

河流相致密砂岩气地质甜点评价 ——以四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组二段1亚段为例

潘辉¹, 蒋裕强¹, 朱讯², 邓海波³, 宋林珂³, 王占磊¹, 李杪¹, 周亚东¹, 冯林杰¹, 袁永亮¹, 王猛⁴

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500; 2. 中国石油西南油气田分公司气田开发管理部, 四川成都 610051; 3. 中国石油西南油气田分公司致密油气项目部, 四川成都 610051; 4. 成都西南石油大学科技园发展有限公司, 四川成都 610500)

摘要:四川盆地侏罗系沙溪庙组储层具有孔隙度和渗透率低、非均质性强、砂体叠置关系复杂的特点,导致地质甜点判别困难、预测精度较低。为实现气藏的高效开发,通过分析、研究沉积作用、成岩作用和源-储配置关系对天然气聚集成藏的影响,建立了研究区沙溪庙组二段1亚段致密砂岩气地质甜点评价标准。研究结果表明:①沉积微相和河道类型控制了砂体规模及储层的物性,顺直河或低弯度曲流河边滩砂体厚度大、物性好,是优质储层发育区。②岩胶岩屑含量和成岩相不同是导致储层质量差异的主要原因。其中绿泥胶结相物性最好。③源-储配置关系控制储层中天然气的充注程度,与烃源断层直接相接或距离烃源断层较近的砂体含气性最好。④储层质量和含气性共同控制单井天然气产量。根据研究提出的地质甜点评价标准,将研究区地质甜点分为3类。I类甜点主要为顺直河或低弯度曲流河边滩砂体,孔隙度大于12%,渗透率大于 $0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以绿泥胶结为主,且距烃源断层近,含气性好,含水饱和度小于30%,泊松比小于0.24,单井产气强度大于 $0.10 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。II类甜点主要为中弯度曲流河砂体,孔隙度10%~12%,渗透率为 $0.15 \times 10^{-3} \sim 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以伊利石或伊/蒙混层胶结为主,距烃源断层相对较远,含水饱和度为30%~40%,泊松比为0.24~0.25,单井产气强度为 $0.05 \times 10^4 \sim 0.10 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。III类甜点主要为小型中弯度曲流河边滩,孔渗性差,主要发育伊利石或伊/蒙混层胶结,且远离烃源断层,含气性较差。

关键词:顺直河; 曲流河; 甜点主控因素; 甜点评价标准; 致密砂岩气; 沙溪庙组; 侏罗系; 四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Evaluation of geological sweet spots in fluvial tight sandstone gas: A case study of the first submember of the second member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

PAN Hui¹, JIANG Yuqiang¹, ZHU Xun², DENG Haibo³, SONG Linke³, WANG Zhanlei¹, LI Miao¹,
ZHOU Yadong¹, FENG Linjie¹, YUAN Yongliang¹, WANG Meng⁴

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Gas Field Development Management Department, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Tight Oil and Gas Exploration and Development Project Department, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 4. Chengdu Southwest Petroleum University Science Park Development Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Reservoirs of the Jurassic Shaximiao Formation in the Sichuan Basin feature low porosity and permeability, strong heterogeneity, and complex sand body superposition. These characteristics complicate the identification and accurate prediction of geological sweet spots. To achieve efficient exploitation of the gas reservoirs, we establish the criteria for evaluating geological sweet spots in tight sandstone gas in the 1st submember of the 2nd member of the Shaximiao Formation (the Sha 2¹ submember) in the study area by delving into the effects of the sedimentation, diagenesis, and source rock-reservoir configuration on the formation and hydrocarbon accumulation of these gas reservoirs. Key findings are as follows. (1) The sand body scale and reservoir physical properties are governed by sedimentary microfacies and channel

收稿日期:2023-11-29;修回日期:2024-03-16。

第一作者简介:潘辉(1998—),男,博士研究生,致密砂岩油气储层及开发地质。E-mail: 1650036990@qq.com。

通信作者简介:蒋裕强(1963—),男,教授,页岩油气、致密砂岩油气储层及开发地质。E-mail: 1014533645@qq.com。

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTC2021JCYJ-MSXMX0897);中石油西南油气田分公司重大专项(2022ZD01)。

types. Notably, sand bodies located within the point bars of straight or low-sinuosity meandering rivers exhibit large thicknesses and favorable physical properties, standing as high-quality reservoirs. (2) Reservoir quality discrepancy primarily results from differences in lithic content in magmatic rocks and diagenetic facies. Specifically, the chlorite-cemented facies exhibits the most favorable physical properties. (3) Natural gas charging in the reservoirs is dictated by the source rock-reservoir configuration. Most especially, sand bodies in contact with or in proximity to source rock-rooted faults boast the most favorable gas-bearing properties. (4) The single-well natural gas production is jointly determined by reservoir quality and gas-bearing properties. Based on the evaluation criteria established in this study, the geological sweet spots in the study area are categorized into three types: types I, II, and III. Type I sweet spots primarily encompass sand bodies in the point bars of straight or low-sinuosity meandering rivers, with porosity exceeding 12 % and permeability surpassing $0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and chlorite-cemented facies dominating. They are situated near source rock-rooted faults, exhibiting favorable gas-bearing properties with water saturation below 30 %, Poisson's ratio less than 0.24, and single-well gas production rate over $0.10 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$. Type II sweet spots are dominated by sand bodies in middle-sinuosity meandering rivers, with porosity ranging from 10 % to 12 % and permeability from 0.15×10^{-3} to $0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Their diagenetic facies are dominated by illite- or mixed-layer montmorillonite-illite-cemented facies. They are positioned comparatively far from source rock-rooted faults, with water saturation ranging from 30 % to 40 %, Poisson's ratio from 0.24 to 0.25, and single-well gas production rate from 0.05×10^4 to $0.10 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$. Type III sweet spots primarily comprise sand bodies in the point bars of small-scale, medium-sinuosity meandering rivers, characterized by low porosity and permeability. Their diagenetic facies mainly include illite- or mixed-layer montmorillonite-illite-cemented facies sitting far from source rock-rooted faults and with poor gas-bearing properties.

Key words: straight river, meandering river, primary factor controlling sweet spot formation, criteria for evaluating sweet spot, tight sandstone gas, Shaximiao Formation, Jurassic, Sichuan Basin

引用格式:潘辉,蒋裕强,朱讯,等. 河流相致密砂岩气地质甜点评价——以四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组二段1亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 471–485. DOI: 10.11743/ogg20240212.

PAN Hui, JIANG Yuqiang, ZHU Xun, et al. Evaluation of geological sweet spots in fluvial tight sandstone gas: A case study of the first submember of the second member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 471–485. DOI: 10.11743/ogg20240212.

致密砂岩气作为当今非常规油气勘探开发的重要领域,在中国各大盆地都具有重大的资源潜力,是未来天然气增储上产的重要领域^[1-4]。近几年四川盆地侏罗系沙溪庙组致密砂岩气的勘探工作取得了重大突破,通过老井上试和新井钻探在川中地区沙溪庙组一段(沙一段)和二段均获得工业油气流,揭示了沙溪庙组多层含气的特征,明确了沙溪庙组致密砂岩气巨大的勘探潜力^[5-8]。

次生气藏是指原生气藏被断层、不整合或其他地质因素破坏之后天然气排出经过再次运移并聚集形成的气藏^[9]。川中地区沙溪庙组属于典型的河流相次生致密砂岩气藏,天然气通过沟通烃源岩和储层的烃源断层运移至河道砂体,在河道砂体内部泥岩分隔层的封堵下,最终聚集形成岩性气藏^[10-11]。然而受沉积、成岩和成藏条件等多种因素影响,沙溪庙组储层孔渗性差、非均质性强,砂体纵横向叠置关系复杂,断层发育较多且断-砂配置关系复杂,不同区块不同砂组的储层物

性、孔隙结构、含气性和单井产量等存在较大的差异,气藏的天然气富集的主控因素和地质甜点分布特征不明,为气藏精准勘探及高效开发带来了巨大挑战^[12-14]。

目前国内外学者在致密砂岩气地质甜点评价方面的研究主要是从烃源岩、运移条件、储层特征和裂缝发育特征等方面开展,利用覆压孔隙度、含气饱和度和岩-电实验等建立相应的图版,或分析成藏要素与生产情况的定量关系等进行地质评价,结合协克里金、多元回归以及层次分析法等方法建立甜点评价模型,识别储层中的甜点段,利用地球物理方法进行甜点区预测,明确地质甜点空间分布特征^[15-23]。前人在川中地区沙溪庙组致密砂岩气地质甜点的研究中主要从储层物性评价和优质储层预测等方面开展工作,对于影响储层质量的微观原因以及烃源岩、输导体系 and 储层之间的配置关系对天然气富集的影响等方面研究不够深入,在实际生产过程中过度依赖地震反演数据,勘探开发的精度相对较低^[24-25]。为此,本文以四川盆地川中地区

沙溪庙组二段1亚段(沙二¹亚段)为例,通过对储层沉积作用、成岩作用和源-储配置关系等方面进行综合分析,明确了本区沙溪庙组致密砂岩气地质甜点主控因素,建立了地质甜点评价标准,以期为研究区致密砂岩气纵向甜点段识别和空间上甜点区的预测提供参考。

1 地质背景

研究区位于四川盆地中部,构造位置横跨川中平缓褶皱带北部和川北古中拗陷低缓带南部(图1a),构造活动以垂向差异升降为主,整体构造格局为北西低、南东高的单斜构造,局部发育中台山、八角场等鼻隆构造,断层较为发育,主要为近东西向断层。侏罗系中统沙溪庙组为陆相河湖沉积体系,发育一套红色、紫红色和灰绿色泥岩夹灰色、灰白色砂岩的陆相碎屑岩,整体厚度为1 200~2 000 m,自下而上可划分沙一段和沙二段,沙二段可进一步分为4个亚段^[26-27],其中沙二¹亚段是本文研究的主要目的层。

沙一段主要为三角洲-河流相沉积,在沙一段沉积末期气候快速变化,盆地内发生了一次快速而短暂的湖侵,沉积了一套厚度为3~5 m的叶肢介页岩,该套页岩层在研究区广泛发育且厚度稳定,可作为区分沙一段和沙二段的区域性标志层^[28-29](图1b)。沙二段主要发育河流相沉积,气候持续干旱,泥岩以

