

王立新, 高青松, 周家林, 等. 黏土矿物类型对抗锦旗下石盒子组致密砂岩储层束缚水饱和度的影响[J]. 岩矿测试, 2024, 43(6): 821-835. DOI: 10.15898/j.ykcs.202407150157.

WANG Lixin, GAO Qingsong, ZHOU Jialin, et al. The Impact of Different Clay Mineral Types on the Irreducible Water Saturation in Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi Area, Ordos Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(6): 821-835. DOI: 10.15898/j.ykcs.202407150157.

## 黏土矿物类型对抗锦旗下石盒子组致密砂岩储层束缚水饱和度的影响

王立新<sup>1</sup>, 高青松<sup>1\*</sup>, 周家林<sup>1</sup>, 刘岩<sup>2</sup>, 曹茜<sup>2\*</sup>, 陈婷<sup>2</sup>, 王力<sup>2</sup>

(1. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 河南 郑州 450006;

2. 成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都 610059)

**摘要:** 现有研究对黏土矿物、孔喉结构和束缚水饱和度关系认识不足, 对束缚水饱和度的微观影响因素尚不明确。本文聚焦鄂尔多斯盆地北缘杭锦旗地区锦30井区盒1段致密砂岩储层, 探讨黏土矿物类型与含量对束缚水饱和度的影响。在岩心观察基础上, 通过X射线衍射分析、高分辨率扫描电镜、铸体薄片分析、一维核磁共振实验和高压压汞实验等多种测试方法, 对目的层岩石学特征、黏土矿物类型及产出形态、孔隙结构、束缚水分布展开研究。研究结果显示: ①盒1段储层黏土矿物平均含量为18.36%, 主要发育高岭石、伊利石、绿泥石和伊/蒙混层等黏土矿物; ②不同岩相中黏土矿物的类型存在差异: 岩屑石英砂岩中黏土矿物以长石蚀变高岭石为主, 发育长石粒内溶孔、高岭石晶间孔; 岩屑砂岩以岩屑及杂基蚀变伊利石为主, 发育伊利石充填的岩屑粒内溶孔; ③束缚水饱和度随黏土矿物总量增加呈增大趋势, 伊利石呈丝状发育堵塞孔喉是影响束缚水饱和度分布的主导因素; 不同成因高岭石对束缚水分布影响有差异: 长石高岭石化形成的高岭石单体排列杂乱且疏松, 对应黏土矿物晶间孔隙不发育但长石溶蚀孔较发育, 孔隙连通性较好; 自生高岭石呈蠕虫状或书页状集合体状分布, 相互支撑形成大量微纳米级孔隙, 引起束缚水饱和度增加; 不同类型黏土矿物分布对束缚水饱和度影响的研究, 对致密砂岩储层评与产能预测至关重要。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 致密砂岩; 黏土矿物; 孔喉结构; 束缚水饱和度

**要点:**

- (1) 研究层段储层普遍发育高岭石、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层, 不同岩相下黏土矿物含量及类型存在显著性差异。
- (2) 储集空间内主要发育高岭石晶间孔、长石粒内溶孔、岩屑溶孔等, 孔隙多为中小孔。
- (3) 伊利石、长石溶蚀形成高岭石及自生高岭石充填部分粒间孔隙形成复杂的束缚水网络, 导致不同含量和不同类型黏土矿物作用下束缚水分布存在差异性。

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

致密砂岩气资源在中国现阶段的能源结构转型中发挥着重要作用, 目前中国已在鄂尔多斯盆地地下石盒子组和山西组、四川盆地须家河组等发现了储

量巨大的致密砂岩气资源。杭锦旗勘探新区不断获得新发现, 部分井压裂初产气量可达 $1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{d}$ , 显示出盒1段富含天然气, 有巨大的勘探潜力<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-11-01; 接受日期: 2024-11-20; 网络出版日期: 2024-12-25

基金项目: 中石化科技部项目“东胜致密高含水气藏有效开发关键技术”(P23030)

第一作者: 王立新, 高级工程师, 主要从事油气田开发工作。E-mail: wanglx.hbsj@sinopec.com。

通信作者: 高青松, 高级工程师, 主要从事天然气地质及气藏开发技术研究。E-mail: gaoqs.hbsj@sinopec.com。

通信作者: 曹茜, 博士, 高级工程师, 主要从事非常规油气储层评价及实验研究。E-mail: caoqian2022@cdut.edu.cn。

在致密砂岩油气勘探开发愈发重要的大背景下,如何提高采收率和开发效率成为新热点,黏土矿物作为孔喉结构、束缚水饱和度的重要影响因素成为关注的焦点<sup>[2-3]</sup>。鄂尔多斯盆地杭锦旗地区盒 1 段储层碎屑矿物成熟度较低,储层中发育的黏土矿物类型多样<sup>[4-6]</sup>,储层非均质性强,由黏土矿物类型及含量差异导致孔喉结构特征错综,造成储层流体赋存状态复杂<sup>[7]</sup>。

储层中的水以可动水和束缚水两种形式存在,束缚水主要赋存于非连通的密封孔内,以薄膜形式附着于黏土矿物表面或发育在微小孔隙内<sup>[8]</sup>。研究束缚水饱和度可对储层中的可动水进行定量评价,对研究致密砂岩含气性有重要意义。前人针对不同致密砂岩储层中束缚水赋存的影响因素进行了分析,通过分析束缚水饱和度与孔隙结构、岩性之间的关系,利用孔隙结构指数建立束缚水饱和度评价模型,指出束缚水饱和度与岩石粒度中值、孔隙度和孔隙结构有关,孔隙半径越小,束缚水膜相对厚度越大,束缚水饱和度越高<sup>[9-10]</sup>;也有学者指出束缚水饱和度随着物性指数增加而降低,随着泥质含量增加而上升,岩石亲水性越强,水膜厚度越大,束缚水饱和度越高<sup>[11-12]</sup>。黏土矿物晶间孔构成了致密砂岩储层的次级孔喉网络,不同成因的黏土矿物产状、结构及矿物间转化,导致储层储集系统越发复杂。目前由于缺乏对黏土矿物作用下孔隙结构差异,从而引起束缚水饱和度分布变化的系统研究,严重制约了储层含气性精细评价工作。

鉴于此,本文以鄂尔多斯盆地北缘杭锦旗地区下石盒子组盒 1 段致密砂岩储层为研究对象,在岩心观察基础上,通过 X 射线衍射分析、高分辨率扫描电镜、铸体薄片分析、一维核磁共振实验和高压压汞实验等多种测试方法,对目的层岩屑砂岩和岩屑石英砂岩储层中黏土矿物类型及产出特征以及不同岩相孔隙结构的差异,对束缚水饱和度的影响进行研究,厘清不同类型黏土矿物产出差异性,与束缚水饱和度之间的关系,为下石盒子组储层含气性精细评价提供依据。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是一个构造简单的大型多旋回克拉通叠合盆地,北至伊盟隆起,南至渭北高原,是中国第二大沉积盆地。杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北部,跨越了伊盟隆起、伊陕斜坡以及天环坳陷三大地质构造单元<sup>[13-14]</sup>,从西到东主要发育 4 大断裂带,

分别为三眼井断裂、乌兰吉林庙断裂、泊尔江海子断裂和李家渠断裂,依据地形、断层和行政界限,主要划分为新召、公卡汗、浩绕召、十里加汗、什股壕、阿镇六个区块。

杭锦旗地区上古生界沉积体表现为由滨浅海环境向内陆湖泊环境的过渡性特征,其碎屑物和沉积特征反映了复杂地质作用的过程,盒 1 段的沉积受到加里东运动以来的古构造格局控制,由浅海陆棚相过渡为海陆过渡相,物源主要为鄂尔多斯盆地北部的剥蚀区风化岩层,碎屑物经过风化、剥蚀搬运,最终沉积<sup>[15]</sup>。研究区以阵发性的洪水冲积平原为主,河道系统分布呈现由南向北的条带状特征,其中辫状河道在横向分布上表现为片状发育,不同河道在纵向上交错叠置,形成一系列复杂沉积构造,构成了油气储集有利空间<sup>[16-17]</sup>(图 1)。

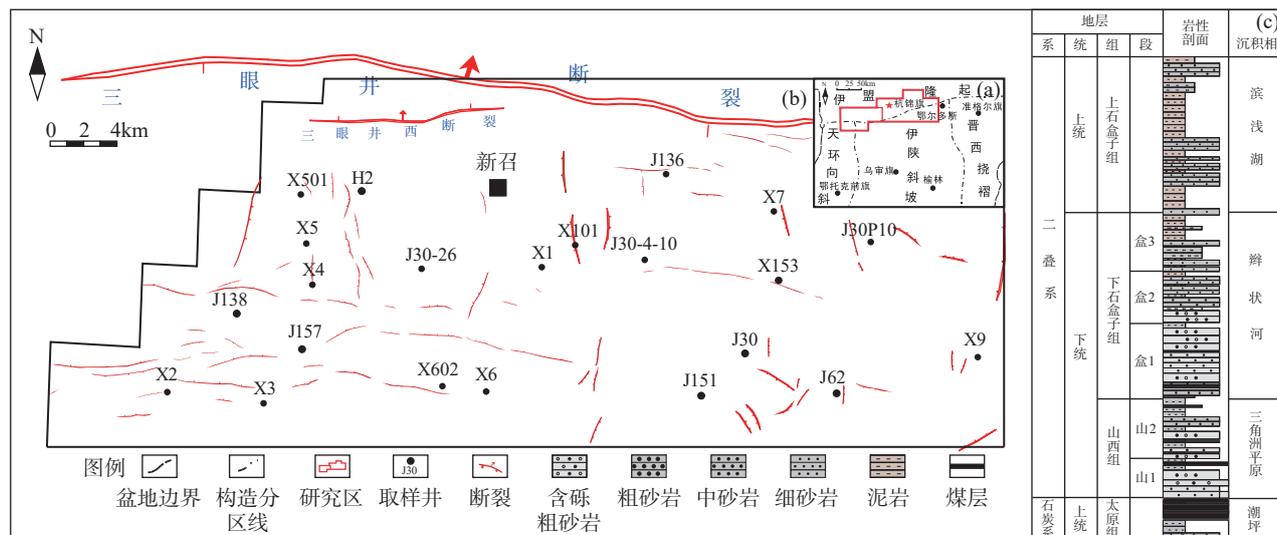
## 2 实验部分

### 2.1 实验样品

本次研究共采集自鄂尔多斯盆地杭锦旗地区锦 30 井区盒 1 段 15 口井样品共 143 件,先对样品全部进行 X 射线衍射和高分辨率扫描电镜测试,选择代表性样品,分别进行铸体薄片鉴定、核磁共振测试以及高压压汞等测试。所开展的实验均在成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室完成。

