

吐哈盆地巴喀油田下侏罗统致密砂岩储层特征及主控因素分析

张超¹, 李旭平¹, 钟建华², 张涛锋³

(1. 山东科技大学地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 3. 渤海钻探第二录井分公司 综合作业部, 河北 沧州 062552)

摘要:运用层序地层手段,结合主要探井、地震资料,确定对比标志层;通过钻井、测井资料,划分基准面旋回,建立地层格架。通过关键井单井相、岩心观察和描述,编制综合井柱状图。经薄片鉴定、扫描电镜及X-衍射粘土矿物分析,认为储层颗粒整体较粗,胶结物含量低、成分成熟度和结构成熟度高,普遍含塑性岩屑、发育伊利石等多因素共同导致了储层的致密化。储集空间主要为粒间孔和粒内溶蚀孔。

关键词:巴喀;致密砂岩;沉积作用;成岩作用;构造

中图分类号:P618.130

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0065-07

Properties and the Main Controlling Factors of Compact Sandstone Reservoirs in Lower Jurassic Series of Baka Oilfield in Tuha Basin

ZHANG Chao¹, LI Xuping¹, ZHONG Jianhua², ZHANG Taofeng³

(1. College of Geological Sciences & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Geosciences and Technology, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China;

3. Department of Comprehensive Business, Second Logging Branch of Bohai Drilling Company, Cangzhou, Hebei 062552, China)

Abstract: By means of the sequence stratigraphy and combining with main exploratory wells and seismic data the comparative key bed was determined. The sedimentary base cycles was divided and the stratigraphic framework was established with the drilling and logging data. The columnar section of comprehensive well was made through the study of single-well phase of key wells, the observation and description of cores. By thin section authentication, electron microscopy scanning and X-ray diffraction of clay mineral analysis, the grain size of particles composed the reservoirs was quite coarse as a whole, and the low cement content, low compositional maturity and high textural maturity, generally with plastic debris, and the development of illite and many other factors led to the reservoir compaction. Accumulation capacity of the reservoirs mainly displays intergranular pores and intragranular dissolution pores.

Key words: Baka; compact sandstone; sedimentation; diagenesis; structure

致密砂岩气藏被列为一种非常规气藏,因其潜在的巨大资源量可以有效弥补常规天然气的储量递减,在气藏勘探开发领域业已成为国内外众多学者的研究热点和前沿问题^[1]。当前,关于致密砂岩气藏的定义最为认可的是美国联邦能源监管委员会(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)的定义,即地层渗透

收稿日期:2011-09-08

基金项目:国家示范工程“吐哈盆地致密砂岩气高效开发示范工程”项目(yty2011011)。

作者简介:张超(1981—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要从事沉积与岩相古地理方面的研究。E-mail: julian225@163.com.

李旭平(1959—),女,江苏常州人,教授,博士,主要从事矿物、岩石、矿床等方面的研究。

E-mail:lixuping@sdust.edu.cn.

率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层^[2]。我国对致密砂岩气藏规定为有效渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (绝对渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、孔隙度小于 10% 的气藏^[3]。目前,世界上 70 多个盆地广泛分布着致密砂岩气藏,其中可采储量占已发现储量的 24%,约为 $10.5 \times 10^{12} \sim 24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居非常规天然气之首^[4]。我国致密气藏远景资源量达 $12 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[5],开发潜力巨大。其中,近几年以中石油为代表,先后在四川盆地须家河组和鄂尔多斯盆地上古生界发现了超过万亿 m^3 的大型致密砂岩气田^[6-7]。前人研究认为,台北凹陷山前带八道湾组和三工河组的三角洲砂体物源主要来自靠近物源的北部博格达山,搬运距离短,分选磨圆差,刚性的石英、长石等颗粒含量较高,其抗压能力强,成为颗粒之间的骨架,一方面有利于原生孔隙的保存,另一方面有利于次生孔隙的形成。

本次工作从沉积相入手,注重组成储层的颗粒大小、成份、成岩作用以及后期的构造作用等,综合分析研究区致密砂岩储层的特征和性质。

1 区域地质概况

巴喀致密砂岩气藏位于新疆维吾尔自治区吐鲁番地区鄯善县境内,距离鄯善县约 30 km,北部紧靠博格达山,东面与丘陵油田相邻。该气藏位于吐哈盆地台北凹陷北部山前带中段柯柯亚构造带(图 1),包括近凹低断阶带、中间断阶带和近山高台阶带等三个断阶带,柯柯亚构造带整体位于中段近凹低断阶带,油气成藏条件优越。

