

渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷 古近系深层优质储层形成机制

王永诗¹, 张 顺²

1. 中国石化 胜利油田分公司, 山东 东营 257001;
2. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015

摘要: 随着勘探程度的提高, 渤海湾盆地渤南洼陷油气勘探的主要对象逐渐由中浅层转向中深层。深层勘探的关键问题是优质储层, 其发育取决于沉积充填和地层流体的相互作用。古近系沙河街组四段沉积时期, 该区发育了咸化环境湖相碎屑岩与膏盐层沉积。利用钻井、实验等基础资料, 分析储层沉积环境、地层水特征、岩石学特征及成岩作用类型, 探讨深层优质储层发育演化机制。研究表明: (1) 在分布面积广、沉积厚度大的膏盐层的封闭下, 咸化湖泊环境的沙四段碎屑岩, 早成岩期经历了碱性成岩环境, 形成的碳酸盐胶结物充填原生孔隙, 并有效阻滞压实作用的发生; (2) 随着烃源岩中的有机质趋于成熟, 中成岩期有机酸在异常高压的驱动下向地层中运移, 早期碳酸盐胶结物以及长石、岩屑普遍被溶蚀, 形成次生孔隙, 酸碱交替作用是深层优质储层发育的主要机制; (3) 优质储层的发育受到膏盐层分布、烃源岩发育、断裂体系与碎屑沉积体展布的控制, 受酸碱流体影响强烈的缓坡扇三角洲和陡坡近岸水下扇中前端砂体, 是渤南洼陷沙四段优质储层发育区。

关键词: 优质储层; 膏盐层; 烃源岩; 流体性质; 次生孔隙; 古近系; 渤南洼陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

WANG Yongshi¹, ZHANG Shun²

1. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China;

2. Exploration & Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China

Abstract: With the continuous improvement of exploration degree, the main object for oil and gas exploration in the Bonan Sub sag of Bohai Bay Basin gradually changes from medium and shallow layers to medium and deep layers. The key factor for deep exploration is the development of high-quality reservoir, which depends on the interaction between sedimentary filling and formation fluid. During the deposition of the fourth member of Paleogene Shahejie Formation, lacustrine clastic rocks and gypsum salt deposits developed in this area under a saline environment. Based on the comprehensive study of drilling data and experimental results, the sedimentary environment, formation water characteristics, reservoir petrographic characteristics and diagenetic types of the Paleogene reservoirs in the Bonan Sub sag were discussed, the development and evolution mechanism of the deep and high-quality reservoirs in Paleogene was also indicated. Results show that: (1) Under the sealing of gypsum salt layer with wide distribution area and large sedimentary thickness, the clastic rocks of Es₄ member in salty environment experienced alkaline diagenetic environment in the early stage. The carbonate cements formed in this period filled primary pores and effectively prevented the occurrence of compaction. (2) With the increase of the maturity of organic matters in source rocks, significant organic acid migrated to stratum driven by abnormal high pressure during the middle diagenesis stage. The early carbonate cements, feldspar and debris were generally dissolved and secondary pores were subsequently formed. Acidic and alkaline reworks are the main mechanism for the development of deep high-quality reservoirs. (3) The development of high-quality reservoirs was controlled by the distribution of gypsum salt layer, the development of source rock, fault system and the distribution of clastic sedimentary body. The front sand bodies of gentle-slope fan delta and steep-slope

收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-12-15。

作者简介: 王永诗(1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事石油地质研究与油气勘探管理工作。E-mail: wangyongshi.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家重大科技专项(2016ZX05006-003)资助。

nearshore subaqueous fan strongly influenced by acid and alkali fluid are the high-quality reservoir development area of Es_4 member in Bonan Subsag.

Key words: high-quality reservoir; gypsum salt layer; source rock; fluid property; secondary pore; Paleogene; Bonan Subsag; Bohai Bay Basin

渤南洼陷是渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷中部的一个负向构造单元,北以埕南断裂带与埕东凸起相接,南邻陈家庄凸起,东以孤西断裂带与孤北洼陷相邻,东南以垦西地垒与三合村洼陷、孤南洼陷相接。渤南洼陷是一个北陡南缓的箕状断陷湖盆,受近东西向盆倾断层切割,由南向北依次为罗家鼻状构造带、垦西斜坡带、渤南深洼带和埕南陡坡带(图 1)。古近纪以来,渤南洼陷一直是沾化凹陷的沉降中心之一,湖相环境沉积了一套近 4 000 m 厚的地层。随着中浅层勘探程度的不断提高,渤南洼陷中深层已成为油气勘探的主要对象和“增储上产”的重要勘探领域。近年来,相继在该区陡坡带沙四段深层砂砾岩体中发现油气藏并取得了重大突破,展现了深层巨大的勘探潜力。

研究表明,渤南洼陷中深层油气成藏的关键问题是优质储层的发育,而优质储层的发育取决于沉积充填、地层流体的相互作用^[1-3]。本文以渤南洼陷沙四段为研究对象,在分析构造演化和洼陷沉积物充填特征基础上,研究沙河街组沉积期地层水化学特征,揭示沙四段储层形成机制。

1 构造演化及沉积充填

渤南洼陷构造发育与演化具明显的阶段性,根

据构造活动、不整合及沉积环境、古生物组合等,将古近纪划分为初始裂陷期、裂陷伸展期和裂陷收敛期 3 个阶段,对应形成了 3 个三级层序^[4](图 2)。

1.1 初始裂陷期

初始裂陷期指孔店组和沙四下亚段($Ek+Es_4^{\downarrow}$)沉积时期。该期气候干旱,盆地充填和沉积、沉降中心明显表现出对中生代构造格局的继承性,受控于 NW 向的边界断裂活动,湖盆稳定水体范围小,湖平面振荡频繁,发育了盐湖—咸化环境的洪水—漫湖沉积(SS1)^[5]。其中孔店组二段(Ek_2)为灰色、深灰色泥岩夹砂岩、硬砂岩、含砾砂岩、油页岩、碳质泥岩及煤层等湖相—沼泽相低位体系域沉积;孔一段(Ek_1)为棕红色砂岩与紫红色泥岩不等厚互层,夹少量绿色泥岩,为局限湖相湖扩展体系域沉积。沙四下亚段为河流—浅湖相湖萎缩体系域沉积,缓坡为大套棕色、紫红色泥岩、灰色泥岩和灰色砂砾岩互层的洪积扇沉积;陡坡发育冲积扇—盐湖沉积体系,湖盆中心以大面积分布的膏盐沉积为特征。

