

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-6-6

库车坳陷克拉苏冲断带深部巴什基奇克组致密储层孔隙演化定量研究

潘 荣^{1,2}, 朱筱敏^{1,2,*}, 谈明轩^{1,2}, 张剑锋^{1,2}, 李 勇³, 邸宏利³

1. 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

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油塔里木油田 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

PAN Rong^{1,2}, ZHU Xiaomin^{1,2,*}, TAN Mingxuan^{1,2}, ZHANG Jianfeng^{1,2}, LI Yong³, DI Hongli³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Institute of Exploration and Development, Tarim Oil Field, PetroChina, Korla 841000, China

PAN Rong, ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, et al. Quantitative research on porosity evolution of deep tight reservoir in the Bashijiqike Formation in Kelasu structure zone, Kuqa Depression. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 159-169

Abstract: Based on core observation, thin section identification, image analysis, analyses of thermal and burial histories of organic matters, analyzes of dehydration of gypsum bed and clay mineral transformation, and other technical methods, quantitative studies on porosity evolution were conducted in the deep tight reservoir in the Bashijiqike Formation in Keshen area, Kelasu structure zone, Kuqa Depression. The results show that the buried diagenetic sequences mainly experienced sequentially from clay coasting to early-stage shallow buried and slowly compaction, followed by dissolution of feldspars and rock fragments, secondary growth of quartz, early calcite cementation, middle-stage rapidly buried and strong compaction, dissolution of carbonate cement, tight carbonate cementation, and finally late-stage fissures created by compression and thrusting to enlarged fissures formed by dissolution. Each key factor in the reservoir porosity evolution was quantitatively characterized on the basis of current reservoir composition and pore structure (the initial porosity was found to be 37.87%; porosity losses were 27.62% and 7.51% due to compaction and cementation, respectively, porosity increases were 1.7% and 1.32% due to dissolution and fracturing, respectively). In addition, the quantitative controls on the evolution of reservoir physical properties in different geological periods and diagenesis types were studied to recover the actual porosity evolutionary history constrained by buried diagenetic evolution. It is concluded that the influences from different types of diagenesis on porosity varied greatly, however, the tendency of porosity decreasing was unavoidable. The late-stage hydrocarbon accumulation in the Bashijiqike Formation with relatively high porosity (6.2%) was well matched with fissures formed by regional compression. Therefore, the deep tight reservoir was beneficial for hydrocarbon accumulation, making it a favorable exploration target in Keshen area.

Key words: diagenetic evolution; tight reservoir; porosity evolution; Bashijiqike Formation; Kelasu structure zone

摘 要:综合利用岩心观察、普通薄片、铸体薄片鉴定观察、图像分析、埋藏演化史与有机质热史演化分析,膏盐层脱水及黏土矿物转化分析等技术方法,对库车坳陷克拉苏冲断带克深区块深部巴什基奇克组致密储层进行了孔隙演化定量研究。这套致密储层主要经历了“黏土膜→早期缓慢浅埋压实作用→长石、岩屑溶蚀和

收稿日期:2017-03-12;修回日期:2017-06-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2011CB201104);国家油气重大专项(2011ZX05001-002);国家自然科学基金项目(41272133)

作者简介:潘 荣(1985—),女,博士,主要从事储层地质学研究。E-mail:rongfenxiang@163.com

* 通讯作者简介:朱筱敏(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事沉积学和层序地层学教学研究。E-mail:xmzhu@cup.edu.cn

石英加大→早期方解石胶结→中期快速深埋强烈压实作用→长石、碳酸盐胶结物溶蚀→碳酸盐致密胶结→晚期挤压推覆形成裂缝→裂缝溶蚀扩大”的埋藏-成岩演化过程。以孔隙结构特征为基础,定量计算各关键成岩作用对储集空间的影响量(初始孔隙度为 37.87%,压实损孔量为 27.62%,胶结损孔量为 7.51%,溶蚀增孔量为 1.7%,裂缝增孔量为 1.32%),并以埋藏-成岩演化史为主线及约束,恢复校正不同历史时期不同成岩作用对储层物性演化的控制量,从而恢复储层实际孔隙演化史。研究表明,不同成岩作用对储集层孔隙度的影响量不同,孔隙度整体变化趋势为逐渐减小。克深区块晚期气藏充注时期与区域构造挤压造缝时期配置良好,结合较好的储层孔隙度(6.2%),有利于烃类充注成藏,形成有利勘探目标。

关键词:成岩演化;致密储层;孔隙度演化;巴什基奇克组;克拉苏冲断带

中图分类号:TE122.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)02-0159-11

0 引言

碎屑岩储层中孔隙的发育与保存研究是储层地质学中研究的重要内容,对储层孔隙度演化的定量评估及现今孔隙度的预测也成为地质学家们研究的热点。Wyllie 等^[1-2]基于地震资料根据地震得到层速度估算储层孔隙度,用时间平均公式表达孔隙度与速度关系,但关系式中地震速度仅考虑了地震波穿过的液体和固体的相对容量,忽略如骨架颗粒弹性常数、颗粒密度、温度等因素,其估算孔隙度值相对于岩心实测孔隙度的标准偏差大于 10%^[1-3]。国外基于实际地质资料对孔隙度的估算的研究成果主要集中在 20 世纪 80 年代。Scherer^[3]利用岩心资料分析岩石压实过程中影响砂岩孔隙度的 13 种参数,认为影响砂岩孔隙度的主要参数为年代、骨架矿物(碎屑石英含量)、最大埋深及分选系数,并提出了孔隙度的预测模型(模型适用于三百万年以上、很少或无胶结、没有淋滤作用、埋深大于 500 m、没有或很小剪切应力的砂岩)^[3]。Houseknecht^[4]建立了评价压实作用和胶结作用对砂岩孔隙度影响的图版,被广泛应用至今。Schmoker 等^[5]通过成岩场的角度建立了砂岩孔隙度与热成熟度之间的幂函数关系式。国内学者也对碎屑岩储层孔隙度演化研究做过大量工作^[6-13],其主要可分为两类,一类为成岩过程评估,另一类为成岩效应评估。成岩过程评估主要是基于大量薄片观察,分析主要成岩作用类型,统计镜下自生矿物、胶结物、溶蚀孔隙等含量,估算各主要成岩作用对孔隙度的影响量。这种方法将各成岩作用对孔隙度的影响孤立起来,假设成岩作用分阶段进行,其估算结果较为粗略;成岩效应评估关注重点为各成岩作用对储层的综合效应,基于大量孔隙度实测数据,分析其与埋藏深度、温度、镜质体反射率等地质参数关系,总结规律,求取函数关系模型,

这些模型主要侧重于对现今储层孔隙度的预测。在实际油气勘探过程中,更为关注的是了解储层孔隙度在地质演化过程中的变化规律,明确各种成藏要素的配置关系。塔里木盆地克拉苏地区深层巴什基奇克组碎屑岩近年来的勘探已取得巨大的经济效益,对这套具有“构造背景复杂、埋深大、特低孔特低渗”特点的碎屑岩储层进行孔隙演化史研究及成藏特征研究,对该地区的油气勘探具有重要的意义。在前人工作基础上,笔者尝试以孔隙结构特征为基础,定量计算各关键成岩作用对孔隙度的影响量,并以埋藏-成岩演化史为主线及约束,恢复校正不同地质历史时期不同成岩作用对孔隙度的控制量,确定不同地质时期储层孔隙度,并结合油气成藏史分析评价储集层有效性,对研究区的油气勘探开发提供科学依据。

