

库车坳陷 DB 气田白垩系巴什基奇克组砂岩的多期溶蚀

袁 静¹, 成荣红², 朱忠谦², 杨学君², 袁凌荣³, 李春堂⁴

[1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;
3. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 4. 中国石化 华北油气分公司, 河南 郑州 450000]

摘要:以岩心观察、普通薄片和铸体薄片观察与鉴定为基础, 辅以阴极发光显微镜、扫描电镜和油层物性分析等技术手段, 结合区域地质研究成果, 系统研究塔里木盆地库车坳陷 DB 气田白垩系巴什基奇克组砂岩储层溶蚀作用特征及其发育机制, 并剖析其与孔隙演化的关系。结果表明, 库车坳陷 DB 气田白垩系巴什基奇克组砂岩为特低孔-特低渗储层, 发育多种溶蚀孔隙。储层经历多期溶蚀作用, 依次为大气淡水表生淋滤溶蚀作用、有机酸溶蚀作用、微弱的碱性溶解作用和较弱的酸碱交替溶蚀作用, 分别溶蚀早期碳酸盐胶结物、长石、不稳定岩屑和石英质组分等, 形成粒间溶孔、溶蚀缝、超粒大孔隙、粒内溶孔等溶蚀孔隙。结合地层埋藏史、有机质发育史和构造演化史等研究成果, 综合分析认为, DB 气田多期溶蚀和烃类多期注入相匹配是形成现今高产气田的重要原因。

关键词:多期溶蚀; 砂岩; 巴什基奇克组; 白垩系; 气田; 库车坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Multi-staged dissolution of sandstone in Cretaceous Bashijiqike Formation in DB gas field of Kuqa Depression, Tarim Basin

Yuan Jing¹, Cheng Ronghong², Zhu Zhongqian², Yang Xuejun², Yuan Lingrong³, Li Chuntang⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. CNOOC Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057, China;
4. SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Characteristics and genesis of dissolution and its influence over pores in sandstone reservoirs of the Cretaceous Bashijiqike Formation in DB gas field of Kuqa Depression are studied based on observation of cores, and normal/cast thin sections, analyses through cathodoluminescence microscope, scan electricity microscope, and characterization of reservoir physical properties, and etc. The result shows that the sandstone reservoirs in the Formation have ultra-low porosity and permeability and contain various types of dissolved pores. The reservoirs had experienced successively atmospheric water supergene leaching (dissolving carbonate cementation), organic acid dissolution (dissolving feldspar), weak alkaline dissolution (dissolving unstable debris), and less weak alternative acid/alkali dissolution (dissolving quartzose), resulting in intergranular dissolution pores, dissolution fractures, large dissolution pores surpassing grain size, intragranular dissolution pores, and etc. A combination of the study with previous analyses, including stratigraphic burial history, and evolutionary history of organic matter and tectonics of the Formation, indicates that right timing between multi-staged dissolution and hydrocarbon charge was critical for forming prolific DB field.

Key words: multi-stage dissolution, sandstone, Bashijiqike Formation, Cretaceous, gas field, Kuqa Depression

自 20 世纪 80 年代以来, 人们愈加认识到碎屑岩中次生孔隙对油气储集的重要性, 提出了包括大气淡水淋滤、碳酸水溶液引起的溶解、有机酸引起的溶解、收缩裂缝、粘土矿物转化、硫酸盐溶解和碱性介质引起的石英质组分溶解^[1-11] 等在内的众多成因机制。DB 气田位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带西端, 天

然气储量大, 已形成良好的产能。主力产层白垩系巴什基奇克组埋深普遍大于 5 000 m, 储集空间以次生溶孔为主, 是天然气储量的主要贡献者, 形成期次多, 形成机制复杂。目前, 对该区的研究重点主要集中于对裂缝的识别、描述、评价与成因分析^[12-16], 对储层成因机制和整个库车坳陷白垩系的成岩作用也有所涉

收稿日期: 2015-03-12; 修订日期: 2016-06-12。

第一作者简介: 袁静 (1972—), 女, 教授, 储层沉积学和储层地质学。E-mail: drjyuan@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05003-04); 中国石油科技重大专项 (2010E-2103)。

及^[17-20],但尚无专文开展溶蚀作用对深部储层孔隙形成演化的影响研究。本文以普通薄片和铸体薄片观察与鉴定为基础手段,辅以的岩心精细观察、阴极发光显微镜、扫描电镜、粘土矿物 X-衍射、流体包裹体、油层物性分析以及测井成像解释等技术手段,结合区域储层地质研究成果,系统研究 DB 气田巴什基奇克组砂岩储层的多期次溶蚀特征,同时回溯孔隙演化历史。

1 区域地质背景

DB 气田与西气东输的起点——克拉 2 气田同属塔里木盆地库车坳陷北缘克拉苏构造带(图 1),且较克拉 2 气田更接近于生油凹陷,是有利的油气聚集成藏区域。DB 地区自下而上发育三叠系、侏罗系、下白垩统、古近系、新近系及第四系,缺失上白垩统。三叠系和侏罗系为两套优质煤系烃源岩。主要目的层段为下白垩统巴什基奇克组,具有埋藏深,成岩作用强的特征。古近系库姆格列木群膏岩、盐岩和泥岩为优质盖层。前人研究表明,在白垩系巴什基奇克组沉积早期,DB 地区邻近盆地边缘,发育了一套扇三角洲前缘(主要为水下辫状分流河道与河口坝)的粗碎屑沉积物质(巴三段)。到巴什基奇克组沉积中晚期,在克拉苏构造带沉积了辫状河三角洲前缘(主要为水下分流河道与河口坝)及滨浅湖沉积(巴二段)^[18-19]。白垩纪末—古近纪初(距今 89 Ma)^[21],由于构造抬升,DB 地

区整体缺失上白垩统,且下白垩统巴一段也全部遭受剥蚀。古近世早期研究区重新接受沉积,自中新世开始快速深埋,至今目的层最大埋深超过 6 000 m。从古—始新世至上新世,研究区经历了 4 次较大规模的构造活动,构造挤压作用主要发生在约 25.0 Ma 以后。构造抬升和强烈挤压、早期缓慢浅埋—后期快速深埋^[22]的构造—埋藏历史势必对研究区储层演化产生强烈影响。

2 岩石学特征和储集空间类型

2.1 岩石学特征

岩心观察表明,DB 气田巴什基奇克组岩石颜色普遍为褐色、褐红色与褐灰色,偶为灰绿色和灰白色,反映沉积物主要形成于弱氧化环境。对该区已钻井巴什基奇克组各岩石类型的统计结果表明,其岩石类型以细砂岩、粉砂岩和泥岩为主,泥质粉砂岩和粉砂质泥岩较少,偶见中砂岩和含砾粗砂岩。总体上,巴二段比巴三段岩性稍粗。