1.2 裂陷伸展期

裂陷伸展期即沙四上亚段至沙二下亚段($Es_4^{\uparrow}-Es_2^{\downarrow}$)沉积时期(图 2),这一时期控制凹陷沉积的主断裂处于活动高峰期,造成盆地沉降幅度大,发育了深湖—半深湖沉积(SS2)。其中沙四

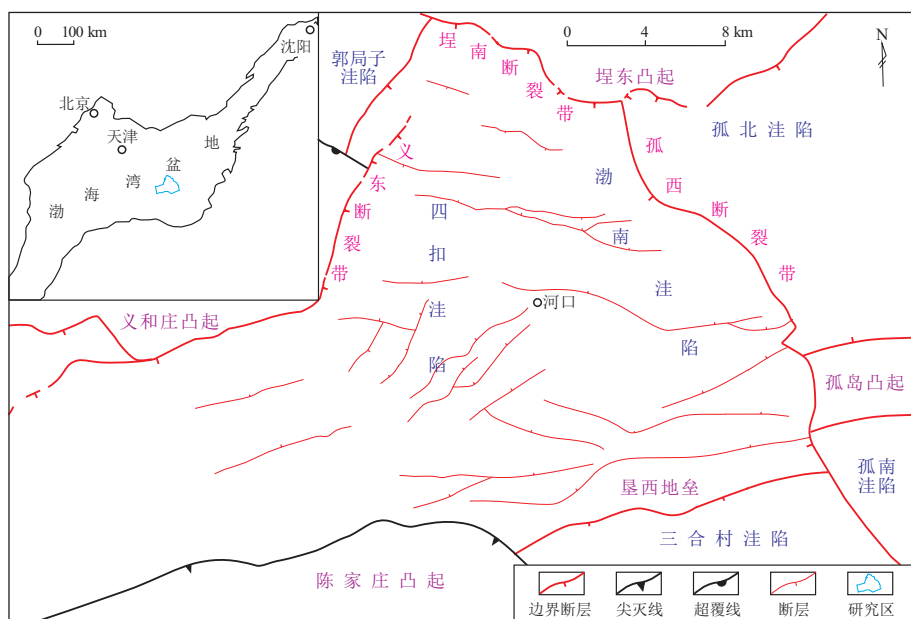


图 1 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷区域构造位置

Fig.1 Structural location of Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

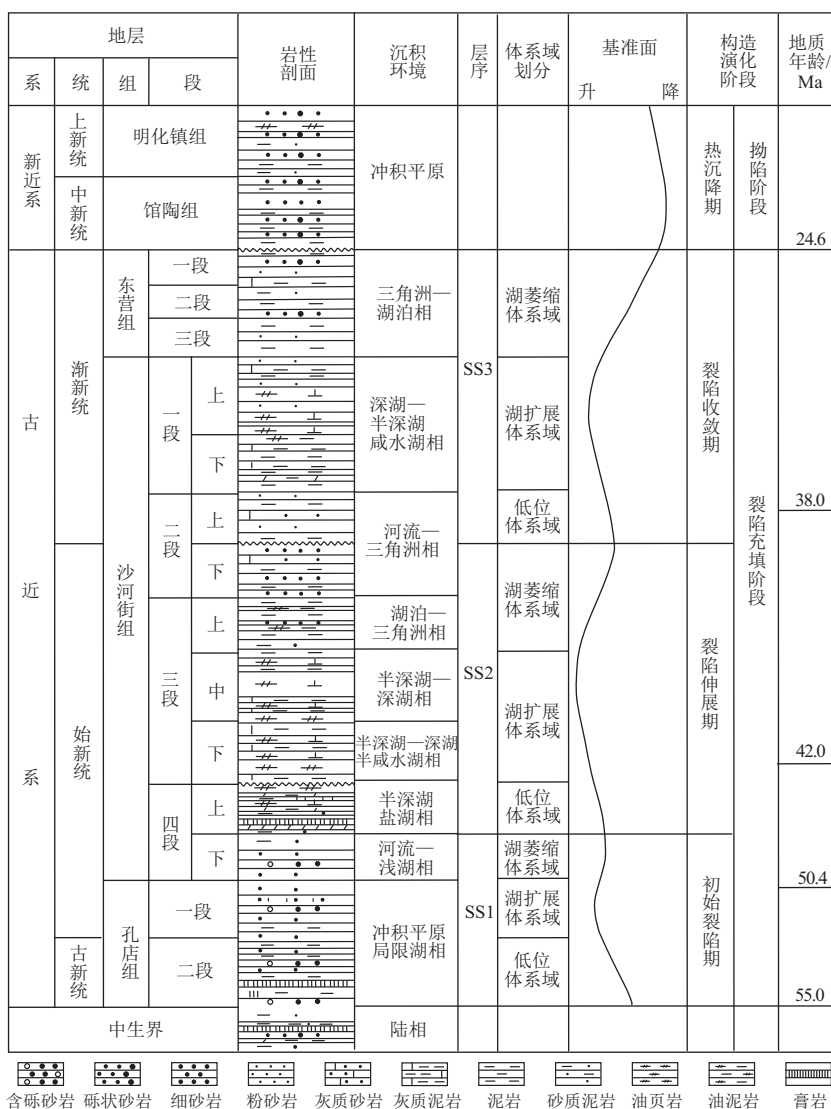


图 2 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近纪构造演化及地层柱状剖面
据李丕龙等^[4]修改。