红色和紫红色为主,共识别出23期河道沉积,已证实的含油气砂组共13期^[30-31],其中沙二¹亚段的6—9号砂组是研究区目前主要的开发层系,主要为曲流河沉积。

2 储层基本特征

2.1 岩石学特征

对研究区沙二¹亚段砂岩样品进行岩心观察和薄片鉴定分析,结果显示,沙二¹亚段砂岩类型主要为岩屑长石砂岩,其次为长石岩屑砂岩。碎屑组分中石英含量介于28.0%~42.0%,平均为34.9%;长石类型主要为钾长石,斜长石含量较少,整体含量介于24.0%~42.0%,平均为37.1%;岩屑组分较为复杂,3种类型岩屑均存在,整体含量介于23.0%~37.0%,平均为28.1%,其中沉积岩岩屑含量稳定,平均为7.2%,岩浆岩和变质岩岩屑含量呈此消彼长的趋势,平均分别为6.3%和12.9%。

填隙物主要为黏土质杂基和胶结物,其中杂基含量较少,主要介于3%~5%,胶结物主要有方解石、浊沸石、硅质、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层6类,其中方解石含量最高,其次为绿泥石、伊利石和伊/蒙混层,浊沸石在6号砂组含量较高,至7—9号砂组含量逐渐降低,硅质胶结物发育较少。

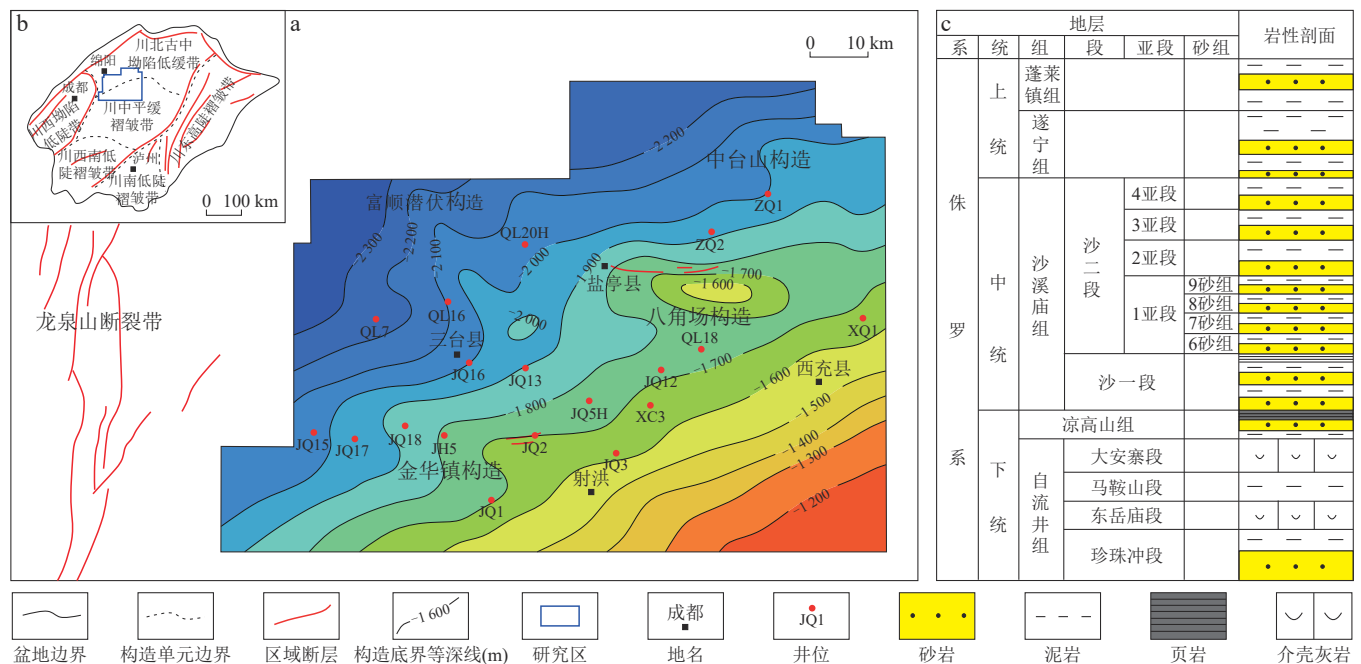
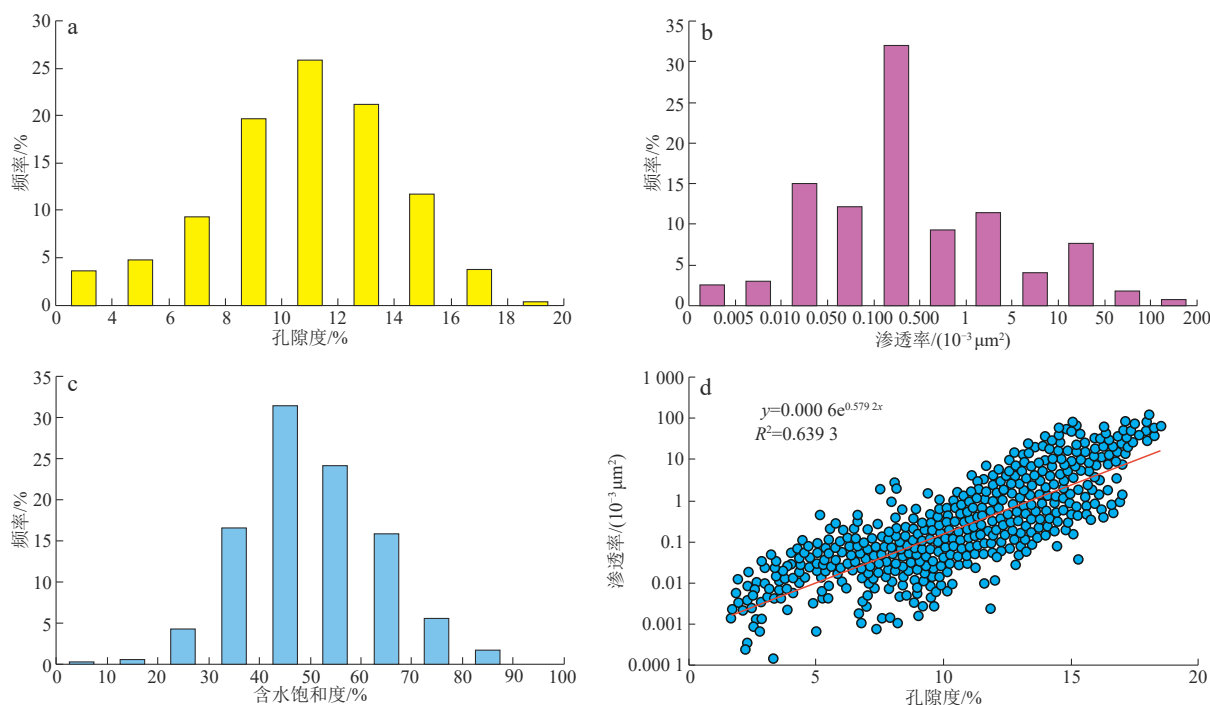


图1 川中地区沙二段底界构造图(a)、研究区位置(b)及侏罗系地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Structural map of the bottom boundary of J₂s² (a), the location of the study area (b), and comprehensive histogram of Jurassic strata (c) in the study area in the central Sichuan Basin

图2 川中地区沙二¹亚段储层孔-渗-饱分布及孔-渗关系Fig. 2 Reservoir porosity, permeability, water saturation distribution and porosity-permeability relationship of $J_{2s}^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

a. 孔隙度分布直方图; b. 渗透率分布直方图; c. 含水饱和度分布直方图; d. 孔-渗相关性

2.2 物性特征

岩心实测的常压孔渗数据统计结果表明,研究区沙二¹亚段储层孔隙度主要分布于6%~16%(图2a),平均值为11.5%,渗透率主要分布于 $0.100 \times 10^{-3} \sim 5.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2b),平均渗透率约为 $4.650 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值渗透率为 $0.244 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔、渗之间具有良好的正相关性(图2d),表明储层属于孔隙型储层。根据碎屑岩储层评价标准,沙二¹亚段砂岩主要为低孔-特低孔、低渗-超低渗储层,储层含水饱和度主要分布于30.0%~70.0%,平均为50.1%,具有中-高含水的特征(图2c)。

2.3 孔隙结构

2.3.1 孔喉类型

研究区沙二¹亚段砂岩孔隙类型主要为残余粒间孔和长石溶孔(图3a,b),含少量粒间溶孔、杂基孔和晶间孔,其中残余粒间孔最为发育,平均面孔率为5.7%,是储层中最主要的储集空间。其次为长石粒内溶孔,平均面孔率为1.3%,粒间溶孔含量较少,面孔率约为0.8%。喉道类型主要为片状和弯片状,该类喉道狭窄且细长,在黏土矿物吸水膨胀的情况下极易发生堵塞,严重影响储层的渗流能力,同时可见少量的缩颈型喉

道,仅存在于部分物性相对较好的砂岩中(图3a,b)。

2.3.2 孔隙结构参数

对50个砂岩样品进行高压压汞测试,结果表明,研究区沙二¹亚段储层排驱压力和中值压力均较低,平均分别为0.79 MPa和2.43 MPa,最大进汞饱和度较高,平均为76.4%,表明储层最大孔喉半径较大,孔、喉之间的连通性较好。平均孔喉半径主要分布于 $0.12 \sim 1.72 \mu\text{m}$,平均为 $0.63 \mu\text{m}$,中值孔喉半径介于 $0.01 \sim 1.85 \mu\text{m}$,平均为 $0.43 \mu\text{m}$,主要为微-细喉道。根据核磁共振测试结果,沙二¹亚段砂体弛豫时间主要在 $0.1 \sim 500.0 \text{ ms}$,左、右谱峰分别代表小孔隙和大孔隙,其中小孔隙占比相对较高,主要介于65.3%~94.9%,平均为69.1%,大孔隙占比介于6.4%~45.3%,平均为30.9%,表明储层的储集空间普遍以小孔隙为主,孔-喉配置关系较差,主要为小孔-细喉或小孔-微细喉,严重制约了储层的渗流能力。以15 000 r/min的离心转速对样品进行离心,结果显示储层的流体可动性相对较差,测试样品的可动流体饱和度主要分布于4.62%~67.80%,平均为39.50%,不同样品之间可动流体饱和度差异较大,反映了储层具有较强的微观非均质性,渗流能力差异较大(表1)。

