

渤海湾盆地深层砂砾岩储层孔-缝成因机制及演化特征 ——以渤中19-6构造古近系孔店组为例

张新涛¹, 曲希玉², 许 鹏³, 王清斌³, 刘晓健³, 叶 涛³

[1. 中海石油(中国)有限公司勘探开发部, 北京 100010; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;
3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459]

摘要: 优质储层的识别和预测是深层-超深层碎屑岩储层油气勘探研究的重点。以渤海湾盆地渤中19-6构造古近系孔店组砂砾岩为研究对象, 借助物理模拟实验等手段, 研究了孔店组优质储集空间的成因及演化, 建立了渤海湾盆地深层砂砾岩储层的孔-缝演化模式。取得的主要认识如下: ①长石等颗粒的溶蚀孔为优质储集空间, 钾长石的溶蚀随温度升高渐强甚至超过斜长石, 钾长石在深层有更大的增孔潜力。②砾石级的颗粒、长英质的成分及低杂基含量更有利于压裂缝的产生, 长石中压裂缝的发育程度要高于石英; 垂向上, 第一期压裂缝在2 500 m左右的深度开始形成, 第二期压裂缝在3 000 m以深形成, 而且其数量在4 000 m左右的深度达到峰值, 第三期压裂缝在4 500 m以深开始形成, 而且其数量随深度增大而逐渐增加。③孔隙度的垂向变化受到早期压实、晚期胶结以及中期溶蚀作用的控制。早期压实减孔17.38%; 晚期铁白云石胶结减孔7.76%; 有机酸溶蚀增孔5.45%。④油气充注与第二期溶蚀增孔及第一期和第二期压裂缝的发育相对应, 油气在3 000 m左右的深度处富集; 4 000 m以深压裂缝大量发育, 叠加钾长石等溶蚀, 预测深层砂砾岩中发育优质储层。

关键词: 长石溶蚀; 压裂缝; 孔-缝演化; 砂砾岩; 深层; 渤中19-6构造; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Genesis and evolution of pore-fractures in deep sandy conglomerate reservoirs in Bohai Bay Basin: Taking the Paleogene Kongdian Formation in Bozhong 19-6 structure as an example

ZHANG Xintao¹, QU Xiyu², XU Peng³, WANG Qingbin³, LIU Xiaojian³, YE Tao³

[1. Exploration Department, CNOOC, Beijing 100010, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. Tianjin Branch, CNOOC, Tianjin 300459, China]

Abstract: Mapping of quality reservoirs is critical to the successful exploration and discovery of deep- to ultra-deep clastic oil and gas reservoirs. This paper studies the genesis and evolution of storage space in high-quality and deep sandy conglomerate reservoirs in the Paleogene Kongdian Formation, Bozhong 19-6 structure, and establishes pore-fracture evolution models through physical simulation experiments and other means. The results show that: (1) pores formed by dissolution of feldspar particles are usually high-quality reservoir space. The dissolution of potassium feldspar intensifies or even exceeds that of plagioclase with rising temperature, indicating that potassium feldspar has greater potential for increasing porosity of deep layers. (2) Gravel-sized particles, felsic composition and low matrix content are more conducive to the generation of induced fractures, which are more highly developed in feldspar than in quartz. Vertically, induce fractures of the first stage appear at a burial depth of about 2 500 m, that of the second stage appear at a depth larger than 3 000 m with their number peaking at about 4000 m deep, and that of the third stage appear at a depth greater than 4 500 m with their amount increasing with the increasing depth. (3) Vertically, porosity is damaged by early compaction and late cementation but improved by dissolution occurring in between: the early compaction reduced the porosity by 17.38 % and the late ankerite cementation reduced the porosity by 7.76 %, while organic acid dissolution between the two

收稿日期: 2022-12-05; 修订日期: 2023-02-17。

第一作者简介: 张新涛(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 海上油气勘探。E-mail: zhangxt4@cnooc.com.cn。

通讯作者简介: 曲希玉(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 流体-岩石相互作用、储层及沉积学。E-mail: quxiyu@upc.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272145); 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD027)。

processes increased the porosity by 5.45 % . (4) Hydrocarbon charging is well timed relative to the second-stage dissolution with porosity enhancement, and the first- and second-stage induced fracture development, thus, hydrocarbons enrich in reservoirs at about 3 000 m deep. In addition, high-quality reservoirs may occur in the deep sandy conglomerate at 4 000 m deep, where the mass development of induced fractures, together with the dissolution such as potassium feldspar, greatly enhance reservoir quality.

Key words: feldspar dissolution, induced fracture, evolution of pore-fracture, sandy conglomerate, deep strata, Bozhong 19-6 structure, Bohai Bay Basin

引用格式:张新涛,曲希玉,许鹏,等.渤海湾盆地深层砂砾岩储层孔-缝成因机制及演化特征——以渤中19-6构造古近系孔店组为例[J].石油与天然气地质,2023,44(3):707-719. DOI:10.11743/ogg20230314.

ZHANG Xintao, QU Xiyu, XU Peng, et al. Genesis and evolution of pore-fractures in deep sandy conglomerate reservoirs in Bohai Bay Basin: Taking the Paleogene Kongdian Formation in Bozhong 19-6 structure as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 707-719. DOI: 10.11743/ogg20230314.

全球已发现了200多个埋深超过4 500 m的含油气盆地和1 500多个深层-超深层油气藏^[1]。中国也相继在东部(埋深>3 500 m)和西部(埋深>4 500 m)含油气盆地的深层实现了油气勘探的突破,比如渤海湾盆地在渤中19-6构造的深层孔店组发现了大量油气^[2-5];准噶尔盆地在埋深4 800~7 400 m获得高产工业油气流^[6-7];塔里木盆地在库车坳陷博孜9井近8 000 m超深层获高产工业气流^[8]。可见,深层-超深层已成为油气勘探开发的重点和热点领域之一,具有广阔的前景和潜力。

对于孔隙度和渗透率普遍较低的深层-超深层碎屑岩储层来说,优质储层的研究和预测直接制约着油气的勘探和发现。已有成果显示,深层-超深层碎屑岩优质储层是有利的沉积作用、埋藏史-热演化史、流体压力史、成岩史-孔隙演化史-油气充注史等相互耦合的结果^[9-10]。岩石成分、溶蚀作用、裂缝系统和异常高压共同控制着深层碎屑岩优质储层的分布^[6]。渤中19-6构造深层大量油气的发现掀起了渤海海域孔店组砂砾岩研究的热潮,而前人的研究主要集中在沉积特征、成藏特征及储层定性描述方面^[11],缺少对优质储层成因及量化表征方面的研究,制约了渤海湾盆地深层砂砾岩的勘探进程。本文在渤中19-6构造3口取心井的成分统计、物性测试及铸体图像分析的基础上,借助储层成岩物理模拟实验等手段,对优质储集空间的成因及演化进行了深入研究,建立了渤海湾盆地深层砂砾岩储层的孔-缝演化模式,该研究成果对渤海湾盆地深层砂砾岩的优质储层预测具有指导意义。

