

doi:10.3799/dqkx.2016.044

库车凹陷克拉2气田储层成岩作用和油气充注特征

于志超^{1,2}, 刘可禹^{1,2*}, 赵孟军^{1,2}, 柳少波^{1,2}, 卓勤功^{1,2}, 鲁雪松^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083

摘要: 克拉2气田是中国陆上勘探已知最大的天然气气田, 下白垩系巴什基奇克组砂岩是其主力储层。为了揭示本区储层成岩作用和油气充注之间的成因联系, 综合应用偏光显微镜、阴极发光显微镜、扫描电镜、CT扫描三维重构、X-射线衍射、荧光光谱、显微测温和激光拉曼等技术手段研究了克拉2气田储层的成岩作用和油气充注期次及特征, 并且探讨了油气充注对成岩作用的影响。研究结果显示: 本区的成岩矿物组合为石英次生加大边、方解石、白云石、铁白云石、微晶石英和自生高岭石。发育3期油气充注: 第1期为低温高盐度的低成熟油气流体, 以记录在石英愈合裂隙、长石解理和方解石胶结物中的黄褐色荧光包裹体为代表, 充注时间为18 Ma; 第2期为高温高盐度的高成熟油气流体, 以记录在石英愈合裂隙和白云石胶结物中的黄白—蓝白色荧光包裹体为代表, 充注时间为6 Ma; 第3期为高温低盐度的天然气充注, 以记录在石英愈合裂隙和铁白云石胶结物中的无荧光气烃包裹体为代表, 充注时间4 Ma。本区储层中自生高岭石、微晶石英和储层沥青是晚期天然气充注对储层改造的结果。

关键词: 成岩作用; 流体包裹体; 油气充注; 库车凹陷。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000—2383(2016)03—0533—13

收稿日期: 2015—09—17

Characterization of Diagenesis and the Petroleum Charge in Kela 2 Gas Field, Kuqa Depression, Tarim Basin

Yu Zhichao^{1,2}, Liu Keyu^{1,2*}, Zhao Mengjun^{1,2}, Liu Shaobo^{1,2}, Zhuo Qingong^{1,2}, Lu Xuesong^{1,2}

1. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, CNPC, Beijing 100083, China

Abstract: The Kela-2 gas field is the most productive gas field in China. The lower Cretaceous Bashenjiqike Formation (K_1bs) are the dominated gas-bearing strata. Characterization of the diagenetic history, different fluid inclusion assemblages and the effects of oil emplacement on diagenetic processes of the K_1bs in the Kuqa Depression, Tarim Basin have been studied using a combination of techniques such as polarizing microscope, cathode luminescence (CL), scanning electron microscope (SEM), CT three-dimensional reconstruction, X-ray diffraction (XRD), fluorescence spectroscopy, microthermometry, and Raman microspectroscopy. Diagenetic events identify include quartz overgrowths, early calcite cements, dolomite cements, ankerite cements, micro-quartz and authigenic kaolinite. Three episodes of oil emplacement are recorded by the diagenetic products in the K_1bs Formations. The first episode consists of the yellowish-brown fluorescent petroleum inclusions hosted in the transgranular fractures, cleavage plans of the feldspar and calcite cements, paired with low trapped temperature and relatively high salinity, forming around 18 Ma; the second episode consists of the yellow-white to blue-white petroleum inclusions located in the transgranular fractures, boundary of quartz particles and dolomite cements, paired with high trapped temperature and high salinity, forming around 6 Ma; the third episode consists of the CH_4 -bearing vapour inclusions within the annealed microfractures and ankerite cements, having with high trapped temperature and low salinity, forming around 4 Ma. Authigenic kaolinite, micor-

基金项目: 国家“十二五”科技重大专项(No. 2011ZX05016-002).

作者简介: 于志超(1984—), 男, 博士后, 主要从事油气和储层成岩作用的研究. E-mail: yuzhichao@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 刘可禹, E-mail: keyu_liu@petrochina.com.cn

引用格式: 于志超, 刘可禹, 赵孟军, 等, 2016. 库车凹陷克拉2气田储层成岩作用和油气充注特征. 地球科学, 41(3): 533—545.

quartz and solid bitumen are the results transformed by the advanced natural gas charge.

Key words: diagenesis; fluid inclusions; oil emplacement; Kuqa depression.

0 引言

储层中的有机包裹体以及与其伴生的盐水包裹体可以完整地记录不同期次的油气流体信息(Bourdet *et al.*, 2010). 当油气侵入储层后, 油气流体和先期存在于岩石孔隙中的地层水会立刻以包裹体的形式被捕获于同期或稍早期形成的成岩矿物或者是愈合裂隙中(Bourdet *et al.*, 2010). 这些流体包裹体拥有与油气流体充注时相同的温度和盐度, 因此, 将以上包裹体与成岩矿物结合起来进行研究可以有效地解决沉积盆地中油气生成和运移问题(Roedder, 1984; Goldstein, 2001; Baron *et al.*, 2008; 杜丽黎等, 2005). 例如: 通过测试与有机包裹体相伴生盐水包裹体的均一温度, 再结合热埋藏史曲线可以比较精确地确定储层中不同期次油气流体的充注时间(Parnell, 2010). 通过显微测温和荧光光谱分析可以对不同期次的油气流体盐度和成熟度进行全面的分析研究(Dutkiewicz *et al.*, 2003). 特别是那些捕获在成岩矿物中的流体包裹体, 可以同时记录油气和成岩流体的性质, 这对于油气勘探具有重要的理论和实际意义.

位于塔里木盆地北部的克拉 2 气田是中国陆上勘探发现的最大整装干气田, 甲烷含量大于 97% (贾承造等, 2002) 气源主要来自于下伏侏罗系煤系气烃源岩(Lu *et al.*, 2012). 多年的研究证实: 克拉 2 田油气成藏具有“早油晚气、超压充注、晚期成藏”的特征(赵孟军等, 2002). 这些特征与本区超压条件下的成岩作用一起构成了克拉 2 气田独特的成岩—成藏流体演化序列. 然而, 不管是成岩作用研究(张荣虎等, 2014) 还是成藏流体演化(张鼎, 2001), 以往的研究多是侧重于一点, 没有将两者很好的结合在一起. 针对这一科学问题, 本文通过成岩作用和流体包裹体相结合的方法来研究油气充注与成岩流体之间的关系, 并且建立起两者在成岩—成藏史上的演化序列, 为本区油气勘探理论的建设和完善做出贡献.

1 地质背景

库车凹陷是塔里木盆地最主要的油气勘探区(Jia *et al.*, 2008), 沉积了巨厚的中、新生代陆相碎

屑岩地层, 厚度超过了 10 km. 库车凹陷位于塔里盆地北部的天山南麓, 紧邻塔北隆起(图 1a), 东西长 750 km, 宽 30~75 km (Zeng *et al.*, 2010). 库车凹陷是一个低地温盆地, 其现今平均地温梯度为 2.65 °C/100 m. 克拉 2 气田位于库车凹陷北部的克拉苏构造带中段(图 1a、1b). 库车凹陷油气成藏的地质条件十分优越, 古近系膏岩盐和下伏白垩系巨厚的红色砂岩组成了本区的优质储盖组合. 其中, 位于膏岩盐盖层之下的下白垩巴什基奇克组(K_1bs)砂岩储层是克拉 2 气田最主要的含油气层位(Feng *et al.*, 2013)(图 1c). 巴什基奇克组储层以扇三角洲前缘和辫状三角洲前缘沉积为主, 平均孔隙度为 11%, 平均渗透率为 $29 \times 0.9869 \times 10^{-15} \text{ m}^3$, 是本次研究的目的层位.

2 样品和分析方法

样品采自库车凹陷北部克拉苏构造带上的 KL2 和 KL201 井巴什基奇克组储层砂岩, 样品埋深为 3 639.79~4 075.30 m.

