文章编号:1000-0550(2015)02-0394-14

# 库车坳陷白垩系巴什基奇克组成岩层序地层特征

赖 锦<sup>1</sup> 王贵文<sup>1,2</sup> 柴 毓<sup>1</sup> 冉 冶<sup>1</sup> 郑新华<sup>3</sup> 信 毅<sup>3</sup> 周 磊<sup>3</sup> 吴庆宽<sup>3</sup>
(1.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;2.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;
3.中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000)

**摘 要** 充分利用普通薄片、铸体薄片、X-衍射和扫描电镜等资料,对库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组储层的 岩石学、物性和储集空间等特征进行了研究;并结合元素俘获测井 ECS 等资料,对层序边界附近的成岩作用和成岩矿 物组合特征进行了探讨,同时对比分析了巴二段湖侵体系域和巴一段高位体系域内的成岩作用进程的差异。结果表 明,层序界面下薄片中普遍可见溶蚀现象,表现在界面附近长石岩屑含量减少,且靠近层序界面储层物性变好。最大 湖泛面处由于沉积因素致其具有较高的黏土含量,而层序界面之下与溶蚀伴生的高岭石的成岩转化造就了层序界面 之下也具有较高的黏土含量。总体上层序界面和体系域对碳酸盐岩胶结作用的控制并不明显,在层序的各个部位均 可见较高或较低碳酸盐岩含量,主要与研究区的碱性成岩环境有关。研究成果有利于研究区有利储层的追踪对比和 预测工作,在指导天然气勘探的同时也能促进成岩层序地层学理论的发展。 关键词 成岩层序地层学 层序界面 体系域 成岩作用 ECS 巴什基奇克组 克深气田

**第一作者简介** 赖锦 男 1988 年出生 博士研究生 沉积储层与测井地质 E-mail:sisylaijin@163.com 通讯作者 王贵文 男 教授 E-mail: wanggw@cup.edu.cn 中图分类号 P588.2 P539.2 文献标识码 A

### 0 引言

现今油气勘探开发进程的加快和现代地质分析 测试技术的提高极大地促进了成岩作用的研究进程. 同时也对储层成岩作用的研究提出了更高层次的要 求,迫切需求定量性、高精度和可预测性的成岩作用 研究<sup>[1-2]</sup>。传统的观点通常将层序地层学和成岩作用 看作是相互独立的分支学科领域[34],随着地质资料 的积累和研究的不断深入,专家学者们逐渐认识到成 岩作用的差异除受构造、流体等因素影响外,层序地 层对其控制作用也十分明显<sup>[5]</sup>。表现在不同层序界 面和体系域都有着不同的成岩反应规律,也有学者将 其称为成岩层序地层学<sup>[6]</sup>,即以层序的地层成因特 性为原理,充分成岩作用在层序中不同部位的系统差 异。利用成岩作用的微观资料,研究层序内部成岩作 用的变化规律<sup>[7-9]</sup>,通过建立层序地层格架内的成岩 作用模式来进行层序的识别、划分以及实现储层砂体 的预测[10]。主要包括两个方面的内容:一是把成岩 作用研究置于等时的层序地层格架内,从成因机理上 分析沉积物的原始组分、结构以及孔隙水条件等的差 异对早期成岩作用以及成岩演化序列的影响:二是同 样也可以借助微观成岩作用的研究为层序界面的划 分和识别提供依据<sup>[7]</sup>。成岩层序地层学的已成为第 二十九届国际沉积学年会的主要议题之一,在国际上 也是储层成岩动力学研究新的热点<sup>[3,11-15]</sup>。研究表 明,与传统的成岩研究方法相比,将成岩作用置于等 时的层序地层格架内,比较不同体系域储集体成岩作 用差异,并探讨层序界面对成岩作用及储集性能的影 响<sup>[16]</sup>,可更有效地对储层成岩作用和物性变化时空 分布规律进行解析和预测<sup>[1,12,17-18]</sup>,为储层的区域评 价和预测提供新的思路<sup>[8,17]</sup>,这也是成岩层序地层学 研究的最终目的<sup>[8]</sup>。

克深气田是在库车坳陷深层继克拉 2、迪那 2 和 大北气田等发现并建成投产之后相继发现的又一储 量超千亿立方米的大型致密砂岩气田<sup>[19]</sup>。气田所在 的库车坳陷构造变形具有典型的"东西分段、南北分 带和上下分层"的特征,中下侏罗统和中上三叠统广 覆式高生烃强度的煤系烃源岩条件与晚期强充注为 大气田的形成奠定了物质基础,规模发育的有效储集 砂岩为天然气良好的储集空间,山前发育的大量成排 成带的叠瓦冲断构造为天然气聚集提供了有利场 所<sup>[20]</sup>,沟通烃源岩与储集层且处于活动时期的断裂

①国家科技重大专项(编号:2011ZX05020-008)、国家自然科学基金(批准号:41472115)与中石油创新基金(编号:2013D-5006-030)联合资助 收稿日期:2014-03-18;收修改稿日期:2014-06-16

是深部天然气往浅部圈闭运移聚集的主要通道[21]。 古近系库姆格勒木群和新近系吉迪克组两套巨厚的 膏盐层、膏泥岩为深层大气田的保存提供了优越的盖 层条件<sup>[20]</sup>。总体上气田发育优质的储盖组合,具有 优越的油气成藏地质条件良好的油气勘探前景,其主 力产层为下白垩统巴什基奇克组砂岩储集体<sup>[22]</sup>。然 而作为典型的深层背斜构造圈闭型致密砂岩气类 型<sup>[23]</sup>,克深气田天然气主要分布在背斜构造高部位, 气藏具高温、高压、高产、高丰度、高生烃强度、规模储 层、巨厚盖层与构造圈闭发育、产量受裂缝和有效储 层控制的基本特征<sup>[24]</sup>。且储层经历的构造期次多, 深埋致成岩演化程度较高,储层致密化严重[25],因此 通过将成岩作用置于等时的层序地层格架内,探讨层 序地层格架中成岩作用类型以及成岩矿物组合特征. 可为该类储层的综合评价和有利发育区带预测提供 可靠的地质依据。