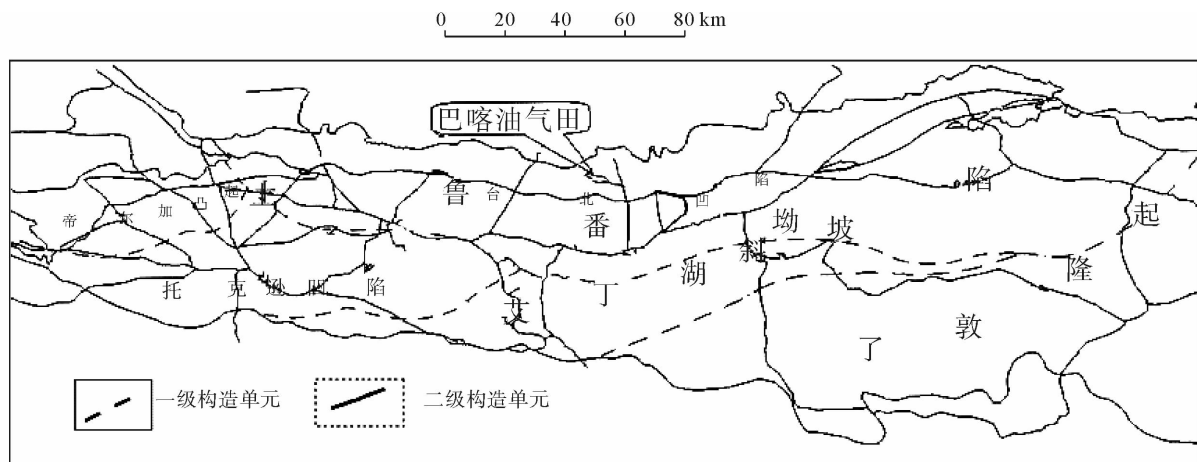


图 1 巴喀致密砂岩气藏地理与构造位置图

Fig. 1 Tectonic and geographic location map of Baka tight gas sandstone reservoir

吐哈盆地是富煤盆地,侏罗系水西沟群煤系烃源岩生气条件好。北部山前带是吐哈盆地致密砂岩气的重点勘探领域之一,整体具备千亿 m^3 以上的资源规模。北部山前带已发现的致密砂岩气藏赋存于水西沟群地层之中,具有储层厚度大、与煤系源岩互层伴生、平面展布稳定等特点。水西沟群沉积期,盆地整体为浅水沉积环境,沉积物供给和可容纳空间基本平衡,发育含煤沉积建造。研究区包括恰勒坎、柯柯亚—核桃沟、鄯勒—红旗坎三个重点区域,东西长 100 km、南北宽 15 km,面积 1500 km^2 。区内致密砂岩储层主要为北部物源体系的扇三角洲、辫状河三角洲平原河流及前缘水下分流河道沉积。

北部山前带下侏罗统发育广泛的河流与河泛沼泽沉积,河流相厚层块状砂岩与煤系源岩互层叠置,厚度大且横向分布稳定^[8]。但是由于该地区气藏构造条件复杂,埋藏深度大,储层物性差,多数气井自然产能较低以及气藏探明程度不高等问题。因此,本文从沉积、成岩以及构造等方面来分析该区气藏储层的影响因素。

2 沉积因素对储层特征的控制作用

吐哈盆地下侏罗统储层物性差异不大,属于致密储层。八道湾组一段含气沙层有效孔隙度 $4.3\% \sim 8.4\%$,平均为 5.9% 。渗透率 $0.076 \sim 3.615 \text{ mD}$,平均为 0.372 mD ;少部分样品孔隙度在 $8.1\% \sim 10.0\%$,

渗透率 1.00~100.05 mD,渗透率大于 10.00 mD 的有明显的裂隙发育。总体上该套储层为低孔隙度和低渗透率储层。究其原因主要是该地区为近物源的辫状河三角洲或冲积扇快速沉积的产物,这类沉积物搬运距离短,沉积物粗细颗粒混杂,分选性差。

2.1 沉积微相

沉积微相对储层物性的控制是先天性的^[9]。主要表现为控制砂岩颗粒的粒度、结构成熟度和成分成熟度。不同的微相具有不同的粒度分布、不同的颗粒成分(岩屑、长石或石英),从而决定了它们具有不同的孔隙保存和成岩演化。根据钻井和地震数据,研究区下侏罗统为含煤的碎屑岩沉积,泥岩以深灰色为主,为潮湿环境下的沼泽—湖泛沉积。吐哈盆地侏罗统包括三工河组和八道湾组(图 2),主力含气层段为八道湾组,八道湾组又分为 1、2、3 三个砂层组。三工河组、八道湾组为扇三角洲和辫状河三角洲沉积,岩性为细砂岩、含砾砂岩、中砂岩和粗砂岩,纵向上呈砂泥岩与煤层互层,砂岩百分比为 50%~60%。其中,八道湾组为辫状河三角洲前缘亚相水下分流河道微相,岩性以粒度较粗的含砾砂岩和粗砂岩为主,单层厚度大,横向连续性好;三工河组为快速堆积的粗碎屑扇三角洲沉积。

