

# 塔里木盆地轮古东地区奥陶系 储层流体包裹体研究及油气成藏史

房启飞<sup>1</sup>, 张 甯<sup>2</sup>, 张宝收<sup>3</sup>, 卢玉红<sup>3</sup>, 武雪琼<sup>4</sup>, 余小庆<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;  
3. 中国石油塔里木油田勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石油大学, 北京 102249)

**摘要:** 流体包裹体蕴含的信息可以反演油气成藏期次。对轮古东地区奥陶系储层烃包裹体荧光特征、赋存关系研究, 结合烃共生盐水包裹体显微测温分析, 确定该储层发育 3 期烃包裹体: 第 I 期为晚加里东—早海西期形成的发褐色荧光烃包裹体; 第 II 期为晚海西期形成的发黄褐色荧光烃包裹体; 第 III 期为燕山—喜马拉雅期形成的发蓝白色荧光烃包裹体。对定量颗粒荧光 QGF 光谱和颗粒吸附烃全扫描荧光 TSF 定量荧光光谱对比分析, 发现包裹体与吸附烃反映的油气性质具有良好的一致性; 基于烃共生盐水包裹体 PT 模拟结果, 将烃共生盐水包裹体捕获温度与捕获深度组合投点于地热—埋藏史图上, 确定轮古东地区奥陶系储层主要经历 3 期油气充注, 分别为晚加里东—早海西期、晚海西期和喜马拉雅早期。晚加里东—早海西期和晚海西期 2 期油气藏遭受不同程度的破坏或降解作用, 3 期油气分别以重质油—稠油、中质油和轻质—凝析油为特征。

**关键词:** 油气成藏期次; 流体包裹体; 荧光分析; 奥陶系; 轮古东地区

**中图分类号:** TE122.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2014)10-1558-10

**引用格式:** Fang Qifei, Zhang Nai, Zhang Baoshou, *et al.* Characteristics of hydrocarbon inclusions and geological age of hydrocarbon accumulation in Ordovician reservoir of eastern Lungu area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1558-1567. [房启飞, 张甯, 张宝收, 等. 塔里木盆地轮古东地区奥陶系储层流体包裹体研究及油气成藏史[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1558-1567.]

## 0 引言

奥陶系海相碳酸盐岩一直是塔里木盆地勘探开发研究的焦点和难点。轮南地区奥陶系油气田是中国第一个海相碳酸盐岩特大型油气田, 拥有巨大的潜在油气储量, 是塔里木盆地油气勘探开发的重点区域<sup>[1]</sup>, 而轮古东地区则是近期扩大轮南地区油气聚集区规模、增储上产的现实领域<sup>[2]</sup>。轮古东地区奥陶系是一个典型的多期充注型油气藏<sup>[3]</sup>, 查明多期油气藏成藏过程及保存情况, 对有效获得工业油气流具有重大的意义。通过以往的经验模式或者经典理论并不能完全解开这个复杂古油藏所蕴含的所有谜底, 以致众多学者<sup>[3-8]</sup>在轮古东地区奥陶系油气

藏成藏期方面至今未达成统一认识。

流体包裹体记录着流体性质和流体动力学等重要信息<sup>[9-10]</sup>。流体包裹体岩石学特征及烃包裹体荧光特征是对构造运动和油气充注过程的反映, 对其分析是恢复古压力和划定成藏期次的一个重要手段<sup>[11-14]</sup>。烃共生盐水包裹体捕获时的温度和压力很大程度上反映了油气运移或油气藏形成时的古温度、古压力以及古埋深, 结合地热—埋藏史研究, 能够精确地限定恢复油气运移或成藏的时间<sup>[13, 15-16]</sup>。本文将利用流体包裹体显微测温及赋存特征划分期次, 结合烃包裹体定量颗粒荧光分析以及流体包裹体 PT 模拟综合确定轮古东地区奥陶系油气藏成藏期, 以期对轮古东地区奥陶系油气勘探工作提供一

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-11-27.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司科研项目(编号: 041010120148)资助.

作者简介: 房启飞(1987-), 男, 江苏徐州人, 助理工程师, 硕士, 主要从事石油地质研究. E-mail: qffang@petrochina.com.cn.

定的借鉴。

## 1 地质背景

本文研究所采样品均来自轮古东地区奥陶系。轮古东位于塔北隆起南坡中段,是轮南低凸起东部的构造单元,受轮古东断裂控制以及轮南断裂带和桑塔木断裂带影响(图 1)。轮古东地区经历晚加里东—早海西期、晚海西期和燕山—喜马拉雅期 3 期主要构造活动<sup>[17-21]</sup>,相应发育了 3 期共 11 种构造裂缝。这些构造断裂的产生,对改善奥陶系碳酸盐岩储层性能以及对早期油气藏的保存和晚期油气的运移、混合起到了至关重要的作用。

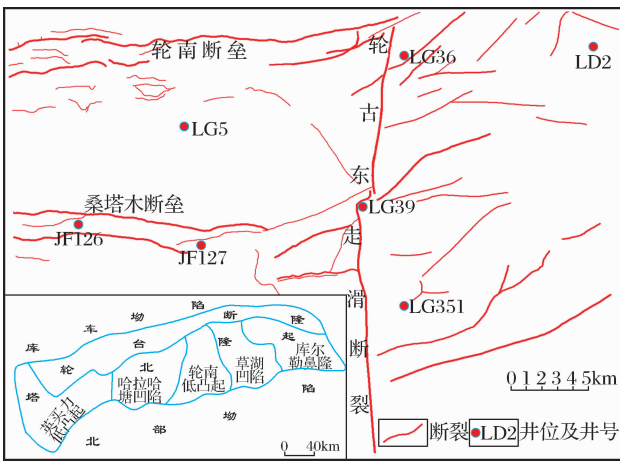


图 1 轮古东地区构造位置及奥陶系断裂系统

Fig. 1 Tectonic position and structure features in

Ordovician reservoir of eastern Lungu area, Tarim Basin

奥陶系整体为一倾向南东呈南厚北薄、西厚东薄的斜坡,受构造抬升剥蚀作用,志留系、泥盆系和二叠系普遍缺失,石炭系直接覆盖在奥陶系之上。轮古东地区奥陶系保存较全,自上而下可细分为上奥陶统桑塔木组、良里塔格组及吐木休克组;中奥陶统一间房组;中一下奥陶统鹰山组与下奥陶统蓬莱坝组。主要含油气层系为奥陶系的良里塔格组、一间房组和鹰山组一段,呈裙边状尖灭。

## 2 流体包裹体期次

轮古东地区奥陶系碳酸盐岩储层中采样 172 块,对其中所含的流体包裹体进行系统的观察和测试分析。样品测试是在中国石油勘探开发研究院成藏年代学重点实验室完成的。烃包裹体荧光特征观察是在紫外光激发下通过荧光显微镜进行。流体包裹体显微测温采用英国 Linkam 公司的 THMSG600 型冷热台在 100 倍长焦物镜下进行,均

