

库车前陆盆地牙哈构造带油气成藏过程研究

刘建良^{1,2}, 姜振学³, 刘可禹^{1,2,4}, 桂丽黎^{1,2}, 李峰³, 邢金艳³

(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;

3. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249;

4. CSIRO Earth Science and Resource Engineering, Bentley WA 6102, Australia)

摘要:利用流体包裹体岩相观察、定量颗粒荧光技术、全扫描荧光分析等实验方法,结合原油和天然气物理及地球化学特征,系统地探讨了牙哈构造带的油气成藏过程。研究表明,牙哈构造带经历了2期油气成藏过程:第一期发生在吉迪克组沉积期(23~12Ma),以三叠系黄山街组成熟的原油充注为主,该期原油充注量较少,原油从烃源岩排出并经过长距离侧向运移后,从牙哈构造带西侧注入,再向东部运移,在牙哈2地区古近系—白垩系储层中形成46m的古油层,吉迪克组储层内未见古油层;第二期发生在库车组沉积以后(5~0Ma),以中下侏罗统大量成熟—高成熟煤型气充注为主,天然气分别从构造带东西两侧注入,再向中部聚集,天然气首先在浮力作用下向圈闭顶部聚集,迫使古油水界面向下迁移,后由于天然气持续充注,原油遭受气洗,最终形成现今凝析气藏。

关键词:库车前陆盆地;牙哈构造带;流体包裹体;定量荧光;油气运移;成藏过程

中图分类号:TE122.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2015)01-0043-11

引用格式:Liu Jianliang, Jiang Zhenxue, Liu Keyu, *et al.* Hydrocarbon accumulation process of the Yaha tectonic belt, Kuqa Foreland Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(1): 43-53. [刘建良, 姜振学, 刘可禹, 等:库车前陆盆地牙哈构造带油气成藏过程研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(1): 43-53.]

0 引言

油气成藏过程是油气成藏研究的重要内容^[1-2],包括油气的生成、运移、聚集以及保存和破坏各个环节,既是石油地质理论的核心问题,又是有效解决油气勘探活动的关键问题^[3],对指明油气勘探方向具有重要的地质意义^[1,4-5]。

牙哈构造带位于库车前陆盆地南部斜坡带上,在白垩系、古近系和新近系的吉迪克组均有油气发现,而牙哈凝析气田也是中国目前正在开发的最大的整装凝析气田^[6]。前人^[7-10]对库车前陆盆地的油气成藏过程做了大量的研究,对牙哈构造带的油气成藏问题具有一定的指示意义,但这些结果不仅存在分歧,而且都没有从牙哈构造带古流体和现代流

体特征角度进行具体的成藏过程研究,因此开展此项研究具有重要意义。

本文在前人研究的基础上,利用流体包裹体分析、定量颗粒荧光(QGF、QGF-E)及全扫描荧光分析(TSF)的实验方法,并结合原油和天然气物理和地球化学特征以及研究区石油地质特征,综合分析了牙哈构造带的油气成藏过程。

1 研究区概况

牙哈构造带位于库车前陆盆地南部斜坡带上,是在古生代残余古隆起基础上发育起来的中、新生代碎屑岩地层,受区域构造运动影响,形成牙哈断裂构造带,整体呈NEE向展布[图1(a)]。北侧为库车坳陷,发育三叠系和侏罗系2套烃源岩,烃源岩条

收稿日期:2014-03-17;修回日期:2014-05-18.

基金项目:典型前陆盆地致密储层天然气藏形成机理与成藏模式(编号:2011ZX05003-001);盆地深层致密砂岩气藏形成机理、过程与评价技术(编号:2011ZX05008-004)联合资助.

作者简介:刘建良(1988-),男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事含油气系统定量分析. E-mail: 51liujianliang@163.com.

件较好,且具有分布广、厚度大、有机质丰度高、成熟度高的特点^[11-12];储集层主要发育在白垩系、古近系以及新近系的吉迪克组,白垩系顶部发育不整合面,直接与古近系底砂岩接触;盖层主要为古近系上部和新近系的膏泥岩地层,具有多套储盖组合。油气藏主要发育在古近系—白垩系储层以及新近系吉迪克组底砂岩层中,具有底水油藏、带底油的底水凝析气藏、底水凝析气藏以及边水凝析气藏 4 种油气藏类型,且自西向东呈现由油藏向凝析气藏过渡的特征[图 1(b)]。

牙哈构造带油藏和凝析气藏均为常温、常压油气藏,原油和天然气具有如下特征。原油:平均密度较低,分布在 $0.79 \sim 0.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,且大部分在 $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右;黏度较低,分布在 $1.43 \sim 5.12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 之间;含蜡量较高,为 $10.5\% \sim 16.03\%$;含氮化合物为 $1 \sim 18.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;原油成熟度(R_o)为 $0.744\% \sim 0.926\%$,为成熟原油^①。天然气:各井平均甲烷含量分布在 $81.26\% \sim 85.18\%$ 之间;干燥系数为 $0.85 \sim 0.9$,为湿气; iC_4/nC_4 值分布在 $0.65 \sim 1.08$ 之间; $\delta^{13}C_2$ 值分布在 $-23.9\% \sim -21.9\%$ 之间;利用包建平^[13]建立起的针对库车坳陷不同类型烃源岩与煤型气成熟度关系的公式,计算得到的天然气成熟度为 $0.985\% \sim 1.332\%$,为成熟—高成熟气。

2 实验样品与方法原理

流体包裹体在油气运移、成藏研究中具有非常重要的作用^[14-16],多源、多期成藏的复杂油气藏储集层中一般会形成多期不同类型的流体包裹体记录^[17]。随着油气成熟度的升高,包裹体荧光颜色呈现由褐色→黄色→黄绿色→蓝色(蓝移)的变化^[18],气液比也随之增大^[19]。荧光颜色与油包裹体密度有一定的对应关系,刘可禹等^[20]通过对塔里木盆地塔中奥陶系储层中包裹体的研究发现,近黄色荧光的油包裹体密度一般为 $0.8299 \sim 0.8550 \text{ g/cm}^3$,属于正常原油包裹体,近蓝色荧光的油包裹体密度一般为 $0.7972 \sim 0.8063 \text{ g/cm}^3$,属于凝析油气包裹体。

定量颗粒荧光技术(QGF、QGF-E)是通过检测储层岩石颗粒及其二氯甲烷抽提溶液的荧光响应,来评价油气的特性及识别古油层和残余油层^[21-23]。常用分析参数包括 QGF 指数、QGF 强度、QGF-E 强度以及最大荧光强度波长(λ_{\max}),其中 QGF 指数为 $375 \sim 475 \text{ nm}$ 之间的平均光谱强度与 300 nm 处光谱强度的比值,QGF 强度是光谱图面积与 300 nm 处光谱强度的比值,QGF-E 强度是归一化到 1 g 样品

20 mLDCM 溶液的最大光谱强度, λ_{\max} 是最大光谱强度对应的波长。一般认为,荧光光谱中最大强度对应的波长(λ_{\max})与油气成熟度有关, λ_{\max} 值越大油气的成熟度越低;古油层具有较强的荧光强度,QGF 指数一般大于 4,而水层的光谱平缓且接近基线,QGF 指数一般小于 6;残余油层的 QGF-E 强度一般大于 20 pc ,而水层的 QGF-E 强度一般小于 40 pc ^[22]。

