

渤海湾盆地渤南洼陷沙四段油气多期充注的流体包裹体证据

林红梅^{1,2},程付启¹,王永诗²,宋国奇³

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015; 3. 中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001]

摘要:为了确定渤海湾盆地渤南洼陷沙河街组四段的油气充注历史,对该层段24口井26块样品进行了流体包裹体系统分析,包括显微鉴定、微束荧光光谱分析和均一温度测定,并结合取样井沉积埋藏史及热演化史分析,明确了油气充注幕次和时间。流体包裹体分析发现,该层段主要发育盐水、油和含烃盐水3类包裹体,并见沥青包裹体及裂缝/孔隙充填沥青。油包裹体以发黄-黄绿色和蓝白色荧光为主,少量发橙色荧光;橙、黄-黄绿和蓝白色荧光光谱主峰波长 $\lambda_{\max}$ 分别为555.76~576.88,513.25~555.76和491.13~497.93 nm。红绿熵 $Q_{650/500}$ 分布在0.21~0.39,0.43~0.96和0.95~1.17, Q_{1535} 值分布在2.25~2.71,0.99~2.45和0.60~1.13,它们伴生的盐水包裹体均一温度分别为92.6~112.2,106.4~143.7(120~140为主)和143.2~162.7℃。由此推测,渤南洼陷沙四段至少发生过早、中、晚3期油气充注过程。通过盐水包裹体均一温度在沉积埋藏史和热史图上的投影,得到3期油气充注时间分别为30.7~27.7,18~5和3.8~0 Ma。目前发现的油气主要是第二和第三期充注的结果。

关键词:微束荧光光谱;均一温度;流体包裹体;油气多期充注;沙河街组四段;渤南洼陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Fluid inclusion evidence for multi-period oil charge in Shahejie Member 4, Bonan Subsag, Bohai Bay Basin

Lin Hongmei^{1,2}, Cheng Fuqi¹, Wang Yongshi², Song Guoqi³

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 3. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China)

Abstract: To confirm oil charge stages in the Bonan Subsag, Bohai Bay Basin, Twenty six samples collected from twenty four wells in Shahejie member 4 (Es^4) were used for fluid inclusion analysis. Based on microscopic identification, micro-beam fluorescence spectra and homogenization temperature testing in combination with sedimentary burial and thermal evolution histories, oil charge stages and their timings were obtained. There mainly developed three types of inclusions in the Es^4 reservoirs including aqueous inclusions, oil inclusions and hydrocarbon brine inclusions. In addition, asphalt inclusion and filling asphalt in cracks and pores were also observed in some samples. Fluorescence colors of oil inclusions mainly are yellow-yellowgreen and blue-white, with a little of orange color. Main peak wavelength ($\lambda_{\max}$) distribution of orange, yellow-yellowgreen and blue-white oil inclusions are 555.76–576.88, 513.25–555.76, and 491.13–497.93 nanometers respectively. Red-green entropy $Q_{650/500}$ and Q_{1535} of the three colors oil inclusions are 0.21–0.39 and 2.25–2.71, 0.43–0.96 and 0.99–2.45, and 0.95–1.17 and 0.60–1.13 respectively. Homogenization temperatures of coeval aqueous inclusions of the three colors oil inclusion are 92.6–112.2, 106.4–143.7 (mainly 120–140) and 143.2–162.7 degree centigrade. Conclusion could be drawn that reservoirs in the Es^4 had experienced at least three oil charging stages (early, middle and later stages) with different maturity of the oils. By positioning the aqueous inclusions homogenization temperature values on sedimentary burial and thermal evolution history chart, the geological times of the three oil charging stages are obtained which are 30.7–27.7, 18–5 and 3.8–0 million years respectively. Current oil and gas found in the Es^4 were mainly accumulated during the second and the third charging stages.

