

文章编号: 1000-0550(2013)04-0717-07

# 库车坳陷索罕露头区与大北气田井下白垩系储层差异性分析

王波 刘群 张惠良 卢文忠 张荣虎 曾庆鲁

(中国石化杭州地质研究院 杭州 310023)

**摘要** 利用露头来进行地下地层和储层研究,是目前国内外较流行的一种研究思路。本文通过对塔里木盆地库车坳陷大北气田井下巴什基奇克组第三段与其典型露头索罕露头区巴三段砂岩储层差异性分析认为,二者沉积相带一致,岩石学特征略有差异,但是在储集空间类型和储层物性上差异较大。差异原因在于索罕露头区巴三段较大北气田井下经历了浅埋藏、弱压实、弱挤压和现代风化淋滤。露头与井下储层的对比研究对于深入了解库车坳陷深层裂隙性致密砂岩储层性质,进而进行储层评价具有重要的理论和实际意义。

**关键词** 储层研究 差异性分析 巴什基奇克组 露头区 大北气田

**第一作者简介** 王波 男 1983年出生 硕士 沉积学、储层地质学 E-mail: wangbo\_hz@petrochina.com.cn

**中图分类号** TE122.2 **文献标志码** A

## 0 前言

库车坳陷是我国陆上天然气勘探的一个重要领域,白垩系巴什基奇克组是国家“西气东输”的主力气源层,其中大北气田深层致密天然气三级地质储量超过  $2.510 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但是目的层埋藏深(均超过5000 m)、钻井取芯也越来越少,因此深层裂隙性致密砂岩储层的成因机制依然是困扰研究人员的一个难题<sup>[1,2]</sup>。近年来,国内外学者广泛利用露头和现代沉积体与油田地下储层进行类比研究,并且取得了丰硕的成果<sup>[3]</sup>。露头砂体的分布规律、几何形态、内部结构和储层非均质性的定量分析在预测无数据的井间储层特性方面发挥了重要作用。露头区又具备直观、取样方便的特点,因此露头被用作地下地层和储层的模拟对象。索罕露头区位于大北气田区东北方向约50 km,与大北气田属于同一构造带,其白垩系巴什基奇克组第三段在物源、相带(沉积微相、岩性、岩相)以及骨架砂体方面与大北气田井下一致,具有可比性,为大北气田白垩系的典型露头。但是露头区储层特征及成因机制方面是否与前人研究一致<sup>[4]</sup>?是否与井下一致?露头储层样品能否代表井下储层样品开展大规模的开发实验?笔者基于露头区大量浅钻样品(2.5 cm × 30 cm)实验分析的基础上,尝试解决上述储层研究方面的问题,不仅具有较高的理论

意义,同时也具有很强的实用性。

## 1 研究区概况

库车坳陷位于塔里木盆地北部,北缘是南天山造山带,南面是塔北隆起,呈NEE向展布。白垩系主要为下统,缺失上统,自下而上为亚格列木组、舒善河组、巴西盖组和巴什基奇克组,古近系库姆格列木群与白垩系不整合接触。主力含气层巴什基奇克组在垂向上表现为多期扇体相互叠置,在平面上表现为多个扇体相互连接,这样形成的冲积扇—扇(辫状)三角洲复合体直接进入湖盆,形成了白垩纪时期规模巨大的砂体<sup>[5,7]</sup>。大北气田构造上位于库车坳陷北部克拉苏构造带西段,索罕露头区(图1)位于拜城县城西北方向约40 km,大北气田区东北方向约50 km。索罕露头区地表出露地层与大北气田井下一致,其中巴什基奇克组第三段出露条件最好。本次储层对比研究工作也是基于该露头区巴三段大量浅钻样品的实验分析资料,进行露头区与井下巴三段储层差异性分析。