从该区巴什基奇克组砂岩成分上看,以长石岩屑细砂岩最为常见,平均石英含量为 51.1%,平均长石含量为 19.9%,平均岩屑含量为 28.8%,含少量云母。总体上,巴三段主要为长石质岩屑砂岩(和杂砂岩),巴二段砂岩中长石含量较高,主要为岩屑质长石砂岩。

微观观察表明,DB 气田巴什基奇克组砂岩胶结物

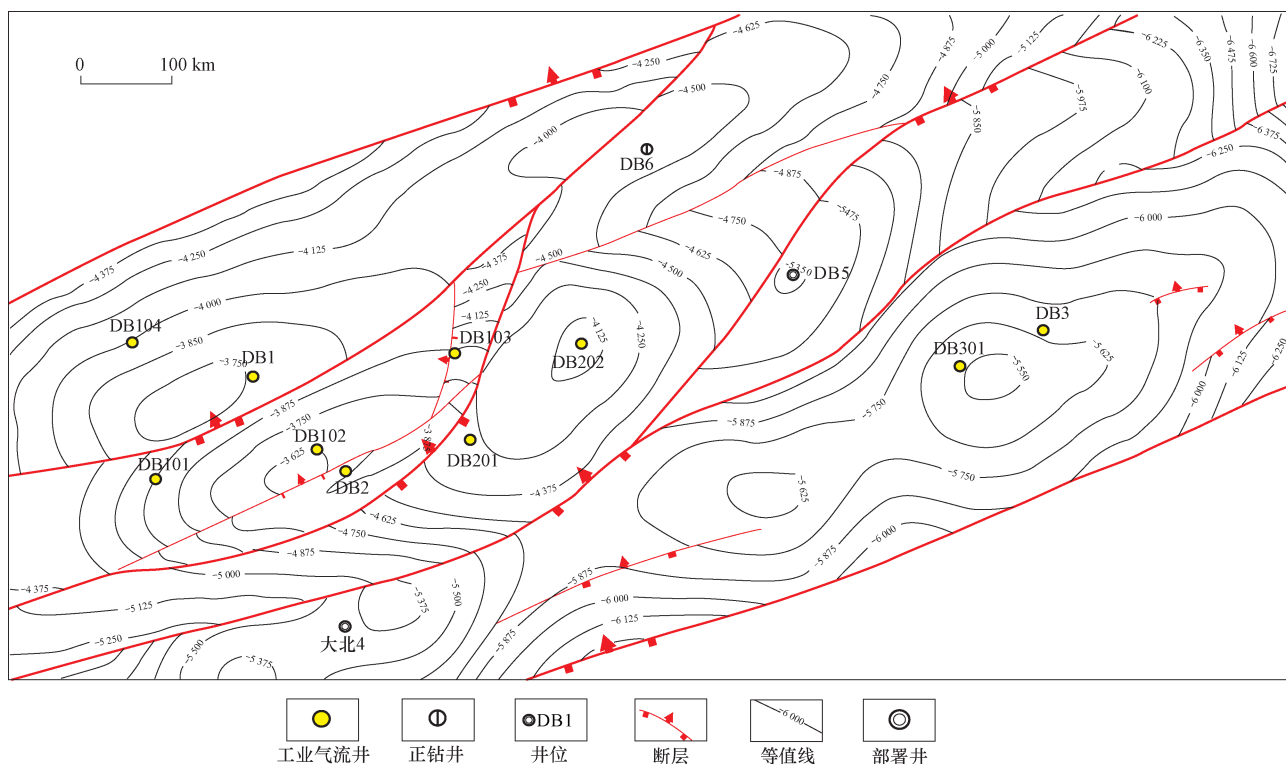


图 1 库车坳陷 DB 气田构造纲要

Fig. 1 Structural outline of DB gas field in Kuqa Depression

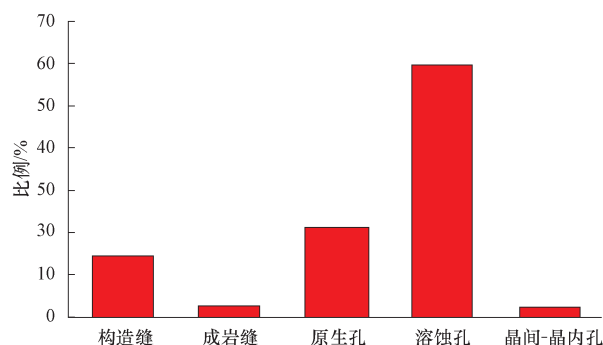


图2 DB气田白垩系砂岩微观储集空间组成

Fig. 2 Histogram showing components of microscopic reservoir spaces of the Cretaceous sandstones in DB gas field

平均含量为9.1%,局部可高达20%~30%,以含铁方解石和方解石为主,约占胶结物总量的90%。另有少量自生白云石、自生石英、自生长石和石膏类发育,其中自生石英和自生长石多以颗粒加大边状产出,碳酸盐类胶结物和石膏类多以粒间孔隙充填状产出,有时还可见其交代颗粒。

2.2 储集空间类型

DB气田巴什基奇克组顶部现今埋深大于5500m,岩石孔隙度主要分布在3.0%~8.0%,平均值约为6%,渗透率主要分布在 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔-特低渗储层。岩石薄片镜下分析发现,DB气田巴什基奇克组砂岩面孔率较小,平均值仅为1.28%,但储集空间类型多样,属裂缝-孔隙型。原生孔、溶蚀孔和晶间-晶内孔等各类孔隙占总面孔率的83%(图2),其中,包括粒间溶孔、粒内溶孔、超粒大孔和铸模孔在内的各类次生溶蚀孔占总面孔率的60%,孔隙大小为0.5/0.01~0.08mm(最大/主要区间),构成气田的主要储集空间。

溶蚀孔隙的发育程度代表了溶解作用的强弱,统计分析溶蚀孔隙面孔率与物性的关系可以得出溶解作用对砂岩基质物性的影响。DB地区巴什基奇克组岩石基质物性与溶孔面孔率呈现正相关关系,即随溶孔增多,储层物性变好(图3)。岩样孔隙度越高,溶孔面孔率所占比例越大,溶孔面孔率达到1%以上后,岩样基质渗透率呈稳定上升趋势。一方面反映溶蚀作用对储层具有较高孔隙度提供了主要贡献,同时也说明溶蚀作用越显著,所形成的溶蚀孔隙连通性越好,越有利于流体在其中渗流。

2.3 各沉积微相砂体内储集空间组成

通过薄片观察发现,DB地区白垩系巴什基奇克组不同沉积微相内储集空间组成具有明显差异。整体而言,辫状河三角洲前缘砂体与扇三角洲前缘砂体比较,储集空间中孔隙相对较发育,微裂缝相对不发育,储集空间中微裂缝所占比例大小与主要储集沉积微相具有明显关系,辫状河三角洲水下分流河道砂体最小,扇三角洲前缘河口坝其次,分流河道间砂体最大(表1)。