一温度误差范围为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,冰点温度误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。颗粒烃包裹体定量荧光分析 QGF (Quantitative Grain Fluorescence) 和全扫描荧光 TSF (Total Scanning Fluorescence)<sup>[22-25]</sup>是利用 Varian Cary-Eclipse 荧光分光光度计测试储层岩石颗粒及溶液样品所含包裹体中油和表面吸附的烃类物质发出的荧光强度,用于储层含油气性分析与包裹体鉴定。

### 2.1 烃包裹体岩相学特征

烃包裹体的颜色和荧光性质是组分特征尤其是成熟度的一个标志。通过紫外荧光显微镜对烃包裹体的透光颜色、荧光颜色与明暗程度的观察,可以大致鉴别油气性质和演化阶段<sup>[25-26]</sup>。轮古东地区奥陶系储层发育 3 种烃包裹体,具有不同的赋存脉体与岩相学特征。第一种小气液比的两相烃包裹体含量较低,单偏下多为无色—浅褐色,荧光下发褐色荧光,常与黑褐色干沥青共存,主要赋存于晚加里东—早海西期形成的一世代细小方解石剪切脉和含黑褐色干沥青的构造缝合线中[图 2(a),图 2(b)],也可见于早期方解石胶结物中,显示重质油组分荧光特征;黑褐色干沥青[图 2(a),图 2(b)]的存在表明这期烃包裹体代表的油气充注后因构造破坏致使轻质组分大量逸散或受到了强烈的生物降解作用<sup>[27-29]</sup>。第二种为发强黄—黄白色荧光的气液两相烃包裹体,单偏光下一般为无色或极浅褐色,有时周围伴生有褐色沥青[图 2(c),图 2(d)],主要分布于晚海西期形成的二世代方解石脉[图 2(c),图 2(d)]或愈合缝以及缝合线边部溶孔,具有成熟的正常油组分特征;少量褐色沥青与本期烃包裹体伴生产出的现象,也说明本期烃包裹体代表的油气遭受了一定程度的生物降解作用<sup>[27-29]</sup>。第三种大气液比的两相烃包裹体发强蓝白色荧光,单偏光下往往为无色,油质较轻,代表高一过成熟的轻质—凝析油组分特征,主要赋存于燕山—喜马拉雅期形成的三世代粗大张性方解石脉中[图 2(e),图 2(f)],偶见未充填完全的张裂缝中含有发弱蓝白色荧光的可动油。个别岩石薄片可见极少量发浅褐色荧光烃包裹体或气态烃包裹体与发蓝白色荧光的烃包裹体伴生,并显示出在形成时间上晚于第三种烃包裹体[图 2(g),图 2(h)]。

### 2.2 流体包裹体显微测温

流体包裹体的均一温度以及冰点温度是区分不同性质流体及成藏环境的依据。轮古东地区奥陶系烃共生盐水包裹体温度区分度较好,不同荧光特征的烃包裹体具有相对独立的共生盐水包裹体群以及温度区间。发褐色荧光烃包裹体共生盐水包裹体均一

温度分布在 70.3~90.4℃ 之间,主要集中在 78~88℃ 之间,平均值为 82.4℃;冰点温度分布在 -0.4~-6.2℃ 之间,平均值为 -3.0℃,对应流体盐度值为 0.7%~9.5%,均值为 4.9%,说明本期流体包裹体形成于低温中低盐度环境;发亮黄色荧光烃包裹体共生盐水包裹体均一温度相对发散,分布在 87.7~123.1℃ 之间,主要集中在 90~109℃ 之间,平均值为 103.9℃;冰点温度分布在 -4.1~-13.3℃ 之间,平均值为 -8.0℃,对应流体盐度值为 6.6%~17.3%,均值为

11.7%,反映本期流体包裹体形成于较高温度的中高盐度环境;发蓝白色荧光烃包裹体共生盐水包裹体均一温度分布在 120.3~156℃ 之间,主要集中在 120~138℃ 之间,平均值为 133.6℃;冰点温度分布在 -4~-11.5℃ 之间,平均值为 -7.8℃,对应流体盐度值为 6.4%~15.5%,均值为 11.5%,表明本期流体包裹体形成于高温中高盐度环境。

综合流体包裹体岩相学及显微测温分析,将轮古东地区奥陶系流体包裹体划分为 3 期:第 I 期为

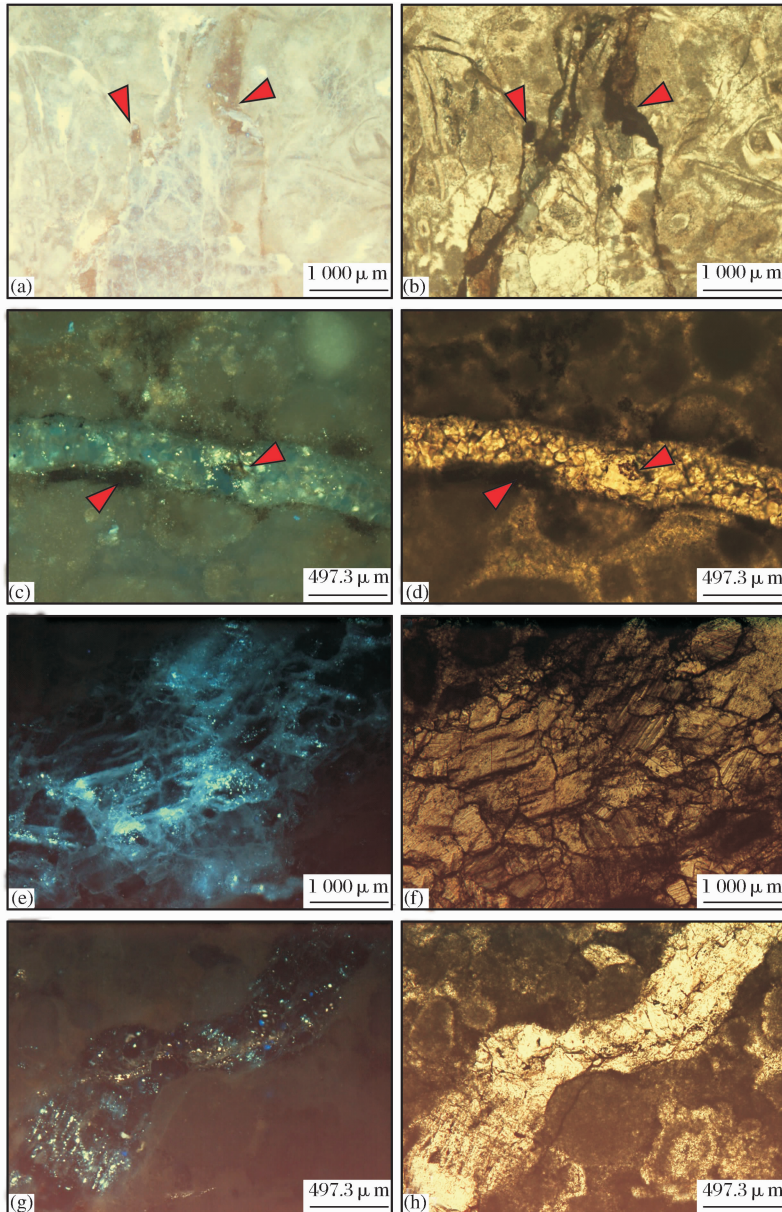


图 2 轮古东地区奥陶系储层烃包裹体特征

Fig. 2 Characteristics of hydrocarbon inclusions in Ordovician reservoir of eastern Lungu area