## 2 储层差异性特征

### 2.1 沉积相带

巴什基奇克组第三段沉积时期,大北气田井下为扇三角洲前缘亚相沉积,上部岩性以红褐色细砂岩、

收稿日期: 2012-08-20; 收修改稿日期: 2012-11-12

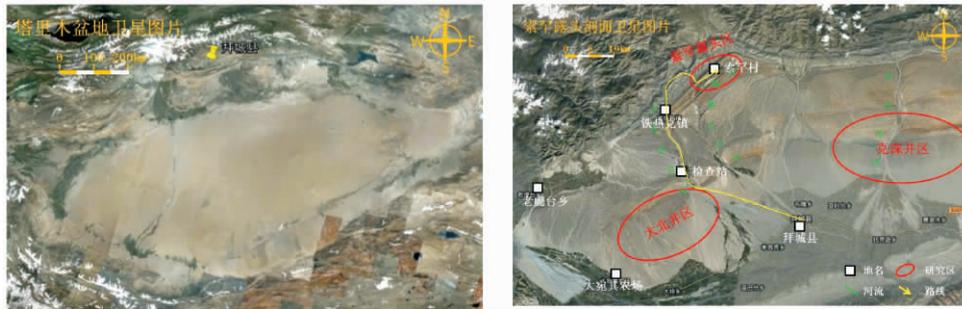


图 1 索罕露头区剖面位置图  
Fig. 1 Location of the Suohan outcrop

粉砂岩与薄层泥岩、泥质粉砂岩不等厚互层为特征，下部为褐灰色细砂岩与泥岩互层沉积<sup>[2]</sup>。根据索罕露头实测剖面的岩性、岩相、结构构造、地表自然伽马、粒度及镜下特征等综合分析表明，索罕露头区巴士奇奇克组第三段亦为扇三角洲前缘细粒岩相沉积与大北气田井下，骨架砂体均为水下分流河道砂体，局部伴生河口坝砂体。露头区沉积相、亚相类型与井下一致，岩性、粒度整体也相似，剖面岩性组合特征也为砂岩夹泥岩，索罕露头区泥岩层相对更发育，砂地比较低。物源与古水流分析表明<sup>①</sup>大北气田井下处于扇体的主物源供给带，而露头区则处于扇体的侧翼或者是连接部位(图 2)。

2.2 岩石学特征

尽管露头和井下巴三段在物源、沉积相带、岩性

岩相及骨架砂体类型等方面具有相同的特征。但是，由于位于不同的扇体部位，沉积物搬运距离不同，储层岩石学特征略有差异：根据索罕露头区 277 片铸体薄片的详细鉴定表明，岩性以岩屑长石砂岩为主，其次为长石岩屑砂岩(图 3)，岩屑以火山岩(凝灰岩)岩屑、变质岩(片岩、板岩)岩屑及云母为主，另有平均含量为 2%~3% 的碳酸盐岩屑；杂基类型为泥质和灰质，均较普遍发育，但是含量较低；胶结物平均总含量为 7%(表)，以方解石为主。大北气田井下<sup>[8]</sup>岩石类型以细粒长石岩屑砂岩为主(图 3)，碎屑成分中石英、长石平均含量较露头低，岩屑含量非常高；填隙物中胶结物和杂基平均值较露头区均偏高(表 1)。露头与井下巴三段储层微观特征表现为结构成熟度相似，成分成熟度露头区略高于井下，长石含量相对

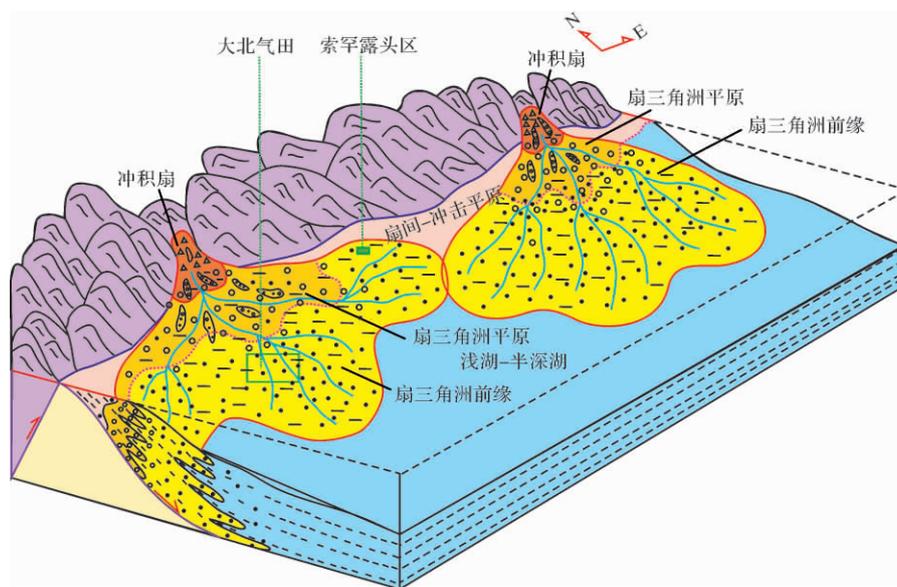


图 2 库车坳陷白垩系巴三段沉积模式

Fig. 2 Sedimentary mode of Cretaceous Bashijiqike Formation 3rd member in Kuqa depression

① 张荣虎, 陈戈, 王波, 等. 库车—塔北地区白垩系—古近系沉积储层研究及目标优选. 中国石油杭州地质研究院, 2011.

