

构造挤压背景下深层砂岩压实分异特征

——以塔里木盆地库车前陆冲断带白垩系储层为例

毛亚昆¹,钟大康¹,李勇²,王腾宇²,孙海涛¹,王媛¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田分公司

勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000]

摘要:压实作用作为影响储层质量演化及预测的重要因素,常被理解为中浅层砂岩所经历的成岩作用,深层的压实作用长期被忽视,然而,库车前陆冲断带白垩系深层砂岩储层存在显著的压实分异现象。利用薄片、阴极发光和粒度分析对白垩系砂岩压实作用进行了深入研究。深层砂岩压实分异受构造挤压作用、胶结作用和砂岩粒径控制。压实作用在不同构造出现规律性的变化以及在纵向上呈现反深度的变化,而且随胶结程度降低,不同构造砂岩压实分异的幅度增大;中砂岩与细砂岩随压实程度增高,压实作用分异减小。深层储层仍存在较强的压实分异意味着在进行深层砂岩储层预测时,应该重视压实作用对深层储层质量差异的影响。

关键词:压实作用;成岩作用;深层储层;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Differential compaction of deep sandstones in compressive tectonic setting: A case study of Cretaceous reservoirs in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin

Mao Yakun¹, Zhong Dakang¹, Li Yong², Wang Tengyu², Sun Haitao¹, Wang Yuan¹

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

2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Compaction, a key factor for reservoir quality evolution and prediction, is generally considered as one of the major diagenesis of sandstones during shallow and intermediate burial instead of deep burial. However, prominent differential compaction is observed in the deep Cretaceous sandstone reservoirs of Kuqa foreland thrust belt and studied in-detail through thin section observation, CL and grain size analysis. Differential compaction of deep sandstone is mainly controlled by grain diameter, cementation and tectonic compression. The compaction degree of the deep sandstone reservoirs shows certain regularities from north to south on different tectonic positions and appears to change inversely with burial depth. Moreover, differentiation of compaction enhances with decreasing cementation. For medium-grained sandstone and fine sandstone, differentiation of compaction lowers along with their compaction degree. The existence of significant differential compaction in the deep-buried sandstone reservoir implies that much attention should be paid to the influence of compaction to reservoir quality differentiation when predicting deep-buried sandstone reservoirs.

Key words: compaction, diagenesis, deeply-buried reservoir, Kuqa Depression, Tarim Basin

压实作用与胶结作用对砂岩储层孔隙体积损失的相对重要性研究表明许多含油气盆地砂岩储层孔隙体积变化主要由压实作用造成的^[1-4]。因此,研究压实作用及其分异规律对储层评价及预测具有重要意义。

压实作用包括机械压实和化学压实。机械压实表

现为颗粒重排、塑形矿物变形及刚性颗粒破裂,化学压实表现为压溶及之后缝合线、硅质胶结物的发育^[5]。压实作用一般由上覆地层垂向负载引起,构造挤压引起的构造压实作用也有少量报道^[6-8]。早期研究表明机械压实主要发生于浅层(<2.5 km),深层主要以化

收稿日期:2015-12-02;修订日期:2017-08-10。

第一作者简介:毛亚昆(1988—),男,博士研究生,储层地质学。E-mail:maoyakun1988@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB201104);国家自然科学基金项目(41302108)。

学压实的方式进行^[9]。随着研究的深入,出现两种不同的观点,一种观点认为深层没有发生明显的压实作用,砂岩体积损失在浅层(<2.5 km)已经基本完成,深层的孔隙损失主要是胶结作用而非机械压实或化学压实造成的^[10-14];另一种观点则认为深层压实作用同样是造成砂岩储层孔隙损失的一种重要过程^[4,15-18]。除化学压实外,实际观察、物理和数值模拟均表明在深埋或高应力环境下砂岩可通过颗粒重排、破裂和孔隙坍塌的变形方式调整岩石的压缩应变过程^[7,17-18]。粗粒径、弱胶结、快速埋藏、低地温梯度、高应力环境均有利于砂岩深层压实发生^[17-18],因此,深层仍可能存在显著的机械压实作用,机械压实作用与否与沉积岩性、成岩、盆地动力学环境有关。基于沉积岩性、成岩、盆地动力环境与深层碎屑岩压实作用的研究,已进行了一些有益的探索^[6,18-20],但许多方面都有待深入提高,这些方面可能包括深层压实变形方式、沉积与成岩对压实演化分异的影响、盆地动力学与压实应变之间的关系、以及深层压实变形对孔隙发育的影响等。

本文利用薄片、阴极发光、全岩X-衍射、粒度分析等资料,在岩石学特征分析基础上,对库车前陆冲断带白垩系砂岩储层压实作用展开研究。通过压实变形方式、压实程度和压实纵横向分布特征、以及岩性、盆地动力学参数与机械压实分异关系的研究,确定深层砂岩压实演化路径和压实控制因素,为储集层质量预测奠定基础,并可对应力场及构造变形分析提供有益的支持。

1 地质背景

1.1 构造特征

库车坳陷在塔里木盆地北部,以中、新生代沉积为主,整体呈NEE向展布,进一步划分为克拉苏构造带、依奇克里克构造带和秋里塔格构造带、乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷、以及北部单斜带和南部斜坡带7个二级构造单元^[21]。库车坳陷在晚二叠世—三叠纪为前陆盆地,侏罗纪—古近纪发展成陆内坳陷,新近纪之后为再生前陆盆地^[22]。克拉苏构造带是靠近山前的第二排构造带,受喜马拉雅期构造运动控制,发育一系列大致平行的、分段生长的东西向逆冲断层和断层相关褶皱构成的成排成带的背斜构造圈闭^[23](图1)。

1.2 地层发育特征

库车前陆冲断带白垩系巴什基奇克组为干旱气候背景下的陆源碎屑沉积^[24-25],厚度约在200~300 m,自下而上划分为巴三段、巴二段及巴一段,其中巴二段和巴一段为主要的含气储层发育段^[3,26]。储层现今埋深约3 000~8 000 m。自早白垩世中期(127 Ma),白垩系储层缓慢沉降,沉降速率约为50~60 m/Ma,至晚白垩世早中期(97 Ma)储层埋至1 500 m~1 800 m,而后逐渐抬升遭受剥蚀,古新世早期(65 Ma)至古近纪末期(23 Ma),又继续缓慢沉降,埋深到2 000 m左

