

鄂尔多斯盆地神木气田本溪组致密砂岩储层 分类评价及南北部差异性

张博杰^{1,2}, 黄有根^{1,2}, 王一妃^{1,2}, 路归一^{2,3}, 汪淑洁^{1,2}, 刘昌民⁴

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司气田开发事业部, 陕西西安 710018; 4. 中国石油长庆油田分公司第三采气厂, 内蒙古鄂尔多斯 017300)

摘要:鄂尔多斯盆地神木气田本溪组储层特征复杂, 制约气藏的高效开发。采用岩心观察、X 线衍射分析、岩石薄片鉴定、扫描电镜及高压压汞实验等方法, 研究神木气田本溪组储层特征, 建立储层综合评价体系, 预测有利储层分布, 明确南北部储层差异性。结果表明: 研究区本溪组储层岩性以灰色—深灰色石英砂岩为主, 南部以中—粗砂岩为主, 北部主要为中—细砂岩; 孔隙类型主要为粒间孔、溶蚀孔、晶间孔及微裂缝, 其中南部以粒间孔和溶蚀孔为主, 北部主要为溶蚀孔, 自北向南面孔率逐渐增大, 物性变好; 孔喉结构以中大孔—粗喉和中孔—粗喉型为主, 连通性较差, 整体表现为低孔低渗致密砂岩特征; 压实—压溶和胶结作用普遍发育, 其中北部储层胶结作用强烈, 南部以溶蚀作用为主, 储层整体处于中成岩 B 期至晚成岩阶段; 储层可划分为 I、II、III 类, 其中 I 类和 II 类为优质储层, 优选面积为 786 km², I 类储层主要富集于南部地区; 南部储层的物性参数、孔隙结构及储集性能优于北部储层的。该结果为神木气田本溪组高效建产开发提供地质依据。

关键词: 储层特征; 储层分类; 储层差异性; 本溪组; 神木气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)06-0046-11

0 引言

鄂尔多斯盆地是中国第二大内陆沉积盆地, 资源储量丰富, 油气聚集规模巨大, 成为重要的油气生产枢纽, 具有“南油北气”的独特资源分布模式^[1-3]。有关鄂尔多斯盆地山西组 and 石盒子组等主力产层的研究较为深入, 太原组和本溪组的研究较为薄弱。随勘探向盆地南部及东南部持续推进, 神木、米脂和高桥等中东部区域相继发现具有工业价值的本溪组气藏, 表明本溪组储层具有开发潜力, 具备形成千亿立方米级大气田的资源基础^[4-6]。

鄂尔多斯盆地本溪组逐渐成为油气地质研究的重点层系。受海西期构造运动控制, 研究区构造格局呈“南隆北倾”的特征^[7-8]。华北海域从盆地北东侧侵入, 北部水体较浅, 物源供应充足, 发育潮控—三角洲复合沉积体系; 南部水体较深, 受潮汐作用影响显著, 以障壁海岸沉积体系为主^[9]。本溪组储层岩性以石英砂岩为主(盆地东南部尤为典型), 含少量岩屑石英砂岩(南部偶见长石残留), 储层具有中—粗粒结构(局部含细粒)、低杂基含量特征, 填隙物以伊利石、绿泥石和高岭石等黏土矿物为主。受多期成岩作用改造, 储层进入晚成岩阶段, 发育大量次生孔隙和晶间孔, 形成以低孔—低渗为主的致密砂岩储层, 颗粒呈次圆状, 分选中等—好, 微观结构复杂, 普遍具有粒度偏细、物性较差和非均质性强的特点^[10-11]。本溪组气藏的烃源岩为上古生界发育的煤层, 主要生烃—成藏期为晚侏罗世至早白垩世, 生烃作用强烈, 成藏规模较大^[12-13], 气藏具有单井产量高、局部富集的特征, 神木气田南部台 8 井区气井产能普遍优于北部神 22 井区的。有关本溪组的研究大多集中于物源分析和砂体展布特征等, 对储层岩性特征、物性参数及主控因素等方面的研究较少^[14-16]。郭艳琴等^[17]、刘军龙^[18]、肖佃师等^[19]考虑储层物性、沉积微相和砂体构型等多维度参数, 构建储层综合评价体系; 马世忠等^[20]认为, 粒间孔对渗透率的贡献率及通过恒速压汞实验获取

收稿日期: 2025-02-16; 编辑: 朱秀杰

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ18YJ04); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ16YJ03)

作者简介: 张博杰(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事致密砂岩方面的研究。

的孔喉半径比,可以作为致密砂岩储层评价的核心参数;周翔等^[21]将孔隙度与渗透率视为储层分类的关键指标;根据高压压汞曲线特征,王伟明等^[22]、林卫兵等^[23]结合物性参数制定储层分类方案。

根据单一参数设定的评价标准,分析研究区本溪组致密砂岩储层的复杂性存在一定局限。笔者采用岩心观察、X 线衍射分析、岩石薄片鉴定、扫描电镜及高压压汞实验等方法,结合沉积微相、物性参数、孔隙结构、测井响应曲线及高压压汞实验结果等,研究神木气田本溪组储层特征,构建适用于研究区的储层综合评价体系,预测有利储层分布,明确南北部储层差异性,为神木气田的建产开发提供地质依据。

1 区域地质概况

神木气田横跨陕西省神木市与榆林市,位于鄂尔多斯盆地东缘伊陕斜坡的东北部,毗邻榆林、米脂、佳县、子洲及大牛地等气田,勘探开发区域面积约为 $6.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ (见图 1(a))。神木气田地质构造呈宽阔平缓的西倾单斜,地层倾角普遍小于 1° ,整体构造较为简单,受差异压实作用影响,局部形成微弱的鼻状构造^[24-25]。本溪组自下而上划分为本三段(湖田段)、本二段(畔沟段)和本一段(晋祠段)(见图 1(b))。底部湖田段广泛发育一套经历风化剥蚀的铁铝质岩层,由于志留系及泥盆系缺失,湖田段与下伏奥陶系马家沟组呈不整合接触;畔沟段及晋祠段为泥岩、砂岩及灰岩互层,其中畔沟灰岩、晋祠砂岩、吴家峪灰岩等典型标志层具有显著的电性特征;晋祠段顶部发育一套稳定的由 8、9 号煤组成的煤系地层,为本溪组与上覆太原组的分界标志。本溪组厚度为 22~98 m,厚层区主要沿东北—西南向展布。砂体厚度一般为 4~20 m,主要集中发育于本溪组上段。顶部 8 号煤层厚度介于 3.8~10.6 m,平均厚度为 5.6 m,是本溪组重要的烃源岩层及优质的深层煤岩气储层^[26]。研究区沉积物主要来源于东北方向,发育三角洲与障壁岛—潟湖相沉积体系^[27]。