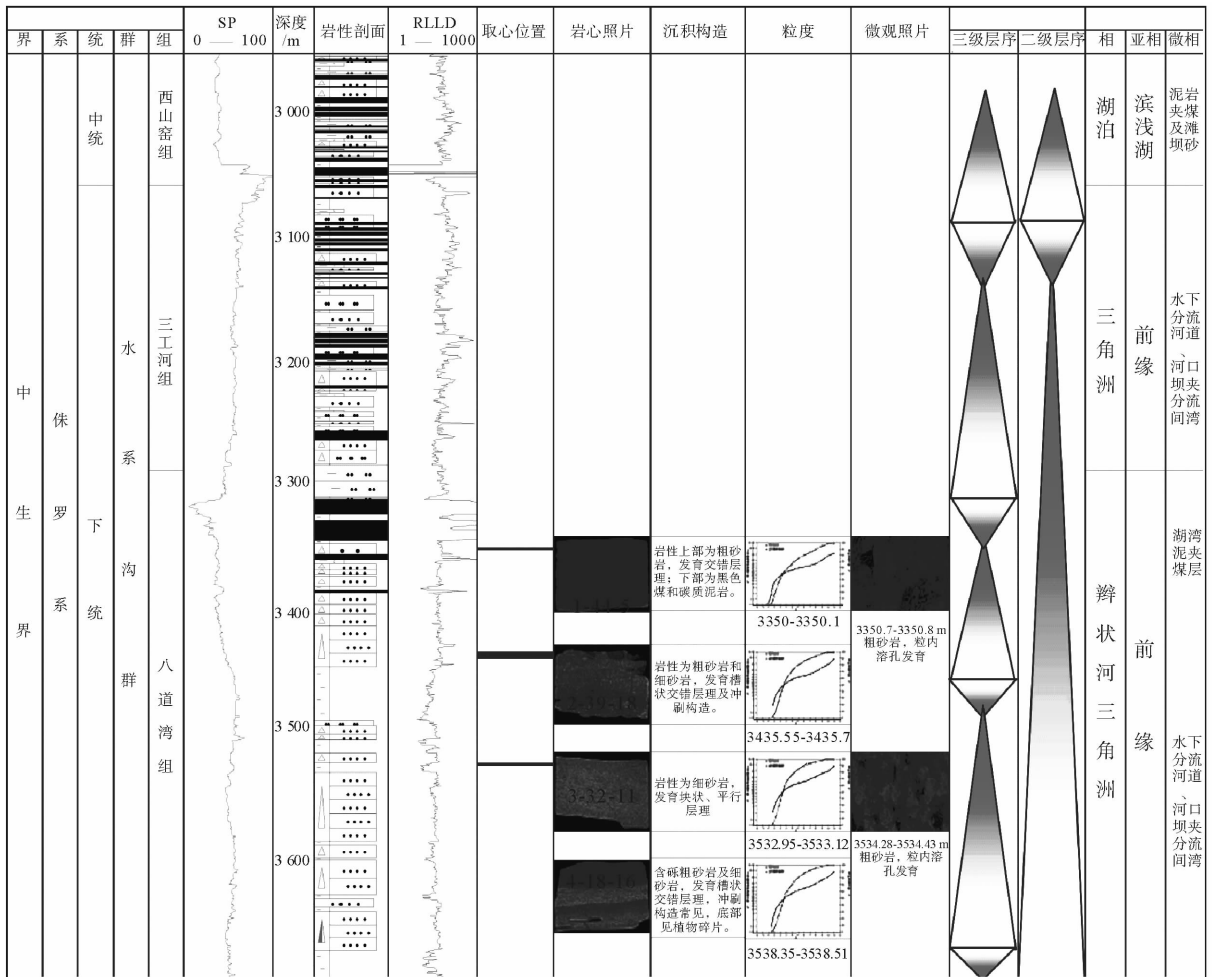


图 2 柯 19 井下侏罗统单井相综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive columnar section of single well phase in lower Jurassic series of Ke 19