1 区域地质背景

克拉苏冲断带位于库车坳陷北部,是目前库车坳陷油气最富集的构造带之一(图 1)。区内高角度断穿基底的克拉苏断裂将克拉苏冲断带南北分带,断裂以北包括克拉区块、吐北区块;断裂以南包括克深区块及大北区块。本次研究以白垩系巴什基奇克组主力勘探层系为研究对象,以目的层埋深最深的克深区块为研究区块。巴什基奇克组为研究区内广泛分布的、厚数百米的一套三角洲砂体^[14-16],其自下而上可分为 3 个岩性段,下部第三段以砂砾岩及含砾砂岩为主,中部第二段以中厚层细砂岩、中粗砂岩夹薄层状泥岩为主,上部第一段主要以厚层细砂岩为主。三叠系的湖相泥岩及侏罗系的煤系地层为库车坳陷主力生油层系^[17],白垩系砂体上覆广泛分布的古近系膏盐层则可作为全区优质盖层^[18],优质的生储盖组合使得克拉苏冲断带蕴含巨大资源潜力。

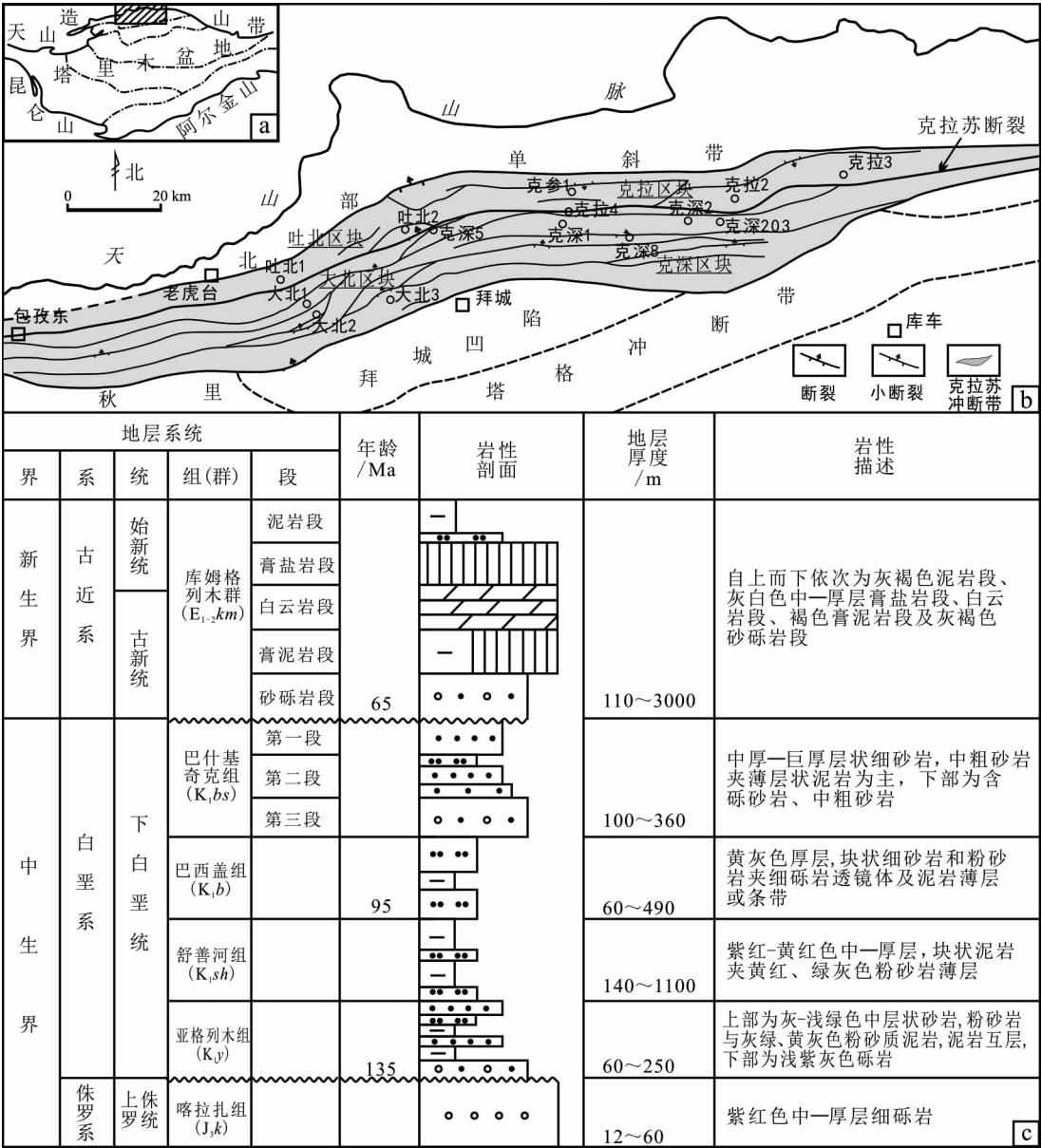


图 1 库车坳陷克拉苏冲断带位置(a)、断裂分布图(b)及白垩系地层综合图(c)
Fig. 1 Location of the study area(a), distribution of faults(b) and Cretaceous stratigraphic column(c) in the Kela Su structure zone, Kuqa Depression

2 巴什基奇克组储集层特征

克深区块巴什基奇克组储层埋深约为 6 500~8 000 m,沉积厚度约 300 余 m,由于埋藏深度大,大部分并未钻穿巴什基奇克组。巴什基奇克组沉积早期(第三段),北部天山已隆升,盆地古地形为北高南低,南天山山口多物源供给,河流携带大量碎屑物质迅速入湖沉积,形成以冲积扇-扇三角洲为主的粒度偏粗(砂砾岩、含砾砂岩)的碎屑岩沉积砂体。巴

什基奇克组沉积中晚期(第二段、第一段),构造沉降活动趋于停止,湖平面上升,岸线后退,辫状河河道显现,沉积物粒度变细,形成了平面上多期辫状河三角洲扇体相连,垂向上多期砂体叠置的辫状河三角洲沉积砂体。

岩心观察和薄片鉴定结果表明,克深区块白垩系巴什基奇克组砂岩以岩屑质长石砂岩为主,其次为长石质岩屑砂岩(图 2a)。颗粒中石英含量为 30%~58%,平均值为 48%;长石含量为 12%~47%,平均值为 29%;岩屑含量为 10%~40%,平均值为

