

天然气地球科学
Natural Gas Geoscience
ISSN 1672-1926, CN 62-1177/TE

《天然气地球科学》网络首发论文

题目：酒泉盆地青西凹陷下沟组富碳酸盐页岩岩相特征及页岩油富集有利岩相
作者：张晨曦，姜福杰，李涛，苑伯超，刘欣泽，樊晓琦，郭婷玮，胡亚超，蒋浩杰
收稿日期：2025-01-03
网络首发日期：2025-04-21
引用格式：张晨曦，姜福杰，李涛，苑伯超，刘欣泽，樊晓琦，郭婷玮，胡亚超，蒋浩杰. 酒泉盆地青西凹陷下沟组富碳酸盐页岩岩相特征及页岩油富集有利岩相[J/OL]. 天然气地球科学.
<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20250421.1518.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.11764/j.issn.1672-1926.2025.04.001

酒泉盆地青西凹陷下沟组富碳酸盐页岩岩相特征及页岩油富集有利岩相

张晨曦^{1,2},姜福杰^{1,2},李涛³,苑伯超³,刘欣泽³,樊晓琦^{1,2},郭婷玮^{1,2},胡亚超^{1,2},蒋浩杰^{1,2}

(1.中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 3. 中国石油玉门油田分公司 勘探开发研究院,甘肃 酒泉 735019)

摘要: 利用岩心观察、薄片鉴定、氩离子抛光扫描电镜、基础地球化学、XRD 全岩分析及高压压汞等技术手段,建立了酒泉盆地青西凹陷下沟组页岩岩相分类方案,明确了下沟组主要岩相及各岩相的有机-无机岩石学、烃源岩质量、储集空间类型及含油性等特征,有助于建立岩相与页岩油富集的联系,寻找有利勘探目标。结果表明:下沟组页岩主要发育 7 类岩相,其中①富有机纹层状云质页岩、富有机脉状云质页岩、富有机斑点状云质页岩有机质纹层富集,发育网状裂缝,热液矿物含大量溶蚀孔,极大改善了储集渗流能力;②富有机块状长英质页岩中发育大量钠长石粒间宏孔,储层有效孔隙及渗流能力强;③含有机块状混合质页岩、含有机含砾混合质页岩生烃潜力低,孔隙被黏土矿物堵塞,韧性提高,导致物性及可压裂性差。综合油气生成潜力、储集渗流性能、含油性、可动性、脆性等因素,认为富有机块状长英质页岩、富有机脉状云质页岩是当前页岩油勘探的最有利岩相。

关键词: 青西凹陷;下沟组;页岩油;岩相特征;有利岩相

中图分类号: TE122.2;文献标志码: A;文章编号: 1672-1926 (XXXX) XX-0001-XX

0 引言

随着油气勘探理念的不断创新,页岩油已成为 21 世纪全球非常规油气勘探开发的重点,美国“页岩革命”的成功表明页岩油的规模效益开发具有可行性^[1-2]。中国发育多套湖相页岩层系,例如渤海湾盆地古近系、鄂尔多斯盆地三叠系、松辽盆地白垩系及准噶尔盆地二叠系等,页岩厚度大、展布广,“十三五”评价指出我国页岩油地质资源量达 $283 \times 10^8 \text{ t}^{[2-9]}$ 。湖相页岩油盆地根据水体盐度可分为淡水湖盆和咸化湖盆,其中咸化湖盆水体盐度高、环境相对稳定、含氧量低的特点有利于倾油有机母质的发育和有机质的富集与保存,进而形成优质烃源岩^[10-11],为其丰富的页岩油资源奠定物质基础。目前咸化湖盆页岩油已在渤海湾盆地济阳拗陷、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷获得勘探突破并形成规模产量^[12-13],有望成为中国页岩油增储上产的主力军。

国外海相页岩通常考虑矿物组成、结构、层理及生物活动遗迹等因素进行岩相划分^[14-17]。相比之下,中国多数咸化湖盆沉积环境规模小,对物源、气候、构造的敏感响应导致了页岩复杂的物质组成和沉积构造,进而影响其烃源岩特性、物性、含油性和可压性等^[3,18-20]。因此,国内陆相页岩岩相划分通常考虑颜色、岩矿组成、沉积构造及有机质含量等特征^[21-25]。开展页岩岩相分类,明确不同岩相基本地质特征、储集能力及与页岩油富集的联系,对于页岩油勘探工

收稿日期: 2025-01-03;修回日期: 2025-04-02

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司玉门油田分公司项目(编号:KT2023JF23006)资助。

作者简介: 张晨曦(1999-),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事盆地分析与资源评价研究.E-mail: zxcup@163.com

通讯作者: 姜福杰(1979-),男,黑龙江兰西人,博士,教授,主要从事油气成藏机理与分布规律研究.E-mail: jiangfj@cup.edu.cn

作具有重要的理论和实践价值。

酒泉盆地是中国重要含油气盆地之一，已进入常规油气精细勘探阶段。其中青西凹陷青南次凹是盆地主要的生烃凹陷和富油凹陷，常规油气探明储量丰度达 $1.05 \times 10^6 \text{ t/km}^2$ ^[26]。凹陷烃源岩集中发育于下白垩统赤金堡组、下沟组和中沟组，其中赤金堡组和下沟组是 2 套主力烃源层系。目前，下沟组已在沉积环境、储层条件、地质地球化学特征等方面取得一定认识^[27-31]。青西凹陷下沟组烃源岩厚度大，生烃母质以藻类体、孢子体为主，属Ⅱ₁ 型，有机质丰度、生烃潜力达到优质烃源岩标准并已进入成熟演化阶段，同时下沟组泥云岩致密储层提供一定的储集空间和自封闭性，具备页岩油形成的地质条件^[32]。新一轮资源评价结果显示酒泉盆地页岩油地质资源量达 $1.37 \times 10^8 \text{ t}$ ^[3,33-34]，然而，前人^[35-37]大多将下沟组当作烃源岩、致密储层进行研究，导致页岩相关工作匮乏^[34]，制约了页岩油的勘探开发。2022 年，中国石油玉门油田分公司在青西凹陷部署了页岩油探井——LY1H 井，针对下白垩统系统取心，含油显示良好，展现出良好的页岩油潜力，该探井对于开辟油气勘探新领域具有重要意义。笔者在 LY1H 井岩心分析的基础上，根据沉积构造—矿物组成对下沟组页岩岩相进行分类，综合地质、地球化学及储层多方面系统剖析不同岩相页岩的烃源岩特性、物性、含油性、可动性及脆性差异，优选出页岩油富集有利岩相，为研究区页岩油甜点地质评价提供参考。

1 区域地质概况

酒泉盆地由酒西坳陷、酒东坳陷和嘉峪关隆起组成，总面积达 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是中国西部重要的含油气盆地。酒西坳陷面积约为 $2\ 700 \text{ km}^2$ ，坳陷西端的青西凹陷夹于南部祁连山逆掩推覆带和北部阿尔金走滑断裂带之间，为一不对称箕状凹陷，现今面积约为 650 km^2 ^[38]。在燕山运动和喜马拉雅运动影响下，下白垩统沉积期凹陷内形成“两凹夹一隆”的次级构造格局及一系列断裂（图 1）^[39]。

下白垩统沉积期湖泊具有微咸化—半咸化特征，水体呈偏碱性—碱性^[27]，气候在潮湿、半干旱之间频繁更替，由此发育了一套以碳酸盐矿物为主的半深湖—深湖亚相富有机质细粒沉积体系。广泛发育赤金堡组（K_{1c}）、下沟组（K_{1g}）和中沟组（K_{1z}）3 套巨厚烃源岩。盆地的短暂抬升与地层剥蚀导致赤金堡组和下沟组呈不整合接触，2 套地层湖侵泥岩较厚，下沟组最厚超 $1\ 200 \text{ m}$ ，至中沟组泥岩厚度减薄^[40]。LY1H 井下沟组埋深 $4\ 007 \sim 5\ 225 \text{ m}$ ，厚 $1\ 218 \text{ m}$ ，自下而上分为 K_{1g0}、K_{1g1}、K_{1g2} 和 K_{1g3} 共 4 段^[29-30,41]。本文研究取样层位涵盖 K_{1c}、K_{1g0}、K_{1g1} 和 K_{1g2} 段（图 1）。