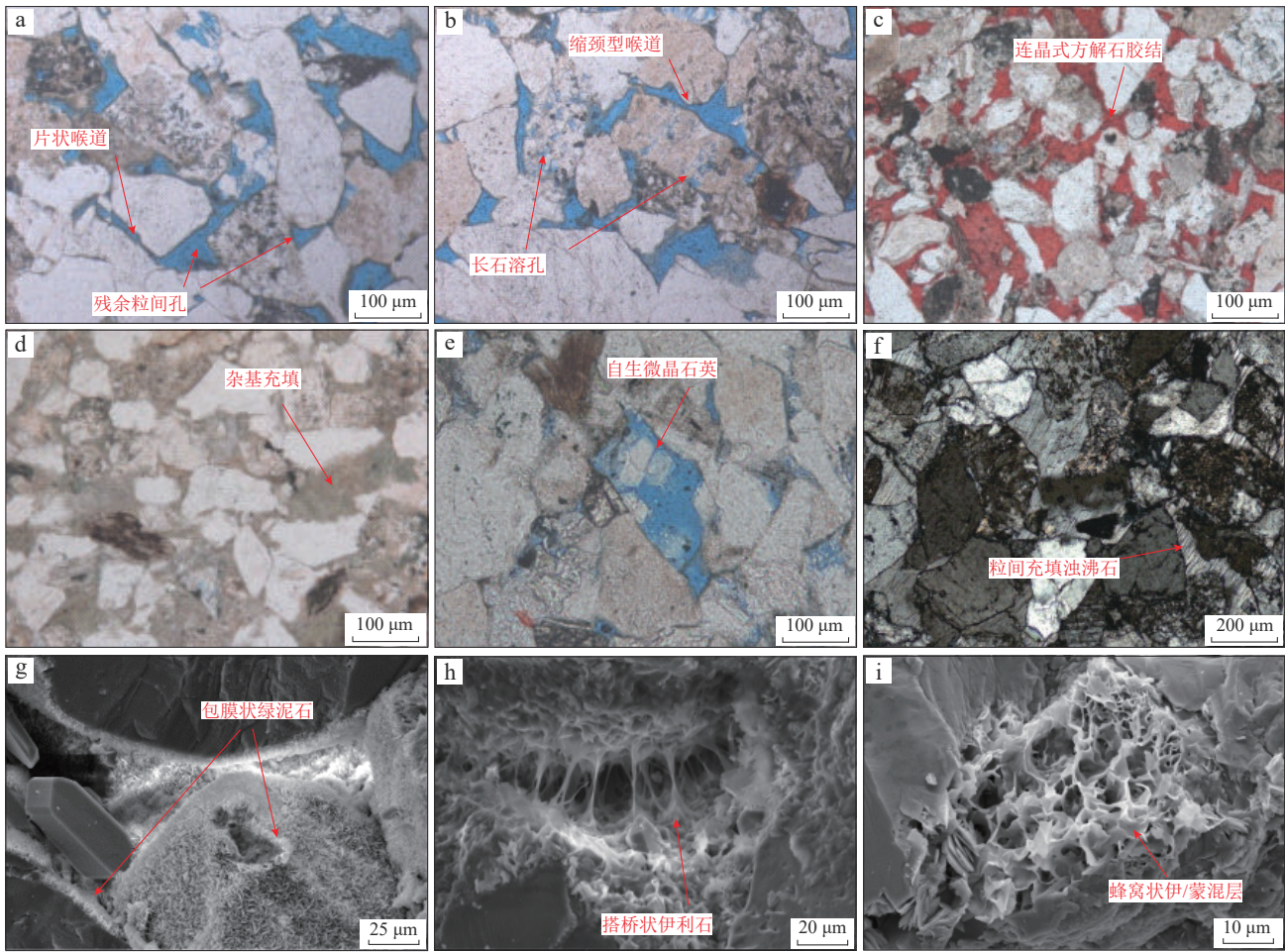


图3 川中地区沙二¹亚段砂岩显微特征照片

Fig. 3 Microscopic characteristics of sandstone of J₂s²⁽¹⁾ in the central Sichuan Basin

a. QL18井,埋深2 101. 23 m,发育残余粒间孔、片状喉道,铸体薄片;b. QL18井,埋深2 105. 42 m,发育残余粒间孔、长石溶孔和缩颈型喉道,铸体薄片;c. QL205井,埋深2 380. 90 m,发育连晶式方解石胶结,铸体薄片;d. QL16井,埋深2 423. 65 m,杂基充填,孔隙发育差,铸体薄片;e. QL17井,埋深2 181. 40 m,发育少量自生微晶石英,铸体薄片;f. JQ3井,埋深2 146. 25 m,浊沸石胶结,铸体薄片;g. QL18井,埋深2 101. 23 m,包膜状绿泥石覆盖颗粒表面,扫描电镜;h. QL202井,埋深2 264. 71 m,搭桥状伊利石分布于颗粒之间,扫描电镜;i. J61-3井,埋深2 276. 71 m,蜂窝状伊/蒙混层充填粒间孔,扫描电镜

表 1 川中地区沙二¹亚段储层孔喉结构参数

Table 1 Reservoir pore-throat structure parameters of J₂s²⁽¹⁾ in the central Sichuan Basin

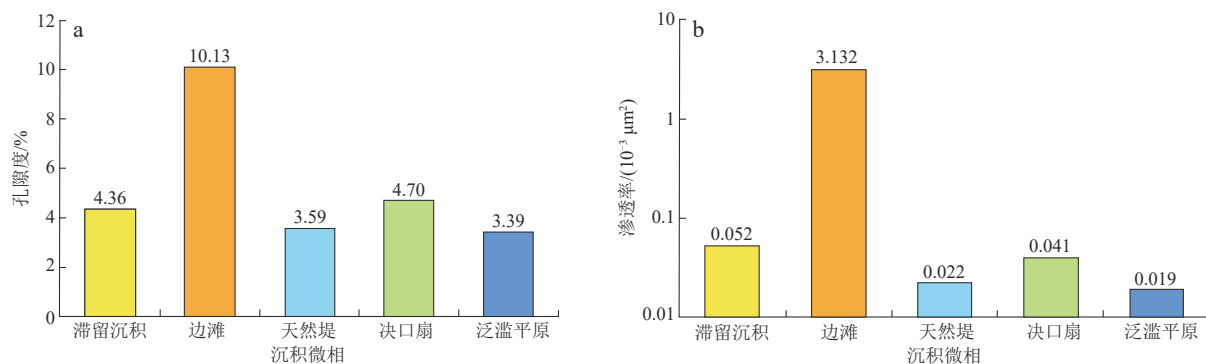
孔喉结构参数	高压压汞参数					核磁共振参数		
	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	中值孔喉 半径/μm	平均孔喉 半径/μm	最大进汞 饱和度/%	大孔隙 占比/%	小孔隙 占比/%	可动流体 饱和度/%
最大值	3. 09	61. 25	1. 85	1. 72	95. 3	45. 3	94. 9	67. 80
最小值	0. 08	0. 40	0. 01	0. 12	26. 1	6. 4	65. 3	4. 62
平均值	0. 79	2. 43	0. 43	0. 63	76. 4	30. 9	69. 1	39. 50

3 致密天然气主要控制因素

3.1 高能且稳定的水动力环境是优质储层形成的基础

沉积作用对储层质量的影响主要表现为不同的水动力条件对砂体的粒度、泥质含量、杂基含量和砂体规

模等方面的影响^[32-33]。研究区沙二¹亚段主要为河流相沉积体系,可划分为滞留沉积、边滩、天然堤、决口扇和泛滥平原等微相,对不同沉积微相孔隙度及渗透率进行统计分析可知,形成于高能稳定水动力条件下的边滩砂体物性最好,平均孔隙度为10. 13 %,平均渗透率为3. 132×10⁻³ μm²,孔渗性远高于其他微相,是优质储层发育的最有利相带(图4)。

图4 川中地区沙二¹亚段不同沉积微相孔隙度(a)和渗透率(b)分布Fig. 4 Bar diagrams showing distribution of porosity (a) and permeability (b) of different sedimentary microfacies of $J_2s^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

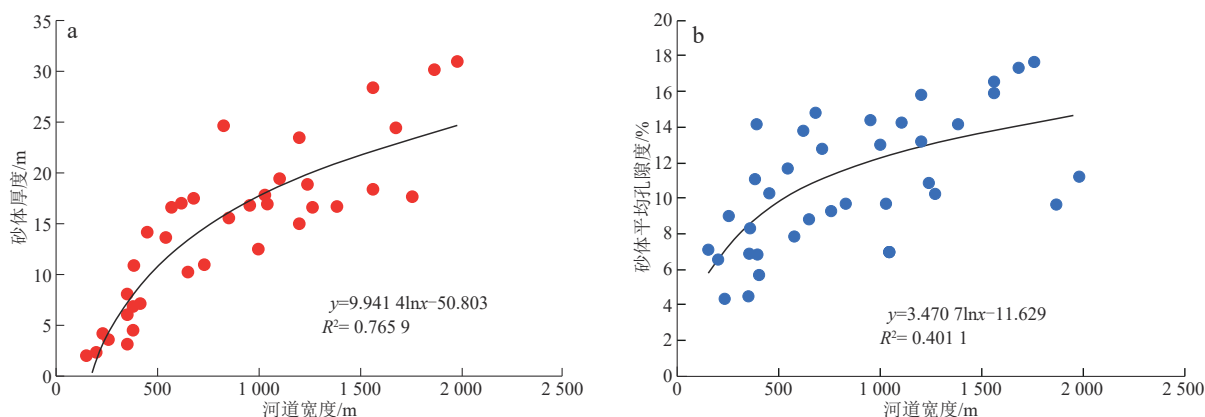
河道的宽度和弯曲度对储层的规模和质量具有重要的影响,根据河流地貌学研究成果,以弯曲度1.2、1.5和2.0为临界值,可将河道类型依次划分为顺直河、低弯度曲流河、中弯度曲流河和高弯度曲流河^[34-35],同时以宽度400 m为界,将6—9号砂组河道划分为主河道和次级河道。研究区主要发育小型顺直河、中—大型低弯度和中弯度曲流河。统计数据显示,河道的宽度与砂体厚度和物性呈正相关关系(图5),主河道砂体规模较大,厚度通常大于10 m,整体的水动力较强,砂体的粒度较粗,储层物性较好;次级河道相对较窄,水动力能量较低,砂体规模较小,厚度普遍小于10 m,储层物性相对较差。

不同弯度的河道迁移摆动的频率和水体能量存在差异,随着弯度增加,河道迁移摆动的频率不断增加,水动力能量变化频繁,导致颗粒的搬运方式和沉积物的粒度存在差异,从而影响砂体的连续性以及隔夹层发育情况^[36-37]。顺直河中水动力较为稳定,粒度概率曲线呈高斜率两段式特征(图6a),颗粒分选性较好,