1 区域地质概况

### 1.1 巴什基奇克组层序地层格架

库车坳陷中、新生带地层发育均比较齐全,自下 而上钻遇的白垩系—古近系地层依次为亚格列木组 (K<sub>1</sub>y)、舒善河组(K<sub>1</sub>s)、巴西盖组(K<sub>1</sub>b)、巴什基奇克 组(K<sub>1</sub>bs)、库姆格列木群(E<sub>1.2</sub>km)和苏维依组 (E<sub>2.3</sub>s)<sup>[26]</sup>。白垩系与下伏侏罗系呈平行不整合(局部 为角度不整合)接触<sup>[27-28]</sup>。晚白垩世末(燕山末期运 动)天山南缘的阶段性隆升导致其上白垩统地层基 本被剥蚀,全区所发育的下白垩统自下而上分为亚格 列木组、舒善河组、巴西盖组和巴什基奇克组,古近系 库姆格列木组直接覆盖于早白垩统地层之上<sup>[29]</sup>,呈 区域性不整合接触<sup>[30]</sup>。

巴什基奇克组为逆冲构造相对宁静期的地层记 录或者盆地充填记录<sup>[31-32]</sup>,层序地层分析一般将巴 什基奇克组划分为一个完整的三级层序<sup>[29]</sup>,其上界 面对应古近系的库姆格列木群底界的区域平行不整 合面<sup>[33]</sup>,下以巴西盖组顶部的沉积结构转换面(沉积 物的粒度、成熟度、沉积构造等)为底界<sup>[31-32]</sup>。处于 低位体系域的巴三段,其顶部以泥岩频繁互层为特征 的初次湖泛面为边界,向上依次发育湖侵体系域(巴 二段)和高位体系域(巴一段)<sup>[29]</sup>,最大湖泛面对应 巴一段和巴二段分界处(图1)。由于此次研究的克 深地区巴什基奇克组埋藏深,平均在 6 200 m 以上, 多数井未钻遇低位体系域的巴三段,因此本次研究主 要是以巴二段和巴一段为主。

#### 1.2 储层基本特征

巴什基奇克组总体属于三角洲沉积体系,沉积相 分异主要体现在纵向上<sup>[29]</sup>,巴三段沉积时期由于强 烈的构造沉降导致其以扇三角洲粗碎屑沉积体系为 主,沉积中晚期由于构造沉降基本停止,地形差降低, 输入坳陷的物质变细,其沉积体系演化为以辫状河三 角洲前缘为主<sup>[34]</sup>,发育水下分流河道、河口坝、水下 分流间湾等微相<sup>[28]</sup>。纵向上相互叠置、平面上连片 分布的水下分流河道、河口坝砂体为其主要的成因砂 体类型,构成了良好的天然气储集空间。然而由于克 深地区目的层埋藏深,平均在6200m以上,多数井 未钻遇巴三段,因此本次研究主要是以巴二段和巴一 段为主,可划分出的沉积微相类型主要是辫状河三角 洲水下分流河道、河口坝和水下分流间湾。

根据岩芯观察、普通薄片、铸体薄片、阴极发光照 片、X 衍射以及扫描电镜分析资料,巴什基奇克组储 层岩性以褐色、棕褐色岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩 为主(图2)。石英含量主要分布在32%~65%,平均 42.5%,长石含量 17%~45%,平均 32.1%,以钾长石 和钠长石为主, 岩屑 12%~45%, 平均 26.4%, 以变质 岩岩屑和岩浆岩岩屑为主,沉积岩岩屑较少。粒度主 要是中一细砂级别,颗粒分选中等一好,磨圆以次棱 角状为主,颗粒之间接触关系主要为点—线式,部分 颗粒分选较差或者颗粒粒度较细层段可见线接触,胶 结类型以孔隙式为主。填隙物含量较高,杂基1%~ 15%,以泥质和铁泥质为主,平均3.4%,胶结物含量 1%~25%,平均5.2%,以方解石、白云石、铁方解石和 铁白云石为主,黏土矿物以伊利石、伊/蒙混层为主。 储层总体具成分成熟度较低和结构成熟度中等偏高 的特点。

模拟地层覆压状态(压力为 21.8 MPa)的 230 块 岩性柱塞样的常规物性分析结果表明,储层孔隙度 0.65%~11.35%,平均 4.41%,渗透率 0.001~6.96× 10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,平均 0.12×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,且绝大多数岩样覆压 渗透率小于 0.1×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>(图 3),属于典型裂缝性致 密砂岩气储层。

薄片镜下观察表明储层孔隙类型多样,极不规则,大小相差悬殊,且孔径分布不均匀。早期长期浅 埋和短期快速深埋的埋藏方式决定的储层特殊的成 岩背景使得原生孔隙一定程度上能得到保留,但含量 极少,一般呈弧面三角形或者不规则多边形状(图 4A,B)。镜下可见到众多的长石和岩屑溶蚀形成的 粒内孔隙(图4C,D)是重要的储集空间类型。黏土









图 3 克深气田巴什基奇克组储层孔渗关系图 Fig.3 Core porosity versus core permeability crossplots for Bashijiqke Formation in Keshen gas field



图 4 克深气田巴什基奇克组储层主要储集空间类型

A.可见大量的粒间孔隙(P),同时也可见长石溶蚀形成的粒内孔隙,Keshen 2-1-5 井,6 714.35 m;B.粒间孔隙常见,长石内部也可见局部溶 蚀形成的粒内孔隙,Keshen 2-2-8 井,6 723.86 m;C.长石粒内孔常见,s 白云石交代碎屑颗粒,Keshen 2-1-5 井,6 713.38 m;D.长石完全溶蚀 形成铸模孔,另外还含有一定的粒间孔隙,岩屑可见粒内孔隙,Keshen 2-1-5 井,6 739.26 m;E.粒间孔部分被自生石英和伊蒙混层充填,伊蒙混层内发育晶间孔(红色箭头),Keshen 208 井,6 600.24 m;F.粒间孔隙大部分为自生石英和伊利石充填,自生黏土矿物内部可见晶间 孔,Keshen 2-1-5 井,6 723.44 m;G.见一条溶蚀缝,呈不规则状,宽窄不等(0.05~0.1 mm),克深 1 井,6 983 m;H.见少量溶蚀孔隙和 2 条微裂 缝,孔缝相连,溶蚀缝宽窄不均(0.02~0.05 mm),克深 1 井,7 012 m(说明:Q 石英,AQ 自生石英,KF 钾长石,RF 岩屑,PF 斜长石,DC 杂基, L/S 伊蒙混层,IL 伊利石,粒间孔隙 P,铸模孔 MP,AF 自生长石,白云石 Dol,铁白云石 FDol,黏土 C)。