研究过程中, 总共切制普通薄片 61 片, 包裹体—阴极发光—扫描电镜多功能薄片 10 片, 磨制砂岩粉末样 62 件. 分析研究是在中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室内完成的. 分析过程如下: 首先, 利用 D/max-2500 型 X 射线衍射仪对 62 件砂岩粉末样进行了全岩和小于 $2 \mu\text{m}$ 部分的 X-射线衍射分析(XRD). 其次, 通过偏光显微镜和阴极发光显微镜对研究区 61 片普通薄片进行了系统的镜下鉴定和骨架碎屑颗粒统计, 识别出目的层位砂岩中胶结物和自生矿物类型, 并得出成岩共生序列. 其中骨架碎屑颗粒统计采用点记法, 每个薄片统计 300~400 个点; 成岩矿物交代关系和形貌观察是通过场发射扫描电镜完成的, 仪器型号为 VE-GA II LMU(捷克 TESCAN 公司). 此外, 利用 CT 扫描三维重构技术对本区的储层沥青和高岭石之间的关系进行了三维重构, 并计算了储层沥青的体积含量. 最后, 在以上分析的基础上进行了系统的流体包裹体研究, 所用仪器为配备 Ocean Optics USB4000 型荧光光谱仪的 Leica DMRX HC 荧光—偏光显微镜. 包裹体成分分析主要是通过激光拉曼光谱仪完成的, 所用仪器为 LabRAM HR800 型研

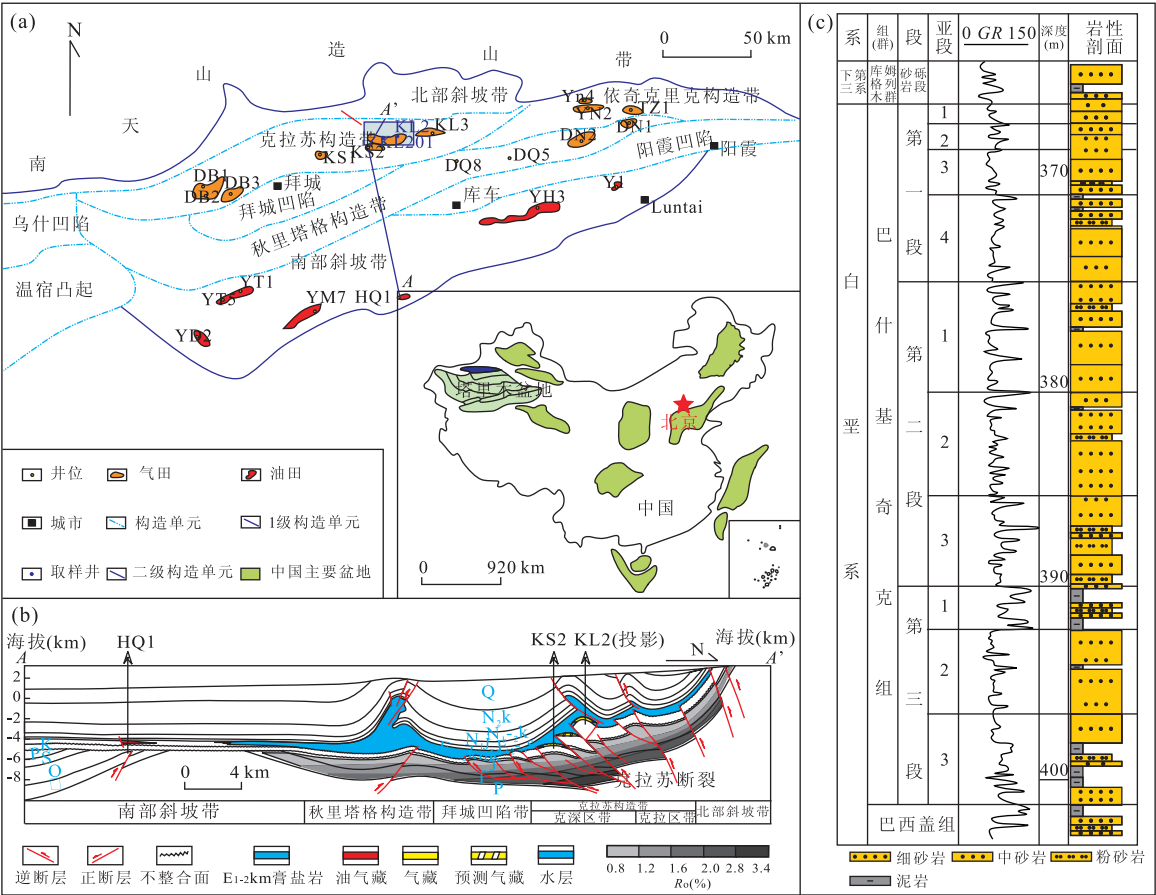


图1 库车凹陷构造单元划分及克拉2气田位置(a)、剖面(b)、岩心柱状图(c)
Fig. 1 Map of the Kuqa Depression showing the Kela 2 Gas Field in the Kelasu thrust fold belt

究级显微激光拉曼光谱仪. 激光光源是波长为632.81 nm的Yag晶体(注:Yag晶体是三价镱离子Yb³⁺掺入钇铝石榴石基质中形成的一种波长为1.03 μm的近红外激光的激光晶体)倍频固体激光器. 在分析中,选定的测光谱的计数时间为8 s,每1 cm(波数)计数一次,100~4 300(cm⁻¹)全波段一次取峰. 激光束斑大约为1 μm,光谱分辨率0.14(cm⁻¹). 实验室相对温度为25℃,相对湿度为50%. 流体包裹体显微测温所用仪器为LinKam-THMS600型冷热两用台,其中,冷热两用台经过标准样品校正,100℃以下误差为0.1℃,100℃以上不超过0.5℃. 所用方法为循环测温法(Goldstein and Reynolds, 1994),该方法所测得的包裹体均一和冰点温度误差不超过0.1℃.

3 结果

3.1 矿物组成特征

XRD分析表明,克拉2气田巴什基奇克组砂岩

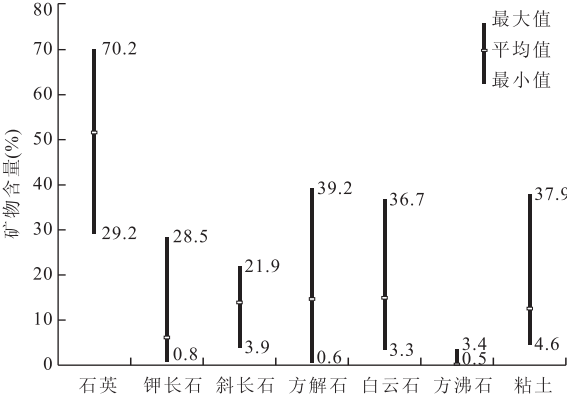


图2 克拉2储层砂岩矿物组成
Fig. 2 Mineral constituents of the Kela 2 reservoir sandstones

由石英,斜长石,钾长石,方解石,白云石,黏土矿物和少量的方沸石组成(图2). 其中,黏土矿物主要由伊蒙混层和伊利石组成,其次是高岭石和绿泥石(图3).

3.2 碎屑矿物

骨架碎屑颗粒统计结果表明:克拉2气田巴什基奇克组砂岩多属于长石岩屑砂岩(图4). 碎屑矿

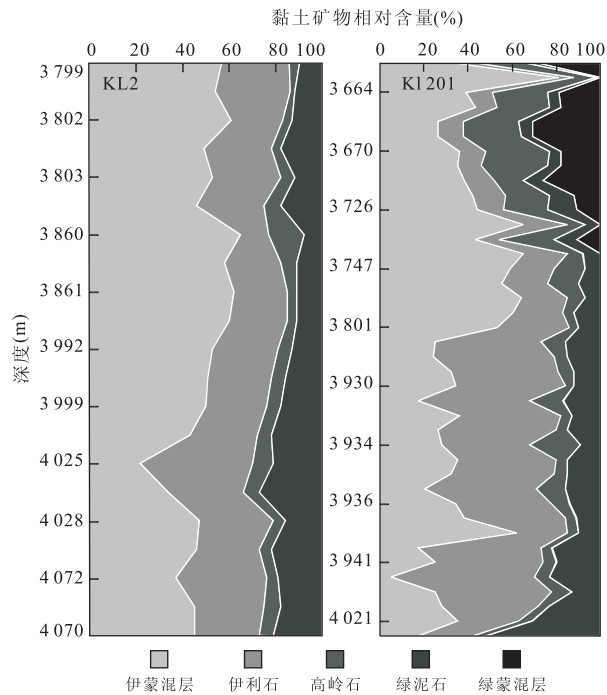


图 3 克拉 2 气田储层砂岩粘土矿物组成

Fig. 3 Clay mineral constituents of the Kela 2 reservoir sandstones

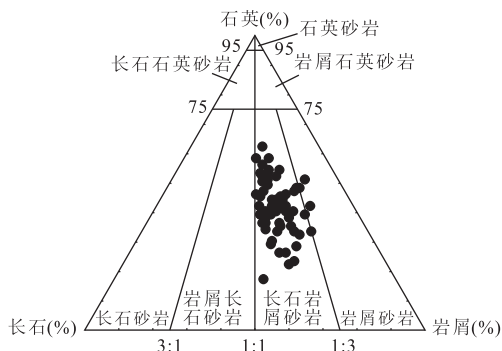


图 4 克拉 2 储层砂岩岩石类型三角分类图

Fig. 4 Classification ternary diagram of the Kela 2 reservoir sandstones

物平均组成为石英(59%),岩屑(18%),斜长石(16%)和钾长石(7%)(图 5).石英主要以单晶石英为主,并含有少量的多晶石英.岩屑组成复杂,以花岗岩岩屑和变质岩岩屑为主.