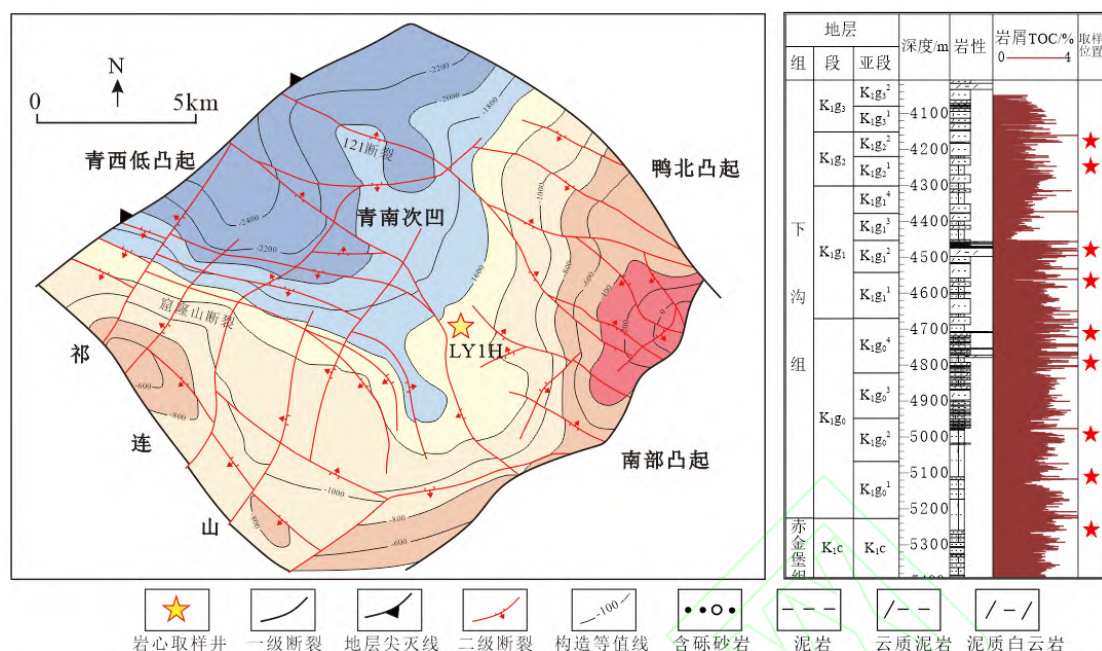


图 1 研究区位置及 LY1H 井下沟组地层柱状图（修改自文献[26]）

Fig.1 Location of the study area and stratigraphic column of Xiagou Formation in Well LY1H
(modified from Ref. [26])

2 下沟组页岩岩相分类及特征

2.1 矿物组成特征

LY1H 井下沟组矿物组成复杂，可见白云石、铁白云石、方解石、石英、钠长石、菱铁矿、黄铁矿、黏土矿物以及方沸石、重晶石等热液矿物。碳酸盐矿物含量为 8.3%~94.8%，以白云石和铁白云石为主，均值分别为 36.2%和 29%，方解石含量均值为 15.4%；长英质矿物含量为 0.7%~61.6%，主要为钠长石，平均含量为 16.5%，石英和钾长石含量较少，占比分别为 5%和 4.5%；黏土矿物含量 0~48.6%，平均为 16.1%。黏土矿物含量从深至浅呈现出明显的分段性（图 2）。K_{1c} 组沉积期水体浅，陆源输入量大，黏土矿物、石英、长石含量较高；K_{1g0} 和 K_{1g1} 段铁白云石、白云石占主导地位，并且发育钠长石、重晶石、方沸石，反映出干旱气候及活跃的热液活动；至 K_{1g2} 段陆源输入作用增强同时水深增加，黏土矿物含量增多，碳酸盐矿物含量减少。

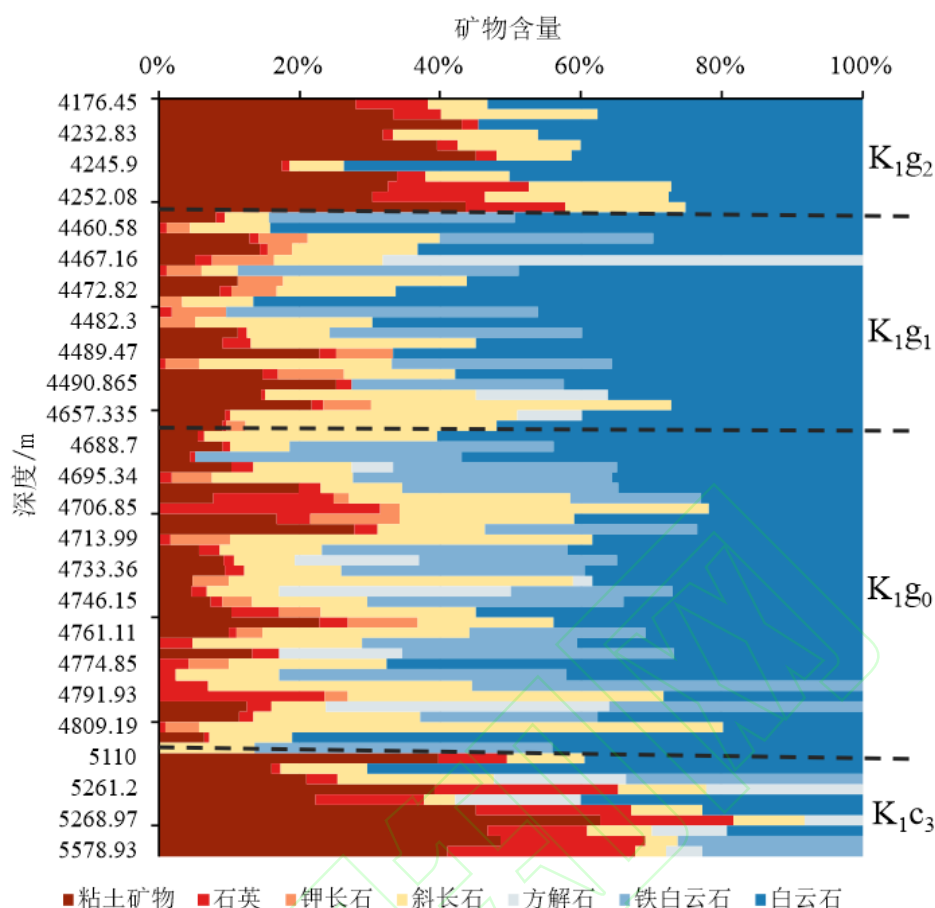


图 2 LY1H 井赤金堡组一下沟组页岩矿物组成

Fig.2 Mineral composition of shale in Chijinpu-Xiagou formations from Well LY1H

2.2 沉积构造

通过岩心和薄片观察到块状构造和纹层构造（图 3）。块状构造（单层厚度 >10 cm）垂直面平整，矿物粒度均一且空间分布均匀；纹层构造由数个厚度小于 1 mm 的单层水平叠置而成纹层多平直或微曲。按成分可分为四类：碳酸盐矿物纹层，硅质纹层、黏土纹层和有机质纹层。其中碳酸盐纹层厚 0.01~0.5 mm，由泥晶白云石/铁白云石、长石组成，单偏光下呈亮灰色；硅质纹层厚 0.01~0.25 mm，富含泥级—粉砂级钠长石，镜下呈暗灰色；黏土纹层厚 0.01~0.2 mm，呈深褐色，与有机质纹层伴生；有机质纹层薄于 0.01 mm，黑色（图 3 中 a2、a3）。半深湖区常见以碳酸盐纹层为主体，硅质纹层、黏土纹层和有机质纹层次要发育的“二元纹层”结构，指示整体稳定分层、高盐度、强还原的水体环境和阶段性河流输入^[28,31]。

除常见的沉积构造外，研究区发育独特的“脉状”（图 3 中 b1）、“斑点状”（图 3 中 c1）和“含砾”（图 3 中 g1）构造。“脉状”和“斑点状”构造是由热液矿物组成的单矿物或复矿物集合体，这些热液矿物来自于青西凹陷丰富的热液活动，以脉体或斑点的形式结晶于下白垩统页岩储层中^[27,29,42]；“含砾”构造由碎屑物质砾石、火山物质砾石组成，由偶发性浊流沉积将凹陷周缘砾石带入下沟组沉积物中。

岩相	岩心照片	普通薄片照片	荧光薄片照片	发育特征及分布	TOC/%
富有机纹层状 云质页岩	a1	a2	a3	K ₁ g ₀ ~K ₁ g ₅ , 黑色, 泥晶白云石、铁白云石为主, 纹层、页理缝发育	1.7~4.7 2.7
富有机脉状 云质页岩	b1	b2	b3	K ₁ g ₀ 段顶部, 灰黑色, 纹层呈软变形构造, 灰色热液矿物脉体呈流动状, 宽0.2mm~1cm, 微裂缝极发育	2.1~3.2 2.7
富有机斑点状 云质页岩	c1	c2	c3	K ₁ g ₀ 顶部、K ₁ g ₁ , 深灰色, 纹层呈软变形构造, 灰色热液矿物斑点均匀分布, 直径0.1~4mm, 斑点内大量孔隙发育	1.7~4.2 2.8
含有机块状 云质页岩	d1	d2	d3	K ₁ g ₀ ~K ₁ g ₅ , 深灰色, 泥微晶铁白云石与白云石为主, 可见构造微裂缝	0.9~2.5 1.8
富有机块状 长英质页岩	e1	e2	e3	K ₁ g ₀ 顶部、K ₁ g ₁ 中部及K ₁ g ₅ 底部, 深灰色, 断面粗糙含油钠长石+石英含量52%~75%, 网状裂缝发育	1.6~3.2 2.2
含有机块状 混合质页岩	f1	f2	f3	K ₁ g ₀ , K ₁ g ₂ , 深灰色碳酸盐矿物、碎屑矿物、粘土矿物含量均为20%~40%, 伊利石、伊蒙混层、黄铁矿增多	0.5~3.5 1.7
含有机含砾 混合质页岩	g1	g2	g3	K ₁ g ₀ , K ₁ c, 灰黑色, 砾石密集无定向分布, 直径0.1mm~1cm, 分为火山碎屑砾石和硅质碎屑砾石	0.7~1.9 1.2