(a)、(b) LG351 井, 6 412.93m, 发褐色荧光的烃包裹体, 分布于早期含干沥青(红色三角所示)构造缝合线中; (c)、(d) LG39 井, 5 817.53m, 发亮黄色荧光的烃包裹体主要分布在边部含褐色沥青(红色三角所示)的平直二世代充填方解石脉中; (e)、(f) LG351 井, 6 301.47m, 发亮蓝白色荧光的烃包裹体呈片状或条带状分布在多世代充填的张性方解石脉中; (g)、(h) LG36 井, 5 944.85m, 偶有少量发亮浅褐色荧光的烃包裹体与发蓝白色荧光的烃包裹体共生一脉, 并呈条带状穿过后者; (a)、(c)、(e)、(g) 为紫外荧光; (b)、(d)、(f)、(h) 为透射光



具重质组分的发褐色荧光烃包裹体,形成于晚加里东一早海西期;第Ⅱ期为发黄色荧光烃包裹体,具中质组分特征,形成于晚海西期;第Ⅲ期烃包裹体形成于燕山—喜马拉雅期,发蓝白色荧光,具高一过成熟的轻质—凝析油组分特征。

### 3 颗粒包裹烃定量荧光分析

颗粒包裹烃定量荧光分析 QGF 是测量紫外光激发岩石颗粒内部包裹体中烃类流体发出的荧光强度从而确定烃类性质的一种技术<sup>[25]</sup>,因不同的化学成分具有不同的官能团,对应不同的波长,故每种芳烃化合物和原油都有其特定的荧光光谱谱峰形态<sup>[30-31]</sup>,通过对荧光光谱及特征波长的分析,能快速探测储层颗粒中烃包裹体,从而反映储层中烃包裹体丰度及油气的性质。轻质油、中质油、重质油和稠油在 QGF 荧光光谱下具有明显不同的特征,主要体现在波型及主峰波长位置的区别上。油质轻,峰值波长偏小;油质重,则峰值的波长偏大。碳酸盐岩储层颗粒荧光与碎屑岩颗粒荧光分析稍有不同,因碳酸盐岩非均质性及  $\text{CaCO}_3$  本身的荧光效应,测试

的荧光光谱可能发生红移现象。

轮古东地区奥陶系储层烃包裹体 QGF 光谱主峰总体相似,次峰具有一定的差异性。LG39 井 QGF 光谱显示出三峰特征[图 3(a)],主峰为中质油在  $400\mu\text{m}$  附近形成的宽峰,次峰分别为  $340\mu\text{m}$  附近代表轻质组分特征的波峰以及  $475\mu\text{m}$  附近代表重质—稠油组分特征的宽峰,这一结果与显微镜下观察到的 LG39 井具有 3 种不同荧光特征烃包裹体的现象吻合。LG36 井 QGF 光谱在  $470\mu\text{m}$  附近形成宽峰,代表本井烃包裹体主要以重质—稠油组分为主,在  $360\sim 380\mu\text{m}$  之间相对轻微的峰值,代表轻质—中质组分含量偏少[图 3(b)]。LG351 井 QGF 光谱特征与 LG36 井 QGF 光谱特征相似[图 3(c)],体现了烃包裹体主要为重质—稠油组分,轻质—中质组分含量少。LD2 井烃包裹体总体含量偏低,表现在 QGF 光谱上则为峰强度较弱。LD2 井 QGF 光谱在  $400\mu\text{m}$  附近形成一宽主峰,表明本井储层中以中质组分烃包裹体含量为主,重质—稠油组分的烃包裹体含量次之,含有轻质组分的烃包裹体较少[图 3(d)]。

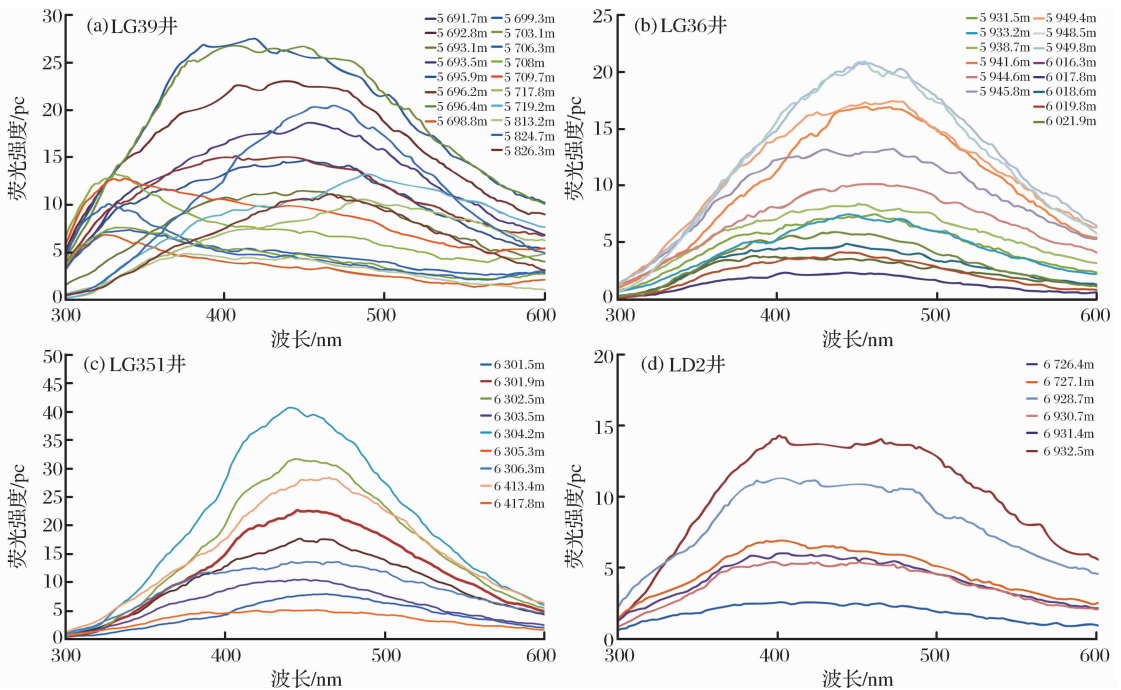


图 3 轮古东地区奥陶系储层颗粒荧光光谱

Fig. 3 QGF plot for inclusions of Ordovician reservoir of eastern Langu area analyzed