Fig.2 Structural evolution and stratigraphic column of Paleogene in Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

上亚段为半深湖盐湖相低位体系域沉积,发育了灰色泥岩、灰质、膏质泥岩、膏岩、生物灰岩、灰岩,局部为砂砾岩,岩性分布呈环状,由边缘向洼陷中心依次为砂砾岩区、含膏泥岩区、泥岩区;沙三段为半咸水—淡水湖相沉积的灰色及深灰色泥岩夹砂岩、油页岩及不同成因类型的深水重力流沉积建造,在凹陷边缘发育有冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇等砂砾岩扇体^[6];沙二下亚段多出现在各凹陷中部,向边缘和凸起往往缺失,发育河流—三角洲相湖萎缩体系域沉积,岩性为绿色、灰色泥岩与砂岩、含砾砂岩互层,夹碳质泥岩。

1.3 裂陷收敛期

裂陷收敛期即沙二上亚段至东营组 (E_{s2}^上—Ed) 沉积时期,这一时期盆地扩张沉降的幅度明显弱于断陷深陷期,形成浅断陷湖盆沉积 (SS3)。其

中沙二上亚段岩性为灰绿色、紫红色泥岩与灰色砂岩互层,夹钙质砂岩、含鲕砂岩及含砾砂岩;沙一段主要由灰色、深灰色、灰褐色泥岩、油泥岩、碳酸盐岩和油页岩组成,属深湖—半深湖咸水湖相湖扩展体系域沉积,以浅湖相灰色泥岩、油页岩、生物灰岩夹细砂岩沉积为特征;东营组以河流冲积相细砂岩、含砾砂岩夹灰色、灰绿色及紫红色泥岩为主。

2 地层水化学特征

地层水化学特征及成因决定着成岩作用的类型,通常用矿化度、水型和常量组分等对地层水化学特征进行表征。

总矿化度是指地下水中所含各种离子、分子与化合物的总量 (总溶解固体),以每升中所含克数表示,通常用 110 °C 下把水分蒸干所剩残渣的量来

计量。地层水的矿化度特征是地理地质环境变迁所导致的地下水动力场和水化学场经历漫长而复杂演化的反映,矿化度对地层水的化学性质起着主导作用,纵横向的矿化度变化对解决地质问题有重要意义。依据苏林分类,水型可分为 CaCl_2 型、 NaHCO_3 型、 MgCl_2 型及 Na_2SO_4 型。地下水中的常量化学组分主要包括: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 。

根据含油气盆地的地层水文地质预测与判断油气的需要,选择主要的离子比值作为特征指标:包括钠氯系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 、变质系数 $[r(\text{Cl}^-)-r(\text{Na}^+)]/r(\text{Mg}^{2+})$ 、脱硫酸系数 $r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100/r(\text{Cl}^-)$ 。

钠氯系数是单位体积卤水中钠离子与氯离子的当量比值,表示地层水中钠盐的富集程度,其因为浓缩变质作用,地层水封闭越好,越浓缩、变质越深,其值越小。变质系数指示地层水在运移过程中水岩作用的强度和离子交替置换的程度,反映流体的变质程度,即流体—岩石相互作用程度或封闭程度,一般其值越大,表明流体的变质程度越强,流体—岩石相互作用强度越大。脱硫酸系数指示地层水中脱硫酸作用,其结果不仅是除去水中的硫酸盐,还包括生成硫化氢气体并进入到天然气中。脱硫酸作用通常都是在缺氧的还原环境中进行,这种环境对保存油气很有利,故脱硫酸作用可作为反映地下水氧化还原环境的重要指标,在封闭的油气藏中,脱硫酸系数一般都很低。

受沉积埋藏水及后期水—岩作用的影响^[7-8],渤南海陷在古近纪经历了咸化湖盆到淡水湖盆的发育过程。从各层系水型分布特征及沙河街组水化学指标(表 1)可以看出,沙河街组地层水主要分为三类,以 NaHCO_3 型为主, CaCl_2 型次之;而东营组和馆陶组则以 CaCl_2 型为主, NaHCO_3 型次之(图 3)。

2.1 沙四段地层水化学特征

渤南海陷沙四段沉积发育了厚层膏盐层,渤深 5 井的沉积厚度达到 186 m。该段膏盐层分布面积

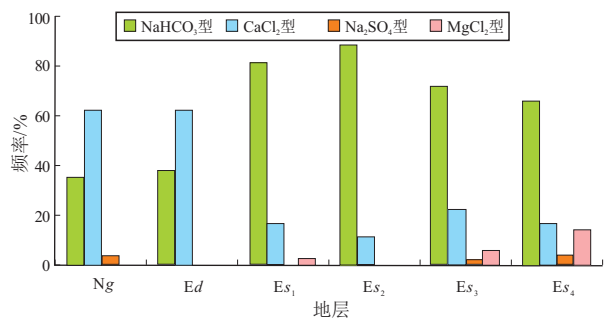


图 3 渤海湾盆地沾化凹陷渤南海陷各层系地层水水型分布
Fig.3 Distribution of formation water types of each stratum in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

广,沉积厚度大,各项水化学指标指示渤南海陷沙四段沉积整体环境较封闭,不同区带水体矿化度存在明显差异。渤南海陷带内地层水矿化度在 10~40 g/L,水型主要为 CaCl_2 型;垦西斜坡带内地层水矿化度分布在 5~20 g/L,水型主要为 NaHCO_3 型。