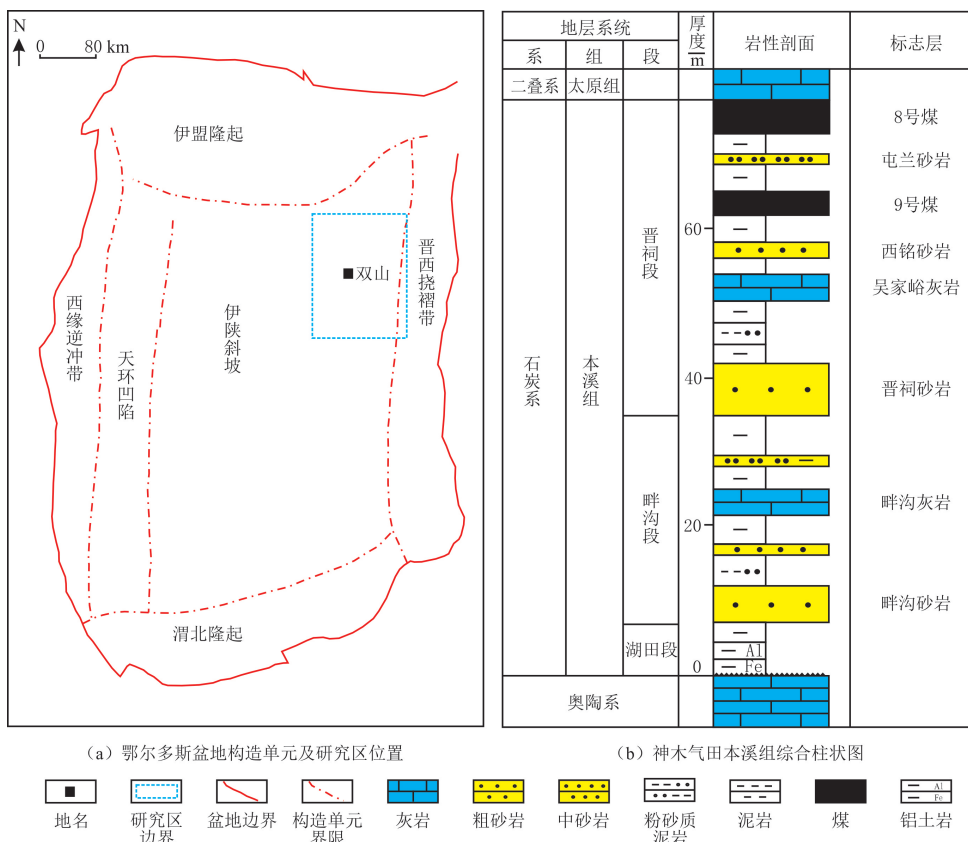


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分、研究区位置及地层综合柱状图(据文献^[22]修改)
 Fig. 1 Tectonic division, location of the study area and comprehensive stratigraphic column of the Ordos Basin(modified by reference^[22])

2 储层特征

2.1 岩石学特征

2.1.1 岩石组分

研究区 26 口钻井 253 个样品的 X 线全岩衍射矿物分析数据显示,在本溪组砂岩碎屑组分中,石英体积分数平均为 80.16%,是砂岩碎屑颗粒的主要成分;岩屑体积分数相对较低,平均为 7.20%,组分呈多样性特征,其中碎屑岩石最为发育;长石组分较为少见,体积分数平均为 0.22%;黏土矿物体积分数整体较高,平均为 8.62%;含有一定量的黄铁矿(体积分数平均为 0.54%)及其他矿物组分(体积分数平均为 3.26%)。将本溪组储层岩石类型按丰度降序排列为石英砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩(见图 2)。

2.1.2 岩石结构

本溪组储层以中—粗粒石英砂岩为主,中砂岩占比最高(平均为 35%),其次为粗砂岩(平均为 27%)和细砂岩(平均为 23%)(见图 3(a)),反映沉积时期水动力条件的显著波动。北部储层以中—细砂岩为主,粒径为 0.17~0.79 mm,平均为 0.41 mm;南部储层以中粗砂岩为主,粒径为 0.21~0.94 mm,平均为 0.51 mm(见图 3(b))。岩石学特征显示,储层以灰色—深灰色砂岩为主,碎屑颗粒多呈次圆—次棱角状,次棱角状颗粒较少,整体分选中等^[28]。

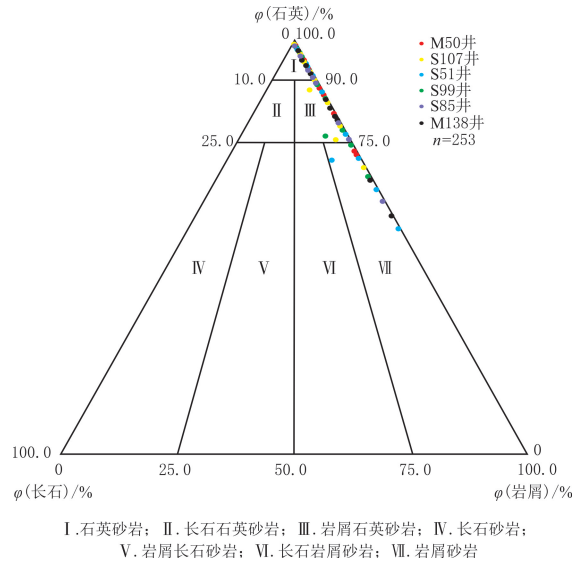


图 2 研究区本溪组岩石组分三端元图
Fig. 2 Ternary diagram of rock composition in the Benxi Formation of the study area

