

渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩 优质储层特征及成因

王冠民¹, 庞小军^{1,2}, 黄晓波², 张雪芳², 潘凯²

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

摘要:为解决渤海海域中-深层重力流砂岩储层物性差异大、优质储层预测较难的勘探难题,基于常规物性、铸体薄片、黏土矿物和地球化学等分析测试手段,结合测井、录井、岩心和地震等资料,研究了渤海海域辽中凹陷古近系东营组三段(东三段)深水重力流砂岩储层的沉积特征及优质储层主控因素。结果表明:渤海海域辽中凹陷东三段重力流的沉积类型为砂质碎屑流,储层以中-低孔、中-低渗为主。储集空间中的粒间溶蚀孔最发育,原生孔次之。中砂岩和粗砂岩储层物性最好,细砂岩次之,粉砂岩较差。控制优质储层发育的关键因素是:①物质基础好,表现为分选好、泥质含量低、富含长石。②东营组早成岩期的快速沉降形成欠压实超压条件,使原生孔隙得以大量保存;超压延长了有机酸的生成时间,为砂岩中的钾长石和方解石等矿物溶解提供了充足的酸性流体。③断层沟通了储层和烃源岩,进一步促进了中-深层储层的溶解作用,有利于大量溶蚀孔的形成。④构造抬升和侧向挤压造成的储层破裂作用又形成了大量裂缝和溶缝带,改善了储层物性。

关键词:砂质碎屑流;超压;裂缝;优质储层;东营组;辽中凹陷;渤海海域

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea

WANG Guanmin¹, PANG Xiaojun^{1,2}, HUANG Xiaobo², ZHANG Xuefang², PAN Kai²

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China]

Abstract: Gravity-flow sandstone reservoirs in the medium to deep parts of the Bohai Sea exhibit significantly varying physical properties, making it difficult to predict high-quality reservoirs. This study aims to address this oil/gas exploration challenge. Based on the analyses and tests of conventional physical properties, casting thin sections, clay mineralogy, and geochemistry, as well as data from well logging, core observations, and seismic survey, we investigate the sedimentary characteristics of the deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation (also referred to as the Dong 3 Member) in the Liaozhong Sag, as well as primary factors influencing the development of high-quality reservoirs. The results show that the gravity-flow deposits in the Dong 3 Member in the study area are of the sandy debris flow type, with reservoirs primarily characterized by medium-to-low porosity and permeability. The storage spaces in the reservoirs are dominated by intergranular dissolution pores, followed by primary pores. Among the reservoirs, medium- and coarse-grained sandstones exhibit the optimal physical properties, followed by fine-grained sandstones, while siltstones show poor physical properties. The key factors influencing the development of high-quality reservoirs include: (1) Good sorting, low clay content, and feldspar enrichment act as the material basis for the formation of high-quality reservoirs; (2) In the early diagenesis stage of the Dongying Formation, the rapid subsidence led to undercompaction-induced overpressure, preserving numerous primary pores. During the hydrocarbon generation in the late stage, overpressure prolonged the generation

收稿日期:2023-09-14;修回日期:2023-11-02。

第一作者简介:王冠民(1969—),男,教授、博士生导师,沉积学和储层地质学。E-mail: wangguanmin@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972131);“十三五”国家科技重大专项(2016ZX05024-003)。

period of organic acids, producing sufficient acidic fluids for the dissolution of minerals like potassium feldspar and calcite in sandstones; (3) Faults connected the reservoirs and source rocks, leading to enhanced dissolution in medium-deep reservoirs, which facilitated the formation of dissolution pores in quantity; (4) Tectonic uplift and lateral compression caused reservoir fracturing, as well as the formation of extensive fractures and dissolution zones, improving the physical properties of the reservoirs.

Key words: sandy debris flow, overpressure, fracture, high-quality reservoir, Dongying Formation, Liaozhong Sag, Bohai Sea

引用格式:王冠民,庞小军,黄晓波,等.渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩优质储层特征及成因[J].石油与天然气地质,2024,45(1):81-95. DOI:10.11743/ogg20240106.

WANG Guanmin, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45 (1): 81-95. DOI: 10.11743/ogg20240106.

深水重力流沉积是国内外油气勘探的重点^[1-7],其沉积类型主要包括滑动滑塌、砂质碎屑流、泥质碎屑流、高密度浊流和低密度浊流等^[1-3],发育在半深湖-深湖或半深海-深海环境中,呈透镜状被泥岩包裹。埋藏后,容易形成隐蔽油气藏。近年来,在国内准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地、北部湾盆地和渤海湾盆地等众多盆地的深水重力流沉积中均发现了大量油气^[8-12]。

目前,学者们对深水重力流的沉积特征、富砂性、搬运机制及主控因素等做了大量研究^[1-14],认为深水重力流的沉积类型、富砂性与物源供给和古地貌密切相关,深水重力流沉积的触发机制主要包括地震、沉积物液化、火山活动、降雨、海啸和湖浪等^[1,13-14]。学者们对深水重力流砂岩优质储层的成因研究主要集中在重力流砂岩储层特征^[15-16]、储层成因^[17-23]和储层评价方面^[24-28]。根据重力流的成因,将重力流分为滑塌、砂质碎屑流、泥质碎屑流和浊流4种类型^[15],其中,砂质碎屑流储层的物性最好,浊积砂岩储层较差,而滑塌岩和泥质碎屑流较难形成有效储层^[15]。部分研究认为填隙物对重力流砂岩储层非均质性的影响较大^[17-18],其中,自生黏土矿物中伊利石发育较弱的地区是优质储层发育的“甜点”区^[17],杂基含量小于7%的储层次生孔隙发育程度较高^[18]。还有部分学者从沉积作用、成岩作用和大气淡水淋滤等方面进行了大量研究^[19-22],认为低塑性砂岩、粗粒、长石溶解和烃类充注等有利于优质储层的发育,压实作用和胶结作用是重力流砂岩储层物性降低的主要原因。其中,低泥质含量的厚层砂质碎屑流砂岩是重力流砂岩优质储层形成的必备条件,厚层块状含砾砂岩储层质量最好,而中-薄层块状含砾砂岩和中-薄层块状纯净砂岩次之。除有机酸

外,早期大气淡水溶蚀形成大量溶蚀孔^[24],能够改善成岩期储层的渗流条件,提高成岩期有机酸的溶蚀效率,有利于优质储层的形成。在成岩强度方面,有研究认为埋深小于3 000 m的深水重力流砂岩优质储层与骨架颗粒成分有关,而埋深大于3 000 m的深水重力流砂岩优质储层与刚性颗粒、绿泥石环边和溶解等因素有关^[25-26],并根据储层物性差异,将砂质碎屑流储层分为好、中和差3类^[27]。

近年来,深水重力流沉积成为渤海海域油气勘探的重要领域,并在辽中凹陷古近系东营组三段(东三段)的中-深层深水重力流砂体中发现了旅大10-6中型油田^[29-32],成为渤海海域首个在深水重力流储层中发现的较大油田,表明渤海海域东三段中-深层深水重力流沉积具有较大的勘探潜力。前人已对渤海海域东三段深水重力流沉积进行了研究^[29-32],认为该类重力流沉积主要为湖底扇或斜坡扇,将湖底扇分为内扇、中扇和外扇^[31-32],或者按照形态将湖底扇分为舌形扇、花瓣扇、朵叶扇及河道扇^[33]。不过,目前还缺乏从流体类型方面对该深水重力流沉积体的分析,更缺乏中-深层(埋深2 500~4 500 m)重力流物性差异和优质储层成因方面的研究,导致中-深层重力流砂岩储层非均质性和优质储层成因不清,制约了渤海海域中-深层重力流砂岩储层的勘探。本文选取渤海海域辽中凹陷南部旅大10-6构造为研究区,利用9口井的岩心或壁心铸体薄片、扫描电镜、黏土矿物、碳氧同位素和物性等分析测试,结合测井、录井和地震资料分析,对东三段重力流砂岩储层的沉积类型、岩石学特征、物性特征、储集空间类型和成岩作用等进行了分析,探讨优质储层的主控因素和发育模式,为渤海海域中-深层重力流储层的油气勘探提供借鉴。

1 地质背景

辽东湾坳陷位于渤海海域东北部,西部为燕山褶皱带,东部为胶辽隆起(图1a)。辽东湾坳陷内发育大量呈北东-南西向的走滑断层和伸展断层,这些断层将坳陷分割成若干凸起和凹陷。自西向东,辽东湾坳陷分别由辽西凹陷、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起和辽东凹陷组成。凹陷和凸起均呈北东-南西向的条带状展布,东西向呈隆凹相间的构造格局。辽中凹陷位于辽东湾坳陷的中部,研究区位于辽中凹陷的南部(图1a)。

辽中凹陷发育新生界古近系、新近系和第四系^[29],古近系主要由孔店组、沙河街组和东营组组成(图1b)。其中,沙河街组主要发育沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,东营组主要发育东三段、东二段和东一段。沙三段、沙二段和沙一段的灰色、深灰色泥岩、油页岩等是辽中凹陷的主要烃源岩^[29-35]。沙二段、沙一段、东三段-东一段的各种三角洲、滩坝和重力流砂砾岩是辽中凹陷古近系的主要储层^[31]。东三段-东二段发育区域性厚层泥岩,为辽中凹陷区域性的盖层^[29]。此外,东三段-东二段三角洲前缘还发育大量深水重力流沉积^[30-34]。近年来,在辽中凹陷埋深2 000~4 000 m的

东三段重力流砂岩储层中发现了大量油气^[29-34],揭示东三段重力流沉积具有较大的勘探潜力。但这些重力流砂体埋深差异大、薄厚不一、物性非均质性强,优质储层成因不明,阻碍了研究区中-深层重力流砂体的进一步勘探和评价。

2 重力流沉积类型

经岩心观察以及测井、录井和地震等资料综合分析,研究区东三段的重力流沉积类型主要为砂质碎屑流(图2)。在岩心中,单层砂岩的顶部和底部均与泥岩突变接触,厚度分布在10~130 cm,多呈块状构造,仅在顶部可见包卷层理和前积层理,局部见泥质撕裂屑和泥砾。由于砂质碎屑流不断进积,在SP和GR测井曲线上多呈漏斗状。录井表明,砂质碎屑流的岩性主要以中-厚层粗砂岩、中砂岩和细砂岩为主,与湖相厚层灰色泥岩互层。经连井对比,LD10-B-4井靠近辫状河三角洲前缘,但砂岩整体相对不发育,表明重力流沉积与辫状河三角洲前缘之间被湖相泥岩分隔,重力流沉积是孤立的砂体(图3)。LD10-B-5井、LD10-B-2井和LD10-B-3井的砂岩与湖相泥岩互层,砂岩厚度相对较大,以中-厚层砂岩为主。结合岩心分析,该

