

渤海湾盆地秦南凹陷东南缘中深层砂砾岩优质储层发育的控制因素

王冠民^{1,2}, 张 婕¹, 王清斌³, 李佳伟¹

[1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 塘沽 300457]

摘要:渤海湾盆地秦南凹陷东南缘中深层沙一、二段普遍发育扇三角洲相的砂砾岩低孔低渗储层,局部层段发育高孔高渗带,储集空间以溶蚀孔、生物体腔孔为主,有利储层发育机理与目前所发现的一般致密砂砾岩不完全相同。利用岩心、铸体薄片、埋藏史及流体包裹体等分析手段,对秦南凹陷中深层沙一、二段砂砾岩优质储层发育特征和控制因素进行了研究。结果表明:研究区沙一、二段扇三角洲砂砾岩中常夹含螺砂砾岩,属于扇三角洲间歇性废弃的水下分流河道经波浪改造后,与螺屑混合沉积而成。砂砾岩中方解石胶结作用比较强烈,是储层致密的主要原因。含螺砂砾岩是优质储层发育的主要岩石类型。颗粒支撑、分选较好、螺化石富体腔孔、具一定程度的早期隐晶白云石包壳胶结的砂砾岩是形成优质储层的主要岩性因素;因颗粒支撑造成压实程度弱,成岩流体易于渗入,酸性孔隙水对中性火山岩岩屑、白云石胶结物和长石的强烈溶蚀,过早注入的油气对孔隙的后期保护,是砂砾岩优质储层发育的主要成岩因素。这种有利储层的形成机理,对陡坡带半咸水环境下的致密砂砾岩储层油气勘探具有较好的参考意义。

关键词:半咸水湖;砂砾岩;中深层;优质储层;秦南凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Factors controlling medium-to-deep coarse siliciclastic reservoirs of high quality at the southeastern margin of Qinnan Sag, Bohai Bay Basin, China

Wang Guanmin^{1,2}, Zhang Jie¹, Wang Qingbin³, Li Jiawei¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tanggu, Tianjin 300457, China]

Abstract: Coarse siliciclastic reservoirs with low porosity and low permeability of fan-delta facies are common in the medium-to-deep first and second members of the Eocene Shahejie Formation (Es_{1-2}) at the southeastern margin of Qinnan Sag in the Bohai Bay Basin, but there are also some zones with high porosity and high permeability in some intervals. The reservoir spaces are largely dissolution pores and biological coelomopores, and the mechanisms of favorable reservoir development are different from that of the common tight coarse siliciclastic reservoirs. So we integrated data from core samples, casting thin sections, burial history, and fluid inclusion to investigate the characteristics and controlling factors of the high-quality coarse siliciclastic reservoirs in the Es_{1-2} . The results indicate that spiral-shell-bearing coarse siliciclastic interbeds are common in the Es_{1-2} coarse siliciclastic reservoirs of fan-delta facies in the study area and are interpreted as wave-modified, intermittently abandoned underwater distributary channel deposits. Intensive calcite cementation plays a major role in the formation of tight reservoirs. The spiral-shell-bearing coarse siliciclastic rock is the major rock type for the development of high-quality reservoirs. Both lithological factors and diagenetic factors contributed

收稿日期:2016-03-25;修订日期:2018-01-20。

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

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-003-006)。

to the development of high-quality reservoirs. The former include particle supporting, good sorting, coelomopores being rich in spiral shell fossils and early cryptocrystalline dolomite cementation, while the latter are mainly poor compaction and infiltration of diagenetic fluids due to particle supporting, strong dissolution of intermediate-acidic volcanic detritus, dolomite cements and feldspars by acidic pore-space waters as well as protection of pores by early charged hydrocarbons. This mechanism of favorable reservoir formation is of great referential significance for petroleum exploration in tight coarse siliciclastic reservoirs formed in brackish settings on steep-slope zones.

Key words: brackish lake, coarse siliciclastic rock, medium-to-deep strata, high-quality reservoir, Qinnan Sag

以致密砂岩和细粒沉积岩为代表的致密储层油气勘探近年来获得了巨大的进展,大量研究表明,储层致密化的成因往往与强烈的压实和胶结作用有关^[1-2],有利储层的发育多受控于沉积条件、成岩作用、酸性溶蚀、超压等因素^[3-6],部分还与早期油气充注抑制胶结作用、绿泥石膜和微裂缝有关^[7]。

随着陆相断陷盆地油气勘探程度的逐渐深入,陡坡带中深层砂砾岩体逐渐成为油气勘探的主要目标,以近年来钻探的松辽盆地徐家围子断陷沙河子组最为典型。这些砂砾岩体也多为低孔低渗的致密储层^[8-9],其致密化的原因同样是压实作用、胶结作用等^[10-14]。与致密砂岩储层相比,优质砂砾岩储层的成因在沉积条件和成岩作用等方面有很大的相似之处。比如,徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩有利储层的发育与三角洲前缘分流河道分选较好的砂体和较强的有机酸溶蚀^[10,12],以及早期胶结物抑制压实作用有关^[12];准噶尔盆地沙湾凹陷百口泉组致密砂砾岩优质储层同样受控于扇三角洲前缘水下分流河道和早期胶结物对粒间孔隙的保护与酸性流体溶蚀^[14];束鹿凹陷沙河街组三段下亚段致密泥灰岩-砾岩的有利储层以各类次生孔隙、裂缝为主^[11];松辽盆地南部深层 J₃—K₁ 致密砂砾岩中的有利储层与构造高点后期酸性溶蚀和微裂缝有关^[13];东营凹陷民丰北带和车西洼陷沙河街组三段的近岸水下扇砂砾岩优质储层也都与分流河道或水道、河口坝等沉积微相和各类酸性流体的多期溶蚀有关^[8,15-16]。

近两年,在渤海湾盆地秦南凹陷东南缘陡坡带沙河街组一段和沙二段(合称沙一、二段)深层砂砾岩体中发现了亿吨级油气田,赋存于低孔低渗砂砾岩的优质储层中。通过研究发现,该区沙一、二段深层砂砾岩优质储层发育特征与目前发现的其它地区砂砾岩优质储层有一定的差异,其形成与沉积期保留下来的大量螺屑孔隙以及埋藏过程中过早的油气充注密切相关。该机理的发现,会有助于在盆地陡坡带咸化水体环境下沉积的致密砂砾岩中进一步寻找类似的有利储集层。