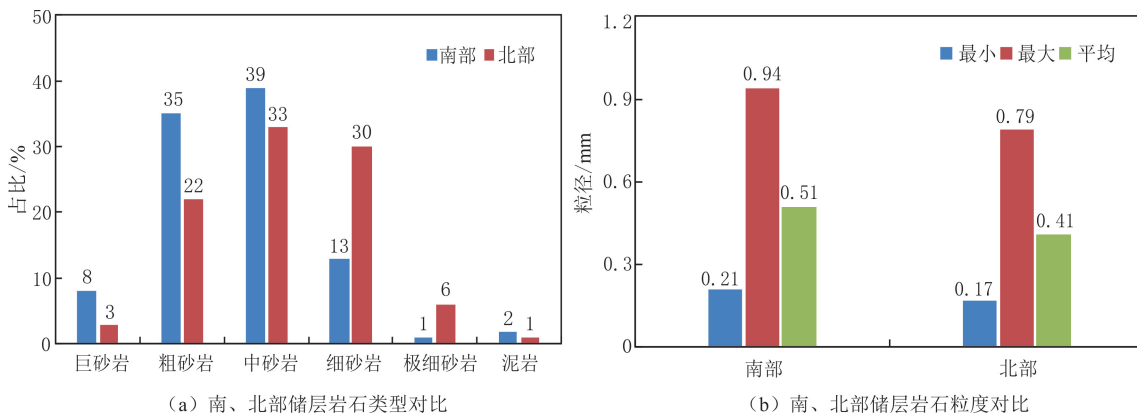


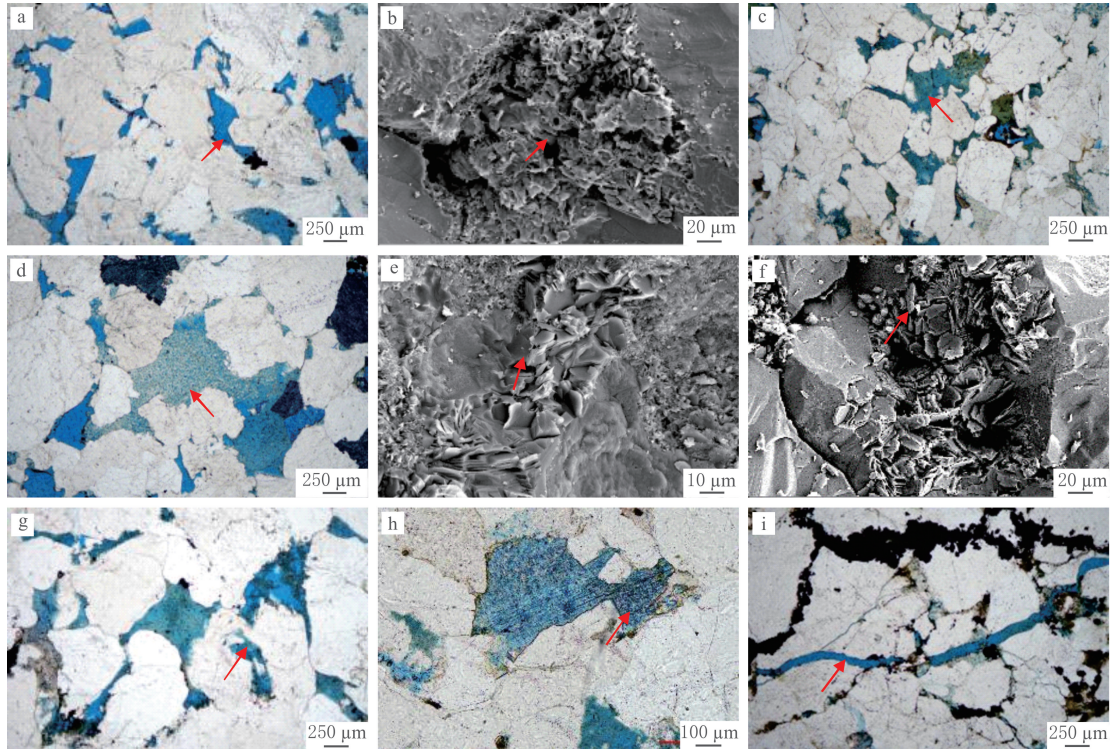
图 3 研究区本溪组岩石粒度分布
Fig. 3 Distribution of rock grain size in the Benxi Formation of the study area

2.2 储集空间特征

2.2.1 孔隙类型

根据铸体薄片与扫描电镜分析,研究区本溪组储层孔隙类型丰富,以原生孔隙与次生孔隙为主,微裂缝发育程度较低。储层主要发育粒间孔、高岭石晶间孔、溶蚀孔及微裂缝等^[29-30]。粒间孔是主要的油气储集空间,扫描电镜下显示内部常被胶结物或自生石英晶体部分充填,平均面孔率为 0.80%(见图 4(a-c))。高岭石晶间孔是重要的晶间孔隙类型,平均面孔率为 0.75%(见图 4(d-f))。溶蚀孔主要为粒间溶孔和粒内溶孔,粒间溶孔表现为碎屑颗粒及填隙物经部分溶蚀形成的半圆形或港湾状孔隙,粒内溶孔主要为岩屑溶孔,呈不规则状和串珠状分布,显著改善储层的储集性能,平均面孔率为 0.90%(见图 4(g-h))。微裂缝作为有效的油气运移通道,对储层渗流能力具有改善作用,镜下观察到部分微裂缝被有机质充填

(见图 4(i))。



(a) 粒间孔, M50井, 本二段, 2 444.90 m, 单偏光; (b) 残余粒间孔, M38井, 本二段, 2 781.62 m, SEM; (c) 残余粒间孔, M38井, 本二段, 2 781.62 m, 单偏光; (d) 高岭石晶间孔, M50井, 本二段, 2 444.90 m, 单偏光; (e) 高岭石晶间孔, M50井, 本二段, 2 443.30 m, SEM; (f) 高岭石晶间孔, S103井, 本一段, 2 489.38 m, SEM; (g) 粒间溶蚀孔, S51井, 本一段, 2 332.60 m, 单偏光; (h) 岩屑溶孔, S107井, 本一段, 2 737.62 m, 单偏光; (i) 微裂隙, M50井, 本二段, 2 443.20 m, 单偏光

图 4 研究区本溪组砂岩储层孔隙类型

Fig. 4 Pore types of sandstone reservoirs in the Benxi Formation of the study area

研究区北部至中部双山地区, 面孔率呈逐渐递增趋势, 双山以南区域表现为整体增大的特征。研究区本溪组储层孔隙类型具有明显的空间差异性, 北部储层以溶蚀孔为主, 南部储层以粒间孔和溶蚀孔为主, 晶间孔占比相对较小; 南部储层平均面孔率为 2.9%, 高于北部的(2.1%) (见图 5)。

2.2.2 孔喉结构

根据研究区本溪组储层 22 个样品的高压压汞实验数据(见表 1)、毛细管压力参数及储层微观特征, 将本溪组储层孔喉结构划分为 I、II 和 III 类(见图 6)^[31]。研究区压汞曲线以 I 和 II 类为主(见图 6(a-b)), 表明储层质量整体较好。本溪组储层表现为中等的排驱压力和较高的最大进汞饱和度特征。压汞曲线形态显示, 曲线斜率较为平缓, 反映孔喉分选性较好; 退汞效率总体较低, 反映储层孔喉连通性较差, 平均退汞效率为 27.04%。这可能与孔喉结构复杂导致的流体滞留、微孔隙发育程度不足、喉道连通性较差^[32-34]等因素有关。

(1) I 类孔喉结构。储集性能较好, 表现为高孔隙度与高渗透率特征。孔喉结构参数显示排驱压力和中值压力较低, 中值半径较大。最大进汞饱和度最高, 毛细管压力曲线中段呈显著且延展的平缓特征, 孔喉分选性优异, 属中大孔—粗喉型结构, 有较好的储集渗流能力(见图 6(a))。

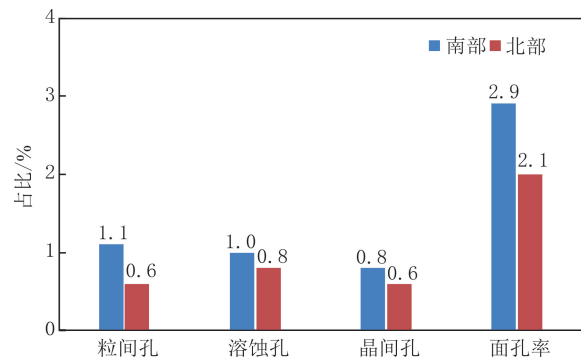


图 5 研究区本溪组储层孔隙类型直方图

Fig. 5 Pore type histogram of the reservoir in the Benxi formation of the study area

(2) II类孔喉结构。储集性能中等,孔隙度与渗透率介于I类和III类孔喉结构之间。孔喉结构参数显示排驱压力和中值压力略高于I类孔喉结构的,中值半径较大。最大进汞饱和度处于中等水平,毛细管压力曲线中段呈较短的平缓特征,孔喉分选性良好,以中孔—粗喉型结构为主,有较好的储集渗流能力(见图6(b))。