收稿日期:2015-11-13;修订日期:2016-08-09。

第一作者简介:林红梅(1969—),女,高级工程师、博士研究生,石油地质与勘探。E-mail:slinhm@126.com。

通讯作者简介:程付启(1978—),男,副教授、博士,油气地质与地球化学。E-mail:chengfu9804@163.com。

基金项目:中央高校基本科研专项(15CX02003A);国家科技重大专项(2016ZX05006-003)。

Key words: micro-beam fluorescence spectrum, homogenization temperature, fluid inclusion, multi-stage charging of oil and gas, Shahejie member 4, Bonan Subsag, Bohai Bay Basin

确定油气充注期次是油气成藏研究的重要内容,也是盆地内油气聚集有效性分析、油气资源潜力评价及勘探目标选取的重要基础^[1-3]。目前油气充注期次确定主要有两种方法。一种是通过圈闭发育史、烃源岩生排烃史等分析推测充注期次的“正演”方法,主要用于成藏研究的早期阶段^[4];另一种是根据油气充注时遗留的“成藏化石”来确定充注期次的“反演”方法^[5],适用于成藏研究的晚期阶段^[6]。流体包裹体是油气运聚的原始记录,能够为人们分析油气充注史提供古流体的多种物理和化学信息^[7-8],是最为有效的“成藏化石”^[9]。流体包裹体岩相学、均一温度和盐度特征等已被广泛应用于油气成藏期确定^[6,8,10]。近几年,国内外学者又将烃类包裹体的显微荧光特征与其有机组分和成熟度联系起来,提出了利用荧光光谱参数确定油气充注期次的方法^[11-16],为多源多期充注油气成藏期确定提供了重要手段。

渤南洼陷是我国东部重要的聚油洼陷,在其内部及周边已发现数亿吨的油气储量。然而到目前为止,对于其油气充注的期次还存在争议,有学者认为存在两期充注过程^[17-19],也有研究者提出应为三期充注^[20]。为了解决这一问题,笔者系统采集了研究区沙

四段储层样品,进行了包裹体岩相学分析、微束荧光光谱分析和盐度、均一温度测定,并藉此划分了油气充注期次。在此基础上,结合取样井沉积埋藏史和热演化史分析,确定了油气充注的关键时期。

1 研究区概况

渤南洼陷位于渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷的中西部,东、西、北分别以孤西断层、义东断层、埕南断层与孤岛凸起、义和庄凸起、埕东凸起相接,南以罗家鼻状构造带向陈家庄凸起过渡(图1),总体上为“三断一超、北陡南缓”的箕状断陷盆地。受构造活动控制,洼陷内发育了巨厚的新生代地层,包括第四系平原组、新近系明化镇组和馆陶组,古近系东营组、沙河街组和孔店组。其中,沙三下亚段(沙河街组三段下亚段)、沙四上亚段是已证实的主要烃源岩段^[21-22],可以通过断层-不整合-连通砂体构成的输导体系,向洼陷及周边供给油气。根据宋国奇等人的最新研究^[23],沙四段沉积时期发生过明显的构造反转,导致上、下亚段构造格局与沉积环境及相应的成藏要素均存在明显差异。沙四下亚段主要为浅水三角洲沉积,以红色碎屑岩为