### 2.2 分析测试方法

对全部样品进行 X 射线衍射测试,实验流程严格按照《沉积岩中粘土矿物和常见非粘土矿物 X 射线衍射分析方法》(SYT 5163—2010)检测标准实施,使用 Rigaku XRD/Rigaku Ultima IV 衍射仪进行测试。全岩 X 射线衍射测试过程为:先将岩石样品在低于 60℃ 温度下烘干后研磨成粒径小于 40 $\mu\text{m}$  的粉末,均匀铺在样品载片的凹槽上,使用 X 射线进行照射,发射狭缝与散射狭缝为 1°、接受狭缝为 0.3mm、扫描速度为 2 $\theta$ (°/min)、采样步宽 0.02°;扫描范围为 5°~45°;利用 X 射线在晶体中的衍射现象获取 X 射线信号特征,将实验得到的衍射图谱与标准数据库中的参考图谱进行比较,定量分析岩石样品的矿物成分组成。黏土在 X 射线衍射测试过程中,先将样品粉碎至粒径小于 1mm,将粉碎后的样品放入烧杯中加入蒸馏水浸泡,并用超声波进行分散,静置 6h 后取 0~10cm 深度的悬浮液<sup>[18]</sup>;置于乙二醇蒸汽中进行熏蒸饱和处理,恒温 50~80℃ 条件下 8h 以上得到乙二醇饱和片;将乙二醇饱和片放置在恒温



a—研究区区域地质概况; b—杭锦旗锦30井区井位图; c—地层综合柱状图。

图1 区域地质图

Fig. 1 Regional geological map.

450~550℃条件下放置2.5h以上,自然冷却至室温,得到高温片;依次测量自然片、乙二醇饱和片和高温片,得到X射线衍射图谱,将实验得到的衍射图谱与标准数据库中的参考图谱进行比较,定量分析岩石样品的黏土矿物种类的含量。对部分样品进行重复测试,测试结果取平均值。

对全部样品进行高分辨率扫描电镜观察,依据《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》(SY/T 5162—2021),样品观察面新鲜并垂直于层理面,用镀膜装置对制备好的样品进行镀金以满足样品分析的导电性要求,采用FEI-QUANTAN 250FEG扫描电子显微镜对样品的成分组成、孔隙分布等进行观察分析<sup>[19]</sup>。通过X射线衍射测试全岩和黏土测试分析,明确样品中不同类型矿物的含量,随后结合铸体薄片鉴定及高分辨率扫描电镜观察,进一步对样品的孔隙、喉道分布特征进行定性表征研究。对61件实验样品进行铸体薄片鉴定,依据《岩石制片方法》(SY/T 5913—2021),通过截取长约2.5cm的柱样制备厚度约0.03mm的薄片,在一定压差下将配置好的染色甲基丙烯酸甲酯单体溶液真空注入样品孔隙中制成铸体薄片样品,在Leica DM2500P偏光显微镜下对铸体薄片观察样品孔隙和喉道的类型及分布。采用核磁共振测试和高压压汞测试实现对21件测试样品孔隙、喉道分布的定量表征,其中核磁共振测试依据《岩样核磁共振参数实验室测量规范》(SY/T 6490—2023)进行,使用LIME-MRI-D2核磁共振岩心分析仪对岩柱进行测试<sup>[20]</sup>。在高压压汞测试测

试前,先按照仪器要求设定磁体控制温度,并使探头和磁体保持恒温,将仪器预热16h以上,将标准水样、油样标准样、待测岩样放入恒温箱中,温度设定为磁体工作温度,恒温6h以上。将准备好的待测岩样用不含氢的非磁性容器装好,放入测量腔;根据测量内容选择相应的脉冲序列,设定核磁共振频率偏移值不得超过额定频率的2%;90°脉冲宽度、180°脉冲宽度;分别采集样品的回波间隔、等待时间、采集回波个数和采集扫描次数。对51件实验样品进行高压压汞测试,采用Micromeritics Auto Pore IV压汞仪,测试包括加压进汞、减压退汞过程,最高实验压力为400MPa。测试过程严格依据《岩石毛管压力曲线的测定》(GB/T 29171—2012)进行,将样品在110℃高温下抽真空2h后,将汞注入岩心样品直至最高压力,然后通过逐步降压使样品中的汞排出,得到汞注入与退出曲线,进而分析岩样不同大小孔喉的结构参数<sup>[21]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 岩相特征

岩相是特定沉积环境中岩石或岩石组合,反映了沉积环境的复杂性和多样性,是构成沉积相的重要要素。不同类型的岩相及其组合方式,对致密砂岩储层的非均质性以及整体储层质量具有关键的影响<sup>[22]</sup>。薄片鉴定结果表明:目的层碎屑颗粒成分成熟度较低,颗粒分选较中-好,粒度主要以含砾粗粒为主,粗到粗-中粒次之,细粒较少(图2)。碎屑颗粒

含量为 63%~98%，平均含量 85%；石英含量为 30%~95.9%，平均含量 78.67%；岩屑含量为 4.6%~49.76%，平均含量 16.1%。

依据岩心的粒度、矿物组成、含量及沉积构造等特征，将锦 30 井区盒 1 段致密砂岩储层划分为 4 种岩相，分别为含砾粗粒岩屑石英砂岩、粗-中粒岩屑石英砂岩、含砾粗粒岩屑砂岩以及粗-中粒岩屑砂岩(图 2a)。XRD 衍射实验结果表明研究区黏土矿物平均含量为 18.36%，黏土矿物为高岭石、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层，平均含量分别为 4.33%、6.52%、4.38% 和 3.08%(表 1)。

含砾粗粒岩屑石英砂岩，呈灰色至深灰色，具有含砾粗粒砂状结构。岩屑含量为 3.64%~44.2%，石英含量低于 95%，富集处见加大边(图 3b)，长石含量为 0~2.59%，长石溶蚀高岭石化现象明显，偶见斜长石。填隙物种类多，主要由机械作用产生的泥质杂基，包含有高岭石、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层，

其含量分别为 2.4%、9.28%、1.44% 和 2.88%(图 3a)。颗粒以粗粒为主，分选性中等，成熟度较高；粗-中粒岩屑石英砂岩，颜色呈岩灰色和灰白色。岩屑颗粒主要为变质岩屑和沉积岩屑，偶见火成岩屑和云母(图 3c)，含量为 4%~23.4%，石英平均含量为 77.52%，主要为单晶石英，长石含量 0~5.4%，主要为斜长石。填隙物由碳酸盐岩胶结物和硅质胶结物构成，发育少量其他类型的胶结物，杂基为黏土，颗粒主要以中粒为主，分选性好，颗粒接触为线性接触、点线接触等；含砾粗粒岩屑砂岩，呈灰白色至深灰色。碎屑物由石英、长石和斜长石组成，其中石英平均含量为 51.42%，长石平均含量为 4.09%，长石可见蚀变现象，存在少量斜长石。岩屑的组分以沉积岩屑与变质岩屑为主，含量分别为 9.5% 和 8.11%。粒间充填杂基，胶结物的含量相对较低(图 3e)。碎屑颗粒多呈次棱角状(图 3d)，颗粒以粗粒为主，分选性中等，成熟度低；粗-中粒岩屑砂岩，颜色呈灰白色至深灰色，碎屑