图 3 青西凹陷下白垩统下沟组页岩岩相类型

Fig.3 Lithofacies classification of Lower Cretaceous Xiagou Formation shale in Qingxi Sag

2.3 岩相分类

矿物组成是岩相分类的基础, 蕴含了物质来源和水介质条件信息, 并控制着页岩的储集空间^[43]; 青西凹陷下沟组页岩与渤海湾盆地沧东凹陷孔店组、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组均为咸化湖盆沉积背景, 具有相似的高碳酸盐矿物含量、低黏土矿物含量特征。参考孔店组和风城组“长英质—黏土质—碳酸盐质三端元各自以含量 50%为界”的岩相分类方案^[44-45], 将下沟组页岩初步划分为白云质页岩、长英质页岩、混合质页岩和黏土质页岩 4 类岩相。白云质页岩占样品总数的 70%以上, 其次为混合质页岩和长英质页岩, 黏土质页岩极少[图 4(a)]。

沉积构造反映了水动力条件和气候变化, 造成页岩渗流特性和可压性差异, 此外气候和事件性沉积作用产生的特殊沉积构造对成储亦有重要影响, 划分岩相时不容忽视[图 4(b)]; 下沟组页岩有机质显微组分主要为腐泥组和壳质组, 是良好的生油母质, 有机质含量控制着页岩油的资源潜力和富集程度^[26]。在页岩油资源分级评价中湖相页岩有机质丰度界限通常在 1%和 2%附近^[24,43,46], 下沟组样品 I_H (氢指数) 随 TOC 的增大呈现先增加后稳定的趋势, I_H 开始增加和

达到稳定的拐点 TOC 值分别为 1%和 2%。因此认为 TOC 值大于 2%为富有机页岩，介于 1%~2%之间为含有机页岩，低于 1%为贫有机页岩。

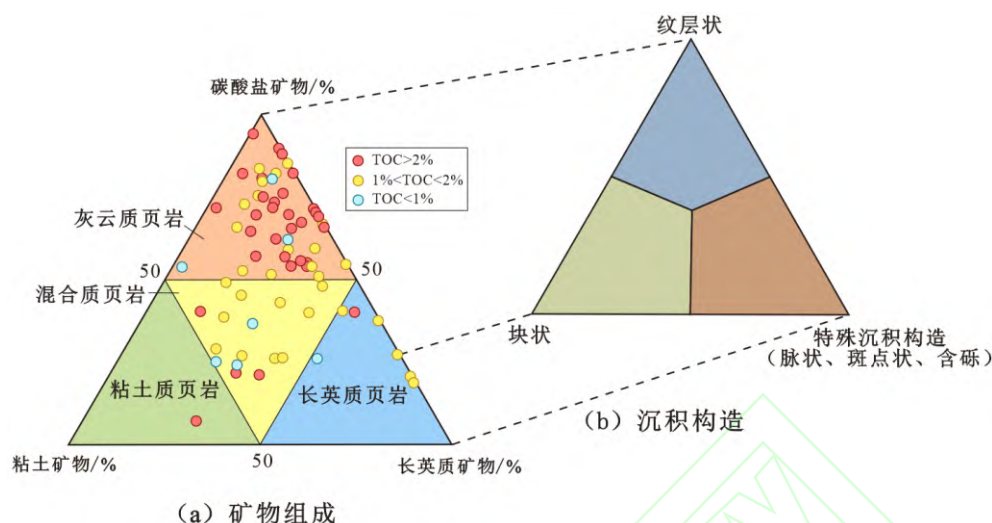


图 4 青西凹陷赤金堡组—下沟组页岩岩相划分

Fig.4 Lithofacies division of Chijinpu-Xiagou formations shale in Qingxi Sag

以前文所述 4 类岩相为基础，发现纹层状、脉状、斑点状构造主要在云质页岩中发育（图 5），含砾构造在混合质页岩中发育，块状构造普遍发育，云质页岩 TOC 值多数高于 1%，混合质页岩和长英质页岩 TOC 值多为 1%~2%。最终在青西凹陷下沟组划分出 7 类主要岩相，定名和数量占比分别为：富有机纹层状云质页岩（19%）、富有机脉状云质页岩（16%）、富有机斑点状云质页岩（11%）、含有机块状云质页岩（27%）、富有机块状长英质页岩（8%）、含有机块状混合质页岩（11%）和含有机含砾混合质页岩（6%）。

3 主要岩相基本特征及储集层特征

3.1 云质页岩相

3.1.1 富有机纹层状云质页岩

富有机纹层状云质页岩广泛发育于 K_{1g0} — K_{1g2} 段。呈黑色，发育水平层理缝（图 3 中 a1）。矿物组成以白云石和铁白云石为主，含量集中分布于 55%~73%之间，最高达 90%；黏土矿物含量为 10%~18%，长英质矿物为 11%~33%。 TOC 值分布于 1.7%~4.7%之间，均值为 2.7%。 I_H 值为 303~463 mg/g，均值为 381 mg/g，有机质富集程度高且生烃潜力大； S_1 （游离烃含量）值和氯仿沥青“A”含量分别为 0.9~3.1 mg/g 和 0.3%~0.6%，均值分别为 2.2 mg/g 和 0.4%。

该岩相孔隙度为 1.6%~6.4%，平均为 3.2%，渗透率为 $(0.0004 \sim 0.0079) \times 10^{-3} \mu m^2$ ，以宏孔为主（表 1）。由于不同类型纹层间力学性质存在差异，导致该岩相层理缝十分发育，常沿富有机质黏土层与其他纹层的接触面延伸，在取心过程中易分离呈“薄饼状”。高压压汞的进汞曲线在达到 0.1 MPa 以前迅速升高

（图 6），说明孔喉半径 $> 7.5 \mu m$ 的孔隙是主要的储集空间，与镜下观察到层间缝开度多在 5~20 μm 之间相吻合（图 7）；其次为碳酸盐矿物晶间孔、晶内孔，这些原本孤立的孔隙虽然被裂缝沟通，但进入其中的汞难以顺利退出，因此退汞残余汞饱和度较高。薄片可见未被充填的垂直缝和斜交缝（图 3 中 a3），起到沟通层间缝的重要作用，场发射扫描电镜中观察到微裂缝中充填沥青，结