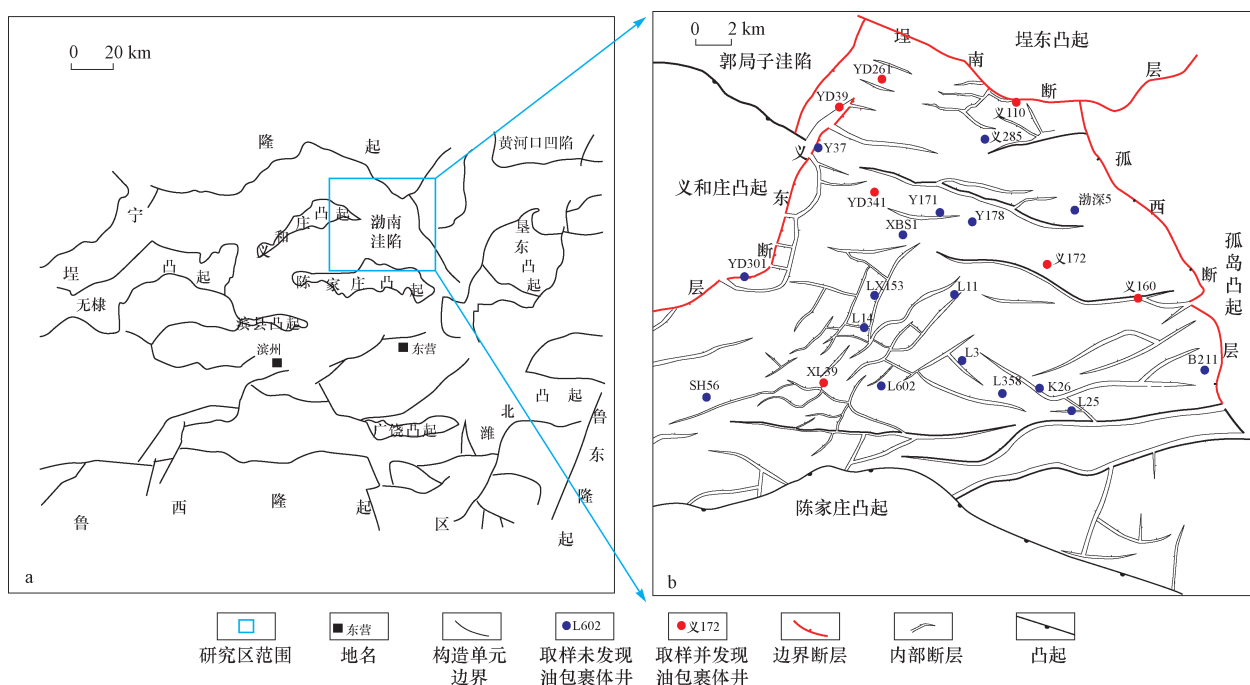


图1 渤南洼陷构造及取样井位置

Fig. 1 Structural location and sample distribution of the Bonan Subsag

a. 渤海湾盆地构造单元划分及研究区位置; b. 研究区沙四段顶面构造特征与取样井位置

主,沙四上亚段纵、横向上沉积环境变化较大,除发育膏泥岩、泥页岩之外,还发育扇三角洲、近岸水下扇和滩坝等储集体^[24-25]。根据油源对比,沙四段油气不仅来自沙四上亚段自身供给,还可以通过断层错接,接受沙三段油气的供给^[26]。

2 样品及分析方法

本次共采集了24口井的沙四段(E_s^4)储集岩样品26块,岩性包括砂岩、灰岩、灰质砂岩和泥质砂岩等,涵盖了沙四段所有已经揭示的储层类型(表1)。取样井分布于整个渤南洼陷(图1),深度上从洼陷边缘的1 944.00 m(渤211井)到深洼部位的5 136.66 m(渤深5井),能够代表研究区不同构造部位、不同深度沙四段的油气充注情况。

对26块样品作双面抛光的包裹体薄片,并在显微镜下进行岩相学特征分析。在此基础上,对有机流体包裹体进行了显微荧光光谱(荧光颜色和微束荧光光谱)观测,以及有机流体包裹体及同期盐水包裹体的均一温度和盐度测定。本次流体包裹体分析在中国地质大学(武汉)资源学院石油系微观烃类检测实验室完成,观测仪器为日本产Nikon 80I显微镜,配备MAYA2000 pro微束荧光光谱分析仪。显微测温仪器为英国Linkam公司产THMS 600G冷热台,另配100倍8 mm长焦镜头,测定方法同参考文献[27],分析精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 结果与讨论