1 研究区概况与沉积特征

秦南凹陷是渤海海域内的一个次级构造单元,东与辽西凸起、辽西凹陷相接,南与渤中凹陷、西与南堡凹陷以石臼坨凸起相隔,北与昌黎凹陷、乐亭凹陷以姜各庄凸起相隔,东部为典型的南断北超^[17-20],研究区位于秦南凹陷东南缘陡坡带(图1)。近年来,在秦南凹陷东南缘陡坡带钻探了 D29-2 和 D29-2E 等构造,揭示了该区具有很大的油气勘探潜力。

秦南凹陷新生界发育齐全,其中,古近系由老到新依次发育孔店组、沙三段、沙一、二段,以及东营组的东三段、东二段、东一段。该区的油气主要来自秦南凹陷东洼,主要烃源岩为沙三段,已发现的油气藏主要分布在沙一、二段储层中。

在前人研究的成果上^[18-22],利用地震解释,结合录/测井、岩心和薄片等资料,可以得到研究区沙一、二段的沉积相类型及平面展布(图1)。

岩心、薄片和录井揭示,沙一、二段发育多个由细砾岩逐渐变为含砾砂岩的正旋回沉积,在每个旋回顶部的含砾砂岩中普遍发育螺化石,局部夹薄层生屑云岩、粉砂岩及深灰色泥岩。砾岩底部可见底冲刷构造,发育交错层理,砾石粒径多在 1~5 cm 不等。地震上,可见明显的楔形前积反射特征,楔形内部反射弱且杂乱。上述特征表明,研究区沙一、二段沉积相类型主要以扇三角洲前缘水下分流河道为主,水下分流河道废弃后经波浪再改造常发育含大量螺化石和隐晶白云石包壳的含螺含砾砂岩。

2 岩性对储层的控制作用

2.1 岩石学特征

沙一、二段扇三角洲相砂砾岩主要包括颗粒支撑砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩以及砂岩等,含少量的粉砂岩、泥岩和生屑云岩。其中,颗粒支撑砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩的分选差,砾石以中砾和细砾为主,局部可见

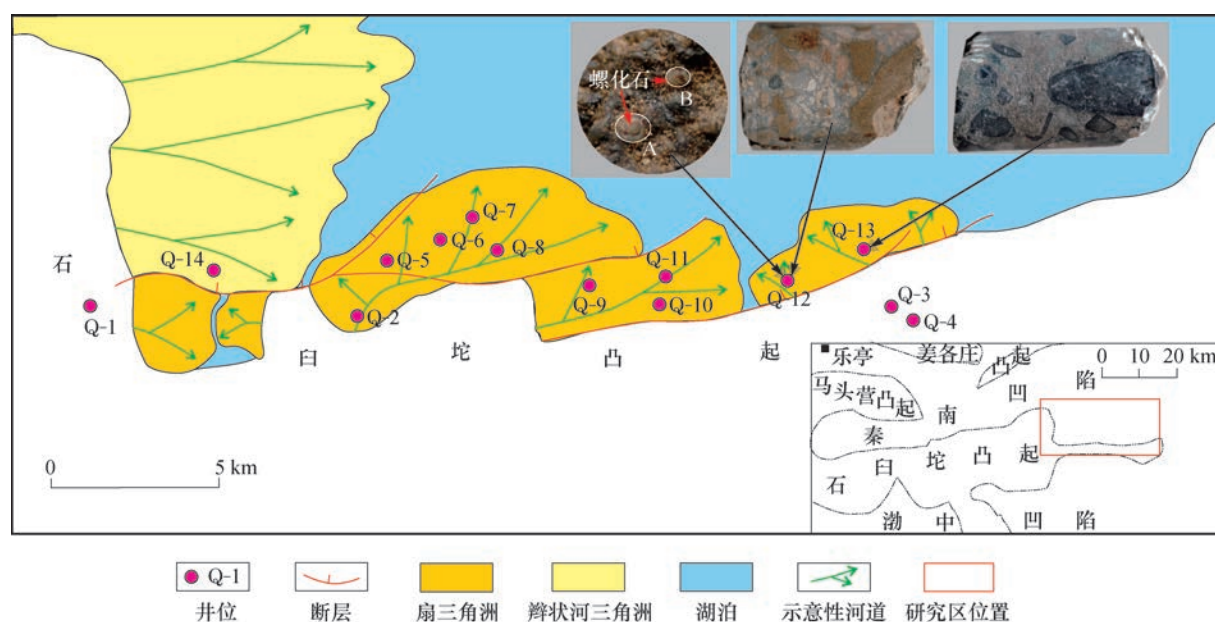


图1 秦南凹陷及围区构造单元及研究区位置、沉积相平面图

Fig. 1 Map showing tectonic units in Qinnan Sag and its surrounding region, and the location of the study area and the sedimentary facies

巨砾,有时砾石之间可见螺化石或生物碎屑。

砾石成分以酸性火山岩为主,多呈次棱角—次圆状,局部可见少量生屑云岩、石灰岩和泥岩撕裂屑。通过对97块铸体薄片观察发现,砾石之间的碎屑基质仍以火山岩屑为主,长石和石英次之,岩屑含量在22%~98%,平均73.7%。

2.2 岩性对储层物性的影响

研究区2口取心井的岩心样品常规物性分析结果表明,沙一、二段砂砾岩储层孔隙度在0.45%~34.70%,平均为14.60%;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 767.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $13.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2a,b)。因此,研究区沙一、二段储层孔隙以低孔、特低孔为主,中孔和高孔次之,含少量的特高孔;渗透率以超低渗为主,特低渗、低渗次之,含少量的中渗储层,储层整体具有低孔低渗的特点,孔隙度与渗透率具有一定的正相关性(图2c)。

但在井深3330~3400 m发育异常高孔隙带(图2d),孔隙度最高可达34.6%。通过对该深度范围内的岩心、壁心薄片观察发现,岩性以含螺含砾砂岩夹薄层鲕粒白云岩为主,螺体腔孔和螺屑壁内溶孔非常发育(图3,图4a),而相邻的不含螺的砂砾岩孔隙度明显偏低。换言之,相对高孔渗的优质储层主要发育在含螺含砾砂岩中。