通过柯 191 井取心井段沉积微相分析(图 3),八道湾组辫状河三角洲前缘水下分流河道发育。水下分流河道砂体是辫状河三角洲平原亚相水下延伸的部分,主要由粗砂岩、中砂岩和细砂岩构成,碎屑颗粒分选较好,具有下粗上细的正粒序。发育块状层理、冲刷构造等,单层厚度 3~6 m,复合砂体厚度 20~30 m,自然伽玛曲线形态多呈钟形和箱形。该类砂体主要见于八道湾组中下部。

2.2 粒度

对八道湾组储层而言,三角洲前缘亚相水下分流河道微相形成于强水动力条件下,保存了搬运不远的粗碎屑颗粒。显微镜下薄片统计证实,砂岩粒度中值与物性具有一定相关性,碎屑颗粒越粗,即粒度中值越大,储层的孔隙度与渗透率也越高。而石英抗磨蚀能力强,容易保存,因此,分流河道微相是有利的储层微相,分流河道中的粗粒颗粒对储层物性具有建设作用。

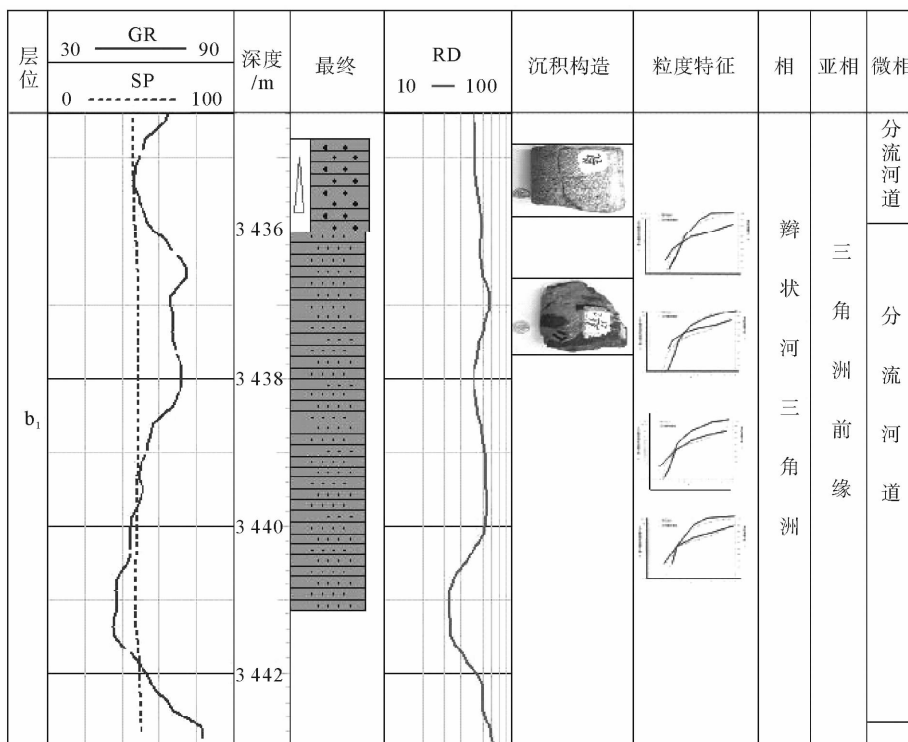


图3 柯191井八道湾1砂组3小层(B13)3434.65~3441.15 m 沉积微相图

Fig. 3 The microfacies of 3 small layers (B13) of 1st sand group in Badaowan of Ke 191 wells(3434.65-3441.15 m)

2.3 砂岩的矿物组成

该区下侏罗统储层以中粗砂岩、不等粒砂岩、细砂岩为主,少量砂砾岩,颗粒成份主要包括石英、岩屑和长石。柯19井、柯20井、柯21井、柯191井4口钻井89个岩矿样品分析表明,西山窑组和三工河组砂岩成份中石英、岩屑和长石三者含量基本相当,八道湾组砂岩以岩屑含量最高(30.9%~60.7%,平均含量为48.73%);岩屑类型主要为岩浆岩岩屑,少量变质岩岩屑,不含沉积岩岩屑;石英含量在29.9%~56.4%之间,平均为43.91%;长石包括钾长石和斜长石,含量为9.4%~29.9%,平均19.75%。通过砂岩类型三角图分析表明,研究区储层主要为长石岩屑砂岩,其次为岩屑砂岩。