将世界典型油田原油 QGF 的最高峰波长  $\lambda_{\text{max}}$  与第二个半高峰波长  $2_{\text{nd}}\lambda_{\text{max}}$ <sup>[23]</sup> 投在关系图中(图 4),发现原油从凝析油向稠油变化时,其 QGF 的  $2_{\text{nd}}\lambda_{\text{max}}$  与  $\lambda_{\text{max}}$  之间的比值呈线性增大。将轮古东地

区奥陶系储层烃包裹体定量荧光分析结果投在  $2_{\text{nd}}\lambda_{\text{max}}$  与  $\lambda_{\text{max}}$  关系图中(图 4),发现其分布范围与典型油田原油分布具有良好的一致性,烃包裹体组分也体现了轻质组分、中质组分、重质—稠油组分特

征。总体来说,轮古东地区奥陶系含有 3 种不同成熟度的烃包裹体,这与紫外荧光显微镜下观察到 3 种不同光性特征烃包裹体的现象吻合,由此可以肯定轮古东地区奥陶系至少存在 3 期油气充注。

全扫描荧光光谱 TSF 中的主峰是原油性质的表征。李素梅等<sup>[32]</sup>研究认为,全扫描荧光光谱 TSF  $R_1$  [270nm ( $Em_{360nm}/Em_{320nm}$ )、TSF  $R_2$  [260nm ( $Em_{360nm}/Em_{320nm}$ )]反映的成熟度趋势与生物标志化合物成熟度大体一致,定量 TSF 参数可用于原油成熟度的研究。通过原油族群及成熟度的差异,区分不同期次不同成分油气的充注过程,从而反映油气成藏期次。储层颗粒吸附烃的 TSF 图谱可以显示储层颗粒间烃组分的特征,在一定意义上可以鉴别古今油藏的原油族群及成熟度。故储层颗粒吸附烃的 TSF 是一种不仅用于充注时油气的成熟度,也是反映油气藏成藏期次的有效方法。

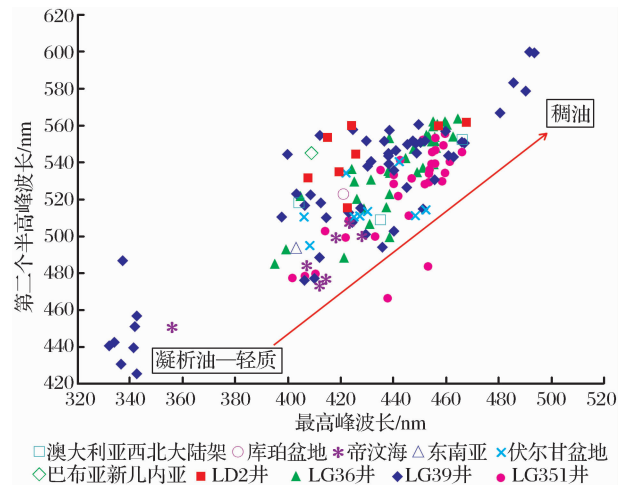


图 4 轮古东地区奥陶系烃包裹体与世界典型油田原油  $GF_{2nd} \lambda_{max}$  与  $\lambda_{max}$  关系(世界典型油田原油数据引自文献<sup>[23]</sup>)  
Fig. 4 Relational graph of QGF  $2_{nd} \lambda_{max}$  &  $\lambda_{max}$  for the typical oil field crude oil and hydrocarbon inclusions of Ordovician reservoir of eastern Lungu area

如图 5 所示,轮古东地区代表井奥陶系储层颗粒吸附烃 TSF 光谱特征总体显示出中质组分主导的吸附烃特征。LG39 井奥陶系储层颗粒吸附烃 TSF 光谱具有不明显的多峰性质,375 $\mu$ m 波长附近荧光相对强烈,形成主峰,代表中质组分;在 425 $\mu$ m 波长附近形成一重质峰,强度次于主峰;同时在低波段还显示一定的轻质组分特征。说明 LG39 井储层中吸附烃具有 3 种特征,以中质烃组分为主,重质与轻质烃组次之。LG36 井奥陶系储层吸附烃荧光光谱中显示双峰特征,在 375 $\mu$ m 与 425 $\mu$ m 附近形

成 2 个主峰,分别代表中质组分和重质组分烃类含量较高,而轻质组分特征不明显。LG351 井奥陶系储层颗粒吸附烃 TSF 光谱具典型的多峰特征,380 $\mu$ m 波长附近形成一独立峰,代表中质组分吸附烃含量较高;在 410~425 $\mu$ m 之间形成一组相对突出的重质峰,并且显示出这组重质组分的吸附烃代表的原油可能遭受了一定程度的降解作用<sup>[33]</sup>。

TSF  $R_1$  与 TSF  $R_2$  主要体现原油中三环芳烃和二环芳烃的丰度变化特征,一般情况下,随成熟度增加,低环芳烃相对于高环芳烃含量有增加趋势,荧光强度降低,即成熟度越高,参数  $R_1$  值与  $R_2$  值越低。对于储层颗粒吸附烃 TSF 光谱,因开放环境下进行的预处理及测试分析而造成部分轻质烃组分的散失,红移现象在所难免。鉴于各期烃包裹体都处于同一预处理与测试分析环境这一前提条件下,所以这种对油气性质分析的方法也可以移植到储层颗粒吸附烃性质的辨别上。分析轮古东地区奥陶系 3 口井 TSF  $R_1$  与 TSF  $R_2$  关系图(图 6),储层吸附烃反映的油气性质也同样包含轻质组分、中质组分和重质一稠油组分特征。综合以上分析,轮古东奥陶系储层经历过 3 期不同性质的油气充注,并且重质一稠油组分的吸附烃所代表的原油可能遭受了一定程度的降解作用。

#### 4 流体包裹体 PT 模拟

Zhang 等<sup>[34]</sup>认为,流体包裹体均一温度、形成温度、盐度和形成压力等 4 个参数之间存在着一定的函数关系。只要已知均一温度、盐度以及形成温度就能确定形成压力。不少学者建立的一些用于包裹体计算的温压关系等容式,其中常用的是 Zhang 等<sup>[34]</sup>导出的等容式:

$$P = A_1 + A_2 T$$

式中: $A_1$  和  $A_2$  常量是均一温度、溶质和溶质浓度的函数。对于特定溶质, $A_1$  和  $A_2$  只与均一温度和溶质的浓度有关。在假定包裹体内流体的溶质是 NaCl 时, $A_1$  和  $A_2$  可表示溶质浓度和均一温度的函数。表达式如下:

$$A_1 = 6.100 \times 10^{-3} + (2.385 \times 10^{-1} - a_1) Th - (2.855 \times 10^{-3} + a_2) Th^2 - (a_3 Th + a_4 Th^2) m$$

$$A_2 = a_1 + a_2 Th + 9.888 \times 10^{-6} Th^2 + (a_3 + a_4 Th) m$$

$$m = 1000Wt / [MN(100 - Wt)]$$

式中: $P$  为盐水包裹体最小捕获压力,10<sup>-1</sup>MPa; $T$  为包裹体捕获温度,即流体包裹体形成时的温度,℃;

