

油气充注成藏贡献度及其意义

平宏伟¹, 陈红汉^{1,2}, 宋国奇³, 刘惠民³

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃兰州 730000

3. 中国石化胜利油田有限公司, 山东东营 257015

摘要: 油气成藏过程常伴随着多幕次的油气充注, 通过流体包裹体方法确定的油气成藏时期大都包含了一个油气藏形成过程中多幕次的油气充注. 然而, 不是所有的充注幕次都对现今的油气藏具有贡献. 因而确定哪一幕油气充注对现今油气成藏的贡献程度最大, 才是准确厘定油气成藏时期的前提. 油包裹体是油气充注的直接证据, 当其他因素影响较小时, 油包裹体荧光颜色的改变反映的是其成熟度的变化, 也是其源岩热演化程度改变的响应. 油包裹体成熟度可以通过已知油藏油的微束荧光光谱参数和原油 API 度关系来定量表征, 古油气成藏贡献度分析就是建立在油包裹体 API 度预测的基础上. 在每一幕原油充注时期内, 成岩矿物捕获的油包裹体 API 度频率分布符合正态分布趋势, 理论上, 当有几幕原油充注时, 原油 API 度分布就存在几个正态分布趋势. 通过对比油包裹体 API 度频率分布直方图与油藏现今流体 API 度, 可以比较出哪一幕原油充注对现今油气聚集的贡献度最大, 从而为油气成藏过程分析和油气充注 PVTx(压力—体积—温度—组分)史恢复提供更好的约束条件.

关键词: 流体; 包裹体; 荧光; 贡献度; 运移; 东营凹陷; 油气.

中图分类号: TE122

文章编号: 1000—2383(2012)01—0163—08

收稿日期: 2011—06—08

Contributions Degree of Petroleum Charging to Oil and Gas Accumulation and Its Significance

PING Hong-wei¹, CHEN Hong-han^{1,2}, SONG Guo-qi³, LIU Hui-min³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Lanzhou Oil and Gas Research Center of Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3. SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying 257015, China

Abstract: The petroleum accumulation always accompanies several petroleum charging episodes. The timing of petroleum accumulation determined by fluid inclusion method is usually representative of all the possible petroleum charging episodes, however, not all the petroleum charging episodes have contributions to present petroleum accumulation. Consequently, the premise for accurately determining the timing of petroleum accumulation is to confirm which petroleum charging episode has the most contribution to present petroleum accumulation. Petroleum inclusion is the direct evidence for petroleum migration and the variation of its fluorescent color reflects both of its maturity changing and the thermal evolution level of its source rock if other influence factors have little effects on the oil maturity. The maturity of petroleum inclusion can be quantified by the relationship between the micro beam fluorescence spectrum parameters and API (American Petroleum Institute) degree of the known reservoir petroleum fluid. The analysis of contributions degree of petroleum charging to present petroleum accumulation is based on API degree prediction. The frequency distribution of API degree of petroleum inclusions should be a normal distribution in each petroleum charging episode. In theory, how many the episodes are, there are corresponding normal distributions of API degree of the petroleum inclusion. We can determine which episodic has the most contribution to the present petroleum accumulation by comparing the frequency distribution of API degree of petroleum inclusions with the API degree of present reservoir fluid, which can be a better restricted condition for the analysis of petroleum migration and accumulation and PVTx history of petroleum charging.

Key words: fluid; inclusions; fluorescence; contribution degree; migration; Dongying depression; petroleum.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB214804); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目.

作者简介: 平宏伟(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事含烃流体地质研究. E-mail: howping@yahoo.cn

油气充注幕次、充注时间及充注时的 PVT_x 条件是成藏研究的重要内容 (McLimans, 1987; Thiéry *et al.*, 2002; Bourdet *et al.*, 2010; Ping *et al.*, 2011). 尽管在油气充注过程中经常伴随着两幕或者多幕油气充注,但并不代表每一幕油气充注都对现今油气聚集起到关键性作用. 油气成藏期应该是指对现今油气聚集起到决定性作用的一幕或者几幕油气充注所对应的时期. 利用储层成岩矿物捕获的流体包裹体均一温度,结合埋藏史和热史投点法或者储层成岩矿物 K-Ar/Ar-Ar 定年法获得油气充注幕次及时间,已经成为较普遍的方法 (Hogg *et al.*, 1993; Mark *et al.*, 2005; 丰勇等, 2009; 李华明等, 2009). 然而,这些方法通常只是对油气充注的幕次和时间进行了限定,并不能指示哪一幕或几幕油气充注对现今油气成藏的贡献度最大. 确定油气充注对成藏的贡献度对油气成藏史分析及油气勘探具有重要的意义,本文在石油包裹体特有的荧光特征基础上,结合前人的研究,尝试性地利用油包裹体 API 度来分析油气充注对现今油气成藏的贡献,以期更好的限定油气成藏时期.