Fig.4 The reservoir pore space of Bashijiqike sandstones in Keshen Gas fields

矿物(伊利石和伊/蒙混层)晶间孔数目较多(图4E, F),但其孔径及喉道半径较小,对储层储集和渗流性 能影响意义不大。此外,伴随构造裂缝产生而形成的 微裂缝在增加储层储集空间的同时能提高储层渗透 率,对于储层渗流性能的改善是非常显著的。

### 2 成岩层序地层学研究概况

### 2.1 概念起源及发展

成岩层序地层学起初是用来解释碳酸盐岩层序 地层学与成岩作用的关系<sup>[6]</sup>。由于硅质碎屑沉积物 对孔隙水地化特性的变化不像碳酸盐岩那样反应敏 感,且成岩作用的进程相比而言较缓慢<sup>[1,11]</sup>,这导致 在层序地层格架内对碎屑岩成岩作用的及其孔隙演 化的研究存在局限性<sup>[11]</sup>。即便如此,近年来不少学 者通过探讨碎屑岩层序地层对成岩作用的控制,发现 不同的层序部位以及层序界面附近的成岩现象仍有 着较强的规律性<sup>[1,35]</sup>,表现为不同体系域内成岩现象 和层序界面附近的成岩现象特征的差异。且尽管后 期的成岩演化将掩盖一些早期的成岩特征,但是早期 的成岩信息仍然部分可被保留下来<sup>[35]</sup>。成岩层序 (不同地层层序单元所表现出的不同成岩规律)新概 念被广泛采用<sup>[5]</sup>。

成岩层序地层学的研究一方面有助于层序的识 别和划分,另一方面也有助于成岩相和优质储层发育 带预测的研究<sup>[36]</sup>。研究油气储层的成岩相与成岩层 序特征,能够从本质上认识储层储集性发育的规律性 和控制因素,搞清复杂油气储层分布规律<sup>[5]</sup>。结合 利用层序地层学原理分析沉积物的沉积和成岩演化 史有助于阐明有利生储盖组合在时空上的分布规 律<sup>[37]</sup>。

#### 2.2 研究内容及方法流程

层序地层控制了成岩作用的类型与时空分布,主 要表现在层序、准层序界面、湖侵和最大湖泛面附近, 以及在低位体系域、湖侵体系域、高位体系域等地层 层序条件下,成岩作用进程等具明显差异。将成岩作 用置入层序地层格架内:一是比较不同体系域砂体成 岩作用和成岩矿物组合特征差异,二是探讨层序界面 附近成岩作用特征及储集性能的影响<sup>[16]</sup>。其中,层 序界面是控制成岩作用的一个重要因素,不同类型的 层序界面具有不同的成岩作用过程和特点<sup>[5]</sup>。且一 个发育完好的层序通常由高位体系域、湖侵体系域和 低位体系域构成,在湖平面变化过程中它们有着截然 不同的成岩路径,并形成不同的成岩序列<sup>[5]</sup>。一般 而言,层序对成岩作用的控制主要表现在 3 方面:一 是层序不同部位沉积物组分和结构的差异决定了后 期成岩作用类型和强度,二是各个体系域、层序界面 上下有着不同的早期成岩作用,三是成岩流体如大气 淡水通过层序界面影响其附近成岩作用类型<sup>[6,35]</sup>。

近20年来,不少专家学者要根据露头、钻井和地 震反射等资料对碎屑岩成岩层序地层学展开了卓有 成效的工作<sup>[8]</sup>.但由于系统数据资料的缺乏,层序域 成岩作用发育规律的研究仍有待深入<sup>[11]</sup>。因此,除 基础理论研究需要加强外,同时亦亟需高密度的室外 取样和高精度的室内地球化学分析。研究表明,元素 俘获谱测井 ECS(Elemental Capture Spectroscopy)利 用快中子与地层中的原子核发生非弹性散射及热中 子被俘获产生的瞬发γ射线的原理,通过剥谱法等 方法解谱,就可以得到地层中Si、Ca、Fe、S、Ti、Cl、Cr、 Gd 等不同元素的相对产额<sup>[38]</sup>;再经过氧化物闭合模 型(所有元素质量的百分含量之和为100%)处理,可 得到地层的矿物含量[39];经过定量岩性分析,结合录 井资料就可以较准确得到岩性含量<sup>[40]</sup>,如黏土含量、 碳酸盐岩含量、砂质(石英+长石+云母等)含量、黄铁 矿、菱铁矿、煤和膏盐岩等[41]。它不仅能够准确地确 定地层岩性,更可将其进一步处理获得组成岩石的各 种矿物含量<sup>[42]</sup>。除在确定矿物类型和含量、确定地 层骨架密度和孔隙度、判别流体性质、分析沉积环境、 压裂酸化等工程方面得到广泛应用外<sup>[42-43]</sup>。ECS 测 井无论是在成岩作用、成岩矿物组合特征以及成岩相 研究中均具有得天独厚的优势[4445]。因此本次研究 在大量岩芯分析化验资料的资料上,主要通过 ECS 测井所获得岩石矿物特征作为成岩演化过程中成岩 环境最直接的反应来阐明克深气田巴什基奇克组层 序地层格架内成岩作用特征。

### 3 层序界面处成岩作用特征

层序界面形成于湖平面的相对下降期,是一个重要的沉积转换面。由于层序界面代表湖平面和水深的突然变化,使得界面处沉积速率、孔隙水化学特征、碎屑组分和结构都发生相应的变化<sup>[1]</sup>,而这些变化必然将导致其成岩作用的差异<sup>[46]</sup>。前人研究表明, 层序界面对于成岩反应的制约主要体现在三方面<sup>[1,56,35]</sup>:一是层序界面代表着相对湖平面下降,由 此引发大气淡水对硅铝酸盐进行充注和淋滤,长石等 蚀变产生高岭石和形成次生溶蚀孔隙;其次,层序界 面代表了短暂的沉积间断,较长的沉积驻留时间,一 方面使得层序界面之下的地层压实作用比界面之上 的压实作用要弱<sup>[6]</sup>,另一方面是使得在层序界面之 下碳酸盐胶结物含量增加;最后是在成岩演化期,层 序界面可作为流体的通道,对层序界面的溶蚀等成岩 改造起到了很好的通道作用<sup>[35]</sup>。