合纳米 CT 孔隙结构三维模型，表明微裂缝是该岩相的主要储集空间。

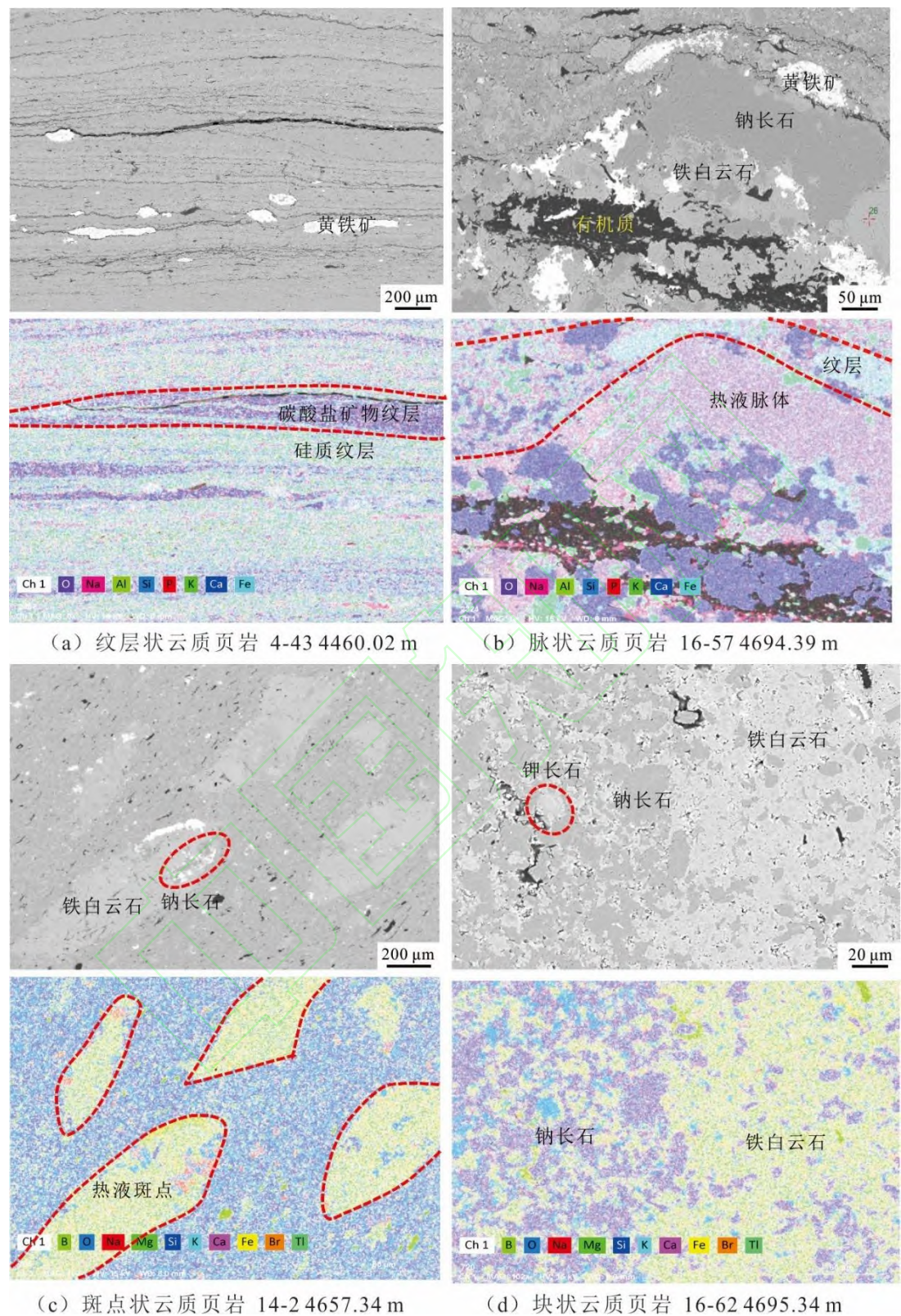


图 5 云质页岩中不同沉积构造扫描电镜背散射成像、X 射线荧光扫描

Fig.5 BSE images and XRF mapping of different sedimentary structures in dolomitic shale
 (a)纹层状云质页岩,4-43,4 460.02 m;(b)脉状云质页岩,16-57,4 694.39 m;(c)斑点状云质页岩,14-2,4 657.34 m;(d)块状云质页岩,16-62,4 695.34 m,图中元素符号及名称:Na:钠;Mg:镁;Si:

硅;K:钾;Ca:钙;Fe:铁;Al:铝;O:氧

3.1.2 富有机脉状云质页岩相

该岩相集中发育于 K_{1g1} 段顶部。在灰黑色岩心表面可观察到不规则分布的白色矿物呈网脉状或条带状产出，脉体宽度 20 μm~1 cm 不等（图 3 中 b1）。镜下观察到脉体常与纹层结构伴生且呈顺层分布或穿插接触关系，穿插接触部分的纹层出现强烈的软变形构造，呈挠曲状（图 3 中 b2）。脉体部分主要由铁白云石、钠长石、方沸石及重晶石等镶嵌接触组成。碳酸盐矿物含量集中分布于 67%~85% 之间，最高达 95%。TOC 值集中分布于 2.1%~3.2% 之间，均值为 2.7%，I_H 值为 403~535 mg/g，均值为 459 mg/g；S₁ 值和氯仿沥青“A”含量分别为 2.6~5.9 mg/g 和 0.4%~0.8%，均值分别为 4.7 mg/g 和 0.6%。

孔隙度可达 2.7%~9.1%，平均为 5.2%，渗透率(0.002~0.04)×10⁻³ μm²，以宏孔为主。岩心性脆易碎裂，电镜下观察到纹层、脉体内部发育直径<10 μm 的晶内孔/粒内孔，有机质纹层内部偶见蜂窝状有机质孔，直径 2 μm 左右，沿脉体与纹层的接触面易发育微裂缝，开度最大可达 0.3 mm。脉体中的热液矿物发育晶间孔，脉体内部发育大量构造微裂缝，不仅沟通了孔隙，而且与层理缝连通交错形成裂缝网络。进汞曲线的汞饱和度在进汞压力达到 10 MPa 后基本不再变化，样品中孔隙直径<150 nm 的孔隙占比很低；退汞曲线斜率大，表明孔隙连通性优越。密集发育的孔隙—裂缝网络是该岩相物性好的重要原因。

表 1 青西凹陷下沟组不同岩相孔隙结构参数

Table 1 Pore structure parameters of different lithofacies in Xiagou Formation, Qingxi Sag

样品编号	岩相	总孔隙体积/(mg/g)	孔隙体积/(mg/g)			孔隙体积占比/%			平均孔径/nm
			微孔	介孔	宏孔	微孔	介孔	宏孔	
17-36	富有机块状长英质页岩	0.139 0	0.015 7	0.046 0	0.077 3	11.27	33.12	55.61	56.15
10-26	富有机脉状云质页岩	0.196 7	0.009 5	0.030 4	0.156 8	4.84	15.46	79.70	110.26
10-38		0.076 5	0.003 7	0.018 5	0.054 3	4.86	24.14	71.00	102.38
23-8	含有机块状云质页岩	0.119 4	0.006 0	0.064 8	0.048 6	5.00	54.31	40.69	42.63
19-83		0.205 3	0.007 5	0.160 9	0.037 0	3.64	78.35	18.01	23.03
22-57		0.133 3	0.005 6	0.094 8	0.032 9	4.17	71.13	24.70	31.81
10-36	富有机斑点状云质页岩	0.097 9	0.007 1	0.039 0	0.051 9	7.23	39.79	52.98	66.28
14-46		0.171 3	0.047 8	0.068 5	0.055 1	28.73	39.97	32.14	38.34
20-11	富有机纹层状云质页岩	0.060 2	0.005 4	0.025 0	0.029 8	8.92	41.50	49.58	71.25
14-2	含有机块状混合质页岩	0.130 2	0.006 6	0.068 5	0.055 1	7.12	49.28	43.60	49.70
24-55	含有机含砾混合质页岩	0.197 2	0.002 4	0.087 2	0.107 7	1.22	44.19	54.58	40.80

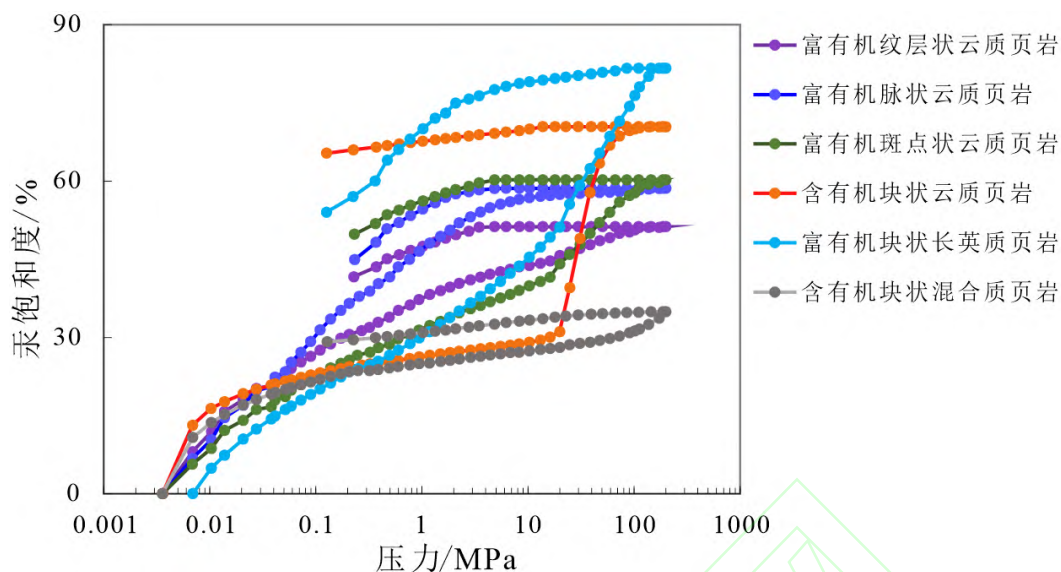


图 6 青西凹陷下沟组主要岩相高压压汞进汞—退汞曲线

Fig.6 High-pressure mercury injection-withdrawal curves of major lithofacies in Xiagou Formation, Qingxi Sag

3.1.3 富有机斑点状云质页岩相

该岩相发育于 K_{1g0} 段顶端和 K_{1g1} 段，岩心表面白色斑点密集分布（图 3 中 c1），不同样品间斑点直径差异较大。可观察到斑点最大直径在 4 mm 左右，最小 100 μm 左右。斑点主要为粒度大于 10 μm 的半自形—自形铁白云石、钠长石、方沸石及重晶石，呈镶嵌状或堆晶结构（图 3 中 c3），矿物粒径大于基质中的泥晶白云石、方解石。斑点与富有机质纹层关系密切，纹层因斑点的存在呈现软变形构造（图 3 中 c2）。TOC 值集中分布于 1.7%~4.2% 之间，均值为 2.8%， I_H 值为 245~547 mg/g，均值为 377 mg/g； S_1 值和氯仿沥青“A”含量分别为 1.9~4.2 mg/g 和 0.4%~1.3%，均值分别为 3.0 mg/g 和 0.6%。