3.3 成岩矿物

大量的薄片鉴定和 XRD 分析显示,克拉 2 气田巴什基奇克组砂岩经历了显著的化学胶结作用,其自生矿物和胶结物所占比重最高可达整个岩石体积的 30%.组成这些自生矿物和胶结物的矿物类型主要有石英、高岭石、方解石、白云石和铁白云石.此外,固体沥青在本区的砂岩中也比较发育.

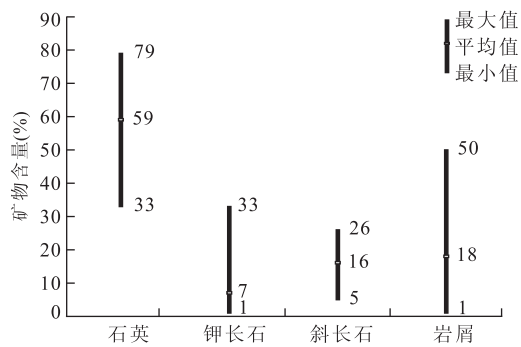


图 5 克拉 2 气田储层砂岩碎屑矿物组成

Fig. 5 Clastic constituents of the Kela 2 reservoir sandstones

石英胶结物主要以次生加大边和微晶石英的形式产出,含量小于岩石总体积的 1%.石英次生加大边的长径宽为 15~40 μm ,通常被方解石和其他碳酸盐矿物所交代(图 6a),形成时间明显早于碳酸盐矿物.微晶石英常常伴随着固体沥青产出于长石溶蚀后的剩余孔隙中(图 6b),预示着微晶石英和固体沥青可能同时形成.

碳酸盐胶结物是本区砂岩中最为发育的孔隙填充物,主要由方解石和白云石组成(图 2).阴极发光显微镜鉴定表明本区砂岩主要发育两个世代的碳酸盐胶结物:第 1 期为方解石,在阴极射线下发黄色光,并且被发橘红色光的白云石交代(图 6c),说明其形成时间早于白云石;第 2 期为白云石,在阴极射线显示橘红色光,有时还可见到其特有的环带结构(图 6c).电子显微镜观察显示:极少量铁白云石以加大边的形式沉淀于不含铁的白云石颗粒边部(图 6d).此外,铁白云石偶尔会和高岭石和固体沥青同时出现,并被溶蚀成一个个的小坑(图 6d、6e),暗示着铁白云石的形成时间要早于高岭石和固体沥青.克拉 2 气田巴什基奇克组砂岩中发育了数量可观的自生高岭石,平均含量在 1.2%左右.这些高岭石单体呈成六方板状、集合体呈书页状(直径在 5~20 μm 之间)和固体沥青以及微晶石英一起沉淀于孔隙中(图 6e、6f).

3.4 流体包裹体岩相学特征和期次划分

克拉 2 储层砂岩中的烃类包裹体比较发育,主要产于石英愈合裂隙,碎屑颗粒边部和碳酸盐胶结物中.但是,与之伴生的盐水包裹体非常稀少.基于包裹体的产状和荧光颜色,可以将克拉 2 气田的巴什基奇克组储层中的烃类包裹体划分为 3 期:第 1 期烃类包裹体显示黄褐色荧光,直径较小,在 1~15 μm 之间,气液比在 0~30% 之间,呈浑圆状或是不规则形态产于碎屑颗粒的愈合裂隙(图 7a、7b)、

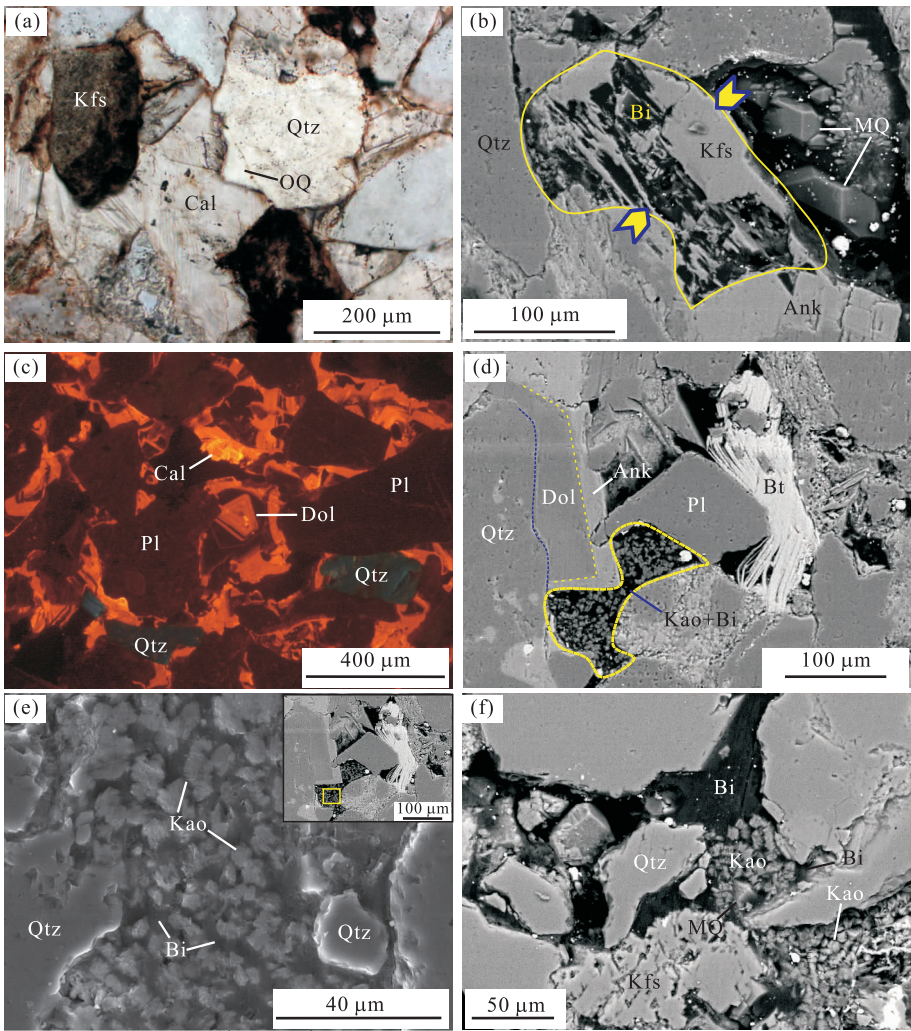


图 6 巴什基奇克组砂岩成岩矿物显微特征照片

Fig. 6 Characteristic photomicrographs for authigenic mineralogy in the K1bs reservoir sandstones

OQ. 石英加大边;MQ. 微晶石英;Qtz. 石英颗粒;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石;Bi. 储层沥青;Bt. 黑云母;Kao. 自生高岭石;Cal. 方解石;Dol. 白云石;Ank. 铁白云石

长石的解理(图 7c、7d), 和早期方解石中(图 8a、8b). 荧光光谱分析显示, 该期油气包裹体成熟度较低, 谱峰范围在 500~550 nm 之间, 峰值为 523 nm (图 8). 第 2 期烃类包裹体显示黄白—蓝白色荧光, 直径较大, 20~30 μm 之间, 气液比在 5%~25% 之间, 呈椭圆或是不规则状产于石英颗粒边部(图 7e、7f)和晚期白云石中(图 8c、8d). 荧光光谱分析显示, 该期包裹体成熟度较高, 谱峰范围在 475~525 nm 之间, 峰值为 495 nm(图 8). 第 3 期主要为灰黑色气烃包裹体, 无荧光显示, 直径在 15~20 μm 之间, 呈圆形或是长条形产出, 多数产于石英愈合裂隙中(图 7g), 偶尔在铁白云石胶结物中也可以见到该类型的包裹体(图 7h).