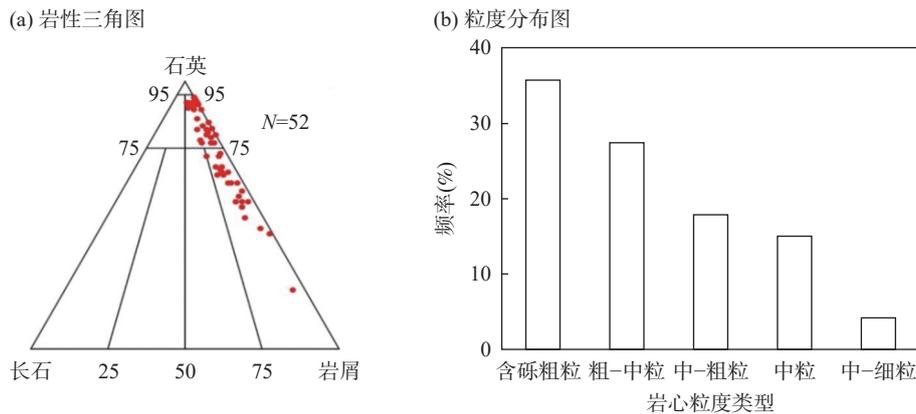


图2 锦 30 井区盒 1 段储层岩石类型

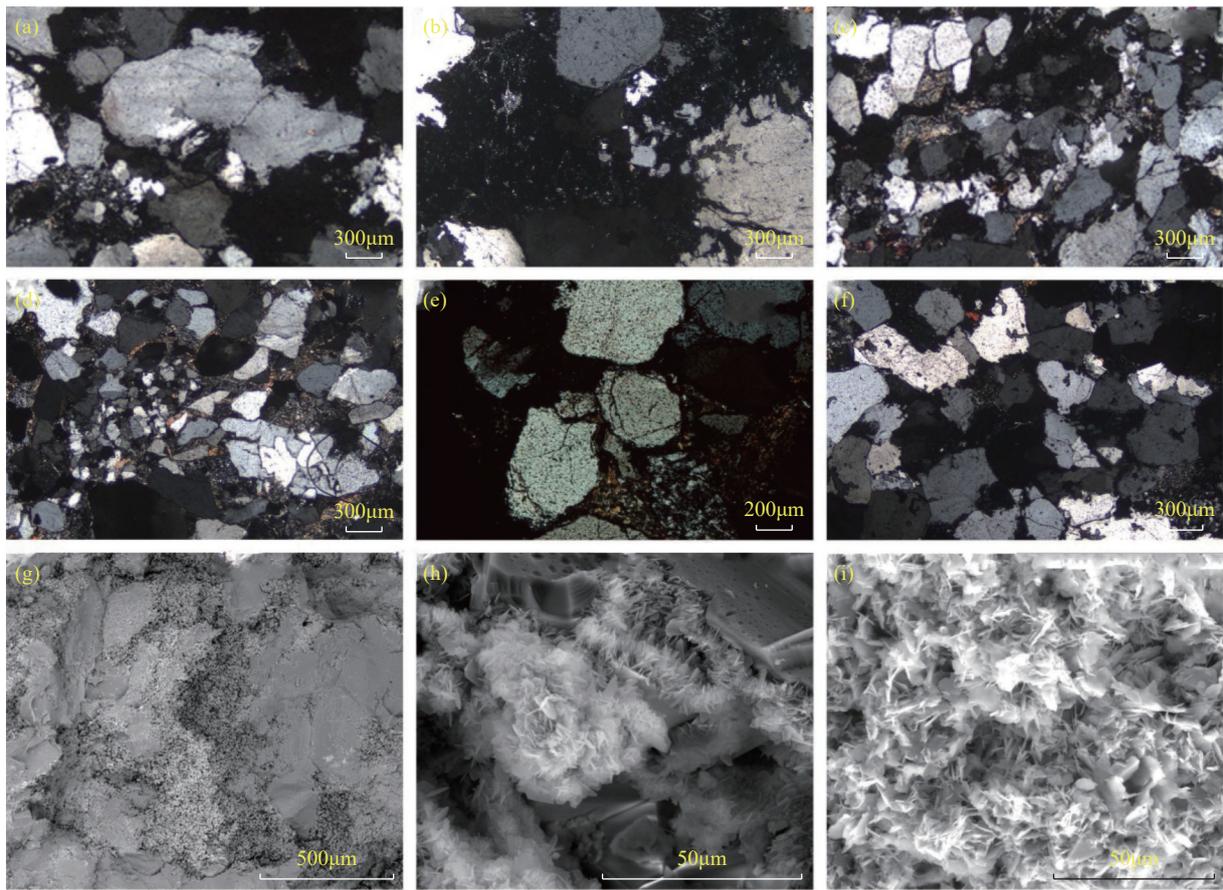
Fig. 2 Reservoir rock types of the He-1 section in well block Jin-30.

表 1 盒 1 段致密砂岩样品全岩黏土矿物组成及含量

Table 1 Section of compact sandstone: full rock clay mineral composition and content.

井号	岩性	黏土矿物含量 (%)	石英含量 (%)	钾长石含量 (%)	斜长石含量 (%)	方解石含量 (%)	黏土矿物相对含量 (%)			
							高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙混层
J30-26	含砾粗粒岩屑石英砂岩	7.4	92.6	-	-	-	27.0	11.0	48.0	14.0
H2	砾质粗粒岩屑石英砂岩	4.1	95.7	-	-	-	26.0	30.0	34.0	10.0
J30-26	粗-中粒岩屑石英砂岩	15.3	80.9	-	-	15.3	11.0	25.0	38.0	26.0
X701	中-粗粒岩屑砂岩	19.1	74.9	-	-	6.0	29.0	26.0	24.0	21.0
X7	含砾粗粒岩屑石英砂岩	12.0	88.0	-	-	-	18.0	43.0	21.0	18.0
H2	中-粗粒岩屑砂岩	21.4	76.0	-	-	2.1	10.0	62.0	20.0	8.0
X101	含砾粗粒岩屑砂岩	30.2	69.8	-	-	-	49.0	27.0	13.0	11.0
X701	含砾粗粒岩屑砂岩	24.8	72.4	-	-	2.8	30.0	32.0	26.0	12.0

注：“-”为未检出。



a—J30-26 井 (3737.47m), 含砾粗粒岩屑石英砂岩; b—H2 井 (3617.07m), 含砾粗粒岩屑石英砂岩; c—J30-26 井 (3746.28m), 粗-中粒岩屑石英砂岩; d—H2 井 (3613.38m), 含砾粗粒岩屑砂岩; e—X701 井 (3461.92m), 含砾粗粒岩屑砂岩; f—H2 井 (3615.92m), 中-粗粒岩屑砂岩; g—X701 井 (3467.72m), 粗粒岩屑砂岩, 发育高岭石、高岭石长石化; h—H2 井 (3614.68m), 含砾粗粒岩屑砂岩, 岩屑伊利石化; i—H2 井 (3619.19m), 含砾砂岩, 杂基向伊/蒙混层转化。

图3 不同类型岩石样品及黏土矿物特征

Fig. 3 Characteristic diagrams of different types of rock samples and clay minerals.

颗粒的平均含量为 35.71%, 岩屑含量的范围为 22% ~ 37.84%, 平均含量约 31.16%, 主要由沉积岩屑和变质岩屑构成 (图 3f), 石英平均含量为 52.23%, 多呈次圆状, 富集处见加大边。填隙物主要发育方解石、高岭石、石英、伊利石等多种胶结物, 含量依次为 6.33%、2.17%、1.83% 和 0.33%; 颗粒以粗粒和中粒为主, 分选性好, 成熟度较高。

### 3.2 孔喉结构及束缚水饱和度特征

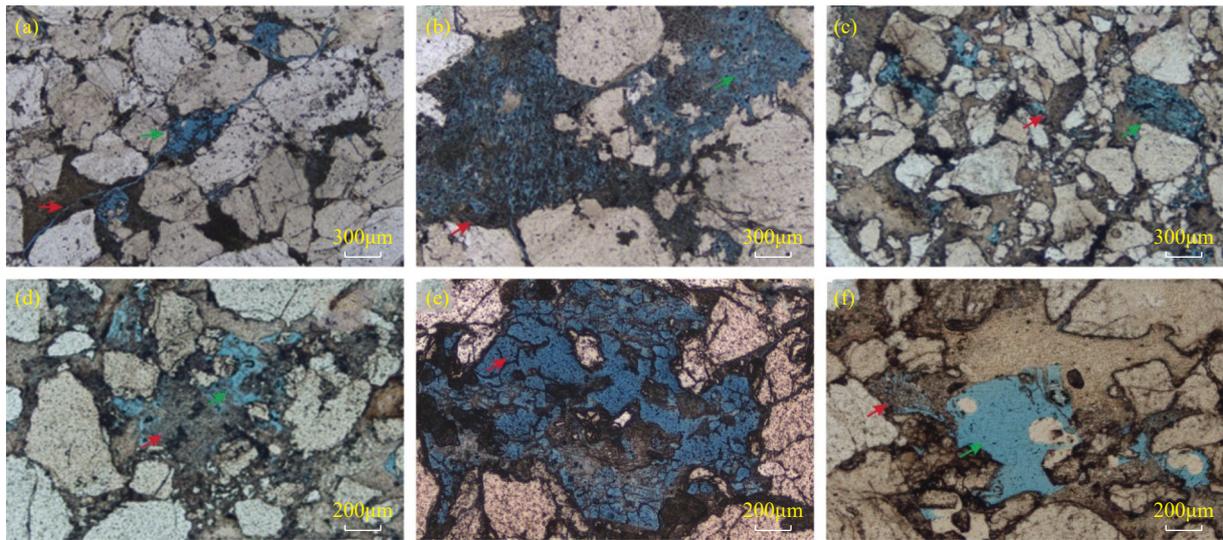
#### 3.2.1 孔隙类型及组合

储集空间类型及组合是评价储层质量的重要参数。根据研究区目的层 61 块样品的铸体薄片鉴定结果可知, 锦 30 井区盒 1 段主要发育高岭石晶间孔、长石粒内溶孔、岩屑溶孔、杂基微孔四类孔隙, 微裂缝发育 (图 4)。压实作用导致原生孔隙几乎消失殆尽, 溶蚀作用形成粒内及粒间溶孔, 其中长石在酸性流体作用下发生溶蚀, 形成长石粒内溶孔或蚀变形