较高, 岩屑含量相对少。

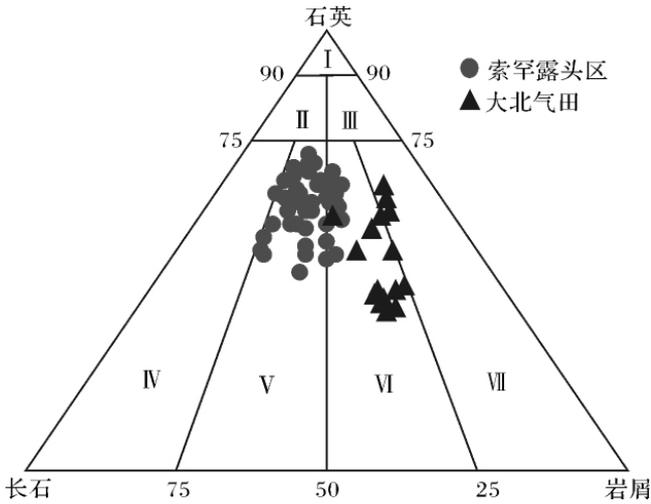


图 3 巴三段岩石骨架组分三角图

Fig. 3 The petromineralogy triangular plot of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member

表 1 索罕露头区与大北气田井下巴三段砂岩储层碎屑成分  
Table 1 Contents of petromineralogy of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member between Suohan outcrop and Dabei gas field

成分	碎屑含量 / %			填隙物含量 / %	
	石英	长石	岩屑	胶结物	杂基
索罕露头区	41 - 79 58.6	5 - 39 22.5	7 - 37 18.9	2 - 16 7.0	1 - 10 3.0
大北井下 (5 300 ~ 5 800 m)	35 - 65 48.2	8 - 22 16.9	22 - 43 34.9	1 - 15 7.8	2 - 14 4.6

### 2.3 储层物性

根据对露头区巴三段 600 个样品测得的 594 组物性数据分析, 露头区孔隙度范围在 1% ~ 20.02% 之间, 平均值 13.16%; 渗透率范围在  $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  ~  $152.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均值为  $28.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 孔渗相关性较好(图 4)。其中优势岩石相(板状交错层理细砂岩 - 平行层理粉砂岩)物性最好, 孔隙度集中在 13% ~ 18%, 渗透率分布在  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  ~  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相比之下, 井下相同的优势岩石相(也为板状层理细砂岩和平行层理粉砂岩)的孔隙度分布在 2% ~ 7%, 渗透率分布在  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  ~  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 基本属于特低孔特低渗储层<sup>[8]</sup>。从储层物性来讲, 露头与井下差异非常大, 露头物性较好,

尤其是孔隙度值较高, 孔渗相关性良好。

### 2.4 储集空间类型

首先索罕露头区孔隙度和渗透率相关性非常好, 反映孔隙主要以粒间孔为主, 其次根据镜下面孔率统计, 原生孔隙与次生孔隙比约为 9.8: 1<sup>②</sup>, 说明即残余原生粒间孔占孔隙类型的绝对优势, 次生孔隙含量较低。另外镜下可识别的孔隙类型, 另外镜下可识别的孔隙类型, 按成因分为 3 类, 包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝。原生孔隙是指原生粒间孔和残余原生粒间孔; 次生孔隙包括粒间溶孔, 长石和岩屑的粒内孔以及泥屑中的微孔隙; 裂缝则包括构造微裂缝、泥屑收缩缝和成岩压碎缝(图 5)。

而井下大北气田储层孔隙类型主要为次生孔隙(含粒间溶孔、粒内溶孔和微孔隙), 其次为原生粒间孔、裂缝(图 5)<sup>[8]</sup>, 裂缝的发育为这种特低孔特低渗深部储层的高产提供了基础<sup>[2]</sup>。露头与井下储集空间类型最大的差别在于前者以原生孔隙为主, 后者则以次生孔隙为主。

索罕露头区与大北气田井下巴三段砂岩储层差异性特征表现为, 二者沉积相带一致, 岩石学特征略有差异; 但是在储集空间类型和储层物性上差异较大。下文通过对比分析露头和井下储层的控制因素, 揭示二者出现上述差异性的主控因素。