2.2 沙三段地层水化学特征

沙三段埕南断阶带—渤南海陷带地层水矿化度明显高于垦西斜坡带地层水矿化度。其中渤南海陷带为矿化度高值区,矿化度为 10~40 g/L,钠氯系数主要为 0.85~1.2,脱硫酸系数也小于 1;垦西斜坡带矿化度值都较小,分布在 5~10 g/L 之间,钠氯系数大于 1.2,变质系数小于 -10。

2.3 沙一段地层水化学特征

沙一段绝大部分地区的地层水矿化度都小于 15 g/L, NaHCO_3 型水约为 81%, CaCl_2 型水主要分布在孤岛凸起周围孤北断裂和孤西断裂处。沙一段绝大部分地区钠氯系数都大于 1,在渤南海陷出现局部高值区;变质系数绝大部分地区都小于 0,整体变质程度较低,变质系数低值区与钠氯系数高值区大体一致。

3 深层优质储层形成机制

在传统认识中,3 500 m 以下储层孔隙度普遍小于 10%,缺失优质储层^[9-10]。深层储层在埋藏

表 1 渤海湾盆地沾化凹陷渤南海陷古近系沙河街组地层水化学指标

Table 1 Hydrochemical indexes of Paleogene Shahejie Formation in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

层系	区域	矿化度/(g·L ⁻¹)	水型	钠氯系数	变质系数	脱硫酸系数
沙四段	渤南海陷带	10~40	CaCl_2 型	0.85~1	0~10	0~1
	垦西斜坡带	5~20	NaHCO_3 型	1~1.2	<0	1~5, 5~10
沙三段	埕南断阶带—渤南海陷带	10~40	NaHCO_3 型、 CaCl_2 型	0.85~1.2	-10~10	0~1
	垦西斜坡带	5~10	NaHCO_3 型	>1.2	<-10	1~10
沙一段	垦西斜坡带	5~10	NaHCO_3 型	>1	-10~0	1~5

成岩演化的漫长过程中,不同性质的流体决定着储层演化及孔隙发育^[11]。许多学者认为有机质演化过程产生的酸性流体对储层改善明显^[12-14],相关学者也就碱性流体成因及其控储作用进行了初步的研究^[15-17]。本文以渤南洼陷北部陡坡带深层沙四上亚段砂岩储层为例,论述优质储层形成机制。

3.1 储层岩石学特征

渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段岩性以岩屑长石砂岩为主,次为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩(图 4)。其中石英含量在 1%~70% 之间,主要由单晶石英组成,颗粒一般呈棱角一次棱角状,分选中等偏差,常具次生加大边;长石含量在 2%~45% 之间,长石类型多为斜长石和钾长石,长石颗粒内部常沿解理缝或破裂缝发生溶蚀形成粒内溶孔,部分完全溶蚀形成铸模孔,成为主要的孔隙类型之一;岩屑含量介于 17%~99%,岩屑成分一般以中酸性喷出岩、石英岩和泥质岩屑为主,受成岩作用影响,较软的塑性岩屑常受挤压变形呈假杂基。填隙物包括杂基和胶结物,黏土矿物是填隙物重要的组成部分,X 射线衍射分析黏土矿物含量在 1%~44% 之间;胶结物以方解石为主,见少量铁白云石和黄铁矿。

3.2 储层成岩演化特征

渤南洼陷沙四段成岩环境经历了从碱性到酸性的变化,这可在黏土矿物、增生石英和胶结物含量上体现出来。沙四段沉积于咸化水体环境,伴随着膏岩的脱水作用,早成岩 A 期,随着压实作用的

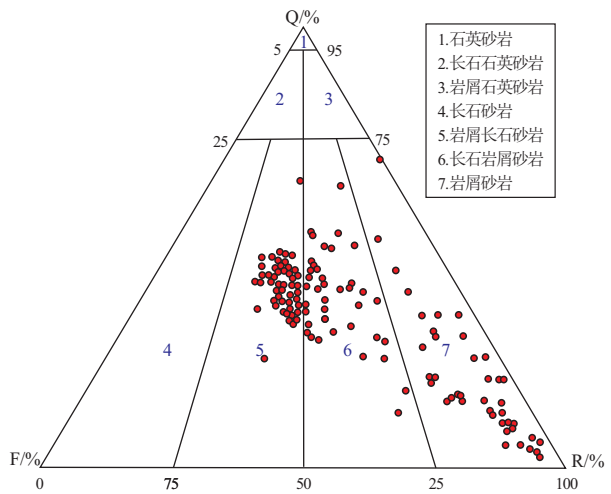


图 4 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系沙四上亚段碎屑岩岩石类型

Fig.4 Rock types of clastic rocks in upper section of fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

进行,原生粒间孔减少,颗粒呈点状接触,在碱性流体作用下,碳酸盐胶结物不断产生,当埋深达到 2 800 m 时方解石胶结物含量高达 25%,高岭石含量为 20% 左右,这一层段正是对应了膏盐层和灰岩的集中发育段,大量的碳酸盐胶结物充填原生孔隙,并有效阻滞压实作用的发生;早成岩 B 期,随着埋深的不断增大,机械压实作用持续进行,碳酸盐胶结物含量升高并一直持续到 3 300 m (图 5a-b,图 6),当烃源岩埋深超过 2 800 m 时,镜质体反射率(R_o)达到 0.5%,烃源岩开始排出有机酸,碳酸