以边滩砂体垂向叠加为主,主要发育块状层理,泥质夹层或滞留沉积较少,砂体垂向上连续性较好(图6b)。低弯度曲流河中河道存在一定程度的摆动,水体能量动荡,粒度概率曲线中跳跃组分斜率降低,悬浮组分含量升高(图6c),发育少量泥质夹层及滞底砾石,垂向连续性变差(图6d)。中弯度曲流河中河道迁移的频率较高,水动力变化频繁,粒度概率曲线中跳跃组分含量和斜率进一步降低,悬浮组分含量较高(图6e),砂体中出现大量的泥质夹层,可见明显的冲刷面,砂体垂向连续性较差(图6f)。

3.2 岩浆岩岩屑含量及成岩相不同导致储层质量分异

根据胶结物类型,研究区沙二¹亚段共划分出4种主要的成岩相,分别为绿泥石胶结相、伊利石+伊/蒙混层胶结相、方解石胶结相和浊沸石胶结相。结果显示,绿泥石含量与孔隙度呈正相关性,主要呈包膜状覆盖于颗粒表面(图3g),表明在成岩作用早期绿泥石先形

图5 川中地区沙二¹亚段河道宽度与砂体厚度和孔隙度相关性Fig. 5 Correlation of channel width with sand body thickness and porosity of $J_2s^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

a. 河道宽度与砂体厚度相关性;b. 河道宽度与砂体平均孔隙度相关性

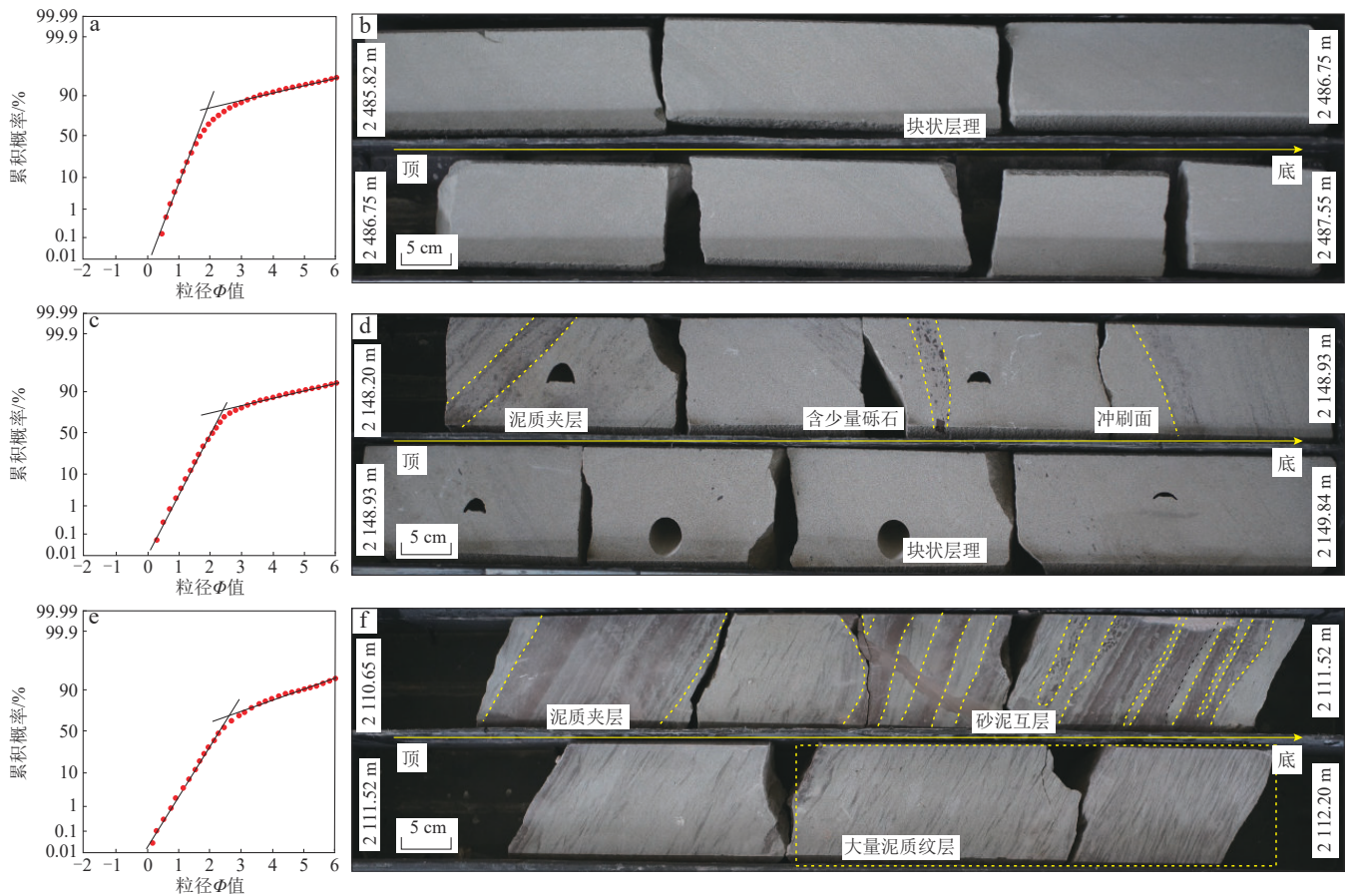


图6 川中地区沙2¹亚段不同弯度河道砂体典型样品粒度累积概率曲线(a,c,e)及岩心照片(b,d,f)

Fig. 6 Grain size probability accumulation curves and core photos of channel sand bodies with different curvatures of $J_2^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

a. JQ12井,埋深2 485.90 m,6号砂组,顺直河砂体;b. JQ12井,埋深2 485.82~2 487.75 m,6号砂组,顺直河砂体,发育块状层理;c. JQ8井,埋深2 148.70 m,8号砂组,低弯度曲流河砂体;d. JQ8井,埋深2 148.20~2 149.84 m,6号砂组,低弯度曲流河砂体,发育块状层理、冲刷面,含少量砾石和泥质夹层;e. ZQ3井,埋深2 111.56 m,9号砂组,中弯度曲流河砂体;f. ZQ3井,埋深2 110.65~2 112.20 m,9号砂组,中弯度曲流河砂体,砂-泥互层频繁,可见大量泥质纹层

成薄膜并包裹颗粒之后再经历压实作用,在一定程度上起到了抗压实作用,同时抑制了其他胶结物的生长,对原生粒间孔的保存具有积极作用^[38-40](图7a)。方解石和浊沸石胶结物含量与孔隙度呈明显负相关性(图7b,c),方解石主要呈晶粒状或连晶状生长于颗粒之间,含量较高时可形成基底胶结,少量为交代作用形成(图3c),浊沸石通常以晶粒状分布于颗粒之间(图3f),造成相对明显的孔隙损失,导致储层质量变差。伊利石和伊/蒙混层通常伴生存在,其含量与孔隙度无明显相关性(图7d),二者主要呈蜂窝状或丝缕状充填孔隙(图3h,i),发育较多的晶间孔,增加了流体流动通道的弯曲度,因此会导致储层渗透率降低,对孔隙度的影响不大。

通过分析发现,岩浆岩岩屑含量不同是储层成岩相存在差异的主要原因,从而导致储层物性和孔隙结

构存在明显差异,非均质性增强。前人研究表明,浊沸石主要形成于碱性环境下,其主要物质来源为钠长石在富钙流体中蚀变或斜长石的水化,包膜状绿泥石主要是在成岩作用早期蒙皂石在富 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子流体中转化而来,而岩浆岩岩屑中暗色矿物的水解会产生大量的 Ca^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,同时导致孔隙流体的碱性增强,为浊沸石和绿泥石的形成提供良好的物质基础和生成条件^[41-43]。薄片鉴定结果显示,浊沸石和绿泥石含量随着岩浆岩岩屑含量的升高而增加,在岩浆岩岩屑含量较高的砂组,孔隙流体中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子含量较高,形成较多的绿泥石和浊沸石,同时由于大量的蒙皂石转化为绿泥石,伊利石或伊/蒙混层缺乏物质来源,含量相对较低,而在岩浆岩岩屑含量较低砂组中,绿泥石含量较低,更多的蒙皂石在埋藏后期转化为伊利石,导致储层物性较差。

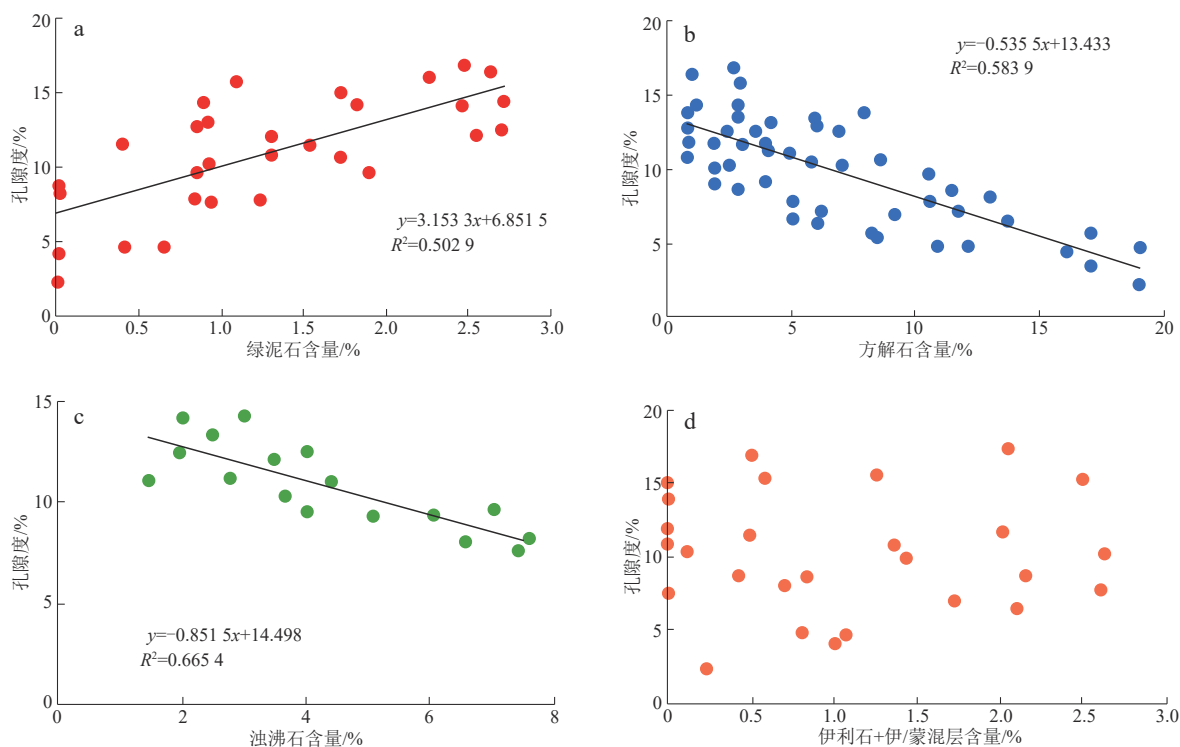


图7 川中地区沙二¹亚段不同成岩相胶结物含量与孔隙度相关性

Fig. 7 Correlation diagram between cement content and porosity of different diagenetic facies of $J_2s^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

a. 绿泥石; b. 方解石; c. 浊沸石; d. 伊利石+伊/蒙混层

3.3 源-储配置关系控制天然气充注程度

沙溪庙组气藏属于次生气藏,其自身不具备生烃能力,天然气主要来自下部三叠系须家河组烃源岩以及下侏罗统凉高山组、大安寨组烃源岩,其中须家河组烃源岩在川西地区厚度较大,向东至研究区厚度逐渐减薄(图8a);凉高山组和大安寨组烃源岩沉积中心位于川中地区,向西烃源岩厚度逐渐减薄(图8b,c)。沟通烃源岩和储层的烃源断层是研究区天然气充注的主要运移通道,根据断开的层位将沙溪庙组断层分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级3类,其中Ⅰ级断裂断至须家河组烃源岩,以逆断层为主;Ⅱ级断裂为断至下侏罗统烃源断层,主要为正断层;Ⅲ级断裂为沙溪庙组内部断层,主要为小型正断层(图8d)。Ⅰ级断裂是天然气向沙溪庙组河道砂体充注的首要运移通道,天然气可通过Ⅰ级断裂与砂体的有效配置实现接力式运移^[44-46]。