3 溶蚀作用及其产物基本特征

在DB气田白垩系巴什基奇克组储层所经历的成岩作用中,以压实作用、胶结作用和溶蚀作用对其物性影响最为明显。对200余片岩石普通薄片和铸体薄片微观观察和分析表明,DB气田巴什基奇克组储层在强烈压实和挤压作用后,溶蚀作用的发生明显改善了储层的储集性能。本区的溶蚀孔隙主要为长石和不稳定岩屑粒缘和粒内溶蚀所致,碳酸盐类胶结溶蚀形成的粒间孔隙也较常见,偶尔可见石英质组分的直接溶蚀现象。按溶蚀作用与岩石组分的关系和强烈程度,可

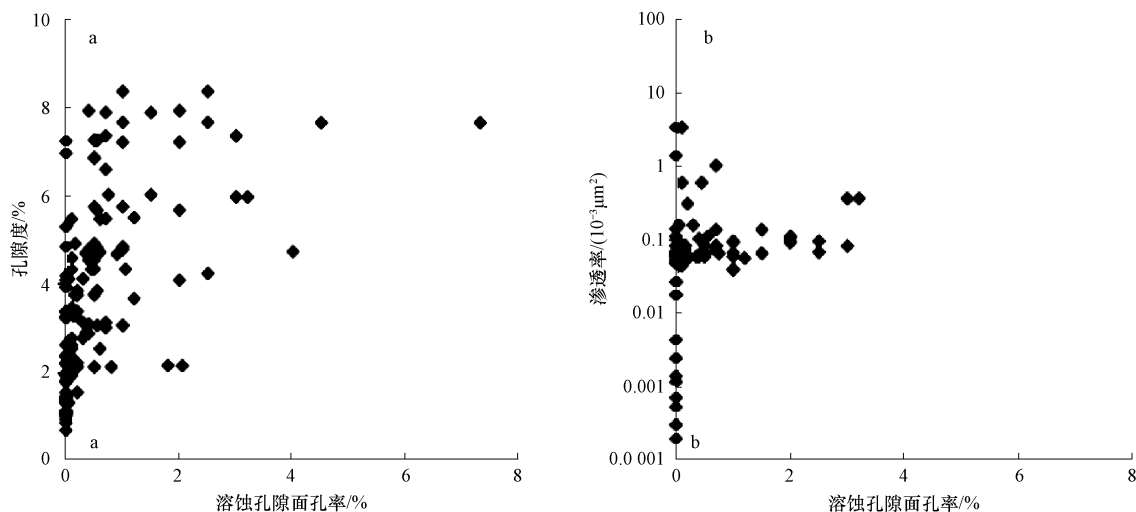


图3 DB气田白垩系砂岩溶蚀孔隙面孔率与基质物性关系

Fig. 3 Surface porosity of dissolution pores vs. matrix properties of the Cretaceous sandstones in DB gas field

a. 面孔率与孔隙度关系;b. 面孔率与渗透率关系

表 1 DB 气田白垩系主要沉积微相微观储集空间组成

Table 1 Microscopic reservoir space types in different microfacies of the Cretaceous sandstones in DB gas field

沉积相	沉积微相	数值	面孔率/%	构造缝/%	成岩缝/%	原生粒间孔/%	粒间溶孔/%	粒内溶孔/%	晶间-晶内孔/%	孔径/mm	孔喉配位数	储集空间类型
辫状河三角洲	水下分流河道	最大	10.80	1.00	0.90	3.00	5.30	2.00	1.20	0.35	3	孔隙型
		最小	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
		平均	1.61	0.04	0.03	0.51	0.78	0.22	0.03	0.01~0.10	0~1	
	河口坝	最大	4.50	3.00	0.05	1.00	2.70	0.50	0	0.50	2	裂缝-孔隙型
		最小	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
		平均	1.88	0.40	0.01	0.33	0.90	0.24	0	0.01~0.08	0~1	
扇三角洲	水下辫状河道	最大	5.50	3.50	0.40	1.00	3.00	2.00	0.50	0.20	3	裂缝-孔隙型
		最小	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
		平均	1.00	0.32	0.02	0.03	0.38	0.21	0.04	<0.01~0.08	0~1	
	河口坝	最大	5.50	5.00	0.20	0.20	1.00	1.00	0	0.2	2	孔隙-裂缝型
		最小	0	0	0	0	0	0	0	—	—	
		平均	1.15	0.59	0.02	0.02	0.33	0.19	0	0.01~0.10	0~1	

注:数据源于薄片鉴定结果,孔径和孔喉配位数中的分子为最大值,分母为主要区间。

将其分为粒间溶蚀孔、粒内溶蚀和过量溶蚀,分别形成粒间孔隙、粒内孔隙和超粒大孔隙。

3.1 粒间溶蚀和粒间溶孔

镜下观察发现,DB 气田巴什基奇克组砂岩填隙物(包括裂缝充填物)溶解发生完全或不完全溶解,或者长石和中酸性喷出岩岩屑颗粒边缘发生溶蚀形成的粒间溶孔约占面孔率的 25%~30%。其特点为:颗粒间含少量或无填隙物,颗粒边缘凹凸不平呈蚕食状,溶蚀强烈时颗粒呈现松散状(颗粒间多成点接触)甚至漂浮状(图 4a),并常与裂缝连通或形成溶蚀缝;周围未发生溶蚀作用的颗粒间则被压实呈致密接触。进一步研究发现,许多颗粒边缘常保留有未被溶蚀的泥铁质薄膜(图 4a),阴极发光显微镜下观察可见其发橙色光(图 4b 视域左上方),分析为早期成岩作用形成的含铁泥晶碳酸盐胶结物,如菱铁矿,反映其沉积期及成岩早期水体半氧化-半还原碱性较明显的介质特征。

3.2 粒内溶蚀和粒内溶孔

研究区常见的粒内溶蚀主要发生在长石与酸性喷出岩岩屑内(图 4c)。该类孔隙的大小与颗粒内发生溶蚀作用的强度密切相关,溶蚀作用较弱时常在颗粒内形成蜂窝状细小孔隙,在普通偏光显微镜下难于辨别(<0.005 mm)。溶蚀作用较强时颗粒内的孔隙在镜下明显可辨,有时甚至仅残留颗粒的少量边缘或表面的泥质包壳而形成铸模孔隙(图 4c 视域下中部)。

深入观察发现,DB 气田巴什基奇克组砂岩中多见长石和不稳定岩屑粒内溶蚀微孔,较大的粒内溶孔多被方解石胶结物充填,可能是由于粒内孔隙的大小影

响其与周围孔隙的连通性,而连通性的好坏直接关系到孔隙内成岩流体的供应是否充分。溶蚀微孔由于过于细小,难与周围其他颗粒内或颗粒间的孔隙连通,后期饱含矿物质的成岩流体未能流经,因而得到保存。较大的粒内溶蚀孔(孔径达 0.05 mm)由于溶蚀作用较强烈,会与周围的孔隙系统连通,饱含矿物质的成岩流体可顺畅流经,最终导致自生矿物发生沉淀甚至完全充满孔隙空间。此外,粒度较大的中酸性喷出岩岩屑内溶孔常被早期碳酸盐胶结物充填,推测组成岩屑的不稳定长石在风化期已被溶蚀^[23]。