1 地质概况

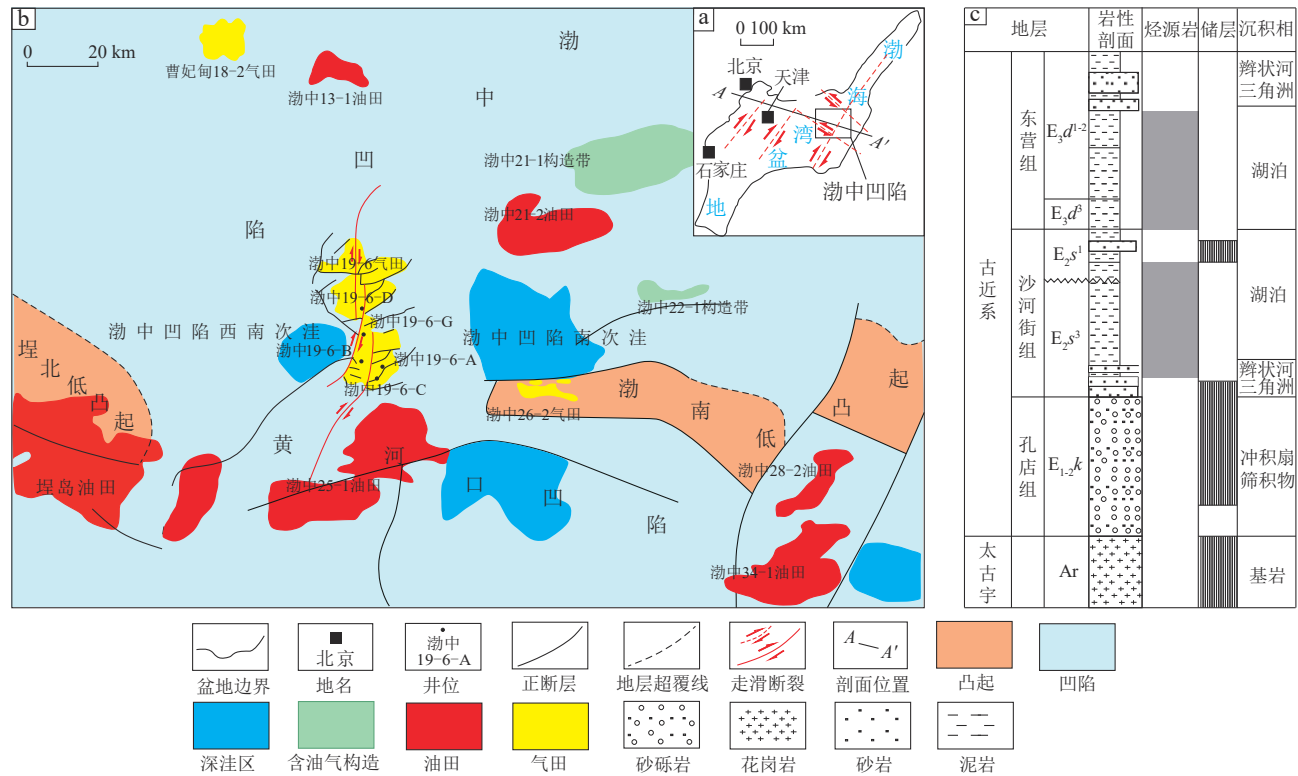
渤海湾盆地位于华北古地台基底上,从古近纪到

第四纪大致经历了5个主要的构造演化阶段^[12-13]——自古近纪孔店组沉积时期开始经历了两次大规模裂陷、两次裂后热沉降及新近纪明化镇组沉积时期以来的新构造运动,形成了以渤中凹陷为沉积中心,各盆地相互交接融合的统一盆地^[14-15]。渤中19-6构造位于渤海湾盆地渤中凹陷西南部深层构造脊上,东南邻渤南低凸起,东为渤中凹陷次洼,西邻埕北低凸起,南接黄河口凹陷,北为渤中凹陷主洼^[2,16-19],以背斜隆起带的形式发育,构造位置极为有利^[3,20](图1)。

古近系发育孔店组($E_{1-2}k$)、沙河街组(E_2s)和东营组(E_3d),孔店组以砂砾岩为主,下部发育砂砾岩夹泥岩冲积扇沉积,中部发育砂岩夹泥岩的湖相沉积,顶部为砂砾岩河流相沉积;沙河街组以湖相泥岩为主,夹薄层粉砂岩、细砂岩,局部可见粗碎屑砂砾岩;东营组自下而上从巨厚泥岩夹砂岩过渡到砂岩夹泥岩,其中东二段沉积环境发生转变,从半深湖转为三角洲沉积。渤中19-6构造是渤海湾盆地近年来的重点勘探目标之一,探明储量超千亿立方米,具有巨大的天然气勘探潜力。其油气主要富集于太古宇潜山变质岩和孔店组厚层砂砾岩储层中^[5],孔店组砂砾岩储层埋深普遍超过3 500 m,在埋藏过程中经历了强烈的构造活动和成岩作用改造,砾石主要源于下伏的太古宇潜山富长英质的变质岩,形成了复杂储集体。

2 储层岩石学特征

综合渤中19-6构造孔店组3口取心井的镜下鉴定及X射线衍射分析结果,统计砂砾岩储层的骨架颗粒组成表明,储层骨架颗粒主要由石英、长石和岩屑组成,具有高岩屑、低石英及中等长石含量的特征,其中石英含量为8.00%~40.00%,平均为16.83%;长石含量为15.00%~

图1 渤海湾盆地渤中19-6构造位置及地层综合柱状图^[3]Fig. 1 Location of Bozhong 19-6 structure and composite stratigraphic column, Bohai Bay Basin^[3]

a. 区域构造位置; b. 井位分布; c. 地层综合柱状图

55.00%, 平均为 34.19%; 岩屑含量为 12.00% ~ 78.00%, 平均为 49.03%; 见少量云母, 平均含量约 0.40%。储层岩石类型主体为长石岩屑砂岩, 岩屑长石砂岩次之, 含少量长石砂岩及岩屑砂岩(图2)。长石类型包括钾长石和斜长石, 含量相当; 岩屑类型主要为火成岩岩屑和变质岩岩屑, 分别占骨架颗粒的 31.58% 和 13.42%。其中火成岩岩屑主要以花岗岩岩屑为主, 含有少量的酸性喷出岩岩屑及安山岩岩屑; 变质岩岩屑主要以石英岩岩屑为主, 含有少量的燧石岩屑及片岩岩屑。

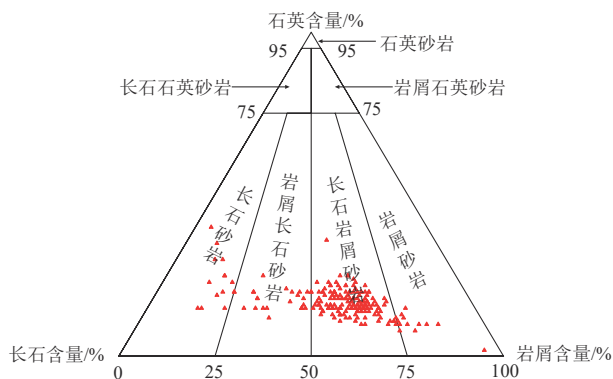


图2 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组砂岩分类三角图

Fig. 2 Sandstone classification ternary diagram of Kongdian Formation in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

3 储层物性特征及储集空间类型

3.1 储层物性特征

孔店组砂砾岩储层 336 个岩心样品的物性数据分析显示(图3), 储层孔隙度分布于 2.08% ~ 18.80%, 平均 9.15%, 主要分布于 5.00% ~ 15.00%, 其中 5.00% ~ 10.00% 的样品为 161 个, 占 47.92%, 10.00% ~ 15.00% 的样品为 141 个, 占 41.96%; 渗透率介于 $(0.012 \sim 21.060) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $2.350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主要分布于 $(1.000 \sim 10.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 样品数为 236 个, 占 70.24%。按照 SY/T6285—2011《油气储层评价方法》碎屑岩储层划分标准, 孔店组储层为低孔-特低渗型储层。

3.2 储集空间类型

在储层整体物性较差的背景下, 寻找优质储层将是制约油气富集的重要工作, 而形成优质储层的主要影响因素是储集空间类型的优劣。渤中19-6构造砂砾岩储层的储集空间具有孔隙和裂缝的双重介质的特点(图4; 表1), 包括原生孔、粒内溶孔、粒间溶孔及微

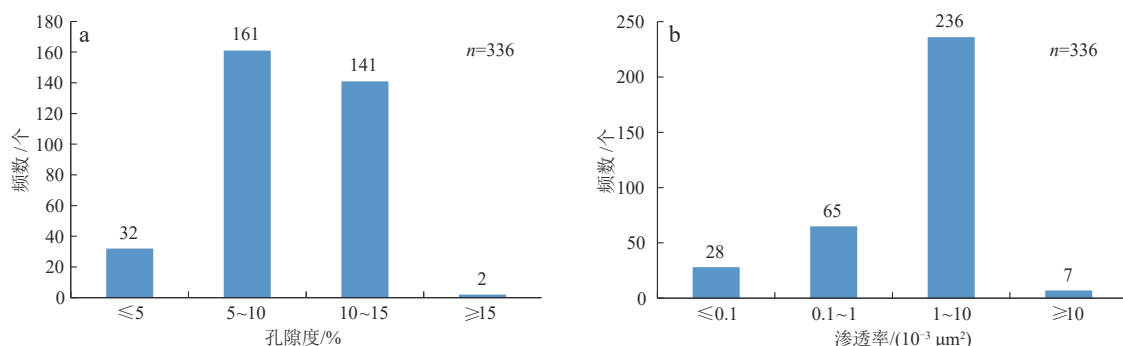


图3 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组储层孔、渗分布频数直方图

Fig. 3 Histograms of porosity and permeability distribution of reservoirs in Kongdian Formation in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

a. 孔隙度; b. 渗透率

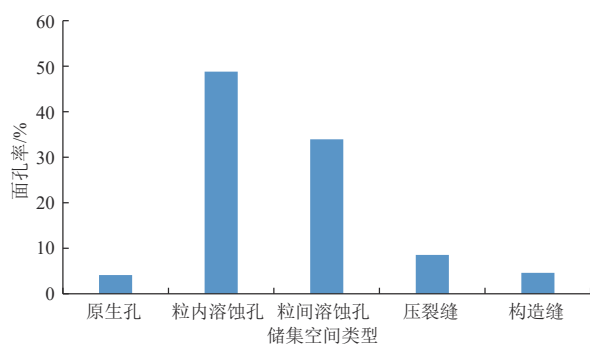


图4 渤海湾盆地渤中19-6构造储集空间类型分布柱状图

Fig. 4 Bar chart of spatial type distribution of reservoirs in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