全扫描荧光分析(TSF)是利用三维激发—发射荧光、荧光强度反映原油、岩石可溶烃指纹特征的技术^[24-25]。常利用 R_1 参数($R_1 = E_{m360 \text{ nm}}/E_{m320 \text{ nm}}$,激发光为 270 nm)以及光谱峰值对应的波长(E_x/E_m),对原油性质进行评价,凝析油的 R_1 值通常小于 2.0, E_x/E_m 值主要集中在 $235 \sim 261$ 或 $345 \sim 370$ 之间,正常原油通常 $2.0 < R_1 < 3.0$, E_x/E_m 值主要集中在 $258 \sim 268$ 或 $348 \sim 380$ 之间^[25-26]。

本文对牙哈地区白垩系、古近系及新近系吉迪克组储层进行了取样分析,对其中 21 块样品进行了包裹体岩相观察,利用 ZEISS Imager A1m 多功能显微镜,从包裹体发育的类型、产状、颜色、大小和气液比等方面进行了详细的观察与描述;选取了 3 个层系共 28 块岩石样品,其中牙哈 2 井 20 块,牙哈 5 井 8 块,经过严格的前处理步骤后^[23],利用澳大利亚 CSIRO 的储集层颗粒荧光分析仪,对二氯甲烷萃取的吸附烃进行 QGF-E 分析,对岩石颗粒进行 QGF 分析;选取了 11 块岩石样品,利用二氯甲烷对其颗粒间游离烃进行抽提,进而利用荧光分析仪进行全扫描荧光分析。

3 实验结果

3.1 包裹体特征

通过对牙哈地区包裹体观察发现,吉迪克组储层中油气包裹体整体不发育,只能在岩石薄片里的个别颗粒上观察到,古近系—白垩系凝析气藏储层的上部包裹体比较发育,下部不发育,包裹体颜色以黄白色和黄绿色为主。通过观察可以将油气包裹体划分为 2 期:第 I 期主要发育在穿石英颗粒裂纹内,也可见粒内零星分布以及次生加大边内分布,颜色以黄白色和黄绿色为主,气液比较小,分布在 $1\% \sim 9\%$ 之间,且以小于 5% 为主[表 1,图 2(a),图 2(b)],属于正常油包裹体;第 II 期以发蓝色、蓝白色荧光的油包裹体为主,偶见气包裹体,该期包裹

① 包建平,朱翠山.库车坳陷油气运移特征研究.江汉石油学院.内部报告,2004.

体整体发育较少,产状主要为粒内零星和群体状分布,也可见穿颗粒串珠状分布,该期包裹体气液比较大,主要分布在 9%~52% 之间[表 1,图 2(c),图 2(d)],属于成熟度较高的凝析油和湿气包裹体。

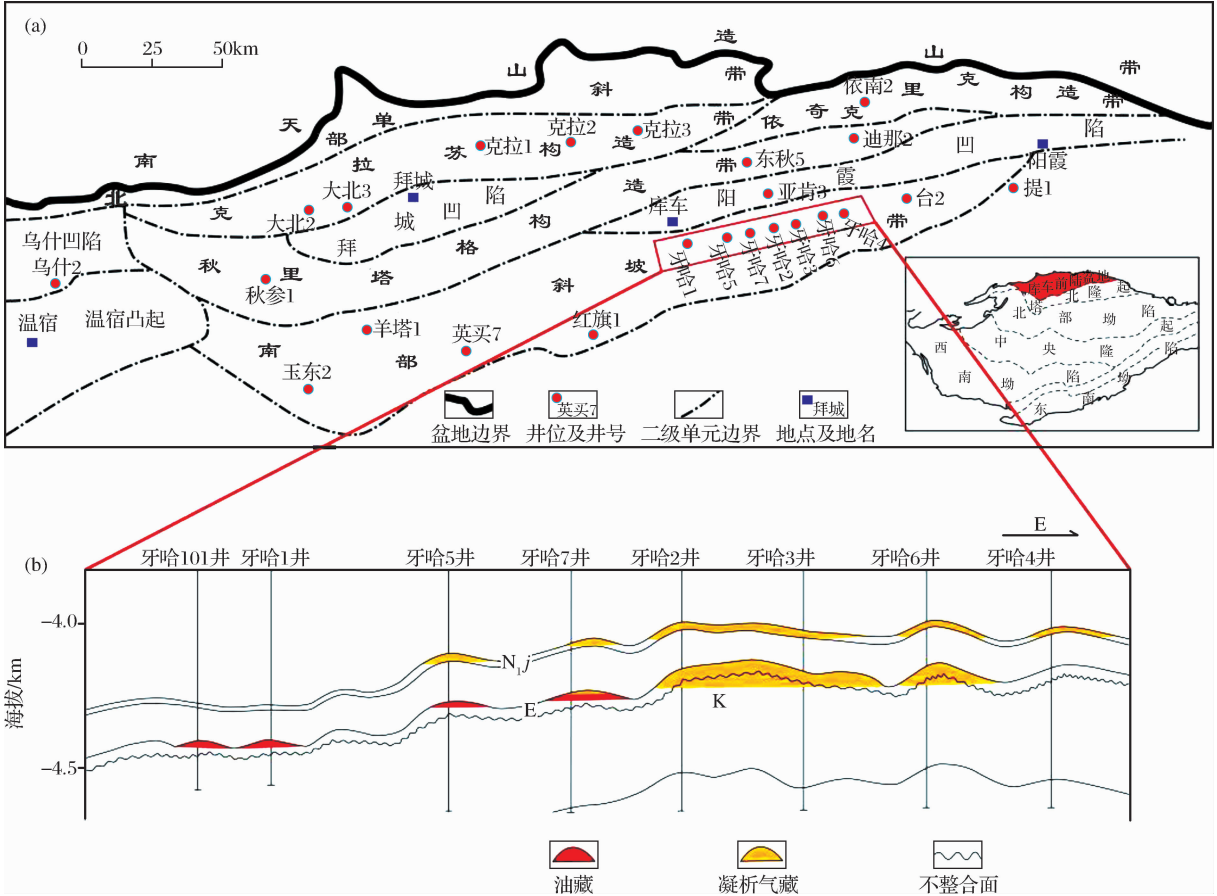


图 1 库车前陆盆地牙哈构造带位置(a)及油气藏剖面(b)

Fig. 1 Location(a) and oil and gas reservoir cross section(b) of the Yaha tectonic belt, Kuqa Foreland Basin

表 1 库车前陆盆地牙哈地区油气包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions in the Yaha area, Kuqa Foreland Basin

井名	深度/m	层位	产状	荧光颜色	大小/ μm	气液比/%
牙哈 2	4 952	N_{1j}	穿颗粒裂纹串珠状	黄绿色	1~5	2~6
				蓝色	4、11	30、52
	5 108	E	穿颗粒裂纹串珠状 粒内群体状	黄白色	2~7	1~4
				蓝白色	4~14	12~25
牙哈 5	5 123	E	穿颗粒裂纹串珠状 粒内点状	黄绿色	1~13	1~4
				蓝白色	10、11	21、42
	5 143	K	穿颗粒裂纹串珠状	黄白色	3、4	4、9
				黄白色	5~15	1~3
牙哈 5	5 087	N_{1j}	穿颗粒裂纹、粒内点状	蓝白色	5~40	10~39
	5 095	N_{1j}	穿颗粒裂纹、粒内点状	蓝白色	2~11	8~30
	5 101	N_{1j}	穿颗粒裂纹、粒内点状	黄白色	1~4	2~8