3.5 显微测温

符合测温条件的包裹体数量很少, 本次研究总

计测试了 3 个烃类包裹体和 20 个与不同期次烃类包裹体相伴生的盐水包裹体的均一温度, 测试结果见表 1. 图 9 为研究区烃类包裹体及相伴生的盐水包裹体的均一温度直方图. 第 1 期黄褐色荧光包裹体的均一温度在 80 ℃左右, 与之伴生的盐水包裹体的均一温度在 95~120 ℃之间. 第 2 期黄白—蓝白色荧光包裹体的均一温度为 93 ℃, 与之伴生的盐水包裹体均一温度在 114~123 ℃之间. 与第 3 期气烃包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度在 123~178 ℃之间. 考虑到油气流体充注的连续性, 此次研究将每一期伴生盐水包裹体的最小均一温度作为该期油气流体的捕获温度. 因此, 克拉 2 气田巴什基奇克组砂岩储层中第 1 期油气流体的捕获温度为 95 ℃;第 2 期为 114 ℃;第 3 期为 123 ℃. 部分与第 3 期气烃包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度在

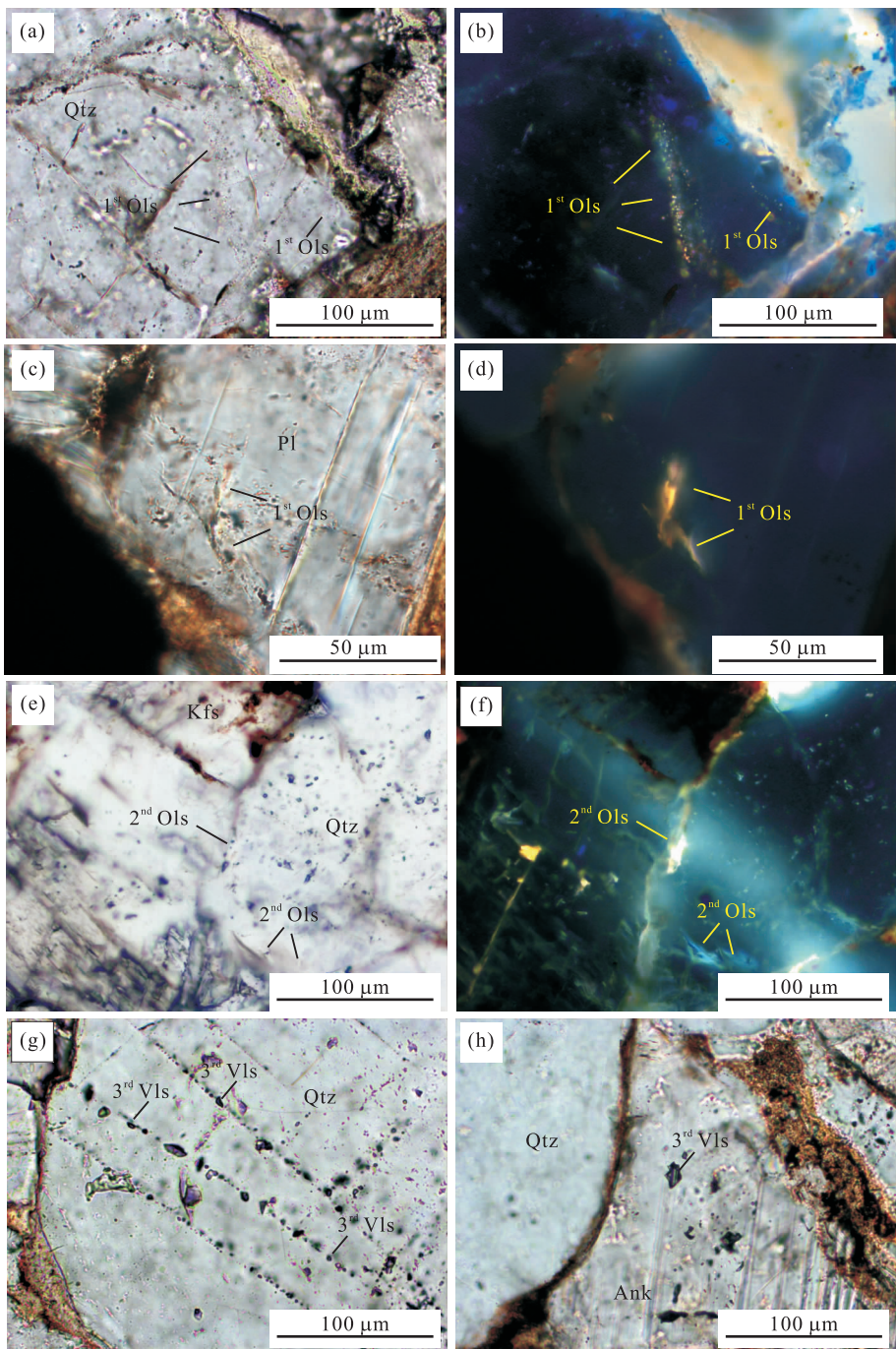


图 7 巴什基奇克组砂岩烃类包裹体显微特征照片

Fig. 7 Characteristic photomicrographs for oil and coexisting aqueous inclusions in the K1bs reservoir sandstones
Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Ank. 铁白云石; 1st Ols. 第 1 期烃类包裹体; 2nd Ols. 第 2 期烃类包裹体; 3rd Vls. 第 3 期气烃包裹体

150~180 ℃之间,结合本区深部层位的断层十分发育的事实,推测这部分包裹体所记录的流体可能受到了深部热流体的影响,使其温度高于正常地温值。

由于与烃类包裹体相伴生的盐水包裹体体积较小,测温时相态观察困难,本次研究仅测试了其中的 14 个盐水包裹体的冰点,具体结果见表 1。如图 10 所示:不同期次的包裹体盐度和均一温度具有较好

的相关性。第 1 期和第 2 期流体包裹体的盐度较高,在 17.34%~20.52% NaCl eq. 之间;第 3 期流体包裹体的盐度较低,在 13.94%~18.13% NaCl eq. 之间,与现今的地层水盐度接近。

3.6 激光拉曼分析

激光拉曼分析主要是针对第 3 期流体包裹体进行的。10 个气烃包裹体拉曼光谱分析表明,第三期

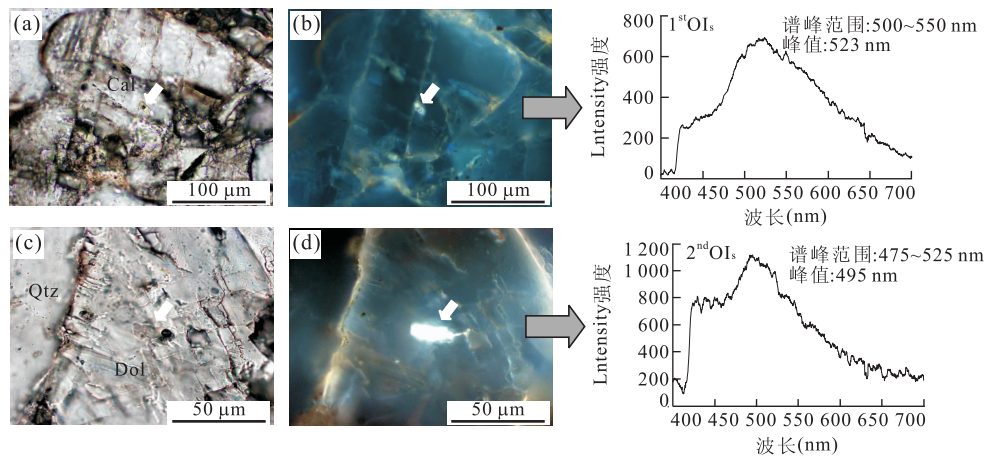


图 8 巴什基奇克组砂岩两期烃类包裹体显微特征和荧光光谱曲线

Fig. 8 Characteristic photomicrographs and Fluorescence spectra of two episodes of oil inclusions in the K1bs reservoir sandstones