裂缝。整体上原生孔隙较少(4.10 %)(图5a),粒内溶孔(48.83 %)(图5b)多为长石及火成岩岩屑溶蚀形成,粒间溶孔(33.94 %)(图5c)以风化破裂后的粒间碎屑溶蚀为主,其次为钙质等胶结物的溶蚀。微裂缝分为构造微裂缝和成岩压实破裂缝,构造微裂缝(4.61 %)主要为贯穿多个颗粒的平直较宽裂缝(图5d),以及沿颗粒边缘分布的贴粒缝;成岩压实破裂缝(8.53 %)(以下简称压裂缝)可以细分为两部分,一部分是砾石挤压破裂形成与砾石边缘高角度相交的成岩压实破裂缝(图5e),此裂缝开启程度较差,数量

较多,多被泥质充填;另一部分是沿长石等脆性矿物解理破裂形成的(图5f),此类裂缝开启程度普遍较好,多被溶蚀扩大。成岩压实破裂缝的大量发育极大地改善了砂砾岩储层的油气渗流及储集性能。

4 优质储集空间类型及其成因机制

渤中19-6构造孔店组砂砾岩储层中长石及岩屑的溶蚀作用提供了大量的次生溶孔,是砂砾岩储层中占比最大也是最优质的储集空间类型;微裂缝虽然含量相对较低,同样是砂砾岩储层中非常重要的储集空间类型,本研究对粒内溶孔及压实破裂缝的成因机制进行了探讨。

4.1 不同类型岩屑的溶蚀机制

不同类型的岩屑溶蚀能力不同。曹英权^[21]等借助高温高压反应釜对岩屑的有机酸溶蚀特征进行实验研究,明确了流纹岩和安山岩岩屑是最易溶蚀的岩屑类型,其次为花岗岩和片麻岩岩屑。该结论在渤中凹陷CFD6-4油田得到了验证。其后曲希玉^[22]等在该认识的基础上,利用玄武岩等岩屑类型进行实验,得到了

表1 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组储集空间类型及特征

Table 1 Statistical table of reservoir space types and characteristics of Kongdian Formation in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

孔隙类型	相对含量/%	成因及主要特征
孔隙型	原生孔	4.10 花岗质原岩经过长期的风化淋滤,物理风化后破碎为花岗质碎块原地堆积,形成颗粒支撑格架而出现粒间原生孔
	粒内溶孔	48.83 碱性长石及部分火成岩岩屑,在大气淡水淋滤及酸性流体的作用下通过溶解作用被溶蚀形成溶孔
	粒间溶孔	33.94 风化破裂后无明显颗粒骨架及钙质等胶结物被溶蚀形成粒间溶孔
裂缝型	构造缝	4.61 构造运动过程中,应力集中而产生的裂缝,具有开启宽度大、延伸远、方向性强的特点,裂缝间相互切割或平行
	成岩压实破裂缝	8.53 砾石压裂形成与砾石边缘高角度相交的成岩压实缝,具有开启程度差、数量多、多被泥质充填的特点;沿长石等脆性矿物解理发育,后期多被溶蚀扩大,含油性好

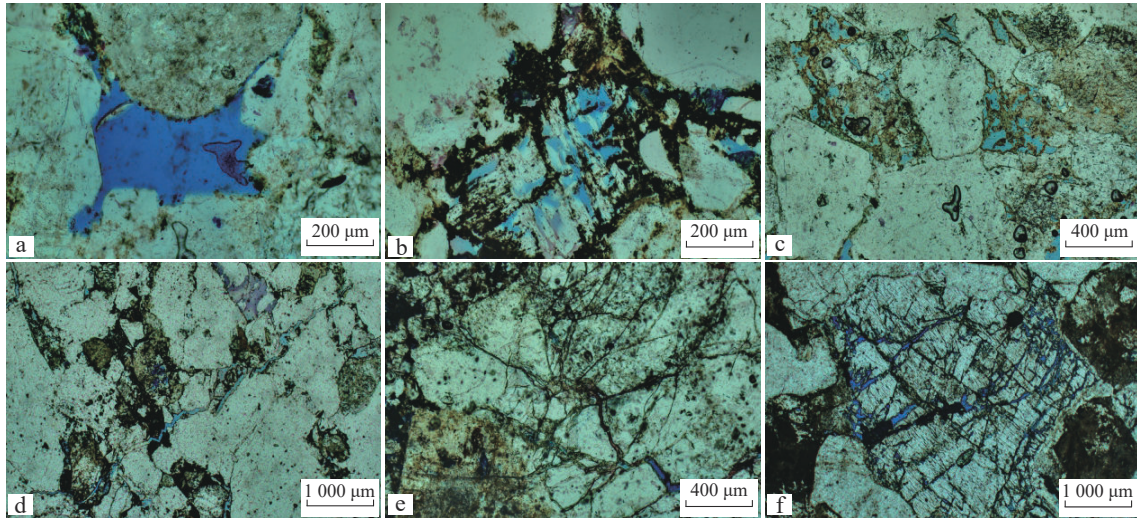


图5 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组砂砾岩储层孔隙类型镜下照片

Fig. 5 Microscopic photos showing pore types in sandy conglomerate reservoirs of Kongdian Formation Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

- a. 渤中19-6-A井,埋深3 735.0 m,粒间原生孔,单偏光;b. 渤中19-6-A井,埋深3 617.2 m,长石沿双晶发生粒内溶蚀,单偏光;c. 渤中19-6-A井,埋深3 735.0 m,粒间溶蚀孔,单偏光;d. 渤中19-6-A井,埋深3 585.0 m,构造缝,贯穿多个颗粒,单偏光;e. 渤中19-6-C井,埋深3 730.0 m,砾内压实破裂缝,单偏光;f. 渤中19-6-B井,埋深4 047.2 m,沿长石颗粒破裂缝的溶蚀扩大,单偏光

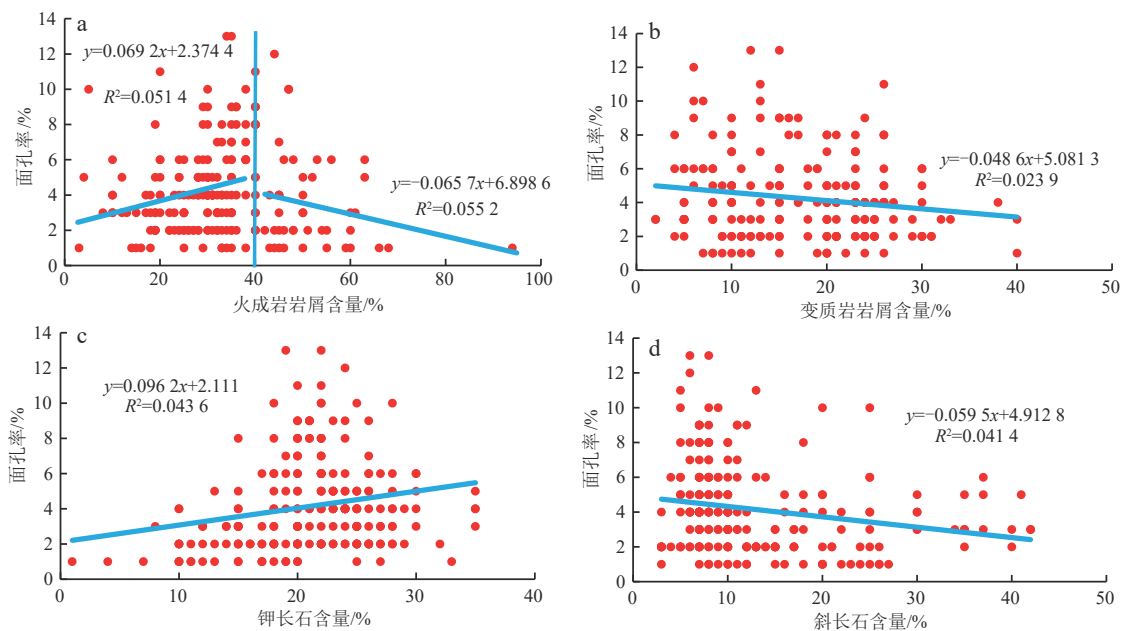


图6 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组储层骨架碎屑颗粒含量与面孔率相关性散点图

Fig. 6 Scatter plots showing the correlation between framework debris particle content and thin-section porosity of Kongdian Formation reservoirs in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