三者的含量与储层物性之间的关系如图4所示。

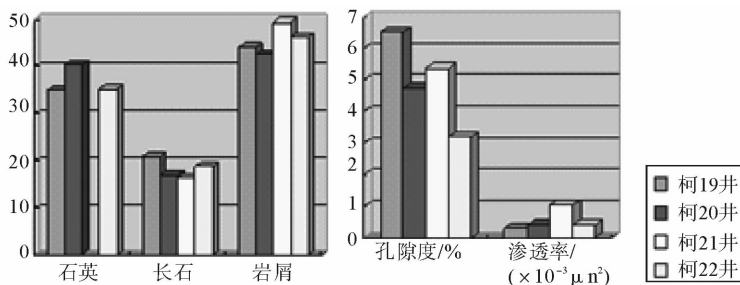


图4 储层岩石矿物含量与孔隙度、渗透率之间关系对比图

Fig. 4 The comparison between mineral content and permeability, porosity of reservoir rock

三者的含量与储层物性之间的关系如图4所示。

2.3.1 石英含量

从石英含量与储层物性关系来看,石英含量与孔隙度、渗透率具有正相关性。随着石英含量升高,孔隙度、渗透率呈略升高趋势。石英硬度大,抗压实作用强,但岩石中存在的大量塑性颗粒会引起岩石强度的变化^[10-11],因此在一定程度上抑制了砂岩早期强烈压实作用,孔隙更容易保存,保留下来的孔隙为后期酸性流体的注入提供了条件。

2.3.2 岩屑含量

从岩屑含量与孔隙度、渗透率相关性来看,岩屑含量与储层物性相关性不太明显,储层物性随岩屑含量升高略呈降低趋势。岩屑成分主要是塑性的千枚岩、低变质泥岩和板岩。塑性碎屑含量升高导致砂岩抗压能力降低,随着岩屑含量升高,砂岩早期易被强烈压实致密,不利于粒间孔保存,后期酸性流体不易注入储层。

2.3.3 长石含量

长石含量与孔隙度的相关性具有分段性,长石含量小于15%时,孔隙度随长石含量升高而升高;长石含量15%~23.5%时,孔隙度随长石含量升高而降低;当长石含量大于23.5%时,孔隙度随长石含量升高具有升高趋势。该区孔隙度的变化与石英含量关系更为密切。从长石含量与石英含量关系图可以看出(图4),储层母岩具有分异特征,以长石含量15%和23.5%划分的三个范围代表了不同的岩石类型,岩性类型主要为长石岩屑砂岩及岩屑砂岩。

长石含量与渗透率相关性不明显。由于长石稳定性差,易发生溶蚀形成长石溶孔,增加储层的孔隙度,但对渗透率影响不大。

3 成岩因素对储层的控制作用

该区胶结物主要为碳酸盐、粘土和硅质,多以充填孔隙或交代颗粒的方式出现,主要对孔隙度、渗透率起破坏性作用,但也有一些矿物的胶结会起到保存孔隙或提供次生孔隙的作用。下面分别讨论成岩作用对储层孔隙的影响。

3.1 压实作用使储集空间随埋深的增大而变小

随着埋深的增加,碎屑岩储层所经历的压实作用逐渐增强,压实特征主要表现为碎屑颗粒间的接触关系由点、线一点向点一线及线状接触过渡,呈塑性岩屑挤压变形等。八道湾组碎屑岩储层中胶结类型为压嵌式,说明压实作用强烈。从储层物性与埋深关系图可以看出(图5、图6),随着储层埋深增大,物性变差。表明本区压实作用对储层的影响比溶蚀作用更强。

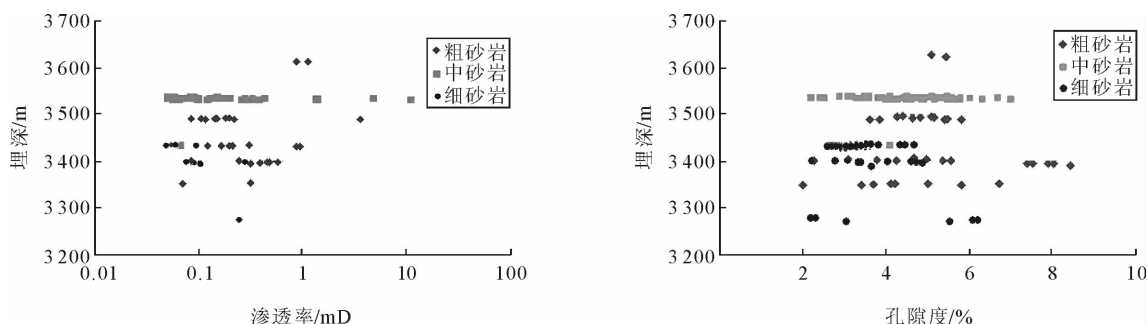


图5 岩心分析储层物性与埋深关系图

Fig. 5 The diagram of relationship between reservoir properties and depth through core analysis