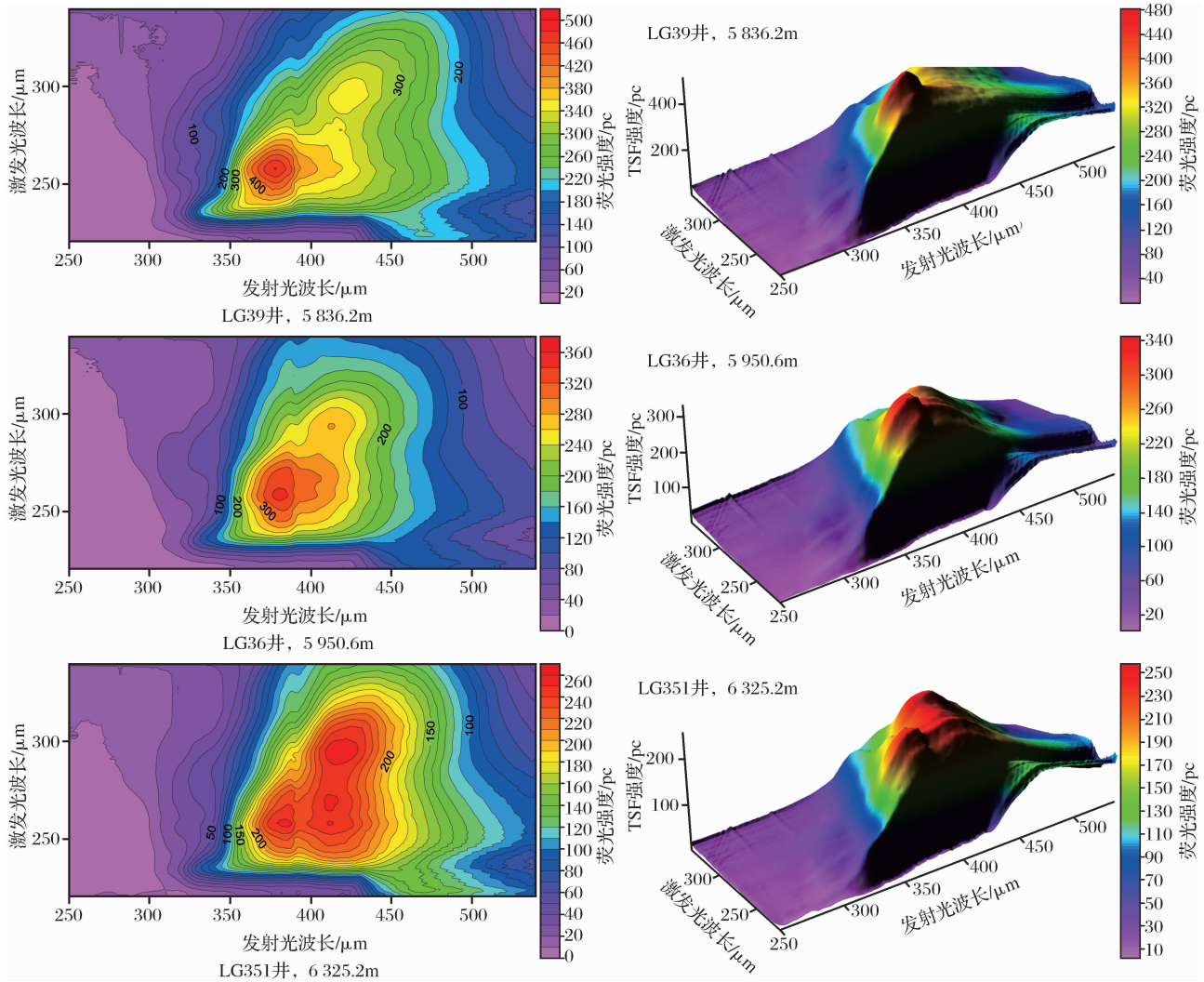


图5 轮古东地区奥陶系储层吸附烃二维、三维荧光光谱指纹特征

Fig.5 2D and 3D excitation-emission contour plot for Ordovician reservoir rock extracts of eastern Lungu area analyzed

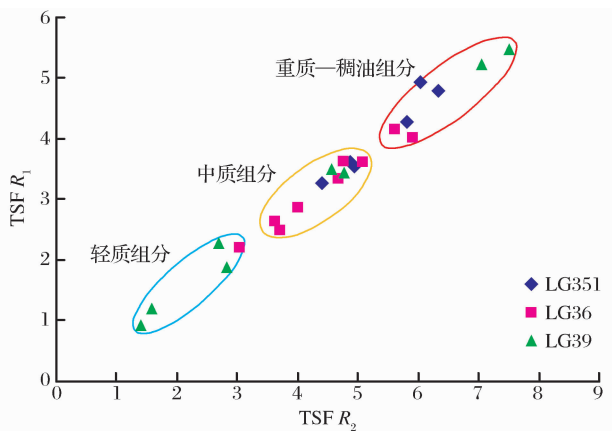


图6 不同成因吸附烃 TSF R<sub>1</sub> 与 TSF R<sub>2</sub> 关系

Fig.6 Plot of TSF R<sub>1</sub> against TSF R<sub>2</sub> for the reservoir rock extracts

58.5g/mol;  $Wt$  为流体包裹体内的盐度,%;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  为常数,与溶质成分有关。对于 NaCl—H<sub>2</sub>O 体系,  $a_1 = 2.873 \times 10^1, a_2 = -6.477 \times 10^{-2}, a_3 = -2.009 \times 10^{-1}, a_4 = 3.186 \times 10^{-3}$ 。然而上述参数应用于较大密度的 NaCl—H<sub>2</sub>O 体系时,偏差值较大, Brown 等<sup>[35]</sup> 修改为  $a_1 = 1.86102 \times 10^1, a_2 = -9.52838 \times 10^{-3}, a_3 = 1.34907, a_4 = -7.67355 \times 10^{-3}$ ; 这些参数适用于密度为 0.98~1.2g/cm<sup>3</sup> 的 NaCl—H<sub>2</sub>O 溶液。本文使用 Brown 等<sup>[35]</sup> 修改后的参数进行计算。

流体包裹体均一温度是其形成温度的下限值,要获得流体包裹体被捕获时的真实温度,就必须通过一定的方法对均一温度这一下限值进行温度校正。根据陈勇等<sup>[36]</sup> 研究的“烃包裹体共生盐水包裹体均一温度校正曲线”对烃共生盐水包裹体的均一温度进行系统校正,从而获得准确的盐水包裹体的捕获温度(表1)。结合实测的各期烃包裹体共生盐