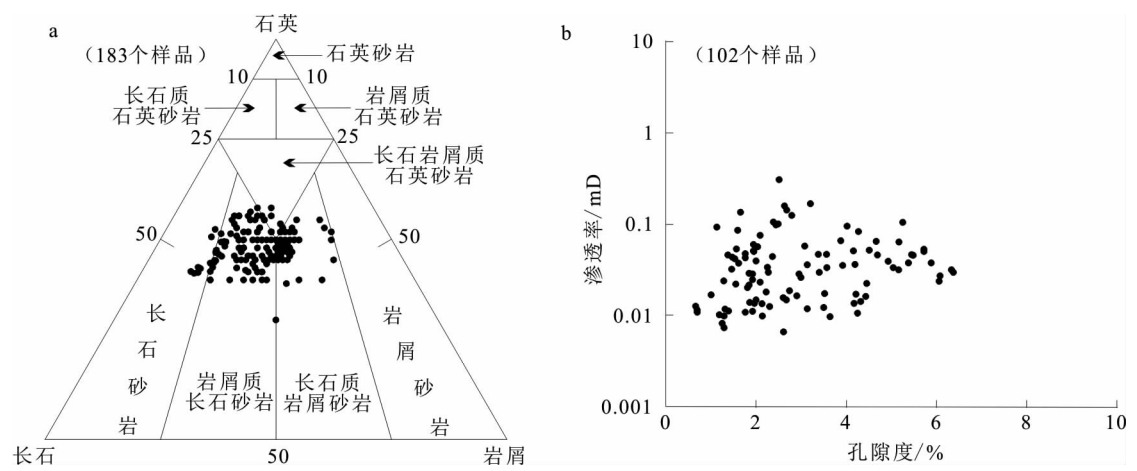


图2 克拉苏冲断带克深区块巴什基奇克组储层砂岩分类图(a)及孔隙度和渗透率分布图(b)
Fig.2 Classification plot of sandstones (a) and relationship between porosities and permeabilities(b) of the Bashijiqike Formation in Keshen area, Kelasu structure zone

23%，主要为变质岩岩屑，多为石英岩、片岩及千枚岩岩屑等；胶结物平均含量约为7.3%，胶结物类型以碳酸盐为主，胶结方式以孔隙式为主。储集层分选中等-好，磨圆以次棱角、次棱角-次圆状为主，碎屑颗粒间可见线接触-凹凸接触。总体上这套储集体具有成分成熟度较低、结构成熟度中等-偏低、成岩作用强的特征。

储层储集空间以次生孔隙为主，主要为溶蚀孔及裂缝，也可见少量原生孔隙。岩心物性分析结果表明：巴什基奇克组第一段岩样孔隙度为1.81%~6.37%，平均孔隙度为4.51%，渗透率为0.01~0.11 mD，平均渗透率为0.04 mD；巴什基奇克组第二段岩样孔隙度为0.65%~5.72%，平均孔隙度为2.39%，渗透率为0.007~0.31 mD，平均渗透率为0.05 mD；目的层第三段埋深大，暂无取心资料。储层孔隙度和渗透率相关性较差(图2b)，表明储层基质的渗透性和连通性偏差。根据胡文瑞^[19]对储层类型和低渗透储层的划分特点，巴什基奇克组储层为典型的特低孔-特低渗透储层。

3 储集层埋藏-成岩演化史

储集层原始沉积条件为储层形成提供了物质基础，在其经历了地质埋藏-成岩演化过程后，现今孔隙结构特征是不同的埋藏方式、多重成岩作用共同改造而保存下来的结果。不同埋藏地史时期发生的不同成岩作用影响控制着储集层储集空间的演化配置。进行储集层孔隙度演化的定量研究，首先需结

合地层埋藏热史，还原储层成岩作用时空属性，明确各主要成岩作用发生的先后顺序，求取各主要成岩作用对孔隙度演化的影响量。本论文基于成岩作用类型及特征分析，结合地层埋藏演化史和有机质演化史等分析，认为克拉苏冲断带深部巴什基奇克组储集层经历了“黏土膜→早期缓慢浅埋压实作用→长石、岩屑溶蚀和石英加大→早期方解石胶结→中期快速深埋强烈压实作用→长石、碳酸盐胶结物溶蚀→碳酸盐致密胶结→晚期挤压推覆形成裂缝→裂缝溶蚀扩大”的埋藏-成岩演化过程(图3,图4)。目前巴什基奇克组储层主要处于中成岩A—B期。

巴什基奇克组储层埋藏演化可划分为3个阶段：早期缓慢浅埋(埋深小于2 200 m，埋藏速率约为14~21 m/Ma)、中期快速深埋(埋深大于6 500 m，埋藏速率约为210~243 m/Ma)和晚期推覆调整。

距今约130~98.7 Ma，储集层沉积环境为干旱炎热半咸水^[20]。成岩阶段早期，孔隙水新生沉淀黏土膜发育，主要表现为以片状伊利石为主的原生式薄膜(图4a)和丝网状伊/蒙混层为主的自生式薄膜。研究区目的层扫描电镜分析结果表明：砂岩中黏土矿物主要类型为伊/蒙混层及伊利石；电镜下伊/蒙混层呈舌状、丝网状，由颗粒表面向孔隙方向延伸；伊利石表现为片状或弯曲片状，晶形不太完整，略具有定向性。早成岩阶段的压实作用导致砂岩颗粒间紧密排列，具有颗粒定向、云母及塑性岩屑变形(图4b、4c)等特征。