3.2 充填胶结作用使孔隙度减少

充填胶结作用使储层孔隙度减少,物性变差。八道湾组碎屑岩储层中胶结物主要为碳酸盐、硅质和粘土矿物。随充填物增加,储层物性具有明显减少趋势。

3.3 溶蚀作用形成次生孔隙

Wickinson等^[12]认为微裂隙是最常见的,对渗透率的大小起主导作用,原因是微裂隙连通了因颗粒的溶

蚀作用而产生的次生孔隙。1977 年, Van^[13]、Wyatt^[14]、Price^[15] 等首先在北海和加拿大北部的砂岩储层中发现了次生孔隙, 随后石油地质学家逐渐认识到次生孔隙在储层中的重要作用。认为次生孔隙是在有机质演化过程中释放二氧化碳并在一定压力条件下在地层中形成弱碳酸, 使得砂岩中的方解石胶结物发生溶解, 形成次生孔隙。

八道湾组砂岩的溶蚀对象主要是长石、岩屑和充填物。长石被无机酸溶解后形成高岭石和石英, 石英不容易被流体带走, 一部分往往沉淀下来充填于孔隙之中, 而有机酸与长石反应形成络合物, 可随流体带走, 因而有机酸的溶解作用利于形成次生孔隙, 改善储层的物性。八道湾组碎屑岩储层中溶解作用形成了粒内溶孔, 在 91 个铸体薄片中有 34 个样品发育粒内溶孔, 面孔率 0.1%~2.2%, 平均 0.69%。多数样品粒内溶孔不发育, 反映本区溶蚀作用不强, 在强压实作用下, 形成了特有的致密储层。

研究区储层的储集能力由储层中的裂缝、内孔和粒间溶蚀孔控制。薄片鉴定、扫描电镜及 X 射线衍射粘土矿物分析表明, 砂岩中长石和岩屑的溶蚀最常见(图 7), 其次为杂基和胶结物的溶蚀。长石的溶蚀作用常沿解理面进行, 形成蜂窝状孔隙, 砂岩中还可见到长石铸模孔。石英的溶蚀表现为边缘呈不规则状、港湾状, 也可见少量粒内溶蚀孔。云母解理、长石颗粒中易溶组分常被溶蚀成蜂窝状, 部分颗粒完全溶蚀呈铸模孔隙。八道湾组砂岩中发育的自生粘土矿物主要为伊利石, 少量的伊/蒙混层矿物和绿泥石; 伊利石呈片状分布于粒间孔隙中, 常与自生石英伴生, 充填于剩余粒间孔、长石等碎屑的溶蚀孔隙, 降低了孔喉半径及渗透性; 而片状伊利石等粘土矿物及微晶石英在剩余粒间孔及颗粒溶孔中的沉淀, 是造成八道湾组储层特低渗的重要原因。方解石胶结物的溶蚀现象不明显, 因为该区亮晶方解石胶结物的形成时间较晚, 因此, 研究区大规模的溶蚀作用发生在亮晶碳酸盐胶结之前。

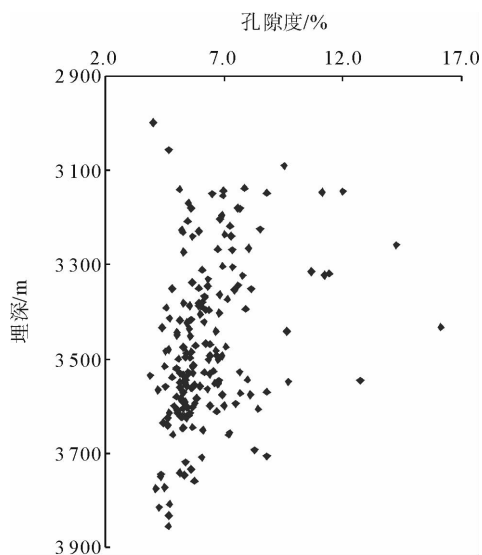
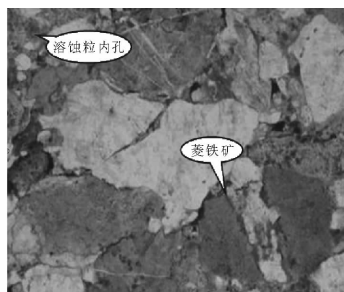
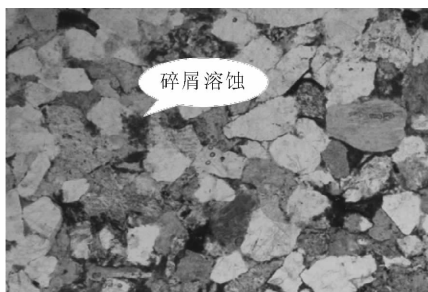