$Th$  为包裹体均一温度,℃;  $m$  为流体包裹体内流体溶质的质量摩尔浓度, mol/kg;  $MN$  为溶质的摩尔质量,



水的均一温度、盐度数据,通过温压关系等容式计算得到流体包裹体的捕获压力(表1)。

古埋深是确定流体包裹体形成压力及形成时间的重要指标,通过测定烃共生盐水溶液包裹体的均一温度及拟合地温梯度就能推算出其形成深度<sup>[37]</sup>:

$$H=1\ 000(Th-T_0)/PGT$$

式中: $H$ 为包裹体形成深度,m; $Th$ 为烃共生盐水包裹体的均一温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_0$ 为古地表温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $PGT$ 为古地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。根据不同期次不同深度的盐水包裹体对应不同温度的原理,将同一层位同一期次共生盐水包裹体在不同深度对应的温度值拟合出古地温梯度(表1)。

结果显示,第I期油气充注时的流体包裹体捕获温度平均值为 $84.9^{\circ}\text{C}$ ,捕获压力平均值为 $6.46\text{MPa}$ ,平均古埋深为 $1\ 835\text{m}$ ;第II期流体包裹

体捕获温度平均值为 $112.9^{\circ}\text{C}$ ,平均捕获压力为 $20.67\text{MPa}$ ,平均古埋深为 $2\ 707\text{m}$ ;第III期流体包裹体平均捕获温度为 $151.6^{\circ}\text{C}$ ,捕获压力均值为 $37.8\text{MPa}$ ,平均古埋深为 $4\ 544\text{m}$ 。

### 5 油气成藏期次

将烃共生盐水包裹体均一温度直接投点于地热—埋藏史图是较为常用的油气成藏期判定方法。鉴于均一温度仅仅是捕获温度的最低估计值,所以利用流体包裹体均一温度结合地热—埋藏史来判断油气充注期次,缺乏一定的准确性。本文利用烃共生盐水包裹体均一温度校正后所得的捕获温度与古埋深组合在地热—埋藏史图上投点,所得结论将更为科学。将3期烃共生盐水包裹体捕获温度平均值与对应古埋深平均值投入轮古东地区地热—埋藏史图中(图7),

表1 烃共生盐水包裹体捕获温度、压力计算结果

Table 1 Trapping temperature and pressure of the coexisting aqueous inclusions

井号	井深 /m	期次	烃共生盐水包裹体		盐度 /%	地温梯度 /( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )	质量摩尔浓度 /( $\text{mol}/\text{kg}$ )	捕获温度 /( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )	捕获压力 /( $10^{-1}\text{MPa}$ )	古埋深 /m
			均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点/ $^{\circ}\text{C}$						
LG36	5 934	I	82.2	-5.5	8.5	34	1.6	84.7	64.7	1 829
LG39	5 924	I	77.7	-0.3	0.5	34	0.1	80.1	62.9	1 697
均值—I	—	I	82.4	-3	4.9	34	0.9	84.9	64.6	1 835
LG39	5 826	II	105.3	-5.2	8.1	31	1.5	115.7	236.1	2 751
LG351	6 302	II	102	-4.1	6.6	31	1.2	110.5	195.3	2 645
LG36	5 944	II	98.9	-5.6	8.7	31	1.6	106.9	186.1	2 545
均值—II	—	II	103.9	-8	11.7	31	2.3	112.9	206.7	2 707
LG36	5 944	III	141	-11.5	15.5	25	3.1	159.5	385.2	4 840
LG39	5 924	III	136.5	-10.8	14.8	25	3	154.5	378.3	4 660
均值—III	—	III	133.6	-7.8	11.5	25	2.2	151.6	378	4 544

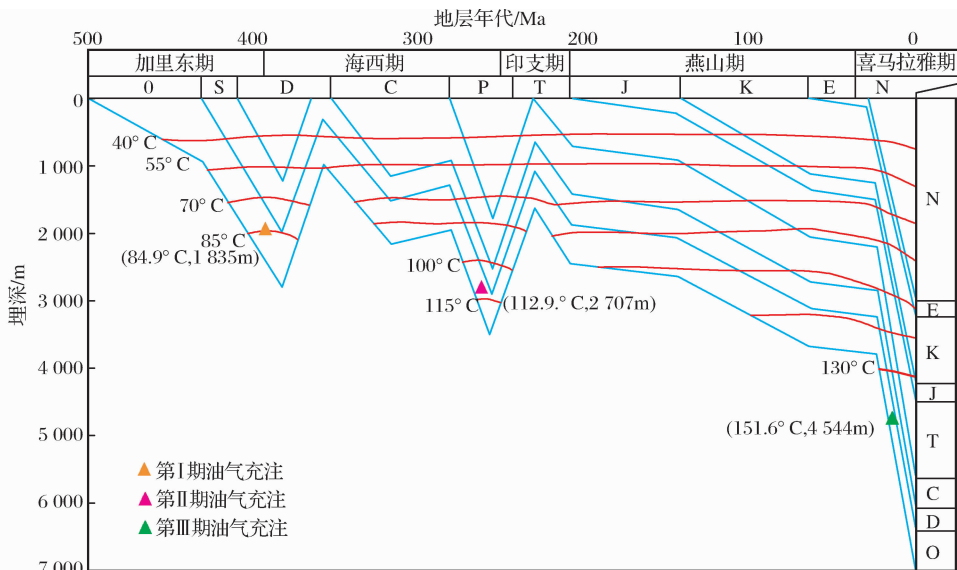


图7 轮古东地区奥陶系储层油气成藏史(据文献[3]LG391井地热—埋藏史图修改)

Fig. 7 Petroleum accumulation time of Ordovician reservoir of eastern Lungu area

可以确定轮古东地区奥陶系具有3个明显的油气成藏期:晚加里东—早海西期、晚海西期及喜马拉雅早期。

喜马拉雅早期,轮古东地区奥陶系具有一次明显的油气充注过程。然而,从第Ⅲ期烃包裹体的“共生”烃包裹体来看[图2(g)],轮古东地区奥陶系在喜马拉雅期可能不止一次经历过油气充注作用。这种“共生”烃包裹体的形成先后顺序难以确定,可能是喜马拉雅期油气充注时间间隔短,抑或是不同组分烃包裹体共生盐水包裹体相互伴生,而成藏环境又具有一定的相似性导致的。仅仅依靠烃包裹体岩石学特征难以明确解释这种现象,所以只有进一步研究,才能揭示该地区奥陶系是否在喜马拉雅期隐藏更为复杂、细致的成藏模式,从而更好地为轮古东地区奥陶系轻质油气藏的勘探开发工作服务。

## 6 结论

(1)轮古东地区奥陶系发育3期烃包裹体:第Ⅰ期为具重质组分的发褐色荧光烃包裹体,捕获温度平均值为84.9℃,捕获压力平均值为6.46MPa,形成于晚加里东—早海西期;第Ⅱ期为发黄色荧光烃包裹体,具中质组分特征,捕获温度平均值为112.9℃,平均捕获压力为20.67MPa,形成于晚海西期;第Ⅲ期烃包裹体形成于燕山—喜马拉雅期,发蓝白色荧光,具高一过成熟的轻质—凝析油组分特征,平均捕获温度为151.6℃,捕获压力均值为37.8MPa。