- a. 火成岩岩屑含量与面孔率的关系表现为先增加(正相关)后减少(负相关)的趋势,并以含量40%为界;b. 变质岩岩屑含量与面孔率呈负相关关系;c. 钾长石含量与面孔率呈正相关关系;d. 斜长石含量与面孔率呈负相关关系

火山岩岩屑更易溶、物源区(表生阶段)及早成岩期玄武岩岩屑溶蚀更强、沉积区及中晚成岩期流纹岩岩屑溶蚀更强的认识,该结论在松辽盆地长岭断陷得到了验证。

上述研究成果在本研究区同样适用,渤中19-6构

造孔店组砂砾岩储层的岩屑类型主要为火成岩岩屑(31.58%)和变质岩岩屑(13.42%)。火成岩岩屑以花岗岩岩屑为主,含有少量的酸性喷出岩岩屑及安山岩岩屑。火成岩岩屑含量与面孔率的关系表现为先增加(正相关)后减少(负相关)的趋势(图6a),并以含量

40%为界。说明当岩屑含量较低时(低于40%),安山岩及酸性喷出岩的溶蚀作用较强,提供的次生孔隙占比较高,岩屑含量与面孔率正相关;当岩屑含量较高时,安山岩及酸性喷出岩的溶蚀作用同样较强,但其提供的次生孔隙占比较低,而其余岩屑的溶蚀作用又较弱,最终导致岩屑含量与面孔率呈负相关。变质岩岩屑含量与面孔率呈负相关的关系(图6b)。

4.2 不同类型长石的溶蚀机制

4.2.1 长石溶蚀特征

渤中19-6构造孔店组砂砾岩储层中的长石溶蚀作用是次生溶孔的主要贡献者,表现为沿长石颗粒解理、双晶缝及破裂缝的溶蚀,形成粒内溶孔、溶蚀扩大孔或者铸模孔,研究区可见大量钾长石的溶蚀作用,如沿微斜长石格子状双晶的溶蚀(图5b)及沿破裂缝的溶蚀扩大(图5f)。统计研究区长石含量与总面孔率的关系发现,钾长石含量与总面孔率呈正相关,而斜长石含量与总面孔率呈负相关关系(图6c,d),说明在渤海湾深层砂砾岩储层中钾长石的溶蚀作用以及对次生孔隙的贡献强于斜长石,这与传统的由物理模拟实验得出的“长石溶蚀程度由高到低依次为钙长石、钠长石和钾长石”^[23-32]的认识相矛盾。由于前人的实验通常选用单一矿物或者单一有机酸进行,为了最大限度地模拟地层真实情况,以新鲜的钾长石、斜长石、方解石、白云石、安山岩和流纹岩岩屑为对象,以Ⅱ₁型干酪根所排有机酸为介质,在不同成岩阶段的古温度补偿后的实验温度(70, 100, 130, 160, 190和250℃)下,进行长石溶蚀的水-岩模拟实验^[33],以表征混合矿物条件下长石的溶蚀特征及机理。

4.2.2 长石溶蚀机理

在表征钾长石和斜长石(钠长石为主)溶蚀程度的时候,综合考虑两种长石在样品中的含量及离子浓度等因素,提出了一种表征长石溶蚀程度的方法,公式如下:

$$R = \frac{c}{V} \times \frac{M_1}{M_2} \times \frac{1}{\eta m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为长石溶蚀程度,%; c 为离子浓度,mg/L; V 为溶液体积,mL,按500 mL计算; M_1 钾钠钾钠离子源岩相对分子质量,无量纲; M_2 为离子相对原子质量,无量纲; η 为钾钠离子源岩在各样品中占比之和,%; m 为单个样本质量,g,按2.50 g计算。

用钠离子和钾离子溶出速率分别代表钠长石和钾长石的溶蚀速率。据公式(1)计算出6组温、压条件下

钾长石和钠长石的溶蚀比例、溶蚀速率以及相对溶蚀比例。当温度低于160℃时,两类长石的溶蚀速率均低于0.5 mg/L;之后均明显上升,在250℃时达到2.0 mg/L以上(图7)。说明温度对长石矿物溶蚀具有明显的促进作用,两类长石的溶蚀速率均随温度升高而增大。

实验条件下,钾长石的溶蚀比例小于钠长石,仅在250℃条件下二者相等;钠长石/钾长石的相对溶蚀比例均小于3.6(图7),远低于前人单矿物实验条件下钠长石/钾长石的溶蚀比例在6.9左右的结论^[23]。本实验中钠长石/钾长石的相对溶蚀比例随温度的升高主体呈下降趋势,至250℃时降至1.0,说明在温度低于250℃时,钾长石的溶蚀程度小于钠长石;温度为250℃时,钾长石与钠长石的溶蚀程度接近,并有超过斜长石的趋势。钾长石和钠长石的晶体结构相似,但钾的原子核更重,形成化学键的键能更高,破坏其化学键所需的能量更大^[34],因此,实验温度越高,钾长石越快达到反应活化能,释放出的钾离子浓度也表现为随温度和反应时间的增加而升高。随温度的升高,钾长石的溶蚀作用逐渐增强,甚至超过斜长石,说明深埋条件下钾长石可能有更大的溶蚀速率与增孔潜力。

4.3 成岩压实破裂缝的成因机制

微裂缝是渤中19-6构造孔店组砂砾岩储集层重要的储集空间类型,其中压裂缝(占64.92%)是主要的裂缝类型。对于非均质性极强的深层砂砾岩储层来说,压裂缝的大量发育不但改善砂砾岩储层的油气渗流能力,而且还扩大有效的油气储集空间,能够起到沟通孔隙和储集油气的双重作用。为了表征压裂缝的成因及演化过程,结合研究区实际情况,利用“成岩物理模拟实验设备”,按照不同埋藏压实阶段补偿恢复而来

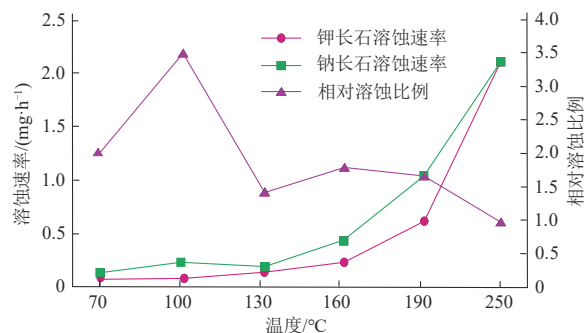


图7 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组长石溶蚀速率及相对溶蚀比例

Fig. 7 Dissolution rate and relative dissolution ratio of feldspar of Kongdian Formation in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

的温压条件^[35],进行成岩压实物理模拟实验,并对“人造岩心”进行铸体薄片图像分析。

4.3.1 压裂缝发育程度的影响因素

综合实验结果和研究区实际情况发现,压裂缝的发育程度与颗粒粒度、碎屑组分和填隙物含量有关。砾石级颗粒的压裂缝主要沿垂直颗粒接触部位的切线方向延伸,比砂级颗粒的裂缝开度更大、数量更多(图8a),是由于砾石的支撑点少、接触部位的压强高^[36],超过颗粒的破裂强度而沿平行压应力的方向破裂^[37]。被压裂的碎屑组分主要为长石、石英和刚性岩屑,石英及刚性岩屑的压裂缝沿边界破裂或者贯穿整个颗粒,多平行应力呈线性分布(图8b,c);长石颗粒的压裂缝多沿解理缝呈网状破裂,易被溶蚀扩大(图8d)。长石中的压裂缝平均开度为 $10.51\text{ }\mu\text{m}$,平均数量为45条;石英中的压裂缝平均开度为 $7.50\text{ }\mu\text{m}$,平均数量为21条,长石比石英的压裂缝更发育。此外,压裂缝的发育程度还与填隙物含量有关,与填隙物(杂基)含量呈反比,即颗粒支撑者比杂基支撑者压裂缝更为发育(图8e,f)。