3.3 过量溶蚀与超粒大孔隙

颗粒和填隙物发生强烈溶解(过量溶蚀)时形成超粒大孔隙,其孔径远大于周围颗粒。研究区超粒大孔隙孔径一般为 0.5~2 mm,占总面孔率的 1%。尽管这类孔隙不常发育,但往往与正常的粒间和粒内溶孔,甚至是裂缝相连通或形成溶蚀缝(图 4d),构成孔隙-裂缝系统,与良好的储集物性和渗流能力相对应,同时也表明其形成与沿裂缝具有强烈的溶解作用有关。

4 溶蚀作用机制与孔隙演化

通过岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜和阴极发光显微镜观察,结合地层埋藏史、构造演化史、有机质成熟史和成岩演化史研究成果,综合分析认为,DB 气田的溶蚀作用具有多期次多重溶蚀的特征,依次经历了大气淡水表生溶蚀作用、有机酸溶蚀作用、碱性溶蚀作用和成岩晚期较弱的酸碱交替溶蚀作用。其中,对储层物性有积极影响的主要是大气淡水的表生溶蚀作用和有机酸流体的酸性溶蚀作用。

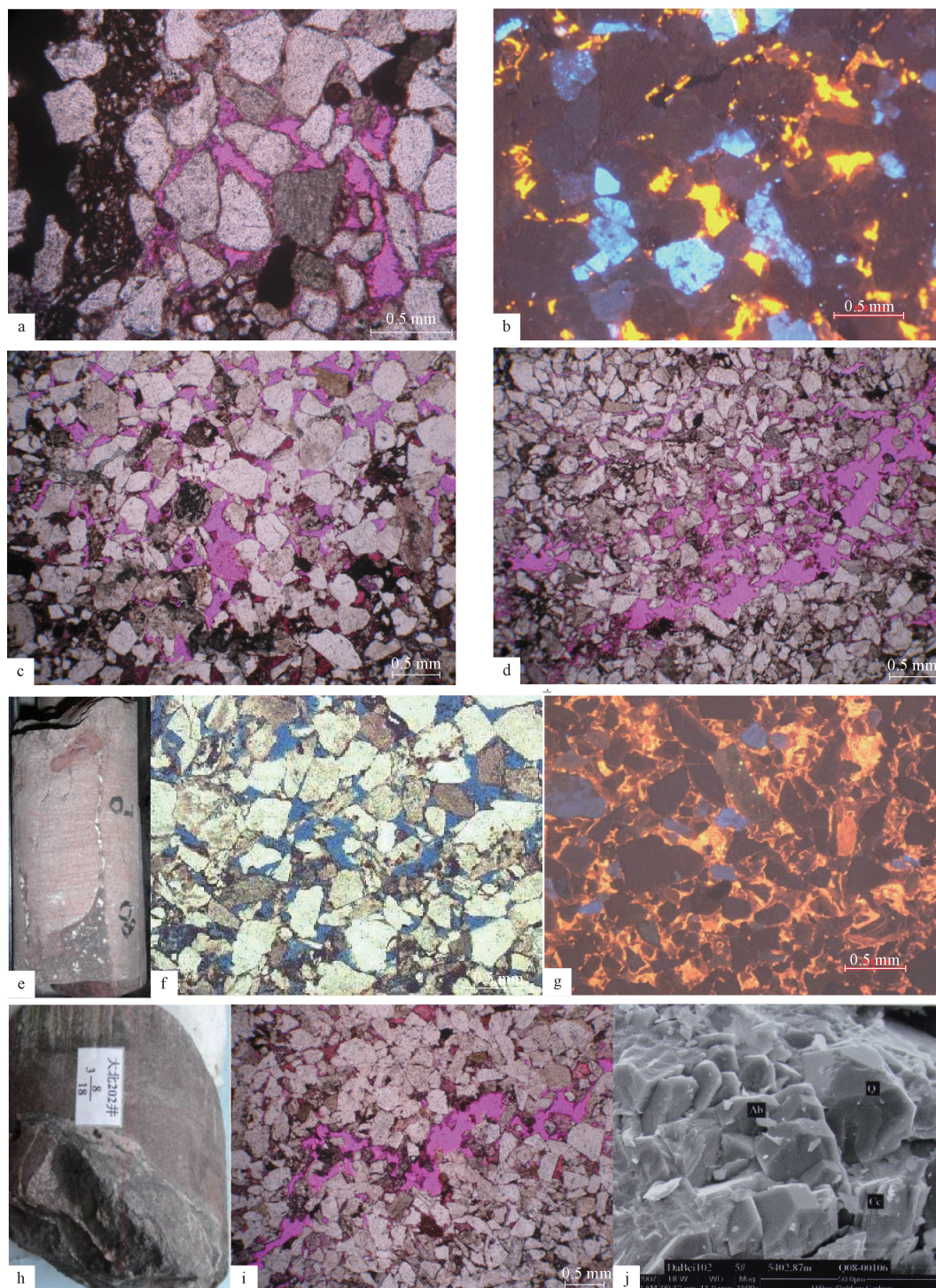


图4 DB气田巴什基奇克组砂岩溶蚀作用特征

Fig. 4 Characteristics of dissolution in the Cretaceous sandstones in DB gas field

a. 粒间溶孔, DB101井, 埋深5 793 m; b. 视域中上部粒间孔(不发光)为方解石胶结物溶蚀所致, 石英发棕色光(为主), 次生加大边不发光, 长石由发天蓝和蓝灰色光钾长石组成, 岩屑发棕色光, 粒间泥质杂基具氧化铁染, 不发光, 方解石分布较均匀, 发橙色光, DB202井, 埋深5 714.63 m; c. 粒内溶孔, DB102井, 埋深5 321.96 m; d. 溶孔和裂缝孔-缝系统, DB101井, 埋深5 801.22 m; e. 表生溶蚀作用与垂直溶蚀缝, DB202井, 埋深5 714.6 m; f. 粒间溶孔, DB202井, 埋深5 714.6 m; g. 粒间孔中方解石具亮暗相间的阴极发光环带(标尺上方), DB202井, 埋深5 717.42, 距古剥蚀面6.98 m; h. 与层面近平行的溶蚀缝充填残余, DB2井, 埋深5 555.96 m; i. 表生溶蚀作用与顺层溶蚀缝, DB202井, 埋深5 788.95 m; j. 粒间孔隙充填方解石 Cc、石英 Q 和钠长石 Ab, 石英见溶蚀坑, DB102井, 埋深5 402.87 m