(2)储层颗粒荧光定量分析和吸附烃全扫描荧光分析结果显示:储层中烃包裹体与颗粒吸附烃反映的油气充注期次一致,且充注的油气性质吻合,分别表现出重质—稠油组分、中质油组分、轻质—凝析油组分特征。

(3)轮古东地区奥陶系3期油气充注过程分别发生在加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅早期。前2期油气充注受到不同程度的构造或者降解作用破坏,在喜马拉雅早期一次油气充注过程之后,可能还存在一定规模的多期次油气充注活动。

**致谢:**澳大利亚联邦科学与工业研究院(CSIRO)刘可禹教授在成文期间给予了建设性意见和建议;中国石油勘探开发研究院与塔里木油田勘探开发研究院提供了帮助和支持,并提供了部分研究资料,在此深表谢意!

### 参考文献(References):

[1] Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Han Jianfa, *et al.* Cases of discovery

and exploration of marine fields in china(part 12):Lunnan Ordovician oil-gas field in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 67-77. [周新源, 杨海军, 韩剑发, 等. 中国海相油气田勘探实例之十二——塔里木盆地轮南奥陶系油气田的勘探与发现[J]. 海相石油地质, 2009, 14(4): 67-77.]

- [2] Yang Haijun, Hao Fang, Han Jianfa, *et al.* Fault systems and multiple oil-gas accumulation play of the Lunnan Lower Uplift, Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(4): 795-811. [杨海军, 郝芳, 韩剑发, 等. 塔里木盆地轮南低凸起断裂系统与复式油气聚集[J]. 地质科学, 2007, 42(4): 795-811.]
- [3] Zhao Wenzhi, Zhu Guangyou, Su Jin, *et al.* Study on the multi-stage charging and accumulation model of Chinese marine petroleum: Example from eastern Lungu area in the Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 709-721. [赵文智, 朱光有, 苏劲, 等. 中国海相油气多期充注与成藏聚集模式研究——以塔里木盆地轮古东地区为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 709-721.]
- [4] Gu Yi. Characteristics of Hydrocarbon Genesis and Preservation of Oil and Gas in the Northern Tarim Basin[M]. Beijing: Science Press, 1998. [顾忆. 塔里木盆地北部油气成因与保存[M]. 北京: 地质出版社, 1998.]
- [5] He Dengfa, Jia Chenzao, Liu Shaobo, *et al.* Multiple oil-gas accumulation dynamics of Lunnan Low Uplift, Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(supplement): 122-130. [何登发, 贾承造, 柳少波, 等. 塔里木盆地轮南低凸起油气多期成藏动力学[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 122-130.]
- [6] Zhao Jingzhou, Guo Deyun, Yan Hongjun, *et al.* Geological age and mode of hydrocarbon accumulation in Lunnan region, north Talimu Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(6): 1-5. [赵靖舟, 郭德运, 阎红军, 等. 塔北轮南地区油气成藏年代与成藏模式[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2004, 19(6): 1-5.]
- [7] Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Yang Haijun, *et al.* The phases of Ordovician hydrocarbon and their origin in the Tabei Uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2447-2460. [张水昌, 朱光有, 杨海军, 等. 塔里木盆地北部奥陶系油气相态及其成因分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2447-2460.]
- [8] Miao Zhongying, Chen Jianfa, Zhang Chen, *et al.* Regularity of distribution and accumulation stages of natural gases in the Lunnan Lower Uplift of the Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(3): 404-410. [苗忠英, 陈践发, 张晨, 等. 塔里木盆地轮南低凸起天然气分布规律与成藏期次[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 404-410.]
- [9] 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.]
- [10] Zhuo Qingong, Song Yan, Ni Pei, *et al.* Experiences on application of fluid inclusion in research of reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 122-128. [卓勤功, 宋岩, 倪培,



- 等. 油气藏研究中流体包裹体应用的几点体会[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 122-128. ]
- [11] Zhang Nai, Zhao Zongju, Xiao Zhongyao, *et al.* Characteristics of hydrocarbon fluid in the Ordovician vein calcite of Tazhong No. 1 slope-break zone[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 389-397. [张鼎, 赵宗举, 肖中尧, 等. 塔中 I 号坡折带奥陶系裂缝方解石烃包裹体特征及成藏[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 389-397. ]
- [12] Goldstein R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic system[J]. Lithos, 2001, 55(1-4): 159-193.
- [13] Liu Bin, Shen Kun. Fluid Inclusion Thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. [刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. ]
- [14] Si Shanghua, Chen Honghan, Feng Yong, *et al.* Two sources and three charging event of hydrocarbons in Lower Cretaceous reservoirs in Shaya Uplift, Tarim Basin: Evidence from fluid inclusion analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 12-21. [斯尚华, 陈洪汉, 丰勇, 等. 塔里木盆地沙雅隆起下白垩统双源三幕油气充注成藏的流体包裹体证据[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 12-21. ]
- [15] Lu Huazhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004. [卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004. ]
- [16] Shi Weijun, Jiang Hong, Xi Binbin. Application of the PVTx simulation of reservoir fluid inclusions to estimate petroleum charge stages: A case study in the Tuoputai area of Tarim Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 18(1): 125-132. [施伟军, 蒋宏, 席斌斌. 应用储层流体包裹体 PVTX 模拟研究油气成藏期次——以塔里木盆地托甫台地区为例[J]. 高校地质学报, 2010, 18(1): 125-132. ]
- [17] Tang Liangjie, Jin Zhijun, Zhang Yiwei, *et al.* Negative reversal structure and its geological significance of Tabei Uplift, Tarim Basin[J]. Geoscience, 1999, 13(1): 93-98. [汤良杰, 金之钧, 张一伟, 等. 塔里木盆地北部隆起负反转构造及其地质意义[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 93-98. ]
- [18] Zhang Yunpeng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, *et al.* Structure features and its evolution of Lunnan Low Uplift, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 440-447. [张云鹏, 任建业, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地轮南低凸起构造特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 440-447. ]
- [19] Jia Chenzao. Structure Features and Hydrocarbon Accumulation of Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 291-306. [贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 291-306. ]
- [20] Xu Jie, Li Tao, Chen Guoguang, *et al.* Structural features of the buried hill in Lunnan area of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5): 14-18. [徐杰, 李涛, 陈国光, 等. 塔里木盆地轮南潜山构造特征[J]. 石油学报, 2002, 23(5): 14-18. ]
- [21] Yang Haijun, Han Jianfa. Characteristics and its main controlling factors of multiple oil-gas accumulation in Lunnan area of Tarim Basin[J]. Science in China, Series D, 2007, 37(supplement 2): 53-62. [杨海军, 韩剑发. 塔里木盆地轮南复式油气聚集区成藏特点与主控因素[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(增刊II): 53-62. ]
- [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 Engineering, 2003, 39: 275-285.
- [23] Liu K, Fenton S, Bastow T, Van Aarssen Eadington P. Geochemical evidence of multiple hydrocarbon charges and long distance oil migration in the Vulcan Sub-basin, Timor Sea[J]. APPEA Journal, 2005: 1-17.
- [24] Jiang Zhenxue, Wang Xiandong, Pang Xiongqi, *et al.* Paleohydrocarbon water contact restoration of typical silurian oil and gas reservoirs in the northern Tarim Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(2): 201-208. [姜振学, 王显东, 庞雄奇, 等. 塔北地区志留系典型油气藏古油水界面恢复[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(2): 201-208. ]
- [25] Zhang Nai, Zhao Ruihua, Zhang Dijia, *et al.* Fluorescence characteristics of the Ordovician hydrocarbon inclusions in the Tazhong- I slope-break zone and the timing of hydrocarbon accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 63-68. [张鼎, 赵瑞华, 张蒂嘉, 等. 塔中 I 号带奥陶系烃包裹体荧光特征与成藏期[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 63-68. ]
- [26] Song Jimei, Wang Lingfeng. Fixed wavelength synchronous fluorescence spectral characteristics of oil-gas samples[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(5): 803-805. [宋继梅, 王凌峰. 油气样品的固定波长同步荧光光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(5): 803-805. ]
- [27] Qin Shengfei, Pan Wenqing, Han Jianfa, *et al.* A method for biomarker study from reservoir bitumen and inclusions[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 315-318. [秦胜飞, 潘文庆, 韩剑发, 等. 储层沥青与有机包裹体生物标志物分析方法[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 315-318. ]
- [28] Yang Shuanrong, Pan Wenqing, Han Jianfa, *et al.* A discussion on the oil controlling mechanisms of carbonate rock reservoirs of Ordovician in Lunnan area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1): 84-88. [杨栓荣, 潘文庆, 韩剑发, 等. 轮南奥陶系碳酸盐岩储集体控油机理探讨[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 84-88. ]
- [29] Zhang Nai, Wang Zhaoming, Ju Fengping, *et al.* Diagenetic bitumen in Ordovician carbonate reservoir of the northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 225-231. [张鼎, 王招明, 鞠凤萍, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩中的储层沥青[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 225-231. ]
- [30] Ci Xinghua, Xiang Qiaoling, Chen Fanghong, *et al.* Application of quantitative fluorescence analysis to the distinguishment of oil properties: A case study in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(1): 100-102. [慈兴华, 向巧玲, 陈方鸿, 等. 定量荧光分析技术在原油性质判别方面的应用探讨[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 100-102. ]
- [31] Li Sumei, Pang Xiongqi, Liu Keyu, *et al.* A new approach to discriminate oil fluid inclusions quickly: Quantitative grain fluorescence(QGF) techniques and its application[J]. Petroleum