3.1 流体包裹体岩相学特征

通过透射光和荧光薄片显微观察,在26块岩石样

品发现大量包裹体,主要为盐水、油和含烃盐水3类,宿主于穿石英颗粒裂缝、石英颗粒内裂纹、石英次生加大边、长石颗粒节理纹及硅质胶结和方解石胶结物中(图2)。包裹体形态多为椭圆形和近圆形,并见少量条形和不规则状。包裹体相态既有纯液相,又有气液两相,气液比主要分布在4%~8%,个别超过10%,其中义东261井样品油包裹体内边缘见黑色沥青(图2k,l)。包裹体主要为气、液两相,个体较小。其中,盐水包裹体气液比为3%~8%,平均为4.9%,大小在2~14 μm ,平均为5.4 μm ,在透射光和紫外光下均无色;油包裹体气液比为3%~10%,平均为6.24%,大小在3~14 μm ,平均为6.5 μm ,透射光下为无-褐色,紫外光照射下为橙色、黄色、黄绿色和蓝白色;含烃盐水气液比为2%~4%,平均为3.4%,大小在3~8 μm ,平均为4.6 μm 。26块样品中有7块检测到油包裹体,还有1块油-沥青包裹体。值得提及的是,在罗25井样品的粒间孔和义172井样品的溶蚀孔中,还见到沥青充填,透射光下为褐色,荧光下呈棕色,应是早期充注原油的裂解所致。

3.2 烃类包裹体显微荧光特征

3.2.1 油包裹体荧光颜色

烃类包裹体在紫外光激发下会发出荧光,且不同成分和成熟度油气的荧光颜色、主峰波长及光谱特征存在差异,可被用来进行油气运移和油气藏充注幕次研究^[12,27-28]。通过26块样品透射光和紫外光检测,发现7块样品发育油包裹体,荧光颜色包括橙色、黄色-黄绿色和蓝白色。其中,橙色荧光油包裹体较少,仅在义东39、新罗39和义160井中发现,黄色-黄绿色荧光与蓝白色荧光油包裹体数量多、分布广。根据

表1 渤南洼陷沙四段流体包裹体样品分析

Table 1 Test results of fluid inclusion samples from the E_s^4 of the Bonan Sub sag

序号	井号	取样深度/m	岩性	序号	井号	取样深度/m	岩性
1	渤211	1 944.00	砂砾岩	14	邵56	2 772.20	含砾岩
2	渤深5	5 136.66	灰岩	15	新渤深1	4 374.89	红色泥岩
3	垦26	2 826.00	砂砾岩	16	新罗39	2 924.40	灰质泥岩
4	垦26	2 799.88	砂岩	17	义110	3 366.00	砂砾岩
5	罗11	3 227.72	灰岩	18	义160	3 594.57	砂岩
6	罗14	3 009.66	砂岩	19	义171	3 485.50	含油灰岩
7	罗25	2 619.20	砂岩	20	义172	4 014.50	含油砂岩
8	罗3	2 910.00	泥岩	21	义285	4 181.00	砂质灰岩
9	罗358	2 615.50	砂质灰岩	22	义东261	4 023.25	灰质砂岩
10	罗602	2 694.00	灰岩	23	义东301	3 596.60	泥质灰岩
11	罗斜153	3 853.00	粗砂岩	24	义东341	3 701.00	灰质砂岩
12	邵54	2 804.00	灰岩	25	义东39	3 155.90	砂岩
13	邵56	2 716.37	砂岩	26	义深7	3 360.30	灰质砂岩