(3) III类孔喉结构。储集性能相对较差,孔隙度与渗透率较低。孔喉结构参数表现为最高的排驱压力和中值压力,中值半径较小。最大进汞饱和度最低,毛细管压力曲线缺乏明显的平直段,孔喉分选性较差,主要呈细孔—细喉型结构,储集渗流能力较弱(见图6(c))。

表1 研究区本溪组储层压汞曲线参数

Table 1 Mercury injection curve parameters of Benxi Formation reservoir in the study area

取值	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	中值半径/ μm	最大进汞饱和度/ %	退汞效率/ %
最大	10.52	2.34	1.35	61.44	1.00	90.92	45.76
最小	2.56	0.07	0.20	0.74	0.01	62.62	6.52
平均	6.67	0.52	0.71	9.66	0.27	79.02	27.04

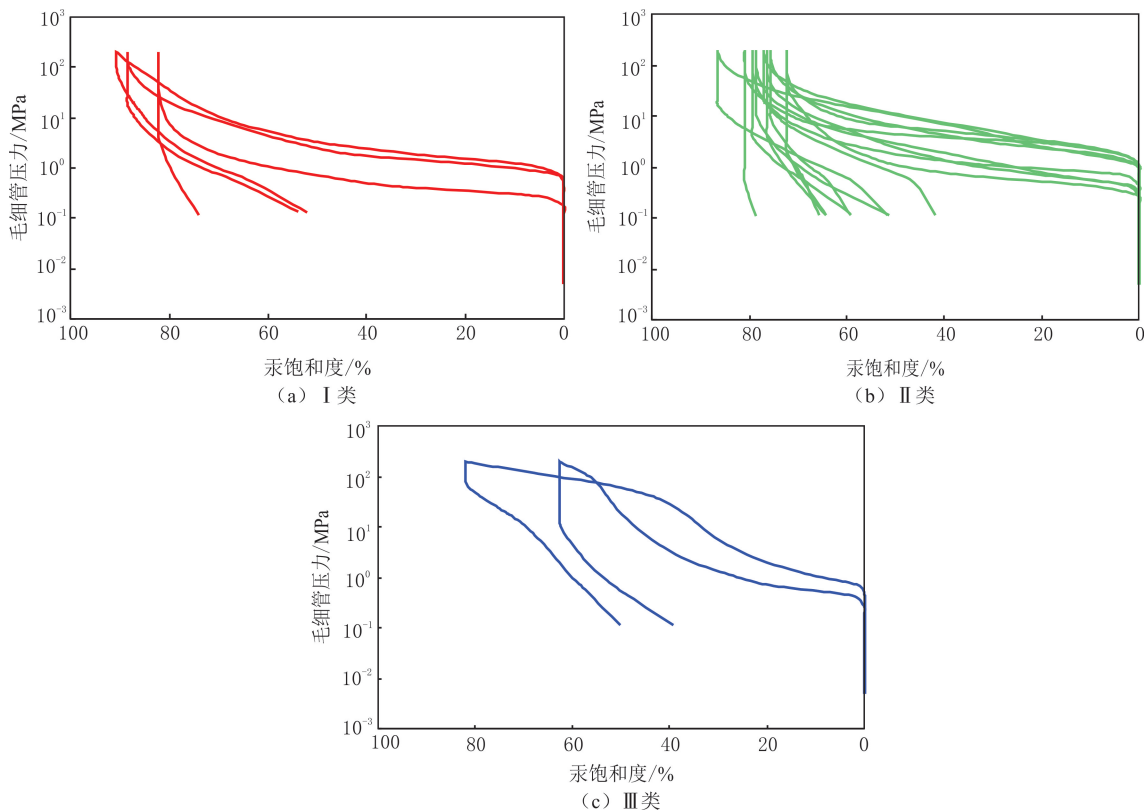


图6 研究区本溪组储层高压压汞曲线特征

Fig. 6 Characteristics of high pressure mercury injection curves of Benxi Formation reservoir in the study area

2.3 储层物性

研究区本溪组孔隙度整体介于0.30%~12.52%,其中孔隙度在6.00%~8.00%区间的频率最高,为33.1%,整体以中低孔隙度(2.00~10.00%)为主,平均为5.86%,高孔隙度占比极少(见图7(a));渗透率整体介于 $(0.07\sim 7.34)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中渗透率在 $(0.20\sim 0.40)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 区间的频率最高,为34.8%,峰值区间为 $(0\sim 0.60)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.56\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见图7(b)),整体呈低渗透率特征。

根据油气储层分类标准^[35-37],确定研究区本溪组储层为低孔低渗致密砂岩储层。研究区南、北部储层物性参数(见图8)表明,南部储层平均孔隙度为7.80%,北部储层平均孔隙度为7.30%,二者差异较小,孔隙度主要分布在4.00%~10.00%之间;渗透率表现为明显的区域差异性,南部储层平均渗透率为

$0.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 显著高于北部的 ($0.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 表明南部储层物性整体优于北部储层的。

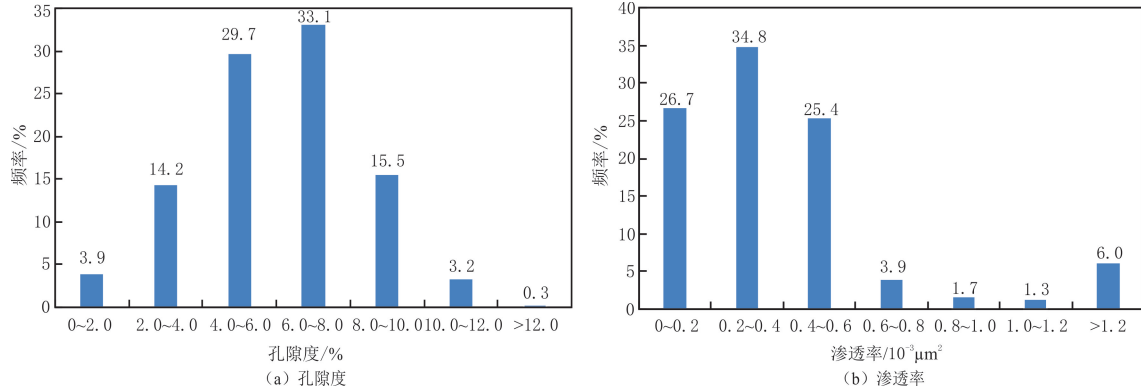


图7 研究区本溪组孔隙度及渗透率分布直方图

Fig. 7 Distribution histogram of porosity and permeability of Benxi Formation in the study area