3.2 QGF、QGF-E 实验结果

牙哈 2 井实验样品的深度范围为 5 102~5 205m。QGF 实验结果显示[图 3(a)],QGF 指数分

布在3.2~19.1 之间,QGF 强度分布在 2.4~39.5pc 之间,且随深度的变化逐渐降低。5 143.25m 以深样品的 QGF 指数均大于 4,QGF 强度也基本分布在

10pc 以上,解释为古油层;该深度以下 QGF 指数基本小于 4, QGF 强度也明显降低,解释为水层。QGF-E 实验结果显示[图 3(b)], QGF-E 强度分布在 9.3~240.3pc 之间,5 162.05m 以深样品的 QGF-E 强度值基本都在 40pc 以上,解释为残余油层,该深度以深的

QGF-E 强度明显降低且基本小于 40pc,解释为水层; λ_{\max} 值分布在 358~477nm 之间,5 162.05m 处 λ_{\max} 值异常大(477nm),说明该样品点吸附一些低成熟度原油,除此之外,其他样品的 λ_{\max} 值均分布在 358~375nm 之间,表明吸附烃成熟度较高。

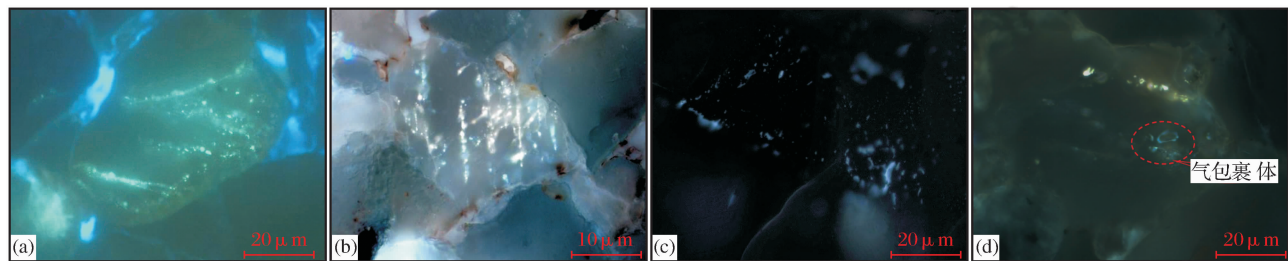


图 2 库车前陆盆地牙哈 2 井和牙哈 5 井储层流体包裹体显微照片

Fig. 2 Photomicrograph of fluid inclusions from the YH2 and YH5 wells, Kuqa Foreland Basin

(a) 牙哈 2 井, K, 5 188.3m, 黄绿色, 荧光; (b) 牙哈 5 井, N_{1j} , 5 095.1m, 黄白色, 荧光;
(c) 牙哈 2 井, E, 5 108m, 蓝色, 荧光; (d) 牙哈 2 井, 4 952.04m, N_{1j} , 气包裹体, 荧光

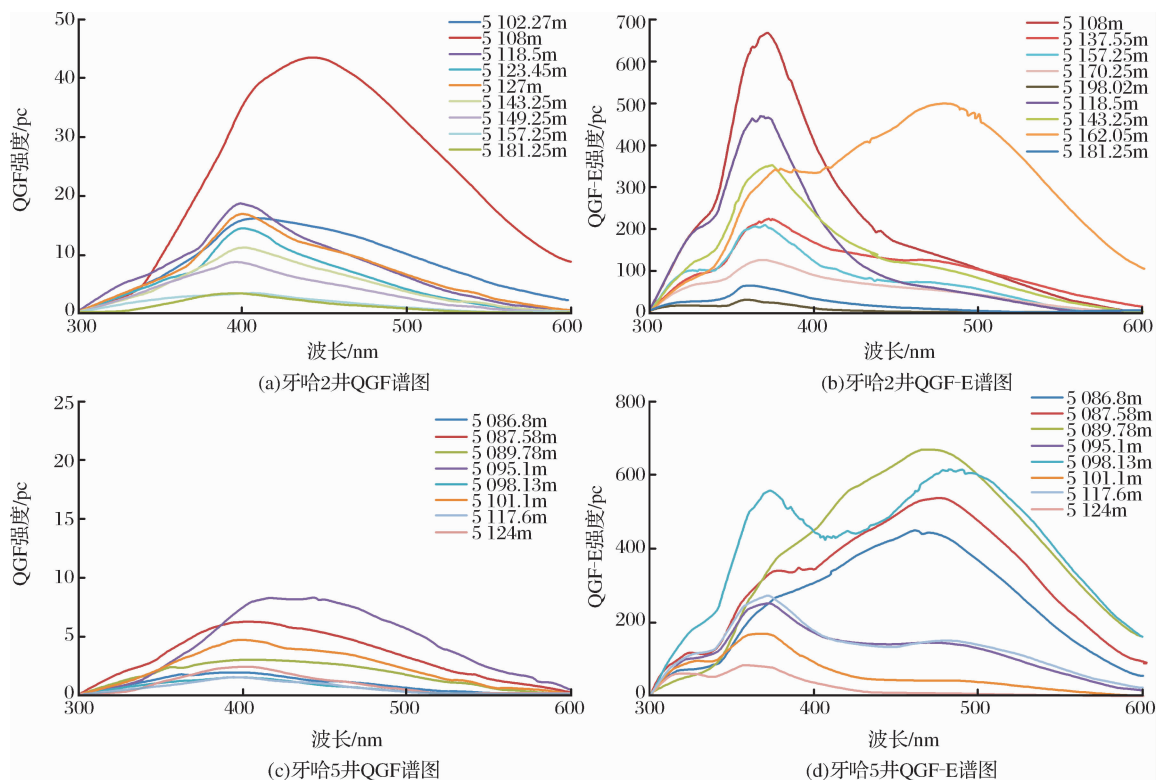


图 3 库车前陆盆地牙哈地区 QGF 和 QGF-E 光谱特征

Fig. 3 QGF(a, c) and QGF-E(b, d) fluorescence spectra in the Yaha area, Kuqa Foreland Basin

牙哈 5 井实验样品的深度范围为 5 086.8~5 124m。QGF 实验结果显示[图 3(c)], QGF 指数分布在 2.7~4.6 之间, QGF 强度分布在 1.8~9.7pc 之间, λ_{\max} 值分布在 388~433nm 之间, 表明无古油层存在。QGF-E 实验结果显示[图 3(d)], QGF-E 强度分布在 27.9~258.2pc 之间, 且

5 117.6m 以深的强度值均大于 156pc, 解释为残余油藏; λ_{\max} 值分布具有明显的 2 个区间, 即 363~373nm 和 463~483nm, 前者表现为凝析油气的特征, 后者为成熟度较低原油的特征。

3.3 TSF 实验结果

牙哈地区储层颗粒间游离烃的 TSF 实验结果

显示,TSF 最大强度(TSF_{max})具有较宽的分布范围,为 $63.75 \sim 2\,967.3pc$,对应的激发光波长(Ex_{max})分布在 $220 \sim 257.96nm$ 之间,发射光波长(Em_{max})分布在 $334.06 \sim 435nm$ 之间, R_1 值分布在 $0.75 \sim 2.27$ 之间, R_2 值分布在 $0.98 \sim 3.07$ 之间。 R_1 值具有明显的 2 个区间,即 $0.75 \sim 1.3$ 和 $2.05 \sim 2.27$ (图 4),分属凝析油和正常油 2 种类型,分别从 2 个区间内选取一个样品,它们的 Ex/Em 值分别为 $234/344$ [图 5(a)]和 $257.96/367.96$ [图 5(b)],同样对应为凝析油和正常油的特征。