研究区内发育角①以及金①两套Ⅰ级断裂,其中角①断层断穿整个沙二¹亚段,金①断层仅断至6号砂组,二者共同沟通区内须家河组煤型气和下侏罗统油型气储层,在研究区中-东部形成混源气^[43]。通过分析研究区气藏断-砂配置关系得出,主河道砂体与一级断裂相接的部位富气程度较高,气井具有较高的产量,以JQ1—

JQ2—YT207—8—H1—J30—ZQ1井8号砂组气藏剖面为例,Ⅰ级断裂与主河道砂体相接,井区整体含气性较高,其中YT207—8—H1井获得高产,日产无阻流量为 $91.49 \times 10^4 \text{ m}^3$,压力系数为0.98,ZQ1井和JQ2井距离断层较远,气藏压力系数和产量随距离增加而降低,JQ1井由于存在岩性封堵,测试为干层(图9)。当Ⅰ级断裂没有与主河道砂体直接相接时,储层整体富气程度较低,如JQ6—XC3—YT201—7—H1—J62—1—ZQ1井7号砂组气藏剖面中,仅J62—1井和XC3井两口储层物性较好且构造部位相对较高的井测试获气,且产量较低,日产无阻流量分别为 $15.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $8.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图10)。

研究区西侧发育龙泉山断裂带,主要沟通川西须家河组煤型气,由于其断裂规模较大,能够提供充足的运移动力,因此天然气在进入川西地区沙溪庙组之后可以通过侧向运移进入研究区河道砂体内并聚集成藏^[47]。由于烃源断层所提供的地层压力随距离的增加不断衰减,因此天然气的充注程度随着运移距离的增加而降低。统计结果显示,气井距烃源断层的距离与气藏压力系数呈明显的负相关性,距离烃源断层较近的气井压力系数较高,天然气充注强度大,储层含气性好,而远离断层的储层天然气充注程度较低,压力系数较低,含气性较差。

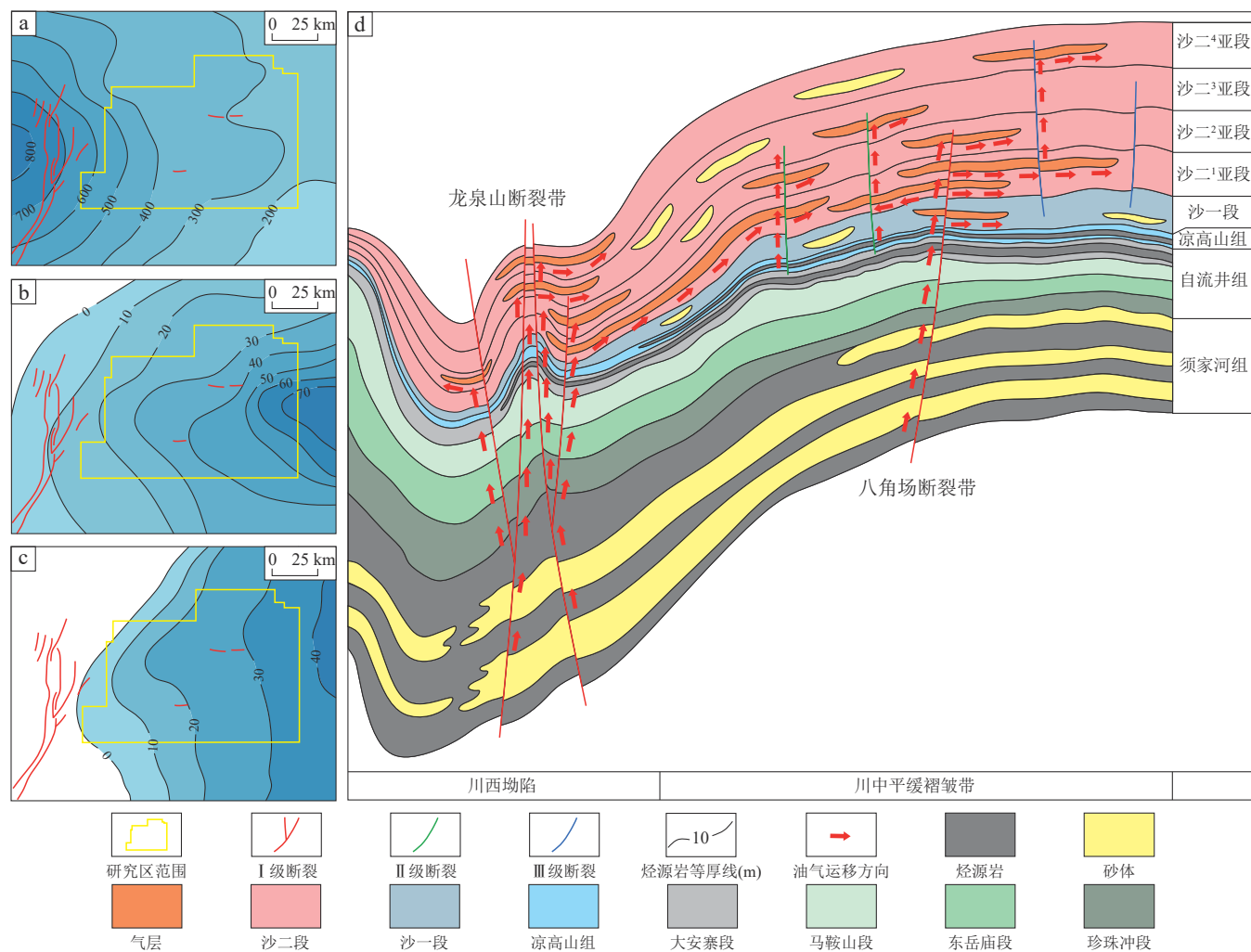


图8 川中地区沙溪庙组气藏烃源岩厚度平面图(a—c)及成藏模式(d)

Fig. 8 Isopach of some rocks contributing to and hydrocarbon accumulation pattern of the Shaximiao Formation gas reservoir in central Sichuan Basin

a. 须家河组烃源岩; b. 大安寨段烃源岩; c. 凉高山组烃源岩; d. 沙溪庙组成藏模式

3.4 储层质量和含气性共同控制气井产能

油气在运移过程中,受孔隙毛管压力的影响,通常会选择阻力较小的空间进行运移,因此孔渗相对较高的储层是气藏形成的基础,含气性是决定气藏产能的关键因素。研究区沙溪庙组气藏目前以水平井作为主要的开发井型,为消除各井水平段长度不同对产能的影响,利用产气强度(每米储层的无阻流量)作为水平井产能的评价指标。储层物性参数与产气强度之间的相关性分析表明,孔隙度、渗透率以及中值孔喉半径均与产气强度呈明显正相关性(图 11a—c),储层物性越好、孔喉半径越大,气藏产量越高。储层的富气程度可以采用储层与烃源断层的距离、含水饱和度和泊松比进行表征,烃源断层对研究区沙溪庙组天然气成藏具有明显的控制作用,储层与烃源断层之间的距离与产气强度呈明显

的负相关性(图 11d),距离断层越远,储层含气性越差;而泊松比和含水饱和度则共同反映储层的含气性,二者与产气强度均具有较好的负相关性(图 11e,f),作为表征物体横向变形的弹性参数,泊松比可以很好地反映储层的流体性质,由于气体具有较强的可压缩性,泊松比较低,而水由于不可压缩,泊松比为 0.5,因此当含气性较差、含水饱和度较高时,储层具有较高的泊松比,含气性越好的储层含水饱和度和泊松比越低。

4 致密气地质甜点评价

本文针对川中地区沙二¹亚段致密砂岩气从沉积作用、成岩作用以及源-储配置关系等方面开展研究,建立了适合研究区致密气的地质甜点评价标准(表2),完成了川中地区致密砂岩气甜点综合评价。