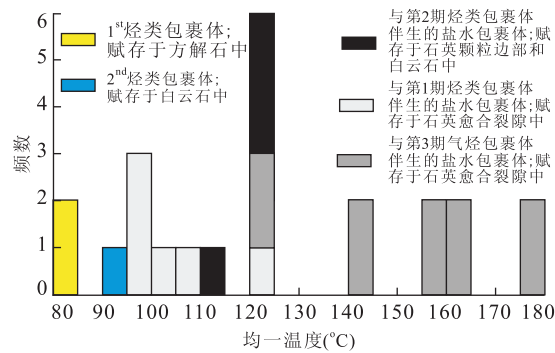


图 9 烃类包裹体及伴生盐水包裹体均一温度直方图

Fig. 9 Homogenization temperature histogram of petroleum and coexisting aqueous fluid inclusions

流体包裹体的气相成分主要是 CH_4 ，其拉曼特征峰主要集中在 $2\,911\text{ cm}^{-1}$ （表 2），少数集中在 $2\,912\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,913\text{ cm}^{-1}$ （图 11）。考虑到甲烷的拉曼位移会随着捕获压力的增加而减小（Lu *et al.*，2007），拉曼位移值在 $2\,911\text{ cm}^{-1}$ 附近的甲烷气包裹体很可能是在较高压力状态下捕获的。

4 讨论

4.1 成岩矿物共生序列

确定不同自生矿物形成的先后顺序是研究油气流体充注特征的前提条件，因为几乎所有阶段的油气充注过程都可以以包裹体的形式记录在成岩矿物中（Goldstein，2001）。克拉 2 气田巴什基奇克组砂岩的成岩矿物组成为方解石、白云石、高岭石、石英次生加大边和微晶石英。接触交代关系表明：石英次生加大边是本区最早形成的成岩矿物。但是，巴什基奇克组砂岩中的自生石英含量非常低，这可能与本

区大规模的油气充注有关。因为，沉积储层中油气充注会抑制硅质矿物的沉淀（Parnell *et al.*，1996）。方解石胶结物的形成时间要晚于石英次生加大边，在薄片中可以观察到其交代石英次生加大边（图 6a）。白云石是区内最为发育的碳酸盐胶结物，形成时间晚于方解石。大量发育的白云石胶结物说明区内曾经长期处于一个高浓度的 Ca、Mg、Na 和重碳酸盐的碱性流体环境下（Gierlowski-Kordesch and Rust，1994）。铁白云石以加大边的形式沉淀于白云石颗粒的边部（图 6d），说明其形成时间要晚于白云石。国外的相关研究表明，该种结构的铁白云石形成温度可高达 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ （Schmid *et al.*，2004），略大于现今取样层位的实际地层温度（ $100\sim 106\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），说明铁白云石是晚期成岩作用产物。

高岭石在本区十分发育，并且多和固体沥青相伴生，沉淀在长石溶蚀后的剩余孔隙中（图 6d、6e）。此外，扫描电镜观察表明：微晶石英和高岭石以及固体沥青可以同时存在于孔隙中（图 6f），并且不同程度地溶蚀了铁白云石，推断这 3 种成岩—成藏产物很可能是最晚一期形成的，其形成与本区的天然气充注有关。

4.2 克拉 2 地区成岩—成藏史

流体包裹体、成岩作用结合热埋藏史曲线（图 12）研究显示：克拉 2 气田巴什基奇克组储层总计发生了 3 期油气充注事件：第 1 期油气充注时间为 18 Ma，以赋存在碎屑颗粒的愈合裂隙、长石的解理缝和早期方解石胶结物中的黄褐色烃类包裹体为代表，捕获温度较低，为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；盐度较高，为 $17.34\%\sim 18.8\%\text{ NaCl eq.}$ ；成熟度低，荧光光谱峰值为 523 nm 。第 2 期油气充注时间为 6 Ma，以赋存在石

表 1 流体包裹体显微测温结果
Table 1 Summary of microthermometric results

编号	包裹体类型	宿主矿物	产状	大小 ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	气液比 (%)	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)	冰点 ($^{\circ}\text{C}$)	盐度 (% NaCl eq.)	伴生烃类包裹体
1	气液两相盐 水包裹体	石英	愈合 裂隙	2×3	5	95.0	−13.5	17.34	黄褐色荧 光包裹体
2				2×4	5	96.2	/	/	
3				2×3	5	120.0	/	/	
4				2×3	5	102.3	−14.5	18.22	
5				2×5	10	108.3	−14.5	18.22	
6				1×8	5	96.7	−15.2	18.80	
7	气液两相盐 水包裹体	石英	愈合 裂隙	1×3	5	123.0	−12.6	16.53	气烃包 裹体
8				1×4	5	160.0	−14.1	17.87	
9				2×4	5	140.0	−13.3	17.17	
10				5×9	10	145.8	−13.4	17.26	
11				2×4	20	156.4	−10.0	13.94	
12				2×4	10	123.4	/	/	
13				2×2	10	162.1	/	/	
14				3×12	5	154.7	/	/	
15				2×1	10	175.3	−14.4	18.13	
16				2×6	10	177.7	−12.6	16.53	
17	气液两相盐 水包裹体	石英	边部	3×6	10	114.0	/	/	蓝白色荧 光包裹体
18		白云石	孤立 分布	2×3	5	122.0	−17.0	20.22	
19				2×4	5	122.0	−17.4	20.52	
20				1×5	5	123.0	−17.0	20.22	
21	蓝白色荧 光包裹体	白云石		10×25	25	93.7	/	/	/
22	黄褐色荧 光包裹体	方解石		7×15	25	80.0	/	/	/
23	黄褐色荧 光包裹体			10×14	30	81.2	/	/	/

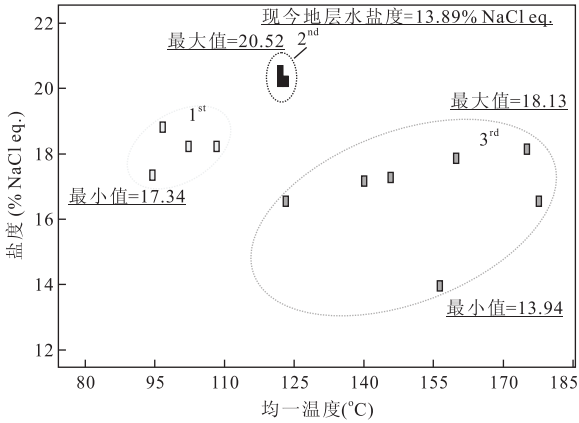


图 10 均一温度—盐度散点图

Fig. 10 Homogenization temperature versus ice-melting temperature plot for aqueous inclusions associated with oil inclusions

英颗粒边部和晚期白云石胶结物中的黄白—蓝白色荧光包裹体为代表,捕获温度较高,为 114 $^{\circ}\text{C}$;盐度最高,为 20.22%~20.52% NaCl eq.;成熟度高,荧光光谱峰值为 495 nm. 第 3 期主要为天然气充注,充注时间为 4 Ma,以赋存在石英愈合裂隙和晚期铁白云石胶结物中不发荧光的气烃包裹体为代表,捕

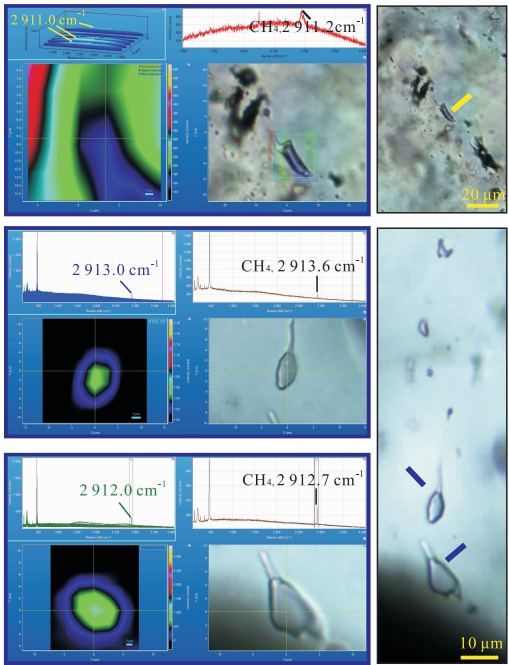


图 11 甲烷包裹体的激光拉曼光谱图

Fig. 11 Raman 2D spectrogram and spectra of typical CH_4 -bearing vapour inclusions