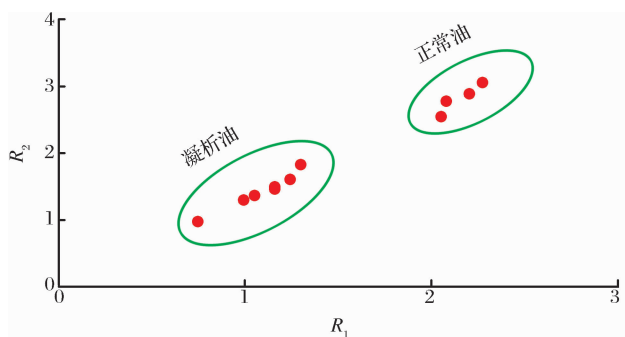


图 4 库车前陆盆地牙哈地区 TSF 参数 R_1 与 R_2 分布特征

Fig. 4 Cross plot of the TSF parameters R_1 and R_2 for normal oil and condensate in Yaha area, Kuqa Foreland Basin

综合以上 3 类实验结果认为,牙哈地区储层内存在 2 种成熟度不同的原油,目前以成熟度较高的凝析油气为主,但在油包裹体内、颗粒表面吸附烃以及部分颗粒间游离烃内包含着成熟度较低的正常原油。

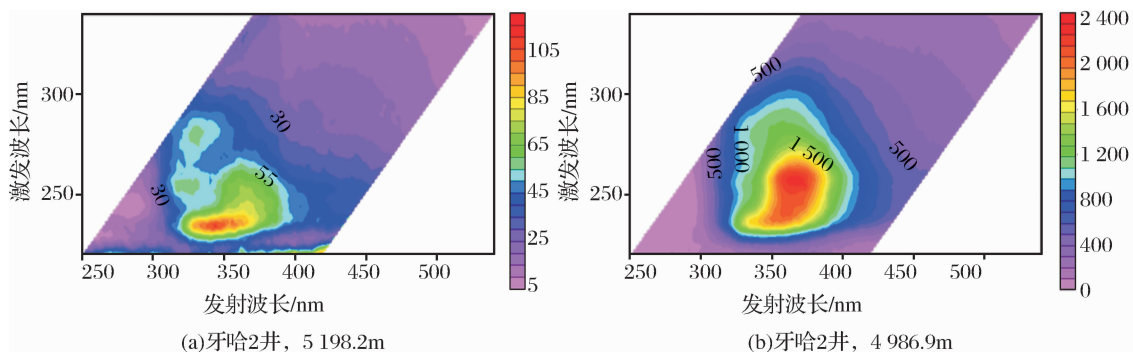


图 5 库车前陆盆地牙哈 2 井储层游离烃三维荧光光谱

Fig. 5 Three-dimensional fluorescence spectrograms of extracted hydrocarbons from sandstone reservoir of the YH2 well, Kuqa Foreland Basin

通过现代流体特征分析及前人研究认为,牙哈地区中、新生界的原油来源于库车坳陷三叠系黄山街组湖相烃源岩^[27],原油的成熟度为 $0.744\% \sim 0.926\%$,为成熟原油,而三叠系黄山街组烃源岩在吉迪克组沉积期($23 \sim 12Ma$)成熟度普遍达到 0.8%

4 讨论

4.1 古油层与残余油层定量分析

通过 QGF、QGF-E 实验结果、GOI 测定结果、测井曲线以及储层地质特征综合分析认为,牙哈 2 井 E+K 储层存在古油层,古油水界面(POWC)为 $5\,144m$,距圈闭顶界($5\,098m$)为 $46m$,古油层规模较小,油气丰度也较低;残余油水界面(ROWC)在古油水界面以下,为 $5\,162.05m$,距圈闭顶界为 $64.05m$,其中造成 $5\,125 \sim 5\,135m$ 处 QGF-E 强度值较小的原因是该段储层物性较差,油气不易充注进去;现今凝析气藏的气水界面(OWC)为 $5\,201.5m$ (图 6)。牙哈 5 井 N_{1j} 储层主要为下部底砂岩,该套底砂岩又分为上砂岩段和下砂岩段,中间以薄层泥岩段相隔,储层中未形成古油层;残余油水界面在 $5\,121.5m$ 处,距圈闭顶界($5\,079.12m$)为 $42.38m$;现今凝析气藏分布在上砂岩段,为半背斜圈闭内的层状边水凝析气藏,气水界面为砂岩段底界,即 $5\,104.12m$ (图 7)。

4.2 油气充注期次及相互作用分析

包裹体观察结果显示,牙哈地区发育 2 期油气包裹体:第一期主要发育油包裹体,其主要特征是发黄白色、黄绿色荧光,气液比较小,成熟度较低;第二期主要发育凝析油气包裹体,其主要特征是发蓝白色、蓝色荧光,气液比较大,成熟度较高,2 期包裹体对应 2 期油气充注事件。

以上,生成大量成熟原油^[28],因此认为原油的充注时期为 $23 \sim 12Ma$ 。前人^[8,29]对天然气成因类型研究后认为,煤型气的乙烷碳同位素值大于 -28% ,油型气的小于 -28% ,而牙哈地区天然气 $\delta^{13}C_2$ 值分布在 $-23.88\% \sim -21.9\%$ 之间,为煤型气,来源于库车坳陷

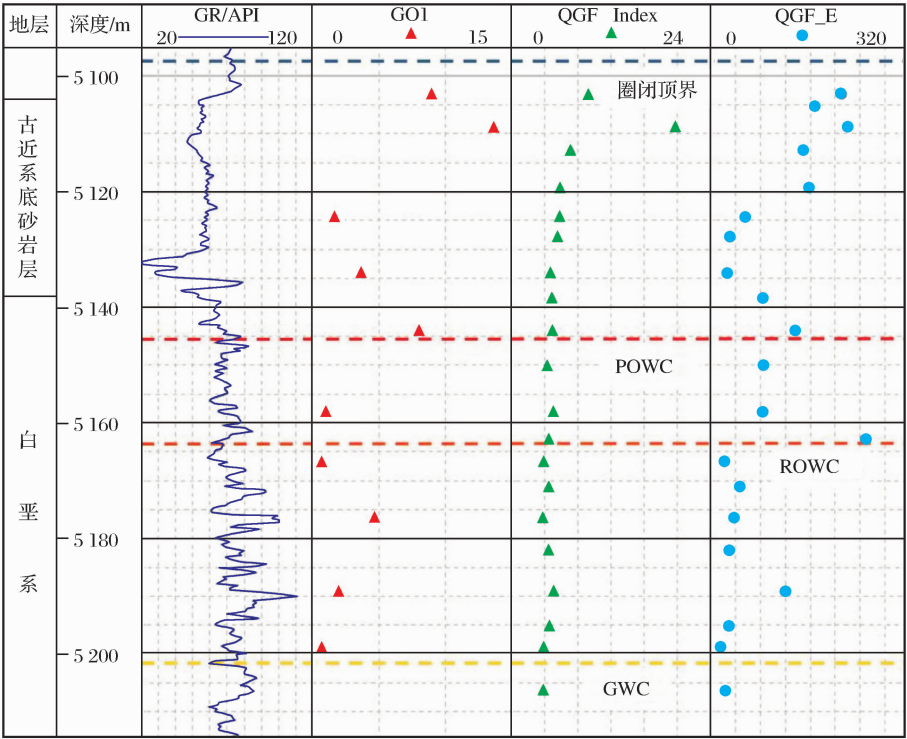


图 6 库车前陆盆地牙哈 2 井 QGF 和 QGF-E 剖面

Fig. 6 QGF and QGF-E parameter depth profile of the YH2 well, Kuqa Foreland Basin