#### 3.1 溶蚀作用

层序界面包含了丰富的地质信息,也发育各具特色的成岩作用,但具体到库车坳陷白垩系巴什基奇克组储层,层序界面对成岩作用的控制则主要表现在溶蚀作用方面,这一点可以直观地从层序界面附近的砂体普遍发育的溶蚀现象得到佐证(图 5A,B)。主要就是中下侏罗统和中上三叠统煤系烃源岩产生的有机酸无法达到层序界面处形成溶蚀。

从各单井的 ECS 测井资料来看,层序界面之下 最典型的特征就是砂质含量显著减小(尤其是 20 m 范围之内),尔后随着深度增加而含量相应增大并趋 于稳定,随后逐渐减小,并在巴一段和巴二段分界线 处(对应最大湖泛面位置)达到最小值(图 6A,B)。 由于层序界面形成时期,可容空间较低,一般形成的 沉积物粒度较粗,杂基含量一般较少,石英、长石含量 多,且较稳定的石英在成岩演化过程中不易发生蚀 变<sup>[48]</sup>,因此层序界面处 ECS 测井中砂质含量的显著 减小主要就是长石和岩屑发生溶蚀。

此外,由于铝硅酸盐矿物的溶解除了产生次生孔 隙之外,也会产出一定数量的黏土矿物,如高岭石等 (式1和式2)<sup>[47]</sup>,因此从储层演化角度来说,高岭石 通常是长石溶解和次生孔隙发育的指示矿物<sup>[49]</sup>。但 研究区巴什基奇克组储层长石普遍溶蚀但高岭石反 而缺失的原因,主要就在于巴什基奇克组储层埋深较 深的结果,较深的埋藏深度直接导致沉积物暴露在较 高的地温下(大于130℃),高岭石变得不稳定将向伊 利石等转化,如下式3<sup>[47,50-51]</sup>。这在ECS测井上也得 到体现,即总体上层序边界附近的黏土含量比其他部 位的相对要高(图 6C 和图 6D),且与ECS测井中所 获得的砂质含量呈此消彼长关系(对比图 6A 和 6C; 6B 和 6D),这也从侧面说明了层序界面之下的溶蚀 作用。

 $2NaAlSi_{3}O_{8}( 钠长石 ) + 2CO_{2} + 3H_{2}O \rightarrow Al_{2}Si_{2}O_{5}$  $(OH)_{4}( 高岭石 ) + 4SiO_{2} + 2Na^{+} + 2HCO_{3}^{-}$ (1)

$$\begin{split} & 4 \text{KAlSi}_{3} \text{O}_{8}( \ensuremath{/}{\text{H}} \& \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Xi} ) + 2 \text{CO}_{2} + 4 \text{H}_{2} \ensuremath{\,\Omega} \to \text{Al}_{2} \ensuremath{\,\text{Si}}_{2} \ensuremath{\,O}_{5} \\ & ( \ensuremath{\,OH} )_{4} ( \ensuremath{\,\tilde{}} \& \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Xi} \ensuremath{\,\Theta} \ensuremath{\,\Theta}$$

3Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>(高岭石)+2K<sup>+</sup>→2KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (OH)<sub>2</sub>(伊利石)+3H<sub>2</sub>O+2H<sup>+</sup> (3)

而从储集物性变化规律来看,随着离不整合面距 离的增加,孔隙度总体逐渐减小,如克深 201 井和克 深 208 井(图 7A,B),说明对巴什基奇克组这样一个 原生孔隙基本损失殆尽,以次生溶蚀孔隙为主的致密 砂岩气储层而言,层序界面对溶蚀孔隙的控制还是很 显著的。但当离层序边界距离较远时(一般大于 100 m),则不具此规律,如克深 2-1-5 井和 2-2-4 井(图 7C,D),孔隙度非但不随深度增加而减小反而具有增 加的趋势,主要就是溶蚀作用受层序边界影响的大气 淡水淋滤深度范围有限,下覆的离层序边界距离较远 的砂体,除受层序边界的大气淡水淋滤外,油气充注 时期使得大量有机酸性水得以侵入,这也是造成砂体 溶蚀的另一原因。



图 5 层序边界附近发育的溶蚀作用 A.溶蚀孔隙发育,克深 208 井,6 602.06 m,距层序边界 38.56 m;B.长石粒内溶蚀,克深 208 井,6 601.65 m,距层序边界 38.15 m。 Fig.5 Dissolution of framework grains under the sequence boundary



图 6 ECS 测开砂灰苔重随床及变化天东图 Fig.6 Crossplots showing the variation of sand content (Q-F-M in ECS logging) with burial depth

由以上(1)层序界面下薄片中普遍可见溶蚀现 象;(2)靠近层序界面附近储层物性变好;(3)靠近层 序界面附近长石岩屑含量减少等可以看出,层序界面 对于巴什基奇克组储层的溶蚀控制作用还是比较显 著的,证实了大气淡水在次生溶蚀孔隙形成中的淋滤 作用<sup>[48,52]</sup>。研究表明,克深地区埋深超过7900 m的 巴什基奇克组仍发育优质碎屑岩储集层其中很大一 部分原因就是溶蚀作用的贡献,一般以150 m内的砂 体大气淡水溶蚀有效性最好,溶蚀作用具有横向成层 性的特征<sup>[53]</sup>。

### 3.2 压实和胶结作用

就压实作用而言,相关的成岩物理模拟实验已证 实,巴什基奇克组顶部层序界面的形成导致沉积物在 地质历史时期较长时间处于浅埋状态,直至受喜玛拉 雅运动的影响才快速深埋至现今深度。与其它深层 致密储层的长期缓慢逐渐埋藏型和短期快速深埋型 埋藏方式相比,巴什基奇克组储层早期浅埋—晚期快 速深埋型埋藏方式使得沉积物压实作用并不彻底,保 留有与埋深不相匹配的相对较好物性条件<sup>[53]</sup>。