研究区扇三角洲砂砾岩为近源快速堆积,埋深在3200 m以下,受上覆地层强烈压实作用,颗粒间表现

为线接触、凹凸接触,颗粒内部见破裂缝,但含螺砂砾岩中的生物化石往往保留比较完整,体腔孔非常发育。如何解释该现象?我们认为这是由于含螺砂砾岩多为颗粒支撑,杂基含量少,储层抗压实能力较强,结果造成颗粒格架之间的螺体腔孔和壁内溶孔保存相对较完整(图3,图4a)。含螺砂砾岩是在扇三角洲水下分流河道的废弃阶段,部分早期沉积的砂砾在后期经湖浪重新淘洗,与完整或不完整的螺屑共同沉积形成席状混积砂砾滩。颗粒的分选、磨圆变好,砂砾间常含大量螺类生物碎屑。这些螺屑是风浪将扇三角洲前缘死亡的螺壳搬运到席状混积砂砾滩并快速沉积下来的,其较好的物性源于波浪对先期分流河道沉积物的重新改造和生物体腔孔的发育。

3 成岩作用对优质储层的控制作用

通过对研究区2口井280多块岩心、壁心铸体薄片的观察和分析,发现区内储层成岩作用类型包括压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用。成岩作用的差异是优质储层发育的又一重要因素。

3.1 压实作用

薄片鉴定揭示,研究区扇三角洲砂砾岩储层在埋藏过程中经历了较强的压实作用(图4b),它是研究区中深层储层物性降低的主要原因之一。

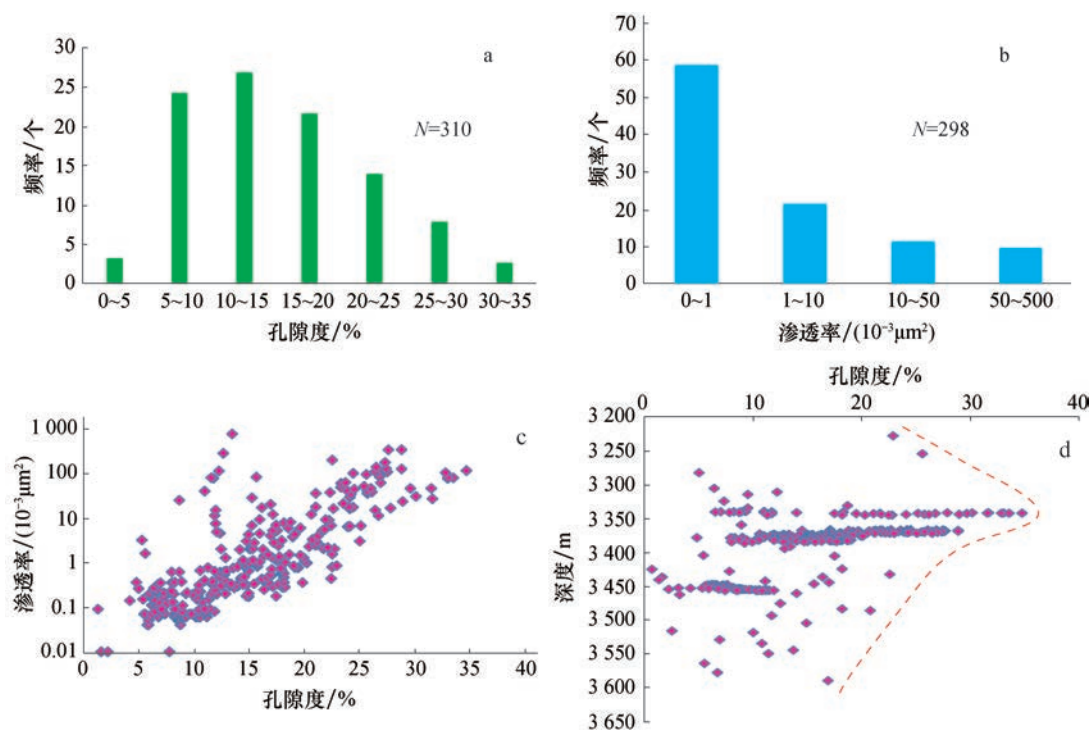


图2 秦南凹陷沙一段砂砾岩储层物性分布直方图及孔-渗关系和孔-深关系

Fig. 2 Histogram of coarse siliciclastic reservoir physical properties in Es¹ of Qinnan Sag, and relationships of the porosity-permeability and the porosity-depth

a. 孔隙度分布直方图; b. 渗透率分布直方图; c. 孔-渗交会图; d. 孔-深关系图

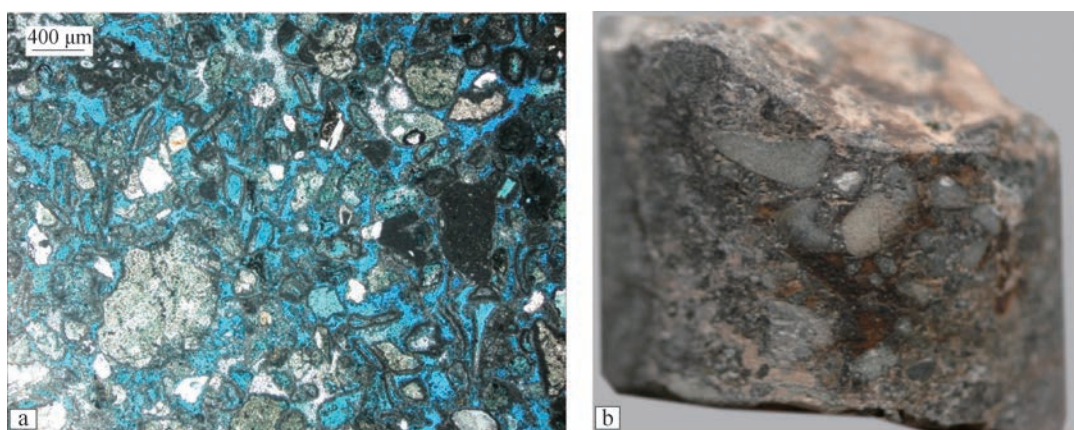


图3 秦南凹陷沙一、二段含螺砂砾岩镜下照片和壁心照片

Fig. 3 Microscopic features and core photographs of spiral-shell-bearing coarse siliciclastic rocks in the Es¹⁻² of Qinnan Sag

a. 生物体腔孔及壁内溶孔, Q-12井, 埋深3362 m, 铸体薄片, 单偏光; b. 含螺含砾砂岩, Q-4井, 埋深3311.1 m, 壁心

但在分选较好的颗粒支撑砂砾岩中, 压实作用的强度明显偏低, 这一点在波浪成因的含螺含砾砂岩中尤为明显(图4a, c)。

3.2 胶结作用

沙一、二段扇三角洲砂砾岩中的胶结物主要有碳酸盐矿物、硅质、粘土矿物、菱铁矿、黄铁矿等。高岭石多呈米粒状分布在颗粒之间, 含量约在1% ~

15%, 平均6.3%; 硅质胶结物主要以充填裂缝(图4d)和次生加大的石英为主, 含量平均在0.12%。另外, 也可见少量的菱铁矿和黄铁矿胶结, 平均含量1.2%。