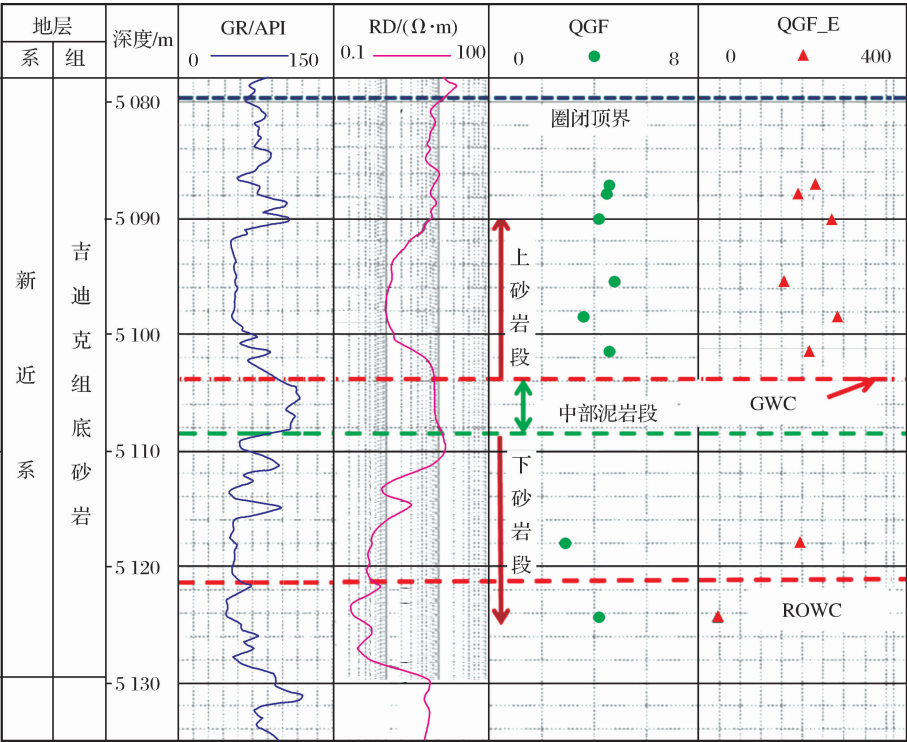


图 7 库车前陆盆地牙哈 5 井 QGF 和 QGF-E 剖面

Fig. 7 QGF and QGF-E parameter depth profile of the YH5 well, Kuqa Foreland Basin

中下侏罗统煤系源岩。天然气的成熟度分布在 0.985%~1.332%之间,为成熟—高成熟煤型气,而下侏罗统源岩在 5Ma 时期,只有坳陷中部达到了 1.0%

以上,而现今(0Ma)整个坳陷的成熟度均达到了1.2%以上^[28],因此认为天然气的充注发生在 5Ma 以后。
原油在遭受气洗作用时,通常会造成轻组分的

正构烷烃大量散失,同时导致重组分的芳烃、蜡质、沥青质等富集^[30-31]。牙哈地区原油的密度较低,但含蜡量比较高,为10.5%~16.03%,同时在薄片观察中也看到了残留沥青质的存在(图8),这些均表明原油遭受了后期天然气的气洗,而凝析气和残留的重质组分是气洗的2种产物。结合前述实验结果认为,早期储层中含有成熟的正常原油,后期遭受气洗,原油发生反凝析作用,形成凝析气,少量的发近蓝色荧光,成熟度较高的凝析油气包裹体也是在这个时期被捕获的。

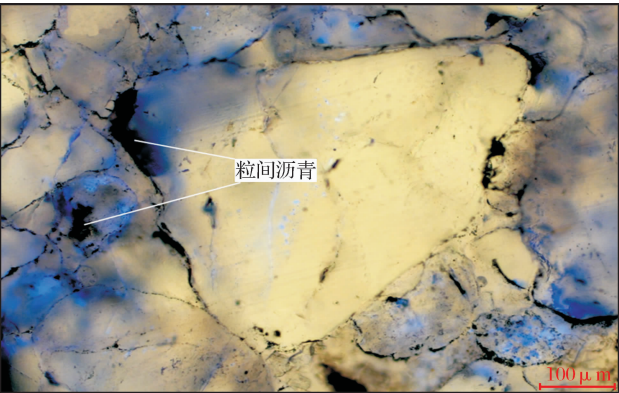


图8 库车前陆盆地牙哈2井5 108m 储层颗粒间及粒内溶蚀孔内残留沥青显微照片

Fig.8 Photomicrograph of the intergranular and intragranular residual asphaltene at 5 108m, YH2 well, I, Kuqa Foreland Basin

4.3 油气运移方向分析

4.3.1 原油运移方向

原油在运移过程中常发生层析作用,即沿着原油运移方向,原油的密度、黏度以及含氮化合物总量

逐渐降低^[32-33]。牙哈地区原油特征显示,从构造带西侧的牙哈1井到东侧的牙哈4井,原油的密度、黏度及含氮化合物总量呈现出逐渐降低的趋势(图9),表明原油是从西侧充注进来再沿着构造带向东侧运移的。

4.3.2 天然气运移方向

天然气在运移过程中常引起以下几个参数的变化:①由于储层中矿物和岩石颗粒对重烃组分具有较强的吸附保留能力,因此沿着运移方向,甲烷含量不断增加^[34];②沿着运移方向,甲烷碳同位素值趋于变小^[35],又因为甲烷碳同位素与天然气成熟度成正比^[36],因此天然气成熟度也趋于变小;③沿着运移方向,天然气中异构烷烃相对富集而正构烷烃不断丢失,即*iC₄/nC₄*值不断增大^[35]。

天然气特征显示,*iC₄/nC₄*值在牙哈3井处达到最大,然后向东西两侧逐渐降低;天然气成熟度在牙哈2井和牙哈3井处最低,向东西两侧的牙哈4井和牙哈1井处逐渐增大;*CH₄*含量在牙哈6井处最大,同样具有向两侧逐渐降低的趋势(图10),这些地球化学特征表明,天然气是从牙哈构造带东西两侧充注进来,然后再向中部运移的。

地质特征表明,中下侏罗统气源岩遍布整个库车坳陷,在牙哈地区东西两侧均有分布,且东部比西部面积小、成熟度低,到了库车期以后整体达到成熟—高成熟阶段^[28],因此天然气具有从牙哈构造带东西两侧注入的地质条件。综合地质和地球化学特征,认为天然气从东西两侧向牙哈构造带注入,且以从西向东注入为主。