富有机斑点状云质页岩相孔隙度为 2.8%~4.5%，平均为 3.8%，平均渗透率为 $0.007 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，主要含介孔和宏孔。样品宏观裂缝欠发育，含少量顺层微裂缝。孔隙度随斑点直径的增大而升高，在热液矿物晶体内和晶体间均发育大量孔隙，特别是堆晶结构的斑点中晶间溶蚀孔密集大量发育，直径可达 10 μm 至数百微米；其次是晶内溶蚀孔，但孔径普遍小于 10 μm 。压汞曲线表明此类样品中 15 nm、20~60 μm 左右的孔隙体积占比最大。这些孔隙可能与斑点遭有机质层排出的有机酸溶蚀有关。孔隙间相互连通，在空间上呈层状分布，与斑点发育位置关系密切（图 7）。

3.1.4 含有机块状云质页岩相

该岩相在 K_{1g0} — K_{1g2} 段普遍发育，深灰色块状构造，均匀致密，网状裂缝发育（图 3 中 d1）。总体以泥晶—微晶铁白云石与白云石为主，其次为钠长石及少量陆源石英、黏土矿物与有机质混合而成（图 3 中 d2），局部见黄铁矿。黏土呈条带状，有定向性，多与有机质伴生（图 3 中 d3）。有机母质为分散状结构镜质体、孢子体。有机质含量显著降低，TOC 值分布于 0.9%~2.5% 之间，均值为 1.8%， I_H 值为 136~419 mg/g，均值为 223 mg/g； S_1 值和氯仿沥青“A”含量分别为 0.8~5.6 mg/g 和 0.3%~0.8%，均值分别为 3.0 mg/g 和 0.5%。

该岩相孔隙度为 1.9%~5.2%，平均为 3.1%，主要发育介孔。铸体薄片下仅

能观察到少量相对较大的晶间孔/粒间孔, 直径为 10~30 μm ; 大部分孔隙属于晶内孔/粒内孔, 直径多小于 1 μm ; 不发育有机质孔隙, 偶在有机质内部和边缘发现微裂缝。进汞曲线的汞饱和度在 10~70 MPa 区间迅速提高了 40%, 表明孔隙直径在 20~150 nm 的孔隙体积占比最高, 为该岩相最主要的储集空间。退汞曲线平缓, 渗透率为 $(0.001\sim0.004)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 平均仅为 $0.002\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 表明这些孔隙之间互相孤立, 连通性差, 样品中存在水平和垂直裂缝时可明显改善孔隙的连通性(图 7)。

3.2 富有机块状长英质页岩相

该岩相在 K_{1g0} 段顶部、 K_{1g1} 段中部及 K_{1g2} 段底部较发育, 以夹层形式分布于页岩地层中。岩心为深灰色(图 3 中 e1), 断面质感粗糙。整体均匀致密, 可见网状裂缝, 岩心表面原油渗出。长英质矿物含量为 52%~75%, 以粒径小于 0.5 mm 的钠长石、石英为主(图 3 中 e2); 其次为泥晶—微晶铁白云石、白云石, 占比为 25~41%, 黏土含量仅为 2%。 TOC 值在 1.6%~3.2%之间, 平均为 2.2%; I_H 值为 172~312 mg/g, 均值为 247 mg/g; S_1 值和氯仿沥青“A”含量在所有岩相中最高, 分别为 3.1~6.3 mg/g 和 0.7%~1.3%, 均值分别为 4.9 mg/g 和 1.0%。

平均孔隙度和渗透率分别为 5.2%和 $0.014\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 以宏孔为主。此类岩相的突出特征是钠长石颗粒间和颗粒内发育大量溶孔, 直径大于 1 μm , 最大可达 80 μm , 孔隙规模大且数量多, 在空间中均匀密集分布(图 7), 是储集能力良好的主要原因。较高的退汞效率和渗透率表明孔隙间连通性好。

3.3 混合质页岩相

3.3.1 含有机块状混合质页岩相

该岩相发育于 K_{1g0} 、 K_{1g2} 段。岩心深灰色, 裂缝发育程度低(图 3 中 f1)。矿物粒径小、粒度均一, 泥晶—微晶碳酸盐矿物含量 25%~40%、粉砂级碎屑矿物含量为 29%~40%、黏土矿物含量为 23%~44%。黏土矿物大量聚集呈团块状、或点状分散分布(图 3 中 f2), 多为伊利石、伊/蒙混层。此外, 密集发育的层状黄铁矿与黏土、有机质共生, 表明沉积水体安静、处于强还原环境。有机质呈条状、块状填充于颗粒间(图 3 中 f3), 含量分布在 0.5%~3.5%之间, 平均为 1.7%; I_H 值为 68~263 mg/g, 均值为 148 mg/g; S_1 和氯仿沥青“A”含量分别为 0.7~2.2 mg/g 和 0.2%~0.5%, 均值分别为 1.5 mg/g 和 0.3%。

平均孔隙度为 3.4%, 渗透率为 $0.004\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 介孔为主。铸体薄片孔隙不明显, 仅发育少量未被充填的微裂缝, 开度 1~5 μm 。电镜下进一步观察发现大量丝片状伊利石生长于颗粒表面、充填于颗粒间, 将孔隙分割成许多三角形小孔隙(图 7)。微裂缝、黏土矿物晶间孔和矿物内部孔隙是主要孔隙类型。最大汞饱和度仅为 24%, 除微裂缝外, 仅有少量微米孔隙零星分布, 多数属纳米级孔隙。

3.3.2 含有机含砾混合质页岩相

该岩相外表深灰色至灰黑色, 呈块状构造, 见于 K_{1g0} 段顶部、 K_{1c} 层顶部及底部。岩心表面可见密集无定向排布的砾石, 粒径 0.1 mm~1 cm 不等, 多数呈圆状、次圆状(图 3 中 g1)。根据物质成分差异将砾石分为火山碎屑砾石和硅质碎屑砾石。 TOC 值在 0.7%~1.9%之间, 平均为 1.9%; I_H 值为 56~138 mg/g, 均值为 101 mg/g; S_1 值和氯仿沥青“A”含量分别为 1.4~2.1 mg/g 和 0.2%~0.4%, 均值分别为 1.7 mg/g 和 0.3%。

在硅质碎屑和火山碎屑内部均可见孔隙，硅质碎屑中孔隙密集发育但规模仅为数十纳米，火山碎屑发育收缩孔、溶蚀孔，直径普遍在 10~100 μm 之间。此外，砾石中可见少量微裂缝，起到一定沟通作用。该岩相中虽然发育大孔隙，但仅发育在火山碎屑砾石中，受其数量和尺寸限制。主要的孔隙类型为黏土晶间孔，基质矿物、硅质碎屑砾石内部孔，孔隙直径集中分布在 20~40 nm 之间。孔隙三维分布与砾石发育位置密切相关，在空间上具有强非均质性（图 7），且退汞效率低，孔隙连通性差。