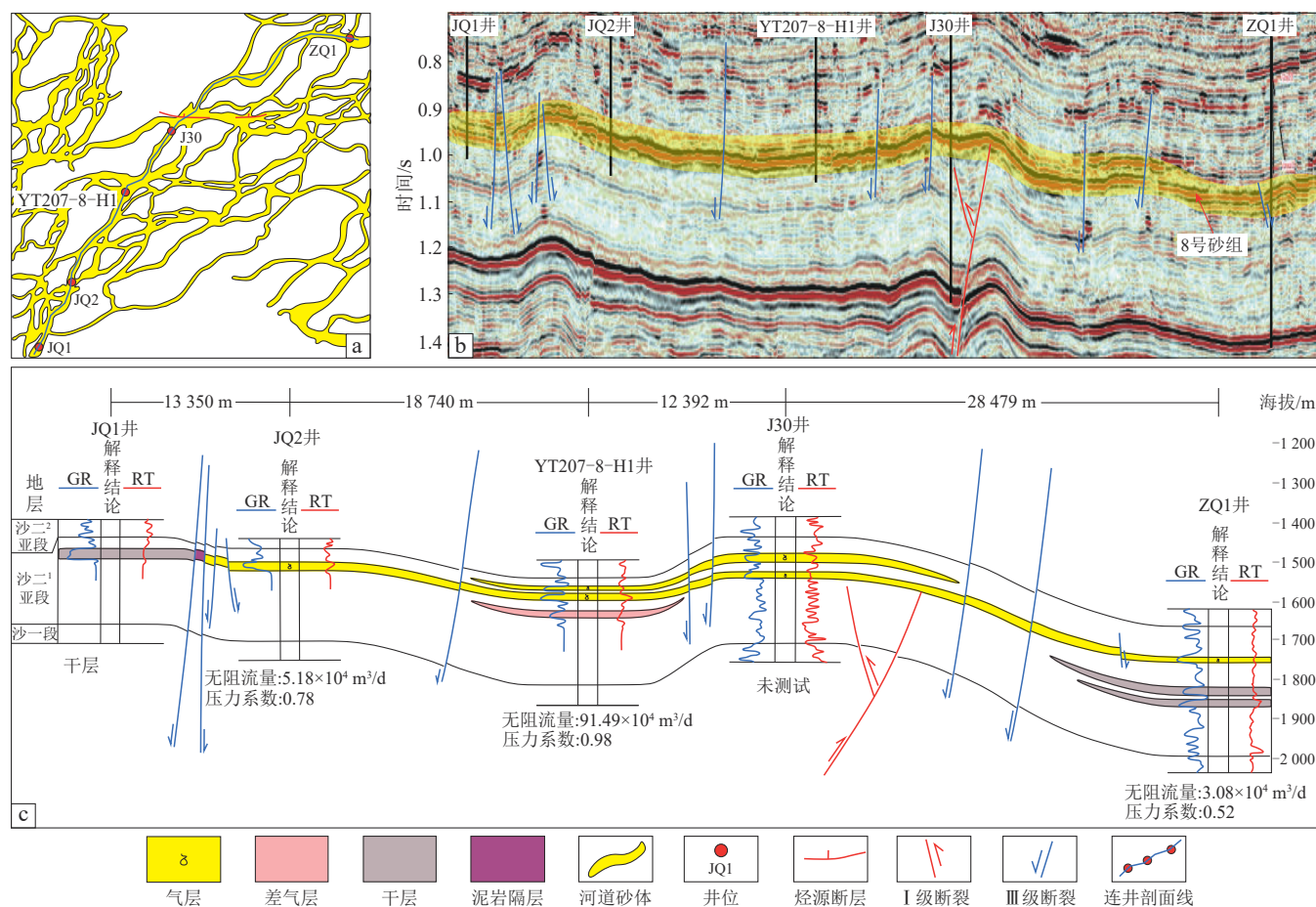


图9 川中地区沙溪庙组8号砂组过JQ1—JQ2—YT207-8-H1—J30—ZQ1井主河道平面分布(a)、地震剖面(b)以及气藏剖面(c)
Fig. 9 Map of main river channels (a), well-tied seismic section (b) and gas reservoir profile (c) crossing JQ1, JQ2, YT207-8-H1, J30, ZQ1 wells in No. 8 sand group in the Shaximiao Formation, Sichuan Basin

川中地区沙二¹亚段致密砂岩气地质甜点评价需要从储集条件和气层的含气性两个方面开展研究,储集条件主要考虑沉积微相、河道类型、储层物性和成岩相等4个方面,顺直河或低弯度曲流河的主河道水体能量更强且相对稳定,砂体厚度大、物性好,是天然气富集的基础;成岩作用对储层的改造是导致储层质量存在差异的主要原因,以绿泥石胶结相为主的砂体保留了更多的原生孔隙,储层物性较好,以伊利石+伊/蒙混层胶结相为主的砂体中大量的孔隙被充填,导致储层质量较差。气层的含气性主要考虑源-储配置关系,并通过含气饱和度和泊松比对其进行表征,距离烃源断层较近的储层天然气充注强度大,储层流体以天然气为主,表现为较高的含气饱和度和较低的泊松比,而远离烃源断层的储层天然气充注程度较低,含气性较差。

对于川中地区沙二¹亚段致密砂岩气,其地质甜点可分为3类。其中Ⅰ类甜点区主要为顺直河或低弯度曲流河主河道边滩砂体,河道宽度大于400 m,以绿泥石胶结相为主,储层物性好,孔隙度大于12%,渗透率

大于 $0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,同时距离烃源断层近,气藏充注程度高,泊松比小于0.24,整体表现为高压力系数和高单井产量;Ⅱ类甜点区主要为中弯度曲流河边滩砂体,成岩相以伊利石+伊/蒙混层胶结相为主,孔隙度介于10%~12%,渗透率介于 $0.15 \times 10^{-3} \sim 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层与烃源断层之间的距离相对较远,泊松比介于0.24~0.25,储层的含气性较好;Ⅲ类甜点区主要为高弯度曲流河中边滩砂体,成岩相以伊利石+伊/蒙混层胶结相为主,储层物性相对较差,孔隙度小于10%,渗透率小于 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,距离烃源断层最远,泊松比大于0.25,气藏的充注程度较低。

根据表2中列出的甜点评价标准,对研究区各砂组开展甜点区预测,建立了甜点预测平面图。以8号砂组为例,利用新钻井测试产量对甜点预测结果进行验证,结果表明位于Ⅰ类区的开发井普遍获得高产(图12),井均无阻流量达到 $126.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,井均EUR(单井评估的最终可采储量)为 $1.16 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$;位于Ⅱ类区的开发井产量相对较低,井均无阻流量约为

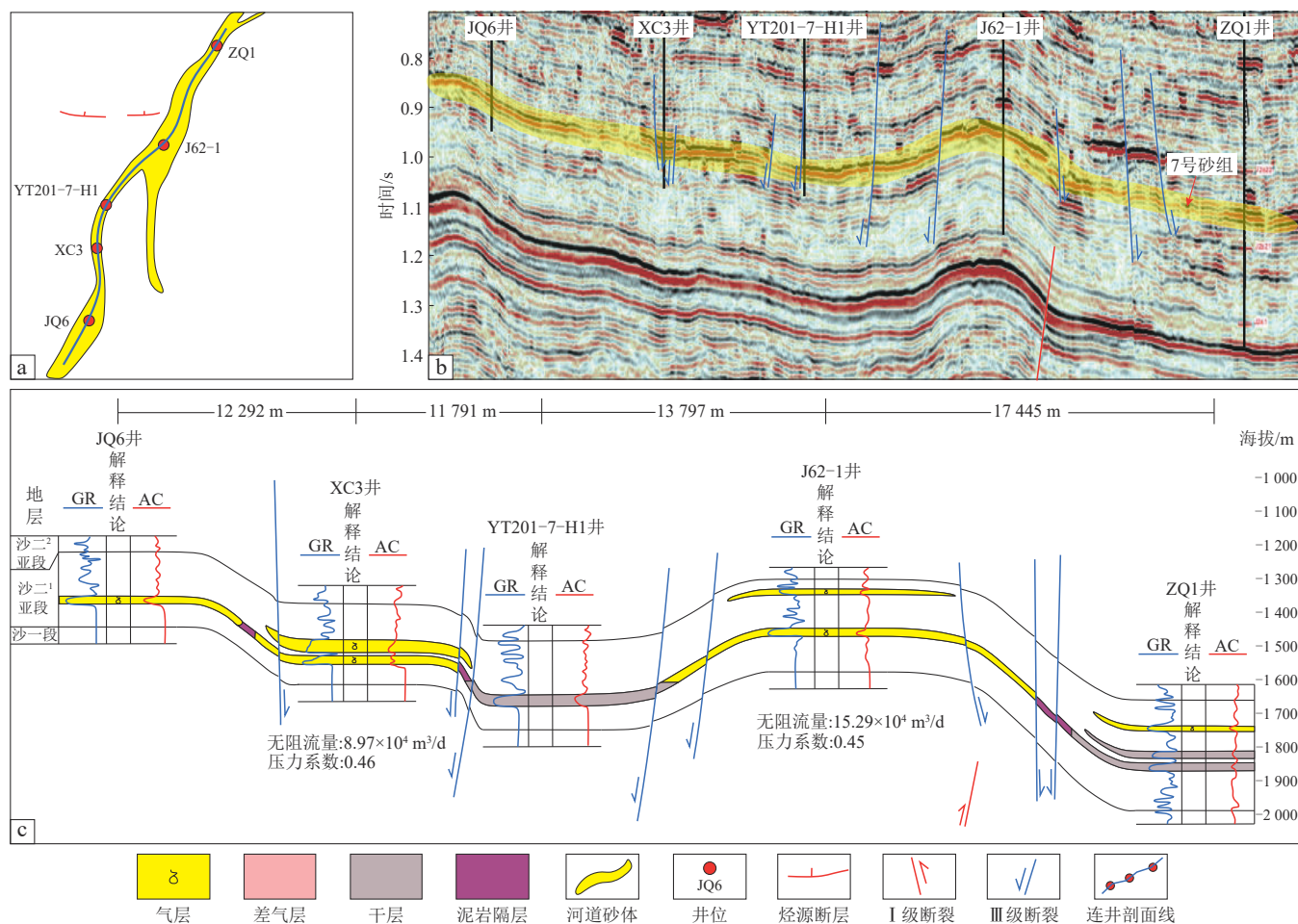


图 10 川中地区沙溪庙组 7 号砂组过 JQ6—XC3—YT201-7-H1—J62-1—ZQ1 井主河道平面分布(a)、地震剖面(b)以及气藏剖面(c)
Fig. 10 Map of main river channels (a), well-tied seismic section (b) and gas reservoir profile (c) crossing JQ6, XC3, YT201-7-H1, J62-1, ZQ1 wells in No. 7 sand group in the Shaximiao Formation, Sichuan Basin