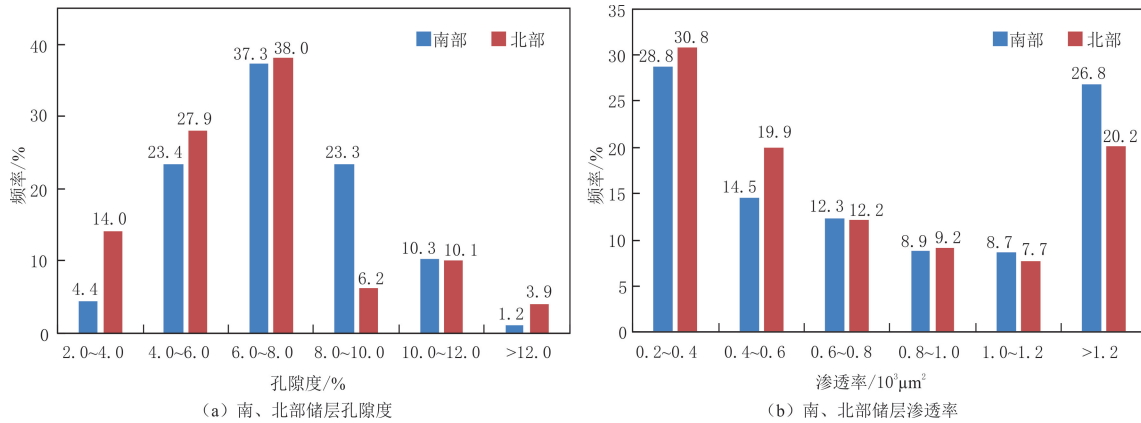


图8 研究区本溪组南、北部储层孔隙度及渗透率对比直方图

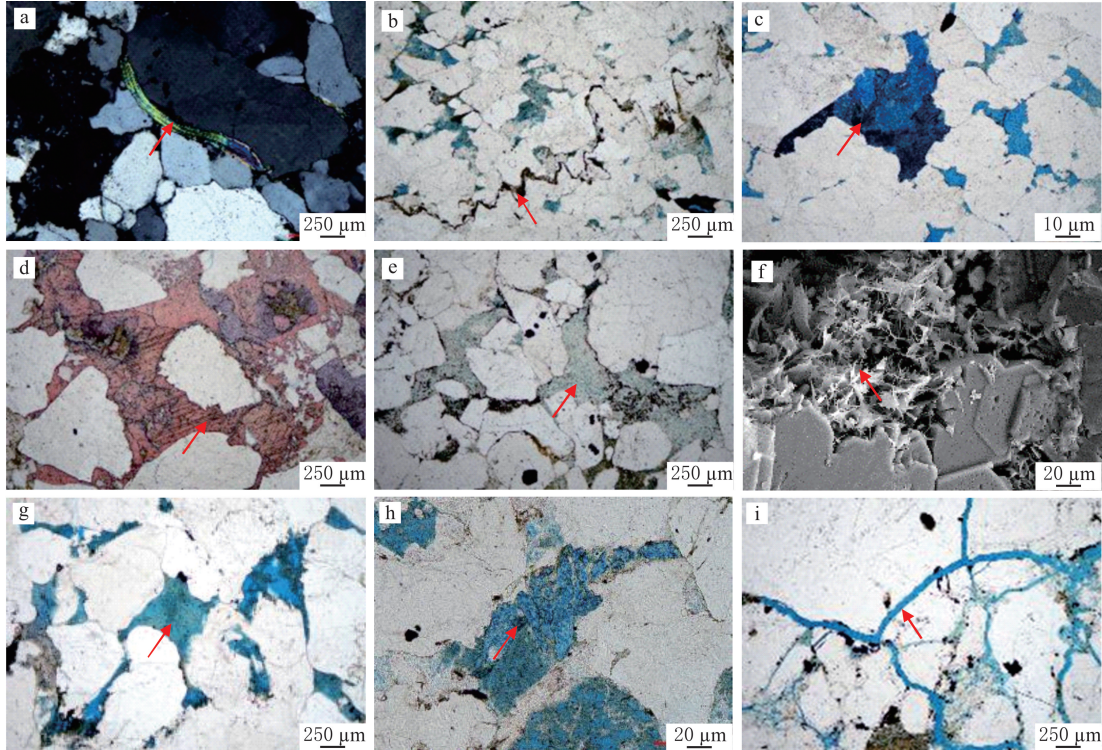
Fig. 8 Contrast histogram of porosity and permeability between the northern and southern reservoir of Benxi Formation in the study area

3 成岩作用

成岩作用对鄂尔多斯盆地本溪组储层物性具有显著的控制作用。压实—压溶作用是研究区本溪组最常见的成岩作用,导致储层原生孔隙明显减少,是储层低孔隙度和低渗透率的主要原因之一。压实作用强度随地层埋深的增加而增大,镜下观察到典型的压溶缝合线构造和云母颗粒塑性变形(见图9(a-b))。胶结作用将分散的矿物颗粒粘合,降低孔隙度及渗透率,镜下观察到本溪组常见的胶结物包括石英次生加大边、方解石胶结及黏土矿物充填,北部储层胶结作用强烈,是导致北部储层物性劣于南部的原因之一(见图9(c-e))。溶蚀作用将储层矿物组分中的不稳定矿物颗粒溶解,生成的次生孔隙改善储层物性,南部储层广泛发育溶蚀孔,有效提高储层孔隙度和渗透率(见图9(f-h))。构造应力与成岩压力共同作用形成微裂缝系统,可以改善储层的储集能力,为油气运移提供有效通道^[38](见图9(i))。

成岩阶段划分是致密砂岩储层研究的关键。根据SY/T 5477—2003《碎屑岩成岩阶段划分》,结合有机质成熟度、黏土矿物特征及孔隙类型等,划分研究区本溪组储层成岩阶段。鄂尔多斯盆地本溪组顶部8号煤层为主要烃源岩,埋深为2 456.63~3 568.81 m。研究区22个样品的热解峰温分布在558~563℃之间,平均为560℃,镜质体反射率介于1.5%~2.8%,平均为1.8%,表明本溪组处于热解气生成的高峰阶段^[39]。本溪组石英次生加大边主要发育直径小于5 μm的群体液相包裹体,包裹体均一温度呈双峰分布特征,第一温度区间为90~100℃,第二温度区间为110~130℃^[37],指示两期重要的成岩流体活动。本溪组砂岩储层发育原生孔隙、次生溶蚀孔隙及裂缝,且Ⅲ级石英次生加大边、铁方解石及铁白云石胶结

等胶结作用普遍发育,黏土矿物胶结以高岭石为主(平均体积分数为 62.43%),同时可见发丝状伊利石及混层比较低(13~16)的伊/蒙混层。表明研究区本溪组储层处于中成岩 B 期至晚成岩阶段。



(a) 云母被压弯变形, M119井, 本一段, 3 027.95 m, 单偏光; (b) 压溶缝合线构造, M138井, 本一段, 2 817.46 m, 单偏光; (c) 铁白云石胶结, M50井, 本二段, 2 444.60 m, 单偏光; (d) 方解石胶结, M38井, 本二段, 2 779.31 m, 单偏光; (e) 高岭石胶结, M119井, 本一段, 3 027.15 m, 单偏光; (f) 发丝状伊利石胶结, S51井, 本一段, 2 330.31 m, SEM; (g) 粒间溶蚀孔, S51井, 本一段, 2 332.60 m, 单偏光; (h) 岩屑溶蚀孔, S107井, 本一段, 2 738.11 m, 单偏光; (i) 微裂隙, S99井, 本一段, 1 972.90 m, 单偏光