## 3 差异性主控因素

### 3.1 埋藏方式

根据地层厚度、地温梯度、剥蚀量、压实系数以及包裹体均一温度等参数作露头区与井下埋藏史图, 并结合电显微镜下的孔隙特征、成岩现象与成岩序列作孔隙演化史曲线(图 6)。从图中可以看出, 大北 202 井区经历了早期长期浅埋、中期抬升暴露和晚期快速深埋的过程<sup>[2]</sup>, 最大埋深达到 5 000 m 以下, 使得孔隙损失较大。而露头区埋藏过程则与此不同, 在历经早期浅埋—抬升—浅埋之后, 在 23.3 Ma 时经历了深埋, 埋深最大 4 000 ~ 4 500 m 之间; 之后略微抬升—沉降后, 于喜山晚期又巨幅抬升, 最终出露地表(图 6); 而且遭受现代地表风化淋滤作用, 使得在浅埋藏且受溶蚀的作用下, 保存了较好的储层物性。对比分析表明, 二者的埋藏方式差异很大, 目前索罕露头区较井下为浅埋藏。

② 卢文忠, 王波, 夏志远等, 大北气田典型露头储层数字化精细描述, 中国石油杭州地质研究院, 2011。

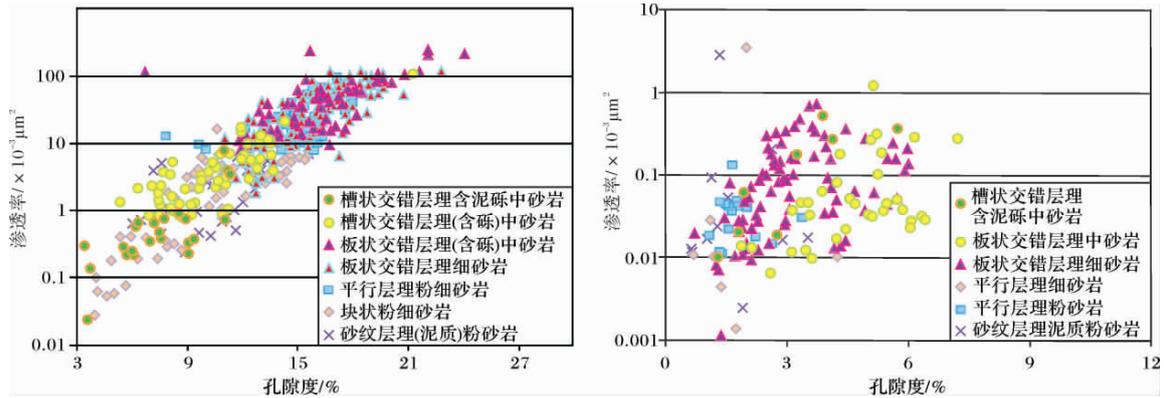
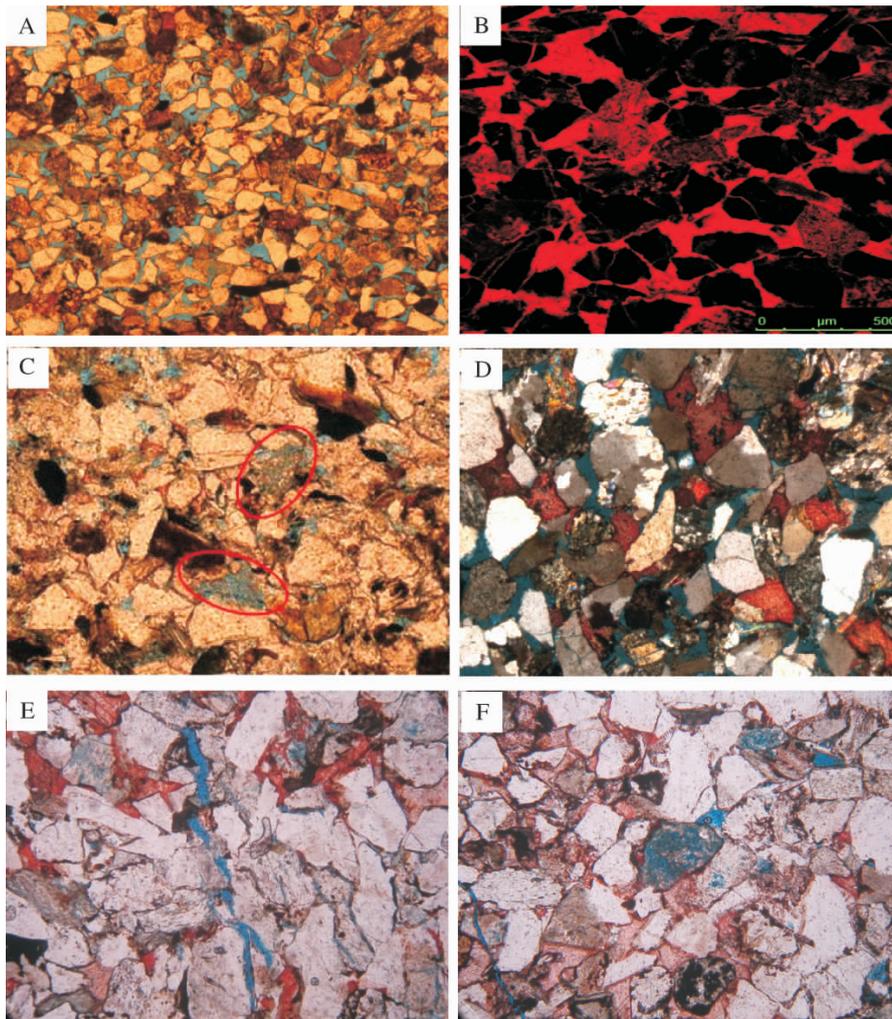