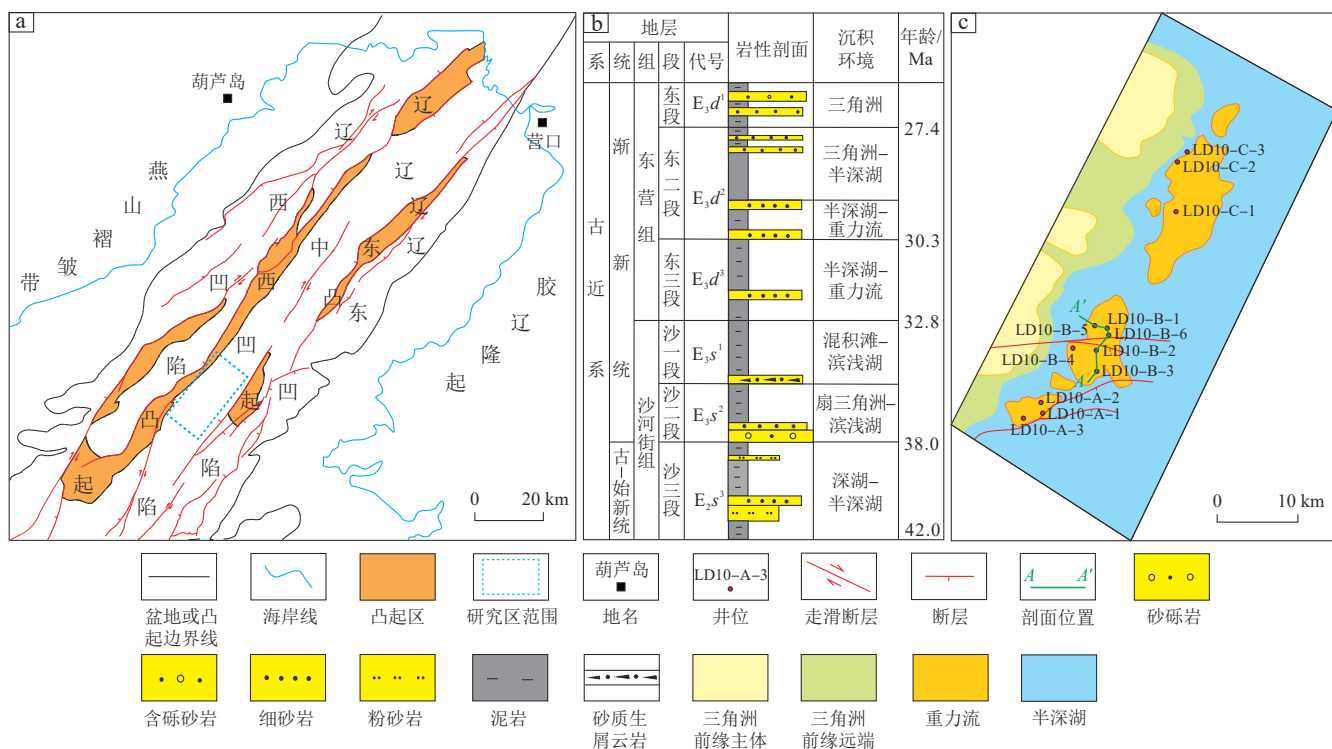


图1 辽中凹陷南部构造位置及沉积相分布^[20]

Fig. 1 Structural location and sedimentary facies distribution of the southern Liao Zhong Sag^[20]

a. 辽东湾坳陷构造单元划分平面图; b. 辽中凹陷古近系综合柱状图; c. 辽中凹陷南部东三段沉积相平面图

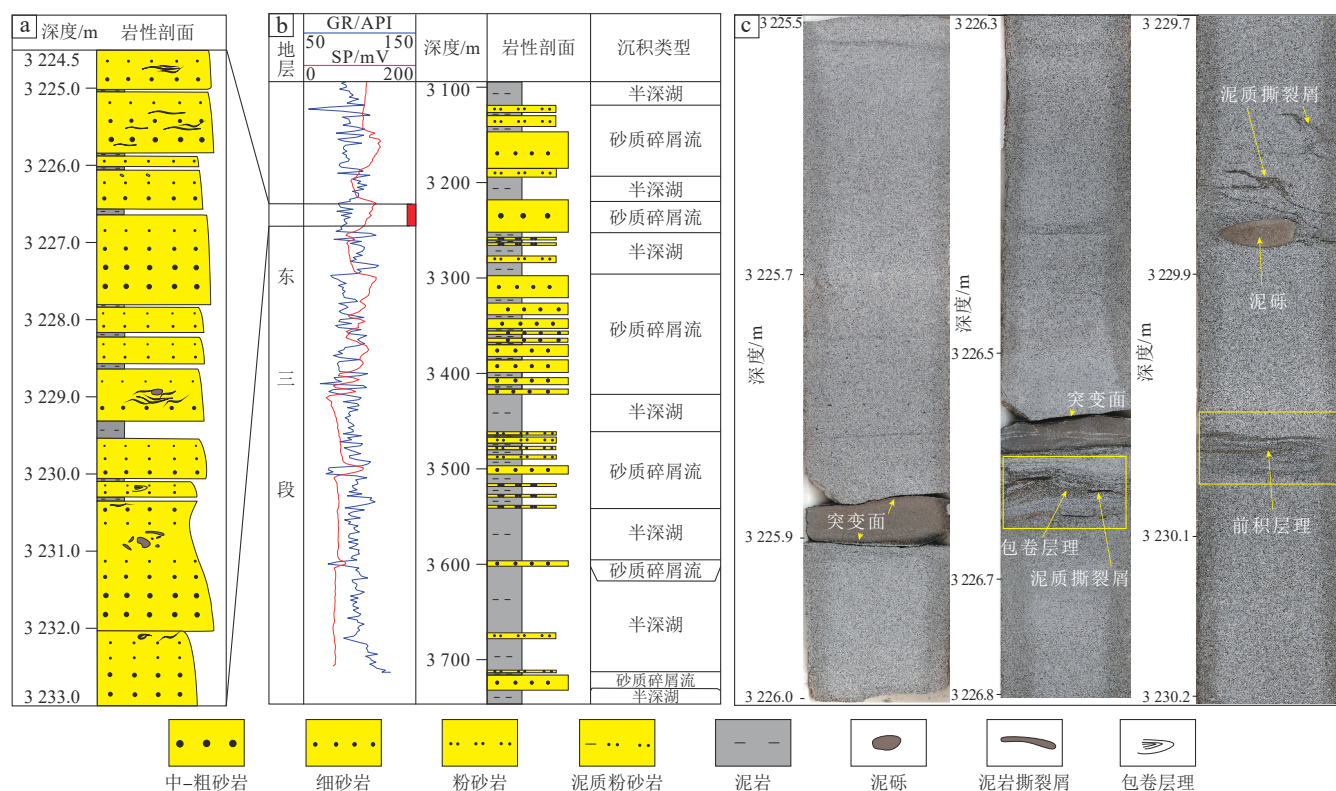


图2 辽中凹陷南部东三段重力流沉积岩性、测井曲线及沉积构造特征

Fig. 2 Lithology, logging curves, and sedimentary structure characteristics of gravity-flow deposits in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

a. 岩心的岩性特征; b. 重力流沉积的测井、录井岩性和沉积类型; c. 岩心重力流沉积构造特征

重力流沉积类型应该是砂质碎屑流。在地震剖面中,重力流沉积体呈强振幅高频连续短轴或弱振幅透镜状反射(图4),其顶部、底部以及两侧均过渡为强振幅反射,表明砂质碎屑流被半深湖-深湖相泥岩包裹。均方根振幅属性揭示,重力流砂体呈孤立的朵状分布,朵状体内部由多个较均一的次级朵状体组成,表明重力流砂体具有多期次的沉积特征。

上述证据表明,辽中凹陷南部东三段重力流沉积以砂质碎屑流沉积为主。东三段沉积期,来自西部燕山褶皱带的大型远源辫状河三角洲前缘^[29-33]沉积物,在地震、洪水和较大斜坡等触发下,辫状河三角洲前缘砂体沿前三角洲斜坡发生滑塌,在坡脚形成砂质碎屑流沉积(图1c,图4a)。

3 储层特征

3.1 岩石学特征

辽中凹陷南部9口井岩心和录井揭示,东三段砂质碎屑流砂岩主要以中砂岩和细砂岩为主,粗砂岩和

粉砂岩次之(图2,图3)。经346个铸体薄片统计,砂质碎屑流砂岩以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主(图5a),富含长石(平均含量为37.6%)。岩屑主要为变质岩岩屑和火山岩岩屑(图5b),变质岩岩屑以石英岩、片麻岩等为主,火山岩以流纹岩等为主。砂岩分选中等-好,颗粒次圆-次棱角状,表明碎屑物质经历了长距离搬运。颗粒间以线接触为主,压实作用中等-强。

3.2 物性特征

辽中凹陷南部9口井东三段365个岩心常规物性数据分析,储层孔隙度与渗透率呈指数关系(图6a),局部出现孔隙度较低、渗透率高的特征,主要受微裂缝的影响。在储层埋深大于3500 m层段,可表现出孔隙度较好、但渗透率偏低的特征。

纵向上储层物性随埋深的增加逐渐变差(图6b,c)。埋深2500~3500 m的储层孔隙度主要分布在10.0%~25.0%,平均为17.3%;渗透率主要分布在 0.10×10^{-3} ~ $1000.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $54.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以中孔、中-低渗为主。埋深大于3500 m的储层孔隙度分布在