最主要的胶结物是碳酸盐矿物, 多为白云石和铁白云石(图4c, e), 平均占全部胶结物的47.1%, 局部可达86%; 方解石和铁方解石(图4f)少量, 平均占全部胶结物的4.1%, 局部最大为69%。白云石胶结物

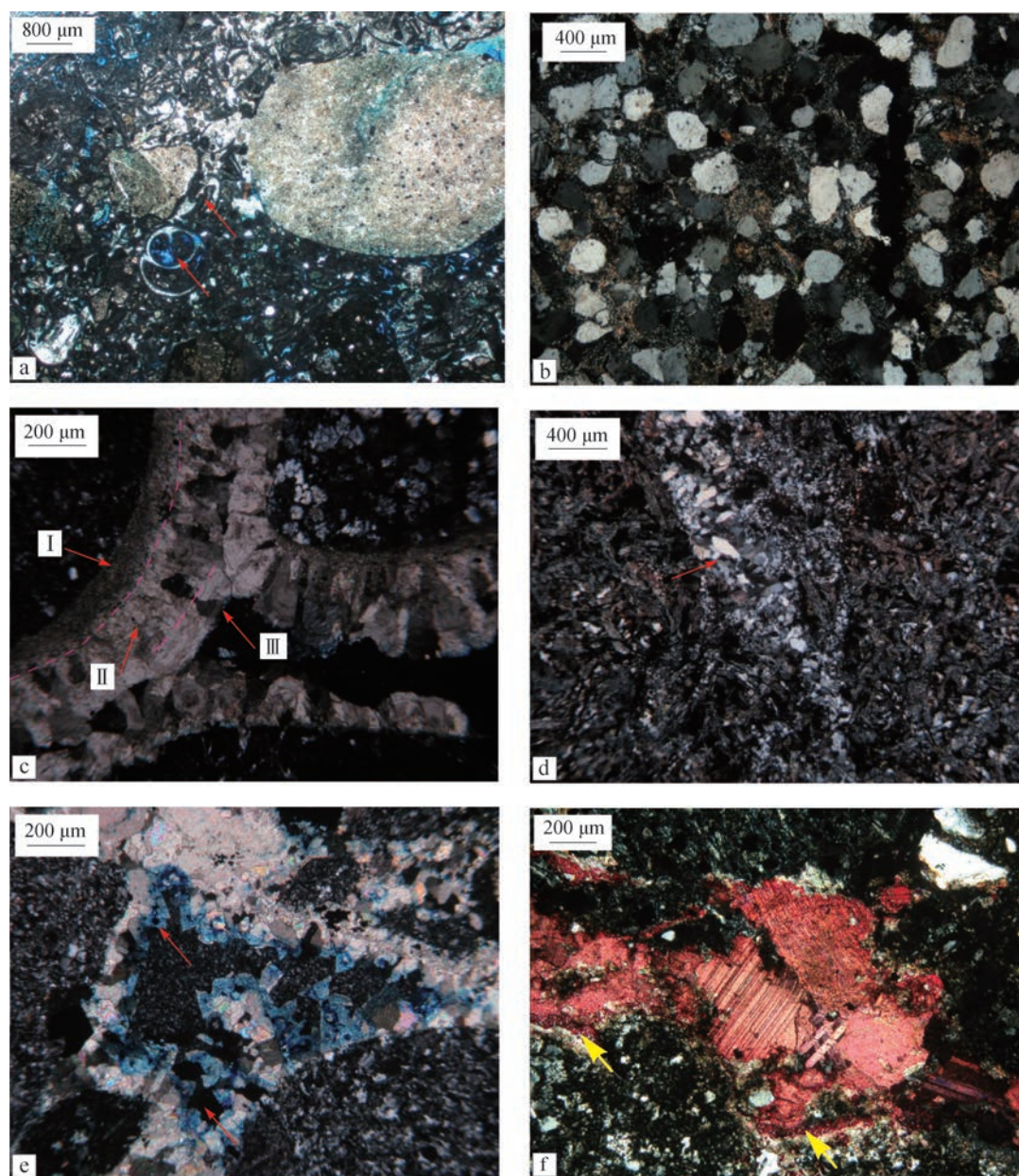


图 4 秦南凹陷沙一、二段砂砾岩成岩作用类型

Fig. 4 Diagenetic types of coarse siliciclastic rocks in the Es¹⁻² of Qinnan Sag

a. 砾石磨圆较好,具有较强的抗压实作用,砾石间螺屑发育(箭头处),Q-13井,埋深3 358 m,铸体薄片,单偏光;b. 碎屑颗粒分选差,泥质杂基及泥晶白云岩发育,压实作用强,孔隙不发育,Q-12井,埋深3 621 m,铸体薄片,正交光;c. 发育3期白云石胶结(箭头处),孔隙中央残留有原生孔,Q-13井,埋深3 382.34 m,铸体薄片,正交光;d. 砾石内部裂缝被硅质胶结物充填(箭头处),Q-13井,埋深3 535 m,铸体薄片,正交光;e. 铁白云石(蓝色,箭头处)交代白云石,颗粒之间残留原生孔,Q-13井,埋深3 453 m,铸体薄片,正交光;f. 铁方解石(箭头处)交代方解石(红色),粗大的方解石晶粒将孔隙完全充填,Q-13井,埋深3 564.5 m,铸体薄片,正交光

共发育3期(图4c),第Ⅰ期以隐晶白云石的形态环绕颗粒分布;第Ⅱ期以隐晶白云石为基底,呈马牙状亮晶充填于颗粒之间;第Ⅲ期在第Ⅱ期亮晶白云石基础上,呈晶粒状向孔隙中央继续生长。

利用中石化胜利油田分公司地质科学研究所的D/max-2500PC衍射仪,测试样品的全岩矿物成分;利用中海油天津钻采院实验中心的PoroTM300

9903002及Low Perm-meter JS100005孔渗仪,测试样品的孔隙度和渗透率。通过214个样品的全岩分析结果,与相应的孔渗测试数据进行对比(图5),显示储层中随着白云石含量的增加,孔隙度和渗透率增大;随着方解石含量的增加,孔隙度和渗透率减小。在偏光显微镜下观察发现,白云石大多呈隐晶薄膜状包裹碎屑颗粒或生物碎屑,形成于同生期和准同