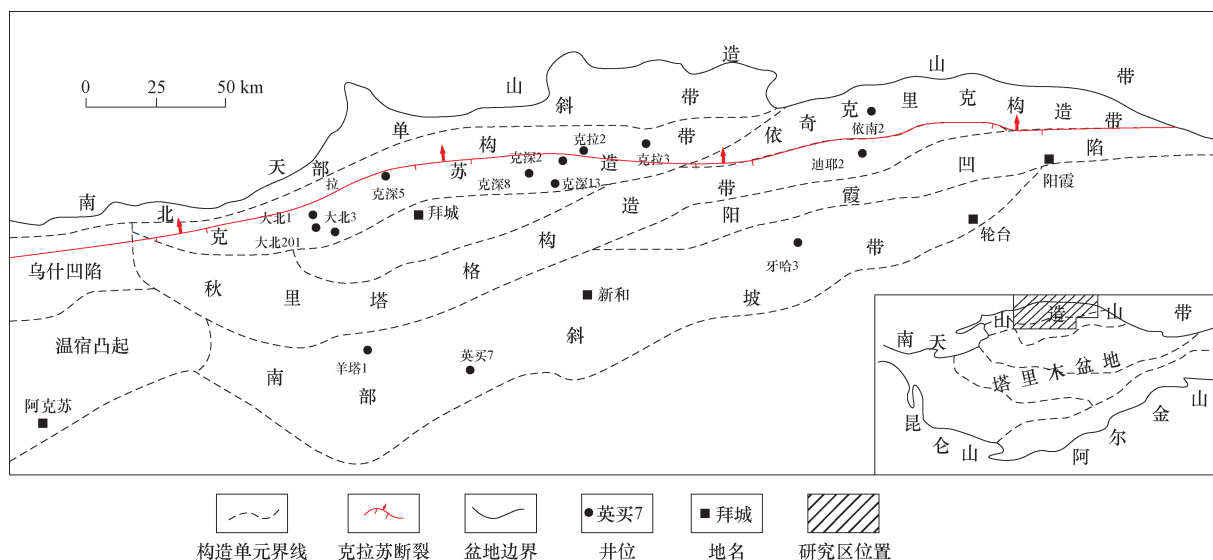


图1 库车坳陷克拉苏构造带及其典型构造圈闭^[26]

Fig. 1 Typical structural trap in Kelaasu tectonic zone, Kuqa Depression^[26]

右,到新近纪,进入到短时间快速埋藏阶段,埋藏速率可以达到 $230 \sim 250 \text{ m/Ma}$,中新世末(5.3 Ma)地层埋深超过 5500 m ,之后克拉苏断裂上盘储层抬升到现今约 $3200 \sim 4500 \text{ m}$,下盘储层继续深埋至现今约 $5500 \sim 8500 \text{ m}$ ^[26-27]。白垩系沉积时古地温梯度约为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C/km}$,新生代地温梯度整体持续降低至 $21 \text{ }^{\circ}\text{C/km}$ ^[28]。

1.3 沉积特征

前人对研究区巴什基奇克组沉积环境作过较详细的研究,认为巴一段与巴二段为辫状河三角洲前缘沉积,巴三段为扇三角洲前缘沉积^[3,26,29]。巴什基奇克组沉积砂体厚度大,延伸远,大范围稳定展布,砂地比值高,这可能与沉积时南天山物源供应充足、沉积地形比较平坦有关。沉积砂体以水下分流河道为主体,少量为河口坝沉积,砂体主要由分选中等-好的中、细粒砂岩组成,含少量的含砾砂岩、泥质砂岩、粉砂岩等^[3]。

2 样品及方法

本次样品来自研究区8个背斜构造(图1),除大北1构造砂岩样品为巴三段外(大北1地区仅保留有巴三段),其余构造砂岩样品均为巴一段和巴二段。砂岩样品在不同构造的深度由北向南整体逐渐增加。

压实作用研究的难点之一是没有直接参数表征压实程度。评价压实程度常需要依据间接参数(紧密堆积指数、颗粒接触指数、颗粒接触类型比例^[30]及粒间体积^[10,12]等)和假定初始孔隙度^[11]。本文利用大量薄片、阴极发光和粒度分析资料,使用定性及定量结合的方法,依据颗粒接触类型比例、塑形颗粒变形情况、刚性颗粒破裂程度及粒间体积(%)综合分析压实程度及其变化规律,并进一步利用薄片及对应的粒度分析资料(筛析法)对矿物结构、杂基、胶结物含量与粒间体积的关系作对比分析。其中,粒间体积(%)为薄片下杂基含量(%)、粒间胶结物含量(%)与粒间孔隙含量(%)之和,不包括粒内溶孔量^[12]。与胶结物含量不同,粒间体积是不可逆的下降变化过程。砂岩分选一致的情况下,粒间体积越小,压实作用越强^[12]。

3 岩石学特征

3.1 薄片分析结果

根据样品薄片鉴定结果,岩石类型以岩屑长石砂岩与长石岩屑砂岩为主,成分成熟度及结构成熟度中

等-好。石英含量为 $33\% \sim 65\%$,平均 46% ,长石含量为 $8\% \sim 45\%$,平均 31% ,岩屑含量为 $10\% \sim 51\%$,平均 23% 。岩屑以变质岩岩屑和岩浆岩岩屑为主,含部分沉积岩岩屑。刚性岩屑所占比例较多,塑性岩屑较少。杂基含量整体较低,基本在 8% 以下,平均 $2\% \sim 4\%$,主要包括泥质和泥铁质,泥质成分主要为伊利石、伊蒙混层矿物,铁质成分为赤铁矿。胶结程度中等,胶结物含量 $1\% \sim 27\%$ 不等,其中,胶结类型以方解石和白云石胶结为主,此外有少量的硅质、钠长石、硬石膏、粘土矿物等;岩石粒度以中、细粒为主,分选中等-好,次棱角-次圆状。

3.2 全岩矿物分析结果

全岩X-衍射矿物分析表明(图2),矿物组分主要包括石英、长石、方解石、白云石、粘土以及少量的硬石膏等。

石英及长石矿物含量整体变化不大,石英矿物含量主要分布在 $50\% \sim 70\%$,平均 62% ;长石矿物含量主要分布在 $15\% \sim 35\%$,平均 29% ;大北地区比克深地区石英及长石矿物含量略高;而由北向南,由浅入深,石英矿物含量在不同构造略有降低,长石矿物含量略有升高。