4.1 大气淡水淋滤和表生溶蚀作用

富含 CO_2 的大气淡水为弱酸性介质, 对岩石中的

不稳定组分, 如长石、碳酸盐矿物和某些岩屑具有溶蚀作用。学者们对碳酸盐岩地层的岩溶作用在垂向上划分出垂直渗流带和水平潜流带, 并认为渗流带主要发

生溶蚀作用,潜流带则以胶结作用为特征^[24]。不整合面下富含碳酸盐胶结物和长石等不稳定组分的砂岩层也会因大气淡水的淋滤作用而发生溶蚀^[25-26],是值得重视的溶蚀机制。

前人研究表明,早白垩世巴什基奇克组沉积早期 DB 地区古气候干旱、炎热,沉积水体不断浓缩,促使石膏、泥晶方解石和石盐等盐类矿物析出,形成同生期胶结物,占据了大量原生储集空间^[17,19,22]。这一阶段巴什基奇克组最大埋深达 1 000 m^[25],经早期胶结和压实,储层保存孔隙度为 16% 左右。该时期受断层活动影响,古地震频繁,同沉积和早成岩期裂缝(即研究区第一期和第二期构造裂缝)发育(图 5)。

DB 地区白垩系巴什基奇克组地层自 89 Ma^[21](燕山后期)开始抬升至地表遭受长期(约 30 Ma)^[19]的暴露剥蚀,受构造作用和风化作用控制,形成第 3 期构造裂缝和风华缝,产状直立或呈网状,直至古近纪库木格列姆期才沉降接受沉积,形成了两套地层间的不整合接触。这一过程中储层因埋藏较浅处于表生成岩期,压实作用相对较弱。燕山期本区块地势北高南低,剥蚀厚度自南向北逐渐增大,整体缺少巴一段,大气淡水沿区域不整合面、风化破裂缝和砂体渗入地下,残留的巴什基奇克组顶部势必存在大气淡水淋滤作用和表生溶蚀作用,在靠近剥蚀面的岩层中形成类似碳酸盐岩储层中岩溶的表生溶蚀孔缝。风化破裂缝与溶蚀孔隙缝洞连通,溶蚀作用的增孔量达到 0.5%~2%,占面孔率的 30%~65%,改善了下白垩统巴什基奇克组砂岩的储集性能,是低孔低渗储层获得高产的重要因素。

岩心观察发现,DB202 井距剥蚀面 16.2 m 处岩心发育多条近垂直于层面的溶蚀缝(图 4e),这些溶蚀缝由上至下逐渐扩大,缝内半充填地表粘土和自生方解石晶体,同一深度岩样的镜下观察表明,其储集空间几乎全为粒间溶孔(图 4f),且颗粒边缘的早期泥晶碳酸盐也几乎溶蚀殆尽,反映了成岩早期表生环境中选择性溶解的特点,属于渗流带淡水淋滤作用的产物。该深度附近的粒间孔中方解石胶结物具有不发光-亮暗相间的阴极发光环带(图 4g),反映其 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量及其比值从无到有,高低交替的变化过程,其中不发光的方解石胶结物形成于氧化环境,可以作为大气水成岩环境的响应特征之一^[27]。同时,该井第 3 次取心距离剥蚀面 83.2~86 m,发育与层面近于平行的溶蚀缝(图 4h,i),基本被方解石晶粒全充填,局部有充填残余,形成边缘平直的胶结物晶间孔,具有潜流带水平溶蚀和沉淀的特征。上述表生溶蚀缝与粒内溶孔、粒间溶孔相互沟通,对改善研究区目的层段储集物性极为有利。统计 DB102 井岩心常规分析数据发现(表 2),

表 2 DB 气田巴什基奇克组样品距剥蚀面距离及其孔隙度
Table 2 Porosity and distance to erosion surface of the samples from the Cretaceous sandstones in DB gas field

井号	DB1	DB101	DB102	DB104	DB2	DB202	
距剥蚀面平均距离/m	19	71	8	89	137	17	6
平均孔隙度/%	4.31	2.75	5.2	1.23	2.48	5.8	2.33

在距离剥蚀面平均距离 8 m 处的平均孔隙度为 5.20%,至距离剥蚀面平均距离约 89 m 处,平均孔隙度为 1.23%。结合其他取心井数据,可以认为表生溶蚀作用随与剥蚀面距离增加而迅速减弱,其作用下限在研究区约为剥蚀面下 80~140 m。

4.2 有机酸溶蚀作用

DB 气田主要的烃源岩为上三叠统黄山街组和中侏罗统恰克马克组^[7]。其中,三叠系烃源岩的生油期主要为侏罗纪中期到吉迪克组沉积初期(180~16 Ma),生气期主要为白垩纪中期至库车组沉积初期(100~4 Ma)。侏罗系烃源岩的生油期主要为古近纪末期到库车组沉积初期(24~4 Ma),生气期主要为吉迪克组沉积初期到库车组沉积末期(15~2 Ma)^[28-29]。烃源岩在排烃时会携带一定量的有机酸注入砂岩储层,这些有机酸对砂岩的成岩作用具有重要影响^[30-34]。前人研究表明,DB 气田共经历了 3 期主要的油气充注过程,伴随着早油晚气有机酸的 3 期充注^[26,35-39]。

DB 气田的第一期油气充注发生在库姆格列木群沉积末期(距今 50 Ma),此时三叠系和侏罗系烃源岩镜质体反射率约为 1.0%~0.5%。该次油气充注以油为主,且规模较大,因此也是有机酸进入 DB 气田巴什基奇克组砂岩储层的主要时期^[24],使其发生石英加大和长石、碳酸盐等组分的酸性溶蚀作用^[40],孔隙度约增加 1%~2%。古新世早期 DB 地区重新接受沉积,至古近纪末期巴什基奇克组最大埋深已近 1 500 m,储层处于早成岩 A 期。储层受持续压实作用、长石加大和早期方解石类胶结作用的影响,最大减孔量为 8%~10%。该阶段伴随粘土矿物脱水形成少量成岩收缩缝。

研究区的第二期油气充注发生在康村组沉积末期(5 Ma),此时三叠系和侏罗系烃源岩经进入成熟-高成熟期,对巴什基奇克组砂岩储层的充注以气为主,油为辅。因此,该期充注虽然是目前 DB 气田天然气的主要充注期,但仅有微量有机酸进入储层^[24]。该阶段地层快速深埋,粘土矿物发生第 1 次快速转化,储层进入中成岩 A₁ 亚期。长石、不稳定岩屑和碳酸盐胶结物等发生不同程度的酸性溶蚀,保存孔隙度为 6~8%。自康村组上部沉积以来,DB 气田巴什基奇克组进入深埋藏期,压实作用造成孔隙度持续降低。