1 成藏贡献度分析方法

1.1 油包裹体 API 度预测

油包裹体荧光颜色通常可以指示捕获的油组分、成熟度及可能的油源 (Guilhaumou *et al.*, 1990; Burruss, 1991; Pironon and Pradier, 1992; Stasiuk and Snowdon, 1997; Caja and Permanyer, 2009), 利用油包裹体荧光特征可以重构油气运移路径 (McLimans, 1987; Bodnar, 1990). 早在 1981 年, Gijzel 就报道了原油荧光颜色随着原油成熟度增加,其荧光颜色向短波方向移动(蓝移),随后原油荧光特征在油气领域研究中得到大量应用 (Lo, 1987; Ottenjann, 1988; Alpern *et al.*, 1993; Caja and Permanyer, 2009). Bodnar (1990) 修正了 Gelfand and Lang (1985) 提出的荧光颜色与原油 API 度的关系,首次将油包裹体荧光颜色与 API 度定性的对应起来. 尽管油包裹体荧光颜色与成熟度关系还存在争议 (George *et al.*, 2002; Oxtoby, 2002), 但在同一石油系统中油包裹体荧光颜色与其密度关系已经在油气成藏研究中广为应用 (Bodnar, 1990; Stasiuk and Snowdon, 1997; Blanchet *et al.*, 2003; Caja and Permanyer, 2009). 通常,油包裹体 API 度是通过已知的参照原油荧光颜色、荧光光谱

参数或者荧光色度值,与已知原油 API 度关系校正获得的 (Bodnar, 1990; Stasiuk and Snowdon, 1997; Blanchet *et al.*, 2003). 值得注意的是包裹体中捕获的原油是位于封闭体系内,在室温下包裹体内压力往往要达到几个兆帕,油中才会溶解部分天然气,而参照原油在常温常压条件下几乎缺少挥发性组分. 那么包裹体内原油中溶解的天然气是否会对荧光属性有较大影响呢? Blanchet *et al.* (2003) 认为溶解的天然气对油包裹体荧光影响非常有限. 因此,利用参照原油的荧光属性间接确定油包裹体 API 度是可行的. 需要注意的是,利用已知原油来校正油包裹体油密度时,参照原油最好是与包裹体油来源于同一石油系统 (Pironon and Pradier, 1992).

1.2 油包裹体 API 度频率分布

油气从烃源岩内排出,到充注储层、直至成藏,整个过程是幕式的,每一幕原油充注时期内,成岩矿物捕获的油包裹体 API 度频率分布应该符合原油从充注强度小、API 度低—充注高峰时充注强度最大,到 API 度增大—充注晚期充注强度再次减小、API 度增大这样一个正态分布趋势 (图 1a). 理论上,有几幕原油充注,原油 API 度分布就有几个正态分布趋势. 图

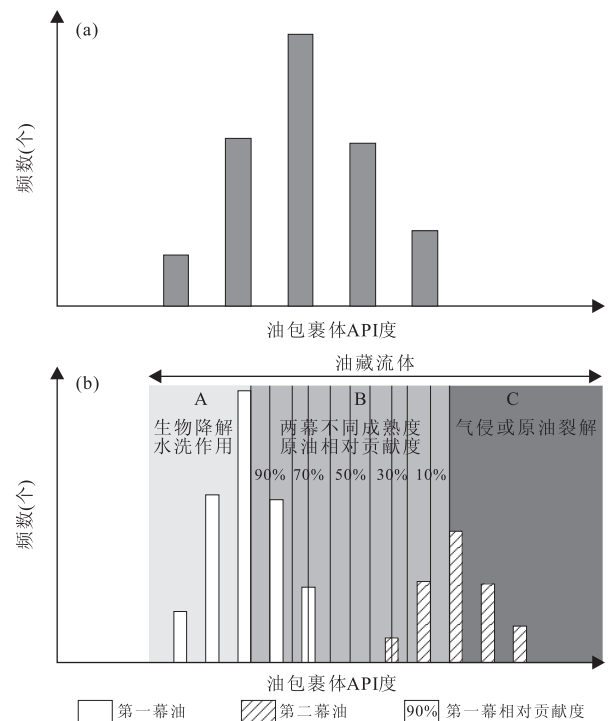


图 1 油气充注成藏贡献度理想模式

Fig. 1 The ideal schema diagram of contributions degree of petroleum charging

a. 单幕原油充注 API 度直方图; b. 两幕原油充注 API 度直方图、成藏贡献度以及成藏后的次生改造作用

1b 为理想的两幕原油充注的油包裹体 API 度频率直方图,其中 A、B 和 C 这 3 个不同区域代表成藏后油藏流体 API 度的可能范围. 如果油藏流体 API 度位于区域 B 内,则表明现今油藏为两幕原油充注共同贡献的结果;如果油藏流体 API 度较靠近第一幕原油峰值 API 度,则表明第一幕原油对现今油藏贡献度较大,反之则表明第二幕原油对现今油藏贡献度较大. B 区域的百分比线即表示对应油藏原油 API 度的第一幕油充注对现今油气藏成藏的贡献度大小(图 1b). 对于两幕油充注,任意一幕油充注的成藏贡献度数值可以通过以下公式计算:

$$C(A) = \frac{API_R - API_A}{API_B - API_A} \times 100\%, \quad (1)$$

$$API^o = \frac{141.5}{\rho_{oil}/\rho_w} - 131.5, \quad (2)$$

其中, $C(A)$ 为 A 幕油充注的成藏贡献度; API_R 为油藏油的 API 度; API_A 为 A 幕油充注的峰值范围内平均 API 度; API_B 为 B 幕油充注的峰值范围内平均 API 度; ρ_{oil} 为地面标准条件下原油密度,这里近似用室温条件(20 °C)下油包裹体液相密度(g/cm^3)代替; ρ_w 为 4 °C 纯水密度(g/cm^3). 需要注意的是,以上公式只适用于现今油藏油 API 度位于古充注油 API 度范围内的情况(B 区域,图 1b);随着现今油藏油 API 度越来越远离古充注油 API 度,表明油气充注后次生改造作用对油藏 API 度影响越来越大(A 和 C 区域,图 1b). 对于三幕或更多幕次的油充注,可以通过 API 度频率分布图确定其中最主要的两幕油充注(假设其他的幕次对成藏贡献可以忽略),进而根据式 1 和式 2 计算各幕油的成藏贡献度.

包裹体油 API 度变化除主要受成熟度控制外,其他因素如烃源岩成熟度变化、运移分馏、多期油混合、水洗、生物降解、捕获分馏、原油裂解(Pang *et al.*, 1998; George *et al.*, 2001; Oxtoby, 2002; Blanchet *et al.*, 2003; Teinturier *et al.*, 2003) 等对包裹体内原油组分变化也有影响. 利用油包裹体 API 度频率分布直方图同样可以指示原油成藏后可能的次生改造过程,例如,当油藏流体 API 度小于第一幕充注原油峰值平均 API 度时,表明原油成藏后很可能经历了生物降解或者水洗作用(A 区域,图 1b);同样当油藏流体 API 度大于第二幕充注原油峰值平均 API 度时,则表明原油成藏后很可能经历了晚期天然气气侵或者油藏原油再次裂解过程(C 区域,图 1b). 因此,储层中成岩矿物捕获的油包裹

体 API 度频率分布不仅可以指示油气是随着时间连续充注进储层还是分幕次充注,还可以结合现今油藏流体 API 度识别出哪一时期充注的原油对现今油气聚集起主要作用,另外还可能指示原油成藏后的次生改造作用.

原油在幕式充注过程中,随着充注的原油 API 度的增大(成熟度增大),相应捕获的油包裹体的均一温度(T_{hoil})与其 API 度关系会呈不同的趋势. 虽然油包裹体均一温度是温度、压力和组分共同作用的结果(平宏伟和陈红汉, 2011),然而在一幕原油连续充注过程中组分对油包裹体均一温度的影响要较温度和压力对其作用效果小的多. 因此,在一幕原油充注过程中,油包裹体均一温度与其 API 度变化趋势应该是单一的,除非发生引起压力及温度较大波动的地质过程. 而识别这种引起地层压力和温度变化的地质过程,可以通过油包裹体 API 度、油包裹体均一温度(T_{hoil})、油包裹体共生的盐水包裹体均一温度(T_{haqu})3 个约束参数来实现. 图 2 中区域 A、B 和 C 分别代表了持续埋深正常压力系统、持续埋深后抬升过程及持续埋深异常超压系统 3 个代表性的地层演化过程中 T_{hoil} 与 T_{haqu} 随 API 度的变化趋势. 由图 2a 可知,地层持续埋深过程中,如果地层始终为正常压力系统,则在一个石油充注幕次内,随

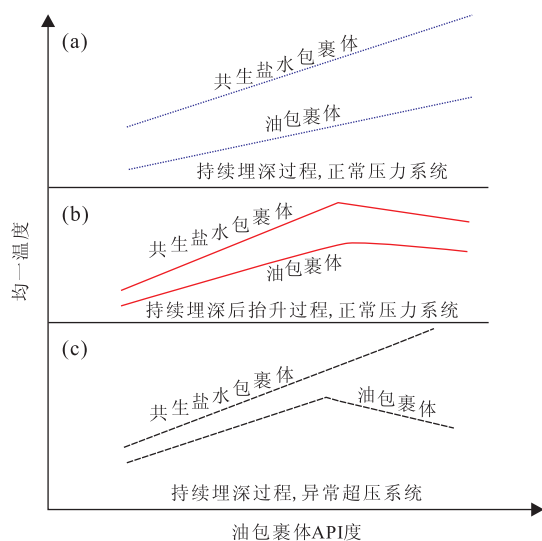


图 2 不同的油包裹体 API 度与油包裹体均一温度(T_{hoil})和与其共生的盐水包裹体均一温度(T_{haqu})组合,及其对储层埋藏史和压力系统演化的指示

Fig. 2 Different groups of API degree and homogenization temperatures of petroleum inclusion and their coexisting aqueous inclusions and its indications for reservoir bury history and pressure system evolution