距今约98.7~65.6 Ma，白垩纪末期研究区整体构造抬升，克深区块巴什基奇克组长期(时长约

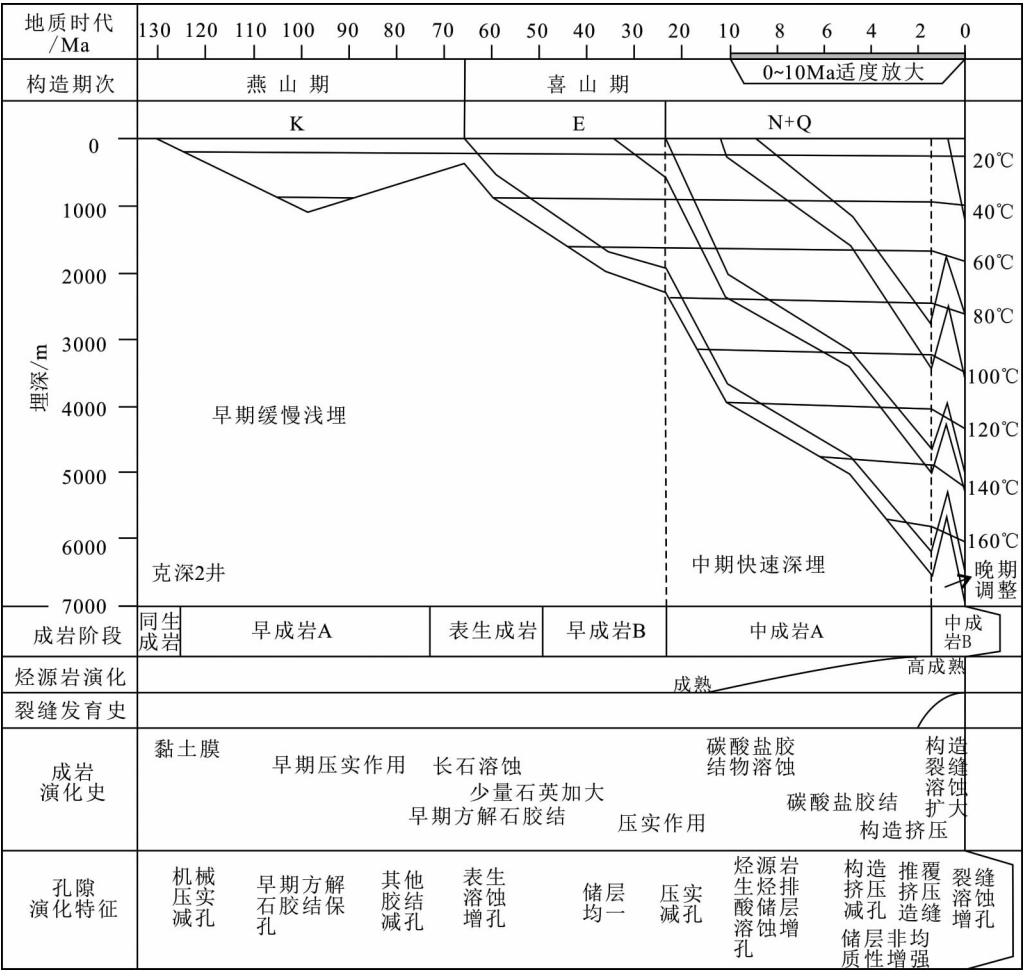


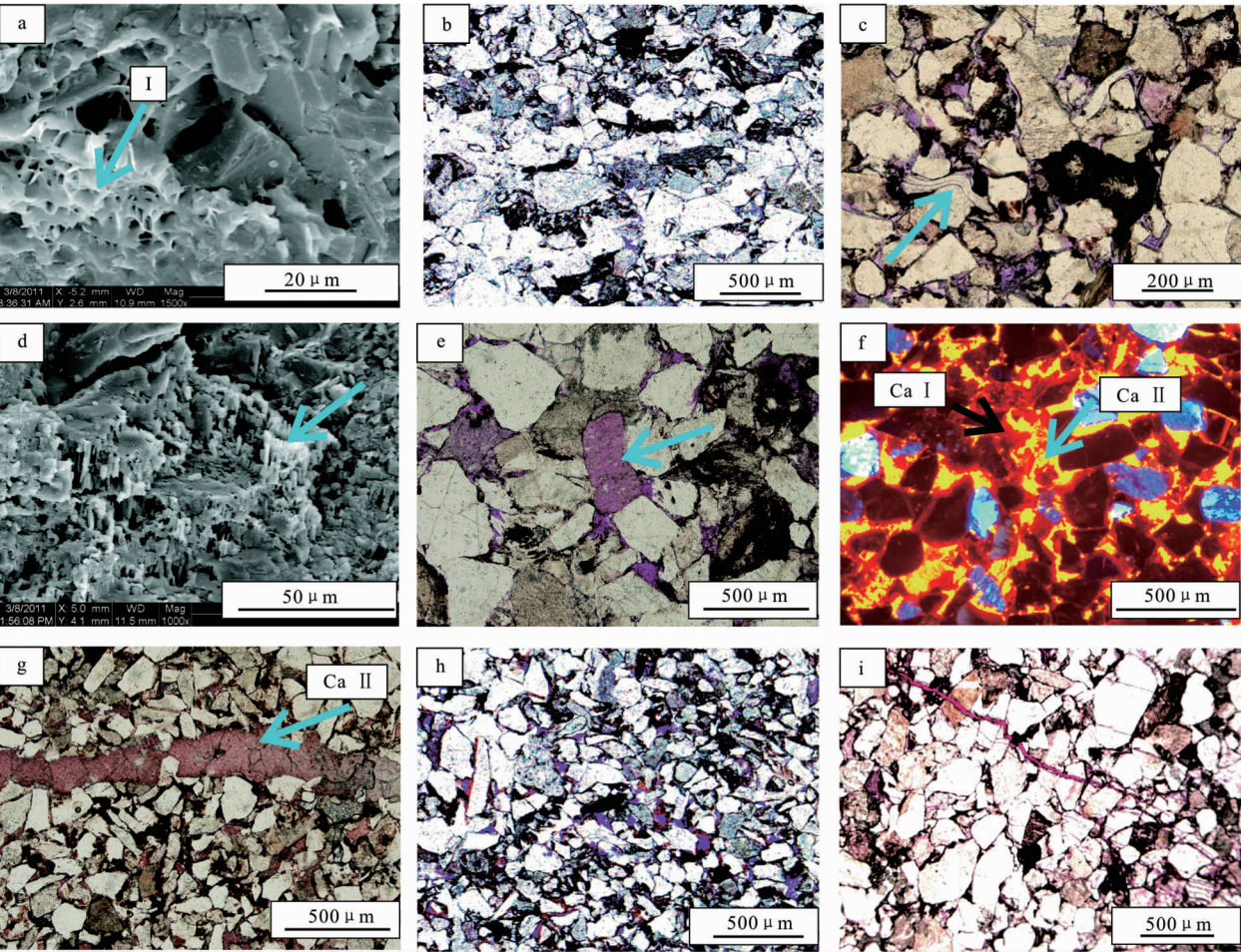
图 3 克拉苏冲断带克深区块巴什基奇克组储层埋藏-成岩演化史及孔隙演化特征

Fig. 3 Burial history, diagenetic paragenesis and pore evolution feature of the Bashiijiike Formation in Keshen area, Kelasu structure zone

33 Ma)暴露地表,部分井巴什基奇克组顶部遭受剥蚀,大气水沿区域不整合面、风化裂缝、砂体渗入地下对储层产生淋滤溶蚀作用^[21],储集层中不稳定颗粒(长石、岩屑)被溶蚀(图 4d、4e),形成粒内溶孔、粒缘溶孔等有效储集空间。早期成岩作用还包括碳酸盐胶结作用,研究区内碳酸盐胶结可分为两期,早期以方解石为主,晶形呈微晶-粉晶结构,晶粒较小,也可见颗粒状,可直接由原生沉积物孔隙水中碳酸盐物质过饱和沉淀形成,也可由表生成岩阶段斜长石岩屑溶蚀提供。早期碳酸盐胶结物(Ca I)在镜下可具体表现为基底式胶结或呈环带状结构分布在碎屑颗粒周围生长,环带状碳酸盐胶结物阴极发光呈橘红色(图 4f),碎屑颗粒之间接触关系呈不接触或点接触,颗粒呈漂浮状,说明这种赋存状态的碳酸盐胶结物形成于有效压实作用发生前较早的成岩阶段^[22]。

距今约 65.6~23 Ma,早期缓慢浅埋末期,巴什基奇克组储层地层温度小于 80℃,储集层成岩作用以黏土矿物脱水转化和压实作用为主。随着埋深增加,颗粒之间接触点压力逐渐增大,当压力超过正常孔隙流体压力时,发生压溶作用,镜下可见早期石英次生加大现象(图 4h)。