层序界面形成时期较长的沉积物驻留时间使湖



Fig.7 Crossplots showing the relationships between porosity and its distance to sequence boundary



图 8 ECS 测井碳酸盐岩含量随深度变化关系图 Fig.8 Crossplots showing the variation of carbonate content with burial depth

水与大气淡水的混合从而易发生表生胶结作 用<sup>[1]</sup>。对巴什基奇克组储层而言,层序界面之下一 定深度确实出现了较高含量的碳酸盐岩,但总体上层 序界面对其碳酸盐岩胶结作用的控制并不明显,在层 序的其他部位均可见较高和/或较低碳酸盐岩胶结物 含量(图 8A,B),反应了成岩作用纵向上的非均质 性。这可能与巴什基奇克组沉积时期整体的干旱、炎 热的古气候条件有关,氧化宽浅湖盆的古地理背景使 得泥晶方解石和石盐等矿物可以直接从沉积水体中 析出,形成同生期胶结物<sup>[54-55]</sup>,因此在层序的各个部 位均可形成较高含量的碳酸盐岩胶结物。

### 4 不同体系域成岩作用差异

随着湖平面的升降变化,沉积体系域不断进行着

从低位、湖侵到高位体系域的演变,体系域垂向上的 演化控制了成岩环境的演化,也将引导出不同的成岩 作用进程及其演化路径,从而形成具有成岩演化过程 下的独特的成岩作用<sup>[56]</sup>,并形成不同的成岩序列<sup>[5]</sup>。 主要就是层序地层格架内不同沉积体系域具有不同 的岩性组合方式,处于不同的成岩环境并经历了不同 的成岩过程<sup>[57]</sup>,因此不同体系域中不同的沉积体系 变化使得成岩演化具有明显的规律性<sup>[7]</sup>。这种相关 性可以通过不同体系域所发育的成岩作用类型体现 出来,因此,根据对不同层序各个体系域垂向演化的 分析,便可为成岩作用的发育、演化及优质储集体预 测提供新的思路。考虑到巴三段低位体系域砂体由 于埋藏过深而基本未钻遇,因此本次研究主要对比以 最大湖泛面为二分时间单元分界线的巴一段高位域 和巴二段湖侵域砂体内的成岩作用差别。

同样由于研究区的碱性成岩环境,碳酸盐岩胶结物可发育于层序的不同部位,因此体系域对碳酸盐岩胶结物的影响也不明显(图8)。

前已述及,随着湖平面的下降,高位体系域砂体 有可能出现暴露,导致大气降水对铝硅酸盐矿物等进 行淋滤改造<sup>[58]</sup>,高位体系域的一部分砂体(即巴一段 顶部)因为抬升受到大气淡水淋滤。同时长石岩屑 蚀变的伴生产物高岭石在成岩演化过程中又将转化 成伊利石和伊蒙混层,这直接导致层序界面之下黏土 矿物含量增高(图6C,D、图9)。

虽然在一个层序地层单元形成过程中,水介质的

物理化学条件将发生变化,沉积物的矿物成分、微量 元素等类型和含量皆发生周期性变化[59],如随着湖 平面的低→高→低的变化,绿泥石和高岭石呈低→高 →低变化,而伊利石和伊/蒙混层则呈高→低→高变 化[60]。但由于高岭石、伊利石等黏土矿物含量受后 生成岩作用影响较大.巴什基奇克组储层经过后期成 岩作用的改造,上述的这一规律性并不明显,如图9 中各单井纵向上黏土矿物含量分布并不具明显的规 律性。虽然在最大湖泛面处见最大值,但在层序边界 以及巴二段湖侵体系域底部,也可见较高含量的黏土 矿物(图9),这可能与有机酸溶蚀作用有关,由于巴 什基奇克组油气主要来源于下伏的中下侏罗统和中 上三叠统煤系烃源岩,有机酸将随油气充注进入巴什 基奇克组储层中,巴二段底部的砂体由于易于跟有机 酸接触,因此具备优先溶蚀的条件,同时伴生出较高 的黏土含量,这也是为什么有些井随着砂体与层序边 界的距离越远,但物性反而越好的主要原因(图7C. D)。从图 10 中也可以看出,总体上储层孔隙度随深 度增大而逐渐降低,此后又有逐渐增高的趋势,与层 序界面控制的大气淡水溶蚀以及有机酸性水溶蚀作 用的机理是相吻合的。

水侵体系域晚期或高位体系域早期的最大湖泛 面附近,可容空间较大,水动力能量弱,形成的沉积物 泥质含量相对较高,而砂质含量较小(图 6C,D、图 10),但这一点主要不是受成岩作用影响,而是由沉 积因素所控制的沉积物原始组分和结构所决定的。



图 9 ECS 测井黏土矿物含量随深度变化关系图 Fig.9 Crossplots showing the variation of clay content with burial depth



图 10 克深 207 井层序地层格架内物性变化及 ECS 成岩矿物组合特征

Fig.10 Reservoir property and diagenetic mineral characteristics in sequence stratigraphic framework of Well Keshen 207