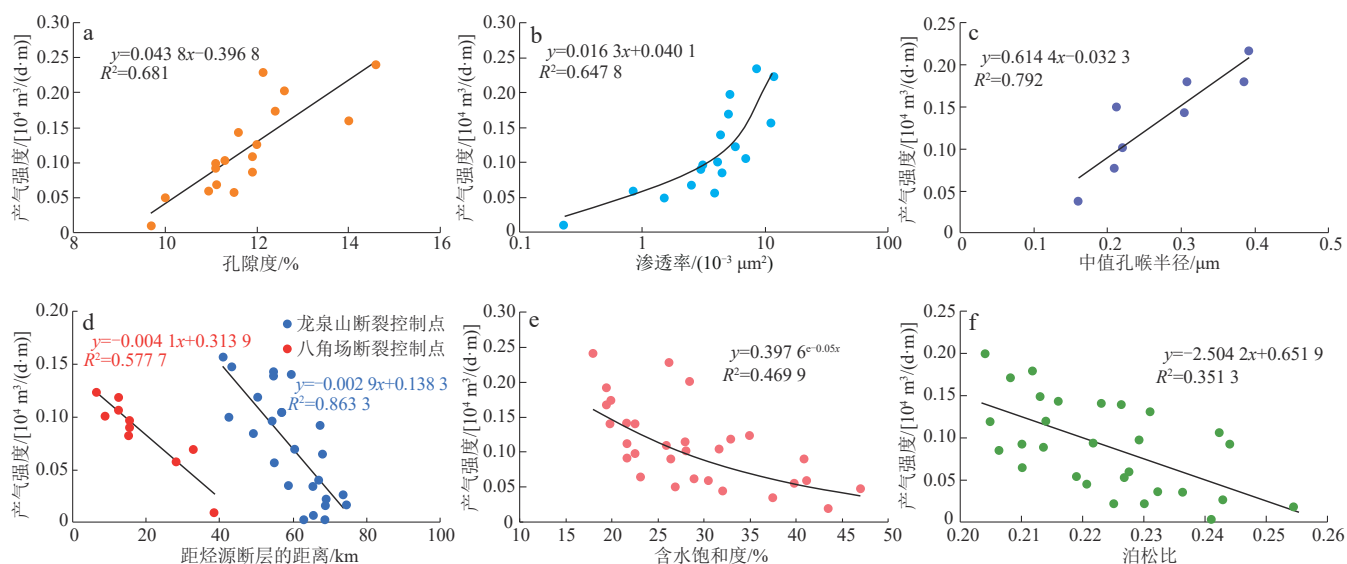


图 11 川中地区沙二¹亚段产能敏感性参数与产气强度相关性

Fig. 11 Correlation diagram between productivity sensitive parameters and gas production intensity of $J_{2s}^{2(1)}$ in the central Sichuan Basin

a. 孔隙度; b. 渗透率; c. 中值孔喉半径; d. 断-储距离; e. 含水饱和度; f. 泊松比

表2 川中地区沙二¹亚段地质甜点评价标准

评价参数		I类甜点区	II类甜点区	III类甜点区
沉积参数	河道宽度/m	>400	>400	<400
	河道弯曲度	<1.5	1.5~2.0	1.5~2.0
储层参数	成岩相	绿泥石胶结相	伊利石+伊/蒙混层胶结相	伊利石+伊/蒙混层胶结相
	孔隙度/%	>12	10~12	<10
	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	>0.30	0.15~0.30	<0.15
含气性参数	泊松比	<0.24	0.24~0.25	>0.25
	含气饱和度/%	>70	60~70	<60
	储层与断层的距离/km	龙泉山断裂	40~60	60~70
		八角场断裂	0~20	20~30
产能参数	产气强度/(10 ⁴ m ³ /(d·m))	>0.10	0.05~0.10	<0.05

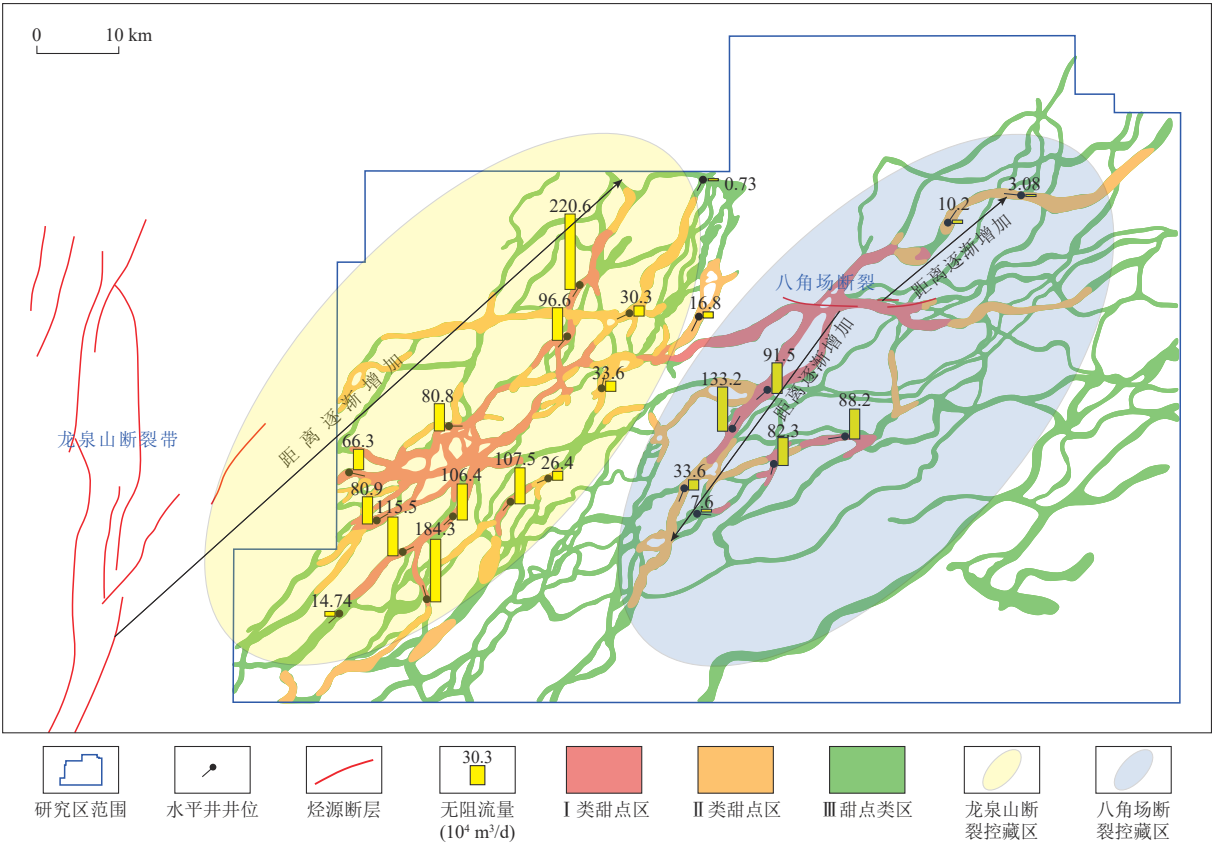


图12 川中地区沙二¹亚段8号砂组地质甜点分布平面

Fig. 12 Map showing distribution of the geological sweet spots of No. 8 sand group in J_{2s}²⁽¹⁾ in the central Sichuan Basin

38.47×10⁴ m³/d,井均EUR为0.67×10⁴ m³/(d·m);位于Ⅲ类区的井产能最差,井均无阻流量仅为17.55×10⁴ m³/d,井均EUR为0.41×10⁴ m³/(d·m),说明本次建立的地质甜点评价标准可靠性较高,对下一步勘探开发工作具有较好的指导作用。

5 结论

1) 研究区沙二¹亚段砂岩类型主要为岩屑长石砂

岩,储层平均孔隙度为11.5%,平均渗透率为4.650×10⁻³ μm²,以低孔-特低孔、低渗-超低渗的孔隙型储层为主,孔隙类型主要为残余粒间孔和长石溶孔,喉道主要为片状和弯片状喉道,平均喉道半径为0.43 μm,属于微-细喉型储层。

2) 地质甜点主要受沉积作用、成岩作用和源-储配置关系共同影响,顺直河和低弯度曲流河中主河道边滩储层厚度大、砂体物性好、夹层发育较少,是优质储层形成的最有利相带;岩浆岩岩屑含量不同导致成

岩相差异,是储层质量分异的主要原因,其中绿泥石胶结相储层孔隙结构最优,伊利石+伊/蒙混层胶结相次之,浊沸石和方解石胶结相最差;烃源断层控制气藏的充注程度,与烃源断层直接相接或距离烃源断层近的河道砂体天然气充注程度高,含气性好;气藏产能受储层质量和含气性共同影响,孔渗性好、孔喉半径大且含气性好的储层产量较高。

3) 建立地质甜点评价标准,很好地指导了研究区沙溪庙组致密砂岩气开发有利区的优选与预测,对致密砂岩气的高效开发和下一步开发目标的制定具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,翟光明,张光亚,等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.
- [2] 邹才能,杨智,何东博,等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 575-587.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 575-587.
- [3] 孙龙德,邹才能,贾爱林,等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015-1026.
SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015-1026.
- [4] 李国欣,朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.
- [5] 唐大海,王旭丽,曾琪,等. 四川盆地西南部沙溪庙组致密砂岩低渗储层特征及形成机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 143-154.
TANG Dahai, WANG Xuli, ZENG Qi, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of low permeability tight sandstone of Shaximiao Formation in southwest Sichuan Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 143-154.
- [6] 杨雨,谢继容,曹正林,等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917-932.
YANG Yu, XIE Jirong, CAO Zhenglin, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917-932.
- [7] 郭贵安,关旭,肖富森,等. 四川盆地中部侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 40-50.
GUO Guian, GUAN Xu, XIAO Fusen, et al. Integrated seismic description technology for tight sandstone gas reservoir of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 40-50.
- [8] 何江,杨羿,陈文,等. 窄河道型致密砂岩储层特征及主控因素——以天府气田金华区块沙溪庙组为例[J]. 断块油气田, 2024, 31(01): 1-10.
HE Jiang, YANG Yi, CHEN Wen, et al. Characteristics and main controlling factors for narrow channel tight sandstone reservoir: a case study of Shaximiao Formation in Jinhu Block of Tianfu Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(01): 1-10.
- [9] 陶士振,李建忠,柳少波,等. 远源/次生气藏形成与分布的研究进展和展望[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 699-714.
TAO Shizhen, LI Jianzhong, LIU Shaobo, et al. Formation condition, distribution law and exploration potential of far-source secondary oil and gas reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 699-714.
- [10] 邹娟,乐园,金涛,等. 川中地区侏罗系致密砂岩储集层成因及“甜点”预测[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5): 555-560.
ZOU Juan, YUE Yuan, JIN Tao, et al. Genesis and sweet spot prediction of Jurassic tight sandstone reservoir in central Sichuan Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(5): 555-560.
- [11] 付菊,操延辉,叶素娟,等. 次生致密砂岩气藏甜点综合评价——以四川盆地中江气田侏罗系气藏为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(增刊1): 23-29.
FU Ju, CAO Yanhui, YE Sujuan, et al. Comprehensive evaluation of sweet spots in secondary tight sandstone gas reservoirs-A case study of Jurassic gas reservoirs in Zhongjiang Gas Field, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 23-29.
- [12] 周亚东,蒋裕强,杨广广,等. 致密河道砂体精细刻画及富气区预测技术——以川中北部地区中侏罗统沙溪庙组为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(9): 1532-1540.
ZHOU Yadong, JIANG Yuqiang, YANG Guangguang, et al. Fine characterization of tight channels and prediction of gas-rich areas: Case study of Middle Jurassic Shaximiao Formation in central and northern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(9): 1532-1540.
- [13] 王小娟,洪海涛,吴长江,等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1037-1051.
WANG Xiaojuan, HONG Haitao, WU Changjiang, et al. Characteristics and formation mechanisms of tight sandstone reservoirs in Jurassic Shaximiao Formation, central of Sichuan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1037-1051.
- [14] 谢格云,田云英,刘柏,等. 川西南部地区中侏罗统沙溪庙组优质储层形成条件与控制因素[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 45-54.
XIE Geyun, TIAN Yunying, LIU Bai, et al. Formation conditions and controlling factors of high-quality reservoirs in the Middle Jurassic Shaximiao Formation of the southwestern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 45-54.
- [15] 杨希濮,孙卫. 鄂尔多斯盆地延安地区致密砂岩气藏“甜点”储层主控因素分析[J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 138-143.
YANG Xipu, SUN Wei. Major controlling factor of tight sandstone