成高岭石晶间孔。通过扫描电镜观察可知, 高岭石集合体形态主要表现为蠕虫状和书页状, 高岭石晶间孔发育<sup>[23]</sup>。岩屑粒内溶孔随着粒度的变细占比逐渐增大, 杂基微孔主要是杂基沉积物在风化时形成的孔隙, 孔隙半径极小, 在不同岩性中的占比均较小<sup>[24]</sup>。不同岩石类型中孔隙类型分布存在差异, 含砾粗粒岩屑石英砂岩中主要发育长石粒内溶孔和高岭石晶间孔, 面孔率占比分别为 41% 和 24%; 中-粗粒岩屑石英砂岩中主要发育高岭石晶间孔、岩屑溶蚀长石粒内溶孔和铸模孔, 面孔率占比分别为 25%、21% 和 27%; 含砾粗粒岩屑砂岩和中-粗粒岩屑砂岩中孔隙类型主要为岩屑粒内溶孔和高岭石晶间孔, 面孔率占比分别为 35% 和 25%。

#### 3.2.2 孔喉结构特征

高压压汞实验是一种常用的孔喉结构特征测试方法, 通过记录进汞与退汞过程中随着毛细管压力



a—H2井(3618.07m), 裂缝(红箭头)及长石溶孔(绿箭头); b—H2井(3617.01m), 高岭石晶间孔(红箭头)及长石溶孔(绿箭头); c—X701井(3466m), 杂基溶孔(红箭头)加岩屑溶孔(绿箭头); d—X701井(3466m), 岩屑溶孔(红箭头)加高岭石晶间孔(绿箭头); e—J30P10井(3507.76m), 含砾粗粒岩屑石英砂岩, 凝灰岩屑溶孔(红箭头)f—X101井(3514.83m), 含砾中-粗粒岩屑石英砂岩, 铸模孔(红箭头)及杂基溶孔(绿箭头)。

图4 杭锦旗锦30井区盒1段典型样品孔隙类型

Fig. 4 Pore type diagrams of typical samples from the He-1 section in well block Jin-30, Hangjinqi area.

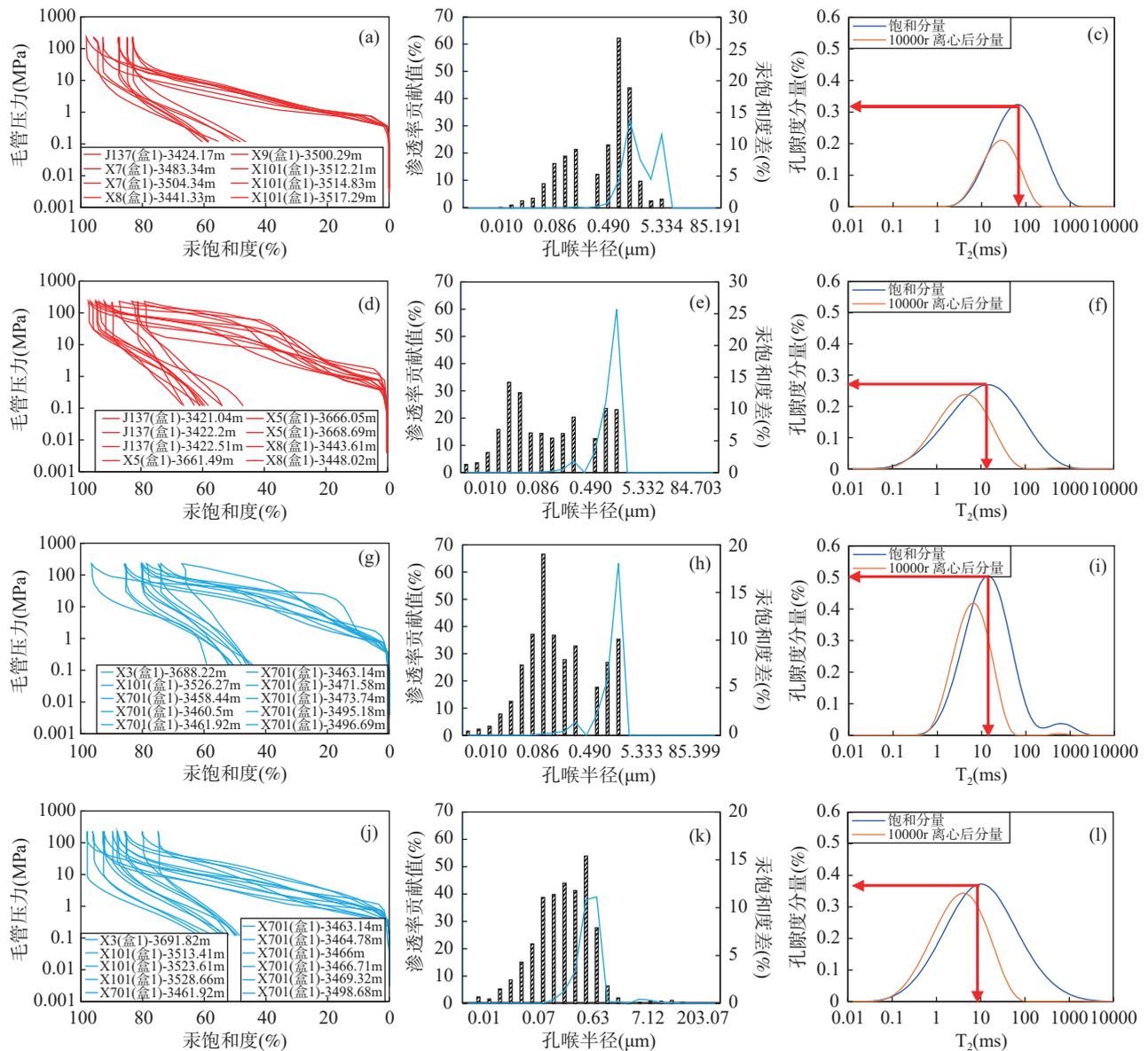
的增大或减小进汞量的变化,进而定量分析样品的孔喉大小及其连通性<sup>[25]</sup>。核磁共振实验依据岩石饱和流体的核磁共振 $T_2$ 谱可测定岩石的孔径分布,通过分析孔径与流体中弛豫时间 $T_2$ 之间的关系,可定量评估岩样中的孔径分布,该方法几乎不受岩石骨架成分的影响,能够提供更为精确的孔径分布数据<sup>[26]</sup>。

由研究区盒1段不同岩相样品的高压压汞和核磁测试结果可知(图5),不同岩相孔喉结构特征存在差异,其中:含砾粗粒岩屑石英砂岩中,在进汞的过程中,随着毛管压力的增大,进汞曲线缓慢增大(图5a),排驱压力约0.73MPa,最大进汞饱和度达到80%,退出效率为46%,岩样中孔隙发育,孔喉半径呈单峰分布,分布在300~500nm之间(图5b),核磁共振 $T_2$ 谱呈单峰型,峰值达到100ms(图5c)。中-粗粒岩屑石英砂岩随着毛管压力的增大,进汞曲线呈阶梯状(图5d),储层中存在大小不同的孔喉,排驱压力约为1.245MPa,孔喉连通性较差,退出效率为39%,孔喉分布呈双峰态,峰值分别约20nm和600nm(图5e),核磁共振 $T_2$ 谱呈宽谱单峰型,峰值约10ms(图5f)。含砾粗粒岩屑砂岩压汞曲线呈阶梯状分布(图5g),排驱压力约1.17MPa,孔喉半径呈10~20nm和400~500nm的双峰分布(图5h),孔隙连通性较差,核磁共振 $T_2$ 谱呈较弱的双峰型,峰值在10ms左右(图5i)。中-粗粒岩屑砂岩进汞量随着毛管压力的增

大呈缓慢增大趋势(图5j),与含砾/粗粒岩屑砂岩相比,孔隙分布集中,呈单峰分布在70~100nm之间(图5k),退出效率约40%,孔隙连通性相对较好,核磁共振 $T_2$ 谱呈宽谱单峰型,峰值小于10ms(图5l)。

### 3.2.3 束缚水饱和度分布特征

由锦30井区盒1段不同样品核磁共振 $T_2$ 谱在离心转速10000r/min下的曲线特征可知(图5),当样品为饱水状态时,除含砾粗粒岩屑石英砂岩样品的 $T_2$ 谱曲线峰值偏右外,多数样品的 $T_2$ 谱曲线峰值偏左,表明多数样品发育小孔隙。含砾/粗粒岩屑石英砂岩样品峰值偏右,样品中大孔隙占比高;粗-中粒岩屑石英砂岩样品和粗-中粒岩屑砂岩样品进汞曲线较平缓峰值偏左,主要发育小孔隙;含砾粗粒岩屑砂岩样品呈左峰偏大的双峰状,样品中主要发育小孔隙,但同时也存在一定数量的大孔隙。同一样品的饱水状态和离心状态下的 $T_2$ 谱曲线的形态进行对比,可观察到可动流体的分布特征, $T_2$ 谱曲线下降的幅度表示该样品中可动流体的含量差异,结果显示各个样品均有不同程度地下降。其中,含砾粗粒岩屑石英砂岩样品 $T_2$ 谱曲线下降的幅度较大,样品中的大孔隙中可动水含量较高,束缚水含量相对较低,粗-中粒岩屑石英砂岩样品和粗-中粒岩屑砂岩样品 $T_2$ 谱曲线下降的幅度较小,样品中小孔隙的可动水含量少,束缚水主要赋存在中小孔隙中;含砾粗粒岩屑砂



a—含砾粗粒岩屑石英砂岩样品的进汞-退汞曲线；b—X501 井 (3649.12m) 孔喉半径分布直方图；c—X501 井 (3649.12m) 饱水及离心转速 10000r/min 下的核磁共振  $T_2$  谱分布；d—粗-中粒岩屑石英砂岩的进汞-退汞曲线；e—J30-26 井 (3747.25m) 孔喉半径分布直方图；f—J30-26 井 (3747.25m) 饱水及离心转速 10000r/min 下的核磁共振  $T_2$  谱分布；g—含砾粗粒岩屑砂岩的进汞-退汞曲线；h—X501 井 (3663.23m) 孔喉半径分布直方图；i—X501 井 (3663.23m) 饱水及离心转速 10000r/min 下的核磁共振  $T_2$  谱分布；j—粗-中粒岩屑砂岩的进汞-退汞曲线；k—X101 井 (3523.61m) 孔喉半径分布直方图；l—X101 井 (3523.61m) 饱水及离心转速 10000r/min 下的核磁共振  $T_2$  谱分布。

图5 杭锦旗锦 30 井区不同岩性样品孔喉结构分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of pore throat structure of different lithology samples in well block Jin-30, Hangjinqi area.