图 4 索罕露头区与大北气田井下巴三段孔渗相关图

Fig. 4 The porosity-permeability correlation of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member between Suohan outcrop and Dabei gas field



A 岩屑长石细砂岩 原生孔隙发育。( - )  $\times 50$   $\phi = 16.78\%$   $K = 72.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。B 岩屑长石细砂岩 原生粒间孔、岩屑内溶孔发育。激光共聚焦照片(红色为孔隙 黑色代表颗粒) C 长石岩屑细砂岩 凝灰岩岩屑粒内溶孔。( - )  $\times 100$   $\phi = 9.48\%$   $K = 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。D 岩屑长石中砂岩 粒间溶孔 灰质碎屑粒内溶孔 长石粒内溶孔。( - )  $\times 100$   $\phi = 15.94\%$   $K = 60.97 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。E 大北 104 井  $\phi$  049.18 m 巴三段 细中粒岩屑砂岩 微裂缝及溶蚀孔 早期孔隙被方解石充填。( - )  $\times 100$   $\phi = 3.3\%$ 。F 大北 202 井  $\phi$  789.20 m 巴三段 含灰中粒岩屑长石砂岩 粒间方解石充填 岩屑溶蚀。( - )  $\times 100$   $\phi = 4.12\%$ 。

图 5 索罕露头区巴三段砂岩储层镜下孔隙特征

Fig. 5 Porosity characteristics under microscope of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member between Suohan outcrop and Dabei gas field

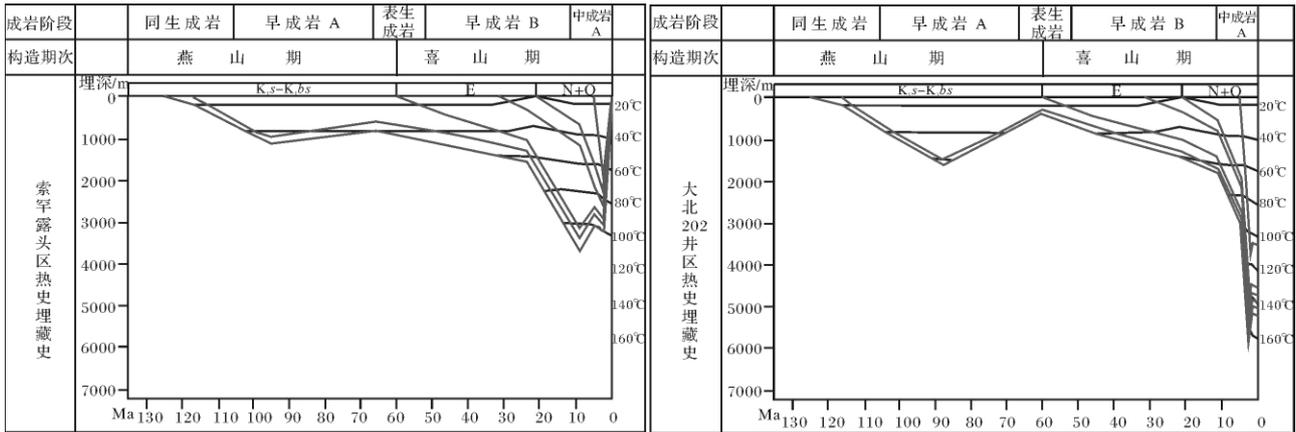


图 6 索罕露头区与大北气田井下巴三段埋藏史对比图

Fig. 6 Comparison diagram of bury history of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member between Suohan outcrop and Dabei gas field

3.2 成岩作用

根据 David W. Houseknecht 1987 年的计算方法<sup>[9]</sup>对压实作用和胶结作用对储层孔隙度造成的丧失进行评价。粒间体积为胶结物体积与残余原生粒间孔隙之和(在发生溶解作用的地层中,颗粒边缘溶蚀而增加的孔隙体积须排除);胶结物总量为各类胶结物含量之和。以原始粒间体积为 40%,分别计算压实作用和胶结作用造成的孔隙损失百分比。而实际孔隙度损失为实际原始孔隙度与上述孔隙度损失百分比的乘积,现今储层孔隙度为实际原始孔隙度与实际孔隙度损失之差。