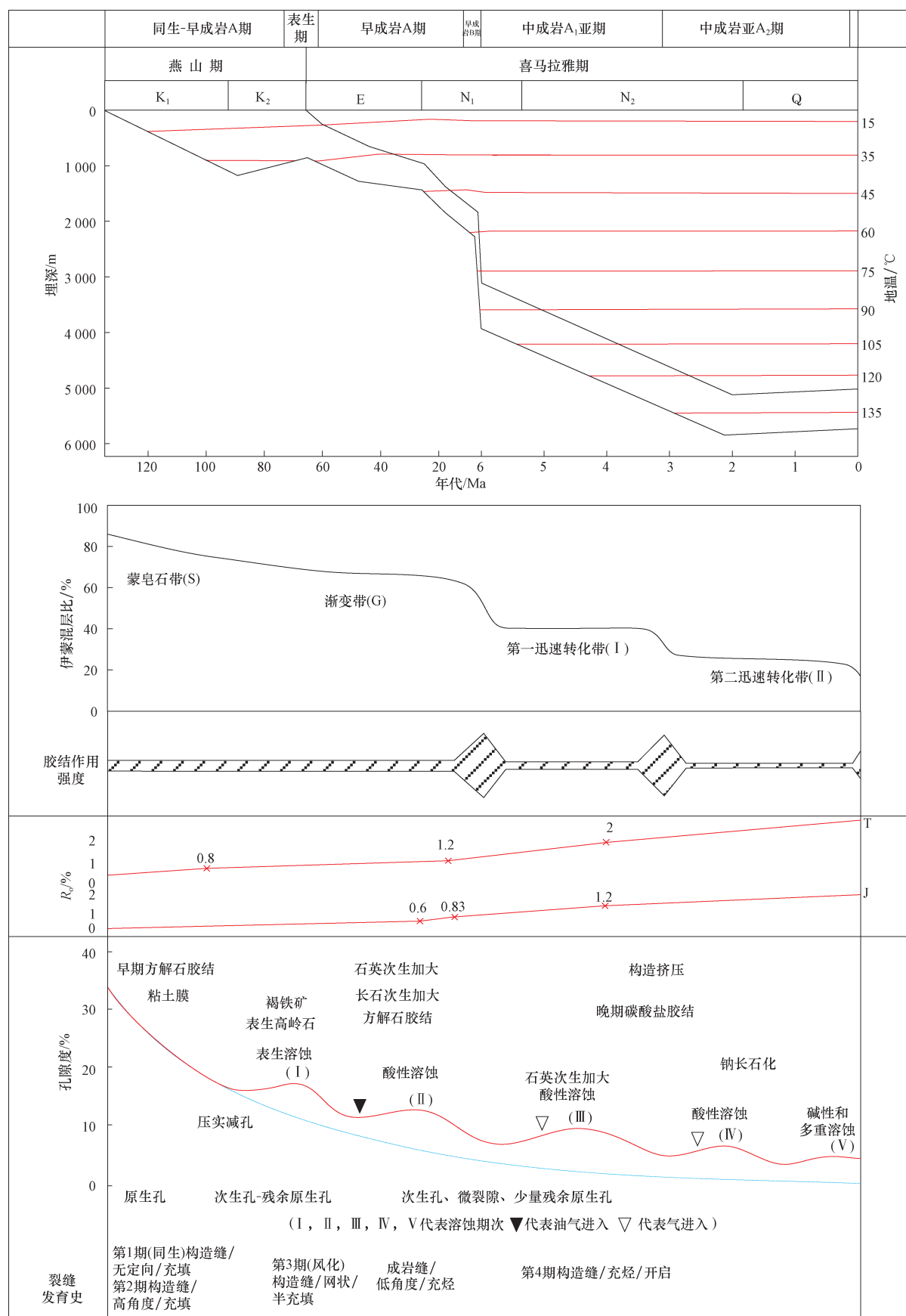


图5 DB气田白垩系热史-埋藏史-成岩和孔隙演化史示意图

Fig. 5 Sketch map showing history of geothermal, burial, diagenesis and pores evolution in the Cretaceous of DB gas field

DB 气田的第三期油气充注是在库车末期—西域期 (3 ~ 1 Ma), 主要是侏罗系烃源岩所生成的少量高成熟天然气运移至气藏中, 同时充注微量有机酸^[24], 粘土矿物发生第二次快速转化, 储层进入中成岩 A2 亚期。这一时期自北向南强烈的逆冲挤压活动使研究区形成有效的构造圈闭, 最终形成了现今的油气藏^[19,41]。

DB 气田砂岩中常见的长石和中—酸性喷出岩岩屑的溶蚀和溶解应主要与上述有机酸注入储层有关。库姆格列木群沉积末期大量的有机酸注入, 尤其会造成碳酸盐胶结物的强烈溶解, 形成连通性较好的粒间孔、溶蚀缝, 甚至会将充填早期裂缝的碳酸盐矿物溶解 (图 4d), 使裂缝“复活”, 成为油气运移的有利通道和储集空间。

4.3 地层水碱性溶蚀作用和弱酸、弱碱交替的多重溶蚀作用

薄片观察和扫描电镜分析表明, DB 气田巴什基奇克组砂岩储层流体盐度较大, 大量出现的碳酸盐类胶结物、长石加大边和自生钠长石表明地层流体碱性较强, pH 值应在 8 ~ 9, 甚至更高^[42-44]。在这样的高盐度、高 pH 值的成岩介质中, 石英质组分会溶解 (图 4j), 形成碱溶性孔隙^[11]。值得注意的是, DB 气田白垩系砂岩粒间孔隙和胶结物表面常有石盐晶体发育, 一方面表明现今地层水碱性较弱, 同时也反映碱性溶蚀作用不很强烈, 碱溶性孔隙也不甚发育。推测其与储层目前埋藏较深, 进入中成岩 B 期, 胶结物大量沉淀, 导致地层水碱度总体呈减弱趋势有关。

从地层埋藏史、构造发育史、油气充注史和储层成岩演化角度来看, 上新世至今, 研究区巴什基奇克组储层持续埋深达 6 000 m, 进入中成岩 B 期, 遭受深埋压实的减孔作用相对减弱^[19]。此时受喜马拉雅运动的影响, 相继发生构造作用 (侧向挤压及破裂, 形成研究区第 4 期裂缝)、第三期天然气注入带来的微量弱酸性水溶蚀、晚期盐酸盐胶结—交代作用、钠长石化和微弱的碱性溶蚀作用, 弱酸弱碱交替介质条件下的溶蚀作用产生微量次生孔隙, 最终形成现今孔隙度约为 6% 的储集空间。

5 结论

库车坳陷 DB 气田白垩系巴什基奇克组砂岩为特低孔—特低渗储层, 原生孔、溶蚀孔和晶间—晶内孔等各类孔隙占总面孔率的 83%; 其中, 粒间溶蚀孔、粒内溶蚀和过量溶蚀形成的粒间孔隙、粒内孔隙和超粒大孔隙等溶蚀孔隙占总面孔率的 60%, 构成了气田储量主要的储集空间。DB 气田白垩系储层经历多期溶蚀