着油包裹体 API 度变化, T_{hoil} 与 T_{haqu} 将呈递增的趋势演变, 其差值 (ΔT_h) 主要取决于储层埋藏过程中的压力/温度梯度, 压力/温度梯度越大则 ΔT_h 增加越快, 反之越慢(平宏伟和陈红汉, 2011); 一般来说, 当地层在持续沉降后发生构造抬升、地温下降, 此阶段捕获的油包裹体均一温度与其 API 度关系趋势与图 2b 中的趋势类似; 如果在地层持续埋深过程中发育异常超压则 T_{hoil} 与其 API 度变化趋势将不再是单调递增过程, 而是在超压开始发育时 T_{hoil} 开始呈递减趋势、 ΔT_h 呈增大趋势, 表明油包裹体含气不饱程度增加(图 2c). 图 2 为几种典型地质过程中 T_{hoil} 和 T_{haqu} 随油包裹体 API 度变化的趋势图, 具有一定的指导意义. 然而, 实际地质条件更加复杂, 还应该具体情况具体分析.

2 东营凹陷北带民丰地区深层油气成藏贡献度分析

2.1 区域地质概况

民丰地区位于东营凹陷中央隆起带以北, 东临青坨子凸起, 西部紧靠利津一胜坨地区, 北靠陈家庄凸起, 南接牛庄洼陷. 东营凹陷北带地层分布与整个东营凹陷一致, 其中第三系地层分布普遍, 厚度大, 是东营凹陷北带主要的生油层系的储油层系(图 3). 第三系地层由老到新分为: 孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组. 其中沙河街组又细

分为沙一段、沙二段、沙三段和沙四段, 沙四段又包含沙四上亚段和沙四下亚段. 本文研究的深层就是指沙河街组沙四段的沙四下亚段层位. 近几年来, 民丰地区靠近北部陡坡的沙四下亚段砂砾岩体中发现了以丰深 1 井凝析油气为代表的高质量油气流. 油源对比表明, 东营凹陷北带深层沙四下亚段的油气主要来源于沙四下亚段烃源岩(冯伟光, 2008), 属于自生自储型油气藏.

2.2 流体包裹体荧光及均一温度测试

6 块流体包裹体样品被应用到民丰深层油气充注成藏贡献度分析, 样品主要来自丰深 1 井和丰 8 井, 样品详细信息如表 1 所示. 本文应用的流体包裹体研究技术方法主要包括: 紫外激发荧光光谱、显微测温等. 实验仪器及其参数为: Nikon E80I 双通道荧光显微镜, 用于流体包裹体岩相学观测; 紫外激发光为多色激发, 激发波长为 330~380 nm; 荧光微束光谱, 由 Ocean Optics Inc. 公司的 Maya 2000 Pro 光谱仪记录; Yuanao 显微光谱分析系统, 用于接收和处理光谱数据; Linkam THMS G600 冷/热台, 用于流体包裹体均一温度和盐度测试. 流体包裹体显微荧光观测结果表明, 民丰地区丰深 1 井检测到大量发蓝白色荧光油包裹体(图 4a), 油包裹体产状主要为长石颗粒继承性溶蚀裂纹、方解石胶结物及穿石英颗粒裂纹内. 另外, 丰深 1 井在穿石英颗粒裂纹内检测到大量带蓝白色荧光帽的凝析气包裹体(图 4b), 表明丰深 1 井经历过高成熟油气的充注.

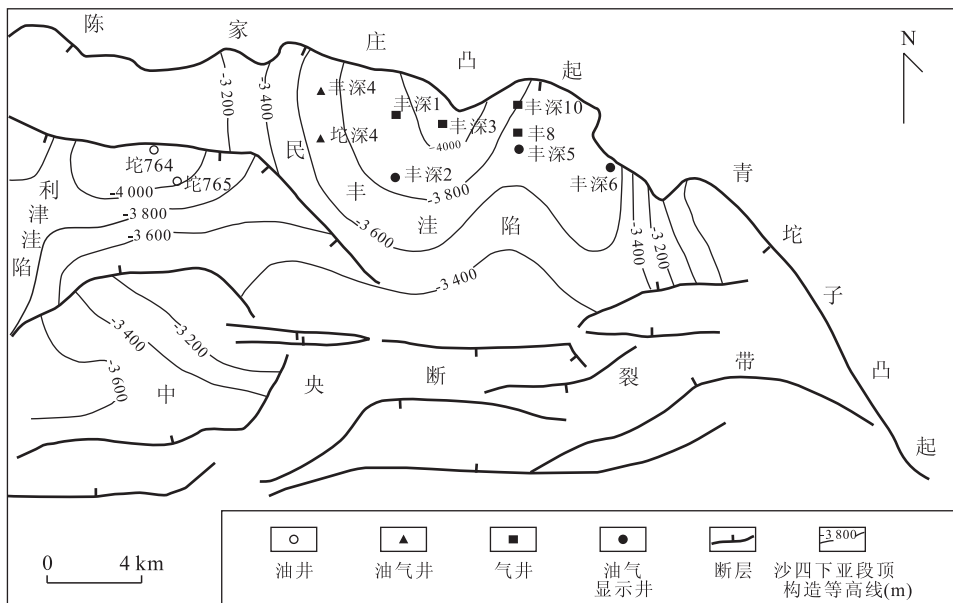


图 3 东营凹陷北带民丰地区地质概况

Fig. 3 Regional geologic map of Minfeng area in North Dongying depression

表 1 东营凹陷北带民丰地区深层流体包裹体分析

Table 1 Fluid inclusions analysis in the deep reservoir in Minfeng area in North Dongying depression