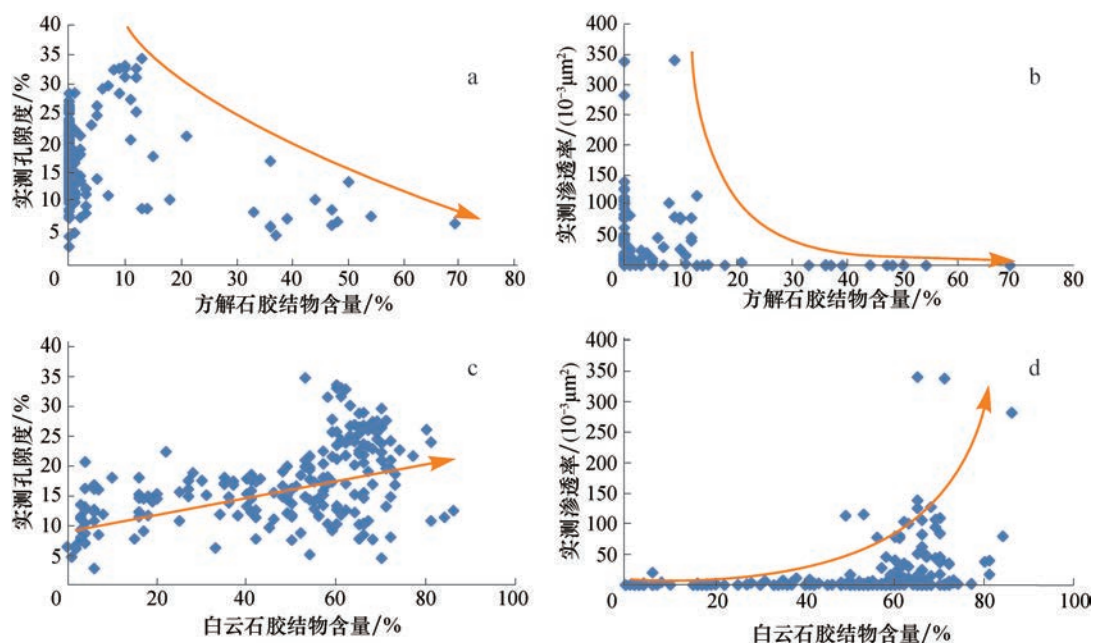


图5 秦南凹陷沙一、二段储层中不同类型碳酸盐胶结物含量与储层物性的关系

Fig. 5 Relationships between contents of various carbonate cements and reservoir physical properties in the Es¹⁻² of Qinnan Sag

a. 样品孔隙度随方解石胶结物含量增加而降低; b. 实测渗透率随方解石胶结物含量增加而快速降低; c. 实测孔隙度随白云石胶结物含量增加呈增大趋势; d. 实测渗透率随白云石胶结物含量增加有增大趋势

生期。白云石胶结物发育的砂砾岩,一般分选很好,颗粒之间极少有泥晶或杂基,抗压实作用比较强,有利于原生孔隙和白云石胶结物的保存。此外,白云石胶结物在埋藏过程中比方解石更易溶解^[23-24],也造成了富白云石胶结物在成岩期通过溶蚀作用改善储层物性。

方解石胶结物晶粒普遍粗大,是在成岩阶段交代了早期碎屑组分或充填于先期孔隙中形成的(图4f),是砂砾岩储层致密的另一个主要因素。

3.3 溶蚀作用

溶蚀作用是优质储层形成的又一重要因素。通过280块铸体薄片分析,溶蚀作用主要表现为火山岩岩屑(图6a—c)和碳酸盐矿物(图4c,e)的溶蚀,长石溶蚀次之,见少量的石英溶蚀(图6d)。秦南凹陷沙三段、沙一、二段烃源岩较发育^[17-18],研究区沙一、二段扇三角洲砂砾岩储层与烃源岩紧密相邻,因此,烃源岩成熟后释放的有机酸促进了溶蚀作用的发生。较多的高岭石胶结物也是砂砾岩储层经历过明显酸性环境的重要标志(图6e,f)。

前人研究表明^[25],有机酸进入储层后,首先对火山岩岩屑中的长石和长石颗粒进行溶蚀,其次对碳酸盐胶结物进行溶蚀。火山岩岩屑溶蚀后大多数形成铸模孔,极大地改善了储层的物性。另外,碳酸盐胶结物

尤其是白云石的溶蚀(图4c,e)对储层物性也具有重要改善作用。溶蚀作用是酸性流体进入砂砾岩孔隙后发生的,故而颗粒支撑的砂砾岩因压实程度弱,颗粒之间原始孔隙保存较好,有利于流体率先进入发生较强的溶蚀作用。

4 成岩演化与优质储层发育机理

4.1 成岩作用演化序列

利用共生矿物之间的交代和溶蚀-充填关系可以判断成岩作用的先后顺序^[15-16],建立成岩作用的演化序列。研究区沙一、二段砂砾岩骨架颗粒呈点接触或线接触(图4b),且大多数骨架颗粒周围被泥晶包壳包裹,泥晶包壳上又发育2期马牙状碳酸盐胶结物(图4c,e),表明颗粒早期被碳酸盐胶结,其后遭受了持续的压实作用。储层在长石、火山岩岩屑发生溶蚀作用之后,再遭受碳酸盐矿物的胶结,胶结物充填于粒内溶蚀孔隙中;有时可见石英颗粒及次生加大边的溶蚀,代表石英次生加大形成时间早于石英的溶蚀;碳酸盐胶结物交代石英次生加大边,则代表碳酸盐胶结物形成晚于石英次生加大;黄铁矿也能够对含铁白云石、(含铁)方解石及碎屑颗粒发生交代。