图 7 左为整个露头区 4 个建模砂体的成岩作用量化图。根据对井下薄片鉴定的胶结物含量与孔隙度数据分析,表明索罕露头区储层压实作用贡献为

36%,胶结作用贡献为 24%。由于井下和露头区的实际原始储层孔隙度一致,且假定为 40%。经计算后露头区实际压实减孔量为 14.4%,实际胶结减孔量为 9.6%,计算露头区现今储层孔隙度为 16%。另外考虑到构造侧向挤压减孔及溶蚀增孔等因素,则该结果与实测储层孔隙度平均值 13.16% 基本相符合。

图 7 右为大北 1 井成岩作用量化图。量化后确定压实作用贡献为 53%,胶结作用贡献为 27%。计算井下实际压实减孔量为 21.2%,实际胶结减孔量为 10.8%,计算井下现今储层孔隙度为 8%。考虑到构造侧向挤压减孔及溶蚀增孔等因素,则该结果与实测储层孔隙度平均值 5% 基本相符合。对比分析表明露头区巴三段储层在成岩作用方面的主要影响因素为压实作用,相比井下为弱压实。

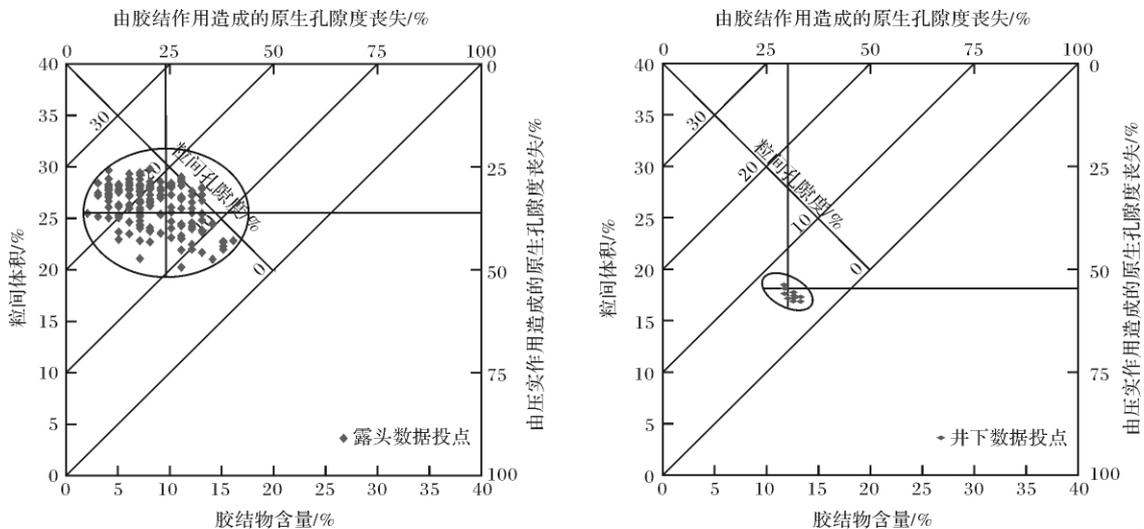


图 7 索罕露头区与大北气田井下巴三段砂岩储层成岩作用量化图(井下数据来自大北 1 井)

Fig. 7 The quantized reservoir diagenesis of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member between Suohan outcrop and Dabei gas field

### 3.3 构造挤压程度

根据前人最大古构造应力减孔的经验计算公式<sup>[10]</sup>,大北1井区白垩系巴什基奇克组三段储层的埋深在5 500~5 800 m之间,成岩演化阶段已达中成岩A2亚期,并处于相对强烈的构造挤压作用范围内,最大古构造应力达74.8~75.4 MPa,其最大减孔量可达6.1%~6.2%。露头区则采用前人侧向挤压减孔实验模拟公式<sup>[11]</sup>,应用Kaiser效应点方法测试得到9组25个数据<sup>②</sup>,露头区最大古构造挤压力值为44 MPa,根据公式得出构造挤压减孔率为3.2%。对比分析表明露头区构造侧向挤压比井下弱。