作用, 由早至晚, 主要遭受大气淡水表生淋滤溶蚀作用、有机酸溶蚀作用、微弱的碱性溶解作用和成岩晚期较弱的酸碱交替溶蚀作用, 溶蚀早期碳酸盐胶结物、长石、不稳定岩屑和石英质组分等, 形成粒间溶孔、溶蚀缝、超粒大孔隙、粒内溶孔等溶蚀孔隙。多期溶蚀和烃类多期注入相匹配是形成现今 DB 高产气田的重要原因。

参 考 文 献

- [1] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (1): 1 - 27.
- [2] Glasmann J R, Clark R A, Larter S, et al. Diagenesis and hydrocarbon accumulation, Brent Sandstone (Jurassic), Bergen high area, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (11): 1341 - 1360.
- [3] Hartmann B H, Ranseyer K, Matter A. Diagenesis and pore-water evolution in Permian sandstones, Gharif Formation, Sultanate of Oman [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70: 533 - 544.
- [4] 朱抱茎, 程中第, 应凤祥. 地层干酪根有机酸与储层次生孔隙的关系 [J]. 石油实验地质, 1996, 18 (2): 206 - 215.
Zhu Baoqian, Cheng Zhongdi, Ying Fengxiang. Relation of organic acid generated by kerogen to secondary porosity of reservoir [J]. Experimental Petroleum & Geology, 1996, 18 (2): 206 - 215.
- [5] 刘林玉, 陈刚, 柳益群, 等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析 [J]. 沉积学报, 1998, 16 (2): 97 - 101.
Liu linyu, Chen Gang, Liu yiqun, et al. Analysis on influencing factors of solution-type secondary pore-evolution in clastic reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16 (2): 97 - 101.
- [6] 袁静, 赵澄林. 水介质的化学性质和流动方式对深部碎屑岩储层成岩作用的影响 [J]. 石油大学学报, 2000, 24 (1): 60 - 63.
Yuan Jing, Zhao Chenglin. Influence of chemistry of fluid and circulated convection current on diagenesis of petroclastic rock in deep formation [J]. Journal of University of Petroleum, China, 2000, 24 (1): 60 - 63.
- [7] Emery D, Myers K J, Young R. Ancient subaerial exposure and fresh-water leaching in sandstones [J]. Geology (Boulder), 1990, 18: 1178 - 1181.
- [8] Bloch S, Franks S G. Preservation of shallow plagioclase dissolution porosity during burial implications for porosity prediction and aluminum mass balance [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1488 - 1501.
- [9] 黄思静, 武文慧, 刘洁, 等. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用—以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2003, 28 (4): 219 - 424.
Huang Sijing, Wu Wenhui, Liu Jie, et al. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos Basin [J]. Earth Science- Journal of China University of Geosciences, 2003, 28 (4): 219 - 424.
- [10] 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31 (9): 752 - 759.
Qui Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence to reservoir in Biyang Depression [J]. Science in China (Series D), 2001, 31 (9): 752 - 759.

- [11] 袁静,张善文,乔俊,等. 东营凹陷深层溶蚀孔隙的多重介质成因机理和动力机制[J]. 沉积学报,2007,25(6):840-846.
Yuan Jing,Zhang Shanwen,Qiao Jun,et al. Cause of formation and dynamic mechanisms in multiply medium of dissolved pores in deep formation of Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica. 2007,25(6):840-846.
- [12] 张博,李江海,吴世萍,等. DB 气田储层裂缝定量描述[J]. 天然气地球科学,2010,21(1):42-46.
Zhang Bo,Li Jianghai,Wu Shiping,et al. The quantitative description of tight sand reservoir fissures in Dabeig gas field[J]. Natural Gas Geoscience,2010,21(1):42-46.
- [13] 李世川,成荣红,王勇,等. 库车坳陷 DB1 气藏白垩系储层裂缝发育规律[J]. 天然气工业,2012,32(10):24-27
Li Shichuan,Cheng Ronghong,Wang Yong,et al. Fracture development pattern in the Cretaceous reservoirs in the Dabeig-1 gas pool of the Kuqa Depression,Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry,2012,32(10):24-27.
- [14] 禹定儒,刘春雷. 库车坳陷 DB 地区白垩系裂缝及产能特征[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版) 2011,13(5):16-18,34
Yu Dingru,Liu Chunlei. On the characters of productivity and crack at Dabeig area in Kuqa Depression of the Cretaceous stage[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology:Natural Science Edition,2011,13(5):16-18,34.
- [15] 高伟,刘安,费世祥,等. 库车坳陷 DB 地区深部储层裂缝综合评价[J]. 石油地质与工程,2012,26(3):32-35,39.
Gao Wei,Liu An,Fei Shixiang,et al. Dabeig area deep reservoir fractures comprehensive evaluation in Kuche Depression [J]. Petroleum Geology and Engineering. 2012,26(3):32-35,39.
- [16] 朱忠谦,杨学君,赵力彬,等. 陆相湖盆致密砂岩储层裂缝形成机理研究[C]//钟建华,陈树敏,William John Lee. 国际非常规油气勘探开发(青岛)大会论文集,北京:地质出版社,2011:147-158.
Zhu Zhongqian,Yang Xuejun,Zhao Libin,et al. Characteristics and origin of nature fractures in tight sandstone reservoir of continental lacustrine basin[C]//Zhong Jianhua,Chen Shumin, Lee W J. The international conference(Qingdao) on unconventional petroleum exploration and development,Beijing:Geological House,2011:147-158.
- [17] 刘春,张惠良,韩波,等. 库车坳陷 DB 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 Dabeig zone of Kuche sag[J]. Nature Gas Geosciences,2009,20(4):504-512.
- [18] 张丽娟,李多丽,孙玉善,等. 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,et al. Analysis of characteristics of sedimentary reservoir between Cretaceous and Palaeogene in the western part of the Kuqa Depression[J]. Nature Gas Geosciences, 2006,17(3):355-360.
- [19] 张荣虎,张惠良,寿建峰,等. 库车坳陷 DB 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 Bashijiqike Formation in Dabeig area of the Kuqa Depression[J]. Chinese Journal of Geology,2008,43(3):507-517.
- [20] 沈扬,马玉杰,赵力彬,等. 库车坳陷东部古近系——白垩系储层控制因素及有利勘探区[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):136-142.
Shen Yang, Ma Yujie, Zhao Libin, et al. Controlling factors of the Paleogene-Cretaceous reservoirs and potential exploration areas in the eastern Kuqa Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 136-142.
- [21] 贾承造,陈汉林,杨树锋,等. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应[J]. 石油学报,2003,24(3):1-5,15.
Jia Chengzao,Chen Hanlin,Yang Shufeng,et al. Late Cretaceous uplifting process and its geological response in Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica. 2003,24(3):1-5,15.
- [22] 张荣虎,张惠良,马玉杰,等. 特低孔特低渗高产储层成因机制——以库车坳陷 DB1 气田巴什基奇克组储层为例[J]. 天然气地球科学,2008,19(1):75-82.
Zhang Ronghu,Zhang Huiliang, Ma Yujie, et al. Origin of extralow porosity and permeability high production reservoirs: A case from Bashijiqike reservoir of Dabeig 1 oil field, Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 75-82.
- [23] Schoner R, Gaupp R. Contrasting red bed diagenesis: the southern and northern margin of the central European Basin[J]. International Journal of Earth Science(Geology Rundsch), 2005, 94: 897-916.
- [24] 杨学君. 大巴气田低孔低渗砂岩储层裂缝特征及形成机理研究[D]. 山东青岛:中国石油大学,2011.
Yang Xuejun. Characteristics and origin of fractures in sandstone reservoir with low permeability, Dabeig gas field [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [25] 郝芳,邹华耀,方勇. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿[J]. 地学前缘,2005,12(4):481-488
Hao Fang,Zou Huayao,Fang Yong. The difficulties and frontiers of subtle oil/gas reservoir research[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 481-488
- [26] 张福顺,朱允辉,王芙蓉. 准噶尔盆地腹部深埋储层次生孔隙成因机理研究[J]. 沉积学报,2008,26(3):469-478.
Zhang Fushun,Zhu Yunhui,Wang Furong. Forming mechanism of secondary pores in deep buried reservoirs of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 469-478.
- [27] 刘丽红,黄思静,王春连,等. 碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系——以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质,2010,15(1):55-60.
Liu Lihong,Huang Sijing,Wang Chunlian,et al. Cathodoluminescence Zonal Texture of Calcite Cement in Carbonate Rock and Its Relationship with Trace Element Composition: A Case of Ordovician Carbonate Rock of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(1): 55-60.
- [28] 肖中尧,黄光辉,卢玉红,等. 库车坳陷却勒 1 井原油的重排藿烷系列及油源对比[J]. 石油勘探与开发,2004,31(2):35-37.
Xiao Zhongyao,Huang Guanghui,Lu Yuhong,et al. Qiu-cha rearranged hopanes in oils from the Quele 1 Well, Tarim Basin, and the significance for oil correlation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 35-37.
- [29] 何治亮,高山林. 中国西部燕山运动及其对成藏的控制[J]. 石油与天然气地质,2008,29(4):419-427.
He Zhiliang,Gao Linshan. The Yanshanian movement and its control over hydrocarbon accumulation in western China [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 419-427.
- [30] 万桂梅,汤良杰,金文正,等. 库车坳陷西部构造圈闭形成期与烃源岩