由此,研究区沙一、二段扇三角洲储层的成岩作用

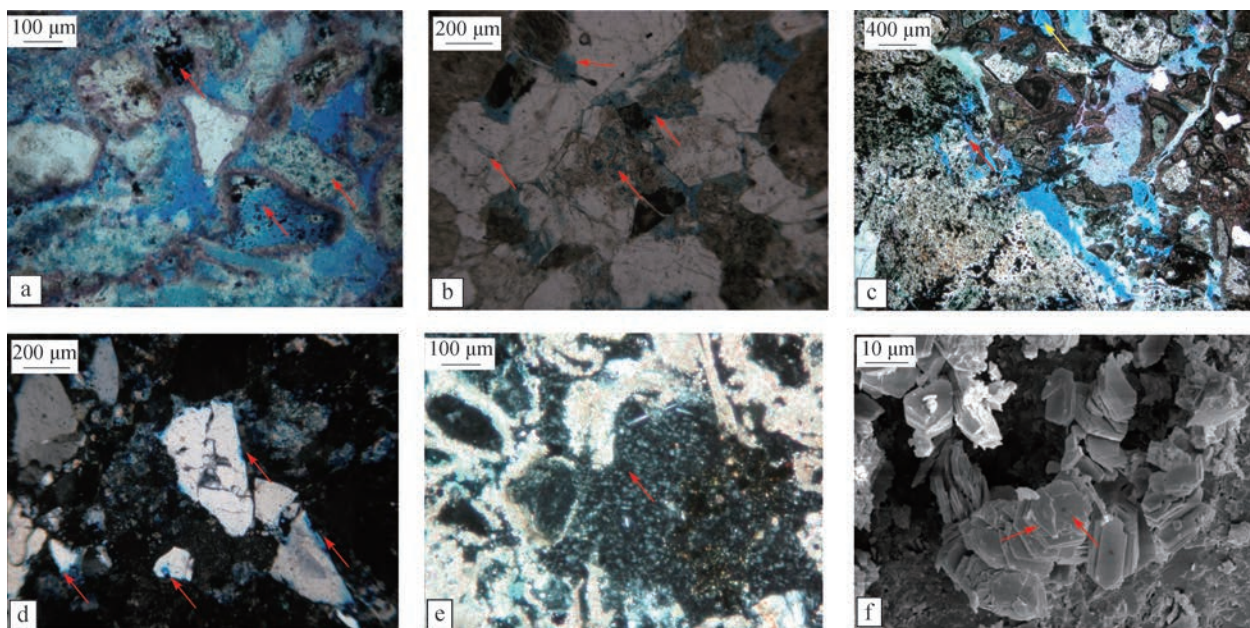


图6 秦南凹陷沙一、二段溶蚀作用

Fig. 6 Dissolution in the Es¹⁻² of Qinnan Sag

a. 火山岩岩屑强烈溶蚀(箭头处),局部见铸模孔,Q-12井,埋深3 406 m,铸体薄片,单偏光;b. 火山岩岩屑内部及长石边缘溶蚀作用强烈(箭头处),Q-13井,埋深3 672.5 m,铸体薄片,单偏光;c. 火山岩岩屑边缘(红色箭头处)和生屑体腔强烈溶蚀(黄色箭头处),Q-12井,埋深3 331.5 m,铸体薄片,单偏光;d. 石英颗粒边缘溶蚀(箭头处),Q-13井,埋深3 611.5 m,铸体薄片,正交光;e. 高岭石呈米粒状充填于孔隙(箭头处),Q-13井,埋深3 344.08 m,铸体薄片,正交光;f. 高岭石呈书页状(箭头处)充填于孔隙,Q-13井,埋深3 445 m,扫描电镜

顺序为:隐晶白云石包壳—压实作用/白云石胶结/方解石胶结—火山岩岩屑溶蚀/长石溶蚀/碳酸盐胶结物溶蚀/石英次生加大—铁白云石胶结/(含铁)方解石胶结—石英溶蚀—黄铁矿胶结。

4.2 成岩环境演化

通过成岩作用阶段分析和埋藏史—热史进行恢复(图7),可以建立研究区沙一、二段的成岩期及其成岩环境演化过程。

沙一、二段沉积时期,秦南凹陷发育半咸水湖泊环境,波浪对碎屑颗粒及生物碎屑进行冲刷,使得颗粒间杂基被淘洗干净,过饱和的碳酸盐水体使得颗粒表面沉淀隐晶白云石包壳。后期埋藏过程中,地层流体在早期隐晶白云石包壳的基础上,相对缓慢沉淀了第二期白云石胶结物。

距今12.5 Ma之前,沙一、二段埋深约为1 900 m,处于早成岩A、B期(图7),地层水呈碱性,除压实作用以外,第3期白云石胶结物继续发育。

距今12.5~1.2 Ma时,沙一、二段埋深为1 900~3 100 m,处于中成岩A期(图7),此期沙三段烃源岩已成熟和生、排烃^[17-18],生成的油气沿断层快速向上运移到沙一、二段富含螺屑、分选较好的砂砾岩储层中,使得螺体腔孔为代表的原生孔隙大量保

存。通过包裹体测温发现,油气开始充注的时间为8.6 Ma,大约在明下段沉积中期(图7)。至2.6 Ma,由于断裂活动进一步增强,油气充注强度增大,注入的酸性流体增多,造成火山岩岩屑、长石、碳酸盐胶结物均发生溶蚀,以及高岭石胶结物和石英的次生加大。

距今1.2 Ma至今,沙一、二段埋深3 100~3 600 m,处于中成岩A期末(图7)。因沙三段有机酸的脱羧作用,地层流体由酸性转化为碱性,方解石胶结物开始大量充填,对已经充注的油气储集空间形成封堵作用。由此造成现今部分储层渗透率极差(图2b)。在未进行酸化前,对研究区沙一、二段储层经过测试,日产原油仅0.8~20 m³,经过酸化处理后,单井最大日产原油达1 000 m³以上。这也证实了该区储层经历了先油气充注、后被碳酸盐胶结物充填封堵转为致密的成岩过程。

对比研究表明,油层与干层的孔隙演化具有明显的差异性,主要表现为干层的碳酸盐胶结程度比油层强,说明油气的充注对储层的物性演化具有重要的影响。前人研究表明^[15,26],油气的充注一方面提供一定量的有机酸,促进岩屑、长石以及碳酸盐胶结物的溶蚀;另一方面抑制了矿物之间的交代与转换作用,保护早期孔隙。