4.3.2 压裂缝的垂向发育特征

裂缝发育程度的基本评价参数包括宽度、长度、间距、密度、产状、充填情况、溶蚀改造情况等^[38],裂缝的

宽度与长度用来评价裂缝的三维分布^[39],与裂缝的强度呈正相关关系,即宽度大、长度长说明裂缝强度也较大^[40]。本实验的结果表明,随深度的增大,1号(岩屑为花岗岩的人造岩心)和2号(岩屑为片麻岩的人造岩心)样品的面孔率均呈减小的趋势,2号略高于1号(图9a);在同一模拟深度下,2个样品的裂缝发育数量及平均宽度变化趋势基本一致且差异不大(图9b,c)。砂砾岩储层压裂缝的垂向发育特征如下。

1) 2 000 ~ 3 000 m 的浅埋阶段(垂向压实初期),随埋深的增加,样品的裂缝发育数量均稳定增加,1号样品的裂缝数量由28条增加到40条,2号样品的裂缝数量由26条增加到40条。随埋深增大,样品的裂缝宽度呈先增大后减小的趋势,埋深2 000 ~ 2 500 m,裂缝宽度不断增大,1号样品的压裂缝平均宽度由 $7.25\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $12.63\text{ }\mu\text{m}$,2号样品由 $4.03\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $9.53\text{ }\mu\text{m}$;埋深2 500 ~ 3 000 m,裂缝宽度急速衰减,1号样品裂缝宽度由 $13.36\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $3.69\text{ }\mu\text{m}$,2号样品由 $9.53\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $5.2\text{ }\mu\text{m}$ 。上述结果说明,该深度段内继承性裂缝扩大、部分完全开启;非继承性裂缝开始产生、多未开启,压裂缝以继承裂缝发育为主,2 500 m是第一期压裂缝开始形成的深度。

2) 3 000 ~ 4 500 m 的浅埋藏-快速深埋藏转换阶段(垂向压实中期),随埋深的增加,压裂缝的宽度逐渐增加,1号样品的裂缝平均宽度由 $3.69\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增加到

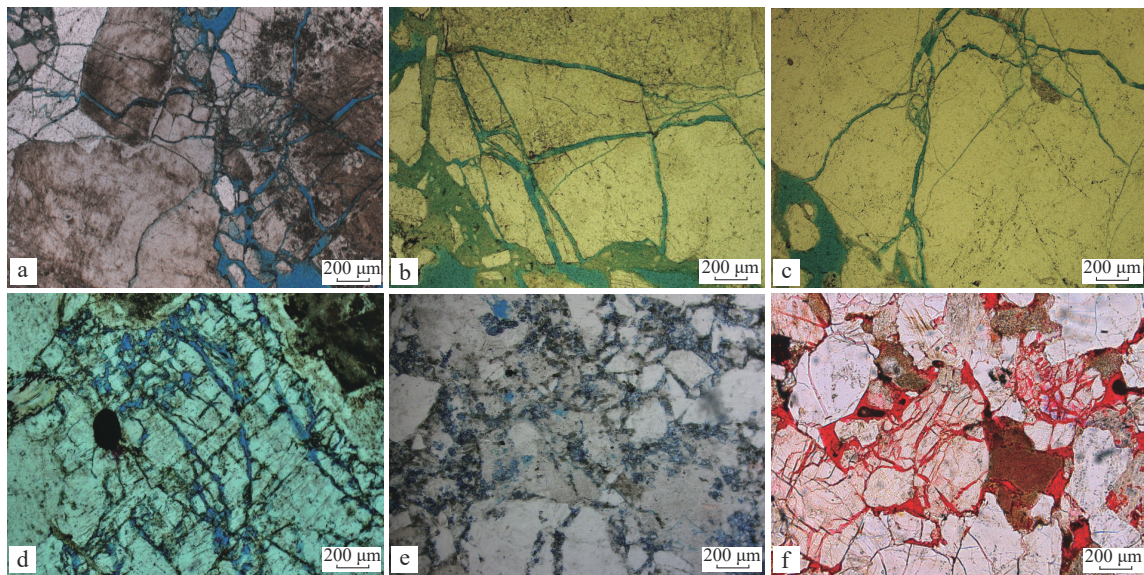


图8 渤海湾盆地渤中19-6构造压实物理模拟及工区裂缝类型与微观特征照片

Fig. 8 Microscopic photos showing fracture types and features during compaction simulation for Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin
a. 片麻岩,模拟埋深5 000.0 m,压裂缝沿垂直大颗粒接触部位的切线方向发育,单偏光;b. 花岗岩,模拟埋深3 500.0 m,岩屑中石英组分压裂缝平行应力方向发育,单偏光;c. 模拟花岗岩,埋深5 000.0 m,压裂缝沿共轭剪切方向发育,单偏光;d. 渤中19-6-B井,埋深4 047.2 m,长石破裂缝溶蚀扩大,单偏光;e. 渤中19-6-A井,埋深3 890.0 m,铁白云石-白云石等填隙物粒间充填,裂缝不发育,单偏光;f. 渤中19-6-5井,埋深4 299.0 m,填隙物含量少,压裂缝大量发育,红色铸体,单偏光

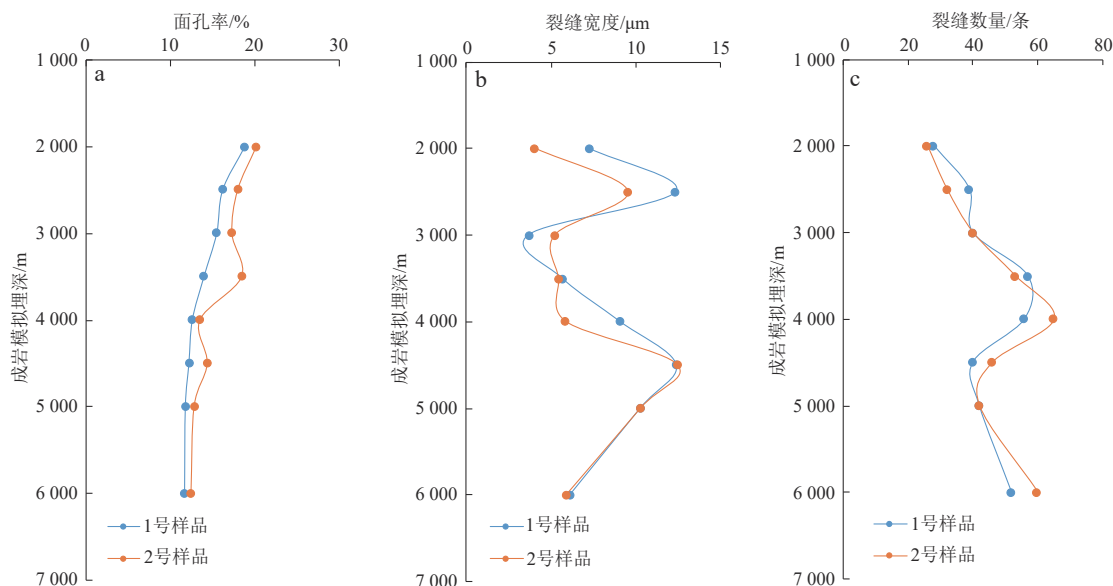


图9 渤海湾盆地渤中19-6构造压实模拟实验面孔率、裂缝宽度及裂缝数量随深度的变化

Fig. 9 Variation of thin-section porosity, fracture width and number with depth during compaction simulation for Bozhong19-6 structure,

Bohai Bay Basin

a. 面孔率; b. 裂缝宽度; c. 裂缝数量

12.38 μm, 2号样品由5.20 μm逐步增加到12.44 μm。而压裂缝数量随埋深的增加,呈现先增后减的趋势:埋深3000~4000 m,1号样品的裂缝条数由40条增至56条,2号样品由40条增至65条;埋深4000~4500 m,1号样品的裂缝条数递减至40条,2号样品递减至46条。4000 m处压裂缝的数量开始减少而宽度仍持续增加,说明该深度段第二期压裂缝开始大量形成,第一期压裂缝与继承性裂缝持续开启。第一期压裂缝与继承性裂缝彻底开启,导致压裂缝数量的减少;第二期压裂缝的大量形成及持续开启,导致压裂缝宽度持续增加。该时期是研究区压裂缝的主要发育阶段。

3) 埋深4500~6000 m的深埋藏早期阶段(垂向压实晚期),压裂缝宽度持续减小,裂缝数量逐渐增加。样品的裂缝宽度相当,平均值由12.40 μm下降至6.05 μm;1号样品的裂缝平均数量由40条增加至52条,2号样品由46条增加至60条。该深度段非继承性第三期压裂缝开始发育,第二期压裂缝的彻底开启及第三期压裂缝的大量发育,导致了压裂缝宽度的减少和数量的增加。