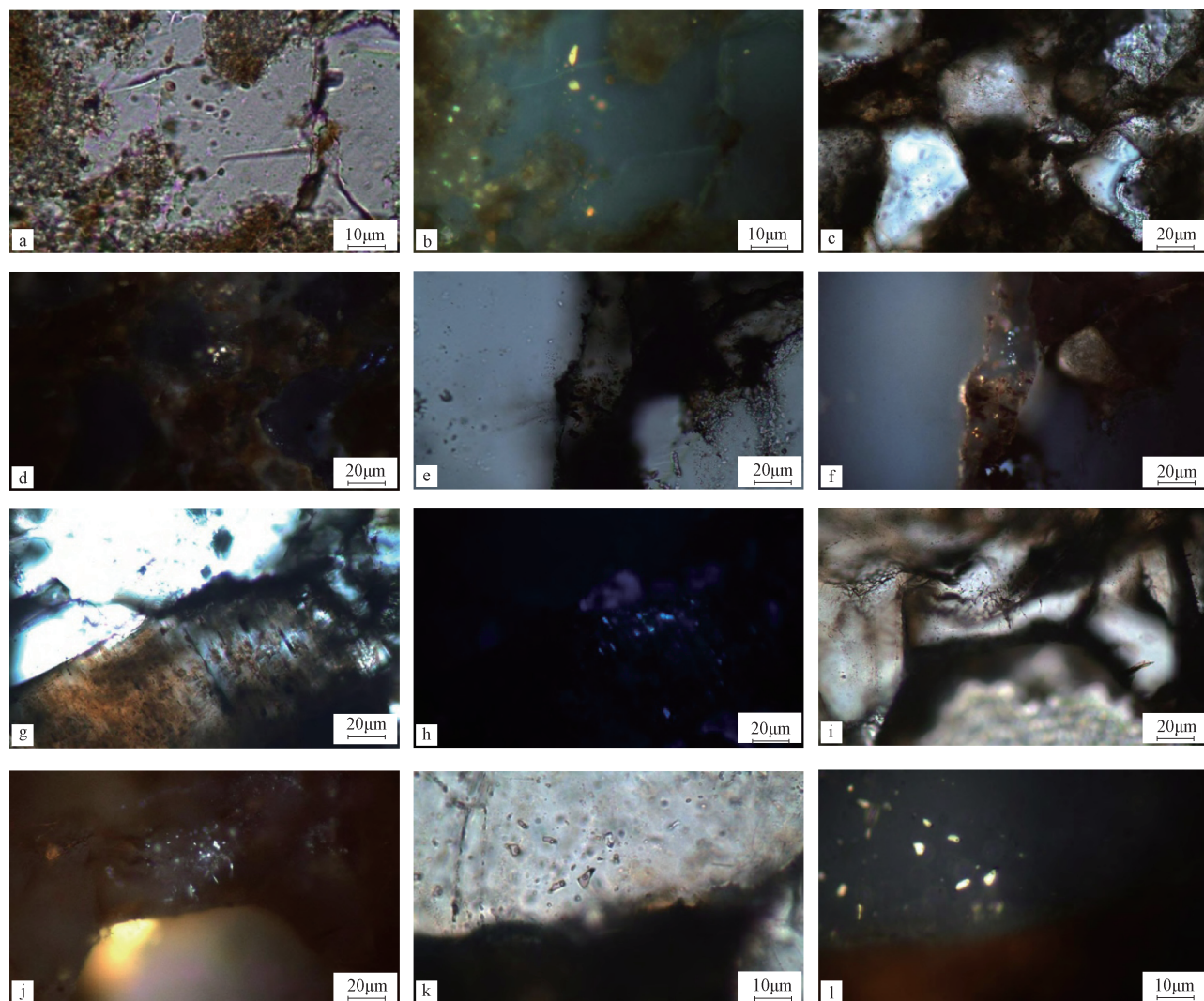


图2 渤南洼陷沙四段流体包裹体岩相学特征及油包裹体荧光颜色

Fig. 2 Petrographic characteristics of fluid inclusions and fluorescent colors of oil inclusions in the Es⁴ of the Bonan Subsalt
a, b. 新罗39井, 埋深2 924.4 m, 灰质泥岩溶孔充填方解石内发橙色荧光油包裹体; c, d. 义东39井, 埋深3 155.9 m, 砂岩石英颗粒内裂纹内发黄色荧光油包裹体(包裹体数目多、形态小); e, f. 义160井, 埋深3 594.57 m, 砂岩石英颗粒加大边内发黄和蓝白色荧光油包裹体; g, h. 义172井, 埋深4 014.5 m, 砂岩长石颗粒解理纹内发蓝白色荧光油包裹体(荧光较微弱); i, j. 义172井, 埋深4 014.5 m, 砂岩粒间孔中硅质胶结物内发蓝白色荧光油包裹体(荧光较微弱); k, l. 义东261井, 埋深4 023.25 m, 灰质砂岩, 石英颗粒内裂纹内见发蓝白色荧光油包裹体, 包裹体内边缘可见黑色沥青

油包裹体荧光颜色与原油成熟度的关系, 推测沙四段至少存在三期油气充注。由荧光颜色随成熟度增加而发生“蓝移”的特征^[29], 可知橙色荧光油包裹体充注最早, 黄色-黄绿色荧光油包裹体次之, 蓝白色荧光油包裹体充注较晚。