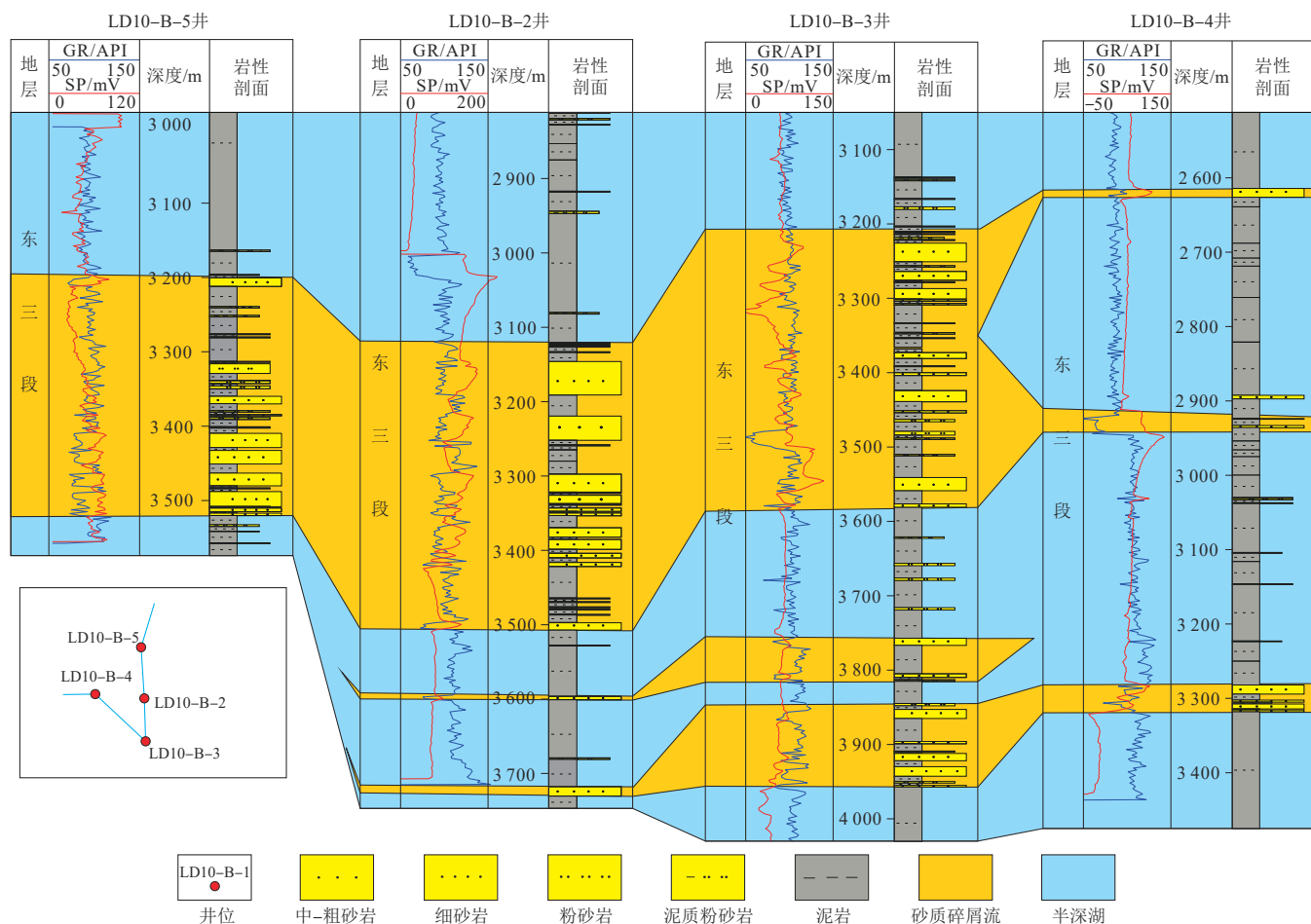


图 3 辽中凹陷南部东三段重力流沉积连井对比

Fig. 3 Seismic-well tie profile of gravity-flow deposits in the Dong 3 Member, southern Liao zhong Sag

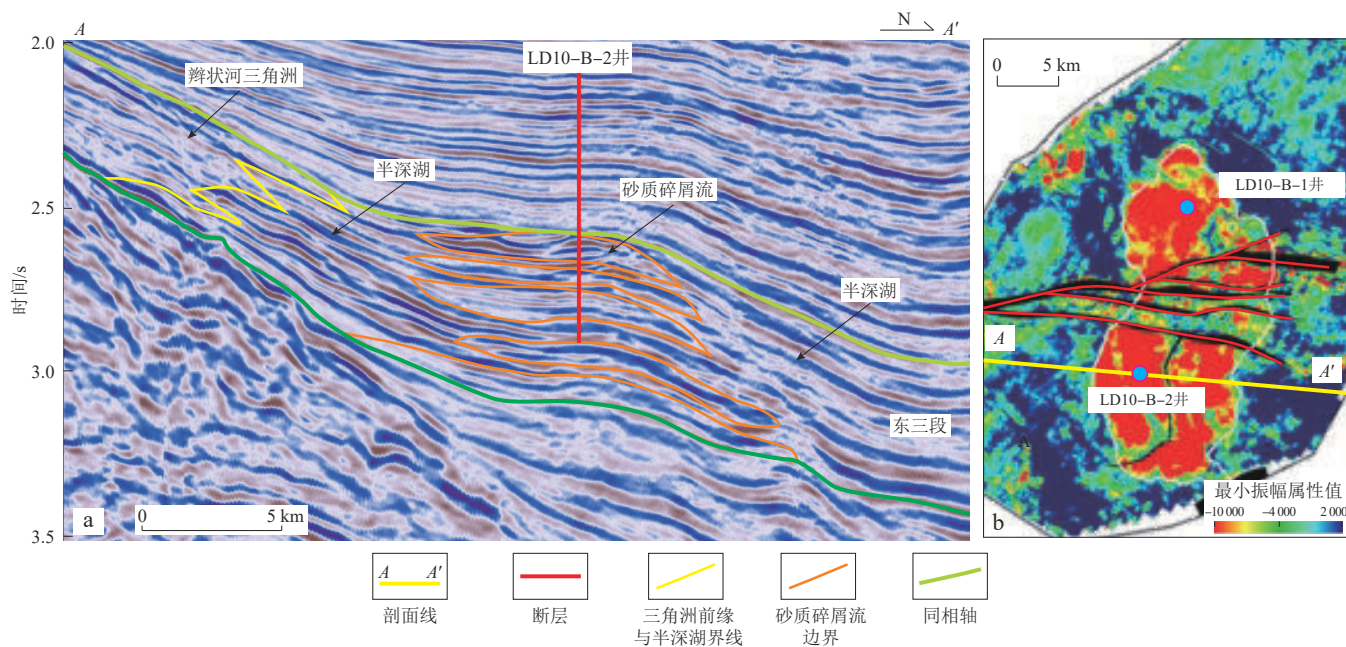


图 4 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流沉积地震反射及最小振幅属性特征

Fig. 4 Seismic reflector and minimum amplitude attributes of sandy-debris-flow deposits in the Dong 3 Member, southern Liao zhong Sag

a. 地震反射特征; b. 最小振幅属性特征

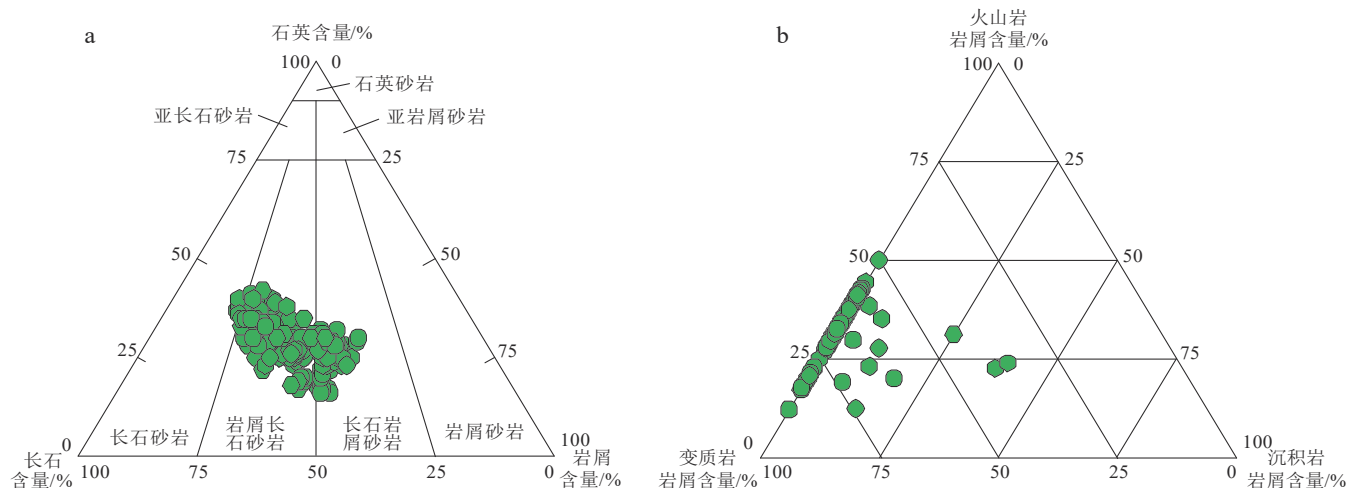


图5 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层的成分(a)及岩屑组分(b)三角图

Fig. 5 Ternary diagrams showing the composition (a) and lithic composition (b) of sandy-debris-flow sandstone reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

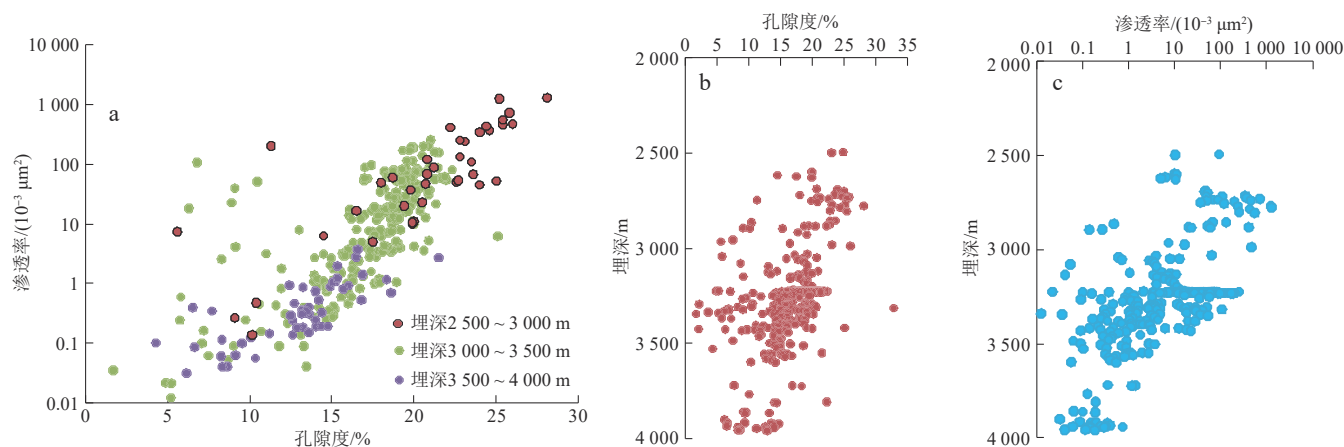


图6 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层孔隙度、渗透率特征

Fig. 6 Porosity and permeability of sandy-debris-flow sandstone reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

a. 孔隙度 vs. 渗透率; b. 孔隙度 vs. 埋深; c. 渗透率 vs. 埋深

5.0 % ~ 20.0 %, 平均为 4.3 %; 渗透率分布在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 以中-低孔、特低-超低渗为主。

由于研究区东三段具有商业价值的油气主要分布在孔隙度大于 10 % 或渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中, 故孔隙度大于 10 % 或渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的优质储层成因是本文研究的重点。