### 5 结论

(1)库车坳陷白垩系巴什基奇克组层序界面之下的主要成岩作用特征是长石和岩屑的溶蚀作用,较高的黏土矿物含量是溶蚀伴生的高岭石成岩转化的结果。

(2) 层序界面之下虽可见较高的碳酸盐岩含量, 但由于研究区碱性成岩环境背景,在层序的其他部位 均可见较高或较低的碳酸盐岩含量。

(3)同样由于碱性成岩环境背景,体系域对碳酸 盐岩胶结作用的控制也不明显,黏土矿物由于后生成 岩作用影响较大,在体系域内也没有相应规律性变 化。

(4) 除在最大湖泛面处外,黏土矿物在层序边界

和巴二段湖侵域砂体底部出现的高值,主要由溶蚀作用伴生的高岭石向伊利石和伊/蒙混层转化有关。

致谢 感谢长江大学地球科学学院胡明毅教授 的宝贵修改意见。

### 参考文献(References)

- 韩登林,张昌民,尹太举. 层序界面成岩反应规律及其对储层储集物性的影响[J]. 石油与天然气地质,2010,31(4):449-454.[Han Denglin, Zhang Changmin, Yin Taiju. Diagenetic reaction pattern of the sequence boundary and its impacts on reservoir quality[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(4): 449-454.]
- 2 李忠,刘嘉庆. 沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干 问题及趋向[J]. 沉积学报,2009,27(5):837-847.[Li Zhong, Liu Jiaqing. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution in sedimentary basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 837-847.]
- 3 黄洁,朱如凯,侯读杰,等. 沉积环境和层序地层对次生孔隙发育的 影响——以川中地区须家河组碎屑岩储集层为例[J]. 石油勘探 与开发,2010,37(2):158-166.[Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, et al. Influences of depositional environment and sequence stratigraphy on secondary porosity development: A case of the Xujiahe Formation clastic reservoir in the central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 158-166.]
- 4 Morad S, Al-Ramadan K, Ketzer J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1267-1309.
- 5 邱桂强.东营凹陷古近系成岩层序特征与储集差异性分析[J].沉 积学报,2007,25(6):915-922.[Qiu Guiqiang. Analysis on Lower Tertiary diagenetic sequence characteristics and their differences of reservoirs in Dongying sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 915-922.]
- 6 谭先锋,田景春,李祖兵,等.碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演 化——以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例[J].地质通报, 2010,29(4):535-543.[Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment—Taking the Member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying sag, Shandong, China for example[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 535-543.]
- 7 姜向强,李德江,朱筱敏,等. 克百地区三叠系储层成岩层序研究 [J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(2):23-27.[Jiang Xiangqiang, Li Dejiang, Zhu Xiaomin, et al. Study on diagenetic sequence stratigraphy in Triassic reservoir of the Kebai region, Junggar Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(2): 23-27.]
- 8 谢武仁,邓宏文,王洪亮,等. 渤中凹陷古近系层序格架内的成岩作用[J]. 断块油气田,2008,15(2):23-26.[Xie Wuren, Deng Hongwen, Wang Hongliang, et al. Diagenesis in sequence stratigraphic framework of Paleogene strata in Bozhong depression[J]. Fault- Block Oil & Gas Field, 2008, 15(2):23-26.]

- 9 周劲松,赵澄林,刘明梅.陕甘宁盆地中部马五段上部成岩层序地 层学研究及其意义[J]. 岩石矿物学杂志,2000,19(2):113-121. [Zhou Jinsong, Zhao Chenglin, Liu Mingmei. A study of diagenetic sequence stratigraphy of upper Ma 5 member, central Ordos Basin and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(2): 113-121.]
- 10 崔金栋,郭建华,朱美衡. 塔中地区石炭系生屑灰岩段成岩层序地 层学[J]. 地质科技情报,2011,30(5):23-28.[Cui Jindong, Guo Jianhua, Zhu Meiheng. Diagenetic sequence stratigraphy of Carboniferous bioclastic limestone member in central Tarim Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(5): 23-28.]
- 11 李忠,韩登林,寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报,2006,22(8):2151-2164.[Li Zhong, Han Denglin, Shou Jianfeng. Diagenesis systems and their spatio-temporal attributes in sedimentary basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2151-2164.]
- 12 Ketzer J M, Morad S. Predictive distribution of shallow marine, low porosity (pseudomatrix-rich) sandstones in a sequence stratigraphic framework: example from the Ferron sandstone, Upper Cretaceous, USA[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(1): 29-36.
- 13 Zamanzadeh S M, Amini A, Ghavidel-Syooki M. Sequence stratigraphic controls on early-diagenetic carbonate cementation of shallow marine clastic sediments (the Devonian Zakeen Formation, southern Zagros, Iran) [J]. Geosciences Journal, 2009, 13(1); 31-57.
- 14 El-ghaliM A K, Mansurbeget H, Morad S, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial and paralic deposits within sequence stratigraphic framework: Evidence from the Ptrohan Terrigenous Group and the Svidol Formation, Lower Triassic, NW Bulgaria [J]. Sedimentary Geology, 2006, 190: 299-321.
- 15 Friedman G M. Rapidity of marine carbonate cementation-implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: perspective [J]. Sedimentary Geology, 1998, 119(1/2): 1-4.
- 16 罗忠,罗平,张兴阳,等. 层序界面对砂岩成岩作用及储层质量的 影响——以鄂尔多斯盆地延河露头上三叠统延长组为例[J]. 沉 积学报, 2007, 25(6): 903-914. [Luo Zhong, Luo Ping, Zhang Xingyang, et al. Effect of sequence boundary on sandstones diagenesis and reservoir quality: An outcrop study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, Northwest China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 903-914.]
- 17 Ketzer J M, Morad S, Evans R, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: Evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(6): 760-774.
- 18 Kordi M, Turnerc B, Salem A M K. Linking diagenesis to sequence stratigraphy in fluvial and shallow marine sandstones: Evidence from the Cambrian-Ordovician lower sandstone unit in southwestern Sinai, Egypt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(8): 1554-1571.
- 19 杨涛,张国生,梁坤,等.全球致密气勘探开发进展及中国发展趋势预测[J].中国工程科学,2012,14(6):64-69.[Yang Tao, Zhang

Guosheng, Liang Kun, et al. The exploration of global tight sandstone gas and forecast of the development tendency in China[J]. Chinese Engineering Science, 2012, 14(6): 64-69.]