岩样品中  $T_2$  谱曲线两个峰的下降幅度相对较小, 样品中束缚水饱和度较高。

### 3.3 束缚水饱和度的影响因素

致密砂岩储层流体赋存状态主要受岩相和孔喉结构的影响, 通过核磁共振实验得知: 含砾粗粒岩屑石英砂岩、粗-中粒岩屑石英砂岩、含砾粗粒岩屑砂岩和粗-中粒岩屑砂岩的束缚水饱和度呈依次降低的趋势, 不同孔径束缚水吸附厚度相当, 但随着孔径半

径的减小, 束缚水在孔隙中所占的比例逐渐增加, 束缚水饱和度升高<sup>[27]</sup>。

#### 3.3.1 黏土矿物对孔喉结构的影响

不同矿物颗粒间黏土矿物的类型和发育程度对孔喉结构影响较大。采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜及铸体薄片观察可知, 研究区盒 1 段致密砂岩储层中黏土矿物为高岭石、伊利石、绿泥石和部分伊/蒙混层。

扫描电镜观察到测试样品中绿泥石一般以孔隙衬里或包膜的形式产出(图6a),有效地保护储层不被上部压力破坏<sup>[28]</sup>;伊利石呈丝状的大量产出充填粒间孔及粒内孔(图6中b,c),导致储层渗透率降低;高岭石通常为酸性环境下的溶蚀产物<sup>[29]</sup>,在酸性介质的作用下,长石溶蚀形成高岭石,溶蚀产物被循环的地层水带走,产生大量溶蚀孔隙形成有效储集空间,镜下可见自生高岭石与自生SiO<sub>2</sub>矿物伴生<sup>[28]</sup>。其中自生高岭石呈蠕虫状、书页状或集合体状分布(图6d),相互支撑形成大量微纳级孔隙,束缚水饱和度高。部分高岭石由长石颗粒溶蚀形成,伴随着长石溶孔(图6中e,f)。

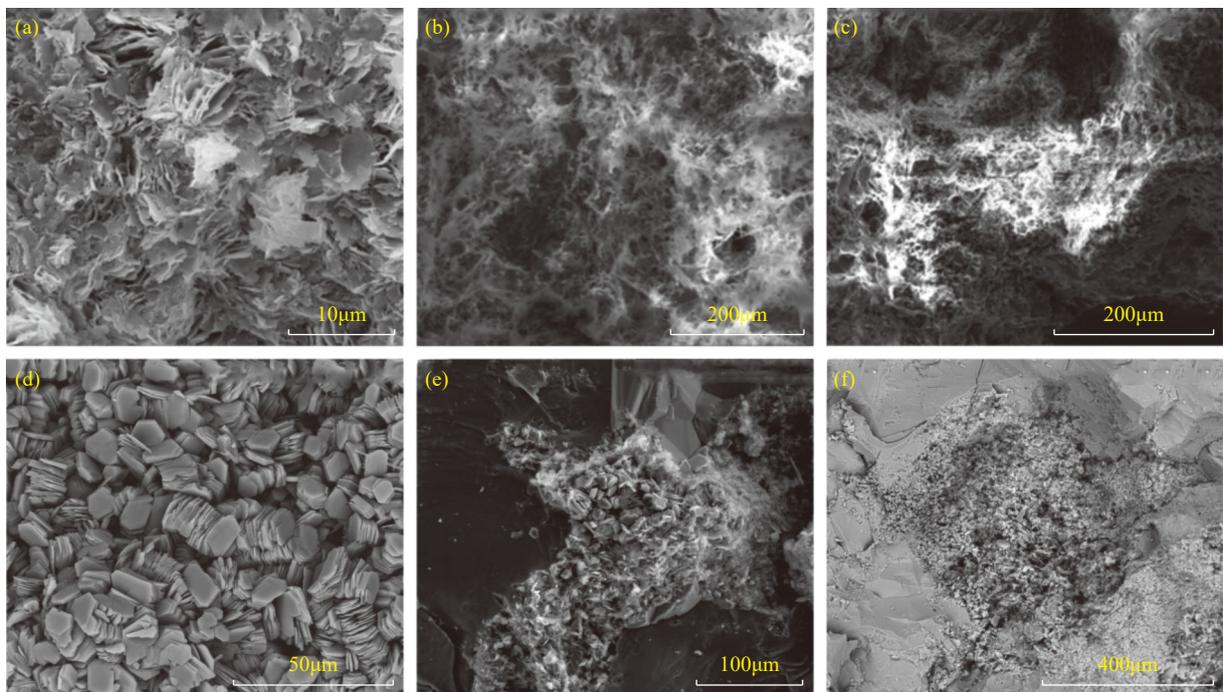
### 3.3.2 不同岩相孔喉结构特征对束缚水分布的影响

杭锦旗锦30井区盒1段致密砂岩储层孔隙类型多样,石英、长石等颗粒表面的黏土矿物充填在孔隙之间或呈搭桥状、薄膜式、分散质点式分布,使得岩石的比表面积增大,孔隙空间复杂,降低了孔喉连通性<sup>[30]</sup>。岩石中的水分为可动水和束缚水,在岩石中存在一个区分可动水和束缚水的孔喉半径的临界半径,小于这个半径,流体在孔喉中就不再流动,这个界限被称为孔喉流动下限,此类流体被称为束

缚水<sup>[31]</sup>。基于高压压汞测试结果计算不同样品的孔喉流动下限,同时借鉴前人对致密砂岩储层孔喉空间的分类方法<sup>[9,32]</sup>,结合研究区不同样品核磁测试表征的全孔径分布特征,以孔径10nm、100nm和1000nm为界限,将研究区致密砂岩储层孔喉空间划分为中大孔(>1000nm)、中孔(100~1000nm)、小孔(10~100nm)和微孔(<10nm)四种类型<sup>[33]</sup>,分别统计不同岩相下不同孔喉空间所占的百分比(图7)。核磁共振主要测量岩石中氢核的弛豫时间来反映储集空间特征和可流动性,利用T<sub>2</sub>谱区分不同大小的孔隙及比例。对离心前后的T<sub>2</sub>谱分别作累积线,从离心后的T<sub>2</sub>谱累积线最大值处作X轴平行线,与离心前的T<sub>2</sub>谱累积线相交,由交点引垂线到X轴,其对应的值为T<sub>2</sub>截止值。在T<sub>2</sub>弛豫时间谱上,计算T<sub>2</sub>截止值左侧的积分面积与总面积的比值可得到10000r/min离心条件下岩样的束缚水饱和度(图8)。

$$S_{wi} = \frac{\int_{1000}^{0.01} 10000r/min \text{ 离心后分量}}{\int_{T_2}^{0.01} 10000r/min \text{ 离心后分量}}$$

含砾粗粒岩屑石英砂岩饱水后的核磁共振 T<sub>2</sub>



a—X501井(3642.42m),含砾粗粒岩屑砂岩,岩屑绿泥石化;b—J30-26井(3736.76m),含砾粗粒岩屑石英砂岩,发育丝状伊利石;c—X701井(3463.08m),粗粒岩屑砂岩,岩屑溶蚀粒内溶孔形成伊利石;d—X101井(3514.02m),粗粒岩屑砂岩,高岭石集合体呈蠕虫状;e—H2井(3611.28m),粗粒岩屑石英砂岩,书页状高岭石和片状绿泥石;f—X501井(3663.47m),粗-中粒岩屑砂岩,颗粒溶孔形成高岭石。

图6 不同岩相中黏土矿物显微图像特征

Fig. 6 Microscopic image characteristics of clay minerals in different lithofacies.

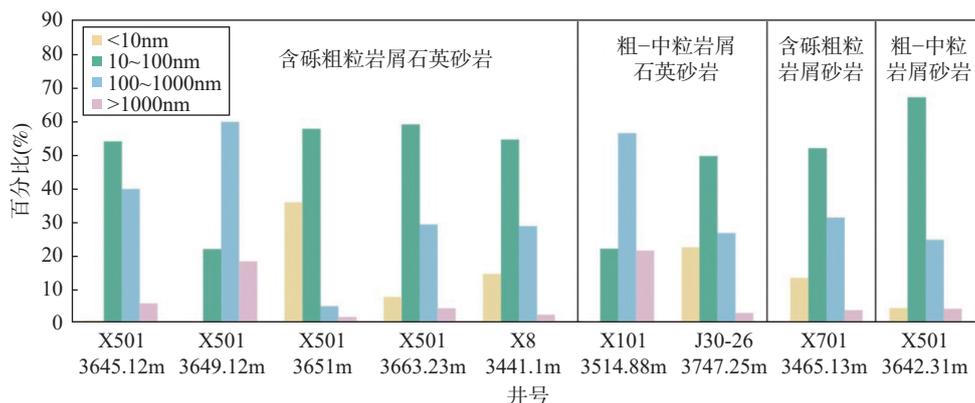


图7 杭锦旗锦 30 井区岩石样品孔径分布频率

Fig. 7 Pore size distribution frequency diagrams of rock samples from well block Jin-30, Hangjinqi area.