3.3 储集空间类型

辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层的储集空间类型以原生孔(面孔率平均为 4.9 %)、溶蚀孔(面孔率平均为 6.2 %)为主(图 7)。

原生孔呈斑块状分布在颗粒之间(图 7a, b), 连通性较好, 单个孔隙面积较大。溶蚀孔主要以粒间溶蚀

孔为主(面孔率平均为 5.1 %), 粒内溶蚀孔次之(面孔率平均为 1.9 %)。粒间溶蚀孔主要是原生孔周围的长石等颗粒边缘被溶蚀后的再扩大部分(图 7b, d), 孔隙之间的连通性较好, 常呈不规则状分布。粒内溶蚀孔分布于长石、岩屑等颗粒内部(图 7b—d), 常呈孤立状分布, 孔隙之间的连通性较差, 少数颗粒在被全部溶蚀后形成铸模孔。除孔隙以外, 局部还发育有两类裂缝: ①颗粒破碎形成的裂缝(图 7e), 表现为破碎颗粒呈条带状分布; ②具明显开裂的张裂缝(图 7f)。

随着埋深的增加, 砂质碎屑流砂岩储层中的原生孔隙逐渐变少。当埋深大于 3 500 m 后, 孔隙逐渐以比较孤立的溶蚀孔为主, 孔隙之间的连通性逐渐变差, 孔隙面积也由大变小。在深层储层中, 裂缝可以沟通较

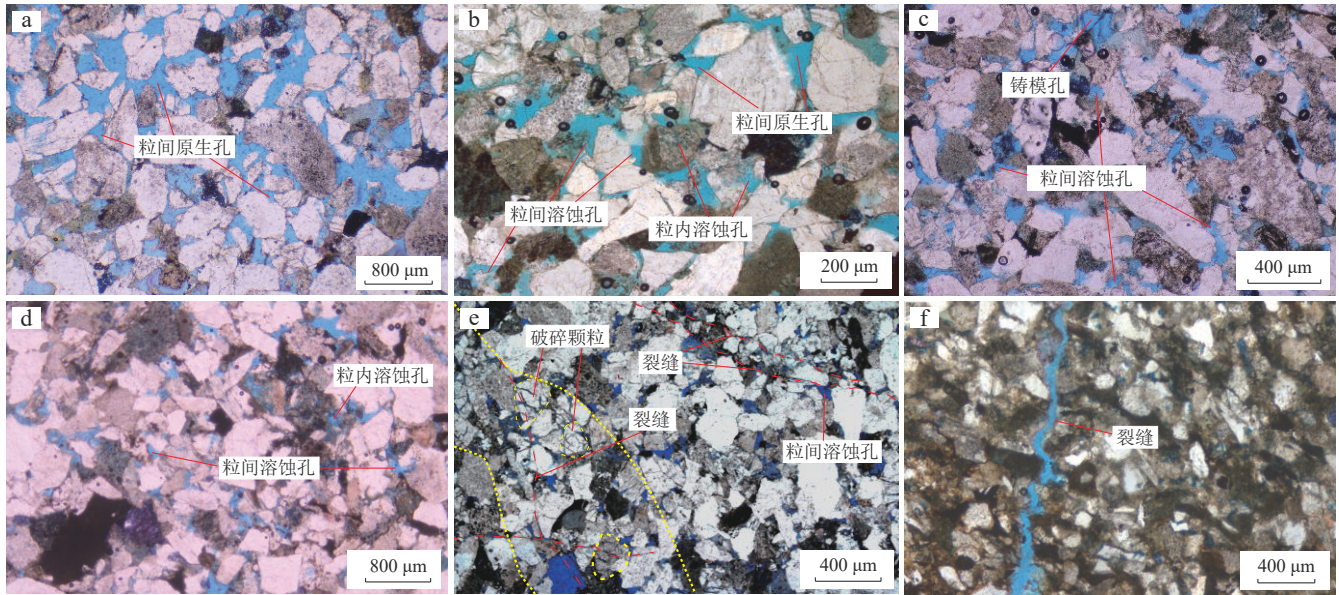


图7 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层储集空间类型显微照片

Fig. 7 Storage space types of sandy-debris-flow sandstone reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liao zhong Sag

a. 大量原生孔,孔隙较大,连通性较好,LD10-A-1井,埋深2 767.5 m,铸体薄片,单偏光;b. 粒间原生孔和粒间溶蚀孔,少量粒内溶蚀孔,LD10-B-2井,埋深3 243.0 m,铸体薄片,单偏光;c. 大量粒间溶蚀孔,少量粒间原生孔和铸模孔,LD10-B-2井,埋深3 627.0 m,铸体薄片,单偏光;d. 粒间溶蚀孔为主,粒内溶蚀孔次之,连通性差,LD10-B-3井,埋深3 945.0 m,铸体薄片,单偏光;e. 孤立粒间溶蚀孔,破碎带内的破碎颗粒呈条带状分布,LD10-B-6井,埋深3 519.0 m,铸体薄片,单偏光;f. 微裂缝,LD10-B-3井,埋深3 719.5 m,铸体薄片,单偏光

孤立的溶蚀孔,进而提高渗透率,对物性的改善至关重要。

4 优质储层主控因素

优质储层是一个相对概念^[36],有学者认为优质储层为现有施工技术条件及经济条件下,能进行高效开发的储层^[37]。辽中凹陷南部东三段孔隙度大于10%或渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层测试可获得日产超过50 m³的产能。因此,综合优质储层的概念和渤海海域辽中凹陷南部东三段实际情况,根据测井解释以及测试产能情况,将渤海海域辽中凹陷南部东三段孔隙度大于10%或渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层可划分为优质储层。

4.1 有利的沉积条件

由于物源和沉积条件的差异,导致辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流不同粒度、分选、骨架颗粒成分、泥质含量的砂岩储层物性具有差异性(图8)。

辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩的中砂岩和粗砂岩储层物性最好(图8a),细砂岩次之,粉砂岩较差。砂岩的分选越好,物性也越好(图8b,c)。骨架颗粒成分对储层物性影响也较大,长石和火山岩岩屑含

量越多,储层物性越好(图8d,e)。砂质碎屑流砂岩储层中含有大量的钾长石和斜长石,高含量的长石为后期溶蚀作用提供了物质基础;流纹岩等酸性火山岩岩屑中含有大量长石微晶,同样也为后期溶蚀提供了物质基础,形成大量的粒内溶蚀孔。泥质含量也是优质储层形成的重要影响因素,一般粉砂岩和部分细砂岩中泥质含量较高,会导致储层物性变差,且泥质含量超过10%时,极少能发育成较好的储层(图8f)。

由于分选好、粒度粗、泥质含量低的砂质碎屑流在沉积时,往往搬运距离不远,一般形成的储层厚度较大(图2)。因此,富含长石、近源堆积的砂质碎屑流容易形成有利的砂岩储集体。

4.2 有利的成岩作用

4.2.1 较弱的压实作用

弱压实作用一般主要与浅埋藏和超压有关。弱压实作用导致大量原生孔的保存,有利于优质储层的发育。辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层分布在埋深2 000~4 000 m,压实作用是储层物性变差的主要原因(图9a,b),造成粒间原生孔的减少(图9b—d)。当埋深大于3 700 m,储层中原生孔隙基本消失(图9b—d),以溶蚀

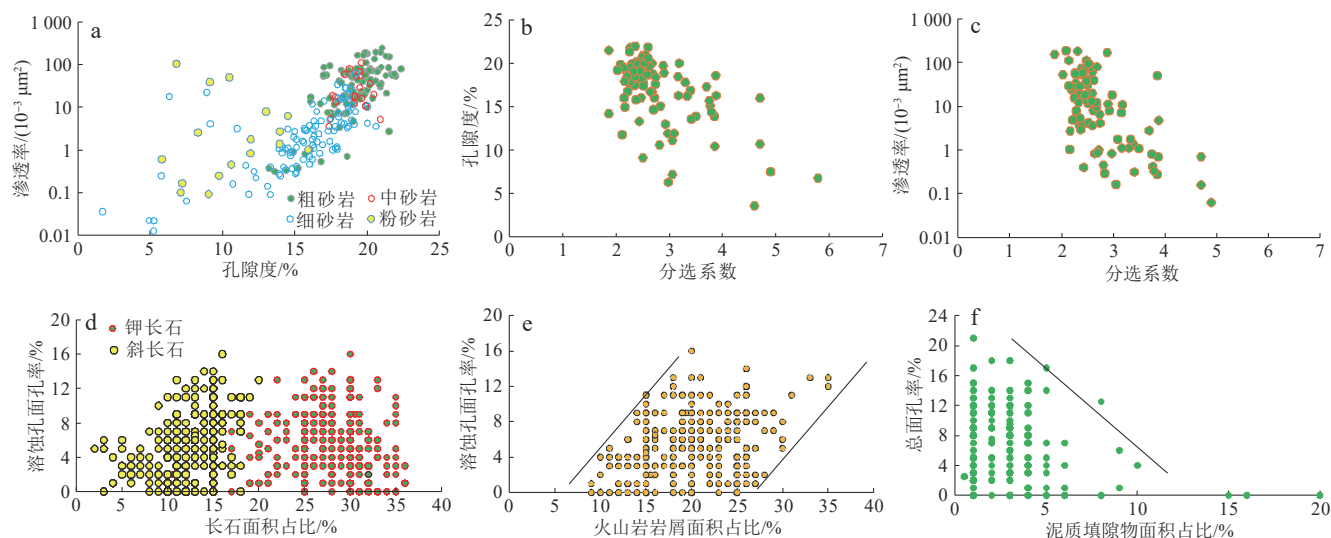


图8 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层岩性、分选、骨架颗粒成分、泥质含量与物性的关系

Fig. 8 Relationships of physical properties with lithology, sorting, framework grain composition, and clay content for sandy-debris-flow sandstone reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

a. 不同岩性的孔隙度 vs. 渗透率; b. 分选系数 vs. 孔隙度; c. 分选系数 vs. 渗透率; d. 不同长石面积占比 vs. 溶蚀孔面孔隙率; e. 火山岩岩屑面积占比 vs. 溶蚀孔面孔隙率; f. 泥质填隙物面积占比 vs. 总面孔隙率