碳酸盐矿物含量为 $1\% \sim 30\%$,分布有所不均。大北地区碳酸盐矿物含量整体较高,平均值 10% ,以方解石为主,白云石较少,克深地区碳酸盐矿物含量平均值为 8% ,以白云石为主,方解石较少;南北向上,南部的碳酸盐含量有所降低。

粘土矿物含量为 $1\% \sim 17\%$,平均值 5.4% ,分布较为均匀,个别地区含量较低。

4 压实作用特征

4.1 压实类型

镜下观察表明,研究区储集砂岩主要呈线接触,部分点接触,少数凹凸接触,缝合线未见发育,硅质胶结程度低(图3);砂岩中云母矿物普遍强变形,泥岩屑、低级变质岩屑在不同构造发生不同程度的弯曲变形(图3a,b,d,g);同时,刚性颗粒(石英、长石)具破裂现象,大北1、大北2构造胶结程度较高,网状破裂比较发育,但颗粒结构仍较完整(图3c,e),其它构造储层砂岩中长石及较粗石英颗粒有一定程度破裂(图3d),破裂颗粒的数量比例有限,单个颗粒发育 $1 \sim 3$ 条破裂缝,破裂程度较低。破裂缝有的弯曲,有的呈楔形,有的呈放射状与其他破裂缝汇于一点,指示挤压破裂的特点。

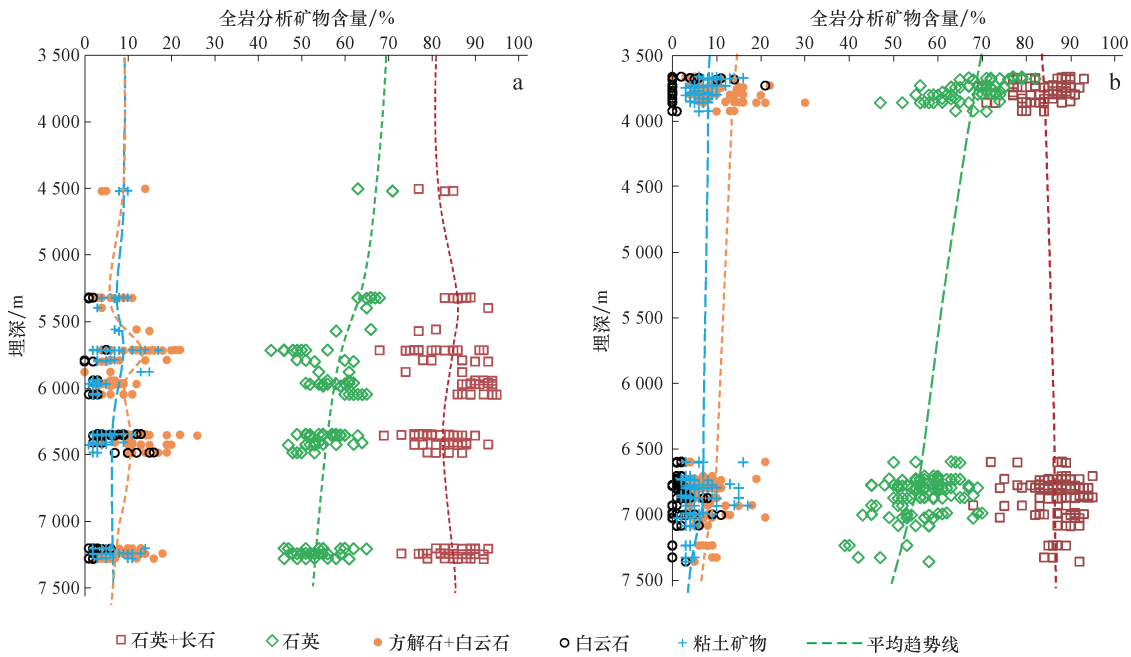


图 2 库车前陆冲断带白垩系储集砂岩全岩 X-衍射分析矿物组分与深度的变化

Fig. 2 Composition from whole rock X-ray diffraction analysis vs. depth of the Cretaceous sandstone samples from Kuqa foreland thrust belt
a. 吐北 - 大北地区; b. 克拉 - 克深地区

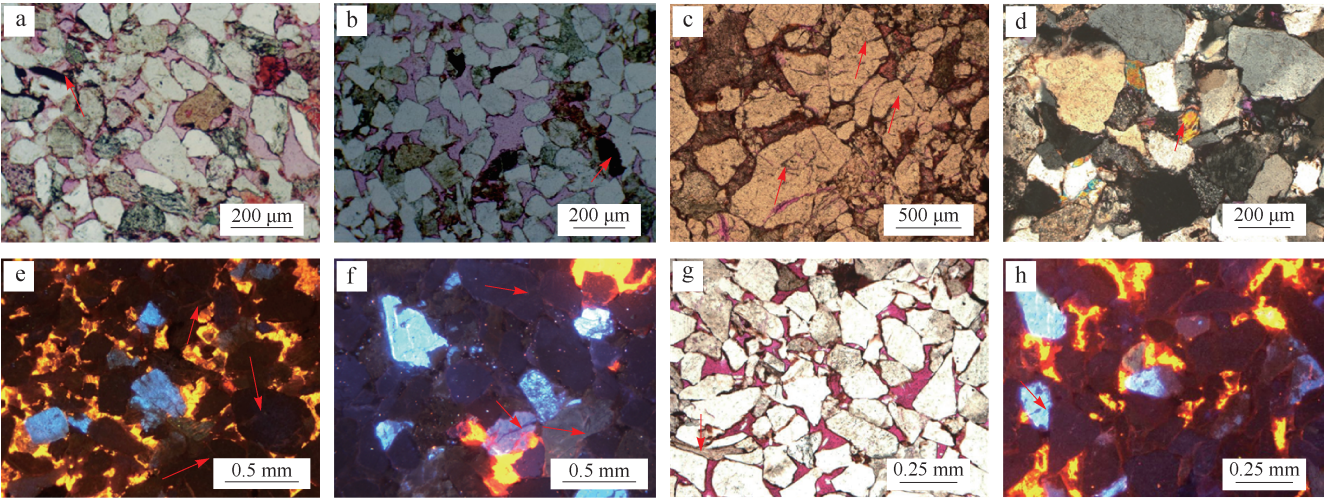


图 3 库车前陆冲断带巴什基奇克组砂岩压实作用镜下特征

Fig. 3 Microscopic compaction characteristics of samples from the Cretaceous sandstone reservoirs in Kuqa foreland thrust belt