谱曲线偏右,中孔和较大孔比较发育,对应孔隙类型主要为长石溶孔,束缚水饱和度平均为 39.92%,对应孔喉流动下限值相对较大,平均约 107nm;粗-中粒岩屑石英砂岩压汞进汞曲线较平缓,  $T_2$  谱曲线峰值偏左,中孔和小孔占比多,主要发育长石溶孔和高岭石晶间孔,束缚水饱和度平均为 52.09%,对应孔喉流动下限值平均约 71nm;含砾粗粒岩屑砂岩主要发育杂基溶孔和岩屑溶孔,孔隙半径小,主要为小孔和微孔,束缚水饱和度为 66.68%,对应孔喉流动下限值平均约 64nm;粗-中粒岩屑砂岩主要发育小孔,孔隙类型主要为岩屑溶孔、粒内发育高岭石晶间孔,束缚水饱和度平均为 39.92%,对应孔喉流动下限值平均约 44nm。不同尺度的孔喉对储层物性的贡献不同,大孔喉具有较高的渗流能力,但其发育程度较低,中孔和小孔比较发育且连通性较好,是储层孔隙度和渗透率的主要贡献者。束缚水饱和度的分布主要受孔喉结构影响,样品小孔和微孔越发育,孔喉流动下限逐渐变小,束缚水饱和度逐渐升高。

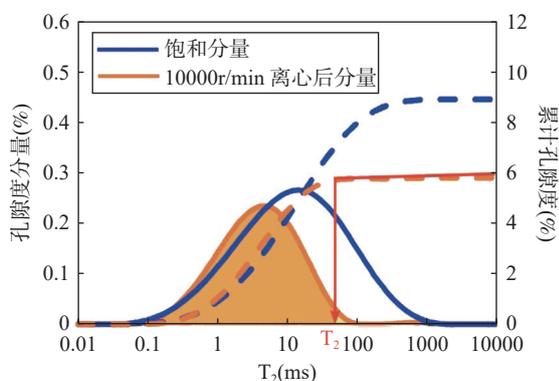


图8  $T_2$  截止值和束缚水饱和度的确定方法

Fig. 8 Determination method of  $T_2$  cut-off value and irreducible water saturation.

### 3.3.3 黏土矿物对束缚水饱和度分布的影响

对研究区 21 个样品的黏土矿物含量与束缚水饱和度进行相关性分析,可知黏土矿物含量的增加不利于储层物性改善,束缚水饱和度随黏土矿物含量增加而增大(图 9),分析原因认为黏土矿物填充在部分粒间孔隙内,使储层内部发育微细毛细管,形成复杂的束缚水网络,导致束缚水含量升高 [34]。

随着黏土矿物含量的增加,束缚水饱和度呈增大趋势(图 10 中 a, b, c, d);长石高岭石化形成的高岭石单体排列杂乱且疏松,对应黏土矿物晶间孔隙不发育但长石溶蚀孔较发育,孔隙连通性较好,长石溶蚀高岭石化过程中,高岭石含量增加,束缚水饱和度正相关增大(图 10a) [35]。图 10a 中,点 A 束缚水饱和度为 51.22%,高岭石含量为 4.62%;点 B 束缚水饱和度为 49.66%,而高岭石含量为 1.71%。两个样品高岭石含量存在差异,而束缚水饱和度相差不大,在扫描电镜下观察可知两个样品中高岭石的存在形

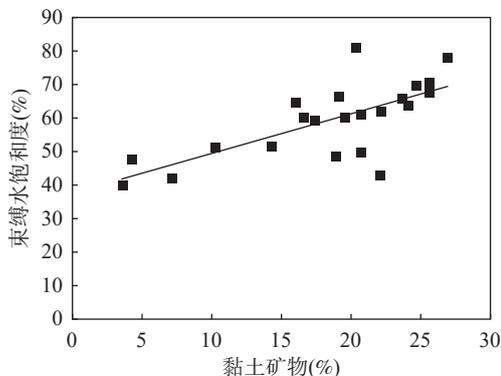


图9 黏土矿物含量与束缚水饱和度的相关性(部分数据引自中石化华北局)

Fig. 9 Correlation between clay mineral content and irreducible water saturation.

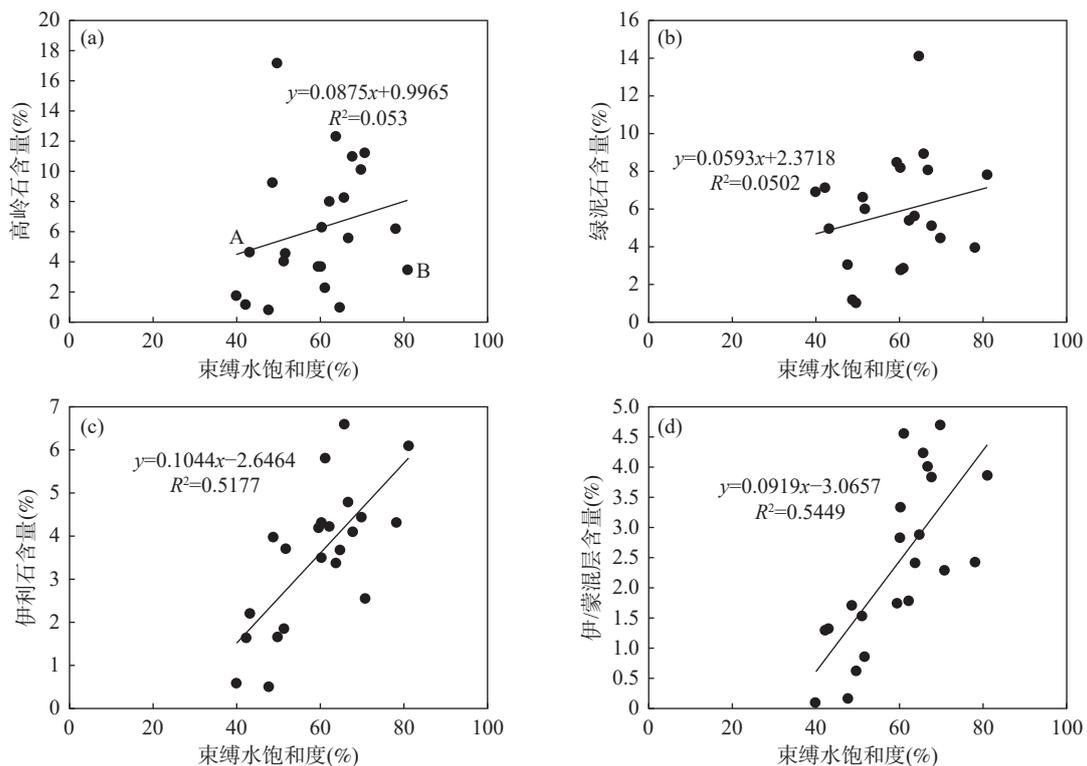


图10 不同样品束缚水饱和度与黏土矿物含量的关系(部分数据引自中石化华北局)

Fig. 10 The relationship between irreducible water saturation and clay mineral content in different samples.

态不同:点 A 样品发育自生高岭石,形成微纳米级高岭石晶间孔;点 B 样品中的高岭石由长石溶蚀形成,长石粒内溶孔发育,孔隙连通性较优。

#### 4 结论

通过 X 射线衍射分析、高分辨率扫描电镜、铸体薄片分析、一维核磁共振实验和高压压汞实验等多种测试,得到杭锦旗锦 30 井区盒 1 段致密砂岩黏土矿物生长类型及形态和储集空间内孔喉结构发育情况:盒 1 段储层黏土矿物类型多样,其中高岭石和伊利石对孔喉结构影响明显,伊利石呈丝状、毛发状和搭桥状分布,对孔喉的堵塞作用明显;自生高岭石呈蠕虫状或书页状集合体状分布相互支撑形成大量微纳米级,束缚水饱和度较高;长石高岭石化形成的高岭石单体多排列杂乱且疏松,对应黏土矿物晶间孔隙不发育,长石溶蚀孔较发育,孔

隙连通性较好。在扫描电镜观察下,储集空间主要发育高岭石晶间孔、长石粒内溶孔、岩屑溶孔、杂基微孔等,孔径范围主要集中在 10~100nm,不同尺度的孔喉类型对储层物性的贡献不同,含砾粗粒岩屑石英砂岩中大孔喉具有较高的渗流能力,但其发育程度较低;粗-中粒岩屑石英砂岩中小孔发育,是储层孔隙度、渗透率的主要贡献者,不仅占据较高的孔喉空间比例,并具有较好的孔喉连通性,束缚水饱和度相对较低;含砾粗粒岩屑砂岩和粗-中粒岩屑砂岩中小孔和微孔发育,孔喉流动下限逐渐变小,束缚水饱和度升高。

本次研究阐述了黏土矿物产出对束缚水饱和度的影响,但本文研究范围局限于杭锦旗锦 30 井区盒 1 段,后续将选取其他层段岩心样品进行对照分析,提出多层段束缚水饱和度评价模型。

# The Impact of Different Clay Mineral Types on the Irreducible Water Saturation in Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi Area, Ordos Basin