- gas sweat reservoir in Yan'an area of Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 138-143.
- [16] 魏志鹏, 郝鹏灵, 刘子雄. 基于源储配置关系的地质工程双甜点研究[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(1): 42-47.
WEI Zhipeng, HAO Pengling, LIU Zixiong. Study on geological-engineering sweet spots based on the source-reservoir configuration [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(1): 42-47.
- [17] 牛栓文. 胜利油田低渗致密油藏地质工程一体化探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 14-25.
NIU Shuanwen. Research and application of geology and engineering integration for low-permeability tight oil reservoirs in Shengli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 14-25.
- [18] 段永明, 曾焱, 刘成川, 等. 窄河道致密砂岩气藏高效开发技术——以川西地区中江气田中侏罗统沙溪庙组气藏为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 58-65.
DUAN Yongming, ZENG Yan, LIU Chengchuan, et al. Technologies for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs in narrow channels: A case study of Middle Jurassic Shaximiao Formation gas reservoir in the Zhongjiang Gas Field of western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 58-65.
- [19] 曾治平, 刘震, 马骥, 等. 深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法[J]. 地质力学学报, 2019, 25(2): 223-232.
ZENG Zhiping, LIU Zhen, MA Ji, et al. A new method for fracability evaluation in deep and tight sandstone reservoirs [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(2): 223-232.
- [20] 宋明水, 刘振, 张学才, 等. 基于改进层次熵分析法的致密砂岩储层可压性评价——以准噶尔盆地Z109井侏罗系储层为例[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 509-517.
SONG Mingshui, LIU Zhen, ZHANG Xuecai, et al. Fractability evaluation of tight sandstone reservoirs based on improved entropy analytic hierarchy process: Taking the Jurassic reservoirs of Well Z109 in the Junggar Basin as an example [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 509-517.
- [21] 尹帅, 孙晓光, 郭忠虎, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘上古生界构造演化及裂缝耦合控气作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3724-3737.
YIN Shuai, SUN Xiaoguang, WU Zhonghu, et al. Coupling control of tectonic evolution and fractures on the Upper Paleozoic gas reservoirs in the northeastern margin of the Ordos Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3724-3737.
- [22] 朱海燕, 龚丁, 张兵. 致密砂岩气储层多尺度“地质—工程”双甜点评价新方法[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 76-86.
ZHU Haiyan, GONG Ding, ZHANG Bing. A multi-scale geology-engineering sweet spot evaluation method for tight sandstone gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 76-86.
- [23] 刘言. 中江气田致密砂岩气藏“一体化”甜点评价技术[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 12-25.
LIU Yan. Integrated sweets spots evaluation technology for tight sandstone gas reservoirs in Zhongjiang Gas Field [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(3): 12-25.
- [24] 陈沁, 谢增业, 张璐, 等. 川东北五宝场地区须家河组和沙溪庙组天然气地球化学特征及其勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(10): 1648-1660.
CHEN Qin, XIE Zengye, ZHANG Lu, et al. Geochemical characteristics and exploration significance of natural gas in Xujiahe Formation and Shaximiao Formation in Wubaochang area, Northeast Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10): 1648-1660.
- [25] ZHANG Xiaojun, DENG Hucheng, LI Tang, et al. The conditions and modelling of hydrocarbon accumulation in tight sandstone reservoirs: A case study from the Jurassic Shaximiao formation of western Sichuan Basin, China [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 225: 211702.
- [26] QIAO Yanguo, LIU Zhigang, LUO Wei, et al. Characterization of seismic information entropy attributes of braided river delta sedimentary microfacies for the upper Shaximiao Formation in the Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin, China [J]. Earth Science Informatics, 2022, 15(3): 1371-1383.
- [27] 吕松婷, 时保宏. 四川盆地川中YTB地区沙溪庙组二段沉积微相研究[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(增刊1): 122-129, 12.
LYU Songting, SHI Baohong. Sedimentary microfacies of the second member of Shaximiao Formation in YTB [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(S1): 122-129, 12.
- [28] 陈少云, 杨勇强, 邱隆伟, 等. 川中地区侏罗系沙溪庙组储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(10): 1597-1610.
CHEN Shaoyun, YANG Yongqiang, QIU Longwei, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10): 1597-1610.
- [29] 方锐, 蒋裕强, 陈沁, 等. 川东北五宝场地区侏罗系沙溪庙组沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 47-58.
FANG Rui, JIANG Yuqiang, CHEN Qin, et al. Sedimentary characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 47-58.
- [30] 付蕾, 张本健, 曹正林, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 85-93.
FU Lei, ZHANG Benjian, CAO Zhenglin, et al. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(1): 85-93.
- [31] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 12-24.
YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 12-24.
- [32] 韦腾强, 张本健, 王小娟, 等. 四川盆地秋林地区侏罗系沙溪庙组二段河流相沉积特征及储集差异性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12438-12446.
WEI Tengqiang, ZHANG Benjian, WANG Xiaojuan, et al. Sedimentary characteristics of fluvial facies and analysis of reservoir differences in the second member of Jurassic Shaximiao Formation in Qiulin area, Sichuan Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12438-12446.
- [33] 胡辉东, 李贤庆, 陈纯芳, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区J58井区盒一段甜点储层特征及主控因素[J]. 矿业科学学报,

- 2022, 7(1): 71–88.
- HU Huidong, LI Xianqing, CHEN Chunfang, et al. Characteristics and main controlling factors of the sweet spot reservoir in the first member of Lower Shihezi Formation of well J58 block in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 71–88.
- [34] 王利良, 牛成民, 杨海风, 等. 渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组下段河道类型演化及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2022, 43(3): 364–375.
- WANG Liliang, NIU Chengmin, YANG Haifeng, et al. Evolution of channel patterns and its geological significance for oil and gas exploration in the Lower Member of Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(3): 364–375.
- [35] 蒲秀刚, 赵贤正, 李勇, 等. 黄骅坳陷新近系古河道恢复及油气地质意义[J]. 石油学报, 2018, 39(2): 163–171.
- PU Xiugang, ZHAO Xianzheng, LI Yong, et al. Paleochannel restoration and petroleum geological significance of Neogene in Huanghua Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(2): 163–171.
- [36] 张昌民, 朱锐, 赵康, 等. 从端点走向连续: 河流沉积模式研究进展述评[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 926–944.
- ZHANG Changmin, ZHU Rui, ZHAO Kang, et al. From end member to continuum: Review of fluvial facies model research [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 926–944.
- [37] 张昌民, 张尚锋, 李少华, 等. 中国河流沉积学研究20年[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 183–192.
- ZHANG Changmin, ZHANG Shangfeng, LI Shaohua, et al. Advances in Chinese fluvial sedimentology from 1983 to 2003 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 183–192.
- [38] 孙小龙, 林承焰, 董春梅, 等. 储层岩性控制下的绿泥石对硅质胶结的影响[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1599–1607.
- SUN Xiaolong, LIN Chengyan, DONG Chunmei, et al. Influence of chlorite on siliceous cement under control of reservoir lithology [J]. Earth Science, 2017, 42(9): 1599–1607.
- [39] 王宏博, 马存飞, 曹铮, 等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应——以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 976–992.
- WANG Hongbo, MA Cunfei, CAO Zheng, et al. Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 976–992.
- [40] 曹江骏, 王继平, 张道锋, 等. 深层致密砂岩储层成岩演化对含气性的影响——以鄂尔多斯盆地西南部庆阳气田二叠系山1段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 169–184.
- CAO Jiangjun, WANG Jiping, ZHANG Daofeng, et al. Effects of diagenetic evolution on gas-bearing properties of deep tight sandstone reservoirs: A case study of reservoirs in the 1st member of the Permian Shanxi Formation in the Qingyang Gas Field, southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 169–184.
- [41] 王龙, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 沉积岩中自生浊沸石的形成、分布及油气意义——以鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组为例[J]. 地质论评, 2022, 68(6): 2188–2206.
- WANG Long, DENG Xiuqin, CHU Meijuan, et al. Formation and distribution of laumontite in sedimentary sequences and their exploration significance——A case study on the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2188–2206.
- [42] 袁珍, 郑艳忠, 袁海莉, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘延长组浊沸石胶结物特征及其成岩模式[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 124–134.
- YUAN Zhen, ZHENG Yanzhong, YUAN Haili, et al. Study on the characteristics and diagenesis model of laumontite cement in Yanchang Formation in the southeastern margin of Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 124–134.
- [43] 孙光远, 王哲麟, 刘培刚, 等. 碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段3亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 658–669.
- SUN Guangyuan, WANG Zhelin, LIU Peigang, et al. Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-63 sub-member, Huaqing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 658–669.
- [44] 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 51–61.
- ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinqu Gas Field of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 51–61.
- [45] 杨春龙, 苏楠, 芮宇润, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组致密气成藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 98–109.
- YANG Chunlong, SU Nan, RUI Yurun, et al. Gas accumulation conditions and exploration potential of tight gas reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 98–109.
- [46] 张小菊, 伏美燕, 邓虎成, 等. 川西东斜坡地区沙溪庙组致密砂岩储层断-砂配置关系对天然气富集的控制作用[J]. 矿物岩石, 2020, 40(3): 107–119.
- ZHANG Xiaojie, FU Meiyuan, DENG Hucheng, et al. The controlling effect of fault-sandbody configurations on natural gas enrichment in Shaximiao Formation tight sandstone reservoir in the eastern slope of western Sichuan [J]. Mineralogy and Petrology, 2020, 40(3): 107–119.
- [47] 冯林杰, 蒋裕强, 曹裕翔, 等. 川中北部须家河组烃源岩测井解释及评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 31–42.
- FENG Linjie, JIANG Yuqiang, CAO Jixiang, et al. Log interpretation and evaluation of hydrocarbon source rocks of Xujiahe Formation in the north of central Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(4): 31–42.

(编辑 董奕含)