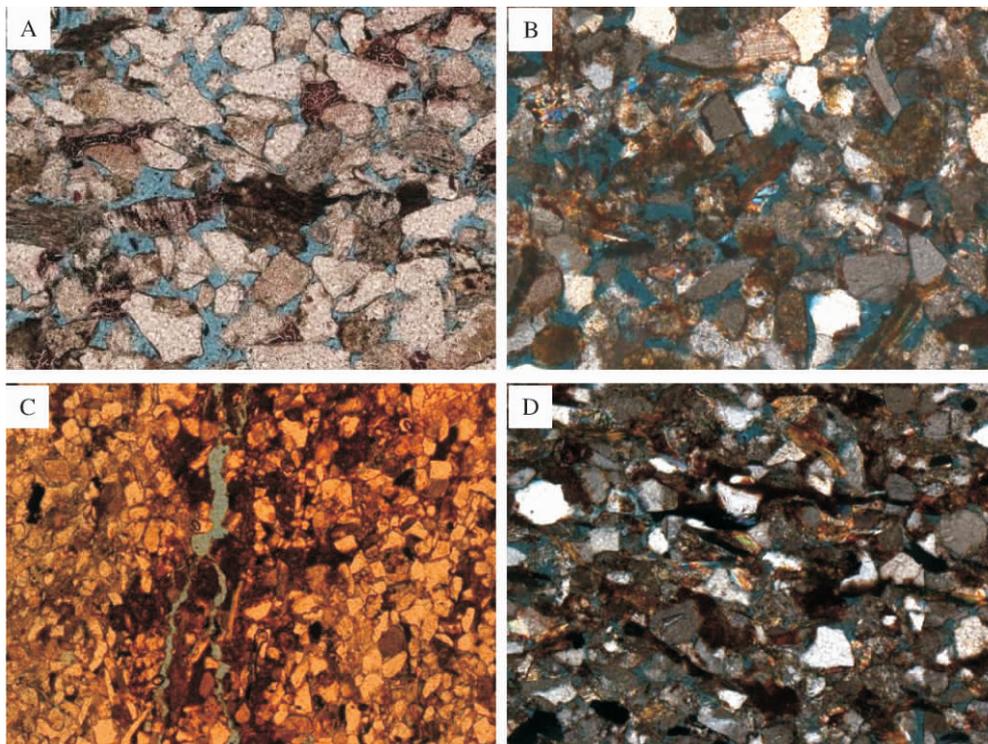
### 3.4 现代风化淋滤作用

露头区巴三段出露地表后遭受了现代风化淋滤作用,形成了一定数量的溶蚀孔隙,改造了储层物性。但是由于现代风化淋滤作用正在进行,经历的地质时间相对较为短暂。相对于古表生期或者埋藏期形成的溶蚀孔隙,使现代风化淋滤作用形成的溶蚀孔隙数量难于统计,但是在镜下可以见到一些现代风化淋滤作用的证据(图8),其中包括泥质层间泄水构造、褐铁矿浸染杂基、渗流物质粒间充填以及高价铁氧化膜等。

综合分析表明,索罕露头区巴三段砂岩储层与井下巴三段储层差异原因在于露头区经历了浅埋藏、弱压实、弱挤压和现代风化淋滤。

## 4 结论

通过露头与井下储层的对比研究表明,索罕露头区与大北气田井下巴三段相带一致,岩石学特征略有差异;二者在储集空间类型和储层物性上差异较大。尽管井下埋藏深、取芯困难,但是利用露头储层样品代替井下样品开展一系列开发实验的思路,面临着重大挑战。进一步分析储层控制因素表明,索罕露头区巴三段砂岩储层与井下巴三段储层差异原因在于露头区经历了浅埋藏、弱压实、弱挤压和现代风化淋滤。这对深入了解库车坳陷深层裂缝性致密砂岩储层性质,进而进行储层评价具有重要的理论和实际意义。基于二者之间的差异性,及勘探开发需求,露头研究成果如何应用到井下,如何设计露头样品代替井下样品的开发实验方案,仍需做大量研究工作。



A 岩屑长石极细砂岩,长石表面风化,渗流粉尘,现代风化作用。( - ) $\times 100$ ,  $\phi = 18.8\%$ ,  $K = 152 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。B 长石岩屑细砂岩,粒间溶孔,高价铁氧化膜,现代风化作用强。( + ) $\times 100$ 。C 泥质细砂岩,方解石胶结,裂缝发育,顺裂缝溶蚀。( - ) $\times 50$ 。D 岩屑长石极细砂岩,泥杂基发育,见褐铁矿浸染颗粒边缘。( + ) $\times 100$ ,  $\phi = 17.45\%$ ,  $K = 54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

图8 索罕露头区巴三段砂岩储层镜下现代风化淋滤特征

Fig. 8 Weathering and leaching characteristics under microscope of Cretaceous Bashiqiqike Formation 3rd member between Suohan outcrop