获温度最高,为 123 $^{\circ}\text{C}$;盐度较低,为 13.94%~

表 2 室温下流体包裹体激光拉曼测试结果

Table 2 Laser Raman analysis of fluid inclusions at room temperature

编号	深度(m)	包裹体类型	产状	气相成分	拉曼位移(cm^{-1})
KL201-1	3 667.7	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 913.6
KL201-2	3 667.7	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 912.7
KL201-3	3 788.1	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.2
KL201-4	3 788.1	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.1
KL201-5	3 632.0	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 913.6
KL201-6	3 632.0	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.9
KL201-7	3 850.4	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 910.2
KL201-8	3 850.4	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.1
KL201-9	3 850.4	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.0
KL201-10	3 850.4	气烃包裹体	石英颗粒愈合裂隙	CH ₄	2 911.1

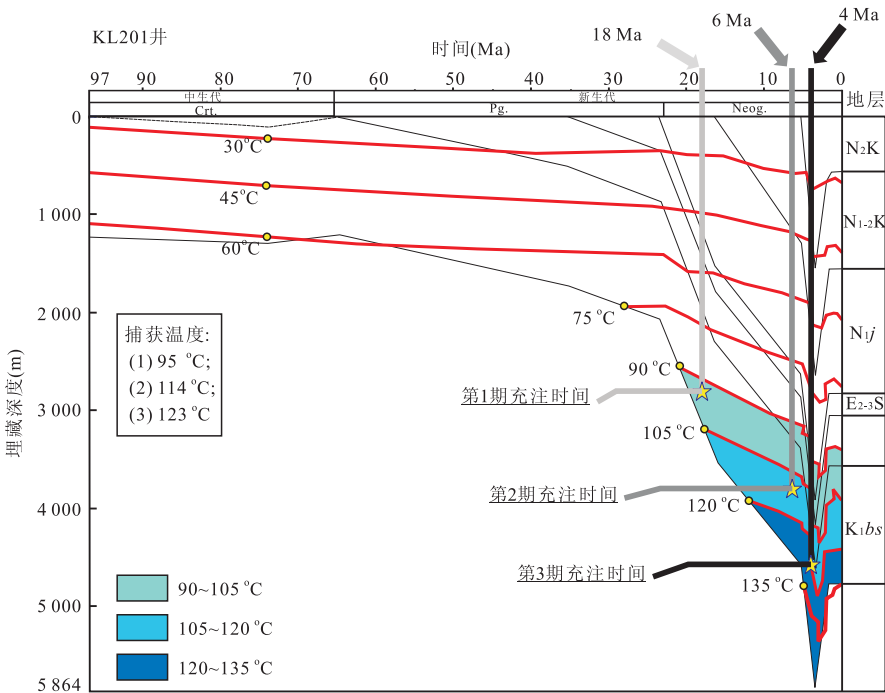


图 12 均一温度结合热史曲线确定油气充注时间(KL201 井)

Fig. 12 Inferred oil charge timing obtained from integration of the minimum Th of the aqueous fluid inclusions coeval with the oil inclusions with the thermal history plots in Well KL201

18.13% NaCl eq.，接近于现今地层水的盐度 (13.89% NaCl eq.)。

在以上研究的基础上,结合本区的构造演化史,总结克拉 2 地区成岩一成藏演化史如图 13 所示. 克拉 2 地区的烃源岩在康村期就已进入成熟阶段,开始大量生排烃(赵孟军等,2003). 在库车组沉积前,已有大型逆冲断裂将克拉 2 地区的砂岩储层与下伏烃源岩层相沟通,使得早期成熟度较低的原油进入到白垩系储层中. 这一时期的油气流体以赋存在石英愈合裂隙和早期方解石中的黄褐色烃类包裹体为代表,拥有较低的充注温度和较高的盐度,充注时间为 18 Ma. 到库车组沉积时,因天山隆升作用导致的

强烈的构造挤压作用使得克拉 2 地区的地层快速沉降,并且破坏了早期成熟度较低的古油藏. 强烈的构造活动使得这一时期的逆冲断层十分活跃,第 2 期成熟度较高的原油沿着上述断层进入到储层中. 颗粒荧光分析显示,克拉 201 井曾存在超过 300 m 的古油柱(Lu *et al*, 2012),直到现在,克拉 2 气田还会产出少量的高成熟度轻质油. 这说明,克拉 2 地区的第二次油气充注的强度和规模远超过第 1 期. 这一时期油气流体以赋存在石英颗粒边部和晚期白云石胶结物中的黄白—蓝白荧光包裹体为代表,拥有较高的充注温度和盐度,充注时间为 6 Ma. 库车组沉积末期,强烈的逆冲推覆作用使克拉 2 地区的地

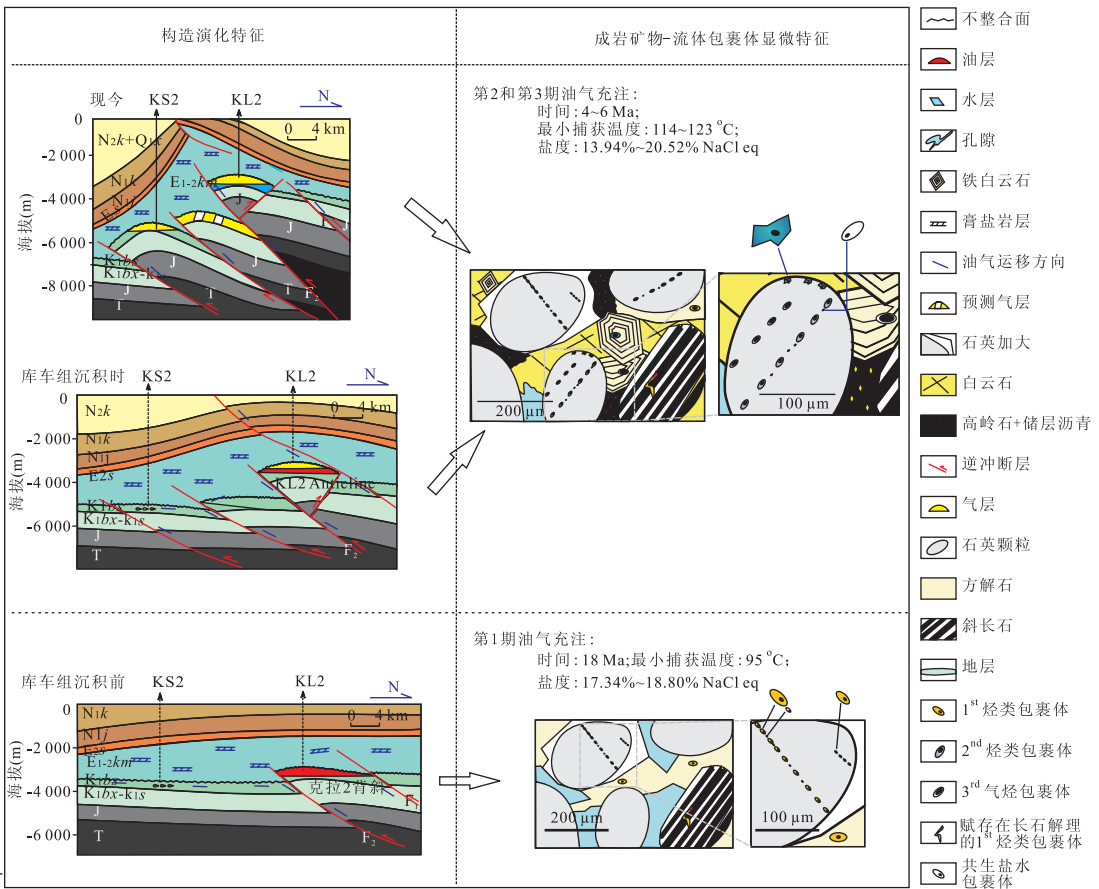


图 13 克拉 2 气田成岩-成藏演化

Fig. 13 Evolution of diagenesis-hydrocarbon accumulation of the Kela 2 Gas Field

层发生了规模巨大的剥蚀作用,剥蚀厚度在 2 000 m 以上(鲁雪松等, 2014),并且破坏了早期形成的油藏.同时,这一时期的快速冲断挠曲沉降使得烃源岩快速生气,晚期干气得以在保存条件较好的圈闭中再次聚集,形成以晚期干气为主、含少量早期残留原油(第 2 期)的油气藏.这一时期的油气流体以赋存在石英愈合裂隙和晚期铁白云石胶结物中的不发荧光的气烃包裹体为代表,拥有着最高的充注温度,但是盐度较低,接近于现今地层水的盐度(图 10).