图 6 测井解释岩心分析储层孔隙度与埋深关系图

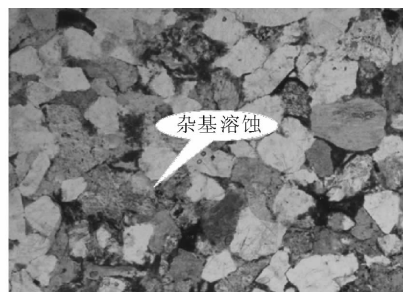
Fig. 6 The relationship between porosity and depth through logging interpretation and core analysis



长石溶蚀
(柯19, 3 394.84 ~ 3 395.01)J1b, 粗粒长石岩屑砂岩, 孔隙发育差, 为溶蚀粒内孔、剩余粒间孔。菱铁矿充填孔隙, 石英次生加大Ⅱ级。单偏光, ×100



碎屑溶蚀
(柯20, 3 492.30 ~ 3 491.41)J1b, 单偏光, ×100



杂基溶蚀
(柯20, 3 490.99 ~ 3 491.11)J1b, 单偏光, ×100

图 7 溶蚀作用典型特征图

Fig. 7 The typical characteristics of dissolution

4 构造作用对砂岩储集性的影响

吐哈盆地台北凹陷北部山前带西起卡拉图, 东至大步^[16-18]。博格达山造山运动对其南北两翼沉积地层

进行了强烈的推覆挤压,沿山体走向形成带状褶皱。受燕山和喜山两期构造运动控制,山前带构造圈闭普遍形成于中晚燕山期,定型于喜山期。柯柯亚构造带位于近凹低断阶区,构造变形相对较弱,圈闭形态完整。该地区断层形成时间早,并在后期构造运动中持续活动。构造应力作用产生了大量裂缝,在八道湾组碎屑岩中裂缝密度为2.71条/m,柯191井裂缝密度达5.2条/m,巴喀气田孔隙发育差,基质渗透率低,需压裂方可获得工业气流,在该区气井中,工业气流层均见裂缝显示,而非工业气流层,裂缝显示不明显。

5 结论

1)研究区发育辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积,岩性为中砂岩和粗砂岩,厚度大、横向分布稳定。沉积作用决定了储层的岩石组成、结构以及原生孔隙发育状况;而储层岩石的矿物组成和结构是影响物性的关键因素,并在后期成岩演化中有重要的作用;成岩作用对孔隙进行改造,有利于油气储集。

2)研究区储层为特低渗或致密储层,储集空间主要由粒内、粒间溶孔构成。储层中裂缝和孔隙发育,改善了致密储层渗滤能力,降低了储层产气物性下限,有利于提高气井产量。

3)由于受近东西向主断层和近南北向协调断层控制,柯柯亚构造带整体上有南北分带、东西分块的特点,平面上各断块自东向西呈现出依次抬高的趋势。受构造作用影响在储层中形成大量的裂隙,储层物性得到一定改善。但由于气藏构造条件复杂,埋藏深度大,储层物性较差,多数气井自然产能较低等因素,气藏勘探开发面临探明程度不高、需要加快落实探明储量资源、压裂改造提高单井产量难度较大的问题,因此要建立切实可行的勘探开发方案还存在一系列亟待解决的问题。

参考文献:

- [1]李健,吴智勇. 深层致密砂岩气藏勘探开发技术[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
- [2]杨晓宁,张惠良,朱国华. 致密砂岩的形成机制及其地质意义:以塔里木盆地英南2井为例[J]. 海相油气地质,2005,10(1):31-36.
YANG Xiaoning,ZHANG Huiliang,ZHU Guohua. Formation mechanism and geological implication of tight sandstones:A case of well YN-2 in Tarim basin[J]. Marine Origin Geology,2005,10(1):31-36.
- [3]刘吉余,马志欣,孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. 天然气地球科学,2008,19(3):316-319.
LIU Jiyu,MA Zhixin,SUN Shuyan. Present research situation and prospect of tight gas sands[J]. Natural Gas Geoscience,2008,19(3):316-319.
- [4]董晓霞,梅廉夫,全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学,2007,18(3):351-355.
DONG Xiaoxia,MEI Lianfu,QUAN Yongwang. Types of tight sand gas accumulation and its exploration prospect[J]. Natural Gas Geoscience,2007,18(3):351-355.
- [5]康竹林. 中国深层天然气勘探前景[J]. 天然气工业,2000,20(5):124.
KANG Zhulin. The exploration prospect of deep gas in China[J]. Natural Gas Industry,2000,20(5):124.
- [6]董晓霞,梅廉夫,全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学,2007,18(3):351-355.
Dong Xiaoxia,MEI Lianfu,QUAN Yongwang. Types of tight gas accumulation and its exploration prospect[J]. Natural Gas Geoscience,2007,18(3):351-355.
- [7]姜振学,林世国,庞雄奇,等. 两种类型致密砂岩气藏对比[J]. 石油实验地质,2006,28(3):211-219.
JIANG Zhenxue,LIN Shiguo,PANG Xiongqi,et al. The comparison of two types of tight sand gas reservoir[J]. Petroleum Geology&Experiment,2006,28(3):211-219.
- [8]赵文智,程克明,邹才能,等. 吐哈盆地煤系地层油气聚集特征与勘探对策[J]. 天然气工业,1995,13(4):22-23.
ZHAO Wenzhi,CHENG Keming,ZHOU Caineng,et al. Oil-gas accumulation features of coal measure strata in Tuha basin and exploratory countermeasures[J]. Natural Gas Industry,1995,13(4):22-23.
- [9]贾会冲,张哨楠. 鄂北塔巴庙地区上古生界储层发育的控制因素[J]. 天然气工业,2001,21(增):18-23.
JIA Huichong,ZHANG Shaonan. Factors controlling growth of reservoirs in upper Paleozoic at Tabamiao region in north Erdos basin[J]. Natural Gas Industry,2001,21(s):18-23.
- [10]谢润成,周文,单钰铭,等. 考虑岩样尺度效应时钻井液对岩石力学性质影响的试验评价[J]. 石油学报,2008,29(1):135-139.

- XIE Runcheng, ZHOU Wen, SHAN Yuming, et al. Trial evaluation on drilling fluid and mechanical properties of rock while considering size of rock[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2008, 29(1): 135-139.
- [11] 周文, 高雅琴, 单钰铭, 等. 川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 34-37.
ZHOU Wen, GAO Yaqin, SHAN Yuming, et al. Lithomechanical property of tight sand reservoirs in the second member of Shaximiao formation in Xinchang gas field, west Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 34-37.
- [12] WILKINSON M, HASZELDINE R S, ELLAM R M, et al. Hydrocarbon filling history from diagenetic evidence: Brent Group, UK North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 443-455.
- [13] VAN J D, SINGH A, WARD O P. Recent advances in petroleum microbiology[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2003, 67(4): 503-549.
- [14] WYATT A R. Relationship between continental area and elevation[J]. *Quarterly Journal of Geology Science of London*, 1979, 136: 175-186.
- [15] PRICE N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock[M]. London: Pergamon Press, 1966.
- [16] 表明生, 梁世君, 燕列灿, 等. 吐哈盆地油气地质与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [17] 吴涛. 吐鲁番—哈密盆地构造特征与油气聚集[J]. *石油学报*, 1996, 17(3): 10-15.
WU Tao. The structural characteristics and hydrocarbon accumulation in Turpan-Hami coal-bearing basin[J]. *ACTA Petroleum SINICA*, 1996, 17(3): 10-15.
- [18] 吴涛. 吐哈盆地油气田形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

(上接第 64 页)

- [4] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 106-113.
HOU Fanghao, FANG Shaoxian, DONG Zhaoxiong, et al. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of middle Ordovician Majiagou formation in Ordos basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 106-113.
- [5] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [6] 内蒙古自治区有色地质矿业有限公司. 内蒙古自治区伊金霍洛旗—乌审旗矿区岩盐矿普查报告[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区有色地质矿业有限公司, 2009.
- [7] 黄建松, 李智民. 陕北奥陶纪盐田地质特征、勘查方法及开发前景[J]. *陕西地质*, 2001, 19(1): 4-7.
HUANG Jiansong, LI Zhimin. Geological features, exploration method and development prospects of the Ordovician salt fields in the northern Shaanxi province[J]. *Geology of Shaanxi*, 2001, 19(1): 4-7.
- [8] 史基安, 邵毅, 张顺存, 等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(3): 316-324.
SHI Jian, SHAO Yi, ZHANG Shuncun, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary environment in Ordovician Majiagou formation, eastern Ordos basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 316-324.
- [9] 陈文西, 袁鹤然. 陕北奥陶纪盐盆的区域成矿地质条件分析[J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1564-1574.
CHEN Wenxi, YUAN Heran. Regional ore-forming geological conditions of the Ordovician northern Shaanxi salt basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(11): 1564-1574.
- [10] 辛勇光, 周进高, 邓红婴. 鄂尔多斯盆地南部奥陶统马家沟组沉积特征[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(4): 1-5.
XIN Yongguang, ZHOU Jingao, DENG Hongyin. Sedimentary features of lower Ordovician Majiagou formation in the southern part of Ordos basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(4): 1-5.