图 9 研究区本溪组砂岩储层成岩作用特征

Fig. 9 Diagenetic characteristics of sandstone reservoirs of Benxi Formation in the study area

4 储层分类评价及南北部差异性

4.1 分类评价

储层综合评价与有利区预测是油气勘探开发的重要基础。采用多参数综合评价体系^[40-43],根据沉积微相、物性特征、孔隙结构、测井响应及高压压汞实验等,建立研究区本溪组储层分类评价方案,将储层划分为 I、II 和 III 类(见表 2)。

表 2 研究区本溪组砂岩储层分类评价方案

Table 2 Classification and evaluation criteria of sandstone reservoirs of Benxi Formation in the study area

类型	沉积微相	岩石类型	孔隙类型	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	自然伽马/ API	排驱压力/ MPa	中值半径/ μm	砂体厚度/ m	孔隙结构	含气性
I	水下分流河道、潮汐砂坝	粗粒石英砂岩、岩屑石英砂岩	原生粒间孔、溶蚀孔、晶间孔、微裂缝	≥ 8.00	≥ 1.00	≤ 65	0.20~0.38	0.22~1.00	≥ 12	中大孔—粗喉型	好
II	分流河道、潮汐砂坝	中—粗粒石英砂岩、岩屑石英砂岩	溶蚀孔、晶间孔、微裂缝	5.00~8.00	0.30~1.00	65~100	0.53~0.83	0.04~0.11	5~12	中孔—粗喉型	较好
III	三角洲平原分流河道、河口坝、河道边缘	中粒岩屑石英砂岩、中—细粒石英砂岩、岩屑砂岩	溶蚀孔、晶间孔、微裂缝	≤ 5.00	≤ 0.30	≥ 100	1.14~1.35	0.01~0.07	≤ 5	中小孔—中细喉型	较差

(1) I 类储层为优质储层,主要有利沉积微相为潮控三角洲水下分流河道和潮汐砂坝。岩性以粗粒石英砂岩和岩屑石英砂岩为主,砂体厚度 ≥ 12 m;孔隙类型主要为原生粒间孔和溶蚀孔,伴生少量晶间孔和

微裂缝;自然伽马(≤ 65 API)显示低放射性特征;物性较好,孔隙度 $\geq 8.00\%$,渗透率 $\geq 1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙结构以中大孔—粗喉为主,排驱压力(0.20~0.38 MPa)低,中值半径(0.22~1.00 μm)大;含气性好,勘探开发潜力大。

(2) II类储层为中等储层,主要分布于分流河道及潮汐砂坝环境。岩性以中—粗粒石英砂岩和岩屑石英砂岩为主,砂体厚度为5~12 m;储集空间以次生溶蚀孔为主,伴生晶间孔和微裂缝;自然伽马(65~100 API)显示中等放射性特征;物性中等,孔隙度为5.00%~8.00%,渗透率为 $(0.30 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙结构以中孔—粗喉为主,排驱压力(0.53~0.83 MPa)适中,中值半径(0.04~0.11 μm)中等;含气性较好,具有开发价值。

(3) III类储层为差储层,主要分布于三角洲平原分流河道、河口坝及河道边缘环境。岩性以中粒岩屑石英砂岩、中—细粒石英砂岩和岩屑砂岩为主,砂体厚度 ≤ 5 m;孔隙类型以次生溶蚀孔为主,但发育程度有限,伴生晶间孔和微裂缝;自然伽马(≥ 100 API)显示高放射性特征;物性较差,孔隙度 $\leq 5.00\%$,渗透率 $\leq 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙结构以中小孔—中细喉为主,排驱压力(1.14~1.35 MPa)高,中值半径(0.01~0.07 μm)小;含气性较差,效益开发难度较大。

研究区本溪组储层分类平面分布特征见图10,其中I、II类储层为优选有利储层,面积为786 km^2 。I类储层集中分布于南部地区,多以条带状形式发育于砂体较厚的水下分流河道微相;II类储层在沉积微相上的分布特征与I类储层的具有相似性,但砂体厚度相对较小,平面上分布范围更为广泛;III类储层主要发育于北部地区,分流河道规模较大且分布范围广,但砂体厚度最小。

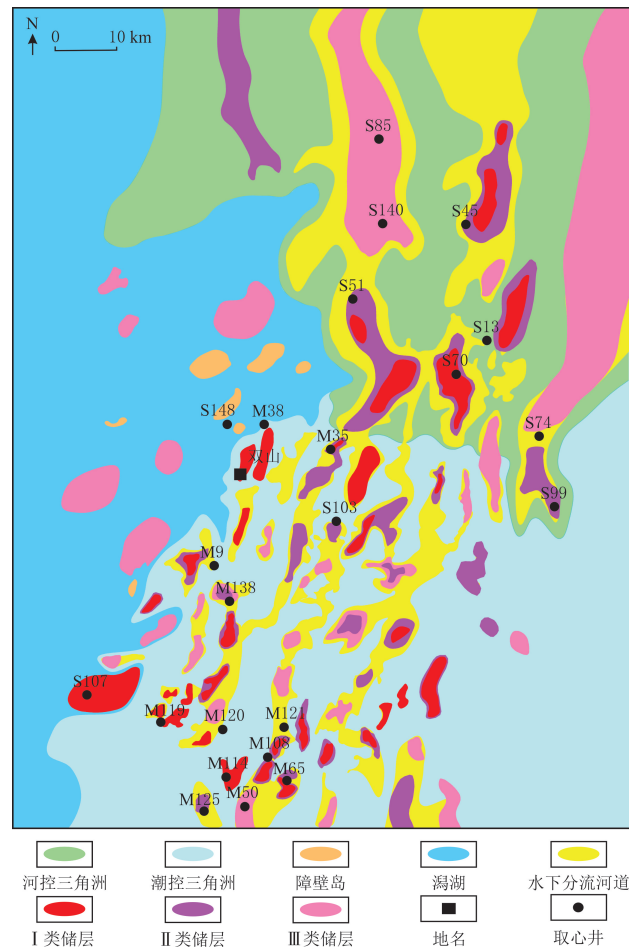


图10 研究区本溪组储层平面分布特征

Fig. 10 Planar distribution characteristics of Benxi Formation reservoirs in the study area

4.2 南北部差异性

研究区北部储层主要发育河控三角洲沉积体系,砂体连续性好,分布稳定且规模较大;储层以中—细砂岩为主,孔隙类型以粒间溶孔为主;物性劣于南部储层的,其中平均面孔率为2.1%,平均孔隙度为7.30%,平均渗透率为 $0.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;胶结作用强烈,以Ⅱ类储层为主,Ⅰ类和Ⅲ类次之。