- um Geology and Experiment, 2006, 28(4): 386-390. [李素梅, 庞雄奇, 刘可禹, 等. 一种快速检测油包裹体的新方法——颗粒包裹烃定量荧光分析技术及其初步应用[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 386-390.]
- [32] Li Sumei, Pang Xiongqi, Liu Keyu, *et al.* Characteristics and application of total scanning fluorescence for oils and reservoir rock extracts from the Dongying Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 439-445. [李素梅, 庞雄奇, 刘可禹, 等. 东营凹陷原油、储层吸附烃全扫描荧光特征与应用[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 439-445.]
- [33] Li Sumei, Pang Xiongqi, Sun Aiyun. Total scanning fluorescence for oils with different genetic types and controlling factors[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 230-232. [李素梅, 庞雄奇, 孙爱艳. 不同成因原油全扫描定量荧光特征及其影响因素[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 230-232.]
- [34] Zhang Y G, Frantz J D. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl KCl CaCl<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions[J]. *Chemical Geology*, 1987, 64(3): 335-350.
- [35] Brown P E, Lamb W M. P-V-T properties of fluids in the system H<sub>2</sub>O ± CO<sub>2</sub> ± NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(6): 1209-1221.
- [36] Chen Yong, Zhou Yaoqi, Ni Pei. A new method for measurement of internal pressure of inclusions: CO<sub>2</sub>-Raman spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2006, 25(3): 211-214. [陈勇, 周瑶琪, 倪培. 一种获取包裹体内压的新方法——二氧化碳拉曼光谱法[J]. 岩矿测试, 2006, 25(3): 211-214.]
- [37] Wang Jianbao, Guo Rutai, Xiao Xianming, *et al.* Timing and phases of hydrocarbon migration and accumulation of the formation of oil and gas pools in Lunnan Low Uplift of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 320-332. [王建宝, 郭汝泰, 肖贤明, 等. 塔里木盆地轮南低隆起早古生代油气藏形成的期次与时间研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 320-332.]

## Characteristics of Hydrocarbon Inclusions and Geological Age of Hydrocarbon Accumulation in Ordovician Reservoir of Eastern Lungu Area, Tarim Basin

FANG Qi-fei<sup>1</sup>, ZHANG Nai<sup>2</sup>, ZHANG Bao-shou<sup>3</sup>, LU Yu-hong<sup>3</sup>, WU Xue-qiong<sup>4</sup>, YU Xiao-qing<sup>2</sup>

(1. Northwest Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Lanzhou 730020, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China;

4. China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The information contained in fluid inclusions can demonstrate the hydrocarbon accumulation period. Based on the fluorescence characters and the occurrence relationships of hydrocarbon inclusions in the Ordovician reservoir of eastern Lungu area, and combined with micro-thermometry analysis of coexisting aqueous inclusions, hydrocarbon inclusions of Ordovician reservoir can be divided into three stages. The brown fluorescence hydrocarbon inclusions representing the first stage were formed in the Late Caledonian-early Hercynian Period. The yellow fluorescence hydrocarbon inclusions of second stage were formed in the Late Hercynian Period. And the blue-white fluorescence hydrocarbon inclusions representing the last stage were formed in the period of Yanshan-Himalayan. Quantitative Grain Fluorescence (QGF) fingerprints were analyzed compared with Total Scanning Fluorescence (TSF) fingerprints of adsorbed hydrocarbons and non-hydrocarbons. The consistency of the inclusion oil and absorbed oil in the Ordovician reservoir is satisfactory. Based on PT simulation results of coexisting aqueous inclusions, combination of trapped-temperature and trapped-depth of fluid inclusion on the diagram of geothermal-burial history can be used to make sure about the history of hydrocarbon accumulation in Ordovician reservoir. Ordovician reservoirs of eastern Lungu area were charged three times. The first stage of heavy oil-filling was in the period of Late Caledonian-Early Hercynian; and the second stage happened in the period of Late Hercynian with normal oil filling; and the third stage of light oil or condensate oil-gas filled in the period of Early Himalayan. The Ordovician oil-gas reservoirs in eastern Lungu area were charged by the first and second stages of oil and gas which had been destroyed and degraded to different degrees before the oil-gas filled in the third stage.

**Key words:** History of hydrocarbon accumulation; Fluid inclusion; Fluorescence analysis; Ordovician; Eastern Lungu area