5 孔店组砂砾岩储层孔-缝演化特征

5.1 孔隙演化特征

本研究以现今岩石薄片的孔隙结构特征为基础,

以“储层成岩演化序列-储层孔隙结构”为约束,恢复地质历史时期各成岩阶段的孔隙面貌特征,建立以成岩相为基础的孔隙演化模式。具体的孔隙恢复过程为:①根据碎屑岩初始孔隙度恢复的经验公式 $\Phi_0 = 20.91 + 22.90/S_0^{[41]}$,计算砂砾岩储层的初始孔隙度,其中, Φ_0 为初始孔隙度(%), S_0 为分选系数(无量纲);②依据成岩作用的类型及相互关系,针对典型的胶结作用类型和强度划分成岩相类型,并建立不同成岩相类型的成岩共生序列;③根据成岩共生序列的先后关系,借助图像分析软件求取各成岩作用造成的面孔率变化;④建立研究区孔隙度与面孔率的函数拟合关系,计算各成岩作用造成的孔隙度变化值;⑤进行机械压实校正,计算压实减孔量;⑥按顺序恢复主要成岩阶段的储层孔隙结构面貌。渤中19-6构造孔店组砂砾岩储层可划分为高岭石-铁白云石胶结成岩相、白云石-铁白云石胶结成岩相和酸性溶蚀成岩相3种成岩相类型,对其进行储层孔隙演化的恢复(表2)。

以渤中19-6-A井埋深3890 m处白云石-铁白云石胶结成岩相为例说明其储层孔隙演化的过程,该成岩相的初始孔隙度为34.43%,埋藏初期快速压实,早期压实作用使其孔隙度大量损失,孔隙减孔量达18.77%;第一期溶蚀处于早成岩A期,是大气水淋滤作用的结果,溶蚀增孔量为1.80%,第二期溶蚀处于中成岩A期,为有机酸溶蚀长石等骨架颗粒及早期胶结物,溶蚀增孔量为4.79%;早期的白云石胶结充填

表2 渤海湾盆地渤中19-6构造孔店组储层各成岩作用造成的孔隙度变化

Table 2 Statistics of porosity changes caused by diagenesis of Kongdian Formation in Bozhong 19-6 structure, Bohai Bay Basin

孔隙度演化阶段	白云石-铁白云石胶结成岩相 ^①		高岭石-铁白云石胶结成岩相 ^②		酸性溶蚀成岩相 ^③	
	孔隙度变化量/%	孔隙度/%	孔隙度变化量/%	孔隙度/%	孔隙度变化量/%	孔隙度/%
初始孔隙度	—	34.43	—	40.49	—	33.22
早期压实减孔	-18.77	15.66	-16.88	23.61	-16.48	16.74
第一期溶蚀增孔	1.80	17.46	—	—	2.35	19.09
白云石胶结减孔	-4.16	13.31	—	—	-4.82	14.27
高岭石胶结减孔	—	—	-12.01	11.60	—	—
硅质胶结减孔	—	—	—	—	-1.88	12.39
第二期溶蚀增孔	4.79	18.10	3.60	15.20	5.97	18.36
铁白云石胶结减孔	-8.31	9.78	-8.23	6.97	-4.71	13.62
伊利石胶结减孔	-1.39	8.40	—	—	—	—
晚期压实减孔	-4.20	4.20	-3.77	3.20	-3.73	9.92
现今孔隙度	—	4.20	—	3.20	—	9.92

注:“—”表示未产生。

①为BZ19-6-A井,埋深3 890 m;②为BZ19-6-A井,埋深3 695 m;③为BZ19-6-A井,埋深3 679 m。

孔隙,胶结减孔量为4.16%,晚期铁白云石胶结交代,胶结减孔量为8.31%,伊利石胶结减孔量为1.39%;晚期压实处于中成岩A₂期一中成岩B期,储层处于快速深埋至缓慢沉降的转换阶段,压实减孔约4.20%。该成岩相中压实及胶结作用是储层物性变差的主要原因,溶蚀作用仅提供少量次生孔隙。

5.2 孔-缝垂向演化特征

综合研究区的孔隙演化及压实破裂缝的垂向发育特征,得出渤中19-6构造孔店组砂砾岩储层孔-缝垂向演化特征(图10)。

1) 砂砾岩储层孔隙度的垂向变化具有早压实、晚胶结及中间溶蚀改善的特征。

孔店组砂砾岩储层的初始孔隙度平均为36.05%,压实减孔作用持续作用于整个埋藏成岩阶段,是孔隙度减小的主控因素,早成岩期的压实减孔作用显著,平均减孔量达17.38%;晚成岩期的压实减孔作用较弱,平均压实减孔量仅为3.9%。

胶结作用是砂砾岩储层致密化的诱发因素,胶结作用类型主要为碳酸盐胶结和黏土矿物胶结,胶结减孔量最高可达20.24%;铁白云石是渤中19-6构造孔店组普遍发育的胶结物类型,其胶结减孔量为4.71%~8.31%,平均为7.08%,是储层晚期孔隙度降低并致密化的主要诱因。黏土矿物胶结虽然具有减孔作用,但是在减孔的同时还能提供大量的晶间孔,故黏土矿物胶结具有减孔(微米孔)和增孔(纳米孔)的

“双重”作用,比如渤中19-6-A井埋深3 695 m处的高岭石-铁白云石胶结成岩相中,高岭石的胶结减孔量(微米孔)达12.01%,由于高岭石的晶间孔(纳米孔)可占其体积的43%,所以高岭石的实际胶结减孔量为5.16%;伊利石晶间孔的体积占比更高,达到63%,其纳米增孔效应更加明显。

溶蚀作用可提供一定数量的次生孔隙,是改善储层物性的重要因素。研究区发育2期溶蚀增孔作用,早期为大气淡水淋滤作用,其增孔作用较弱,溶蚀增孔量仅为2.08%;第二期对应油气充注期,为有机酸的溶蚀作用,其溶蚀增孔量为3.60%~5.97%,平均为4.79%,该溶蚀作用为深部砂砾岩储层提供油气储集空间,是油气勘探的有利部位。

2) 砂砾岩储层压裂缝的垂向演化具有三段性。

浅埋藏阶段,碎屑颗粒在物源区以及搬运过程中形成的砾内缝因受到早期的垂向压实作用而形成继承性裂缝,这些微裂缝自2 000 m以深逐步开启,在深度2 500 m左右第一期压裂缝开始形成。

在浅埋藏-深埋藏转换阶段,早期浅埋阶段形成的继承性裂缝大部分完全开启,脆性矿物及岩屑在压力作用下形成了第二期非继承性压裂缝。这些微裂缝在深度3 000 m之后逐步形成,4 000 m左右微裂缝总数达到峰值。