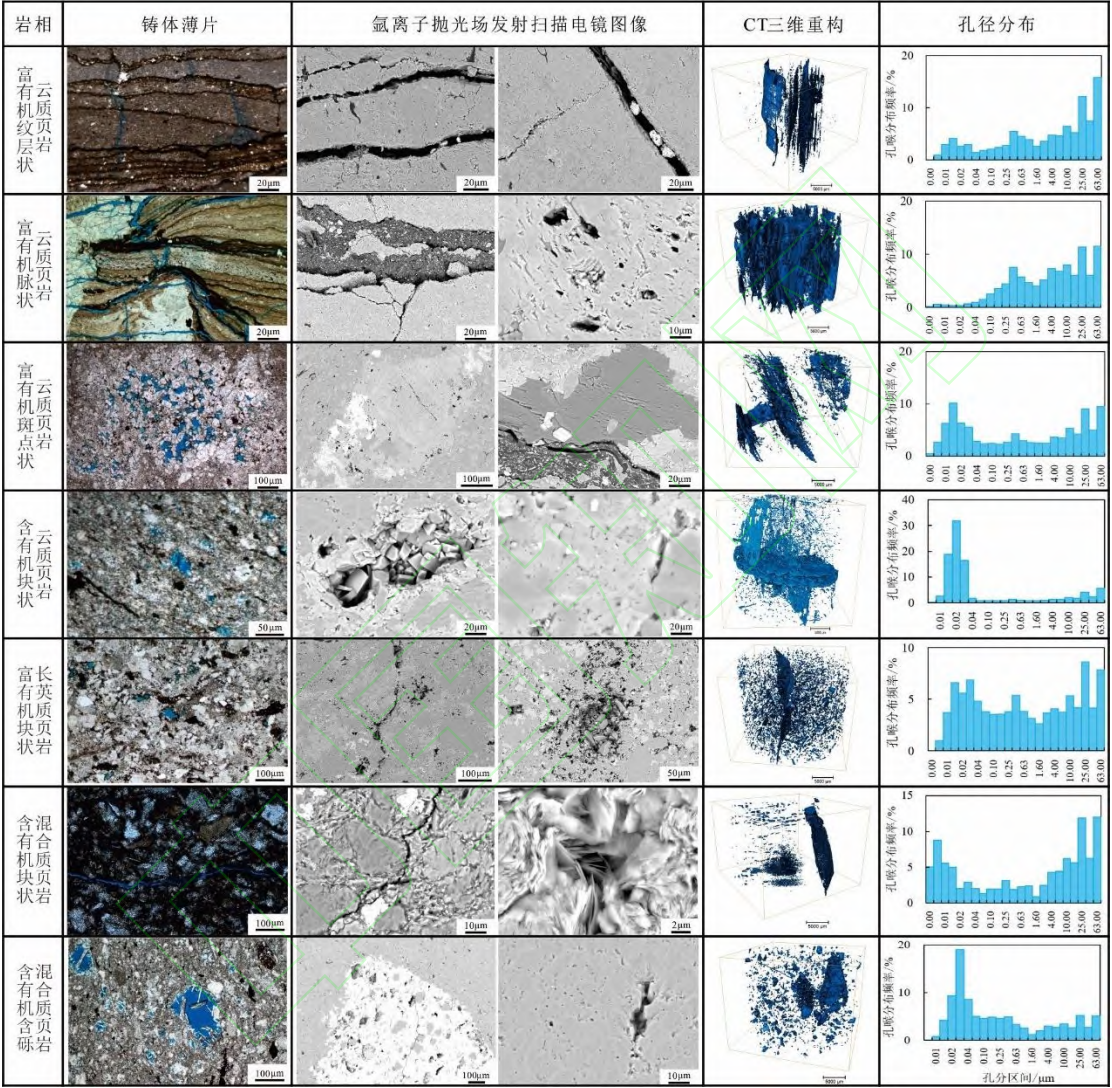


图 7 青西凹陷下沟组主要岩相储层特征

Fig.7 Reservoir characteristics of principal lithofacies in Xiagou Formation, Qingxi Sag

综上所述，富有机纹层状云质页岩、富有机脉状云质页岩和富有机斑点状云质页岩中均发育以碳酸盐纹层为主的“二元纹层”结构，具备良好的生烃潜力和含油性。其中富有机质纹层状云质页岩、富有机脉状云质页岩以微裂缝为主要储集空间，富有机斑点状云质页岩的斑点内含大量晶间溶孔，以介孔、宏孔为主；含有机块状云质页岩非均质性强，以晶内介孔为主；富有机块状长英质页岩具有“低生烃能力，高含油性，粒间溶蚀宏孔发育”的特点；含有机块状混合质页岩和含有机含砾混合质页岩以介孔为主，生烃能力低且含油性差。

4 页岩油富集优势岩相

确定页岩油富集的优势岩相是识别页岩油潜力层段的重要基础，优势岩相的判识需要综合考虑烃源岩品质、储层品质、含油性及工程品质^[47]，涉及的评价参数众多，且不同地区不同层段地质特征存在差异，需要具体分析。

有机质是油气生成的基础，包括有机质丰度、类型和热演化程度。LY1H井下沟组页岩深度处于4 000~5 000 m之间， $T_{\max}$ 值集中在440~445 °C之间，整体处于开始生油—生油高峰阶段。青西凹陷中—东部半深湖—深湖相地区是下沟组高有机碳含量区域^[26]，该地区以沉积碳酸盐矿物为主，云质页岩相TOC值高于长英质页岩和混合质页岩（图8）；同时，湖盆在温暖气候时藻类勃发，深湖区安静、还原性水体有利于优质生烃母质的富集与保存，形成富有机质纹层，因此脉状构造、斑点构造和纹层构造 I_H 值显著高于块状构造和含砾构造[图8(b)]。兼具高碳酸盐含量、有机质纹层两项优势的富有机脉状云质页岩相、富有机斑点状云质页岩相及富有机纹层状云质页岩相有机质丰度高、生烃潜力大，为最优质烃源岩相。

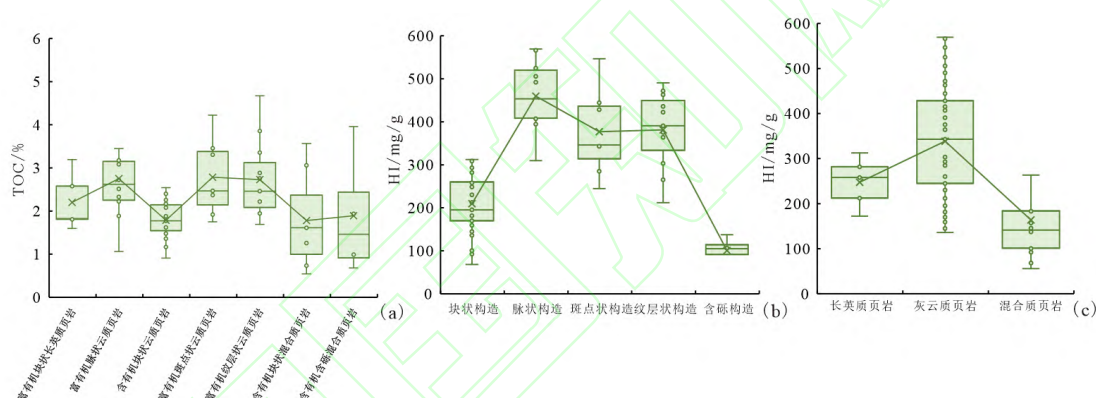


图 8 青西凹陷下沟组主要岩相生烃潜力

Fig.8 Hydrocarbon generation potential of principal lithofacies in Xiagou Formation, Qingxi Sag

当油气源充足的情况下，页岩的储集空间越大，容纳烃类能力越强^[48]。同时，孔隙尺寸通过影响页岩油赋存状态进而控制可动性，富含微裂缝、宏孔的页岩储层游离油含量较高，吸附油含量随介孔、微孔数量的增多而增大^[49]。晚燕山末期和喜马拉雅期强烈的构造活动使青西凹陷发育大型褶皱和断层，派生的裂缝在下沟组发展出大量微裂缝。一方面，这些构造微裂缝普遍开度较大，且充填程度低，是油气主要储集空间和良好的运移通道；另一方面，微裂缝可沟通孔隙、层间缝形成孔—缝网络体系，扩大了有效连通的孔隙空间。富有机块状长英质页岩、富有机脉状云质页岩孔隙度相对较高，宏孔占比超50%，平均孔径大于50 nm，孔缝系统发育，储集条件优越，为优质储层岩相；斑点直径较大的斑点状云质页岩，孔隙度、宏孔占比及平均孔径也可达到较高水平（表1），同样可作为优质储层岩相。

国内在对页岩含油性进行定量评价时重点采用残留烃“ S_1 ”，该参数可以最直接反映单位岩石中所含烃类质量，参考混积型页岩油富集层系评价标准^[47]，认为当 $S_1 > 2$ mg/g时页岩含油量高。同时，还需采用OSI（含油饱和度指数， $OSI = S_1 / TOC \times 100$, mg_烃/g_{TOC}）判断页岩油的可动程度^[50]，OSI

值大于100 mg/g时，表明页岩中的油已满足自身有机质的吸附，多余的油以游离态存在于矿物孔隙中，OSI值越高说明越具页岩油开发潜力。综合含油量及可动性，富有机块状长英质页岩、富有机脉状云质页岩、含有机块状云质页岩、富有机斑点状云质页岩含油性明显更优（图9）。

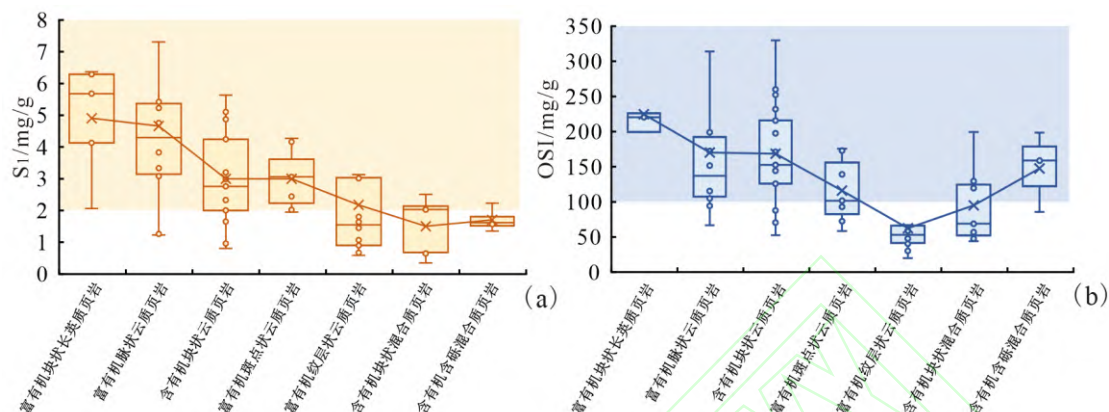


图9 青西凹陷下沟组页岩岩相含油量及可动性对比

Fig.9 Oil content and mobility comparison among shale lithofacies in Xiangou Formation, Qingxi Sag

脆性矿物占比越高，页岩脆性通常更好，有利于储层的压裂改造。高黏土含量通常会堵塞颗粒间孔隙、提高页岩韧性，抑制微米孔隙、微裂缝发育，使储层质量大幅降低。富有机纹层状云质页岩、富有机脉状云质页岩、富有机斑点状云质页岩和富有机块状长英质页岩脆性矿物含量高、微裂缝发育，几乎不发育夹层，有助于水平井压裂形成复杂缝网，是工程品质角度的优势岩相。