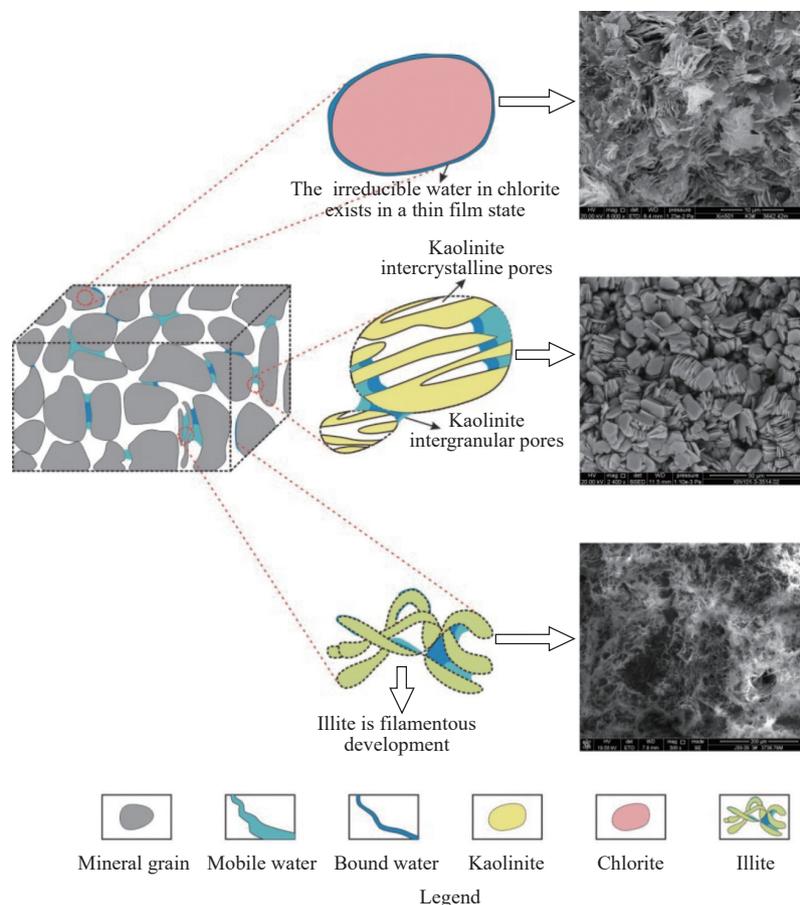
WANG Lixin<sup>1</sup>, GAO Qingsong<sup>1\*</sup>, ZHOU Jialin<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, CAO Qian<sup>2\*</sup>, CHEN Ting<sup>2</sup>,  
WANG Li<sup>2</sup>

(1. China Petroleum & Chemical Corporation North China Oil & Gas Exploration & Development Research Institute, Zhengzhou 450006, China;

2. Chengdu University of Technology College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu 610059, China)

## HIGHLIGHTS

- (1) Kaolinite, chlorite, illite and illite/smectite mixed layers are widely developed in the reservoir of the study section, and there are significant differences in the content and type of clay minerals under different lithofacies.
- (2) The reservoir space mainly develops kaolinite intercrystalline pores, feldspar intragranular dissolved pores, lithic dissolved pores, etc., and the pores are mostly small and medium.
- (3) The kaolinite formed by the dissolution of illite and feldspar and the intergranular pores filled by authigenic kaolinite form a complex irreducible water network, which leads to the difference in the distribution of irreducible water under the action of different contents and types of clay minerals.



**ABSTRACT:** The type and content of clay minerals in tight sandstone reservoirs of the He-1 member in the Jin-30 well area of Hangjinqi in the northern margin of the Ordos Basin have a significant effect on irreducible water saturation. On the basis of core observation, the petrological characteristics, clay mineral types and occurrence forms, pore structure and irreducible water distribution of the target layer by means of X-ray diffraction analysis, high-resolution scanning electron microscopy, casting thin section analysis, one-dimensional nuclear magnetic resonance experiment and high-pressure mercury injection experiment were studied. The results show that: (1) The average content of clay minerals in the reservoir is 18.36%, and the clay minerals mainly include kaolinite, illite, chlorite and illite/smectite mixed layers. (2) There are differences in the types of clay minerals in different lithofacies: the clay minerals in lithic quartz sandstone are mainly feldspar altered kaolinite, and feldspar intragranular dissolution pores, and kaolinite intergranular pores are developed. The lithic sandstone is mainly composed of lithic and matrix altered illite, and the intragranular dissolution pores filled with illite are developed. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202407150157>.

**KEY WORDS:** Ordos Basin; tight sandstone; clay minerals; pore throat structure; irreducible water saturation

## BRIEF REPORT

**Significance:** The irreducible water in the reservoir is mainly attached to the surface of clay minerals in the form of film or developed in tiny pores. The evaluation of its distribution characteristics is of great significance to the study of tight sandstone gas content. At present, due to the lack of analysis of pore structure differences under the action of clay minerals, the fine evaluation of reservoir gas content is seriously restricted. The tight sandstone reservoir of He-1 member of the lower Shihezi Formation in Hangjinqi area is taken as the research object<sup>[4]</sup>. A variety of test methods are used to study the types and output characteristics of clay minerals in the tight sandstone reservoir of the target layer and the difference characteristics of pore structure of different lithofacies, so as to further clarify the relationship between the output difference of different types of clay minerals and irreducible water saturation.

**Methods:** A total of 143 samples were collected from 15 wells in the first member of the lower Shihezi Formation in the Jin-30 well area of Hangjinqi, Ordos Basin. First, all the samples were tested by X-ray diffraction and high-resolution scanning electron microscopy. Representative samples were selected for casting thin section identification, nuclear magnetic resonance test and high-pressure mercury injection test. All tests are carried out in strict accordance with the latest industry standards, and some samples are tested repeatedly to ensure the accuracy of the test results.

**Data and Results:** According to the characteristics of core particle size, mineral composition, content and sedimentary structure, the tight sandstone reservoir of the He-1 member in Jin-30 well area is divided into four lithofacies: gravel coarse-grained lithic quartz sandstone, coarse-medium grained lithic quartz sandstone, gravel coarse-grained lithic sandstone and coarse-medium grained lithic sandstone. The clay minerals in lithic quartz sandstone are mainly feldspar altered kaolinite, and feldspar intragranular dissolution pores, and kaolinite intergranular pores are developed. The lithic sandstone is mainly composed of lithic and matrix altered illite, and the intragranular dissolution pores filled with illite are developed. The reservoir space mainly develops four types of pores, including kaolinite intercrystalline pores, feldspar intragranular dissolved pores, debris dissolved pores and matrix micropores, and microfractures are developed. The intragranular dissolved pores of feldspar and intercrystalline pores of kaolinite are mainly developed in the gravel-bearing coarse-grained lithic quartz sandstone, and the proportion of surface pores is 41% and 24%, respectively. Kaolinite intergranular pores, lithic dissolution feldspar intragranular dissolved pores and mold pores are mainly developed in medium-coarse lithic quartz sandstone, and the surface porosity accounts for 25%, 21% and 27%, respectively. The pore types in gravel-bearing

coarse-grained lithic sandstone and medium-coarse-grained lithic sandstone are mainly intragranular dissolution pores and kaolinite intergranular pores, and the surface porosity accounts for 35% and 25%, respectively.

The saturation of movable water and irreducible water in different samples can be determined by saturation and centrifugation tests. The size of irreducible water saturation is: gravel-bearing coarse-grained lithic quartz sandstone < coarse-medium-grained lithic quartz sandstone and coarse and medium-grained lithic sandstone < gravel-bearing coarse-grained lithic sandstone. With the decrease of pore radius, the proportion of irreducible water in pores gradually increases, and the irreducible water saturation increases. The correlation analysis of clay mineral content and irreducible water saturation of 21 samples in the study area shows that the irreducible water saturation increases gradually with the increase of clay mineral content. Kaolinite and illite have obvious influence on pore throat structure<sup>[16]</sup>. The pore throat is blocked by the filamentous development of illite, which is the dominant factor affecting the distribution of irreducible water saturation. The kaolinite monomer formed by feldspar kaolinization is disorderly and loose, and the corresponding intergranular pores of clay minerals are not developed, but the feldspar dissolution pores are more developed, and the pore connectivity is better<sup>[35]</sup>. The authigenic kaolinite is distributed in worm-like or book-like aggregates to support each other to form a large number of micro-nano pores, causing an increase in irreducible water saturation.

## 参考文献

- [1] 曾溅辉,张亚雄,张在振,等.致密砂岩气藏复杂气-水关系形成和分布主控因素及分布模式[J].*石油与天然气地质*,2023,44(5):1067-1083.  
Zeng J H, Zhang Y X, Zhang Z Z, et al. Complex gas-water contacts in tight sandstone gas reservoirs: Distribution pattern and dominant factors controlling their formation and distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1067-1083.
- [2] 崔耀科.分流河道砂体精细刻画与储层非均质性研究[D].西安:西安石油大学,2023.  
Cui Y K. Study on fine characterization of distributary channelsandbody andreservoirheterogeneity: A case study from Chang 2 reservoir of Qiaozhen area in Xiasiwang oil field [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [3] 王静怡.鄂尔多斯盆地本溪组致密砂岩储层成岩演化与成藏耦合机理研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.  
Wang J Y. Study on coupling mechanism of diagenesis and accumulation of tight sandstone in the Benxi Formation, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [4] 邱隆伟,穆相骥,李浩,等.杭锦旗地区下石盒子组致密砂岩储层成岩作用对孔隙发育的影响[J].*油气地质与采收率*,2019,26(2):42-50.  
Qiu L W, Mu X J, Li H, et al. Influence of diagenesis of tight sandstone reservoir on the porosity development of lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(2): 42-50.
- [5] 聂海宽,张金川,薛会,等.杭锦旗探区储层致密化与天然气成藏的关系[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,2009,24(1):1-7,108.  
Nie H K, Zhang J C, Xue H, et al. Relationship between the densification of reservoir and the accumulation of natural gas in Hangjinqi area of Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2009, 24(1): 1-7, 108.
- [6] 刘飞,周文,李秀华,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界砂岩中储层粘土矿物特征分析[J].*矿物岩石*,2006(1):92-97.  
Liu F, Zhou W, Li X H, et al. Analysis of characteristics of the clay minerals in the upper palaeozoic sandstone reservoir of Hangjinqi area in North Ordos Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006(1): 92-97.
- [7] 郭笑锴,滕飞启,吴明松,等.鄂尔多斯盆地陇东地区铝土岩储层含气性测井评价方法及其应用[J].*天然气地球科学*,2024,35(8):1454-1466.  
Guo X K, Teng F Q, Wu S M, et al. Logging evaluation method for gas bearing properties of bauxite reservoirs in the Longdong area of Ordos Basin and its application[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8): 1454-1466.
- [8] 郭明强,周龙刚,张兵,等.致密砂岩气水分布特征——以鄂尔多斯盆地东部临兴地区为例[J].*天然气地球科学*,2020,31(6):855-864.  
Guo M Q, Zhou L G, Zhang B, et al. The regularity of gas and water distribution for tight sandstone: Case study of Linxing area, Eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(6): 855-864.
- [9] 李港,张占松,郭建宏,等.基于核磁共振测井的束缚水饱和度评价方法:以中东地区M层组的孔隙型碳酸