在深埋藏早期阶段,碎屑颗粒受到垂向压实和侧向挤压作用,颗粒接触更为紧密,共轭剪切力使骨架颗粒趋向于沿共轭剪切方向定向排列,并沿垂直于颗粒

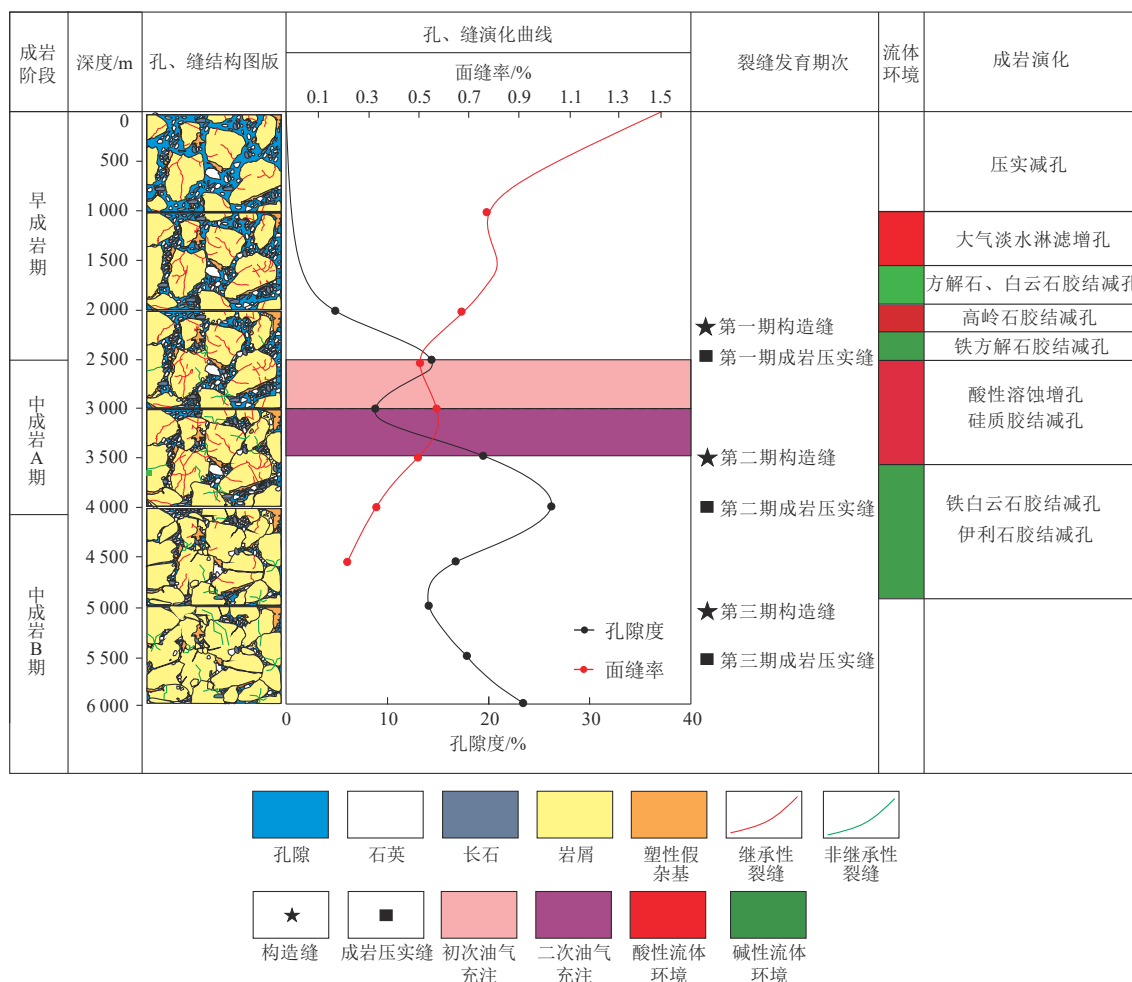


图 10 渤海湾盆地渤中 19-6 构造孔店组砂砾岩储层垂向演化模式

Fig. 10 Vertical evolution model of sandy conglomerate reservoirs of Kongdian Formation in Bozhong19-6 structure, Bohai Bay Basin

接触部位的切线方向发育微裂缝,其数量缝从 4 500 m 开始随深度增大而逐渐增加,第三期压裂缝开始形成。

5.3 优质储层垂向发育有利深度段

渤中 19-6 构造孔店组砂砾岩共有 2 期油气充注:第一期油气包裹体主要发育于第 1 期和第 2 期石英次生加大边形成阶段,丰度较高[含油流体包裹体丰度指标(GOI)为 4 % 左右],均一温度为 130 ~ 135 °C,对应的地质时间为 5 Ma 左右,对应埋深 2 500 m 左右;第二期油气包裹体发育于第 2 期石英次生加大边形成之后,丰度极高(GOI 为 25 % 左右),均一温度为 143 ~ 152 °C,对应的地质时间为 3 Ma 左右,对应埋深为 3 200 m 左右。该油气充注期与第二期溶蚀增孔及第一期压裂缝发育高峰期相对应,此时第二期压裂缝也开始形成,因此,3 000 m 左右为孔店组砂砾岩油气富集有利深度段。

渤中 19-6 构造孔店组 3 500 m 以深的地层,发育

2 期压裂缝,压裂缝的发育高峰期对应深度为 4 000 m 和 6 000 m 左右;叠加深部溶蚀能力较强的钾长石等颗粒溶蚀提供的次生孔隙,可以预测在 4 000 m 以深的深部砂砾岩储层中依然存在优质储层,仍可作为油气富集有利深度段。

6 结论

1) 孔店组砂砾岩具有高岩屑、低石英和中等长石含量的特征,长石和岩屑的粒内溶蚀孔以及压实破裂缝为优质的储集空间。借助水-岩模拟实验证实,钾长石的溶蚀作用随温度升高逐渐增强,甚至超过斜长石,说明孔店组深层的钾长石有更高的溶蚀速率与增孔潜力。

2) 综合物理模拟实验和研究区实际发现,压裂缝的发育程度与颗粒粒度、碎屑组分和填隙物含量有关,砾石级的颗粒、长英质的成分及低杂基含量更有利于

压裂缝的产生,长石较石英的压裂缝更发育。

3) 孔店组孔隙度的垂向变化受到早压实、晚胶结及中间溶蚀作用的控制。其初始孔隙度为36.05%,早期压实减孔量为17.38%;铁白云石胶结减孔量为7.76%,是储层致密的主要诱因;黏土矿物胶结具有减微米孔和增纳米孔的“双重”作用;有机酸的溶蚀增孔量为5.45%,为油气提供储集空间。

4) 孔店组压裂缝的垂向演化具有三段性。浅埋藏阶段以继承性裂缝为主,深度2 000 m开启,2 500 m左右开始形成第一期压裂缝;浅埋藏-深埋藏转换阶段继承性裂缝完全开启,3 000 m以深开始形成第二期压裂缝,4 000 m左右裂缝数量达到峰值;深埋藏阶段早期开始形成第三期压裂缝,并从4 500 m开始裂缝数量向下逐渐增加。

5) 孔店组的油气充注与第二期溶蚀增孔及第一、第二期压裂缝相对应,3 000 m左右为油气富集的有利深度段;4 000 m以深压裂缝大量发育,叠加钾长石等颗粒的溶蚀作用,预测4 000 m以深的砂砾岩储层中依然存在优质储层。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [2] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [3] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [4] 牛涛, 范洪军, 范廷恩, 等. 渤中19-6气田太古界变质岩潜山“隔夹层”成因及发育模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(4): 1-8.
NIU Tao, FAN Hongjun, FAN Tingen, et al. Genesis and development pattern of the interlayer in Archeozoic metamorphic-rock buried hill of Bozhong 19-6 Gas Field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(4): 1-8.
- [5] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.
- [6] 孙靖, 尤新才, 张全, 等. 准噶尔盆地玛湖地区深层致密砾岩储层发育特征及成因[J/OL]. 天然气地球科学: 1-14[2022-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20221025.1755.002.html>.
SUN Jing, YOU Xincan, ZHANG Quan, et al. Development characteristics and genesis of deep tight conglomerate reservoirs of Mahu area in Junggar Basin[J/OL]. Natural Gas Geoscience: 1-14[2022-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20221025.1755.002.html>.
- [7] 李建忠, 王小军, 杨帆, 等. 准噶尔盆地中央坳陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1059-1072.
LI Jianzhong, WANG Xiaojun, YANG Fan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration prospect of the structural traps in lower play of the western Central Depression in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1059-1072.
- [8] 田军, 杨海军, 吴超, 等. 博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 11-19.
TIAN Jun, YANG Haijun, WU Chao, et al. Discovery of Well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 11-19.
- [9] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层-超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 112-140.
CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 112-140.
- [10] 张东东, 刘文汇, 王晓锋, 等. 深层油气藏成因类型及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1169-1180.
ZHANG Dongdong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1169-1180.
- [11] 庞小军, 杜晓峰, 王冠民, 等. 渤海海域渤中19-6构造及围区深层孔店组砂砾岩优质储层成因及孔隙演化[J/OL]. 地球科学: 1-20[2022-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1029.018.html>.
PANG Xiaojun, DU Xiaofeng, WANG Guanmin, et al. Genetic mechanism and pore evolution of high-quality glutenite reservoirs