4.3 克拉 2 地区油气充注与成岩作用的相互关系

沉积盆地中的烃源岩热演化和成岩作用是一个相互作用,有机结合的过程(Girish *et al.*, 1992).例如,烃源岩热演化过程中产生的有机酸会直接影响到上覆储层砂岩中碳酸盐胶结物和铝硅酸盐矿物的稳定性(Surdam *et al.*, 1989).因此,伴随着油气流体的充注必然会导致储层的次生变化,而成岩矿物以及赋存在成岩矿物中的烃类包裹体则可以很好地记录下这些变化.克拉 2 气田储层砂岩中的自生石英非常稀少,而且没有观察到任何长石加大的现象.相同的结论在国外的同类型研究中也可见到:

Girish(1992)等人的研究表明:在同一层位中,油层砂岩中石英和长石加大边的含量要远远的小于水层中的砂岩,说明油气的充注抑制了这些硅质矿物的沉淀.此外,克拉 2 储层砂岩中自生高岭石比较发育,并且和自生微晶石英、沥青同时沉淀在长石溶蚀后的孔隙中. CT 扫描也显示这些储层沥青多与高岭石相伴生,并且可以占到整个岩石体积的 1% 左右(图 14).推断这 3 种成岩-成藏产物很可能是因晚期油气充注而同时形成的,证据如下: (1)勘探表明,克拉 2 气田是一个含气丰度非常高的干气气藏,并且伴生有少量的凝析油,说明其下伏烃源岩的成熟度非常高.当这些油气沿断裂进入到储层时必定会伴随着油气裂解产生的有机酸充注,当这些有机酸进入到储层后,便会与长石颗粒发生化学反应,进而沉淀出高岭石和微晶石英; (2)测井结果表明,现今克拉 2 气田储层中存在一个近 300 m 的气层,储层中沥青是晚期天然气成藏时大规模气洗作用形成的(卓勤功等, 2011; Lu *et al.*, 2012).这些高成熟的油气流体充注,一方面带来了数量客观的高温有机酸流体,溶蚀长石形成高岭石和微晶石英;另一方

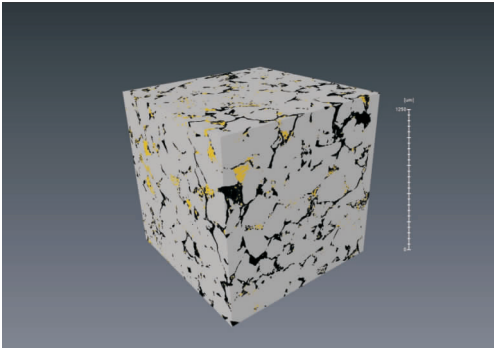


图 14 克拉 201 井储层砂岩沥青和高岭石空间分布
Fig. 14 Spatial distribution of kaolinite and bitumen in the sandstone of Well KL201
黑色:沥青+孔隙;黄色:高岭石;灰色:骨架碎屑和基质

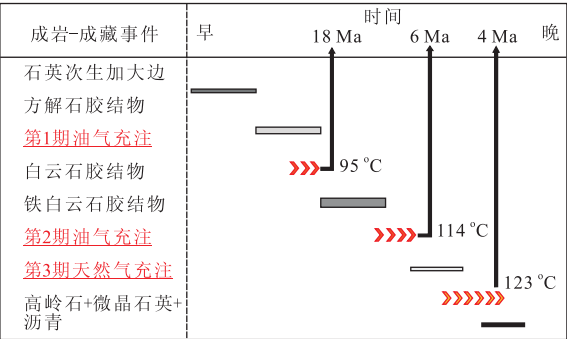


图 15 克拉 2 气田巴什基奇克组砂岩成岩-成藏共生序列
Fig. 15 Paragenetic sequence of diagenetic minerals and oil charge events in K1bs reservoir sandstones from the Kela 2 Gas Field

面大量的天然气充注可以萃取先期赋存在高岭石晶间孔隙中早期原油的轻质组分,形成储层沥青;(3)本区高岭石是最晚期的成岩产物(邹华耀,2005),形成时间要晚于铁白云石.原因如下:(1)高岭石与固体沥青同时沉淀于长石溶蚀后的孔隙中并与铁白云石接触,且不同程度溶蚀铁白云石(图 6b、6d),说明其形成时间要晚于铁白云石;(2)克拉 2 巴什基奇克储层上部被巨厚的膏岩盐层所封闭,大气降水很难进入到储层中.但是在其下部,逆冲断层非常发育(图 1b),使得储层处于一个半开放的体系中,下部侏罗系煤系地层中排出的有机酸可以沿着这些断裂通道进入到储层中溶蚀长石等碎屑颗粒形成高岭石.据此推测本区高岭石并非大气水淋滤形成的早期成岩作用产物(Meisler *et al.*, 1984; Morad *et al.*, 2000; Ketzer *et al.*, 2003);而可能是下部有机酸沿断裂注入储层,溶蚀长石后形成的晚期成岩作用产物(Surdam *et al.*, 1984; Van Keer *et al.*, 1998).

在以上研究的基础上,结合成岩共生序列,克拉 2 地区 3 期油气流体充注与成岩矿物先后顺序如图 15 所示:第 1 期油气充注之前形成的成岩矿物组合为石英次生加大边和早期方解石,并以黄褐色荧光包裹体的形式记录于方解石胶结物中;第 2 期油气流体充注前的成岩矿物组合为石英次生加大边,方解石和白云石,并以黄白—蓝白色荧光包裹体的形式记录于白云石胶结物中;第 3 期天然气充注前的成岩矿物组合为石英次生极大边、方解石、白云石和铁白云石,并以不发荧光气烃包裹体的形式记录于铁白云石中.克拉 2 地区油气充注以第 2 和第 3 期高成熟油气流体为主,尤其是天然气,是本区最晚成藏的流体.这些天然气多以气烃包裹体的形式被记录在晚期铁白云石胶结物中,有时这些气烃包裹体甚至可以切穿整个石英颗粒(图 7g).以上研究证明:克拉 2 地区的天然气成藏时间很晚,并以同时期沉淀于孔隙中的自生高岭石、微晶石英和储层沥青的成岩-成藏形式记录下来.

5 结论

- (1)库车凹陷克拉 2 气田砂岩储层成岩矿物组合为石英次生加大边、方解石,白云石,高岭石、微晶石英和铁白云石,其中,白云石是最主要的胶结物,高岭石和微晶石英则是最晚形成的成岩矿物.
- (2)发育 3 期油气流体充注:第 1 期是以黄褐色荧光包裹体为代表的低成熟油气流体,充注时间为 18 Ma;第 2 期是以黄白—蓝白色荧光包裹体为代表的高成熟油气流体,充注时间为 6 Ma;第 3 期为天然气充注,以不发荧光的气烃包裹体为代表,充注时间为 4 Ma.
- (3)成岩矿物可以很好的记录油气充注过程:第 1 期油气充注被记录在早期方解石胶结物中;第 2 期油气充注被记录在白云石胶结物中;第 3 期天然气充注被记录在晚期形成的铁白云石胶结物中.