a. 吐北 1 井,埋深 4 503.7 m,铸体薄片(-),点-线接触,泥岩岩屑微弱变形,中等压实带;b. 克拉 2 井,埋深 3 744.8 m,铸体薄片(-),点接触,泥岩屑微弱变形,中等压实带;c. 大北 1 井,埋深 5 561.1 m,铸体薄片(-),线接触,颗粒压碎破裂较发育,但颗粒仍较完整,强压实;d. 克深 202 井,埋深 6 797.3 m,铸体薄片(+),线接触,云母强烈弯曲变形,强压实带;e. 大北 203 井,埋深 6 350.9 m,阴极发光,石英、长石破裂程度高、破裂缝多,强压实;f. 克深 201 井,埋深 6 511.2 m,阴极发光,可见长石、石英颗粒破裂,强压实带;g. 大北 307 井,埋深 7 215.9 m,铸体薄片(-),点、线接触,岩屑微弱变形,中强压实带;h. 克深 13 井,埋深 7 355.1 m,阴极发光,线接触,见颗粒破裂,中强压实带

因此,研究区深埋砂岩以较强的机械压实为主,化学压实有一定程度的发展,但是,颗粒重排、塑性变形的方式仍是晚期压实变形的主要方式,晚期压实也未演变为应变碎裂规模发育破坏岩石结构的方式进行。

4.2 压实作用空间分异特征

4.2.1 南北向压实分异显著

压实作用沿南北方向规律性变化,不同构造部位具有强烈的压实非均质性。依据砂岩压实特征及压实

强度,南北向上可划分出中等压实(Ⅰ级)带、中强压实(Ⅱ级)带、强压实带 3 个等级。中等压实(Ⅰ级)带主要位于北部克拉苏断裂上盘,构造上属于逆冲抬升带,这个带砂岩颗粒线接触比例大于 30%,点接触比例大于 50%,云母强弯曲变形,泥岩屑基本无变形,未见—少见颗粒压碎破裂(图 3a,b),粒间体积为 16%~34%,峰值 22%~24%(表 1;图 4)。强压实带分布在克拉苏断裂下盘北部,构造上属于逆冲扩展中部,这些地方颗粒线接触比例大于 70%,少量具凹凸接触,云母及低级变质岩屑有较强弯曲变形,刚性颗粒破裂常见(图 3c—f),粒间体积为 6%~34%,峰值 10%~12%(表 1;图 4)。中强压实带分布在中等压实带与强压实带之间的地区和强压实带以南地区,构造上位于逆冲扩展前锋部位,在逆冲抬升带和逆冲扩展中带的过渡地区也可能发育,这些地方线接触比例大于 50%,点接触比例超过 20%~30%(图 3g,h),颗粒破裂较常见,粒间体积为 10%~30%,峰值 16%~18%(表 1;图 4)。可见,由北向南储层砂岩颗粒线接触、凹凸接触比例先增多又减少,颗粒变形及破裂的程度同样先增强后又变弱,粒间体积则具有相反的变化趋势,反映南北向上弱—强—弱的压实分带特征。

4.2.2 东西向压实分异较低

东西向上,砂岩压实分异不如南北向明显。克深段的砂岩粒间体积最小值要低于大北段(图 4),颗粒破裂程度也弱。这可能与东西向上碳酸盐胶结强度不同有关。薄片及 X—衍射分析结果表明,大北段以方解石胶结为主,胶结相对较强,克深段以白云石胶结为主,胶结相对较弱(图 2)。碳酸盐强胶结有利于保护岩石体积,但易导致岩石破裂。

4.2.3 纵向上有反深度压实效应

纵向上,针对岩性相似、弱胶结中—细砂岩(杂基≤5%,胶结物≤5%),埋深 5 500 m 以上的砂岩粒间体积保持在 20%~21%,埋深为 6 000~6 500 m(西段)与 6 500~7 000 m(东段)的砂岩粒间体积为 10%,埋深为 7 200~7 500 m 的砂岩粒间体积为 16%~17%,粒间体积不仅有随深度增加而减小的变化,也具有反深度的变化,反映压实效应不完全受深度控制(图 5)。研究区普遍发育超压,但过剩压力的变化并不能抵消垂向有效应力的增加趋势(图 6),因此,仅依据上覆地层垂向负载及超压发育难以对压实效应分布做出合理

表 1 库车前陆冲断带砂岩储层机械压实作用强度分类
Table1 Mechanical compaction grading of the sandstone reservoir in Kuqa foreland thrust belt

压实分类	颗粒接触类型比例/%	塑性岩屑变形情况	颗粒破裂情况	粒间体积峰值/%	代表构造
中等压实带	线接触比例大于 30%, 点接触大于 50%	软岩屑基本未变形, 云母弱弯曲变形	少见	20~22	吐北 2、克拉 2
中强压实带	线接触比例大于 50%, 点接触大于 30%	云母强弯曲变形 软岩屑弱变形	较常见	16~18	大北 3、克深 6、克深 13
强压实带	线接触比例大于 70%, 少量凹凸接触	软岩屑有较强的 弯曲变形	常见	10~12	克深 2、大北 1、大北 2