- of the deep Kongdian Formation in southwestern, BZ19-6, Bohai Sea [J/OL]. Earth Science: 1-20 [2022-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1029.018.html>.
- [12] 王鸿祯. 中国地壳构造发展的主要阶段[J]. 地球科学, 1982(3): 155-178.
- WANG Hongzhen. The main stage of tectonic development of the earth's crust in China[J]. Earth Science, 1982(3): 155-178.
- [13] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1037-1046.
- ZHAI Minguo. Cratonization and the formation of North China Block[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2011, 41(8): 1037-1046.
- [14] 薛永安, 柴永波, 周园园. 近期渤海海域油气勘探的新突破[J]. 中国海上油气, 2015, 27(1): 1-9.
- XUE Yongan, CHAI Yongbo, ZHOU Yuanyuan. Recent new breakthroughs in hydrocarbon exploration in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(1): 1-9.
- [15] 祝春荣, 韦阿娟, 王保全. 油气运聚模拟在目标钻前研究中的成功应用——以渤海海域渤中21-22区为例[J]. 海洋石油, 2013, 33(3): 23-28.
- ZHU Chunrong, WEI Ajuan, WANG Baoquan. Successful application of hydrocarbon migration and accumulation modeling in predrilling target study of exploration well in Bohai Sea area[J]. Offshore Oil, 2013, 33(3): 23-28.
- [16] COOK J E, GOODWIN L B, BOUTT D F. Systematic diagenetic changes in the grain-scale morphology and permeability of a quartz-cemented quartz arenite [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(6): 1067-1088.
- [17] 杨兵, 张占松, 张超谟. 渤中19-6气田孔店组砂砾岩储层分类研究[J]. 当代化工, 2020, 49(12): 2786-2790, 2817.
- YANG Bing, ZHANG Zhansong, ZHANG Chaomo. Investigation of reservoir classification of glutenites in Bozhong 19-6 Gas Field [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(12): 2786-2790, 2817.
- [18] 李建平, 周心怀, 刘士磊, 等. 渤海孔店组及其油气勘探意义[J]. 地层学杂志, 2010, 34(1): 89-96.
- LI Jianping, ZHOU Xinhui, LIU Shilei, et al. On the distribution of the Kongdian Formation in the Bohai area with special reference to its bearings on oil exploration [J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(1): 89-96.
- [19] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1334-1346.
- WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1334-1346.
- [20] 贾海松, 李振鹏, 张汶, 等. 渤海B气田孔店组砂砾岩储层特征及主控因素分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2020, 22(3): 44-48.
- JIA Haisong, LI Zhenpeng, ZHANG Wen, et al. Analysis of characteristics and main controlling factors of glutenite reservoir of E₁₋₂k₂ Formation in B Gas Field of Bohai Sea [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 22(3): 44-48.
- [21] 曹英权, 王清斌, 曲希玉, 等. 岩屑的有机酸溶蚀实验及验证——以渤中凹陷CFD6-4油田东营组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 841-852.
- CAO Yingquan, WANG Qingbin, QU Xiyu, et al. A dissolution experiment of organic acid of cuttings and its verification: A case study of the Dongying Formation of the CFD6-4 Oilfield, Bozhong Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 841-852.
- [22] 曲希玉, 苗长盛, 李瑞磊, 等. 致密碎屑岩储层物性影响因素及优质储层主控因素——以松辽盆地长岭断陷龙凤山次凹营城组为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(7): 1036-1048.
- QU Xiyu, MIAO Changsheng, LI Ruilei, et al. Influencing factors of tight elastic reservoir physical properties and main controlling factors of high-quality reservoirs: Taking the Yingcheng Formation of Longfengshan sub-sag in Changling fault depression of Songliao Basin as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(7): 1036-1048.
- [23] 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的实验研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 7-17.
- HUANG Sijing, YANG Junjie, ZHANG Wenzheng, et al. Experimental study of feldspar dissolution by acetic acid at different burial temperatures [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(1): 7-17.
- [24] 杨俊杰, 黄月明, 张文正, 等. 乙酸对长石砂岩溶蚀作用的实验模拟[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 82-86, 113-114.
- YANG Junjie, HUANG Yueming, ZHANG Wenzheng, et al. Experimental approach of dissolution of feldspar sand stone by acetic acid [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 82-86, 113-114.
- [25] 罗孝俊, 杨卫东. 有机酸对长石溶解度影响的热力学研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(2): 183-188.
- LUO Xiaojun, YANG Weidong. The effect of organic acid on feldspar solubility: A thermodynamic study [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(2): 183-188.
- [26] 向廷生, 蔡春芳, 付华娥. 不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 597-602.
- XIANG Tingsheng, CAI Chunfang, FU Hua. Dissolution of microcline by carboxylic acids at different temperatures and complexing reaction of Al anion with carboxylic acid in aqueous solution [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 597-602.
- [27] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤成气低孔渗储集层次生孔隙形成机理——乙酸溶液对钙长石、铁镁暗色矿物溶蚀的模拟实验[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 383-391.

- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Secondary porosity formation of Upper Paleozoic low porosity-permeability coal-formed gas reservoirs, Ordos Basin; Simulation on dissolution of anorthite and dark-colored femic minerals in acetic acid solution [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 383-391.
- [28] 李美蓉, 宋来弟, 于海鹏, 等. 酸碱度对长石溶蚀及增孔效应的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 33-41.
- LI Meirong, SONG Laidi, YU Haipeng, et al. Influence of pH value on feldspar dissolution and pore-increasing effect [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(5): 33-41.
- [29] 曾庆鲁, 张荣虎, 王力宝, 等. 库车坳陷白垩系深层致密砂岩储层溶蚀作用实验模拟研究[J]. *沉积学报*, 2018, 36(5): 946-956.
- ZENG Qinglu, ZHANG Ronghu, WANG Libao, et al. Experimental simulation for dissolution of Cretaceous tight sand rocks as deep reservoir in Kuqa Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 946-956.
- [30] 李宝帅. 库车坳陷克拉苏构造带深层致密砂岩气成藏机制[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 17-22.
- LI Baoshuai. Accumulation mechanism of deep tight sandstone gas reservoir in Kelasu structural belt, Kuqa Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 17-22.
- [31] 朱翔, 陈倩倩, 伏美燕, 等. 多种流体体系与砂岩水岩反应的实验研究[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(2): 17-24.
- ZHU Xiang, CHEN Qianqian, FU Meiyan, et al. Experimental study on water-rock reaction of sandstone in various fluid systems [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(2): 17-24.
- [32] SUN Xiuting, LI Meirong, XING Juntao, et al. The complex effect of organic acids on the dissolution of feldspar at high temperature[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(7): 244.
- [33] 曹婷婷, 曲希玉, 蒋龔, 等. 混积条件下有机酸-矿物溶蚀模拟实验[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(5): 1181-1188.
- CAO Tingting, QU Xiyu, JIANG Yan, et al. Dissolution simulation of organic acids and minerals under mixed deposition [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(5): 1181-1188.
- [34] 方晓玲, 蒋定建. 乙酸条件下长石溶解-沉淀过程探究[J]. *当代化工*, 2019, 48(9): 1990-1994.
- FANG Xiaoling, JIANG Dingjian. Study on dissolution and precipitation process of feldspar under acetic acid condition [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(9): 1990-1994.
- [35] 冯佳睿, 高志勇, 崔京钢, 等. 库车坳陷迪北侏罗系深部储层孔隙演化特征与有利储层评价——埋藏方式制约下的成岩物理模拟实验研究[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(3): 305-320.
- FENG Jiarui, GAO Zhiyong, CUI Jinggang, et al. Reservoir porosity evolution characteristics and evaluation of the Jurassic deep reservoir from Dibe in Kuqa Depression: Insight from diagenesis modeling experiments under the influence of burial mode[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(3): 305-320.
- [36] 郭沫贞, 朱国华, 寿建峰, 等. 碎屑岩压裂缝的特征、成因与油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 483-487.
- GUO Mozhen, ZHU Guohua, SHOU Jianfeng, et al. Features, origin and petroleum explorative significance of crushed fracture in clastic rock [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 483-487.
- [37] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(2): 194-200.
- ZENG Lianbo, LI Yuegang, WANG Zhengguo, et al. Type and sequence of fractures in the second member of Xujiache Formation at the South of Western Sichuan Depression [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2007, 32(2): 194-200.
- [38] 吴元燕, 吴胜和, 蔡正旗. 油矿地质学[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- WU Yuanyan, WU Shenghe, CAI Zhengqi. *Industrial geology of petroleum* [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [39] 李绍华, 何汶锬, 吴育鹏. 低渗透砂砾岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *西部探矿工程*, 2015, 27(1): 73-74, 77.
- LI Shaohua, HE Wensi, WU Yupeng. Fracture development characteristics and main controlling factors of low permeability glutenite reservoir [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2015, 27(1): 73-74, 77.
- [40] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 525-532.
- LONG Pengyu, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 525-532.
- [41] SCHERER M, 侯瑞云. 影响砂岩孔隙度的参数——一种预测砂岩孔隙度的模式[J]. *地质科学译丛*, 1988(2): 74-79.
- SCHERER M, HOU Ruiyun. Parameters affecting porosity of sandstone: A model for predicting sandstone porosity [J]. *Journal of Geoscience Translations*, 1988(2): 74-79.

(编辑 梁 慧)