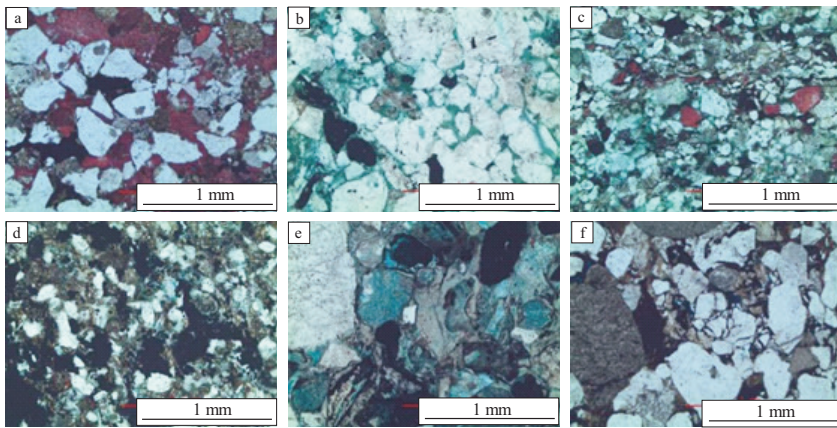


图 5 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系储层主要成岩作用类型及成岩现象

a. 早期胶结作用强,红色方解石大量充填原生孔隙,原生孔隙所剩无几,后期溶蚀作用微弱,有少量粒间溶蚀孔发育,罗 354 井,2 964.9 m,5×10(-); b. 早期胶结作用强,碳酸盐胶结物大量出现,抑制压实,中后期溶蚀作用中等,产生少量粒间孔及铸模孔,义 160 井,3 129.29 m,5×10(-); c. 早期胶结和后期溶蚀作用都较弱,早期红色方解石胶结充填原生孔隙,后期方解石胶结物和长石、岩屑被溶蚀,产生粒间溶孔,罗 802 井,2 022.5 m,5×10(-); d. 后期溶蚀作用强烈,早期胶结物基本被完全溶蚀,长石、岩屑部分溶蚀,产生大量粒间、粒内溶蚀孔,罗 803 井,2 235.29 m,10×10(-); e. 压实作用强烈,长石、岩屑被大量溶蚀,产生较多次生孔隙,义 161 井,3 480.65 m,5×10(-); f. 压实作用强烈,溶蚀作用中等,粒间、粒内溶蚀孔发育,义东 261 井,4 089 m,5×10(-)

Fig.5 Types and phenomena of diagenetic effects of Paleogene reservoirs, Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

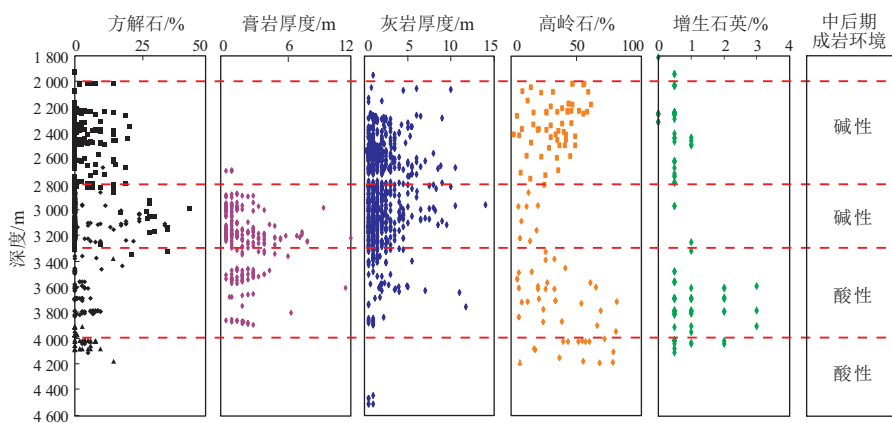


图 6 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系成岩环境及成因分析

Fig.6 Diagenetic environment and genetic analysis of Paleogene in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

盐胶结物开始溶蚀,长石、岩屑微弱溶蚀,颗粒呈点一线状接触,发育少量粒间—粒内溶孔(图 5c)。

中成岩 A 期,当烃源岩埋深超过 3 300 m,且 $R_o > 0.7\%$ 时,有机质热演化程度增强,有机酸数量增多,大量有机酸完全中和掉早期的碱性流体,早期的碱性成岩环境逐渐变为酸性成岩环境;伴随着烃源岩热演化,地层产生异常高压,有机酸在异常高压的驱动下向地层中运移,各类型储集体大量出现了溶蚀现象,且埋深越大,溶蚀作用越强烈,早期碳酸盐胶结物以及长石、岩屑普遍被溶蚀(图 5d),方解石含量降低到 10% 以下,高岭石、增生石英含量逐渐升高,在压实强烈的紧密储层中发育了相当数量的粒间、粒内溶蚀孔隙(图 5e-f,图 6)。中成岩 B 期,当埋深到达 4 000 m 时, $R_o > 1.0\%$,进入生凝析气、湿气阶段;随着埋深的不断增大,有机酸的影响作用越来越弱^[18-19],逐渐演变为中酸性、弱酸性环境;铁质碳酸盐胶结物出现,颗粒呈凹凸接触,颗粒间及颗粒与胶结物之间出现裂缝。

3.3 酸碱共控成储机制

渤南洼陷沙四上亚段为半深湖盐湖相低位体系域沉积,发育了膏质泥岩、膏岩、灰岩和暗色泥岩的互层沉积。成岩作用早期,伴随着膏岩的脱水作用,在碱性成岩环境下,碳酸盐胶结物广泛发育,其中在 2 800 ~ 3 300 m 胶结作用格外强烈,随着压实作用和碳酸盐胶结作用加强,储集物性变差,大量的碳酸盐胶结物充填原生孔隙,并有效阻滞压实作用的进行,为后期酸性溶蚀创造了条件;当埋深超过 3 300 m 时,镜质体反射率大于 0.7%,暗色泥岩、膏质泥岩进入主要的生排烃阶段,有机酸也大规模排出,这时成岩环境演变为酸性,伴随而来的是成岩作用的改变,这种改变首先体现在早期碳酸盐胶结物被大量溶蚀,由溶蚀作用增大的孔隙度大