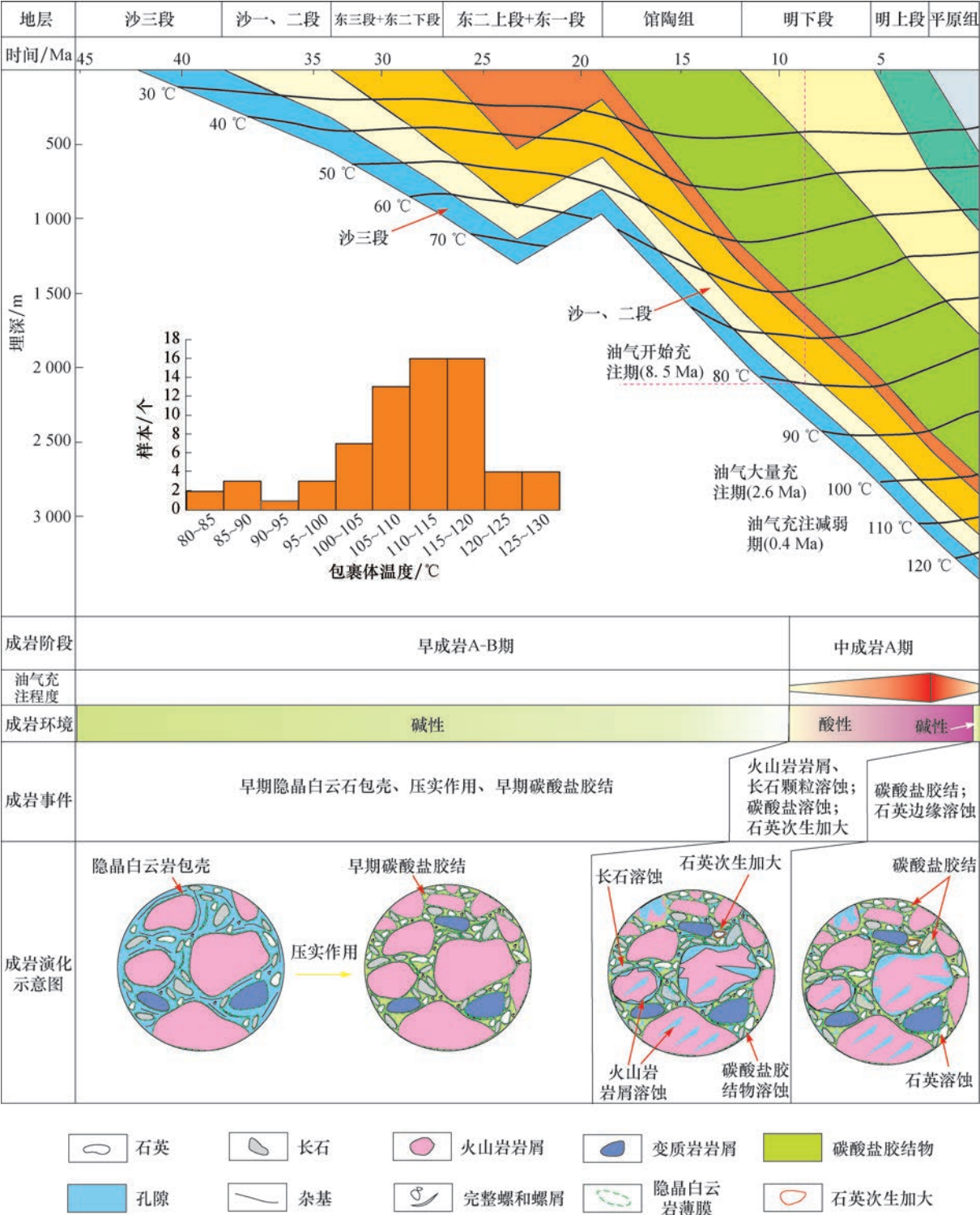


图 7 秦南凹陷 Q-12 井埋藏史-成岩演化序列

Fig. 7 Burial history-diagenetic evolution sequence of Well Q-12 in Qinnan Sag

5 结论

1) 研究区沙一、二段主要发育扇三角洲前缘的水下分流河道沉积,砂砾岩储层具有典型的低孔低渗特

点。但在 3 330 ~3 400 m 发育异常高孔隙带,储集空间以溶蚀孔和生物体腔孔为主。扇三角洲间歇性废弃的水下分流河道经波浪改造后,形成分选好、杂基少和一定量白云石胶结的含螺砂砾岩是优质储层发育的岩性因素。

2) 成岩作用是砂砾岩优质储层发育的直接控制因素。早期地层流体呈碱性, 储层成岩作用以压实作用和白云石胶结为主, 储层物性变差。距今 12.5 ~ 1.2 Ma 时, 富含油气的酸性流体充注, 相对较容易渗入到分选较好、抗压实程度强的含螺砂砾岩中, 岩屑、长石、碳酸盐胶结物发生强烈溶蚀和石英少量次生加大。1.2 Ma 至今, 油气充注能力减弱, 地层流体呈碱性环境, 强烈的方解石胶结造成现今沙一、二段储层整体呈低孔低渗的特点。由于部分含螺砂砾岩储层中有先期油气大量赋存, 孔隙才大量保留下来。