3.2.2 油包裹体荧光光谱特征

对单个油包裹体进行共聚焦微束荧光光谱分析, 获得了28个油包裹体荧光光谱。将荧光光谱图在相同的强度-波长坐标系中进行叠合, 可以进行主峰波长($\lambda_{\max}$)、最大光谱强度($I_{\max}$)及光谱形态等对比(图3)。可以看出, 发橙色荧光油包裹体 $\lambda_{\max}$ 最大, 分布在

555.70~576.88 nm; $I_{\max}$ 小于80, 相对黄色-黄绿色、蓝白色油包裹体弱(图3a)。黄色-黄绿色油包裹体 $\lambda_{\max}$ 和 $I_{\max}$ 分布范围都较宽。其中, $\lambda_{\max}$ 分布在513.25~548.56 nm, 平均为537.08 nm, $I_{\max}$ 从小于10到大于450均有分布(图3b, 义东341井油包裹体 $I_{\max}$ 最大为452, 为了与橙色油包裹体对比, $I_{\max}$ 大于300的谱图未进行叠合)。蓝白色油包裹体主峰波长最短, $\lambda_{\max}$ 分布在491.13~497.93 nm, 平均为494.55 nm; 相对荧光强度最大, $I_{\max}$ 都在20以上, 最大可达740(见于义160井样品, 谱图未进行叠合)。