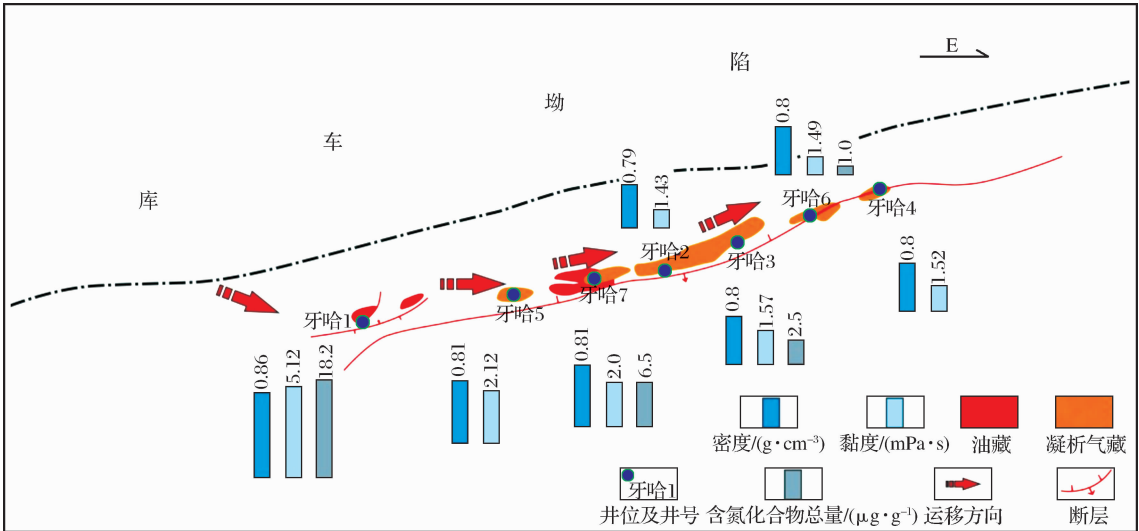


图9 库车前陆盆地牙哈构造带原油性质及运移方向

Fig.9 Oil properties and migration direction in the Yaha tectonic belt, Kuqa Foreland Basin

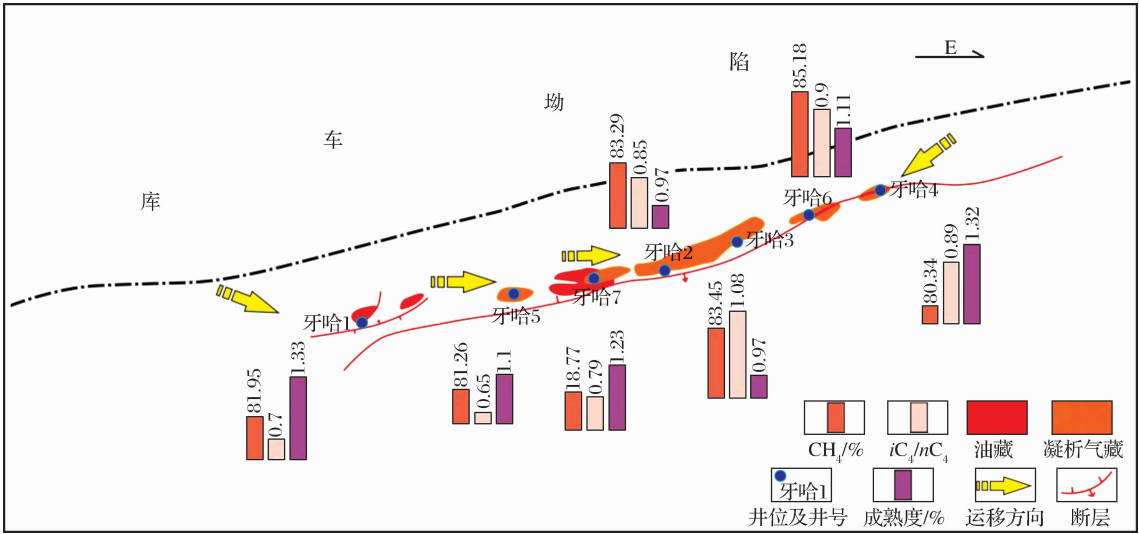


图 10 牙哈构造带天然气性质及运移方向

Fig. 10 Gas properties and migration direction in the Yaha tectonic belt, Kuqa Foreland Basin

4.4 油气成藏过程分析

牙哈构造带经历了早期(海西晚期—燕山早期)逆冲、晚期(燕山晚期—喜马拉雅期)上盘下掉张性正断的负反转活动过程,导致沿断裂带发育了众多不同类型的圈闭构造,其主形成期是在白垩纪以后,且受反转正断层控制^[37]。烃源岩的生烃史表明,古

近纪晚期,三叠系烃源岩进入生油高峰期;新近纪晚期至今,侏罗系烃源岩进入大量排气阶段^[38]。

综合牙哈构造带包裹体特征、定量荧光分析、原油和天然气特征分析、构造演化过程以及库车坳陷烃源岩生烃过程分析,认为牙哈构造带油气成藏主要经历了以下 2 个阶段(图 11)。

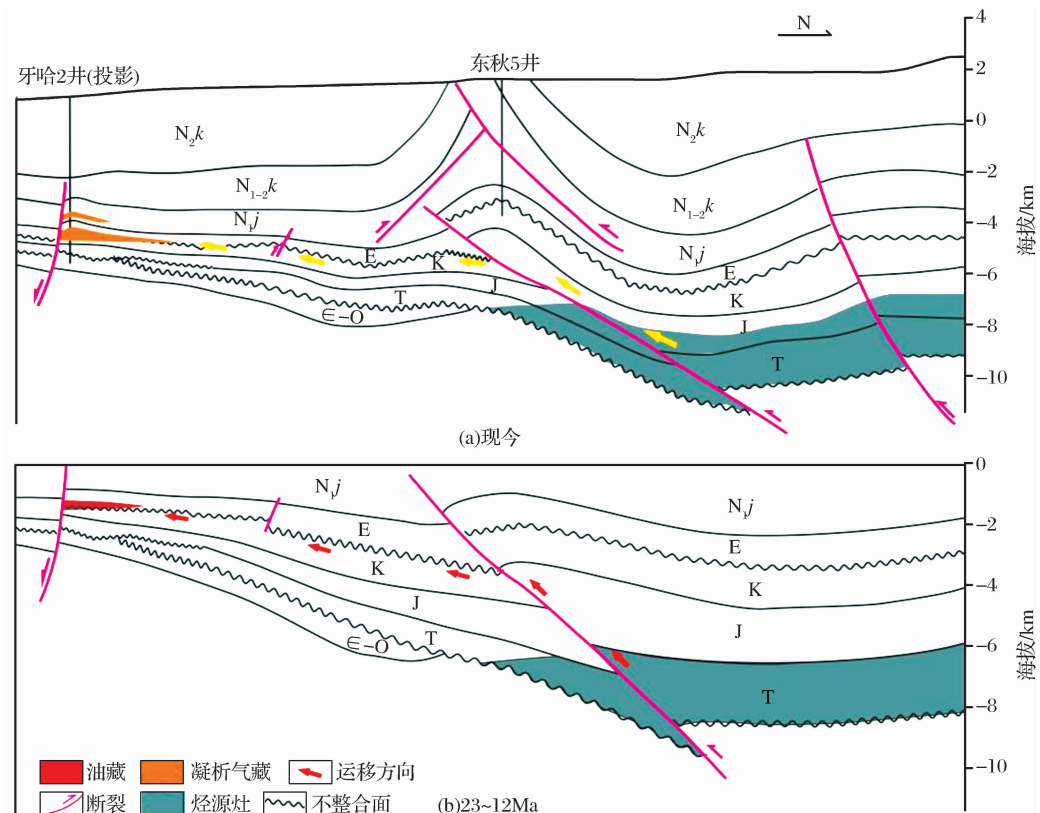


图 11 库车前陆盆地牙哈构造带油气成藏过程

Fig. 11 Oil and gas accumulation process in the Yaha tectonic belt, Kuqa Foreland Basin