距今约 23~1.64 Ma,巴什基奇克组储层进入中期快速深埋阶段,埋深愈大,压实作用愈强,颗粒接触愈加紧密,接触关系由漂浮向点接触、线接触,甚至局部凹凸接触过渡。储层达到中成岩 A 演化阶段,地层温度达 80℃以上,储集层砂岩中高岭石向伊利石大量转化。在这一埋藏阶段,研究区内烃源岩依次成熟生烃。距今约 16 Ma,北部冲断带深层三叠系湖相烃源岩首先进入成熟生油阶段,侏罗系煤系烃源岩处于未熟-低熟阶段;随后距今约 5 Ma,区内两套烃源岩普遍达到成熟阶段,烃源岩大量排



a—克深 201 井,6 511.16 m,扫描电镜,粒间充填片状伊利石;b—克深 202 井,6 855.55 m,铸体薄片,长石颗粒定向排列,胶结致密,红色铸体,单偏光;c—克深 207 井,6 795.35 m,铸体薄片,云母被压弯变形,还可见粒间溶孔,红色铸体,单偏光;d—克深 201 井,6 707.45 m,扫描电镜,长石溶蚀;e—克深 207 井,6 798 m,铸体薄片,溶蚀孔隙,铸模孔,红色铸体,单偏光;f—克深 202 井,6 766.7 m,阴极发光,两期方解石胶结;g—克深 202 井,6 766.01 m,铸体薄片,裂缝被晚期方解石(染色)充填,单偏光;h—克深 202 井,6 797.04 m,铸体薄片,石英次生加大,可见少量剩余原生粒间孔及粒间溶孔,红色铸体,单偏光;i—克深 1 井,6 930 m,铸体薄片,见构造裂缝,方解石致密胶结,石英加大,红色铸体,单偏光。

图 4 克拉苏冲断带克深区块巴什基奇组储集层显微特征

Fig. 4 Microscopic reservoir characteristics of the Bashijiqike Formation in Keshen area, Kelasu structure zone

烃,形成研究区重要的凝析气藏^[23];距今约 1.64 Ma,两套烃源岩达到过成熟阶段,形成高成熟的凝析气藏和过成熟干气气藏^[23]。当地层温度为 80~120 ℃ 时,有机酸生成并大量保存^[24],此时成岩环境主要为酸性,成岩作用以长石(镜下可见长石颗粒沿裂缝、节理缝溶蚀)、岩屑等颗粒矿物溶蚀及早期碳酸盐胶结物溶蚀为主。随着埋藏深度进一步增加,地层温度大于 120 ℃,羧酸阴离子热脱羧,有机酸浓度降低,同时,上覆库姆格列木群膏盐层大量脱水,提供丰富的钙、钾、钠等阳离子,地层发生晚期方解石、铁方解石、白云石等沉淀。晚期碳酸盐胶结物(Ca II)主要以晶粒状、连晶状方解石产出(图 4f、4g),充填孔隙或是裂缝,破坏储层物性,储层砂岩脆性增加。

有学者对这套晚期碳酸盐胶结物的碳氧同位素进行研究^[25],其碳同位素为-3.78‰~-2.45‰,平均为-3.10‰,氧同位素一般为-16.428‰~-13.94‰,平均为-15.29‰,具体数据见参考文献[25]。总体来说,裂缝内晚期碳酸盐胶结物的碳、氧同位素之间表现为正相关关系,表明碳同位素所指示的成岩流体中碳来源和氧同位素反映胶结物结晶时温度关系之间是有联系的。利用 Keith 和 Weber^[26]提出的经验公式无量纲 Z 值可粗略判断这套晚期碳酸盐胶结物成岩过程中孔隙水的性质,即: $Z = 2.048(\delta^{13}C + 50) + 0.498(\delta^{18}O + 50)$ (PDB)。计算结果显示这批样品的 Z 值均小于 120(平均值为 113)(图 5a),表明为矿化度高的陆相淡水来源且形成胶结物的孔

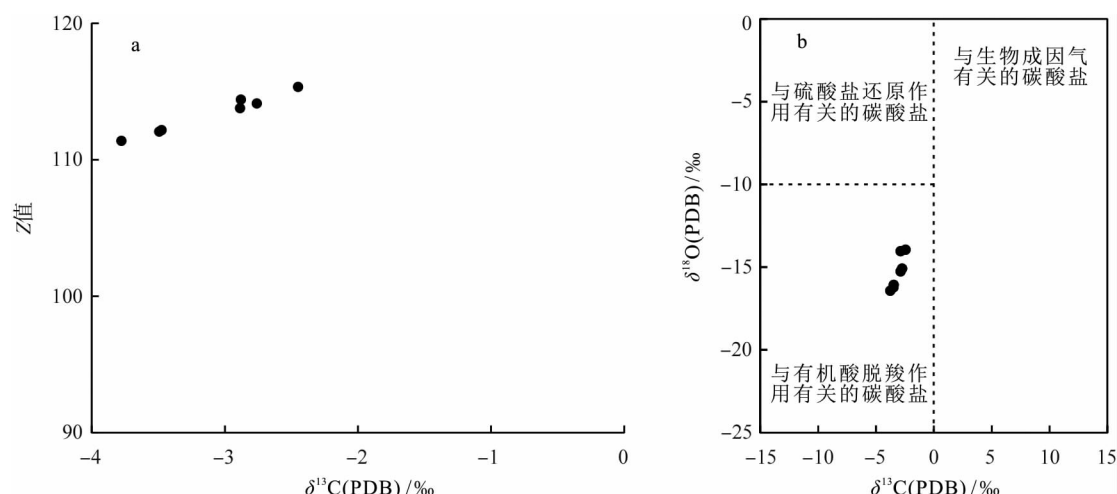


图5 克拉苏冲断带巴什基奇克组晚期碳酸盐胶结物碳氧同位素特征
(b底图据文献[29]修改)

Fig. 5 Features of carbon and oxygen isotopes in the later-stage carbonate cement in the Bashijiqi Formation in Kelasu structure zone

隙流体与沉积物在沉降时保存的大气降水关系密切。自然界大气水中溶解的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -7‰ , 湖相原生碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-2\text{‰} \sim -6\text{‰}$ [27], 研究区内样品碳同位素偏轻, 平均值为 -3.10‰ , 因而一定有外部轻碳源的加入。据 Irwin 等 [28] 的研究, 在成岩过程中, 埋深大于 1 000 m 时, 由于干酪根降解过程中形成的有机酸加入, 生产的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-10\text{‰} \sim -20\text{‰}$ 。因此可以判定, 研究区这套晚期碳酸盐胶结物的形成与有机酸脱羧作用密切相关(图 5b) [29]。

当地层温度大于 $150\text{ }^\circ\text{C}$, 膏盐层脱水趋于稳定。克拉苏冲断带自新近纪以来(距今约 23 Ma), 由于受喜马拉雅运动的影响, 南天山造山带向塔里木盆地发生强烈逆冲, 库车坳陷受到强烈挤压 [15, 30], 特别是 2 Ma 以来的挤压推覆运动, 使得储层裂缝发育。裂缝是深部致密砂岩储层的重要储集空间, 同时也为后期流体贯入进行化学淋滤作用和水岩矿化作用提供了良好通道(图 4i)。孔隙水通过裂缝进入储集层, 并对裂缝进行溶蚀扩大, 有效提高储层物性。