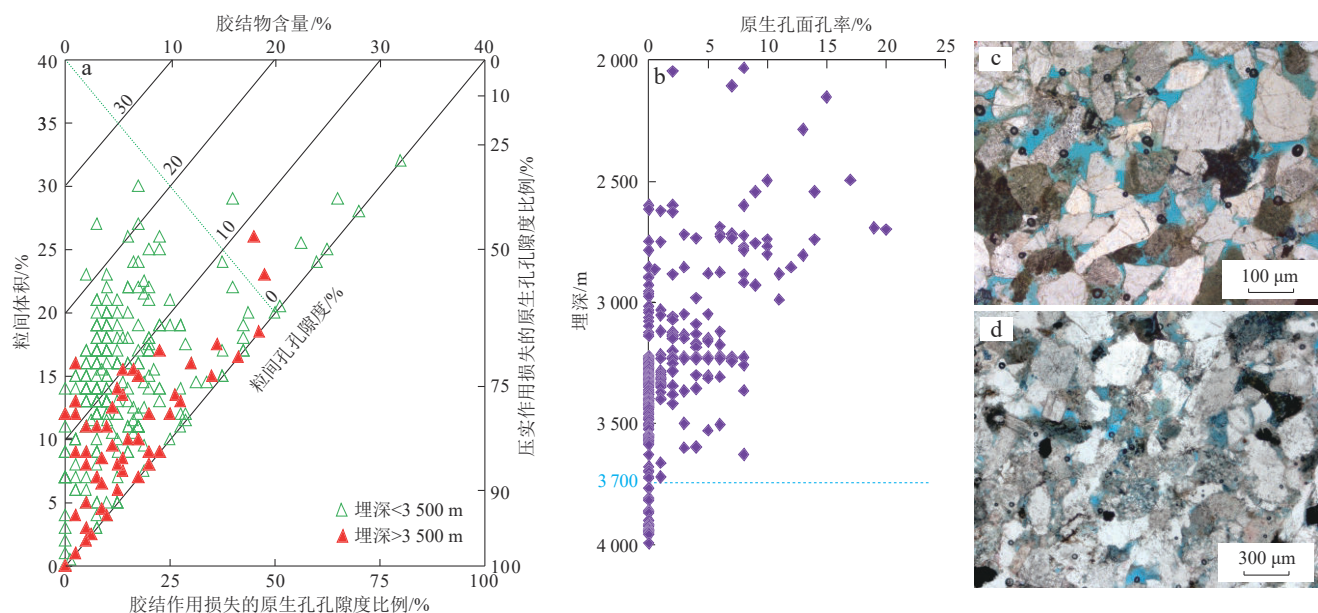


图9 辽中凹陷南部东三段压实作用对储层的影响

Fig. 9 Effects of compaction on the physical properties of reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

a. 压实作用和胶结作用对孔隙度的影响; b. 原生孔面孔隙率 vs. 埋深; c. 粒间原生孔发育, LD10-B-2井, 埋深 3 243 m, 铸体薄片照片, 单偏光; d. 粒间原生孔消失, 溶蚀孔为主, LD10-B-3井, 埋深 3 921 m, 铸体薄片照片, 单偏光

孔为主, 储层致密化。然而, 在埋深 3 500 ~ 3 700 m 的储层中仍保留部分原生孔 (图 9b, d), 孔隙度甚至能够大于 15 %, 表明研究区埋深在 3 500 ~ 3 700 m 以深的深层砂质碎屑流砂岩仍然具备发育优质储层的潜力。深层原生孔的发育与欠压实超压具有密切的关系, 详情在本文后面超压部分阐述。

4.2.2 有机酸的强溶解作用

埋深超过 3 500 m 时, 研究区东三段砂质碎屑流砂岩储层中的原生孔隙迅速减少, 到 3 700 m 时, 原生孔基本消失 (图 9b)。因此, 埋深大于 3 500 m 的层段, 溶解作用形成的溶蚀孔就成为支撑优质储层发育的重要

因素。研究区东三段碎屑流砂岩在埋深3 000~3 700 m和3 900~4 000 m,储层的溶解作用最强,溶蚀孔最发育(图10a)。碳酸盐胶结物的碳、氧同位素分析表明(图10b,c),储层遭受过有机酸的影响^[38]。这说明砂质碎屑流砂岩处于半深湖-深湖相中,下部紧邻湖相烃源岩,烃源岩在热演化过程中形成的有机酸进入了邻近的砂质碎屑流砂岩中,对长石等易溶组分进行溶解(图10d,e)。溶解作用主要发生在颗粒外缘(图10d,e),部分在粒内,形成大量粒间溶蚀孔和少量粒内溶蚀孔。有机酸的溶蚀作用是研究区东三段砂岩优质储层发育的主要原因,尤其对深层砂岩优质储层的发育具有非常重要的作用。

4.2.3 较弱的胶结作用

辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩储层中的胶结物主要为早成岩期形成的方解石、白云石和菱铁矿,中成岩期形成的高岭石,以及晚成岩期形成的铁方解石和铁白云石(图11)。

高岭石主要发育在埋深3 000~3 700 m(图11a)的地层中,对应溶蚀孔发育带。方解石和白云石随着埋深的增加逐渐减少,而铁方解石和铁白云石随着埋深的增加而增加(图11b)。铁白云石和铁方解石一般形成于有机酸溶解作用之后,导致部分储层早期的溶蚀孔被胶结,深层储层更容易受晚期胶结作用(铁白云

石和铁方解石)的破坏(图11g,h)。统计表明,各类胶结物与储层物性均呈负相关关系(图11c),但粒级较粗的中-细砂岩、中砂岩、中-粗砂岩和粗砂岩储层中的胶结物含量相对较低(图11d),而岩性较细的细砂岩和粉砂岩储层中的胶结物含量相对较高,储层物性较差。无论深层还是浅层,由于粉砂岩和细砂岩的渗透性差,导致泥岩生、排烃过程中产生的大量富钙、镁离子的流体,在压力作用下进入粉砂岩和细砂岩中很容易滞留引发沉淀,形成大量的铁方解石和铁白云石胶结物(图11h)。因此,渗透性较好、粒度偏粗的砂岩储层容易形成开放体系,更有利于后期有机酸的进入,发生溶蚀作用并将产物运移走,有利于优质储层的发育。

4.3 欠压实超压和生烃超压对储层的影响

超压包括欠压实超压、生烃超压、黏土矿物转化超压及成岩胶结封闭超压等类型^[38-39]。欠压实超压保护了原生孔隙^[40],生烃超压延长了烃源岩生烃时间、促进了有机酸和油气向储层中运移^[40-41],这两类超压对储层的形成是有利的。黏土矿物转化超压导致伊利石的大量生成^[29],成岩胶结封闭超压促进了碳酸盐类胶结物的沉淀^[40-41],这两类超压破坏了储层的孔隙,对储层不利。辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩埋深大于3 000 m的超压系数大于1.2(图12a)。前人对该区的研究表明,

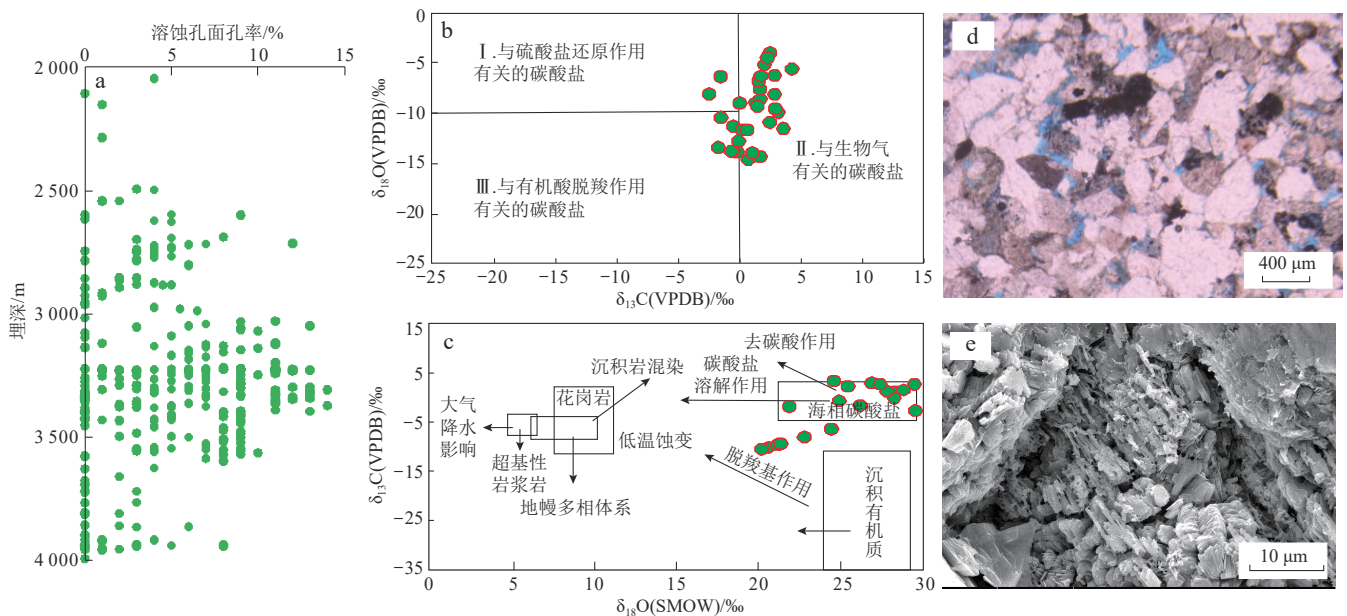


图10 辽中凹陷南部东三段溶解作用对储层的影响

Fig. 10 Effects of dissolution on the physical properties of reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liao Zhong Sag

a. 溶蚀孔随埋深的变化;b. 胶结物碳、氧同位素散点图;c. 碳酸盐胶结物成因判别图;d. 溶蚀孔发育,LD10-B-3井,埋深3 938 m,铸体薄片照片,单偏光;e. 长石沿解理溶蚀,LD10-B-2井,埋深3 597 m,扫描电镜照片