- 盐岩储层为例[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(30): 12900-12910.
- Li G, Zhang Z S, Guo J H, et al. Evaluation method of irreducible water saturation based on nuclear magnetic resonance logging: Taking the porous carbonate reservoir of M Formation in the middle east as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(30): 12900-12910.
- [10] 白玉湖, 王苏冉, 徐兵祥, 等. 致密砂岩束缚水饱和度和微观孔喉结构关系实验研究[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 65-71.
- Bai Y H, Wang S R, Xu B X, et al. Experimental study on the relationship between irreducible water saturation and micro pore throat in tight sandstone[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 65-71.
- [11] 苏玉亮, 李东升, 李蕾, 等. 致密砂岩气藏地层水可动性及其影响因素研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(4): 118-122.
- Su Y L, Li D S, Li L, et al. Formation water mobility and influencing factors in tight sandstone gas reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(4): 118-122.
- [12] 陈鑫, 马立涛, 史长林, 等. 临兴区块致密砂岩储层水赋存状态及气层含水程度识别方法[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(6): 1331-1340.
- Chen X, Ma L T, Shi C L, et al. Water occurrence and identification method of the water-bearing degree of tight sandstone reservoirs in the Linxing block[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(6): 1331-1340.
- [13] 胡向阳, 张广权, 魏修平, 等. 杭锦旗地区南部气水识别及复杂气水关系成因[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(2): 41-48, 7-8.
- Hu X Y, Zhang G Q, Wei X P, et al. Identification of gas-water reservoir and geneses of complicated gas-water relationships in southern region of Hangjinqi area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019, 43(2): 41-48, 7-8.
- [14] 薛会, 王毅, 徐波. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(6): 551-556, 562.
- Xue H, Wang Y, Xu B, et al. Accumulation mechanism of natural gas in Upper Paleozoic, Hangjinqi block, North Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 551-556, 562.
- [15] 杨晋东, 于振锋, 郭旭, 等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代泥岩地球化学特征及有机质富集机理[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(6): 1104-1119.
- Yang J D, Yu Z F, Guo X, et al. Geochemical characteristics and organic matter enrichment mechanism in Late Paleozoic mudstone, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(6): 1104-1119.
- [16] 覃硕, 石万忠, 王任, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区盒一段致密砂岩储层特征及其主控因素[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1604-1618.
- Qin S, Shi W Z, Wang R, et al. Characteristics of tight sandstone reservoirs and their controlling factors of He-1 Member in Hangjinqi block, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1604-1618.
- [17] 王涛, 侯明才, 陈洪德, 等. 海西构造旋回阴山幕式造山与鄂尔多斯盆地北部旋回充填的耦合关系[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(3): 310-317.
- Wang T, Hou M C, Chen H D, et al. Coupling relationship between Yinshan episodic orogenic movement of Hercynian tectonic cycle and filling cycle of the North Ordos Basin in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(3): 310-317.
- [18] 赵红坤, 刘亚轩, 马生明, 等. 粉末压片-X射线荧光光谱法测定小样品量土壤和沉积物中主量元素[J/OL]. *岩矿测试*(2024-09-25)[2024-11-01]. <https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202403040030>.
- Zhao H K, Liu Y X, Ma S M, et al. Determination of major elements in small-weight soil and sediment samples by X-ray fluorescence spectroscopy with pressed-powder pellets[J/OL]. *Rock and Mineral Analysis*(2024-09-25)[2024-11-01]. <https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202403040030>.
- [19] 侯明才, 邓敏, 冯琳, 等. 珠江口盆地流花油田新近系碳酸盐岩白垩状结构化成因机理探讨[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 768-778.
- Hou M C, Deng M, Feng L, et al. Genesis of calcification in Neogene carbonate rocks of Liuhua oilfield, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 768-778.
- [20] 司马立强, 马骏, 刘俊丰, 等. 柴达木盆地涩北地区第四系泥岩型生物气储层孔隙有效性评价[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(2): 1-10.
- Sima L Q, Ma J, Liu J F, et al. Evaluation of pore effectiveness of Quaternary mudstone biogas reservoirs in Sebei area, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 1-10.
- [21] 张文凯, 施泽进, 田亚铭, 等. 联合高压压汞和恒速压汞实验表征致密砂岩孔喉特征[J]. *断块油气田*, 2021, 28(1): 14-20, 32.
- Zhang W K, Shi Z J, Tian Y M, et al. The combination of high-pressure mercury injection and rate-controlled mercury injection to characterize the pore-throat structure in tight sandstone reservoirs[J]. *Fault-Block*

- Oil & Gas Field, 2021, 28(1): 14–20, 32.
- [22] 刘士靖. 松辽盆地页岩油成藏条件研究及甜点评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- Liu S J. The study on shale oil accumulation conditions and dessert evaluation in the Songliao Basin [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022.
- [23] 于振锋. 海—塔盆地火山碎屑岩复杂岩性的岩石学机理及其测井响应[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- Yu Z F. Petrologic mechanism and logging response of complex lithology of volcanoclastic rock in Hailaer—Tamsag Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [24] 周志恒, 钟大康, 凡睿, 等. 致密砂岩中岩屑溶蚀及其伴生胶结对孔隙发育的影响——以川东北元坝西部须二下亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 592–603, 615.
- Zhou Z H, Zhong D K, Fan R, et al. Effect of dissolution of rock fragments and its associated cementation on pore evolution: A case study of the lower sub-member of the second member of Xujiahe Formation in the west of Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 592–603, 615.
- [25] 朱晴, 乔向阳, 张磊. 高压压汞在致密气藏孔喉分布表征和早期产能评价中的应用[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 373–383.
- Zhu Q, Qiao X Y, Zhang L, et al. Application of high-pressure mercury injection in pore-throat distribution characterization and early productivity evaluation of tight gas reservoirs[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 373–383.
- [26] 赵全胜. 核磁共振成像测井技术及应用[J]. 新疆石油地质, 2008(5): 650–653.
- Zhao Q S. Magnetic resonance imaging logging technology and application[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008(5): 650–653.
- [27] 侯伟, 赵天天, 张雷, 等. 基于低场核磁共振的煤储层束缚水饱和度应力响应研究与动态预测——以保德和韩城区块为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 608–616.
- Hou W, Zhao T T, Zhang L, et al. Stress sensitivity and prediction of irreducible water saturation in coal reservoirs in Baode and Hancheng blocks based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 608–616.
- [28] 郑晓薇. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区盒1段优质储层形成机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Zheng X W. Formation mechanism of high-quality reservoir in box section 1 of Hangjinli area, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [29] Yang T, Cao Y C, Friis H, et al. Diagenesis and reservoir quality of lacustrine deep-water gravity-flow sandstones in the Eocene Shahejie Formation in the Dongying sag, Jiyang Depression, Eastern China[J]. Geoscienceworld, 2020(5): 104.
- [30] Najmeh J, Ali K, Mohammad B, et al. Reservoir characterization of fluvio-deltaic sandstone packages in the framework of depositional environment and diagenesis, the South Caspian Sea Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022(9): 224.
- [31] 朱林奇, 张冲, 石文睿, 等. 结合压汞实验与核磁共振测井预测束缚水饱和度方法研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 22–29.
- Zhu L Q, Zhang C, Shi W R, et al. Study on the method of prediction of irreducible water saturation by combining mercury intrusion and NMR logging data[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 22–29.
- [32] 卢双舫, 李俊乾, 张鹏飞, 等. 页岩油储集层微观孔喉分类与分级评价[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 436–444.
- Lu S F, Li J Q, Zhang P F, et al. Classification of microscopic pore-throats and the grading evaluation on shale oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 436–444.
- [33] 张全培. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长7致密砂岩储层微观孔喉结构与分级评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- Zhang Q P. Study on microscopic pore throat structure and grading evaluation of Chang 7 tight sandstone reservoirs in Jiyuan area, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2022.
- [34] 钟高润, 任媛, 郭京哲, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组长6段低阻油层成因机理与测井识别[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(5): 2230–2238.
- Zhong G R, Ren Y, Guo J Z, et al. Genetic mechanism and logging identification of low resistivity oil reservoir in Chang 6 member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(5): 2230–2238.
- [35] 曹桐生, 罗龙, 谭先锋, 等. 致密砂岩储层成因及其孔隙演化过程——以杭锦旗十里加汗地区下石盒子组为例[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 598–603.
- Cao T S, Luo L, Tan X F, et al. Genesis and pore evolution of tight sandstone reservoir: Taking lower Shihezi Formation in the Shilijiahan block of Hangjinli area as an example[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 598–603.