新近系吉迪克组沉积期(23~12Ma),随着埋深的增大,库车坳陷三叠系黄山街组湖相烃源岩达到了成熟阶段,生成的一部分成熟原油由北向南经过长距离的侧向运移,到达南部斜坡带上的牙哈地区,此时受构造运动影响,牙哈地区已形成多种类型的受断裂控制的圈闭。原油从牙哈构造带西侧的牙哈1地区注入,然后沿构造带再向东侧运移。在牙哈2地区古近系—白垩系的半背斜圈闭内形成了油气丰度较低的古油藏,古油柱高度为46m,古油水界面为5143.25m,吉迪克组底砂岩中只聚集了少量原油,未见古油藏。

库车组沉积期至现今(5~0Ma),喜马拉雅晚期运动使深部构造变形加剧,地层快速埋藏,库车坳陷中下侏罗统的煤系烃源岩快速达到了成熟—高成熟演化阶段,生成了大量成熟—高成熟的天然气,分别从牙哈构造带东西两侧注入,再向构造带中部运移。天然气首先在浮力作用下向圈闭上部聚集,迫使古油水界面向下迁移(牙哈2井),形成残余油水界面。随着天然气的持续充注,原油遭受气洗,轻质的原油发生反凝析作用溶解在天然气中形成凝析气,重质组分残留下来,其中一部分凝析气沿着垂向断裂向上运移,受到上覆膏泥岩层的垂向封堵而聚集在吉迪克组底砂岩中,最终形成了现今的凝析油气藏。

5 结论

(1)牙哈地区中、新生界发育2期油气包裹体:第一期以发黄白色和黄绿色荧光、气液比较小的油包裹体为主;第二期以发蓝白色和蓝色荧光、气液比较大的凝析油气包裹体为主,对应2期油气充注事件。

(2)牙哈地区在古近系—白垩系储层中存在小规模古油藏,如牙哈2地区古油柱高度为46m,为早期原油充注的结果,新近系吉迪克组中未见古油藏;TSF结果和残留重质组分表明,早期原油遭受了后期天然气气洗,原油发生反凝析作用,形成凝析气和重质组分。

(3)牙哈地区经历2期油气成藏过程:23~12Ma时期,三叠系黄山街组成熟原油沿构造带西侧向东侧充注进来,在古近系—白垩系储层中形成小规模古油藏;5~0Ma时期,中下侏罗统成熟—高成熟的煤型气分别从构造带的东西两侧向中部充注,天然气首先向圈闭顶部聚集,迫使牙哈2井古油水界面向下迁移,形成残余油水界面,后来随着天然气的持续充注,原油遭受气洗,形成凝析气和重质组

分,部分凝析气沿垂向断裂向上运移至吉迪克组底砂岩中,最终形成现今的凝析油气藏。

参考文献(References):

- [1] Zhao Mengjun, Song Yan, Zhang Shuichang, *et al.* The geological meaning by the study on oil and gas accumulation process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 16(5): 545-551. [赵孟军, 宋岩, 张水昌, 等. 油气成藏过程研究的地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2006, 16(5): 545-551.]
- [2] Li Hongyi, Tang Liangjie, Jiang Zhenxue, *et al.* Process and model of hydrocarbon accumulation in the area of Lenghu No. 7 on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 267-272. [李宏义, 汤良杰, 姜振学, 等. 柴达木盆地北缘冷湖七号构造油气成藏过程与模式[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 267-272.]
- [3] Zhang Yiwei, Jin Zhijun, Zeng Jianhui. The research situation and thinking of the hydrocarbon accumulation mechanism[J]. *Petroleum Explorationist*, 1997, 2(1): 11. [张一伟, 金之钧, 曾溅辉. 油气成藏机理研究现状与思路[J]. *勘探家*, 1997, 2(1): 11.]
- [4] Ma Yujie, Zhuo Qingong, Yang Xianzhang, *et al.* Petroleum dynamic accumulation process and its implications in Kelasu structural belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(3): 249-254. [马玉杰, 卓勤功, 杨宪彰, 等. 库车坳陷克拉苏构造带油气动态成藏过程及其勘探启示[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3): 249-254.]
- [5] Gao Changhai, Zha Ming. Hydrocarbon accumulation process in Chengbei fault step belt of Dagang Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(4): 47-53. [高长海, 查明. 大港油田埕北断阶带油气成藏过程分析[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(4): 47-53.]
- [6] Song Wenjie, Jiang Tongwen, Feng Jilei, *et al.* Geological features and exploration mechanism of the Yaha condensate gas field in the Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 274-283. [宋文杰, 江同文, 冯积累, 等. 塔里木盆地牙哈凝析气田地质特征与开发机理研究[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 274-283.]
- [7] Zhao Mengjun, Wang Zhaoming, Zhang Shuichang, *et al.* Accumulation and features of natural gas in the Kuqa Foreland Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(3): 414-422. [赵孟军, 王招明, 张水昌, 等. 库车前陆盆地天然气成藏过程及聚集特征[J]. *地质学报*, 2005, 79(3): 414-422.]
- [8] Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhao Mengjun, *et al.* Hydrocarbon sources and stages of reservoir formation in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(supplement 1): 56-63. [梁狄刚, 张水昌, 赵孟军, 等. 库车坳陷的油气成藏期[J]. *科学通报*, 2002, 47(增刊1): 56-63.]
- [9] Zhao Jingzhou, Dai Jinxing. Accumulation timing and history of Kuqa petroleum system, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentological Sinica*, 2002, 20(2): 314-319. [赵靖舟, 戴金星. 库车油气系统油气成藏期与成藏史[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 314-