研究区南部储层主要发育潮控三角洲沉积体系,砂体受潮汐作用改造明显,规模较小,连续性差,多呈孤立状分布;储层以中—粗砂岩为主,残余粒间孔、溶蚀孔发育;物性优于北部储层的,平均面孔率为2.9%,平均孔隙度为7.80%,平均渗透率为 $0.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;溶蚀作用强烈,次生孔隙发育,以Ⅰ类储层为主,Ⅱ类和Ⅲ类次之。储层南、北部差异主要受沉积环境和成岩作用的综合影响,为研究区本溪组规模效益开发提供地质依据。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地神木气田本溪组砂岩以灰色—深灰色石英砂岩为主,岩屑石英砂岩次之。北部储层有利沉积微相以三角洲平原分流河道为主,南部储层以潮汐作用改造的三角洲前缘水下分流河道为主;粒度分布具有明显的南北差异性,北部以中—细砂岩为主,南部以中—粗砂岩为主。碎屑颗粒多呈次圆—次棱角状,分选中等,整体属于低孔低渗致密砂岩储层。

(2)研究区储层发育的孔隙类型包括粒间孔、晶间孔、溶蚀孔及微裂缝等,其中南部储层以粒间孔和溶蚀孔为主,北部以溶蚀孔为主。自北向南,面孔率逐渐增大,物性明显改善。孔喉结构划分为中大孔—粗喉(Ⅰ类)、中孔—粗喉(Ⅱ类)及中小孔—中细喉(Ⅲ类)三类,以Ⅰ、Ⅱ类孔喉结构为主。压实—压溶和胶结作用普遍发育,北部胶结作用强烈,南部溶蚀作用显著,储层整体处于中成岩B期至晚成岩阶段。

(3)研究区储层划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类,其中Ⅰ、Ⅱ类为优质储层,优选面积为786 km²,Ⅰ类储层主要富集于研究区南部,整体上南部储层质量优于北部的。

参考文献(References):

- [1] 付金华,董国栋,周新平,等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探,2021,26(3):19-40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):19-40.
- [2] 付金华,段晓文,席胜利. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征[J]. 天然气工业,2000,20(6):16-19.
FU Jinhua, DUAN Xiaowen, XI Shengli. Characteristics of Upper Paleozoic gas reservoirs in Eerduosi Basin[J]. Natural Gas Industry, 2000,20(6):16-19.
- [3] 陈全红. 鄂尔多斯盆地上古生界沉积体系及油气富集规律研究[D]. 西安:西北大学,2007:1-5.
CHEN Quanhong. Research on sedimentary systems and hydrocarbons enrichment of the Upper Palaeozoic of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2007:1-5.
- [4] 陈孟晋,汪泽成,郭彦如,等. 鄂尔多斯盆地南部晚古生代沉积特征与天然气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2006,33(1):1-5.
CHEN Mengjin, WANG Zecheng, GUO Yanru, et al. Late Paleozoic sedimentary systems and gas potential in the South Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(1):1-5.
- [5] MUTHER T, QURESHI H, SYED FI, et al. Unconventional hydrocarbon resources: geological statistics, petrophysical characterization, and field development strategies[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021,12(6):1463-1488.
- [6] 冯娟萍,欧阳征健,陈全红,等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区上石炭统沉积特征[J]. 古地理学报,2021,23(1):53-64.
FENG Juanping, OUYANG Zhengjian, CHEN Quanhong, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Carboniferous in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021,23(1):53-64.
- [7] 李文厚,张倩,李克永,等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理学报,2021,23(1):39-52.
LI Wenhou, ZHANG Qian, LI Keyong, et al. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2021,23(1):39-52.
- [8] 牛小兵,赵伟波,史云鹤,等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报,2023,44(8):1240-1257.
NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(8):1240-1257.

- [9] 肖子亢,刘宝平,高小平,等.鄂尔多斯盆地东南部上中生界致密砂岩储层特征及主控因素分析[J].科技通报,2017,33(8):48-56.
XIAO Zikang, LIU Baoping, GAO Xiaoping, et al. Analyses on characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir on the Upper Paleozoic in Southeastern Ordos Basin[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017,33(8):48-56.
- [10] 郭少斌,郑红梅,黄家国.鄂尔多斯盆地上古生界非常规天然气综合勘探前景[J].地质科技情报,2014,33(6):69-77.
GUO Shaobin, ZHENG Hongmei, HUANG Jianguo. Integrated exploration prospects of unconventional gas of Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2014,33(6):69-77.
- [11] 付金华.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D].西安:西北大学,2004:84-91.
FU Jinhua. The gas reservoir-forming conditions and accumulation rules of Upper Paleozoic in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2004:84-91.
- [12] 周进松,王念喜,赵谦平,等.鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征[J].天然气工业,2014,34(2):34-41.
ZHOU Jinsong, WANG Nianxi, ZHAO Qianping, et al. Natural gas accumulation characteristics in the Upper Paleozoic in the Yanchang Exploration Block of Southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(2):34-41.
- [13] 李明瑞,窦伟坦,蒯宏斌,等.鄂尔多斯盆地东部上古生界致密岩性气藏成藏模式[J].石油勘探与开发,2009,36(1):56-61.
LI Mingrui, DOU Weitan, LIAN Hongbin, et al. Model for tight lithologic gas accumulation in Upper Palaeozoic, east of Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(1):56-61.
- [14] QU H, YANG B, TIAN X, et al. The primary controlling parameters of porosity, permeability, and seepage capability of tight gas reservoirs: a case study on Upper Paleozoic formation in the Eastern Ordos Basin, Northern China[J]. Petroleum Science, 2019,16(6):1270-1284.
- [15] 李云,张建伍,李晶,等.鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组沉积微相特征及其对天然气富集控制作用[J].西北地质,2014,47(2):216-222.
LI Yun, ZHANG Jianwu, LI Jing, et al. A study on sedimentary microfacies of Benxi Formation and its controlling effect on gas enrichment in Yanchang District of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2014,47(2):216-222.
- [16] XU Xin, LIU Linyu, LI Xijun, et al. Sequence stratigraphy, sedimentary characteristics of barrier coastal sedimentary system of the Benxi Formation(Gaoqiao Area, Ordos Basin) and favorable reservoir distribution[J]. Energy Reports, 2021,7:5316-5329.
- [17] 郭艳琴,梁言乐,汪淑洁,等.鄂尔多斯盆地东北部神木—佳县地区上石炭统本溪组沉积特征[J].西北大学学报(自然科学版),2024,54(6):1037-1049.
GUO Yanqin, LIANG Yanle, WANG Shujie, et al. Sedimentary characteristics of Benxi Formation of the Upper Carboniferous in Shenmu-Jiaxian Area of the Northeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2024,54(6):1037-1049.
- [18] 刘军龙.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组沉积体系与储层特征研究[D].西安:西北大学,2018:114-123.
LIU Junlong. Sedimentary system and reservoir characteristics of Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018:114-123.
- [19] 肖佃师,卢双舫,姜微微,等.基于粒间孔贡献量的致密砂岩储层分类:以徐家围子断陷为例[J].石油学报,2017,38(10):1123-1134.
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, JIANG Weiwei, et al. Classification of tight sandstone reservoirs based on the contribution of intergranular pores: a case study of Xujiaweizi Fault Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(10):1123-1134.
- [20] 马世忠,张宇鹏.应用压汞实验方法研究致密储层孔隙结构:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J].油气地质与采收率,2017,24(1):26-33.
MA Shizhong, ZHANG Yupeng. Study on the pore structure of tight reservoir by using method of mercury injection: a case study of the Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017,24(1):26-33
- [21] 周翔,何生,刘萍,等.鄂尔多斯盆地代家坪地区长6致密油储层孔隙结构特征及分类评价[J].地学前缘,2016,23(3):253-265.
ZHOU Xiang, HE Sheng, LIU Ping, et al. Characteristics and classification of tight oil pore structure in reservoir Chang 6 of Daijiaping Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(3):253-265.
- [22] 王伟明,卢双舫,李杰,等.致密砂岩储层微观孔隙特征评价:以中国吐哈盆地为例[J].天然气地球科学,2016,27(10):1828-1836.
WANG Weiming, LU Shuangfang, LI Jie, et al. Analyses of micro-pore structural characteristics of tight sandstone reservoirs: a case study in Turpan-Hami Basin, Northwestern China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(10):1828-1836.
- [23] 林卫兵,陈林,陆永潮,等.鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区长8油层组致密储层评价[J].地质与勘探,2017,53(2):381-389.
LIN Weibing, CHEN Lin, LU Yongchao, et al. Tight reservoir evaluation of the Chang 8 Oil Group in the Zhenjing Area, Southwestern Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2017,53(2):381-389.
- [24] 黄道军,李新虎,刘燕,等.鄂尔多斯盆地中东部本溪组致密砂岩储层特征及有利层段优选[J].西安科技大学学报,2023,43(1):109-118.
HUANG Daojun, LI Xinhua, LIU Yan, et al. Characteristics and favorable intervals selection of tight sandstone reservoirs in Benxi