距今约 1.64 Ma 至今, 巴什基奇克组储集层再次经历了构造抬升-沉降调整, 最终埋深超过 6 500 m。

4 储集层孔隙度演化定量研究

沉积物固结成岩后, 其储集空间的再分配主要受成岩作用控制。为了合理恢复储集层孔隙演化过程, 需定量评价不同成岩作用对孔隙的影响量(生成

量和损失量)。首先利用岩石薄片、铸体薄片(现今镜下孔隙特征及组合)、岩心物性分析等基础资料及计算机图像分析技术, 定量计算压实作用、胶结作用、溶蚀作用、破裂作用对储层孔隙度的总影响量, 即定量计算初始孔隙度(Φ_0)、压实损孔孔隙度(Φ_1)、胶结损孔孔隙度(Φ_2)、溶蚀增孔孔隙度(Φ_3)及裂缝增孔孔隙度(Φ_4)共 5 个参数; 继而以成岩作用类型及成岩演化序列为约束, 综合考虑实际地质环境和埋藏史, 根据一定规则对四大成岩作用对储层孔隙总影响量参数进行回溯校正, 合理恢复时间轴上不同成岩作用对储层的影响, 从而恢复实际孔隙演化过程。

4.1 不同成岩作用改造孔隙度的计算方法

初始孔隙度(Φ_0)可采用 Beard 和 Weyl [31] 于 1973 年提出对不同分选的储集砂岩的初始孔隙度计算关系式来恢复。评价压实作用对原生粒间孔隙的破坏程度可计算压实后剩余粒间孔隙度($\Phi_{\text{压后}}$), 现存孔隙中原生粒间孔(φ_1)、粒间石英长石充填残留孔(φ_2)、现今胶结物所占孔隙(φ_3)及粒间(胶结物)溶孔(φ_4)均属于压实后剩余粒间孔隙空间的部分。储层经历压实作用、胶结作用后的剩余粒间孔隙度($\Phi_{\text{胶后}}$), 即为现存孔隙中原生粒间孔隙和粒间石英长石充填残留孔隙空间所具有的孔隙度。溶蚀孔隙度(Φ_3), 即为次生溶蚀孔隙空间所具有的孔隙度, 包括粒间溶孔(φ_4)、粒内溶孔(φ_5)、粒缘溶孔(φ_6)及铸模孔(φ_7)。裂缝孔隙度(Φ_4), 即由于构造应力作用使得储集层发生破裂形成裂缝空间(φ_8)及

成岩收缩缝(φ_9)所具有的孔隙度,在此,我们将储层中的微孔隙(φ_{10})及溶蚀缝(φ_{11})也算入其中。因铸体薄片所估算的各类孔隙百分含量均为面孔率,本文采用其所占总面孔率($\varphi_{\text{总}}$)百分比与现今孔隙度($\Phi_{\text{现}}$)相乘进行换算。据此可以确定孔隙度随时间变化的演化基线(图 6a 中黑实线)。

具体计算公式如下:

$$\Phi_0=20.91+22.90/S_0$$

(1)

其中, S_0 为特拉斯克(Trask)分选系数, $S_0=(D_3/D_1)^{1/2}$, $D_1=2^{-\varphi_{75}}$, $D_3=2^{-\varphi_{25}}$,即粒度累计曲线上颗粒含量 25%和 75%处所对应的颗粒直径之比的平方根。

$$\Phi_1=\Phi_0-\Phi_{\text{压后}}=\Phi_0-[\varphi_3+(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_4)/\varphi_{\text{总}}\times\Phi_{\text{现}}]$$

(2)

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \Phi_0 - \Phi_{\text{压后}} - \Phi_{\text{胶后}} \\ &= \Phi_0 - \Phi_{\text{压后}} - (\varphi_1 + \varphi_2) / \varphi_{\text{总}} \times \Phi_{\text{现}}\end{aligned}$$

(3)

$$\Phi_3 = (\varphi_4 + \varphi_5 + \varphi_6 + \varphi_7) / \varphi_{\text{总}} \times \Phi_{\text{现}}$$

(4)

$$\Phi_4 = (\varphi_8 + \varphi_9 + \varphi_{10} + \varphi_{11}) / \varphi_{\text{总}} \times \Phi_{\text{现}}$$

(5)

最终计算的初始孔隙度及成岩作用对孔隙的影响量参数值为: Φ_0 37.87%; Φ_1 27.62%; Φ_2 7.51%; Φ_3 1.7%; Φ_4 1.32%。

4.2 时间轴上不同成岩作用孔隙改造量的恢复

前人研究表明,正常压实条件下孔隙度与埋深存在指数关系^[32],而埋藏时间也是影响压实效应的重要参数之一^[33]。Sombra 和 Chang^[34] 提出“时间深度指数”概念,即埋藏史曲线与深度轴和时间轴所组成面积的大小,其不仅能够反映出埋藏时期内储层埋深的演化,也反映了埋藏过程中储层所经历的温度和压力的变化,以定量的形式揭示埋藏方式差异对储层压实效应的影响^[34-35]。因此可基于埋藏史图,以不同埋藏阶段的埋深与时间乘积的比率,决定每阶段压实减孔效应的量。考虑到不同埋藏时期,压实减孔效应应有差异,随着埋深加大,压实作用越来越强,因此选用埋藏因子(α)修正不同埋藏时期压实

