆地上侏罗统砂岩储层次生孔隙形成机制研究[J]. *矿物岩石*, 14 (3) : 62 - 68.
- 吕宝凤, 张越青, 杨书逸, 2011. 柴达木盆地构造体系特征及其成盆动力学意义[J]. *地质论评*, 57 (2) : 167 - 174.
- 刘伟明, 孙国强, 郭佳佳, 等, 2018. 柴北缘西段古近纪物源体系分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 38 (1) : 53 - 61.
- 穆剑, 汪立群, 1999. 论柴达木盆地冷湖-南八仙构造带的含油气远景[J]. *石油学报*, 20 (2) : 18 - 22.
- 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 等, 2006. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析[J]. *岩石学报*, 22 (8) : 2165 - 2170.
- 邵龙义, 李猛, 李永红, 等, 2014. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素[J]. *地学前缘*, 21 (4) : 311 - 322.
- 王安发, 游章隆, 1995. 川东北香溪群影响砂岩孔隙发育的成岩作用因素[J]. *成都理工学院学报*, 22 (2) : 79 - 83.
- 王凤琴, 王宝清, 2006. 柴达木盆地北缘下侏罗统储集岩成岩作用及其对孔隙演化的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 42 (5) : 1 - 6.
- 王学武, 杨正明, 李海波, 等, 2010. 核磁共振研究低渗透储层孔隙结构方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 32 (2) : 69 - 72.
- 王猛, 杨永恒, 王晔桐, 等, 2019. 青海柴达木盆地北缘构造带九龙山地区侏罗系储层特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (2) : 94 - 102.
- 王猛, 耿榕悦, 马富强, 等, 2021. 柴北缘九龙山地区侏罗系成岩作用特征[J]. *科学技术与工程*, 21 (15) : 6175 - 6184.
- 仵宗涛, 孙国强, 王锋, 等, 2016. 柴北缘平台地区下干柴沟组下段碳酸盐胶结物特征及意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 36 (4) : 30 - 36.
- 谢庆宾, 管守锐, 2000. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积相类型及储集层评价[J]. *石油勘探与开发*, 27 (2) : 40 - 44.
- 杨永泰, 张宝民, 李伟, 等, 2000. 柴达木盆地北缘侏罗系层序地层与沉积相研究[J]. *地学前缘*, 7 (3) : 145 - 151.
- 闫建萍, 刘池洋, 张卫刚, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地南部上古生界低孔低渗砂岩储层成岩作用特征研究[J]. *地质学报*, 84 (2) : 272 - 279.
- 闫占冬, 2017. 柴达木盆地北缘西段侏罗纪原型盆地研究[D]. 西安: 西北大学.
- 张梦林, 2012. 柴北缘苏干湖凹陷中生界源内岩性油气藏分布规律研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 张杰, 夏维民, 徐丽, 等, 2014. 柴北缘九龙山地区侏罗系致密砂岩储层成因分析[J]. *天然气地球科学*, 25 (S1) : 71 - 78.
- 张莉, 王威, 舒志国, 等, 2019. 川东北元坝地区须家河组钙质交代—胶结致密层分布与成因[J]. *石油学报*, 40 (6) : 692 - 705.
- 张大智, 初丽兰, 周翔, 等, 2021. 松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组致密气储层成岩作用与成岩相特征[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 51 (1) : 22 - 34.
- 郑浚茂, 应凤祥, 1997. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式[J]. *石油学报*, 18 (4) : 19 - 24.
- 周飞, 王波, 李哲翔, 等, 2019. 柴达木盆地冷湖构造带天然气地球化学特征及成藏主控因素[J]. *天然气地球科学*, 30 (10) : 1496 - 1507.

附中文参考文献

- 陈吉, 史基安, 龙国徽, 等, 2013. 柴北缘古近系-新近系沉积相特征及沉积模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 33 (3) : 16 - 26.
- 陈登钱, 龙安林, 赵国忠, 等, 2014. 柴达木盆地九龙山地区侏罗系储层特征研究[J]. *青海石油*, 32 (2) : 20 - 27.
- 陈波, 陈汾君, 吴志雄, 等, 2015. 柴北缘冷湖地区古近系路乐河组成岩作用及有利成岩相研究[J]. *地质科技情报*, 34 (4) : 20 - 27.
- 窦文超, 刘洛夫, 吴康军, 等, 2016. 基于压汞实验研究低渗储层孔隙结构及其对渗透率的影响-以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7储层为例[J]. *地质论评*, 62 (2) : 502 - 511.
- 杜建军, 张士安, 肖伟峰, 等, 2017. 柴达木盆地北缘中-下侏罗统碎屑岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 39 (6) : 721 - 734.
- 高先志, 陈发景, 2002. 柴达木盆地北缘西段油气成藏机理研究[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 27 (6) : 757 - 76.
- 胡俊杰, 马寅生, 王宗秀, 等, 2017. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中-晚侏罗世古环境与古气候[J]. *古地理学报*,