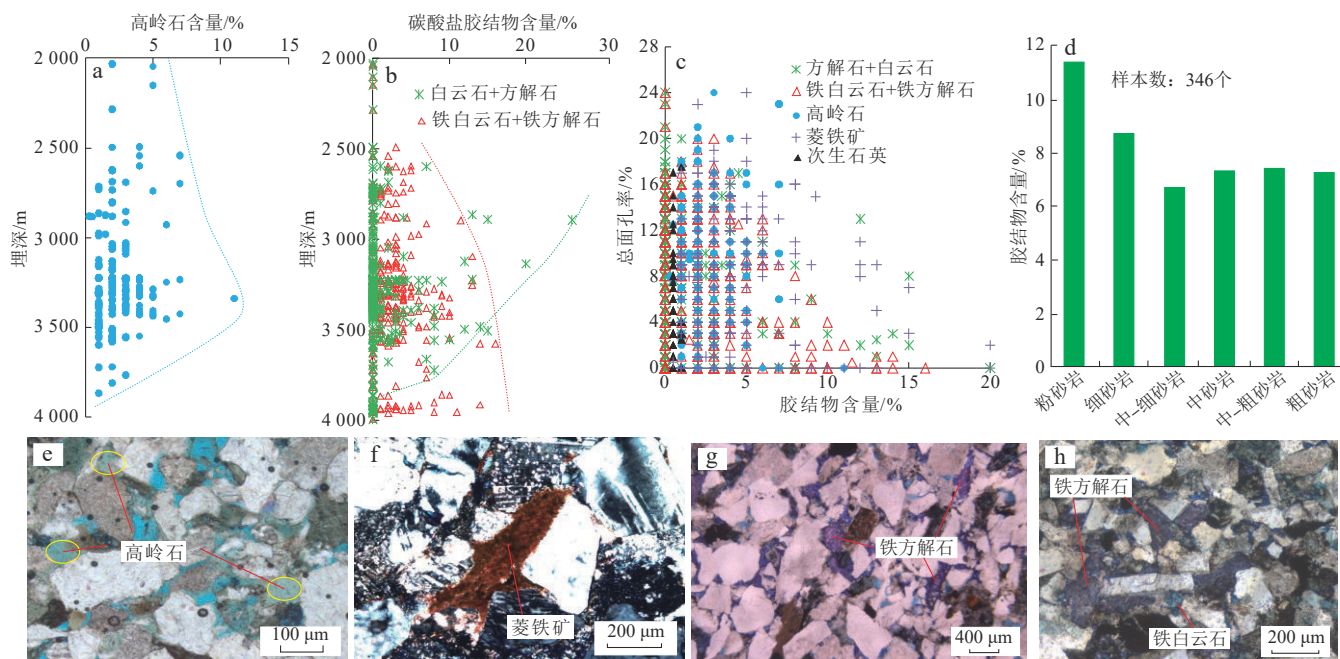


图 11 辽中凹陷南部东三段胶结作用对储层物性的影响

Fig. 11 Effects of cementation on the physical properties of reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liao Zhong Sag

a. 高岭石随深度的变化; b. 碳酸盐胶结物随深度的变化; c. 碳酸盐胶结物与面孔率的关系; d. 不同岩性中的胶结物平均含量; e. 高岭石, 中砂岩, LD10-B-2井, 埋深 3 224.71 m, 铸体薄片照片, 单偏光; f. 菱铁矿, 粗砂岩, LD10-B-6井, 埋深 3 565.00 m, 铸体薄片照片, 正交光; g. 铁方解石充填, 中砂岩, LD10-B-6井, 埋深 3 862.00 m, 铸体薄片照片, 单偏光; h. 铁方解石和铁白云石, 粉砂岩, LD10-B-3井, 埋深 3 579.50 m, 铸体薄片照片, 单偏光

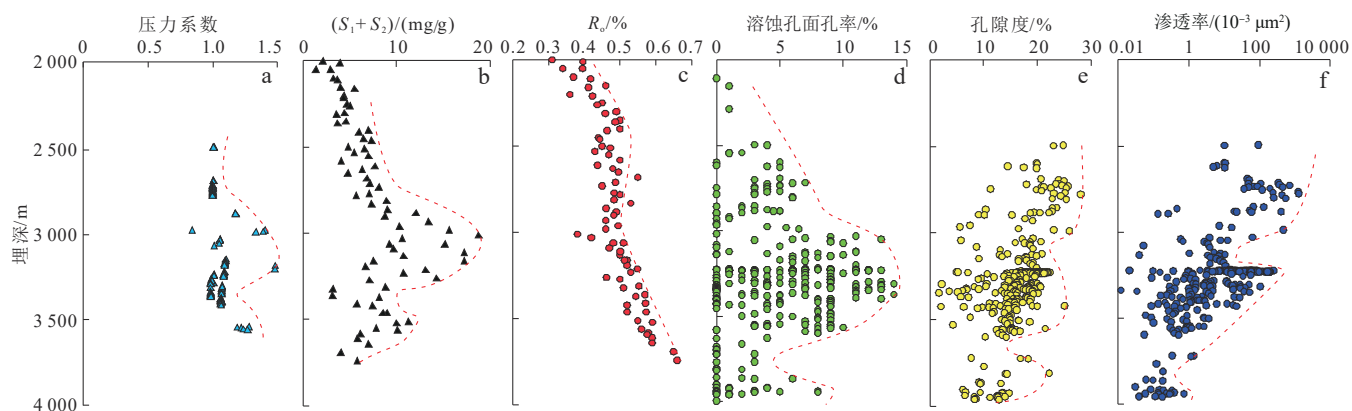


图 12 超压作用对辽中凹陷南部东三段储层物性的影响

Fig. 12 Effects of overpressure on the physical properties of reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liao Zhong Sag

a. 压力系数 vs. 埋深; b. 生烃潜力 (S_1+S_2) vs. 埋深; c. 镜质体反射率 (R_0) vs. 埋深; d. 溶蚀孔面孔率 vs. 埋深; e. 孔隙度 vs. 埋深; f. 渗透率 vs. 埋深

储层的超压类型以生烃超压为主, 叠加欠压实超压^[42]。

研究区东三段碎屑流砂岩呈透镜状被包裹在半深湖-深湖相泥岩中(图 4a), 在没有被构造破坏的情况下, 容易形成相对封闭的成岩系统。研究区东三段在埋藏早期发生了快速沉降^[43], 在不均衡压实作用的影响下, 砂岩中形成了欠压实超压, 表现为异常高孔带中原生孔隙大量发育(图 9b, 图 7b, 图 7c), 甚至在埋深 3 000 ~ 3 700 m 仍存在较多的原生孔, 表明欠压实超

压延缓了压实作用。另外, 在超压发育带, 烃源岩生烃潜力 (S_1+S_2) 出现 2 个异常高值埋深区间(埋深 2 900 ~ 3 210 m, 3 500 ~ 3 700 m)(图 12b), 镜质体反射率 (R_0) 也出现明显增大的趋势(图 12c), 溶蚀孔隙在该埋深段内也出现了异常高值区(图 12d), 薄片下溶蚀孔大量发育(图 7c)。相应地, 砂岩储层的孔隙度和渗透率在该埋深段内出现了异常高值段(图 12e, f), 表明研究区东三段发育的生烃超压促进了大量溶蚀孔的发育。

4.4 断层和构造挤压作用对储层的影响

辽西凹陷南部东三段沉积之后,辽中凹陷南部的郯庐断裂持续活动^[44-45]。受东二段至今活动的走滑断层的持续侧向挤压,研究区东三段砂质碎屑流砂岩储层发生抬升破裂(图13a),形成与走滑相伴生的断层,也导致储层物性继续变好(图13b),其原因主要与储层中形成大量与挤压有关的压裂缝(图13c)和张裂缝(图13d)有关。其中,压裂缝表现为储层中骨架颗粒破碎,并呈条带状分布(图7g,图13c);张裂缝表现为具有一定开度的裂缝(图13d)。

如果断层沟通了烃源岩和砂质碎屑流砂岩储层,这些断层与裂缝会有利于有机酸和烃类进入储层,并对长石等组分进行溶解,形成大量溶蚀孔,有利于储层物性的改善。

5 优质储层发育模式

上述研究表明,辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流

成因的优质储层主要受分选好的厚层粗粒砂岩、浅埋藏、欠压实超压和生烃超压、断层与侧向挤压造成储层破裂的共同影响。根据这些因素分析,本文建立了辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流优质储层的发育模式(图14)。

埋深小于3 500 m的砂质碎屑流砂岩主体,其粒度粗、厚度大、分选好,泥质含量低,压实作用相对较弱,加上生、排烃阶段流体在储层中的流动性好,溶解作用强,且原生孔隙较发育,一般物性较好。发育在砂质碎屑流沉积体边缘的粉砂岩和细砂岩,或砂质碎屑流进一步转化成泥质碎屑流甚至浊流沉积的粉砂岩和细砂岩,分选差,泥质含量高,生、排烃阶段流体在其中的流动性差,容易产生胶结作用,一般物性较差。因此,对于埋深小于3 500 m的砂质碎屑流砂岩储层的油气勘探,尽量避开粉砂岩和细砂岩,寻找砂质碎屑流砂岩主体位置进行优先勘探。