井号	深度(m)	层位	岩性
丰 8	3 943.0	E _{s4x}	泥岩中裂缝充填方解石脉
丰 8	3 943.9	E _{s4x}	泥岩中裂缝充填方解石脉
丰深 1	4 321.7	E _{s4x}	含砾粗砂岩
丰深 1	4 322.1	E _{s4x}	含砾粗砂岩
丰深 1	4 322.9	E _{s4x}	含砾粗砂岩
丰深 1	4 325.1	E _{s4x}	含砾粗砂岩

丰 8 井主要在泥岩裂缝充填方解石脉内检测到大量黄色(图 4c)和蓝白色荧光油包裹体(图 4d)。

2.3 油包裹体 API 度计算及成藏贡献度分析

油包裹体 API 度可以通过已知 API 度的原油荧光参数来约束获取(Bodnar, 1990; Stasiuk and Snowdon, 1997; Blanchet *et al.*, 2003). 本文的油包裹体 API 度是通过采集东营凹陷沙四段油藏原油的 15 个微束荧光光谱, 建立荧光参数 QF-535 与原油 API 度函数关系而获取的. QF-535 是指波长为 750~535 nm 之间的光谱曲线所围成的面积与波长为 535~430 nm 之间的光谱曲线围成面积的比值(Munz, 2001). 图 5 是最终拟合的 API 度与荧光

QF-535 的关系图, 用于计算东营凹陷北带深层油包裹体 API 度的函数关系(式 3), 最终根据式 3 计算了各采样井深度检测到的各幕油包裹体 API 度.

$$API^{\circ} = -8.96 \ln(QF-535) + 34.04 \quad (3)$$

图 6 为丰 8 井油包裹体 API 度频率分布直方图, 由图可知, 在丰 8 井 3 943.0~3 943.9 m 泥岩裂缝充填方解石脉中检测到两幕原油充注: 第一幕油 API 度范围为 34~39, 第二幕油 API 度范围为 40~44. 其中第一幕油对应的峰值 API 度范围为 37.0~38.0, 平均值为 37.7. 第二幕油对应峰值 API 度范围为 41.0~42.0, 平均值为 41.3. 原油的 API 度为 38.32, 根据公式 1 可计算第一幕油的成藏贡献度为 83.3%, 第二幕油的成藏贡献度为 16.7%. 通过图 6 丰 8 井成藏贡献度分析结果表明早期第一幕油充注对现今油气藏成藏起到决定作用, 主成藏时期应该对应为 API 度为 37~38 的油包裹体充注时所对应的时期, 因此接下来就可以着重恢复 API 度为 37~38 时原油充注时期内的 PVT_x 史, 进而厘定油气成藏的主控因素.

图 7 为丰深 1 井油包裹体 API 度频率分布直方图和与油包裹体均一温度和油包裹体共生的盐水包裹体均一温度关系图. 图 7a 所示的丰深 1 井在

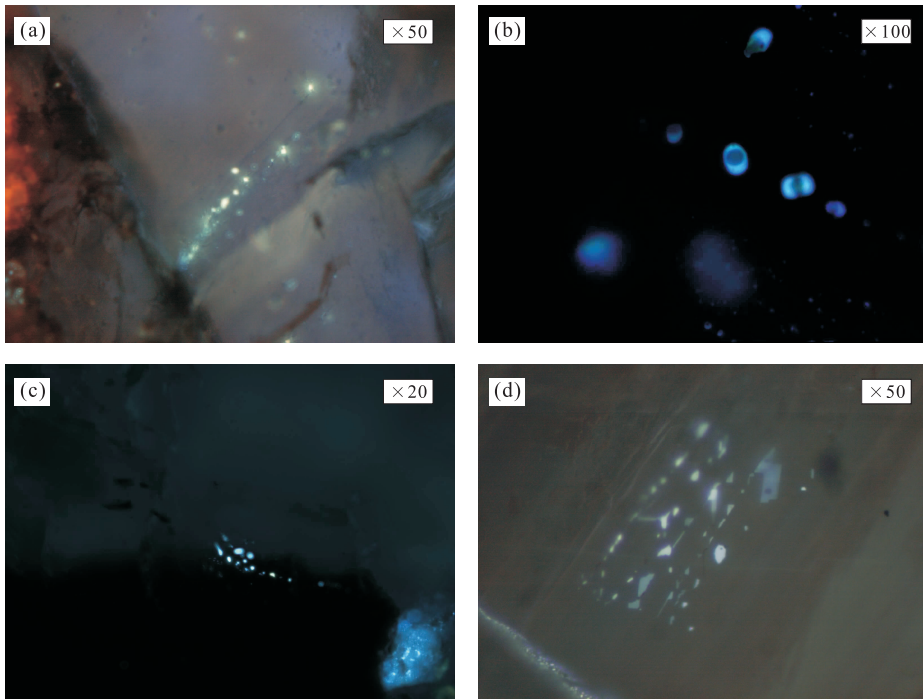


图 4 东营凹陷北带深层民丰地区油包裹体荧光观测照片

Fig. 4 Photomicrographs of petroleum inclusions in Minfeng area

a. 丰深 1 井穿石英颗粒裂纹中捕获的黄色荧光油包裹体; b. 丰深 1 井穿石英颗粒裂纹中捕获的蓝白色凝析气包裹体; c. 丰 8 井泥岩裂缝充填方解石脉中捕获的黄色荧光油包裹体; d. 丰 8 井泥岩裂缝充填方解石脉中捕获的蓝白色荧光油包裹体