虽然富有机块状长英质页岩的低生烃潜力与最高的 S_1 和OSI之间存在矛盾（图9），但考虑到陆相页岩油的“微运移”效应，结合其内部发育大量溶蚀孔、微裂缝以及孔隙中赋存的轻质油（图3中e3浅蓝色部分），判断其含有微运移进入的烃类。富有机脉状云质页岩正处于大量生油阶段，且发育的孔缝网络有利于烃类的滞留（图3中b3浅蓝色部分）。因此，富有机块状长英质页岩、富有机脉状云质页岩相游离烃含量高、可动性强、储集空间足够且渗流性好、可压裂性好，是目前勘探开发的最有利岩相。

5 结论

（1）通过岩心描述、薄片鉴定、扫描电镜观察、高压压汞及地球化学等多种测试手段，发现酒泉盆地青西凹陷下沟组页岩矿物组成以铁白云石、白云石、钠长石、方解石为主，其次为石英、钾长石、黏土矿物及黄铁矿等。发育纹层状、块状构造及热液、重力流作用下的脉状、斑点状、含砾等特殊沉积构造。

（2）以矿物组成、沉积构造（包含特殊沉积构造）为依据将青西凹陷下沟组页岩划分为7类主要岩相：①富有机纹层状云质页岩；②富有机脉状云质页岩，③富有机斑点状云质页岩，④含有机块状云质页岩，⑤富有机块状长英质页岩，⑥含有机块状混合质页岩；⑦含有机含砾混合质页岩。

(3) 富有机纹层状云质页岩、富有机脉状云质页岩、富有机斑点状云质页岩有机质纹层富集, 生烃潜力高于块状和含砾构造的岩相, 层理缝和构造微裂缝构成网状裂缝, 热液矿物发育大量溶蚀孔, 极大改善了储集渗流能力; 富有机块状长英质页岩中发育大量钠长石粒间孔, 且宏孔数量多, 储层有效孔隙及渗流能力强; 含有机块状混合质页岩、含有机含砾混合质页岩中的粒间孔被黏土矿物堵塞, 韧性提高, 物性及可压裂性差。综合油气生成潜力、储集渗流性能、含油性、可动性、脆性等因素, 认为富有机块状长英质页岩、富有机脉状云质页岩是当前页岩油勘探的最有利岩相。

参考文献

- [1]赵文智,朱如凯,张婧雅,等.中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J].中国石油勘探,2023,28(4):1-13.
- ZHAO W Z, ZHU R K, ZHANG J Y, et al. Types, exploration and development status, and development trends of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(4):1-13.
- [2]邹才能,马锋,潘松圻,等.全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J].地学前缘,2023,30(1):128-142.
- ZOU C N, MA F, PAN S Q, et al. Global shale oil distribution potential and theoretical and technological progress of continental shale oil in China[J]. Earth Science Frontiers,2023,30(1):128-142.
- [3]邹才能,杨智,董大忠,等.非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J].地球科学,2022,47(5):1517-1533.
- ZOU C N, YANG Z, DONG D Z, et al. Formation, distribution, and prospects of unconventional source-rock hydrocarbons[J]. Earth Science,2022,47(5):1517-1533.
- [4]支东明,唐勇,杨智峰,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J].石油与天然气地质,2019,40(3):524-534.
- ZHI D M, TANG Y, YANG Z F, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in the Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(3):524-534.
- [5]孙焕泉,蔡勋育,周德华,等.中国石化页岩油勘探实践与展望[J].中国石油勘探,2019,24(5):569-575.
- SUN H Q, CAI X Y, ZHOU D H, et al. Exploration practices and prospects of shale oil in Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):569-575.
- [6]赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等.湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5):856-869.
- ZHAO X Z, ZHOU L H, PU X G, et al. Formation conditions and enrichment model of lacustrine shale retained hydrocarbons: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(5):856-869.
- [7]孙龙德,刘合,何文渊,等.大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J].石油勘探与开发,2021,48(3):453-463.
- SUN L D, LIU H, HE W Y, et al. Major scientific issues and research paths of Gulong shale oil in Daqing, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development,2021,48(3):453-463.
- [8]金之钧,梁新平,王小军,等.玛湖凹陷风城组页岩油富集机制与甜点段优选[J].新疆石油地质,2022,43(6):631-639.

- JIN Z J, LIANG X P, WANG X J, et al. Enrichment mechanism and sweet spot optimization of Fengcheng Formation shale oil in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(6): 631-639.
- [9] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224-237.
- HU S Y, BAI B, TAO S Z, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment characteristics of medium-high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237.
- [10] 尹嘉, 邹才能, 吴松涛, 等. 咸化湖盆优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程——以柴达木盆地地下干柴沟组上段为例[J/OL]. 地球科学: 1-35. [2025-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20250227.1123.002.html>.
- YIN J, ZOU C N, WU S T, et al. Development mechanism of high-quality source rocks and shale oil enrichment in saline lacustrine basins: A case study of the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in the Qaidam Basin[J/OL]. Earth Science, 1-35. [2025-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20250227.1123.002.html>.
- [11] 梁新平, 金之钧, 刘全有, 等. 陆相淡水与咸化湖盆页岩有机质差异富集机理[J]. 科学通报, 2025, 70(2): 262-274.
- LIANG X P, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Differential enrichment mechanisms of organic matter in continental freshwater and saline lacustrine shale[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(2): 262-274.
- [12] 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等. 中国典型咸化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 25-37.
- ZHAO W Z, BIAN C S, PU X G, et al. Enrichment and flow characteristics of shale oil in typical saline lacustrine basins of China and their significance in "sweet spot" evaluation[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2023, 47(5): 25-37.
- [13] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 99-110.
- XIE J Y, CUI X J, LI W B, et al. Exploration and practice of profitable development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 99-110.
- [14] 黎茂稳, 马晓潇, 蒋启贵, 等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.
- LI M W, MA X X, JIANG Q G, et al. Formation conditions, enrichment characteristics, and implications of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [15] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in East-Central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [16] MILLIKEN K L, ESCH W L, REED R M, et al. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1553-1578.
- [17] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [18] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
- ZOU C N, YANG Z, CUI J W, et al. Formation mechanism, geological characteristics, and

- development strategy of shale oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2013,40(1):14-26.
- [19]邹才能,朱如凯,白斌,等.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J].*矿物岩石地球化学通报*,2015,34(1):3-17.
- ZOU C N, ZHU R K, BAI B, et al. Connotation, characteristics, potential, and challenges of tight oil and shale oil[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*,2015,34(1):3-17.
- [20]陈世悦,张顺,王永诗,等.渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J].*石油勘探与开发*, 2016,43(2):198-208.
- CHEN S Y, ZHANG S, WANG Y S, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the Paleogene Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016,43(2):198-208.
- [21]郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等.陆相页岩油富集机理探讨[J].*石油与天然气地质*,2023,44(6):1333-1349.
- GUO X S, MA X X, LI M W, et al. Discussion on the enrichment mechanism of continental shale oil[J]. *Oil & Gas Geology*,2023,44(6):1333-1349.
- [22]刘惠民,张顺,王学军,等.陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征:以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例[J].*地球科学*,2023,48(1):30-48.
- LIU H M, ZHANG S, WANG X J, et al. Lithofacies associations and characteristics of shale in continental rift basins: A case study of the upper Es4 shale in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *Earth Science*,2023,48(1):30-48.
- [23]付金华,邓秀芹,楚美娟,等.鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J].*沉积学报*,2013,31(5):928-938.
- FU J H, DENG X Q, CHU M J, et al. Development characteristics and petroleum geological significance of deep-water lithofacies in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2013,31(5):928-938.
- [24]柳波,石佳欣,付晓飞,等.陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J].*石油勘探与开发*,2018,45(5):828-838.
- LIU B, SHI J X, FU X F, et al. Lithofacies characteristics and shale oil enrichment conditions of continental mud-shale strata: A case study of organic-rich shale in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2018,45(5):828-838.
- [25]王勇,王学军,宋国奇,等.渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩岩相与页岩油富集关系[J].*石油勘探与开发*,2016,43(5):696-704.
- WANG Y, WANG X J, SONG G Q, et al. Relationship between lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016,43(5):696-704.
- [26]陈建平,魏军,倪云燕,等.酒泉盆地酒西坳陷主力烃源岩分布及对油气勘探的启示[J].*石油学报*,2018,39(11):1223-1240.
- CHEN J P, WEI J, NI Y Y, et al. Distribution of main source rocks in Jiuxi Depression, Jiuquan Basin and implications for petroleum exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2018,39(11):1223-1240.
- [27]范铭涛,杨麟科,方国玉,等.青西凹陷下白垩统湖相喷流岩成因探讨及其意义[J].*沉积学报*,2003,21(4):560-564.
- FAN M T, YANG L K, FANG G Y, et al. Origin and significance of lacustrine exhalative rocks in Lower Cretaceous of Qingxi Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2003,21(4):560-564.
- [28]何亮,尹太举,张文旗,等.泥云岩储层成因机理及其特征研究——以酒西盆地青西凹陷下

沟组泥云岩储层为例[J].科学技术与工程,2014,14(32):176-182.