埋深大于3 500 m的砂质碎屑流砂岩,总体上原生孔隙大量减少。但当断层沟通储层与烃源岩时,富含有机酸和烃类的流体沿断层运移至储层中,对长石等组

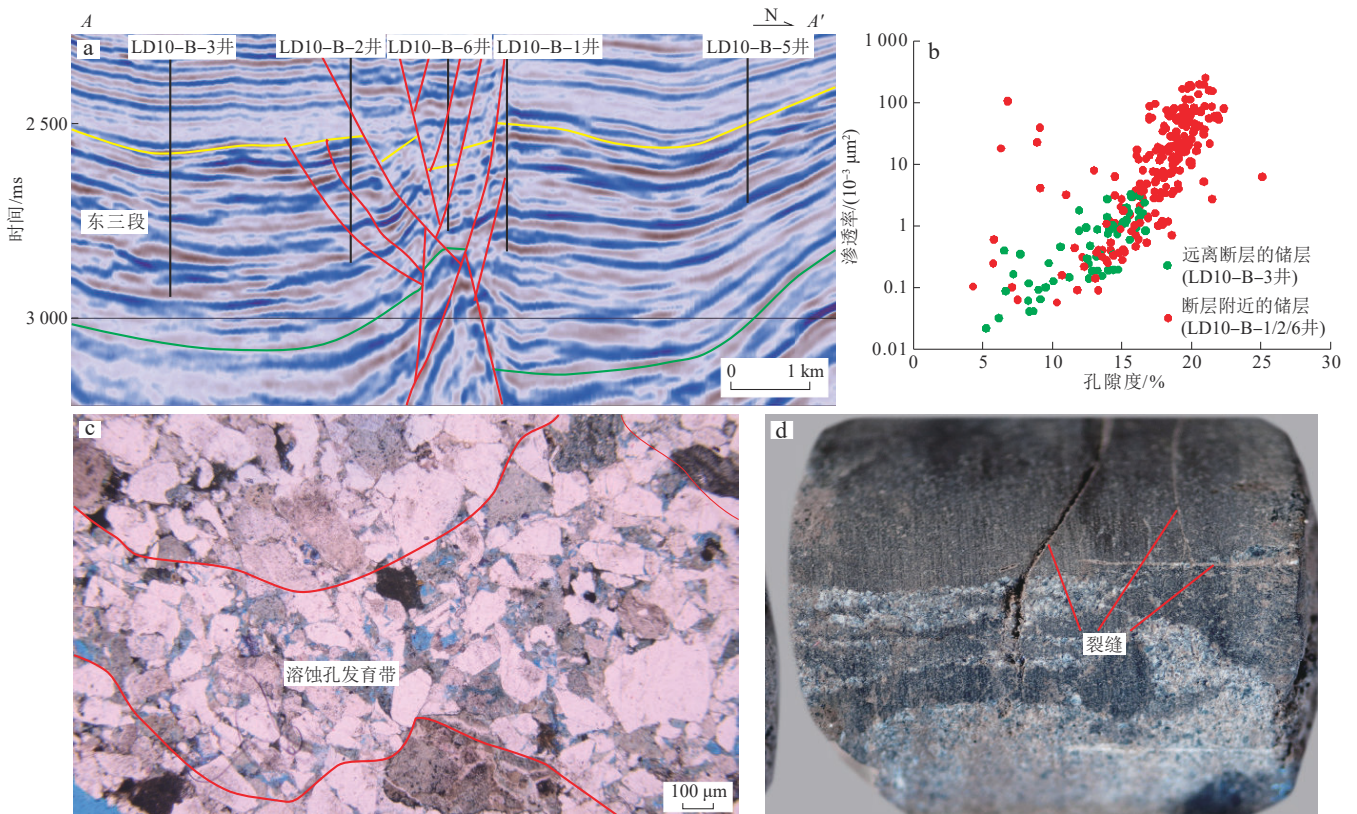


图13 构造挤压和断层发育对辽中凹陷南部东三段储层的影响

Fig. 13 Effects of tectonic compression and faults on the physical properties of reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liao Zhong Sag
a. 地震剖面上砂质碎屑流砂岩储层与断层沟通(剖面位置见图1c); b. 砂质碎屑流砂岩储层物性与断层距离的关系; c. 挤压形成的破裂带,破裂带内裂缝和溶蚀孔发育,破裂带外溶蚀和裂缝不发育,LD10-B-6井,埋深3 322.3 m,铸体薄片照片,单偏光; d. 岩心中发育与伸展断层相关的张裂缝,LD10-B-2井,埋深3 678.0 m,岩心照片

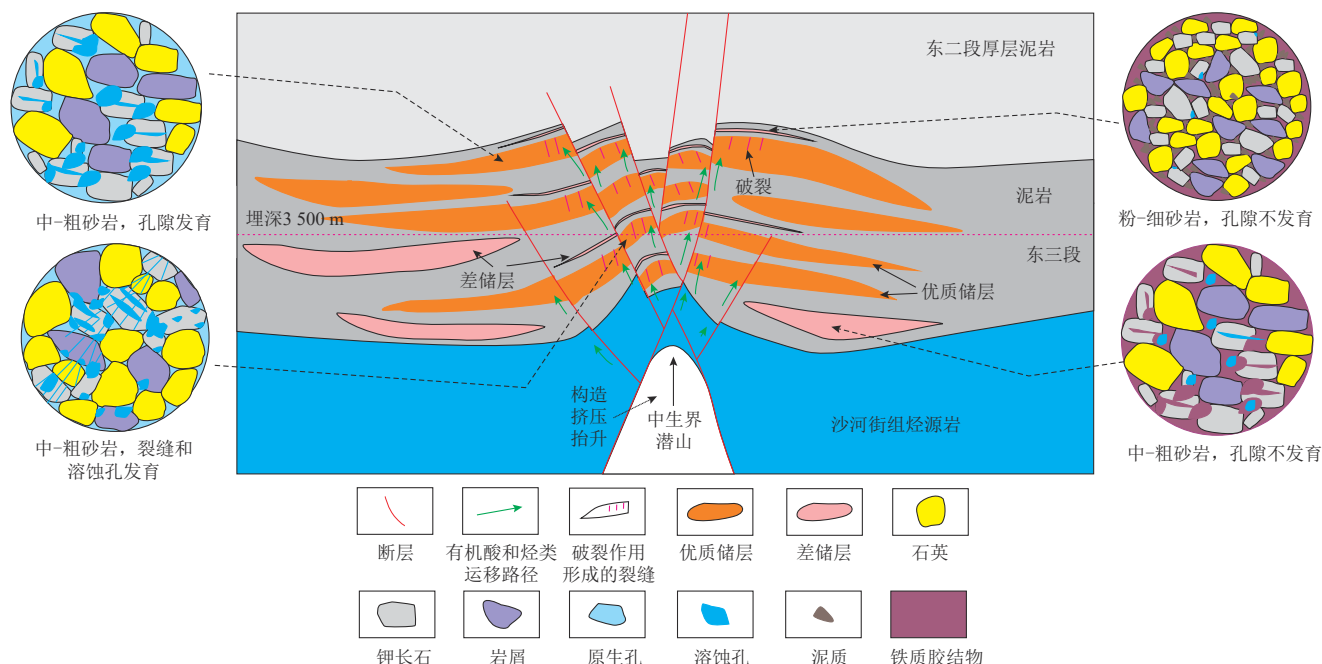


图14 辽中凹陷南部东三段砂质碎屑流砂岩优质储层发育模式

Fig. 14 Development model of high-quality sandy-debris-flow sandstone reservoirs in the Dong 3 Member, southern Liaozhong Sag

分进行溶蚀,形成大量溶蚀孔,改善储层物性。尤其是当储层受走滑断层影响,发生抬升和侧向挤压时,可导致储层发生颗粒破碎作用并形成微裂缝,不仅提高了储层的渗透率,更促进了有机酸和烃类沿破裂带对储层的溶蚀,改善了深层储层的物性。如果砂质碎屑流储层能够形成欠压实和生烃超压,还可以延缓原生孔隙的减少,并促进更多的溶蚀孔形成,进一步拓展优质储层发育的深度。

综上,研究区中-深层的厚层粗粒砂质碎屑流沉积在遭受超压、断层和构造挤压破裂的条件下,可形成有利于优质储层发育的条件。

6 结论

1) 辽中凹陷南部东三段发育的重力流沉积,主要是三角洲前缘发生滑塌后,在前三角洲发生近源堆积的砂质碎屑流沉积。砂岩主体部位单层厚度大,分选好,杂基含量低,富含长石、火山岩屑等颗粒组分,为中-深层优质储层发育提供了物质基础。

2) 研究区东三段砂质碎屑流沉积随着埋深的增加,原生孔隙减少甚至消失,物性逐渐变差,但在中-深层仍具有发育优质储层的条件。主要控制因素包括厚层粗粒砂岩、弱压实作用、强溶解作用、弱胶结作用以及生烃超压等。

3) 如果发育了沟通储层与烃源岩的断层,尤其是

受到走滑作用形成侧向挤压导致储层引发破裂,还可以促进富有机酸和烃类的流体进入储层引发进一步的溶解作用,并有助于溶解产物的迁出,有利于储层物性的进一步改善。

致谢:审稿专家和编辑老师对文章提出了极其宝贵的修改意见,在此表示由衷的感谢!

参 考 文 献

- [1] CAO Yingchang, JIN Jiehua, LIU Haining, et al. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in eastern China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 286-298.
 - [2] ZOU Caineng, FENG Youliang, YANG Zhi, et al. Fine-grained gravity flow sedimentation and its influence on development of shale oil sweet sections in lacustrine basins in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1013-1029.
 - [3] LUAN Xiwu, LU Yintao, FAN Guozhang, et al. Deep-water sedimentation controlled by interaction between bottom current and gravity flow: A case study of Rovuma Basin, East Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 180: 104228.
 - [4] 王敏, 张佳佳, 王瑞峰, 等. 东非鲁伍马盆地深水海底扇储集层质量差异及主控因素 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 491-501.
- WANG Min, ZHANG Jiajia, WANG Ruifeng, et al. Quality variations and controlling factors of deepwater submarine-fan reservoirs, Rovuma Basin, East Africa [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 491-501.

- [5] DODD T J H, MCCARTHY D J, RICHARDS P C. A depositional model for deep-lacustrine, partially confined, turbidite fans: Early Cretaceous, North Falkland Basin [J]. *Sedimentology*, 2019, 66(1): 53–80.
- [6] IGWE E O, OKORO A U. Sediment gravity flows in flood-dominated deltaic setting: Example from the Amasiri sandstone, southern Benue Trough, Nigeria [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(22): 2438.
- [7] MARGHANI M M A, ZAIRI M, RADWAN A E. Facies analysis, diagenesis, and petrophysical controls on the reservoir quality of the low porosity fluvial sandstone of the Nubian Formation, east Sirt Basin, Libya: Insights into the role of fractures in fluid migration, fluid flow, and enhancing the permeability of low porous reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 147: 105986.
- [8] 冯有良, 杨智, 张洪, 等. 咸化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义——以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 839–863.
- FENG Youliang, YANG Zhi, ZHANG Hong, et al. Fine-grained gravity flow sedimentary features and their petroleum significance within saline lacustrine basins: A case study of the Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 839–863.
- [9] 周新平, 何青, 刘江艳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段深水碎屑流沉积特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1063–1077.
- ZHOU Xinping, HE Qing, LIU Jiangyan, et al. Features and origin of deep-water debris flow deposits in the Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1063–1077.
- [10] 符勇, 李忠诚, 万谱, 等. 三角洲前缘滑塌型重力流沉积特征及控制因素——以松辽盆地大安地区青一段为例[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 198–208.
- FU Yong, LI Zhongcheng, WAN Pu, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of slump gravity flow in delta front: A case study of Qing 1 member in Da'an area, Songliao Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 198–208.
- [11] 胡德胜, 宫立园, 满晓, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷雁列断层变换带发育特征及其控储作用——以古近系流沙港组一段重力流沉积为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1359–1369.
- HU Desheng, GONG Liyuan, MAN Xiao, et al. Development pattern of en echelon fault transition zone in Weixi'nan Sag, Beibu Gulf Basin and its control on hydrocarbon accumulation——A case study of gravity flow deposits in the Palaeogene Liu 1 Member [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1359–1369.
- [12] 蒲秀刚, 赵贤正, 王家豪, 等. 渤海湾盆地滨海地区古近系沙河街组一段滑塌型湖底扇储集层特征及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 913–924.
- PU Xiugang, ZHAO Xianzheng, WANG Jiahao, et al. Reservoirs properties of slump-type sub-lacustrine fans and their main control factors in first member of Paleogene Shahejie Formation in Binhai area, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 913–924.
- [13] 杨剑萍, 黄雅睿, 卢惠东, 等. 东营凹陷营11北地区沙三中亚段重力流触发机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 1–11.
- YANG Jianping, HUANG Yarui, LU Huidong, et al. Triggering mechanism of gravity flow sandbodies of middle Es₃ member in the north of Well Ying 11, Dongying Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(4): 1–11.
- [14] 杨田, 操应长, 田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 88–111.
- YANG Tian, CAO Yingchang, TIAN Jingchun. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 88–111.
- [15] 李聪, 鲜本忠, 王鹏宇, 等. 南堡凹陷东北部东二段重力流砂岩储层发育规律[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 159–169.
- LI Cong, XIAN Benzong, WANG Pengyu, et al. Development law of gravity flow sandstone reservoir in the second member of the Dongying Formation in the northeastern Nanpu Depression [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 159–169.
- [16] 杨莎莎, 黄旭日, 贾继生, 等. 黄陵地区延长组长6段深水砂岩储层特征分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(1): 53–65.
- YANG Shasha, HUANG Xuri, JIA Jisheng, et al. An analysis on the characteristics of deepwater sandstone reservoir of Chang 6 member, Yanchang Formation in Huangling area [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(1): 53–65.
- [17] 曹江骏, 陈朝兵, 罗静兰, 等. 自生黏土矿物对深水致密砂岩储层微观非均质性的影响——以鄂尔多斯盆地西南部合水地区长6油层组为例[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(6): 36–49.
- CAO Jiangjun, CHEN Chaobing, LUO Jinglan, et al. Impact of authigenic clay minerals on micro-heterogeneity of deep water tight sandstone reservoirs: A case study of Triassic Chang 6 oil reservoir in Heshui area, southwestern Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(6): 36–49.
- [18] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1098–1111.
- CHEN Chaobing, ZHAO Zhenyu, FU Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1098–1111.
- [19] 徐黎明, 郭茂恒, 刘元博, 等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段深水重力流砂岩储层特征及控制因素——以华池地区CY1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1797–1809.
- XU Liming, GUO Qiheng, LIU Yuanbo, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water gravity flow sandstone reservoir in the Chang 7₃ sub-member in Ordos Basin: Case study of Well CY1 in Huachi area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021,