于压实作用减少的孔隙度,因此形成了次生孔隙发育带;当埋深超过 4 000 m 时, $R_o > 1.0\%$,并随着深度的增加,有机酸的波及程度降低,加之埋藏较深,压实作用已十分强烈,形成的致密储层在溶蚀作用减弱的情况下孔隙度总体较低,仅有少许溶蚀作用形成的次生孔隙存在(图 7)。

在成岩流体作用下,前期碱性流体形成碳酸盐胶结,抑制压实,保护了原生孔隙结构;后期酸性流体溶蚀碳酸盐胶结物,形成次生孔隙。酸性地层流体和碱性地层流体交替控制了有效储层发育,是深层优质储层发育的主要机制。

4 有利储层预测

渤南洼陷深层古近系沙四段优质储层的发育,受膏盐层分布、烃源岩分布、断裂体系展布与沉积储层展布的控制。首先,膏盐层发育决定了早成岩期碱性流体的分布,在渤南洼陷沙四段沉积期膏盐层非常发育,平面上主要分布在洼陷的中部,呈团块状近东西向展布,厚度最大可达 100 m,厚度高值区集中在东、西 2 个次洼中,展布范围较大(图 8a);其次,烃源岩发育决定了中成岩期酸性流体的分布,从沙四上亚段湖侵体系域的烃源岩展布看,其厚度高值区集中在洼陷北部的深洼带,向南烃源岩厚度逐渐变薄,但展布范围一直延伸到南部缓坡盆缘处(图 8b);再次,断裂体系对酸碱流体起输导作用,沙四段顶面断裂系统总体上较发育,主要可分为近东西向与北东向两组断裂体系,在膏盐层和烃源岩发育区断裂系统也较发育,为酸碱流体的流动提供运移通道(图 8c);最后,砂岩发育是优质储层发育的关键,只有在膏盐层分布、烃源岩分布、断裂体系展布与沉积储层展布叠合的区域,才可能形成深部优质储层。渤南洼陷优质储层发育

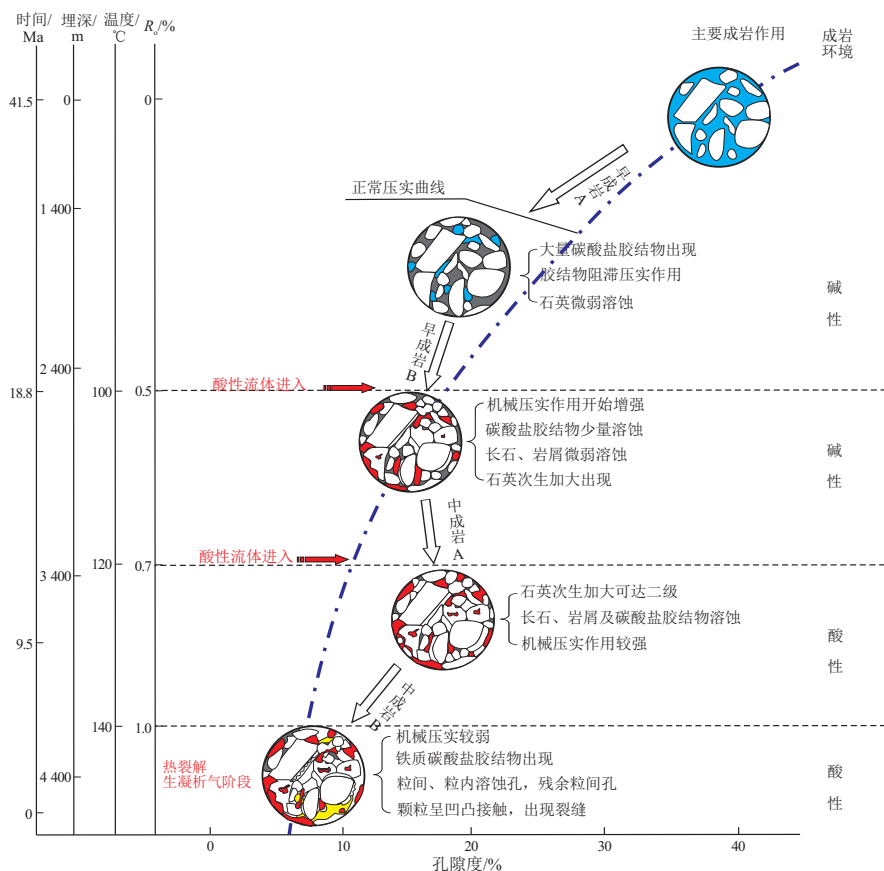


图 7 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系沙河街组四段碎屑岩成岩演化及储层发育模式
 Fig.7 Diagenetic evolution of clastic rocks and reservoir development model of fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