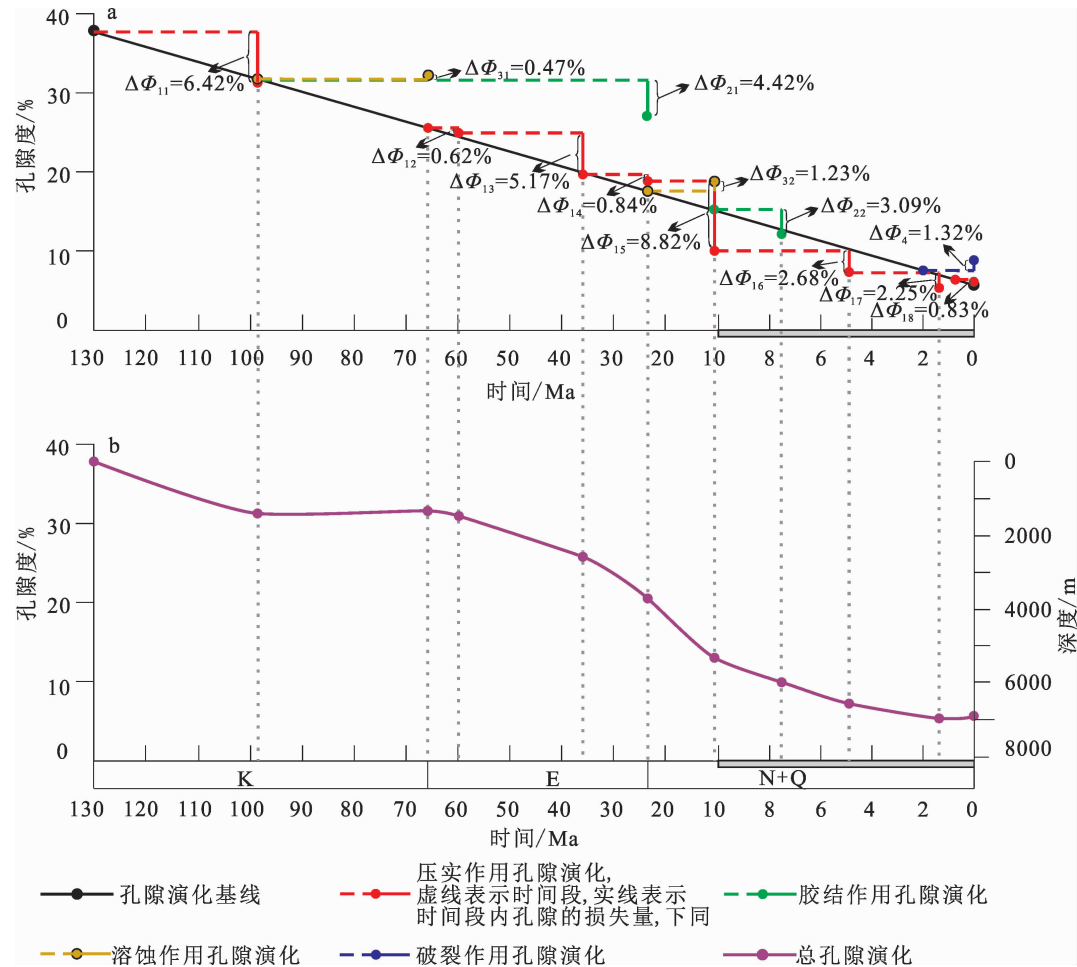


图 6 克拉苏冲断带巴什基奇克组储层孔隙度演化曲线综合图
Fig. 6 Porosity evolution curve of the Bashijiqike Formation in Kelasu structure zone

减孔量。克拉苏冲断带巴什基奇克组储层经历了8次沉降,每次沉降减孔比率算法为

$$C_i = \frac{\Delta H_i \Delta T_i \alpha}{\sum_{i=1}^8 \Delta H_i \Delta T_i \alpha} (i=1,2,\dots,8) \quad (6)$$

其中, C_i 为第*i*次沉降减孔比率, ΔH_i 为第*i*次沉降深度, ΔT_i 为第*i*次沉降所经历时间, α 为埋藏因子($\alpha=2^n$;早期埋藏, $n=0$;中期埋藏, $n=1$;晚期埋藏, $n=2$)。每次沉降埋藏减孔量为

$$\Delta \Phi_{1i} = \Phi_1 \times C_i (i=1,2,\dots,8) \quad (7)$$

据式(7)可画出压实作用在孔隙演化基线上不同地史时期的影响量(图6a,图中虚线表示时间段 ΔT_i ,实线表示时间段内孔隙的变化量 $\Delta \Phi_{1i}$)。

胶结作用对孔隙演化有着明显的破坏性影响,鉴于区内主要胶结物为碳酸盐胶结物,利用阴极发光薄片及PS图像分析技术,计算早期碳酸盐胶结物(Ca I,距今98.7~23 Ma)及晚期碳酸盐胶结物(Ca II,距今11.28~7.55 Ma)比例,对胶结损失孔隙度(φ_2)进行恢复,早期胶结物损失孔隙度 $\Delta \varphi_{21}$ 和晚期胶结物损失孔隙度 $\Delta \varphi_{22}$ (图6a)。

区内溶蚀作用主要有两个时期,大气淡水淋滤时期(距今98.7~65.6 Ma),以长石、岩屑溶蚀为主;有机酸溶蚀时期(距今23~11.28 Ma),以碳酸盐胶结物溶蚀为主,故而根据铸体薄片镜下图像分析统计,早期溶蚀量与晚期溶蚀量的比例,对溶蚀孔隙度(φ_3)进行恢复(早期溶蚀孔隙度 $\Delta \varphi_{31}$ 和晚期溶蚀孔隙度 $\Delta \varphi_{32}$)(图6a)。

破裂作用主要发生在新世以来的喜马拉雅运动(距今2 Ma始),因此,破裂作用形成裂缝对孔隙演化的影响主要发生在这一时期(图6a)。

至此,以成岩序列为约束,结合埋藏史,时间轴上的孔隙演化已明确,具体数据可见图6a。以初始孔隙度为起点,在不同的时间节点上,以其成岩作用的孔隙改造量确定孔隙度,减去破坏性成岩作用的孔隙损失量,加上建设性成岩作用的孔隙贡献量,最终将各时间节点的孔隙度以光滑曲线连接,即得到孔隙度的实际演化史(图6b)。研究表明,在储层孔隙演化历程中,孔隙度随着各成岩作用进程而发生变化,不同成岩作用对孔隙的影响程度有差异,孔隙度整体变化趋势为逐渐减小。结合油气成藏期次研究,为储层有效性评价奠定基础。

5 储层成藏与致密耦合关系

库车坳陷具有“多期成藏、早油晚气、晚期成藏

为主”的特点,对于这一观点学者们比较统一。鲁雪松等^[36]利用流体包裹体分析、荧光光谱分析等油气地球化学分析等技术,从古流体证据角度论证表明,库车坳陷克拉2气田存在中新世早中期(N_1)原油充注、上新世库车组沉积期(N_2)高成熟油气充注与破坏、第四纪(Q_1 以来)高一过成熟煤成气充注的3期成藏过程。近年来,不少学者利用储层中与油气伴生的盐水包裹体均一温度测试分析及埋藏史分析,对研究区深部储层成藏期次进行研究,认为克深区块晚期天然气主充注时间为距今3~1 Ma^[23,37]。结合前述分析的孔隙度演化史曲线(图6b),距今3 Ma时,克深区块巴什基奇克组储层埋深约5 800 m,孔隙度为6.2%,随后区域性大规模的构造挤压造缝(距今2 Ma)有效改造储层质量,且这一时期克深区块膏岩盖层已封闭(封闭关键时间为库车早中期)^[38],利于天然气充注成藏,形成有利勘探目标。研究区主天然气充注时期、区域构造挤压造缝期、盖层封闭期的良好匹配,结合较好的储层孔隙度(6.2%),决定了克拉苏冲断带深层克深气藏为边致密边成藏的天然气藏,同时具有晚期高效成藏特点。因此,准确恢复储层孔隙度演化发育史,对于油气成藏期储集层有效性评价有重要意义,尤其是对深部油气勘探开发具有更强的指导性。

6 结论

(1)库车坳陷克拉苏冲断带克深区块深部巴什基奇克组经历的成岩演化序列为黏土膜→早期缓慢浅埋压实作用→长石、岩屑溶蚀和石英加大→早期方解石胶结→中期快速深埋强烈压实作用→长石、碳酸盐胶结物溶蚀→碳酸盐致密胶结→晚期挤压推覆形成裂缝→裂缝溶蚀扩大。