- 生烃期匹配关系探讨[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 187-196.
- Wan Guimei, Tang Liangjie, Jin Wenzheng, et al. Control of salt-related tectonics on oil and gas accumulation in the Western Kuqa Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 187-196.
- [31] Curtis C D. Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reaction occurring in enclosing mudstones[J]. Journal of Geology Society, 1978, 135: 107-117.
- [32] Thyne G. A model for diagenetic mass transfer between adjacent sandstone and shale Marine and Petroleum Geology[J]. 2001, 18(6): 743-755.
- [33] 应凤祥. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Ying Fengxiang. Diagenesis and diagenetic numerical Simulation of clastic reservoirs in China oil and gas bearing basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [34] Stephen E L, Meghan E W. Diagenesis in porosity evolution of opening-mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico[J]. Tectonophysics, 2006(419): 75-967.
- [35] Surdam R C, Boses W, Grossey L J. The geochemistry of secondary porosity[J]. AAPG Bulletin, 1984, Memoir 37: 127-149.
- [36] 周兴熙. 塔里木盆地库车油气系统新生代构造演化及油气成藏作用[J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 75-82.
- Zhou Xingxi. Oil and gas pool forming process and tectonic evolution of Cenozoic in Kuqa petroleum system of Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(1): 75-82.
- [37] 赵靖舟, 戴金星. 库车油气系统油气成藏期与成藏史[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 314-319.
- Zhao Jingzhou, Dai Jinxing. Accumulation timing and history of Kuqa petroleum system, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 314-319.
- [38] 邢恩袁, 庞雄奇, 肖中尧, 等. 利用颗粒荧光定量分析技术研究塔里木盆地库车坳陷 DB1 气藏充注史[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 432-437.
- Xing Enyuan, Pang Xiongqi, Xiao Zhongyao, et al. Application of quantitative grain fluorescence techniques in analysis of hydrocarbon charge history in Dabe1 gas reservoir, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment. 2012, 34(4): 432-437.
- [39] 冯松宝. 库车坳陷 DB1 煤成大气田储层流体包裹体特征和成藏期研究[J]. 宿州学院学报, 2013, 28(1): 86-90.
- Feng Songbao. Characteristics of fluid inclusion and reservoir-forming time of Dabe1 coal-derived large gas field in Kuqa Depression[J]. Journal of Suzhou University, 2013, 28(1): 86-90.
- [40] 顾家裕, 方辉, 贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状三角洲砂体成岩作用和储层特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 517-523.
- Gu Jiayu, Fang Hui, Jia Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001. 19(4): 517-523.
- [41] 谭秀成, 王振宇, 田景春, 等. 利用储层岩石学研究油气运移期次[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 63-67.
- Tan Xiucheng, Wang Zhenyu, Tian Jingchun, et al. Study on petroleum migration times using reservoir pathology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 63-67.
- [42] Giles M R, Boer R B. Origin and significance of redistributional secondary porosity[J]. Marine and Petroleum Geology, 1990, 7: 379-397.
- [43] 王生朗, 任来义, 王英, 等. 盐湖环境成岩作用特征及其对高孔隙带形成的影响[J]. 石油勘探与开发, 2003. 30(5): 47-49.
- Wang Shenglang, Ren Laiyi, Wang Ying, et al. Characteristics of diagenesis saline lake environment and its effects to high-porosity zones[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003. 30(5): 47-49.
- [44] 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京: 科学出版社. 1992: 12, 138.
- Liu Baojun, Zhang Jinquan. The depositional diagenesis[M]. Beijing: Science Press, 1992: 12, 138.

(编辑 董立)

欢迎订阅 2017 年《石油与天然气地质》期刊

双月刊

单价 60 元/期, 全年定价 360 元

邮发代号 82-287

美国《工程索引》(EI)、《中国科学引文数据库》(CSCD)、北京大学《中文核心期刊要目总览》收录期刊

期刊简介:《石油与天然气地质》创刊于 1980 年, 以记录我国石油地质领域的重大科研成果、反映本学科最新科技水平、促进国内外学术交流、提高石油地质研究和实践水平为办刊宗旨。

主要栏目:“专家论坛”、“油气地质”、“勘探开发”、“技术方法”以及我国石油勘探领域重大成果的新闻报道等。

通信地址:北京市海淀区学院路 31 号 中石化石油勘探开发研究院《石油与天然气地质》编辑部

邮 编: 100083

电 话: (010)82312164, 82312320

电子信箱: ogg_syky@sinopec.com