HE L, YIN T J, ZHANG W Q, et al. Genetic mechanism and characteristics of argillaceous dolomite reservoirs: A case study of argillaceous dolomite in Xiagou Formation, Qingxi Sag, Jiuxi Basin[J]. Science Technology and Engineering,2014,14(32):176-182.

[29]郑荣才,文华国,李云,等.甘肃酒西盆地青西凹陷下白垩统下沟组湖相喷流岩物质组分与结构构造[J].古地理学报,2018,20(1):1-18.

ZHENG R C, WEN H G, LI Y, et al. Composition and texture of lacustrine exhalative rocks in Lower Cretaceous Xiagou Formation, Qingxi Sag, Jiuxi Basin, Gansu[J]. Journal of Palaeogeography,2018,20(1):1-18.

[30]李婷婷,朱如凯,白斌,等.混积岩储层特征——以酒泉盆地青西凹陷下白垩统混积岩为例[J].沉积学报,2015,33(2):376-384.

LI T T, ZHU R K, BAI B, et al. Characteristics of hybrid rock reservoirs: A case study of Lower Cretaceous hybrid rocks in Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015,33(2):376-384.

[31]李婷婷,朱如凯,白斌,等.酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J].中国石油勘探,2015,20(1):38-47.

LI T T, ZHU R K, BAI B, et al. Laminae characteristics and significance of lacustrine fine-grained sedimentary rocks in Xiagou Formation, Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(1):38-47.

[32]陈建平,陈建军,倪云燕,等.酒西坳陷石北次凹油气生成、运移成藏及勘探方向[J].地质学报,2019,93(1):252-271.

CHEN J P, CHEN J J, NI Y Y, et al. Hydrocarbon generation, migration, accumulation, and exploration targets in Shibe Sub-sag, Jiuxi Depression[J]. Acta Geologica Sinica,2019,93(1):252-271.

[33]王建,郭秋麟,赵晨蕾,等.中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2023,44(12):2033-2044.

WANG J, GUO Q L, ZHAO C L, et al. Shale oil and gas resource potential and development prospects in major basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(12):2033-2044.

[34]魏浩元,朱宗良,肖文华,等.酒泉盆地青西凹陷油气地质特征及下步勘探方向[J].地学前缘,2023,30(1):69-80.

WEI H Y, ZHU Z L, XIAO W H, et al. Petroleum geological characteristics and future exploration targets in Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. Earth Science Frontiers,2023,30(1):69-80.

[35]马素萍,张晓宝,夏燕青,等.酒西盆地青西凹陷窟窿山构造下白垩统湖相烃源岩干酪根地球化学特征[J].石油天然气学报,2009,31(2):233-236.

MA S P, ZHANG X B, XIA Y Q, et al. Geochemical characteristics of kerogen in Lower Cretaceous lacustrine source rocks from Kulongshan structure, Qingxi Sag, Jiuxi Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2009,31(2):233-236.

[36]孙维凤,宋岩,公言杰,等.青西凹陷下白垩统下沟组泥云岩致密油储层特征[J].地质科学,2015,50(1):315-329.

SUN W F, SONG Y, GONG Y J, et al. Characteristics of tight oil reservoirs in argillaceous dolomite of Lower Cretaceous Xiagou Formation, Qingxi Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2015,50(1):315-329.

[37]罗群,张泽元,袁珍珠,等.致密油甜点的内涵、评价与优选——以酒泉盆地青西凹陷白垩系下沟组为例[J].岩性油气藏,2022,34(4):1-12.

LUO Q, ZHANG Z Y, YUAN Z Z, et al. Connotation, evaluation, and optimization of tight oil sweet spots: A case study of Lower Cretaceous Xiagou Formation in Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 1-12.

[38] 潘良云, 谢结来, 李明杰, 等. 酒泉盆地白垩纪-新生代区域构造演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2006(01): 62-69.

PAN L Y, XIE J L, LI M J, et al. Cretaceous-Cenozoic regional tectonic evolution and petroleum exploration in Jiuquan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 62-69.

[39] 陈建平, 陈建军, 张立平, 等. 酒西盆地油气形成与勘探方向新认识(一)——基本石油地质条件及生油潜力[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 19-22.

CHEN J P, CHEN J J, ZHANG L P, et al. New understanding of petroleum formation and exploration targets in Jiuxi Basin (Part 1): Basic petroleum geological conditions and hydrocarbon generation potential[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 19-22.

[40] 文华国, 郑荣才, 叶泰然, 等. 酒西盆地青西凹陷下白垩统沉积特征与有利勘探区预测[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(4): 71-77.

WEN H G, ZHENG R C, YE T R, et al. Sedimentary characteristics and favorable exploration areas of Lower Cretaceous in Qingxi Sag, Jiuxi Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2005, 25(4): 71-77.

[41] 罗平, 杨式升, 马龙, 等. 酒西盆地青西坳陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 32-33.

LUO P, YANG S S, MA L, et al. Origin, characteristics, and petroleum exploration significance of argillaceous plagioclase in laminated argillaceous dolomite from Qingxi Sag, Jiuxi Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 32-33.

[42] 文华国. 酒泉盆地青西凹陷湖相“白烟型”热水沉积岩地质地球化学特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.

WEN H G. Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of Lacustrine "White Smoker-Type" Hydrothermal Sedimentary Rocks in Qingxi Sag, Jiuquan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.

[43] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.

MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.

[44] 李圻, 刘可禹, 蒲秀刚, 等. 沧东凹陷孔二段混合细粒沉积岩相特征及形成环境[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3779-3796.

LI Y, LIU K Y, PU X G, et al. Lithofacies characteristics and depositional environment of mixed fine-grained sedimentary rocks in the second member of Kongdian Formation, Cangdong Sag[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3779-3796.

[45] 姜福杰, 黄任达, 胡涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油地质特征与分级评价[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 899-911.

JIANG F J, HUANG R D, HU T, et al. Geological characteristics and graded evaluation of shale oil in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 899-911.

[46] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.

LU S F, HUANG W B, CHEN F W, et al. Discussion on classification and evaluation criteria for

- shale oil and gas resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249-256.
- [47] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN L D, ZHAO W Z, LIU H, et al. Concept and application of shale oil "sweet spot": A discussion[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [48] 李吉君, 史颖琳, 章新文, 等. 页岩油富集可采主控因素分析: 以泌阳凹陷为例[J]. *地球科学 (中国地质大学学报)*, 2014, 39(7): 848-857.
- LI J J, SHI Y L, ZHANG X W, et al. Analysis of main controlling factors for shale oil enrichment and recoverability: A case study of Biyang Depression[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(7): 848-857.
- [49] ZHANG C X, JIANG F J, HU T, et al. Oil occurrence state and quantity in alkaline lacustrine shale using a high-frequency NMR technique[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 154: 106302.
- [50] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: Shale-oil resource systems[J]. *AAPG Memoir*, 2012(97): 89-119.

Lithofacies characteristics and favorable lithofacies for shale oil enrichment of carbonate-rich shale in Xiagou Formation, Qingxi Sag, Jiuquan Basin

ZHANG Chenxi^{1,2}, JIANG Fujie^{1,2}, LI Tao³, YUAN Bochao³, LIU Xinze³, FAN Xiaoqi^{1,2},
GUO Tingwei^{1,2}, HU Yachao^{1,2}, JIANG Haojie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735019, China)

Abstract: The shale oil potential of Qingxi Sag in Jiuquan Basin is good, but the shale lithofacies type and dominant lithofacies are not clear, which restricts the efficient exploration. By means of core observation, thin section identification, argon-ion scanning electron microscopy, basic geochemistry, XRD whole rock analysis and high-pressure mercury injection, the shale lithofacies classification scheme of Xiagou Formation in Qingxi Depression has been established, and the main lithofacies of Xiagou Formation and the organic-inorganic petrology, the quality of source rock, the type of reservoir space and oil content of each lithofacies have been defined. It is helpful to establish the relationship between lithofacies and shale oil enrichment and to find favorable exploration targets. The results show that the shale of Xiagou Formation mainly develops seven types of lithofacies, among which: ① organic stratified shale, organic vein shale and organic blotch-shaped shale are enriched, developed network fractures, and hydrothermal minerals contain a large number of dissolution pores, which greatly improve the reservoir seepage capacity; ② A large number of intergranular macropores of albite are developed in organic-rich massive feldspar shale, and the effective porosity and seepage capacity of the reservoir are strong; ③ The hydrocarbon generation potential of organic-massive mixed shale and organic-gravel mixed shale is low, the pores are blocked by clay, and the toughness is improved, resulting in poor physical property and fracturing ability. Based on factors such as hydrocarbon generation potential, reservoir seepage performance, oil bearing, mobility and brittleness, it is considered that massive felsic shale and vein dolomitic shale are the most favorable rock facies for shale oil exploration at present.

Key words: Qingxi Sag; Xiagou Formation; Shale oil; Lithofacies characteristic; Favorable lithofacies

Foundation item: The project of PetroChina Yumen Oilfield Company (Grand No. KT2023JF23006).