References

Baron, M., Parnell, J., Mark, D., et al., 2008. Evolution of Hydrocarbon Migration Style in a Fractured Reservoir Deduced from Fluid Inclusion Data, Clair Field, West of Shetland, UK. *Marine and Petroleum Geology*, 25(2): 153—172. doi:10.1016/j.marpetgeo.2007.05.010
Bourdet, J., Pironon, J., Levresse, G., et al., 2010. Petroleum Accumulation and Leakage in a Deeply Buried Car-

- bonate Reservoir, Nispero Field (Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): 126—142. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2009. 07. 003
- Dutkiewicz, A., Ridley, J., Buick, R., 2003. Oil-Bearing CO₂-CH₄-H₂O Fluid Inclusions: Oil Survival since the Palaeoproterozoic after High Temperature Entrapment. *Chemical Geology*, 194(1—3): 51—79. doi: 10. 1016/s0009—2541(02)00271—1
- Feng, Y., Zhu, C. Q., Wang, X. H., et al., 2013. A Capacity Prediction Model for the Low Porosity Fractured Reservoirs in the Kuqa Foreland Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 367—371. doi: 10. 1016/s1876—3804(13)60044—0
- Gierlowski-Kordesch, E., Rust, B. R., 1994. The Jurassic East Berlin Formation, Hartford Basin, Newark Supergroup (Connecticut and Massachusetts): A Saline Lake-Playa-Alluvial Plain System. In: Renaut, R. W., Last, W. M., eds., *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes. SEPM Special Publication*, Vol. 50, Tulsa, 249—265.
- Goldstein, R. H., 2001. Fluid Inclusions in Sedimentary and Diagenetic Systems. *Lithos*, 55(1—4): 159—193. doi: 10. 1016/s0024—4937(00)00044—x
- Goldstein, R. H., Reynolds, T. J., 1994. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. SEPM Short Course. Tulsa.
- Gui, L. L., Liu, K. Y., Liu, S. B., 2015. Hydrocarbon Charge History of Yingdong Oilfield, Weostern Qaidam Basin. *Earth Science*, 40(5): 890—899 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Li, Q. M., 2008. Petroleum Geology of Kela-2, the most Productive Gas Field in China. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4—5): 335—343. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2008. 01. 002
- Jia, C. Z., Zhou, X. Y., Wang, Z. M., et al., 2002. Petroleum Geological Characteristics of Kela-2 Gas Field. *Chinese Science Bulletin*, 47(S1): 94—99 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 1007/bf02902824
- Ketzer, J. M., Holz, M., Morad, S., et al., 2003. Sequence Stratigraphic Distribution of Diagenetic Alterations in Coal-Bearing, Paralic Sandstones: Evidence from the Rio Bonito Formation (Early Permian), Southern Brazil. *Sedimentology*, 50(5): 855—877. doi: 10. 1046/j. 1365—3091. 2003. 00586. x
- Lu, W. J., Chou, I. M., Burruss, R. C., Song, Y. C., 2007. A Unified Equation for Calculating Methane Vapor Pressures in the CH₄-H₂O System with Measured Raman Shifts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 3969—3978.
- Lu, X. S., Liu, K. Y., Zhuo, Q. G., et al., 2012. Palaeo-Fluid Evidence of the Multi-Stage Hydrocarbon Charges in Kela-2 Gas Field, Kuqa Foreland Basin, Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(5): 574—582. doi: 10. 1016/s1876—3804(12)60078—0
- Lu, X. S., Song, Y., Zhao, M. J., 2014. Thermal History Modeling of Complicated Extrusional Section and Source Rock Maturation Characteristics in Kuqa Foreland Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(10): 1547—1557 (in Chinese with English abstract).
- Meisler, H., Leahy, P. P., Knobel, L. L., 1984. Effect of Eustatic Sea-Level Changes on Saltwater-Freshwater in the North Atlantic Coast Plain. *United State Geological Survey Water-Supply Paper*, 2255. U. S. A., 27.
- Morad, S., Ketzer, J. M., De Ros, L. F., 2000. Spatial and Temporal Distribution of Diagenetic Alterations in Siliciclastic Rocks: Implications for Mass Transfer in Sedimentary Basins. *Sedimentology*, 47: 95—120. doi: 10. 1046/j. 1365—3091. 2000. 00007. x
- Parnell, J., 2010. Potential of Palaeofluid Analysis for Understanding Oil Charge History. *Geofluids*, 34(10): 73—82. doi: 10. 1111/j. 1468—8123. 2009. 00268. x
- Parnell, J., Carey, P. F., Monson, B., 1996. Fluid Inclusion Constraints on Temperatures of Petroleum Migration from Authigenic Quartz in Bitumen Veins. *Chemical Geology*, 129(3—4): 217—226. doi: 10. 1016/0009—2541(95)00141—7
- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. In: MSO America, eds., *Reviews in Mineralogy*, Vol. 12. Mineralogical Society of America, Washington.
- Saigal, G. C., Bjorlykk, K., 1992. The Effects of Oil Emplacement on Diagenetic Processes: Examples from the Fulmar Reservoir Sandstones, Central North Sea; *Geologic Note (1). AAPG Bulletin*, 76(7): 1024—1033. doi: 10. 1306/bdff8966—1718—11d7—8645000102c1865d
- Schmid, S., Worden, R. H., Fisher, Q. J., 2004. Diagenesis and Reservoir Quality of the Sherwood Sandstone (Triassic), Corrib Field, Slyne Basin, West of Ireland. *Marine and Petroleum Geology*, 21(3): 299—315. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2003. 11. 015
- Surdam, R. C., Boese, S. W., Crossey, L. J., 1984. The Chemistry of Secondary Porosity in Clastic Diagenesis. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 37: 127—149.
- Surdam, R. C., Crossly, L. J., Hagen, E. S., 1989. Organic-Inorganic Interactions and Sandstone Diagenesis. *The*

- American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73(1): 1—23.
- Van Keer, I. V., Muchez, P., Viaene, W., 1998. Clay Mineralogical Variations and Evolutions in Sandstone Sequences near a Coal Seam and Shales in the Westphalian of the Campine Basin (NE Belgium). *Clay Minerals*, 33(1): 159—169. doi:10.1180/000985598545345
- Zeng, L. B., Wang, H. J., Gong, L., Liu, B. M., 2010. Impacts of the Tectonic Stress Field on Natural Gas Migration and Accumulation: A Case Study of the Kuqa Depression in the Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 335—343.
- Zhang, N., 2001. The Characteristics of Organic Inclusions of Kela 2 and Kela 3 Gas Fields and their Indicative Significance to Oil and Gas Pool-Forming in Kuqa Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 28(4): 57—59, 103—12, 4.
- Zhang, R. H., Yang, H. J., Wang, J. P., 2014. The Formation Mechanism and Exploration Significance of Ultra-Deep, Low-Porosity and Tight Sandstone Reservoirs in Kuqa Depression, Tarim Basin, 2014. *Acta Petrolei Sinica*, 35(6): 1057—1069 (in Chinese).
- Zhao, M. J., Lu, S. F., Wang, T. D., et al., 2002. Geochemical Characteristics of Natural Gas and Accumulation Process of Oil Charge in Kela 2 Gas Field. *Chinese Science Bulletin*, 47(z1): 109—115 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo, Q. G., Zhao, M. J., Xie, H. W., et al., 2011. Relationship between Reservoir Bitumen and Hydrocarbon Migration in Dabei Region, Kuqa Foreland Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 33(2): 193—196 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. Y., Hao, F., Liu, G. D., et al., 2005. Genesis of Authigenic Kaolinite and Gas Accumulation in Bashijiqike Fm Sandstone in Kuqa Thrust Belt. *Oil & Gas Geology*, 26(6): 786—791, 799 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 桂丽黎, 刘可禹, 柳少波, 等, 2015. 柴达木盆地西部英东地区油气成藏过程. *地球科学*, 40(5): 890—899.
- 贾承造, 周新源, 王招明, 等, 2002. 克拉2气田石油地质特征. *科学通报*, 47(S1): 91—96.
- 鲁雪松, 宋岩, 赵孟军, 等, 2014. 库车前陆盆地复杂挤压剖面热演化历史模拟及烃源岩成熟度演化特征. *天然气地球科学*, 25(10): 1547—1557.
- 张甯, 2001. 库车坳陷克拉苏构造带有机包裹体特征及对油气成藏的指示意义. *石油勘探与开发*, 28(4): 57—59, 103—12, 4.
- 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等, 2014. 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. *石油学报*, 35(6): 1057—1069.
- 赵孟军, 卢双舫, 王庭栋, 等, 2002. 克拉2气田天然气地球化学特征与成藏过程. *科学通报*, 47(Z1): 109—115.
- 卓勤功, 赵孟军, 谢会文, 等, 2011. 库车前陆盆地大北地区储层沥青与油气运聚关系. *石油实验地质*, 33(2): 193—196.
- 邹华耀, 郝芳, 柳广弟, 等, 2005. 库车冲断带巴什基奇克组砂岩自生高岭石成因与油气成藏. *石油与天然气地质*, 26(6): 786—791, 799.