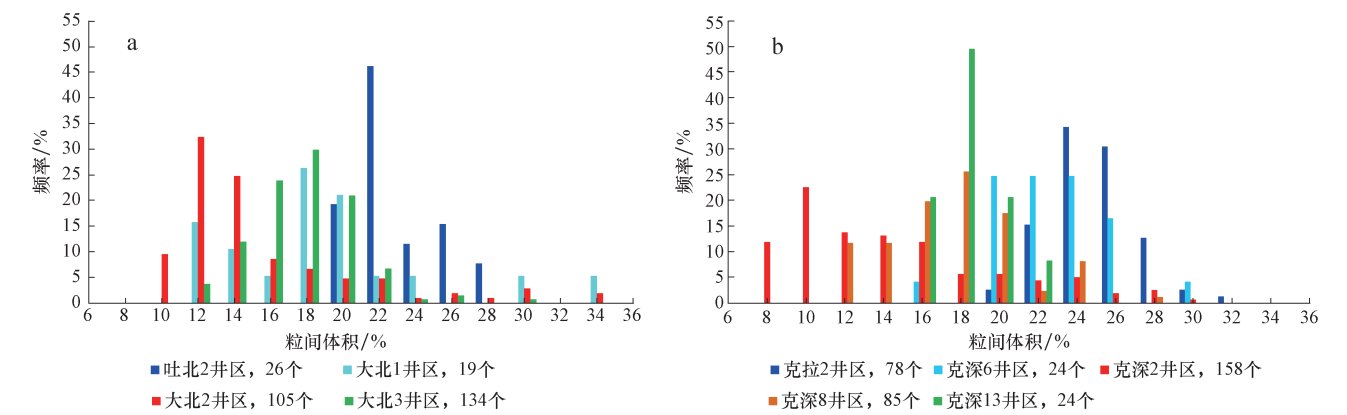


图 4 库车前陆冲断带白垩系储层砂岩粒间体积频率分布
Fig.4 Frequency distribution of intergranular volumes of the Cretaceous sandstone reservoirs in Kuqa foreland thrust belt
a. 吐北—大北地区;b. 克拉—克深地区

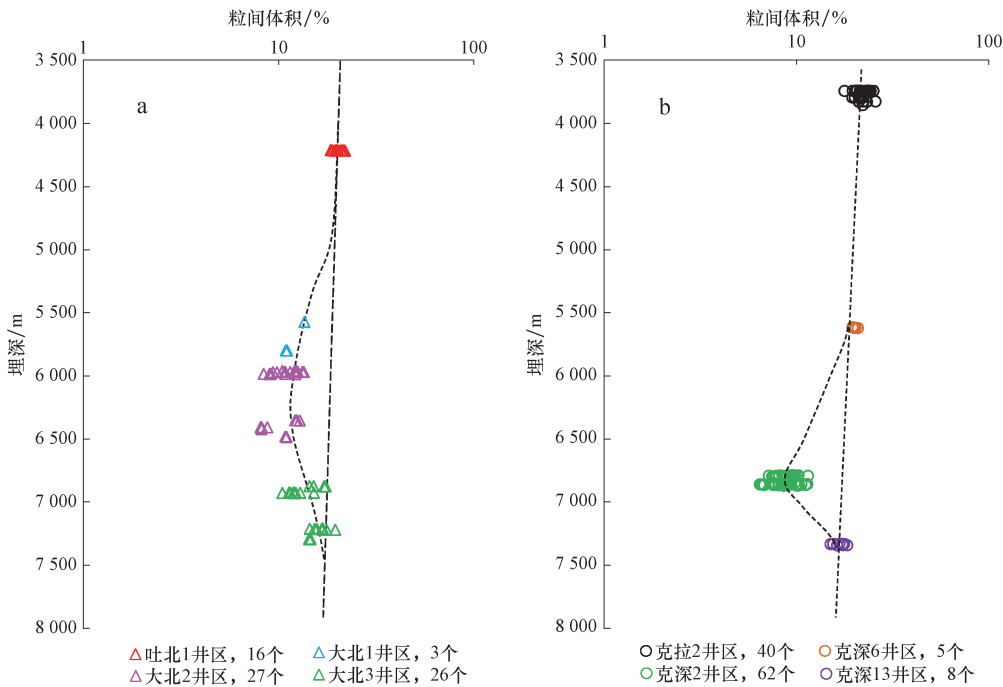


图 5 库车前陆冲断带白垩系巴什基奇克组砂岩粒间体积与深度关系

Fig. 5 Relationship between intergranular volumes and depth of the Cretaceous sandstone reservoirs in Kuqa foreland thrust belt
a. 吐北 - 大北地区; b. 克拉 - 克深地区

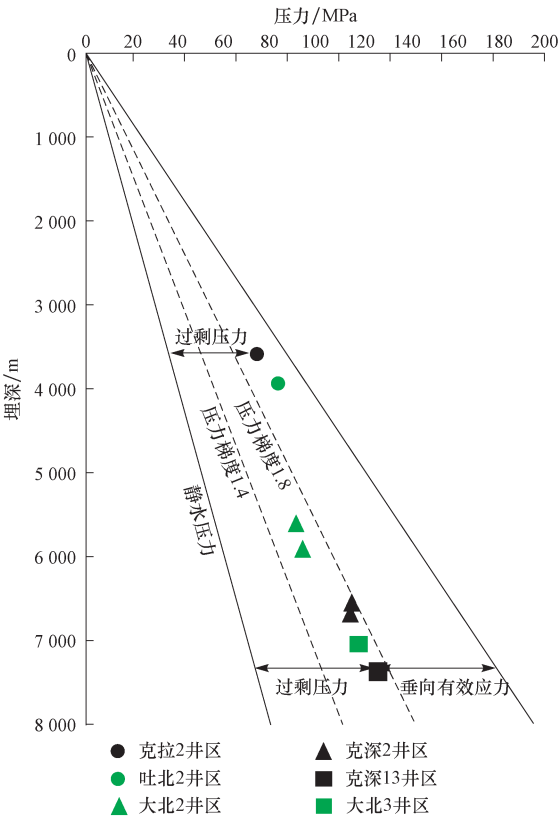


图 6 库车前陆冲断带白垩系储层地层压力

Fig. 6 Pore-fluid pressure of the Cretaceous sandstone reservoirs in Kuqa foreland thrust belt

的解释,压实分布可能受横向构造因素控制。而且,克拉苏大断裂下盘深层储层砂岩粒间体积的差值可达 7%~8%,说明砂岩体积损失并非在浅层就已经完成。

5 压实分异机制

砂岩的机械压实实际是在一定应力作用下岩石体积的收缩过程,其主要表现为岩石孔隙空间的缩小。因而,压实程度取决于岩石本身的可压缩性与作用于岩石骨架的有效应力^[11,16,31]。在沉积盆地中,砂岩岩石学特征、成岩作用及其所处的盆地动力环境制约着岩石可压缩性及有效应力的发育,进而控制着压实过程及相应砂岩粒间体积的变化。