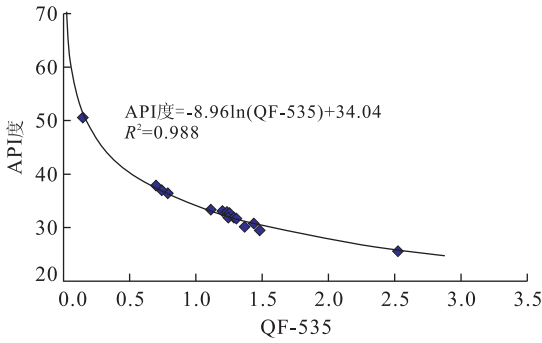


图 5 东营凹陷沙四段原油 API 度与荧光参数 QF-535 关系
Fig. 5 Relationship between API degree and the QF-535 value of the crude oil in Dongying depression

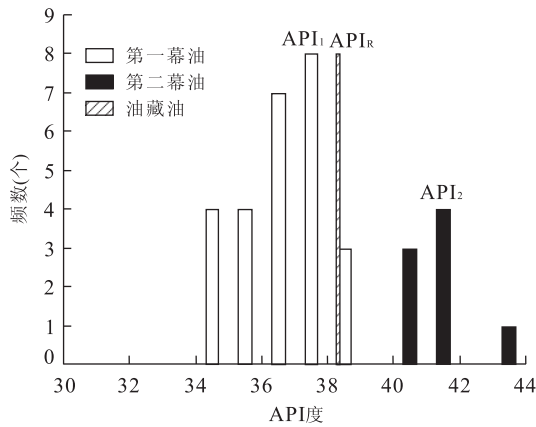


图 6 民丰地区丰 8 井油包裹体 API 度频率分布直方图
Fig. 6 The histogram of API degree of petroleum inclusions from well Feng 8 in Minfeng area

API₁ 为第一幕油充注峰平均值; API₂ 为第二幕油充注峰平均值; API_R 为油藏原油的 API 度

4 321.7~4 325.1 m 检测到二幕油充注,第一幕油 API 度频率分布为典型的正态分布,表明油包裹体 API 度主要受烃源岩成熟度控制,随着原油成熟度由低到高,油气充注强度的演化过程由弱到强再到弱.从图 7a 可以看出,第一幕原油大量充注时对应油包裹体 API 度范围为 38~41,充注高峰时油 API 度为 39~40;第二幕充注原油对应包裹体荧光为蓝色,对应的 API 度为 49~50,油包裹体为富气相,加热均一到气相表明为凝析油,由于第二幕油只在一条穿石英颗粒裂纹中检测到,数据较少,故其 API 度分布为单峰分布.现今丰深 1 井 4 316.0~4 343.0 m 试油结果为凝析油气藏,原油 API 度约为 50,显然第二幕原油 API 度与现今油藏油 API 度一致,根据公式 1 计算的第二幕油的成藏贡献度接近 100%,因此可以断定第二幕油充注对现今丰深 1 井凝析油气藏形成起决定作用.丰深 1 井原油充注过

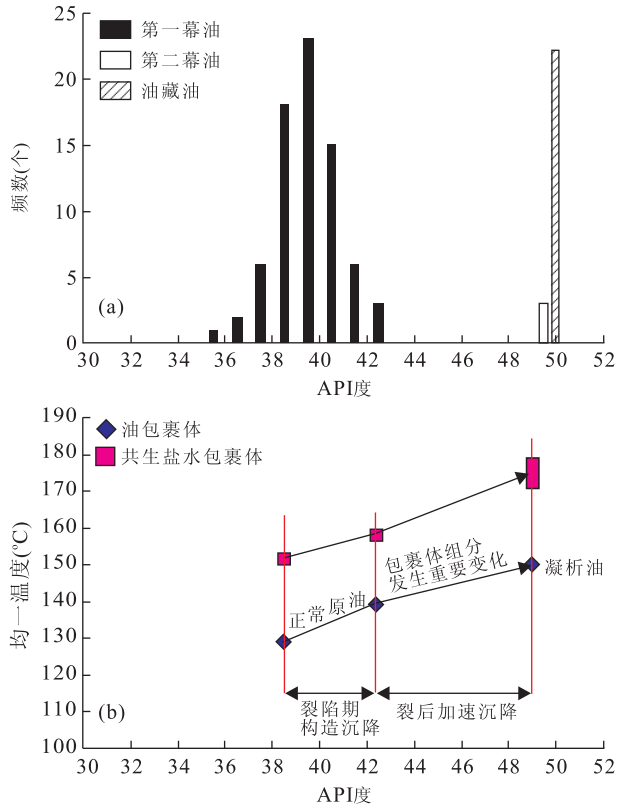


图 7 民丰地区丰深 1 井油包裹体 API 度频率分布(a)及 API 度与其均一温度和与其共生的盐水包裹体均一温度关系(b)