参 考 文 献

- [1] 周翔, 何生, 陈召佑, 等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组 8 段低孔渗砂岩成岩作用及成岩相[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 155–164.
Zhou Xiang, He Sheng, Chen Zhaoyou, et al. Diagenesis and diagenetic facies of low porosity and permeability sandstone in Member 8 of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 155–164.
- [2] 黄文彪, 邓守伟, 卢双舫, 等. 松辽盆地南部扶余油层致密储层成岩序列及成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 508–516.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Diagenetic sequence and hydrocarbon accumulation phases of the Fuyu layer tight reservoir in the southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 508–516.
- [3] 王多云, 郑希民, 李凤杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87–91.
Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, et al. Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 87–91.
- [4] 李剑, 姜晓华, 王秀芹, 等. 裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律——以松辽盆地与渤海湾盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1005–1018.
Li Jian, Jiang Xiaohua, Wang Xiuqin, et al. Mechanisms for gas accumulation and enrichment in tight sandstone reservoir in rift basins: Cases from the Songliao Basin and the Bohai Bay [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1005–1018.
- [5] 陈俊安. 陆相断陷湖盆致密砂砾岩有利储层沉积特征——松辽盆地深层徐家围子断陷沙河子组为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
Chen Junan. The favorable reservoir's sedimentary characteristic of tight sandy grael interterrestrial rift-subsidence lacustrine basin: A case from Shaheziformation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2014.
- [6] 王国亭, 贾爱林, 闫海军, 等. 苏里格致密砂岩气田潜力储层特征及可动性评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 896–904.
Wang Guoting, Jia Ailin, Yan Haijun, et al. Characteristics and recoverability evaluation on the potential reservoir in Sulige tight sandstone gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 896–904.
- [7] 刘春燕. 致密碎屑岩储层“甜点”形成及保持机理: 以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组长 8 油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 873–879.
Liu Chunyan. Formation and preservation mechanism of sweet spot in tight clastic reservoirs: A case study of Chang 8 oil layer of Yanchang Formation in Zhenjing area, southwest Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 873–879.
- [8] 曹刚, 王星星, 朱筱敏, 等. 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层成岩演化及其对储层物性影响[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 158–167.
Cao Gang, Wang Xingxing, Zhu Xiaomin, et al. Diagenetic evolution of Es^{3s} nearshore subaqueous fan reservoir and its influence on property in the steep slope zone of western Chechen sub-sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(1): 158–167.
- [9] 朱筱敏, 张守鹏, 韩雪芳, 等. 济阳坳陷陡坡带沙河街组砂砾岩体储层质量差异性研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1094–1104.
Zhu Xiaomin, Zhang Shoupeng, Han Xuefang, et al. On the differences of reservoir quality of Shahejie Fm. in steep slope zones of Jiyang sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1094–1104.
- [10] 张晶晶. 断陷湖盆致密砂砾岩储层特征及主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(6): 52–57.
Zhang Jingjing. Characteristics and their controlling factors for the tight conglomerate reservoir in the faultdepression lake basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(6): 52–57.
- [11] 韩超, 田建章, 赵蕊, 等. 束鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩—砾岩致密储层储集空间类型及成因[J]. 石油学报, 2015, 36(S1): 31–39.
Han Chao, Tian Jianzhang, Zhao Rui, et al. Reservoir space types and its genesis in tight calcilutite-rudstone reservoir of the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S1): 31–39.
- [12] 肖丽华, 张磊, 田伟志, 等. 徐家围子断陷深层致密砂砾岩优质储层预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1174–1182.
Xiao Lihua, Zhang Lei, Tian Weizhi, et al. High-quality reservoir prediction of deep tight glutenites in Xujiaweizi fault depression [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1174–1182.
- [13] 赵静. 致密砂砾岩有效储层主控因素: 以松辽盆地南部 A 断陷为例[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 165–168.
Zhao Jing. Main controlling factors of tight sandy conglomerate effective reservoir: A case study of A fault depression in southern Songliao basin [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2017, 24(2): 165–168.
- [14] 郑超, 贾春明, 李思, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷百口泉组致密砂砾岩储层特征及主控因素分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(32): 7–13.
Zheng Chao, Jia Chunming, Li Si, et al. Characteristic of tight conglomerite reservoir and main controlling factors of Baikouquan area in Shawan sag of Junggar basin [J]. Journal of Yangtze University

- (Natural Science Edition), 2015, 12(32): 7-13.
- [15] 操应长, 陈林, 王艳忠, 等. 东营凹陷民丰北带古近系沙三段成岩演化及其对储层物性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 6-13.
- Cao Yingchang, Chen Lin, Wang Yanzhong, et al. Diagenetic evolution of Es3 reservoir and its influence on property in the northern Minfeng sub-sag of Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(5): 6-13.
- [16] 操应长, 程鑫, 王艳忠, 等. 车镇北带古近系砂砾岩储层成岩作用特征及其对物性的影响[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1192-1203.
- Cao Yingchang, Cheng Xin, Wang Yanzhong, et al. Diagenesis of Paleogene glutenite reservoir and its control on physical property in the north zone of Chezhen sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1192-1203.
- [17] 庄新兵, 邹华耀, 李楠, 等. 秦南凹陷烃源岩特征与油气勘探新领域[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 146-149.
- Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Li Nan, et al. Characteristics of source rock and new region of oil and gas exploration in Qinnan Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 146-149.
- [18] 杨海风, 魏刚, 王德英, 等. 秦南凹陷秦皇岛 29-2 油气田原油来源及其勘探意义[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 28-31.
- Yang Haifeng, Wei Gang, Wang Deying, et al. Oil sources and exploration significance of Qinhuangdao 29-2 oil-gas field[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 28-31.
- [19] 魏刚, 薛永安, 柴永波, 等. 秦南凹陷油气勘探思路创新与突破[J]. 中国海上油气, 2012, 24(3): 7-11.
- Wei Gang, Xue Yong'an, Chai Yongbo, et al. Philosophy innovations and a breakthrough in petroleum exploration in Qinnan sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(3): 7-11.
- [20] 庄新兵, 邹华耀, 李楠, 等. 秦南地区天然气成因与油气勘探潜力分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 680-688.
- Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Li Nan, et al. Origin of natural gas and exploration potential of hydrocarbon, Qinnan area[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(3): 680-688.
- [21] 王启明, 杜晓峰, 加东辉, 等. 渤海海域 428 凸起地区沙一、二段沉积体系及其主控因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(4): 12-16.
- Wang Qimin, Du Xiaofeng, Jia Donghui, et al. The 1st and 2nd members of the Shahejie formation in No. 428 uplifted area, Bohai Sea: Sedimentary systems and their controlling factors[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2015, 35(4): 12-16.
- [22] 张宇焜, 胡晓庆, 牛涛, 等. 古地貌对渤海石臼坨凸起古近系沉积体系的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6): 1589-1596.
- Zhang Yukun, Hu Xiaoqing, Niu Tao, et al. Controlling of paleogeomorphology to Paleogene sedimentary system of Shijiutuo uplift in Bohai basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1589-1596.
- [23] 肖林萍, 黄思静. 方解石和白云石溶蚀实验热力学模型及地质意义[J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 113-116.
- Xiao Linping, Huang Sijing. Model of thermodynamics for dissolution of carbonate and its geological significances[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(1): 113-116.
- [24] 张天付, 鲍征宇, 崔振昂, 等. 碳酸盐岩埋藏溶蚀的热力学分析及其地质意义[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 179-181.
- Zhang Tianfu, Bao Zhengyu, Cui Zhenang, et al. Thermodynamic analysis of burial dissolution of carbonate rocks and its geological significance[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2): 179-181.
- [25] 远光辉. 成岩过程中长石和碳酸盐矿物溶蚀机理及其物性响应[D]. 青岛: 中国石油大学, 2015.
- Yuan Guanghui. Genetic mechanism of dissolution of feldspars and carbonate minerals during diagenesis and its impact on reservoir porosity[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2015.
- [26] 李艳霞, 刘洪军, 袁东山, 等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 274-280, 295.
- Li Yanxia, Liu Hongjun, Yuan Dongshan, et al. Effect of oil charging on reservoir's diagenetic mineral evolution[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 274-280, 295.

(编辑 张亚雄)