5.1 岩石压缩性相关参数与压实分异的关系

一般来说,压缩性弱的砂岩压实程度高,砂岩的压缩性与砂岩成分、粒度、分选、胶结过程有关^[5,31-32]。研究区砂岩成分成熟度与粒间体积的关系显示(图 7a,b),粒间体积与砂岩成分成熟度不具正相关性。成分成熟度一致的砂岩粒间体积差异较大,甚至有的随成分成熟度增高反而变小。以上表明,成分成熟度的变化对研究区砂岩压实分异无可识别的影响。

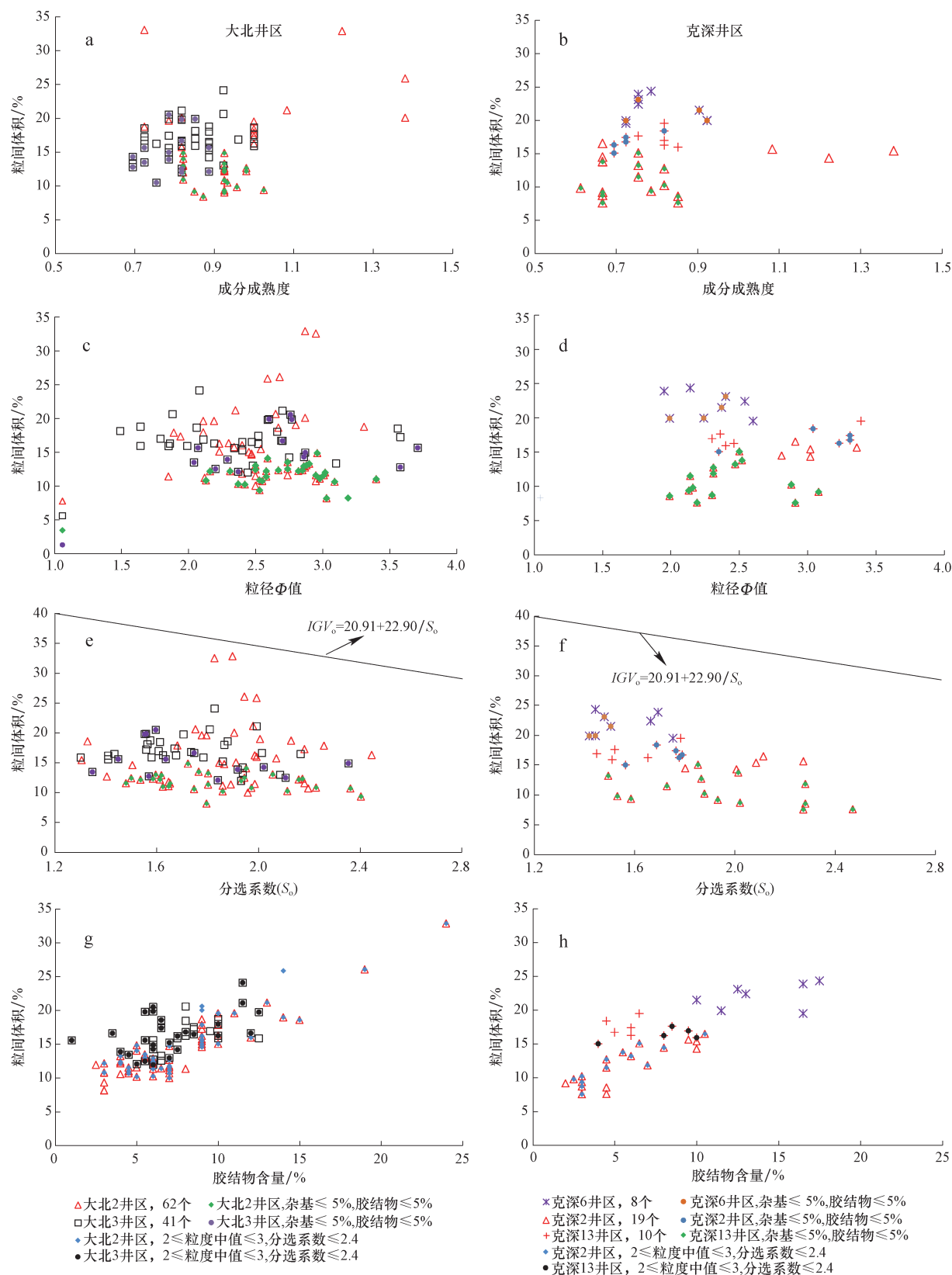


图7 库车前陆冲断带白垩系储层砂岩成分成熟度(a,b)、粒径(c,d)、分选系数(e,f)及胶结物含量(g,h)与砂岩粒间体积关系

Fig. 7 Relationship between compositional maturity(a,b), grain size(c,d), sorting(e,f), cements and intergranular volumes(g,h) of the Cretaceous sandstone reservoirs in Kuqa foreland thrust belt

研究区压实作用与粒径和岩石分选的关系相对密切。总体而言,粒径越粗,粒间体积越大,压实越弱。进一步观察发现,不同构造的砂岩粒径所造成的压实差异变化有一定的不同。对于中、细砂岩来说,压实越强的构造,粒间体积随粒径变化的幅度越弱(图7c,d)。这表明,随压实作用增强,中砂岩与细砂岩压实减孔量差值减小。由图7e、f可知,杂基少、弱胶结的情况下,同一构造砂岩粒间体积随砂岩分选系数的变化表现出“两头小,中间略大”的现象。当砂岩分选系数处于1.8~2.0时,砂岩粒间体积最大,当分选变好或变差,砂岩粒间体积均可能略有降低。这种现象是因为分选好的砂岩,初始粒间空间大,压实过程中损失了更多的孔隙空间,分选较差的砂岩初始空间小,可压缩空间小,压实减孔少。因而分选两端的砂岩粒间体积均较小。

胶结作用有助于提高岩石抗压能力,抑制压实,胶结程度与胶结时间均可能对砂岩压实过程产生重要影响^[2,31]。研究区砂岩样品的胶结物主要为碳酸盐(包括方解石、白云石),及少量的粘土、钠长石、硅质、硬石膏。统计显示,胶结程度与砂岩粒间体积关系呈较好的正相关性(图7g,h)。进一步分析发现,当胶结物含量大于15%~20%,不同构造砂岩粒间体积渐趋于一致,说明在这些胶结物形成以前,不同构造砂岩粒间体积损失相当,暗示不同构造砂岩的早期压实演化接近一致。当胶结物含量降低时,随胶结物含量降低,不同构造砂岩粒间体积逐渐分开,压实分异幅度逐渐增强,换言之,胶结程度越低,压实差异越大,表明胶结作用对砂岩压实过程具有明显抑制作用,也说明压实分异不完全受控于成岩胶结。比较东西向不同构造储层压