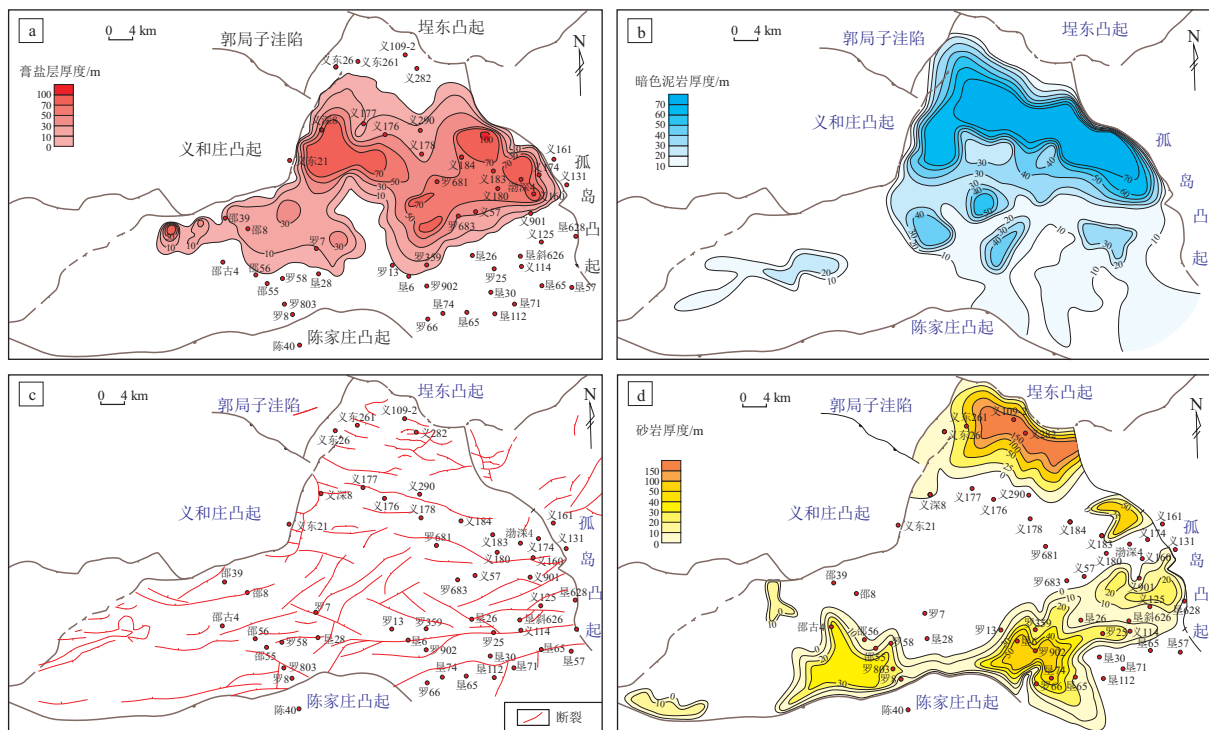


图 8 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系沙河街组四段优质储层发育相关要素平面分布
 a.膏盐层分布;b.烃源岩分布;c.断裂分布;d.砂岩分布

Fig.8 Factors related to development of high-quality reservoirs in fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

于北部陡坡近岸水下扇沉积区和南部缓坡扇三角洲沉积区(图 8d),其中在北部发育的近岸水下扇优质储层向前推进距离较远,在纵、横向上和多套膏盐层和烃源岩叠置对接。

纵向上膏盐层发育段是碱性流体影响强烈层段,而酸性流体的影响范围及作用强弱在不同深度段的表现有所不同,其中 2 800~3 300 m 为弱酸性,3 300~4 000 m 为中酸性,4 000 m 以深酸性环境逐渐变弱。酸碱流体共同作用的 3 300~4 000 m 层段是深部优质储层发育段。因此,渤南洼陷沙四段优质储层发育区为受酸碱流体影响强烈的缓坡扇三角洲和陡坡近岸水下扇中前端砂体(图 8)。

5 结论

(1)渤南洼陷沙四段发育了盐湖—咸化环境的湖相碎屑岩沉积,湖盆中心以大面积分布的膏盐沉积为特征,由盆缘向洼陷中心依次为砂砾岩区、含膏泥岩区、灰岩泥岩区。砂砾岩岩性以岩屑长石砂岩为主,黏土矿物是填隙物重要的组成部分,胶结物以方解石为主,长石颗粒形成的铸模孔是主要的孔隙类型。

(2)渤南洼陷沙四段碎屑岩经历了早成岩期碱性成岩环境,碳酸盐胶结物充填原生孔隙并有效阻滞压实作用的发生,保护了原生孔隙结构;中成岩期,有机酸在异常高压的驱动下向地层中运移,早期碳酸盐胶结物以及长石、岩屑普遍被溶蚀,发育了相当数量的粒间、粒内溶蚀孔隙。酸性流体和碱性流体交替作用控制了有效储层发育,是深层优质储层发育的主要机制。

(3)渤南洼陷深层古近系沙四段优质储层的发育,受膏盐层分布、烃源岩分布、断裂体系展布及沉积储层展布的控制,酸性和碱性流体共同作用对应的埋深 3 300~4 000 m 层段是深部优质储层发育段,为缓坡扇三角洲和陡坡近岸水下扇中前端砂体。

参考文献:

[1] 宫秀梅,金之钧,曾溅辉,等.渤南洼陷深层油气成藏特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2005,26(4):473-479.
GONG Xiumei, JIN Zhijun, ZENG Jianhui, et al. Reservoiring characteristics and main controlling factors for deep hydrocarbon accumulations in Bonan Sag in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 473-479.

[2] 刘雅利,程付启,庄嘉翠,等.渤南洼陷北部陡坡带砂砾岩扇体油气成藏规律[J].油气地质与采收率,2010,17(6):23-26.
LIU Yali, CHENG Fuqi, ZHUANG Jiacui, et al. Hydrocarbon

accumulation law of conglomerate bodies on the northern steep slope in Bonan Sub-sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(6): 23-26.

[3] 徐兴友,徐国盛,秦润森.沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(2):113-120.
XU Xingyou, XU Guosheng, QIN Runsen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of member 4 of Shahejie Formation in Bonan Sag, Zhanhua Depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(2): 113-120.

[4] 李丕龙.陆相断陷盆地油气地质与勘探(卷二):陆相断陷盆地沉积体系与油气分布[M].北京:石油工业出版社,2003:52-55.
LI Pilong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin (volume 2): sedimentary system and hydrocarbon distribution of continental fault basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 52-55.

[5] 朱光有,金强,张善文,等.渤南洼陷盐湖—咸水湖沉积组合及其油气聚集[J].矿物学报,2004,24(1):25-30.
ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHANG Shanwen, et al. Salt lake-saline lake sedimentary combination and petroleum accumulation in the Bonan Sag[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(1): 25-30.

[6] 武恒志.断陷盆地砂砾岩体的发育特征:以沾化凹陷埕南断裂带下第三系沙三段为例[J].石油与天然气地质,2001,22(1):52-56.
WU Hengzhi. Development characteristics of sand-conglomerate bodies in fault-depressed basins; take Eocene Sha-3 Member in Chengnan Fault Belt as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 52-56.