- 319.]
- [10] Zhaoming W, Huashan L. Different Hydrocarbon Accumulation Histories in the Kelasu-Yiqikelike Structural Belt of the Kuqa Foreland Basin[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2010, 84(5): 1195-1208.
- [11] Zhao Mengjun, Zhang Baomin. Source rocks for a giant gas-accumulation area in the Kuqa Forland Depression[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2002a, 37(supplement 1): 35-44. [赵孟军, 张宝民. 库车前陆拗陷形成大气区的烃源岩条件[J]. *地质科学*, 2009, 37(增刊 1): 35-44.]
- [12] Xing Housong, Li Jun, Sun Haiyun, *et al.* Differences of hydrocarbon reservoir forming between southwestern Tarim Basin and Kuche mountain front[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 36-45. [邢厚松, 李君, 孙海云, 等. 塔里木盆地塔西南与库车山前带油气成藏差异性研究及勘探建议[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 36-45.]
- [13] Bao Jianping, Zhu Cuishan, Zhang Qiucha, *et al.* Geochemical characteristics of natural gas from diferent structural units of the Kuqa Depression, the Tarim Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 28(5): 664-668. [包建平, 朱翠山, 张秋茶, 等. 塔里木盆地库车坳陷不同构造单元天然气地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 664-668.]
- [14] Parnell J, Carey P, Monson B. Fluid inclusion constraints on temperatures of petroleum migration from authigenic quartz in bitumen veins[J]. *Chemical Geology*, 1996, 129(3): 217-226.
- [15] Goldstein, R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems[J]. *Lithos*, 2001, 55(1): 159-193.
- [16] Mi Jingkui, Dai Jinxing, Zhang Shuichang. Some problem existed in research of inclusion occurring in oil and gas bearing basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(5): 602-605. [米敬奎, 戴金星, 张水昌. 含油气盆地包裹体研究中存在的问题[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(5): 602-605.]
- [17] Chen Ruiyin, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun. Fluid inclusion evidence for charge stages of hydrocarbon in the Ordovician traps of Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(5): 537-542. [陈瑞银, 赵文智, 王红军. 塔中地区奥陶系油气充注期次的流体包裹体证据[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(5): 537-542.]
- [18] Shi Weijun, Jiang Hong, Xi Binbin, *et al.* Studies of analysis approaches of oil and gas inclusion composition and characteristic[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 643-648. [施伟军, 蒋宏, 席斌斌, 等. 油气包裹体成分及特征分析方法研究[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(6): 643-648.]
- [19] Munz I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications [J]. *Lithos*, 2001, 55(1): 195-212.
- [20] Liu Keyu, Julien Bourdet, Zhang Baoshou, *et al.* Hydrocarbon charge history of the Tazhong Ordovician reservoirs, Tarim Basin as revealed from an integrated fluid inclusion study[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2): 171-180. [刘可禹, Julien Bourdet, 张宝收, 等. 应用流体包裹体研究油气藏——以塔中奥陶系储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 171-180.]
- [21] Liu K, Eadington P, Middleton H, *et al.* Applying quantitative fluorescence techniques to investigate petroleum charge history of sedimentary basins in Australia and Papuan New Guinea [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 57(1): 139-151.
- [22] Liu K, Eadington P, Coghlan D. Fluorescence evidence of polar hydrocarbon interaction on mineral surfaces and implications to alteration of reservoir wettability[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, 39(3/4): 275-285.
- [23] Liu K Eadington P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconstructing hydrocarbon charge history[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(7): 1023-1036.
- [24] Brooks J M, Kennicutt M C, Barnard L A, *et al.* Offshore surface geochemical exploration[J]. *Oil & Gas Journal*, 1986, 84(42): 66-72.
- [25] Liu K, Fenton S, Bastow T, *et al.* Geochemical evidence of multiple hydrocarbon charges and long distance oil migration in the Vulcan Sub-basin, Timor Sea [J]. *APPEA Journal*, 2005, 45: 1-17.
- [26] Liu K, George C, Li S, *et al.* Total Scanning Fluorescence (TSF) as an effective screening tool for delineating oil families[C]//22nd International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG), Seville, Spain, 2005: 12-16.
- [27] Bao Jianping, Zhu Cuishan, Zhang Qiucha, *et al.* Geochemical characteristics of crude oil from frontal uplift in Kuqa Depression[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(4): 40-44. [包建平, 朱翠山, 张秋茶, 等. 库车坳陷前缘隆起带上原油地球化学特征[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(4): 40-44.]
- [28] Liang Digang, Chen Jianping, Zhang Baomin. The Generation of Continental Hydrocarbon in Kuqa Depression, Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. [梁狄刚, 陈建平, 张宝民. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.]
- [29] Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan. On the indicators for identifying gas form oil and gas coal mesure[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 1985, 6(2): 31-38. [戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨[J]. *石油学报*, 1985, 6(2): 31-38.]
- [30] Su Aiguo, Zhang Shuichang, Xiang Longbin, *et al.* Effect of phase-controlled and gas-wash fractionation on variation of component and carbon isotope composition of oil and gas[J]. *Geochimica*, 2000, 29(6): 549-555. [苏爱国, 张水昌, 向龙斌, 等. 相控和气洗分馏作用对油气组分及碳同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 2000, 29(6): 549-555.]
- [31] Zhang Bin, Huang Ling, Wu Ying, *et al.* Quantitative evaluation of crude oil composition changes caused by strong gas washing: A case study of natural gas pool in Kuqa Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 270-279. [张斌, 黄玲, 吴英, 等. 强烈气洗作用导致原油成分变化的定量计算: 以库车坳陷天然气藏为例[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 270-279.]

- [32] Bai Yubin, Luo Jinglan, Liu Xinju, *et al.* Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Yanchang Formation(Upper Triassic) in Wubao area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 374-383. [白玉彬, 罗静兰, 刘新菊, 等. 鄂尔多斯盆地吴堡地区上三叠统延长组原油地球化学特征及油源对比[J]. 沉积学报, 2013, 31(2): 374-383.]
- [33] Zhang Mingfeng, Tuo Jincai, Guo Lijun, *et al.* A discussion on petroleum migration in the Wunan oilfield of Qaidam Basin based on nitrogen compounds[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(5): 727-731. [张明峰, 妥进才, 郭力军, 等. 应用含氮化合物探讨柴达木盆地乌南地区原油运移[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 727-731.]
- [34] Huang Zhilong, Gao Gang. The natural gas origin and the model of oil-gas migration-accumulation in Moliqing rift[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(3): 274-277. [黄志龙, 高岗. 莫里青断陷天然气成因与运聚模式[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 274-277.]
- [35] Chen Anding, Li Jianfeng. Geochemical indicators of natural gas migration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1994, 5(4): 38-67. [陈安定, 李剑锋. 天然气运移的地球化学指标研究[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(4): 38-67.]
- [36] Dai Jinxing, Qi Houfa. Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and R_o of coal gas in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(9): 690-692. [戴金星, 戚厚发. 我国煤成烃气的 $\delta^{13}\text{C}$ - R_o 关系[J]. 科学通报, 1989, 34(9): 690-692.]
- [37] Tang Liangjie, Jin Zhijun. Negative inversion process and hydrocarbon accumulation of Yaha fault belt in northern uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 302-309. [汤良杰, 金之钧. 塔里木盆地北部隆起牙哈断裂带负反转过程与油气聚集[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 302-309.]
- [38] Zhao Mengjun, Lu Shuangfang. Two periods of reservoir forming and their significance for hydrocarbon distribution in Kuqa Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 24(5): 16-20. [赵孟军, 卢双舫. 库车坳陷两期成藏及其对油气分布的影响[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 16-20.]

Hydrocarbon Accumulation Process of the Yaha Tectonic Belt, Kuqa Foreland Basin

LIU Jian-liang^{1,2}, JIANG Zhen-xue³, LIU Ke-yu^{1,2,4}, GUI Li-li^{1,2}, LI Feng³, XING Jin-yan³

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;*

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

3. *Institute of Unconventional Natural Gas Research, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

4. *CSIRO Earth Science and Resource Engineering, Bentley WA 6102, Australia)*

Abstract: Hydrocarbon accumulation process of the Yaha tectonic belt in the Kuqa foreland basin was investigated using an integrated fluid inclusion, quantitative grain fluorescence and total scanning fluorescence analysis in combination with the oil and gas characteristics in the area. The results show that there are two episodes of hydrocarbon accumulation in the Yaha tectonic belt. During the deposition of the Jidike Member, mature oil, was sourced from the Triassic Huangshanjie Member, charged into the Yaha tectonic belt from the western side via long distance lateral migration and migrated to the east along the tectonic belt. A 46-meter long palaeo-oil column was accumulated in the E+K reservoirs in Yaha2 area. From the time of the deposition of the Kuqa Formation to present, a large amount of mature to high mature coal-type gases, were sourced from the Middle-Lower Jurassic, charged into the Yaha tectonic belt from both the west and east sides simultaneously and then migrated to the middle part of the belt. The gas firstly accumulated to the top of the trap due to buoyancy and forced the palaeo-oil-water contact shifting downward. As the gas charge and gas-oil interaction continued, the early charged oil was dissolved and finally formed the current condensate gas reservoir.

Key words: Kuqa Foreland Basin; Yaha tectonic belt; Fluid inclusions; Quantitative fluorescence; Hydrocarbon migration; Accumulation process