实差异,大北1、大北2地区胶结程度较强(图2),这可能会降低这些地区整体压实效应,这可能也是西段压实分异幅度低于东段的原因(图7g,h)。

5.2 有效应力演化与压实分异的关系

除与岩石压缩性相关外,压实程度还受有效应力演化控制,随有效应力增加,压实作用增强^[5,11]。研究区白垩系储层有效应力演化大体分为两个阶段:新近纪之前,盆地处于陆内拗陷阶段,有效应力由上覆地层垂向负载提供;新近纪以来(23.3~0 Ma),盆地处于再生前陆盆地发展阶段,岩石骨架承担的有效应力由上覆地层垂向负载及水平构造应力共同给予。研究区储层压实作用在南北向和深度上的变化规律主要与晚期构造挤压应力有关。

新近纪以前(23.3 Ma),研究区发生整体沉降,研究区南部埋藏速率略低于北部,东部埋藏速率略高于西部,最大埋深处于2 000~2 300 m(图8),一直未出现超压^[33],推测当时北部与东部储层压实程度略强,这与现今北部克拉地区压实弱的现象不符,说明该阶段之后可能才是研究区不同构造压实分异的关键时期。结合现今砂岩粒间体积大小(图5),该阶段结束时砂岩粒间体积还可达到20%以上,这为深埋阶段发生压实作用极为有利^[15-16]。

新近纪之后,研究区进入短时间快速埋藏阶段,水平构造应力增强,最大主应力逐渐转化为水平方向^[34-35]。利用离散元数值模拟^①的方法,分别模拟出了垂直有效应力及水平构造应力的变化情况。结果显示,库车沉积初期(5.3 MPa),研究区储层已达到深埋状态(图8),垂

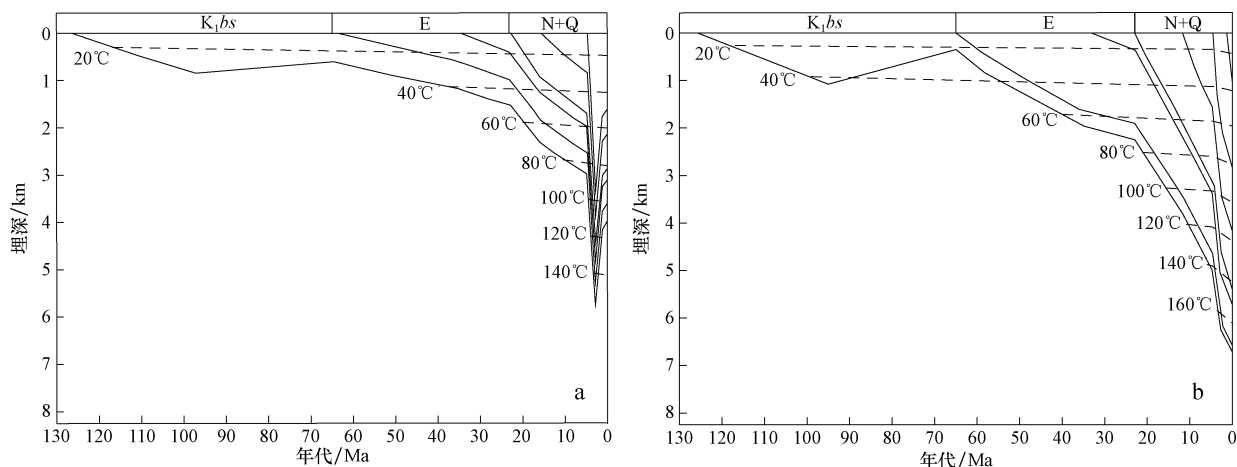


图8 库车前陆冲断带白垩系砂岩储层典型井埋藏史

Fig. 8 Burial history of the Cretaceous sandstone reservoirs in a typical well in Kuqa foreland thrust belt

a. 克拉2井埋藏史-热史; b. 克深2井埋藏史-热史

① 尹宏伟. 基于构造模拟实验的大北-克深三维区构造应力场及应变研究[R]. 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 2014.

直应力在平面上未有可识别的差异,而水平应力沿南北方向开始显示较明显的分异,离构造应力源较近的储层,应力值偏高。库车沉积期以后,克拉苏断裂上盘储层发生抬升(图8),储层构造应力降低,降低的原因可能与抬升变形过程中水平构造应力发生释放以及垂向应力降低等因素有关,而断裂下盘储层水平应力继续差异演化,结果是水平应力在南北方向上具有中-高-较高的变化特征,压实程度沿南北向中-强-较强的变化正是对此的响应。因此,构造挤压作用是控制储层南北向压实分异的主要原因。在构造挤压作用下,不同构造部位产生强烈的压实非均质性,逆冲抬升部位和逆冲前锋端压实强度相对较弱,可能发育较好的储层。

6 结论

1) 分选好、粒径较细的砂岩压实效应相对较强,但随压实作用增强,中砂岩与细砂岩压实减孔量差值减小。

2) 胶结作用抑制压实,保护储层。强胶结(胶结物含量>15%)砂岩压实分异较低,胶结程度较弱的(胶结物含量<15%)砂岩压实分异较强,随胶结程度降低,压实分异幅度增大。