- 20 杜金虎,王招明,胡素云,等. 库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(4):385-393.[Du Jinhu, Wang Zhaoming, Hu Suyun, et al. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 385-393.]
- 21 Zeng Lianbo, Wang Hongjun, Gong Lei, et al. Impacts of the tectonic stress field on natural gas migration and accumulation: A case study of the Kuqa Depression in the Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(7): 1616-1627.
- 22 雷刚林,谢会文,张敬洲,等.库车坳陷克拉苏构造带构造特征及 天然气勘探[J].石油与天然气地质,2007,28(6):816-821.[Lei Ganglin, Xie Huiwen, Zhang Jingzhou, et al. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuqa depression [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 816-821.]
- 23 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要 意义[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.[Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.]
- 24 李建忠,郭彬程,郑民,等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23 (4): 607-615. [Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.]
- 25 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. Geologica analysis on reservoir mechanism of the Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Dabei area of the Kuqa depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 507-517.]
- 26 王波,张荣虎,任康绪,等. 库车坳陷大北-克拉苏深层构造带有效 储层埋深下限预测[J].石油学报,2011,32(2):212-218.[Wang Bo, Zhang Ronghu, Ren Kangxu, et al. Prediction of the lower limit of burial depth for effective reservoirs in the Dabei- Kelasu deep structural belt of Kuqa depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32 (2): 212-218.]
- 27 张荣虎,贾承造,张惠良,等. 塔里木盆地白垩系巴什基奇克组陆 相砂岩中碳酸盐岩碎屑特征及其地质意义[J]. 沉积学报,2009, 27(3):410-418.[Zhang Ronghu, Jia Chengzao, Zhang Huiliang, et al. Carbonate debris characteristics and its geological significance in the terrestrial sandstone of Cretaceous Bashijiqike Group, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 410-418.]
- 28 张惠良,张荣虎,杨海军,等.构造裂缝发育型砂岩储层定量评价 方法及应用——以库车前陆盆地白垩系为例[J]. 岩石学报, 2012,28(3):827-835.[Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, et al. Quantitative evaluation methods and applications of tectonic fracture developed sand reservoir: A Cretaceous example from Kuqa

foreland basin [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 827-835.]

- 29 韩登林,李忠,韩银学,等. 库车坳陷克拉苏构造带白垩系砂岩埋 藏成岩环境的封闭性及其胶结作用分异特征 [J]. 岩石学报, 2009,25(10):2351-2362. [Han Denglin, Li Zhong, Han Yinxue, et al. Sealing feature of burial diagenesis environment and its controls on differentiation of cementation in Cretaceous sandstone reservoir in Kelasu structure zone, Kuqa depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 28(3): 827-835.]
- 30 贾进华. 库车前陆盆地白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究 [J]. 地学前缘,2000,7(3):133-144.[Jia Jinhua. Despositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijike Formation in Kuqa forel basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 133-144.]
- 31 王家豪,王华,陈红汉,等.前陆盆地的构造演化及其沉积、地层响应——以库车坳陷下白垩统为例[J].地学前缘,2007,14(4): 114-122.[Wang Jiahao, Wang Hua, Chen Honghan, et al. Research on the tectonic evolution of forelan d basins and their responses to deposition and stratigraphy: An example from the Lower Cretaceous in Kuqa depression[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 114-122.]
- 32 王家豪,王华,陈红汉,等. 一幕完整的前陆盆地构造演化的地层 记录:库车坳陷下白垩统[J]. 地质科技情报,2006,25(6):31-36. [Wang Jiahao, Wang Hua, Chen Honghan, et al. Stratigraphic record in a whole episode of foreland basin tectonic evolution: The Lower Cretaceous in Kuqa depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(6): 31-36.]
- 33 肖建新,林畅松,刘景颜. 塔里木盆地北部库车坳陷白垩系层序地 层与体系域特征[J]. 地球学报,2002,23(5):453-458. [Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. Characteristics of Cretaceous sequence stratigraphy and system tract in Kuqa depression, northerm Tarim Basin[J]. Geoscience, 2002, 23(5): 453-458.]
- 34 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.]
- 35 谭先锋,田景春,陈兰,等. 陆相断陷湖盆层序对成岩演化控制作 用探讨——以东营箕状断陷湖盆古近系沙河街组为例[J]. 中国 地质,2010,37(5):1257-1272.[Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Chen Lan, et al. Chen Lan The control role of stratigraphic sequence in diagenetic evolution in the terrestrial fault basin; A case study of Paleogene Shahejie Formation in Dongying half basin[J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1257-1272.]
- 36 李国蓉,曾允孚,周心怀,等.十万大山地区下-中泥盆统白云岩成 岩层序地层学研究[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31 (6):668-671.[Li Guorong, Zeng Yunfu, Zhou Xinhuai, et al. Study on diagenesis-sequence stratigraphy of Lower- Middle Devonian dolostone in Shiwandashan area, Guangxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2004, 31 (6): 668-671.]
- 37 王琪,陈国俊,薛莲花,等. 塔里木盆地西部层序地层格架控制下

的石炭系沉积成岩演化特征[J]. 石油实验地质,2003,25(1):39-44.[Wang Qi, Chen Guojun, Xue Lianhua, et al. Evolutionary characteristics of the Carboniferous sedimentation and diagenesis controlled by the sequence stratigraphic framework of the west Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(1): 39-44.]

- 38 韩琳,潘保芝. 应用 ECS 测井资料丰富岩性识别图版信息[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(增刊):110-112.[Han Lin, Pan Baozhi. Application of ECS logging data increases crossplot informations in identifying volcanic lithology[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(Suppl.): 110-112.]
- 39 柳建华,刘瑞林,吴兴能,等. 化学元素测井资料在地层界面处的 响应特征研究[J]. 石油天然气学报,2007,29(1):84-88.[Liu Jianhua, Liu Ruilin, Wu Xingneng, et al. On the data of response characters of elemental capture spectroscopy (ECS) logging at stratum boundary[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(1):84-88.]
- 40 袁祖贵. 地层元素测井(ECS)评价油水层[J]. 核电子学与探测技术,2004,24(2):126-131.[Yuan Zugui. Evaluation of oil-water stratum using Element Capture Spectroscopy (ECS)[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(2): 126-131.]
- 41 马建海,杨雷,杨品,等. 元素俘获测井(ECS)在尕斯库勒油藏描述中的应用[J]. 测井技术,2007,31(6):596-599.[Ma Jianhai, Yang Lei, Yang Pin, et al. Application of ECS logs in reservoir description of Gasikule Block[J]. Well Logging Technology, 2007, 31 (6): 596-599.]
- 42 刘绪纲,孙建孟,郭云峰. 元素俘获谱测井在储层综合评价中的应 用[J]. 测井技术,2005,29(3):236-240.[Liu Xugang, Sun Jianmeng, Guo Yunfeng. Application of elemental capture spectroscopy to reservoir evaluation[J]. Well Logging Geology, 2005, 29(3): 236-240.]
- 43 罗宁,唐雪萍,刘恒,等. 元素俘获谱测井在储层评价中的应用 [J]. 天然气工业,2009,29(6):43-45.[Luo Ning, Tang Xueping, Liu Heng, et al. Application of Elementary Capture Spectroscopy (ECS) log to the reservoir evaluation [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(6): 43-45.]
- 44 赖锦,王贵文,王书南,等. 碎屑岩储层成岩相研究现状及进展 [J]. 地球科学进展,2013,28(1):39-50.[Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28 (1): 39-50.]
- 45 赖锦,王贵文,王书南,等. 碎屑岩储层成岩相测井识别方法综述 及研究进展[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(12):4942-4953.[Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Overview and research progress in logging recognition method of clastic reservoir diagenetic facies [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(12): 4942-4953.]
- 46 孙萍,罗平,阳正熙. 基准面旋回对砂岩成岩作用的控制——以鄂 尔多斯盆地西南缘汭水河延长组露头为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2009,28(2):179-184. [Sun Ping, Luo Ping, Yang Zhengxi. The control of the sequence boundary over the sandstone reservoir and diagenesis: A case study of Yanchang Formation outcrop along the