- 32(12): 1797-1809.
- [20] 曹江骏, 陈朝兵, 程皇辉, 等. 成岩作用对深水致密砂岩储层微观非均质性的影响——以鄂尔多斯盆地合水地区长7油层组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 1031-1046.
- CAO Jiangjun, CHEN Chaobing, CHENG Huanghui, et al. Effect of diagenesis on microheterogeneity of deepwater tight sandstone reservoirs: A case study from the Triassic Chang 7 oil-bearing formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 1031-1046.
- [21] 罗静兰, 罗晓容, 白玉彬, 等. 差异性成岩演化过程对储层致密化时序与孔隙演化的影响——以鄂尔多斯盆地西南部长7致密油积砂岩储层为例[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(1): 79-92.
- LUO Jinglan, LUO Xiaorong, BAI Yubin, et al. Impact of differential diagenetic evolution on the chronological tightening and pore evolution of tight sandstone reservoirs—a case study from the Chang-7 tight turbidite sandstone reservoir in the southwestern Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1): 79-92.
- [22] 刘芬, 朱筱敏, 梁建设, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水重力流岩相发育特征及其储集性[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(6): 46-55.
- LIU Fen, ZHU Xiaomin, LIANG Jianshe, et al. Lithofacies characteristics of gravity flow deposits and their impacts on reservoir quality in the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(6): 46-55.
- [23] 李福来, 王石头, 苗顺德, 等. 华庆地区长6₃段低渗储层特征及优质储层主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6): 1580-1588.
- LI Fulai, WANG Shitou, MIAO Shunde, et al. Characteristics of low permeability reservoirs and main controlling factors of high quality reservoirs of Chang 6₃ member in Huaqing area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1580-1588.
- [24] 刘曦翔, 张宇, 蒲柏宇, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水致密砂岩大气淡水溶蚀及其油气地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(2): 48-55.
- LIU Xixiang, ZHANG Yu, PU Boyu, et al. Meteoric water dissolution in deepwater tight sandstone of Yanchang Formation in Ordos Basin and its geological significance [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(2): 48-55.
- [25] 高丽华, 夏迪, 韩作振, 等. 临南洼陷北部沙三中亚段砂质碎屑流储层定量分类评价[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 71-81, 91.
- GAO Lihua, XIA Di, HAN Zuozhen, et al. Reservoir quantitative classification and evaluation of sand debris flow in middle-Es3 of north of Linnan subsag [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(1): 71-81, 91.
- [26] 张景军, 韩江波, 王畅溪, 等. 南堡凹陷古近系有利构造砂质碎屑流储层评价[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 1-7, 122.
- ZHANG Jingjun, HAN Jiangbo, WANG Changxi, et al. Sandy debris flow reservoir evaluation of Paleogene favorable structures in Nanpu Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 1-7, 122.
- [27] 江琦, 丁晓琪, 刘曦翔, 等. 鄂尔多斯盆地南部长8段砂质碎屑流储层特征及主控因素[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(6): 56-65.
- JIANG Qi, DING Xiaoqi, LIU Xixiang, et al. Reservoir characteristics and control factors of sandy debris flow from Chang 8 interval, south of Ordos Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(6): 56-65.
- [28] 李晓路, 马芳侠, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长6段重力流沉积类型及成因[J]. 断块油气田, 2022, 29(1): 40-46.
- LI Xiaolu, MA Fangxia, HE Yonghong, et al. Sedimentary types and genesis of gravity flow in Chang 6 member of southeastern Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(1): 40-46.
- [29] 张宏国, 吕丁友, 官大勇, 等. 辽东湾地区辽中凹陷东营组湖底扇成藏差异性研究[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 95-106.
- ZHANG Hongguo, LYU Dingyou, GUAN Dayong, et al. Study on hydrocarbon accumulation difference of sub-lacustrine fan in Dongying Formation in Liaozhong Sag, Liaodong Bay [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 95-106.
- [30] 王启明, 杜晓峰, 官大勇, 等. 辽中凹陷中南部西斜坡东三段湖底扇沉积特征与发育模式[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 2979-2992.
- WANG Qiming, DU Xiaofeng, GUAN Dayong, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of sublacustrine fan in the third member of Dongying Formation in the south-central western slope of Liaozhong Sag [J]. Earth Science, 2023, 48(8): 2979-2992.
- [31] 马正武, 官大勇, 王启明, 等. 辽中凹陷古近系东三段湖底扇沉积特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 131-140.
- MA Zhengwu, GUAN Dayong, WANG Qiming, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fans of the third member of Paleogene Dongying Formation in Liaozhong Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 131-140.
- [32] 贾海松, 杨宏飞, 张汶, 等. 渤海辽中中洼东三段湖底扇沉积模式及储层展布特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(5): 21-28.
- JIA Haisong, YANG Hongfei, ZHANG Wen, et al. Sedimentary mode and reservoir distribution characteristics of Ed3 sublacustrine fan in Liaozhong Zhongwa of Bohai Sea [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(5): 21-28.
- [33] 蒋恕, 王浩, 郭涛, 等. 渤海湾盆地辽东湾坳陷盆地隆起缓坡带重力流沉积形态及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 823-832.
- JIANG Shu, WANG Hao, GUO Tao, et al. Geomorphology of gravity flow deposits in the gentle slope zone of intra-basinal high

- in the Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin and its controlling factors [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43 (4): 823-832.
- [34] 张宏国, 吕丁友, 宿雯, 等. 斜坡扇油气运聚关键阶段表征与高丰度油气藏勘探——以辽中凹陷旅大X区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 370-382.
- ZHANG Hongguo, LYU Dingyou, SU Wen, et al. Key accumulation link description of slope fan and exploration practices of high abundance reservoir: Taking LD X area in Liaozhong Sag as an example [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 370-382.
- [35] 黄雪峰, 吴伟, 王星, 等. 辽中凹陷古近系烃源岩特征及有机质丰度控制因素[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(6): 681-686.
- HUANG Xuefeng, WU Wei, WANG Xing, et al. Characteristics of Palaeogene hydrocarbon source rocks and controls on its organic matter abundance in Liaozhong Sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(6): 681-686.
- [36] 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.
- [37] 邱隆伟, 徐宁宁, 周涌沂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储层的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 38-44.
- QIU Longwei, XU Ningning, ZHOU Yongyi, et al. Dissolution of quartz in tight sandstones of the Daniudi area, Ordos Basin, and its influence to high quality reservoirs [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 38-44.
- [38] 尤丽, 范彩伟, 吴仕玖, 等. 莺歌海盆地乐东区块层碳酸盐胶结物成因机理及与流体活动的关系[J]. *地质学报*, 2021, 95 (2): 578-587.
- YOU Li, FAN Caiwei, WU Shijiu, et al. Genesis of carbonate cement and its relationship with fluid activity in the Ledong area, Yinggehai Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95 (2): 578-587.
- [39] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 973-998.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 973-998.
- [40] 孙靖, 尤新才, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地异常压力特征及其对深层—超深层致密储层的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 350-365.
- SUN Jing, YOU Xincan, XUE Jingjing, et al. Characteristics of abnormal pressure and its influence on deep and ultra-deep tight reservoirs in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44 (2): 350-365.
- [41] 范彩伟, 曹江骏, 罗静兰, 等. 异常高压下海相重力流致密砂岩非均质性特征及其影响因素——以莺歌海盆地LD10区中新统黄流组储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 903-915, 949.
- FAN Caiwei, CAO Jiangjun, LUO Jinglan, et al. Heterogeneity and influencing factors of marine gravity flow tight sandstone under abnormally high pressure: A case study from the Miocene Huangliu Formation reservoirs in LD10 area, Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 903-915, 949.
- [42] 王冰洁, 王德英, 郭涛, 等. 渤海湾盆地辽中凹陷南洼超压发育特征及成因[J/OL]. *地球科学*: 1-16[2023-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220110.1355.008.html>.
- WANG Bingjie, WANG Deying, GUO Tao, et al. Development characteristics and origin of overpressure in south of Liaozhong Depression, Bohai Bay Basin [J/OL]. *Earth Science*: 1-16[2023-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220110.1355.008.html>.
- [43] 蒋恕, 蔡东升, 朱筱敏, 等. 辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28 (3): 362-369.
- JIANG Shu, CAI Dongsheng, ZHU Xiaomin, et al. Diagenesis of Liaozhong Sag in Liaohe Depression and pore evolution in its middle-deep strata [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28 (3): 362-369.
- [44] 蒋子文, 罗静兰, 王嗣敏, 等. 郑庐断裂新生代构造演化及其对烃源岩生排烃的影响: 以辽东湾坳陷辽中凹陷为例[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(4): 573-583.
- JIANG Ziwen, LUO Jinglan, WANG Simin, et al. Tectonic evolution of the Tan-Lu fault in the Cenozoic and its effect on hydrocarbon generation and expulsion of source rocks: A case study of the Liaozhong Sag (Liaodong Bay Depression) [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(4): 573-583.
- [45] 王冰洁, 王德英, 王鑫, 等. 渤海湾盆地辽中凹陷南洼走滑转换带特征及其对大、中型油田的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1347-1358.
- WANG Bingjie, WANG Deying, WANG Xin, et al. Characteristics of strike-slip transition zone in southern Liaozhong Sag, Bohai Bay Basin and its control on large/medium-sized oilfields [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1347-1358.

(编辑 梁 慧)