- Formation, Central-Eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Xian University of Science and Technology*, 2023,43(1):109-118.
- [25] 强小龙,文开丰,王德龙,等. 致密砂岩气藏孔喉结构和渗流特征差异及其对水锁的影响:以鄂尔多斯盆地神木气田山西组、太原组和石盒子组为例[J]. *东北石油大学学报*,2025,49(2):1-18.
QIANG Xiaolong, WEN Kaifeng, WANG Delong, et al. Differences in pore-throat structure and seepage characteristics of tight sandstone gas reservoirs and their effects on water-blocking: a case study of Shanxi, Taiyuan and Shihezi Formations in Shenmu Gas Field, Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2025,49(2):1-18.
- [26] 刘再振,刘玉明,李洋冰,等. 鄂尔多斯盆地神府地区太原组致密砂岩储层特征及成岩演化[J]. *岩性油气藏*,2017,29(6):51-59.
LIU Zaizhen, LIU Yuming, LI Yangbing, et al. Tight sandstone reservoir characteristics and diagenesis evolution of Taiyuan Formation in Shenmu-Fugu Area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017,29(6):51-59.
- [27] 李剑,张春林,姜福杰,等. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组致密气富集主控因素[J]. *天然气工业*,2021,41(4):30-40.
LI Jian, ZHANG Chunlin, JIANG Fujie, et al. Main factors controlling the enrichment of Upper Carboniferous Benxi Formation tight gas in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021,41(4):30-40.
- [28] 尚玥. 鄂尔多斯盆地中东部上石炭统本溪组沉积相及储层特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2023:19-22.
SHANG Yue. The sedimentary facies and reservoir characteristics of the Upper Carboniferous Benxi Formation in the central-eastern part of the Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023:19-22.
- [29] 闫建成. 鄂尔多斯盆地东部本溪组气藏地质特征[J]. *云南化工*,2018,45(9):163-164.
YAN Jiancheng. Geological characteristics of the Benxi Formation gas reservoir in the Eastern Ordos Basin[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018,45(9):163-164.
- [30] 王永骁,付斯一,张成弓,等. 鄂尔多斯盆地东部山西组 2 段致密砂岩储层特征[J]. *岩性油气藏*,2021,33(6):12-20.
WANG Yongxiao, FU Siyi, ZHANG Chengong, et al. Characteristics of tight sandstone reservoirs of the second member of Shanxi Formation in Eastern Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021,33(6):12-20.
- [31] 王力,刘岩,曹茜,等. 四川盆地中部须家河组致密砂岩储层孔喉结构分类评价[J]. *东北石油大学学报*,2024,48(4):41-53.
WANG Li, LIU Yan, CAO Qian, et al. Classification and evaluation of pore throat structure in tight sandstone reservoirs of the Xujiahe Formation in the Central Sichuan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(4):41-53.
- [32] DUAN Wei, LI Chunfeng, LUO Chengfei, et al. Effect of formation overpressure on the reservoir diagenesis and its petroleum geological significance for the DF11 Block of the Yinggehai Basin, the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018,97:49-65.
- [33] 关闻. 红河油田延长组长 9 储层孔喉结构特征[J]. *石油地质与工程*,2018,32(2):47-50.
GUAN Wen. Pore throat structure of Yanchang 9 Reservoir in Honghe Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2018,32(2):47-50.
- [34] 赵继勇,刘振旺,谢启超,等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长 7 致密油储层微观孔喉结构分类特征[J]. *中国石油勘探*,2014,19(5):73-79.
ZHAO Jiyong, LIU Zhenwang, XIE Qichao, et al. Micro pore throat structural classification of Chang 7 tight oil reservoir of Jiyuan Oilfield in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014,19(5):73-79.
- [35] 边会媛,韩博华,王飞,等. 柴北缘牛东地区砂砾岩储层特征及分类评价[J]. *西安科技大学学报*,2020,40(5):894-901.
BIAN Huiyuan, HAN Bohua, WANG Fei, et al. Characteristics and classification of glutenite reservoirs in Niudong Area, north margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Xian University of Science and Technology*, 2020,40(5):894-901.
- [36] 王若谷,廖友运,尚婷,等. 苏里格气田东二区山西组砂岩储层特征及主控因素分析[J]. *西安科技大学学报*,2016,36(3):385-392.
WANG Ruogu, LIAO Youyun, SHANG Ting, et al. Controlling factors and characteristics of sandstone reservoir of Shanxi Formation in the east II block of Sulige Gas Field[J]. *Journal of Xian University of Science and Technology*, 2016,36(3):385-392.
- [37] 田夏荷. 鄂尔多斯盆地东部本溪组—山西组致密气储层分类评价研究[D]. 西安:西北大学,2016:64-72.
TIAN Xiahe. Research on tight gas reservoirs evaluation and classification of Benxi Formation-Shanxi Formation in Eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2016:64-72.
- [38] 赵诗红,朱丽,张玲. 川西坳陷合兴场气田须二段致密砂岩储层特征及发育主控因素[J]. *非常规油气*,2025,12(4):13-22.
ZHAO Shihong, ZHU Li, ZHANG Ling. Characteristics and primary controlling factors of tight sandstone reservoirs of the Xu 2 Member in Hexingchang Gas Field, West Sichuan Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2025,12(4):13-22.
- [39] 师展,赵靖舟,孙雄伟,等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系烃源岩特征及生烃潜力评价[J]. *天然气地球科学*,2023,34(9):1612-1626.
SHI Zhan, ZHAO Jingzhou, SUN Xiongwei, et al. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Upper Paleozoic coal measure source rocks in the Southeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023,34(9):1612-1626.

(下转第 84 页)