Ruishui River profile[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28 (2): 179-184.]

- 47 Higgs K E, Zwingmann H, Reyes A G, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki basin, New Zealand [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77 (12): 1003-1025.
- 48 丁晓琪,韩玫梅,张哨楠,等. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用[J]. 地质论评,2014,60(1):145-458.[Ding Xiaoqi, Han Meimei, Zhang Shaonan, et al. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoirs[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 145-458.]
- 49 贺艳祥,张伟,胡作维,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组砂 岩中长石的溶解作用对储层物性的影响[J].天然气地球科学, 2010,21(3):482-488.[He Yanxiang, Zhang Wei, Hu Zuowei, et al. Affect of feldspar dissolution to properties of sandstone reservoir of Chang 8 oil layer in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 482-488.]
- 50 Khidir A, Catuneanu O. Sedimentology and diagenesis of the Scollard sandstones in the Red Deer Valley area, central Alberta[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2003, 51(1): 45-69.
- 51 Dutton S P, Loucks R G. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultradeep (200 - 6700 m) burial, Gulf of Mexico Basin, U.S.A. [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 69-81.
- 52 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,2003, 28(4):419-424.[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, 2003, 28(4): 419-424.]
- 53 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析 [J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.[Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.]
- 54 钟大康,朱筱敏,王红军.中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机

理分析[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2008,38(增刊1):11-18. [Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Wang Hongjun. Characteristics and formation mechanisms analsis of deep high quality clastic reservoirs in China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2008, 38(Suppl.1): 11-18.]

- 55 徐论勋,王宏伟,林克相,等. 库车坳陷克依构造带巴什基奇克组 储层特征[J]. 西南石油学院学报,2005,27(6):15-20.[Xu Lunxun, Wang Hongwei, Lin Kexiang, et al. Reservoir characteristics of Bashenjiqike Formation Keyi tectonic belt Kuche depression[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(6): 15-20.]
- 56 李熙喆,张满郎,谢武仁,等.鄂尔多斯盆地上古生界层序格架内 的成岩作用[J]. 沉积学报,2007,25(6):923-933.[Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren, et al. The diagenesis in sequence stratigraphic framework of the Upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 923-933.]
- 57 朱筱敏,董艳蕾,郭长敏,等. 歧口凹陷沙河街组一段层序格架和 储层质量分析[J]. 沉积学报,2007,25(6):934-941.[Zhu Xiaomin Dong Yanlei, Guo Changmin, et al. Sequence framework and reservoir quality of Sha 1 Member in Shahejie Formation, Qikou sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 934-941.]
- 58 张哨楠,丁晓琪,万友利,等. 致密碎屑岩中粘土矿物的形成机理 与分布规律[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(3): 174-182.[Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, Wan Youli, et al. Formation mechanism and distribution of clay minerals of deeply tight siliciclastic reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(3): 174-182.]
- 59 赵俊青,纪友亮,张世奇,等. 陆相高分辨率层序界面识别的地球 化学方法[J]. 沉积学报,2004,22(1):79-86.[Zhao Junqing, Ji Youliang, Zhang Shiqi, et al. Geochemical methods of boundary identification in terrigenous high-resolution sequence[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 79-86.]
- 60 张立强,罗晓容,何登发,等. 准噶尔盆地南缘下白垩统层序界面 的识别[J]. 沉积学报,2004,22(4):636-643.[Zhang Liqiang, Luo Xiaorong, He Dengfa, et al. Sequence boundaries of the Lower Cretaceous, southern Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 636-643.]

## Diagenetic Sequence Stratigraphy Characteristics of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression

LAI Jin<sup>1</sup> WANG GuiWen<sup>1,2</sup> CHAI Yu<sup>1</sup> RAN Ye<sup>1</sup> ZHENG XinHua<sup>3</sup> XIN Yi<sup>3</sup> ZHOU Lei<sup>3</sup> WU QingKuan<sup>3</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla, Xinjiang 841000)

Abstracts: On the basis of thin section, casting thin sections, X-diffration and scanning electron microscope data, this article discusses reservoir properties including lithology, physical property and reservoir space of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Dabei area of the Kuqa Depression. Combining with Elemental Capture Spectroscopy (ECS) logging, diagenesis and characteristics of diagenetic mineral assembladges were studied. The difference of diagenesis between Ba 2 (the second member of Bashijiqike Formation) transgressive system tract and Ba 1 highstand system tract is also analyzed. The results show that corrosion phenomena are widely observed in the thin sections, with the decrease of feldspathic litharenite content near the boundary and improvement of physical property near sequence boundary. The clay content is higher both at the maximum flooding surfaces due to deposition, and under the sequence boundaries due to kaolinization after corrosion. On the whole, the controls of sequence boundaries and system tracts on carbonate cementation are not obvious. Different contents of carbonate cement could be seen in every part of sequence, which are related to alkaline diagenetic environment of the study area. Study results are beneficial for the track and comparison of reservoirs; Moreover, these would direct the exploration of gas and promote the development of the sequence stratigraphy theory.

Key words: diagenetic sequence stratigraphy; sequence boundary; systems tract; diageneisi; ECS; Bashijiqike Formation; Keshen gas field