[7] 郝芳,董伟良.沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J].地球科学进展,2001,16(1):79-85.
HAO Fang, DONG Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 79-85.

[8] 王伟,纪友亮,张善文,等.胜利油区古近系地层水性质对储层物性的影响[J].高校地质学报,2007,13(4):714-721.
WANG Wei, JI Youliang, ZHANG Shanwen, et al. Effects of Paleogene formation water on physical properties of reservoirs in Shengli Oil Zone[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(4): 714-721.

[9] 操应长,张少敏,王艳忠,等.渤南洼陷近岸水下扇储层岩相—成岩相组合及其物性特征[J].大庆石油地质与开发,2015,34(2):41-47.
CAO Yingchang, ZHANG Shaomin, WANG Yanzhong, et al. Combination and physical property characteristics of the lithofacies and diagenetic facies for the nearshore subaqueous fan reservoirs in Bonan Sag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(2): 41-47.

[10] 李会军,吴泰然,吴波,等.中国优质碎屑岩深层储层控制因素综述[J].地质科技情报,2004,23(4):76-82.
LI Huijun, WU Tairan, WU Bo, et al. Distribution and contro-

- lling factors of high quality clastic deeply buried reservoirs in China [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 76-82.
- [11] 董果果, 黄文辉, 万欢, 等. 东营凹陷北部陡坡带沙四上亚段砂砾岩储层固体—流体相互作用研究 [J]. 现代地质, 2013, 27(4): 941-948.
DONG Guoguo, HUANG Wenhui, WAN Huan, et al. Solid-fluid interaction in glutenite reservoirs of the Upper Submember, Fourth Member, Shahejie Formation in northern slope of Dongying Sag [J]. Geoscience, 2013, 27(4): 941-948.
- [12] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因 [J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.
ZHU Xiaomin, WANG Yingguo, ZHONG Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang Sag [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 197-204.
- [13] 张善文, 袁静, 隋风贵, 等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式 [J]. 地质科学, 2008, 43(3): 576-587.
ZHANG Shanwen, YUAN Jing, SUI Fenggui, et al. Multiple diagenetic environments and evolution model in deep formation of the 4th member, Shahejie Formation in the northern Dongying Sag [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 576-587.
- [14] 晷灵, 张枝焕, 王顺华, 等. 渤南洼陷北部陡坡带砂砾岩储层成岩作用研究 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 299-306.
ZAN Ling, ZHANG Zhihuan, WANG Shunhua, et al. Diagenesis of sandy conglomerate reservoir in northern steep slope of Bonan Subsag [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 299-306.
- [15] 王永诗, 王勇, 郝雪峰, 等. 深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏: 以济阳坳陷东营凹陷古近系为例 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 490-498.
WANG Yongshi, WANG Yong, HAO Xuefeng, et al. Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: a case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 490-498.
- [16] 王永诗, 王勇, 朱德顺, 等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩优质储层成因 [J]. 中国石油勘探, 2016, 21(2): 28-36.
WANG Yongshi, WANG Yong, ZHU Deshun, et al. Genetic mechanism of high-quality glutenite reservoirs at the steep slope in northern Dongying Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 28-36.
- [17] 吴富强, 鲜学福, 胡雪, 等. 次生孔隙形成机制探讨: 以渤南洼陷为例 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 3-5.
WU Fuqiang, XIAN Xuefu, HU Xue, et al. Discussion on the forming mechanism of secondary pores: taking Bonan Subsag in Jiyang Depression as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1): 3-5.

(编辑 徐文明)

(上接第 10 页)

- [28] 杨玉华. 三肇凹陷扶杨油层凹陷区上生下储式源储组合油分布规律及其控制因素 [J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(2): 1-5.
YANG Yuhua. Oil distribution law and its influence factors in combination of generation upper and reservoir lower of depression; a example of FY oil layer in Sanzhao Depression [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(2): 1-5.
- [29] 王琼. 齐家古龙地区生、排烃史研究及其意义 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
WANG Qiong. Kinetics of carbon isotope fractionation in the process of organic thermally cracking into natural gas and its application [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [30] LI Dan, DONG Chunmei, LIN Chengyan. Control factors on tight sandstone reservoirs below source rocks in the Rangzijing slope zone of southern Songliao Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 742-750.
- [31] 宋涛, 李建忠, 姜晓宇, 等. 渤海湾盆地冀中拗陷束鹿凹陷泥灰岩源储—体式致密油成藏特征 [J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(6): 47-54.
SONG Tao, LI Jianzhong, JIANG Xiaoyu, et al. Features of marl tight oil in source rock and reservoir in Shulu Sag of central Hebei Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(6): 47-54.
- [32] 赵俊龙, 张君峰, 许浩, 等. 北美典型致密油地质特征对比及分类 [J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 44-50.
ZHAO Junlong, ZHANG Junfeng, XU Hao, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical tight oil in North America [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 44-50.
- [33] MARTIN R, BAIHLI J, MALPANI R, et al. Understanding production from Eagle Ford-Austin chalk system [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2011: 145117.
- [34] 严锐涛, 徐怀民, 易震, 等. 准噶尔盆地东部沙帐地区中二叠统平地泉组一段致密油源储组合模式 [J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 783-790.
YAN Ruitao, XU Huaimin, YI Zhen, et al. Composite model of sources and reservoirs for Middle Permian P₂p₁ tight oil in the Shazhang area, eastern Junggar Basin [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 783-790.
- [35] 高雄雄, 罗群, 姚立邈, 等. 源储组合特征对花海凹陷致密油成藏的影响 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 55-58.
GAO Xiongxiang, LUO Qun, YAO Limiao, et al. The effect of source-reservoir combinations on tight oil accumulation in Huahai Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 55-58.

(编辑 徐文明)