## 参考文献(References)

- 张丽娟,李多丽,孙玉善.库车坳陷西部古近系—白垩系沉积储层特征分析[J].天然气地球科学,2006,17(3):355-360 [Zhang Lijuan, Li Duoli, Sun Yushan. Analysis of characteristics of sedimentary reservoir between Cretaceous and Palaeogene in the western part of the Kuqa depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 355-360]
- 张荣虎,张惠良,寿建峰,等.库车坳陷大北地区下白垩统巴什基奇克组储层成因地质分析[J].地质科学,2008,43(3):507-517 [Zhang Ronghu, Zhang Huiliang, Shou Jianfeng, et al. Geological analysis on reservoir mechanism of the Lower Cretaceous Bashijiqi Formation in Dabei area of the Kuqa Depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 507-517]
- 蔡希源,李思田,郑和荣,等译.储层模拟中露头和现代沉积类比的综合研究[C]//AAPG论文集80.北京:地质出版社,2008:1-367 [Michael G. Grammer, Paul Mitchell Harris, Gregor Paul Eberli. Integration of Outcrop and Modern Analogs in Reservoir Modeling. AAPG, 2004, 80: 1-394]
- 胡涛,张柏桥,舒志国,等.库车坳陷白垩系巴什基奇克露头储层特征[J].石油与天然气地质,2003,24(2):171-174 [Hu Tao, Zhang Baiqiao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir characteristics in Cretaceous Bashijiqi Formation outcrop in Kuqa depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 171-174]
- 顾家裕主编.塔里木盆地沉积层序特征及其演化[M].北京:石油工业出版社,1996:274-276 [Gu Jiayu. Depositional Sequence Characteristics and Evolution in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 274-276]
- 贾进华.库车前陆盆地白垩系巴什基奇克组沉积层序与储层研究[J].地学前缘,2000,7(3):133-143 [Jia Jinhua. Studies on sedimentary sequence and reservoir of Cretaceous Bashijiqi Formation in Kuqa Foreland Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 133-143]
- 朱玉新,郭庆银,邵新军,等.新疆塔里木盆地库车坳陷北缘白垩系储层沉积相研究[J].古地理学报,2000,2(4):58-65 [Zhu Yuxin, Guo Qingyin, Shao Xinjun, et al. Study on reservoir sedimentary facies of the Cretaceous in the north of Kuqa depression, Tarim basin, Xinjiang [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(4): 58-65]
- 刘春,张惠良,韩波,等.库车坳陷大北地区深部碎屑岩储层特征及控制因素[J].天然气地球科学,2009,20(4):504-512 [Liu Chun, Zhang Huiliang, Han Bo, et al. Reservoir characteristics and control factors of deep-burial clastic rocks in Dabei zone of Kuqa Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 504-512]
- 星子,译.压实作用和胶结作用对砂岩孔隙度降低之相对重要性的评估[C].AAPG译文.海洋地质译丛,1988(5):53-60 [David W. Houseknecht. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71: 633-642]
- 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等.沉积-成岩-构造一体化孔隙度预测模型[J].石油勘探与开发,2011,38(2):145-151 [Zhang Ronghu, Yao Genshun, Shou Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 145-151]
- 寿建峰,朱国华,张惠良.构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用——以塔里木盆地为例压实作用[J].沉积学报,2003,21(1):90-95 [Shou Jianfeng, Zhu Guohua, Zhang Huiliang. Lateral structure compression and its influence on sandstone diagenesis: A case study from the Tarim basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 90-95]

## Analysis of Cretaceous Reservoir Differences between Suohan Outcrop and Dabei Gas Field in Kuqa Depression

WANG Bo LIU Qun ZHANG Hui-liang LU Wen-zhong  
ZHANG Rong-hu ZENG Qing-lu

(Hangzhou Institute of Petroleum Geology PetroChina, Hangzhou 310023)

**Abstract:** The analysis of Cretaceous Bashijiqi Formation 3rd member reservoir finds the similarities and differences between Suohan outcrop and Dabei gas field in Kuqa depression of Tarim Basin. They both have the similar depositional environment and characteristics: both of them mainly deposited fan delta frontal surfaces. Their petrological characteristics are of slightly different. But obvious difference exists in the reservoir property and reservoir space. The physical properties of outcrop are much better with the porosity of 13% ~ 18% and the permeability of  $1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  while the data of Dabei gas field are 2% ~ 7% and  $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Meanwhile the reservoir space types are drastically disparate. The reasons of the differences lay in that Bashijiqi formation 3rd member of Suohan outcrop has ever experienced from shallow burial, low compaction, weak exposure and modern weathering and leaching reformation which Dabei gas field has not. It has important significance to realize reservoir property and reservoir evaluation on tight sandstone and fractured reservoir in Kuqa depression.

**Key words:** reservoir study; difference analysis; Bashijiqi Formation 3rd; Suohan outcrop; Dabei gas field