3) 构造挤压作用对深层压实的影响很大,导致不同构造部位储层强烈的压实非均质性。逆冲抬升带和冲断带前锋压实相对较弱,发育较好的储层。

参 考 文 献

- [1] Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(6): 633-642.
- [2] Lundegard P D. Sandstone porosity loss—a “big picture” view of the importance of compaction[J]. Journal of Sedimentary Research, 1992, 62(2): 250-260.
- [3] 潘荣,朱筱敏,刘芬,等. 克拉苏冲断带白垩系储层成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 973-980.
Pan Rong, Zhu Xiaomin, Liu Fen, et al. Cretaceous diagenesis and its control on reservoir in Kelasu structure zone, Kuqa Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(5): 973-980.
- [4] 周林,陈波,凡睿,等. 川北地区须四段致密砂岩储层特征及成岩演化[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 543-550.
Zhou Lin, Chen Bo, Fan Rui, et al. Characteristics and diagenesis of tight sandstone reservoirs in the 4th member of Xujiahe Formation, northern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 543-550.
- [5] Pittman E D, Larese R E. Compaction of lithic sands: Experimental results and applications[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(8): 1279-1299.
- [6] 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[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.
- [7] Christine S, Quentin J F, Martin C, et al. Structural controls on mechanical compaction within sandstones: an example from the Apshe-ron Peninsula, Azerbaijan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(8): 1713-1724.
- [8] 李军,张超谟,李进福,等. 库车前陆盆地构造压实作用及其对储集层的影响[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 47-51.
Li Jun, Zhang Chaomo, Li Jinfu, et al. Tectonic compaction and its influence on reservoirs in the Kuqa foreland basin, Tarim[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 1-10.
- [9] Ramm M. porosity-depth trends in reservoir sandstone: theoretical models related to Jurassic sandstones, offshore, Norway[J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(5): 553-567.
- [10] Szabo J O, Paxton S T. Intergranular volume (IGV) decline curves for evaluating and predicting compaction and porosity loss in sandstones (abs.)[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(3): 678.
- [11] Lander R H, Walderhaug O. Predicting porosity through simulating sandstone compaction and quartz cementation[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(3): 433-449.
- [12] Paxton S T, Szabo J O, Ajdukiewicz J M, et al. Construction of an intergranular volume compaction curve for evaluating and predicting compaction and porosity loss in rigid-grain sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(12): 2047-2067.
- [13] Thomas R T, Melvyn R G, Lori A H, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [14] Bjørlykke K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins[J]. Sedimentary Geology, 2014, 301(1): 1-14.
- [15] Makowitz A, Milliken K L. Quantification of brittle deformation in burial compaction, Frio and Mt. Simons sandstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(6): 999-1013.
- [16] Makowitz A, Lander R H, Milliken K L. Diagenetic modeling to assess the relative timing of quartz cementation and brittle grain processes during compaction[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6): 873-885.
- [17] Fisher Q J, Casey M, Clennell M B. Mechanical compaction of deeply buried sandstones of the North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(7): 605-618.
- [18] Chuhan F A, Kjeldstad A, Bjørlykke K. Porosity loss in sand by grain crushing—experimental evidence and relevance to reservoir quality[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(1): 39-53.
- [19] 李忠,张丽娟,寿建峰,等. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性:以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2320-2330.
Li Zhong, Zhang Lijuan, Shou Jianfeng, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: A case study for the

- Kuqa subbasin in the northern Tarim basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2320–2330.
- [20] 韩登林, 赵睿哲, 李忠, 等. 不同动力学制约下的储层压实效应特征—以塔里木盆地库车坳陷白垩系储层研究为例[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 241–248.
- Han Denglin, Zhao Ruizhe, Li Zhong, et al. The characteristic of diagenetic compaction induced by multiform geodynamic mechanisms in reservoir; an example from Cretaceous sandstone reservoir in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 241–248.
- [21] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 153–166.
- Wang Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 153–166.
- [22] 贾承造, 宋岩, 魏国齐, 等. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 3–13.
- Jia Chengzao, Song Yan, Wei Guoqi, et al. Geological features and petroleum accumulation in the foreland basins in central and western China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 3–13.
- [23] 卓勤功, 李勇, 宋岩, 等. 库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 42–47.
- Zhuo Qingong, Li Yong, Song Yan, et al. Evolution of Paleogene saline deposits and effectiveness of traps in Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 42–47.
- [24] 刘建清, 赖兴运, 于炳松. 库车坳陷白垩系储层的形成环境及成因分析[J]. *现代地质*, 2004, 18(2): 249–255.
- Liu Jianqing, Lai xingyun, Yu Bingsong. Analysis for the sedimentary environment of Cretaceous strata and its causes of formation in the Kuqa Depression [J]. *Geoscience*, 2004, 18(2): 249–255.
- [25] 高志勇, 冯佳睿, 周川闽, 等. 干旱气候环境下季节性河流沉积特征—以库车河剖面下白垩统为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1061–1071.
- Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Zhou Chuanmin, et al. Arid climate seasonal rivers deposition; A case of Lower Cretaceous in Kuche river outcrop [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1060–1071.
- [26] 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集层特征[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 517–523.
- Gu Jiayu, Fang Hui, Jia Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sand body in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 517–523.
- [27] 毛亚昆, 钟大康, 能源, 等. 库车前陆冲断带白垩系储层流体包裹体特征与油气成藏[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(6): 1100–1109.
- Mao Yakun, Zhong Dakang, Neng Yuan, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbons accumulation of the Cretaceous reservoirs in Kuqa foreland thrust belt, Tarim basin, Northwest China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(6): 1100–1109.
- [28] 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 等. 塔里木盆地的热史[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 613–617.
- Li Huili, Qiu Nansheng, Jin Zhijun, et al. Geothermal history of Tarim basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 613–617.
- [29] 张荣虎, 张惠良, 寿建峰, 等. 库车坳陷大北地区下白垩统巴什奇克组储集层成因地质分析[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 Dabai area of the Kuqa Depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(3): 507–517.
- [30] Wilson J C, McBride E F. Compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura basin, California [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(6): 664–681.
- [31] Bloch S R, Lander H, Bonnell L M. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(2): 301–328.
- [32] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349–369.
- [33] 王震亮. 库车坳陷古流体动力与天然气成藏特征分析[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 28(6): 809–815.
- Wang Zhenliang. Analysis on paleo-hydrodynamic force and gas accumulation characteristics in the Kuqa Depression, the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 28(6): 809–815.
- [34] Zeng Lianbo, Tan Chengxuan, Zhang Mingli. Tectonic stress field and its effect on hydrocarbon migration and accumulation in Mesozoic and Cenozoic in Kuqa depression, Tarim basin [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 47(S. II): 114–124.
- [35] 张仲培, 王清晨, 王毅, 等. 库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示[J]. *地球科学*, 2006, 31(3): 309–316.
- Zhang Zhongpei, Wang Qingchen, Wang Yi, et al. 2006. Brittle structure sequence in the Kuqa Depression and its implications to the tectonic paleostress [J]. *Earth Science*, 31(3): 309–316.

(编辑 张亚雄)