Fig. 7 The histogram of API degree of petroleum inclusions (a) and the diagram showing relationship between API degree and T_{hoil} & T_{haqu} (b) of well Fengshen 1 in Minfeng area

程正好符合图 1 中 C 区域的油气充注成藏贡献度理想模式,即现今油气藏形成是由于气侵或者由早期充注的油热裂解所致.

由图 7b 可知,随着原油连续充注(油包裹体 API 度逐渐增大),油包裹体均一温度和与其共生的盐水包裹体均一温度总体上呈单调递增的趋势,然而 ΔT_b 变化并不是很大,很可能反映埋深过程中正常压力条件下的油气充注(图 2a).另外,结合丰深 1 井埋藏史—热演化史,认为图 7b 中的 T_{hoil} 和 T_{haqu} 与油包裹体 API 度演化关系与其构造演化过程相对应,即第一幕油开始充注时间为裂陷晚期,第二幕凝析油充注时期为坳陷期.

3 结论

利用原油充注过程中捕获的油包裹体 API 度参数进行油气充注成藏贡献度分析,不仅可以识别

油气充注幕次,而且可以将不同幕次充注的原油对现今油气聚集的贡献程度进行定量标定.利用油包裹体 API 度频率直方图还可以识别油气成藏后是否经历了水洗、生物降解、气侵和原油再次裂解等次生改造过程.

油气充注成藏贡献度分析可以为缺少与油包裹体共生盐水包裹体的产出条件下油包裹体的捕获条件提供更加准确的限定.例如,在碎屑岩成岩演化过程中,油气充注往往伴随长石颗粒的酸性溶蚀,通常会在长石颗粒溶蚀区捕获大量的油包裹体,而这种情况下,盐水包裹体较少或者很难观测,因此,通常准确限定长石颗粒溶蚀区中捕获的油包裹体充注条件较难.然而,假如同样在石英颗粒裂纹中也捕获了油包裹体,通过油包裹体 API 度频率分布识别出这 2 个产状所捕获的油包裹体为同一幕充注,那么长石颗粒溶蚀裂纹中捕获的油充注时期就可以通过其他产状的油包裹体捕获时期进行限定了.

油包裹体 API 度频率分布图能较好的应用于单一油源充注条件,各幕油的成藏贡献度分析,而对于多油源多期充注条件下还需要结合详细的油包裹体均一温度、油包裹体 API 度及与其共生的盐水包裹体均一温度来综合判别.

总之,通过分析东营凹陷北带民丰地区丰 8 井和丰深 1 井的油包裹体油 API 度与现今油气聚集的关系表明,油包裹体油 API 度频率分布可以指示原油充注幕次、充注峰值时油成熟度及哪一阶段(早期还是晚期)、何种性质(API 度高还是低)的原油充注对现今油气成藏的贡献度大小以及成藏后的次生改造作用.

References

Alpern, B., Lemos de Sousa, M. J., Pinheiro, H. J., et al., 1993. Detection and evaluation of hydrocarbons in source rocks by fluorescence microscopy. *Organic Geochemistry*, 20(6): 789—795. doi: 10.1016/0146—6380(93)90063—H

Blanchet, A., Pagel, M., Walgenwitz, F., et al., 2003. Microspectrofluorimetric and microthermometric evidence for variability in hydrocarbon fluid inclusions in quartz overgrowths: implications for inclusion trapping in the Alwyn North field, North Sea. *Organic Geochemistry*, 34(11): 1477—1490. doi: 10.1016/j.orggeochem.2003.08.003

Bodnar, R. J., 1990. Petroleum migration in the Miocene Monterey Formation, California, USA: constraints from

fluid-inclusion studies. *Mineralogical Magazine*, 54(375): 295—304.

Bourdet, J., Pironon, J., Levresse, G., et al., 2010. Petroleum accumulation and leakage in a deeply buried carbonate reservoir, Nispero field (Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): 126—142. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.07.003

Burruss, R. C., 1991. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions. *SEPM Short Course*, 25(1): 1—7.

Caja, M. A., Permany, A., 2009. Linking organic geochemistry, oil shows, oil fluid inclusions and tectonic structure to unravel oil migration history (SE Pyrenees, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 101(14). doi: 10.1016/j.gexplo.2008.12.050

Feng, W. G., 2008. Study on formation mode of splitting gas of Minfeng depression. *Petroleum Geology and Engineering*, 22(4): 33—35 (in Chinese with English abstract).

Feng, Y., Chen, H. H., Ye, J. R., et al., 2009. Reservoir-forming periods and accumulation process of Chalufu fault depression of Yitong basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 502—510 (in Chinese with English abstract).