(2)以巴什基奇克组储层孔隙结构特征为基础,定量计算各关键成岩作用对储集空间的影响量,结合埋藏-成岩演化史分析约束,恢复校正不同历史时期不同成岩作用对储层孔隙演化的控制量,从而定量恢复储层实际孔隙度演化过程。

(3)储层孔隙度定量研究表明,在克拉苏冲断带克深区块巴什基奇克组晚期气藏主要充注期(距今3~1 Ma),巴什基奇克组储层孔隙度为6.2%;距今约2 Ma,区域大规模构造挤压造缝改善储层物性,时机匹配良好,有利于天然气充注成藏。克深区块天然气藏为边致密边成藏,具有晚期高效成藏特点。

(4)通过对储集层孔隙度演化的定量恢复,能够明确各成岩作用对储集层物性的影响。在恢复地质历史时期储集层孔隙度动态演化基础上,如能结合有效储层物性下限及深度下限预测工作,分析有效储层形成史及埋藏深度的匹配关系,从而在深层致密储层大背景中寻找有效储层,对深层油气勘探开发具有更强的实用性和指导性。

参考文献

- [1] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. *Geophysics*, 1956, 21(1): 41-70.
- [2] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[J]. *Geophysics*, 1958, 23(3): 459-493.
- [3] SCHERER M. Parameters influencing porosity in sandstones: a model for sandstone porosity prediction[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1987, 71(5): 485-491.
- [4] HOUSEKNECHT D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1987, 71(6): 633-642.
- [5] SCHMOKER J W, GAUTIER D L. Sandstone porosity as function of thermal maturity[J]. *Geology*, 1988, 16(11): 1007-1010.
- [6] 王瑞飞, 沈平平, 赵良金. 深层储集层成岩作用及孔隙度演化定量模型[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 552-559.
- [7] 李锟, 于炳松, 王黎栋, 等. 塔里木盆地东南地区侏罗系低孔渗砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *现代地质*, 2014, 28(2): 388-395.
- [8] 潘高峰, 刘震, 赵舒, 等. 砂岩孔隙度演化定量模拟方法[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 249-256.
- [9] LIU M G, LIU Z, WANG B, et al. A new method for recovering paleoporosity of sandstone: case study of middle Es₃ member of Paleogene formation in Niuzhuang Sag, Dongying Depression, Bohai Bay Basin in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(3): 521-530.
- [10] 施和生, 雷永昌, 吴梦霜, 等. 珠一坳陷深层砂岩储层孔隙演化研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 169-175.
- [11] 钟大康, 祝海华, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 61-68.
- [12] 周翔, 何生, 刘萍, 等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 6 致密油储层孔隙结构特征及分类评价[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3): 253-265.
- [13] 孙靖, 宋永, 王仕莉, 等. 准噶尔盆地深层致密油储层特征及致密化成因: 以莫索湾—莫北地区侏罗系八道湾组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 25-33.
- [14] 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.
- [15] 何碧竹, 焦存礼, 许志琴, 等. 塔里木盆地显生宙古隆起的分布及迁移[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 277-289.
- [16] 赵力彬, 杨学君, 昌杰伦, 等. 塔里木盆地库车坳陷克深地区白垩系低孔砂岩储层“三重介质特征”[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(2): 209-218.
- [17] 赵靖舟, 戴金星. 库车油气系统成藏期与成藏史[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 314-319.
- [18] 付晓飞, 徐萌, 柳少波, 等. 塔里木盆地库车坳陷致密砂岩-膏泥岩储盖组合断裂带内部结构及与天然气成藏关系[J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 521-533.
- [19] 胡文瑞. 低渗透油气田概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 11-13.
- [20] 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 塔里木盆地北部地区中、新生界层序地层、沉积体系与储层特征[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 11.
- [21] 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.
- [22] 张敏强, 黄思静, 吴志轩, 等. 东海盆地丽水凹陷古近系储层砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(3): 259-266.
- [23] 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.
- [24] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [25] 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等. 库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1057-1069.
- [26] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [27] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6): 943-950.
- [28] IRWIN H, CURTIS C, COLEMAN M. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments[J]. *Nature*, 1977, 269(5625): 209-

- 213.
- [29] 王大锐, 宋岩. 碳同位素在生物气勘探中的示踪作用[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(4): 47-51.
- [30] 郑淳方, 侯贵廷, 詹彦, 等. 库车坳陷新生代构造应力场恢复[J]. 地质通报, 2016, 35(1): 130-139.
- [31] BEARD D C, WEYL P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.
- [32] ATHY L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1930, 14(1): 1-24.
- [33] 刘震, 邵新军, 金博, 等. 压实过程中埋深和时间对碎屑岩孔隙度演化的共同影响[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 125-132.
- [34] SOMBRA C L, CHANG H K. Burial history and porosity evolution of Brazilian Upper Jurassic to Tertiary sandstone reservoirs[J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1997, 69: 79-89.
- [35] 韩登林, 李忠, 刘嘉庆, 等. 埋藏方式控制储层压实效应的定量表征: 以库车坳陷白垩系砂岩储层为例[J]. 地质科学, 2010, 45(3): 844-852.
- [36] 鲁雪松, 刘可禹, 卓勤功, 等. 库车克拉2气田多期油气充注的古流体证据[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 537-544.
- [37] 冯松宝, 徐文明, 顿亚鹏. 库车坳陷克拉苏构造带超高压大气田储层流体包裹体特征及成藏信息[J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 211-217.
- [38] 卓勤功, 李勇, 宋岩, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏岩盖层演化与圈闭有效性[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 42-47.

《地学前缘》出版改革重要通知

为了推进《地学前缘》数字化、网络化转型升级,快速发表作者的研究成果,《地学前缘》编辑部将利用和依托中国知网(CNKI)研发并经国家批准的快速传播平台——CAJ-NP。《地学前缘》编辑部已签约加入了此传播平台的《中国学术期刊网络版》(CAJ-N)。CAJ-N作为学术期刊网络版的正式出版平台,与以往没有正式刊号的优先数字出版不同,因已经解决了论文网络首发规范性问题,可以得到国家出版管理、科研与从事管理等相关部门的认可。《中国学术期刊网络版》(CAJ-N)有①录用定稿、②排版定稿、③整期汇编定稿三种模式,而其核心是第①种录用定稿。录用定稿是以网络首发方式发表单篇论文(作者可及时上网下载获得该单篇论文的出版证书),这是出版学术期刊网络版的实质意义,其对作者研究成果首发权、学术竞争力和影响力,以及读者获取科研情报与知识的及时性具有无可争议的重要性。

最需要注意的是,《地学前缘》的单篇论文录用定稿一经CAJ-N首发,那么作者在《地学前缘》后续的出版过程中不得修改自己论文的题目、作者、机构名称和学术内容(如数据等等)(如需修改必须刊发网络勘误声明),只可基于编辑规范进行少量文字的修改。我们会进一步与作者联系解释有关事宜。