Gelfand, J. C., Lang, W. H. J., 1985. The evaluation of shallow potential in a deep field wildcat. *The Log Analyst*, 26: 13—22.

George, S. C., Ruble, T. E., Dutkiewicz, A., et al., 2001. Assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours. *Applied Geochemistry*, 16(4): 451—473. doi: 10.1016/S0883—2927(00)00051—2

George, S. C., Ruble, T. E., Dutkiewicz, A., et al., 2002. Reply to comment by Oxtoby on “Assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours”. *Applied Geochemistry*, 17(10): 1375—1378. doi: 10.1016/S0883—2927(02)00027—6

Guilhaumou, N., Szydłowski, N., Pradier, B., 1990. Characterization of hydrocarbon fluid inclusions by infra-red and fluorescence microspectrometry. *Mineralogical Magazine*, 54(2): 311—324.

Hogg, A. J. C., Hamilton, P. J., Macintyre, R. M., 1993. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir: K-Ar dating in the Alwyn area (UK North Sea). *Marine and Petroleum Geology*, 10(3): 279—294. doi: 10.1016/0264—8172(93)90110—E

Li, H. M., Chen, H. H., Zhao, Y. J., 2009. The hydrocarbon

- charging events and ages in the volcanic reservoir of Santanghu basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(5): 785–791 (in Chinese with English abstract).
- Lo, H. B., 1987. A quantitative fluorescence technique for evaluating thermal maturity: instrumentation and examples. *Organic Geochemistry*, 11(5): 371–377. doi: 10.1016/0146-6380(87)90069-6
- Mark, D. F., Parnell, J., Kelley, S. P., et al., 2005. Dating of multistage fluid flow in sandstones. *Science*, 309(5743): 2048–2051. doi: 10.1126/science.1116034
- McLimans, R. K., 1987. The application of fluid inclusions to migration of oil and diagenesis in petroleum reservoirs. *Applied Geochemistry*, 2(5–6): 585–603. doi: 10.1016/0883-2927(87)90011-4
- Munz, I. A., 2001. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications. *Lithos*, 55(1–4): 195–212. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00045-1
- Ottenjann, K., 1988. Fluorescence alteration and its value for studies of maturation and bituminization. *Organic Geochemistry*, 12(4): 309–321. doi: 10.1016/0146-6380(88)90005-8
- Oxtoby, N. H., 2002. Comments on: assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours. *Applied Geochemistry*, 17(10): 1371–1374. doi: 10.1016/S0883-2927(02)00026-4
- Pang, L. S. K., George, S. C., Quezada, R. A., 1998. A study of the gross compositions of oil-bearing fluid inclusions using high performance liquid chromatography. *Organic Geochemistry*, 29(5–7): 1149–1161. doi: 10.1016/S0146-6380(98)00135-1
- Ping, H. W., Chen, H. H., 2011. Main controlling factors on oil inclusion homogenization temperatures and their geological significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 131–138 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Thiéry, R., Chen, H. H., 2011. Thermodynamic modeling of petroleum inclusions: the prediction of the saturation pressure of crude oils. *Geofluids*, 11(3): 328–340. doi: 10.1111/j.1468-8123.2011.00343.x
- Pironon, J., Pradier, B., 1992. Ultraviolet-fluorescence alteration of hydrocarbon fluid inclusions. *Organic Geochemistry*, 18(4): 501–509. doi: 10.1016/0146-6380(92)90113-C
- Stasiuk, L. D., Snowdon, L. R., 1997. Fluorescence microspectrometry of synthetic and natural hydrocarbon fluid inclusions: crude oil chemistry, density and application to petroleum migration. *Applied Geochemistry*, 12(3): 229–241. doi: 10.1016/S0883-2927(96)00047-9
- Teinturier, S., Elie, M., Pironon, J., 2003. Oil-cracking processes evidence from synthetic petroleum inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 78–79: 421–425. doi: 10.1016/S0375-6742(03)00135-3
- Thiéry, R., Pironon, J., Walgenwitz, F., et al., 2002. Individual characterization of petroleum fluid inclusions (composition and $P-T$ trapping conditions) by microthermometry and confocal laser scanning microscopy: inferences from applied thermodynamics of oils. *Marine and Petroleum Geology*, 19(7): 847–859. doi: 10.1016/S0264-8172(02)00110-1

附中文参考文献

- 冯伟光, 2008. 民丰洼陷裂解气成藏模式研究. 石油地质与工程, 22(4): 33–35.
- 丰勇, 陈红汉, 叶加仁, 等, 2009. 伊通盆地岔路河断陷油气成藏过程. 地球科学——中国地质大学学报, 34(3): 502–510.
- 李华明, 陈红汉, 赵艳军, 2009. 三塘湖盆地火山岩油气藏油气充注幕次及成藏年龄确定. 地球科学——中国地质大学学报, 34(5): 785–791.
- 平宏伟, 陈红汉, 2011. 影响油包裹体均一温度的主要因素及其地质涵义. 地球科学——中国地质大学学报, 36(1): 131–138.