荧光光谱主峰波长主要反映芳烃的特征, 且随演化程度增加, 烃源岩排出油的光谱主峰发生“蓝移”^[15,30]。

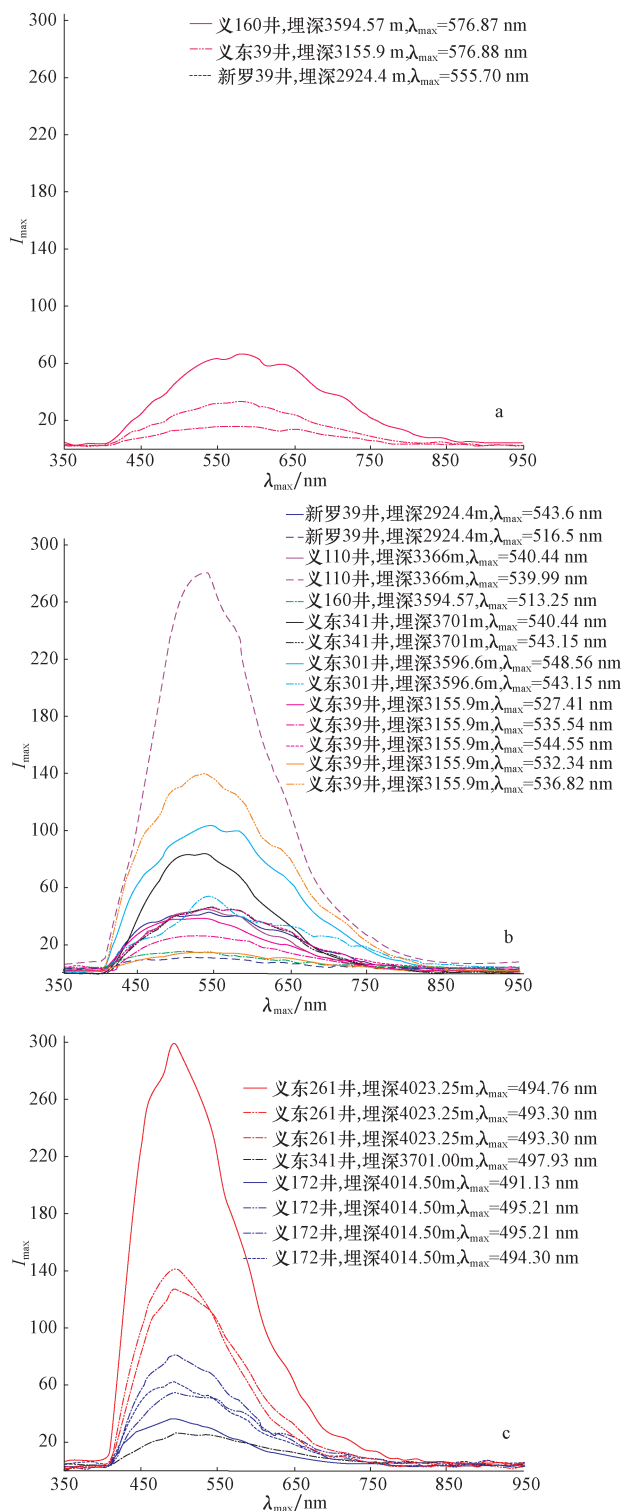


图3 渤南洼陷沙四段油包裹体显微荧光光谱

Fig. 3 Micro-beam fluorescent spectrums of oil

inclusions in the Es⁴ of the Bonan Subsalt

a. 橙色油包裹体; b. 黄色-黄绿色油包裹体; c. 蓝白色油包裹体

从研究区油包裹体荧光光谱波长分布来看,波长与荧光颜色相关性较好,也反映了3期油气充注。其中,黄色-黄绿色油包裹体的主峰波长与荧光颜色分布最

宽,说明该期油气充注持续时间长。荧光相对强度与油包裹体大小及油的含量多少有关,油包裹体大、油含量多则相对荧光强^[28,30]。从3种颜色油包裹体最大荧光强度的分布来看,第一期油气(发橙色荧光油包裹体)供给量较少,第二、三期油气(蓝白色荧光油包裹体)供给量大。

此外,不同颜色油包裹体荧光光谱图形态也存在差别。发橙色荧光油包裹体的光谱图为主峰居中的宽缓型;黄色-黄绿色荧光油包裹体光谱既有宽缓型、又有主峰靠前的窄陡型,且窄陡型主峰相对强度大,宽缓型强度小;蓝白色荧光油包裹体主要为主峰靠前的窄陡型。根据前人油源对比结果^[26],沙四段油气既可来自沙四上亚段自身,也可由沙三下亚段烃源岩供给。结合研究区沙三、沙四段两套烃源岩生烃史与生烃次序^[20],笔者认为,荧光光谱图形态应与油气来源有关,宽缓型与窄陡型油包裹体捕集的原油应分别来源于沙四上亚段和沙三下亚段烃源岩。据此推测,第一期充注的橙色荧光原油仅由沙四段提供,第二、三期充注的原油由沙三、沙四段两套烃源岩供给,其中第三期原油主要来自沙三段烃源岩。从油包裹体样品的分布位置来看,本次对油气来源的推测与前人利用生物标志化合物进行对比的结果非常吻合,从某种程度上说明本次推测的可信性。需要说明的是,利用光谱形态来划分和判断油气来源,是笔者的初步尝试,其可靠性及内在机理尚需进一步研究。

根据苏奥等的研究^[16],原油生物降解等次生变化也会使荧光颜色、谱形发生改变。本次所采样品埋深较大,除早期充注油气裂解外(义172、罗25井油-沥青包裹体及孔隙沥青存在),不存在其他次生变化,因此上述荧光光谱特征总体能够反映油气的原始特征,分析结果可信。

3.2.3 光谱红绿熵值分布

为了定量描述荧光光谱的形态和结构特征,前人提出了红绿熵($Q_{650/500}$, Q_{1535})等参数^[29,31-32],其中 $Q_{650/500}$ 为650 nm和500 nm波长处的荧光强度之比, Q_{1535} 为波长430~535 nm与波长535~750 nm包络面积之比。 $Q_{650/500}$, Q_{1535} 越大,说明原油中大分子组分越多,原油成熟度越低。研究区沙四段油包裹体样品红绿熵值分布与包裹体荧光颜色具有很好的对应关系,橙色、黄色-黄绿色与蓝白色荧光油包裹体的 $Q_{650/500}$ 值分布范围分别为0.95~1.17, 0.43~0.96和0.21~0.39, Q_{1535} 值分布在2.25~2.71, 0.99~2.45和0.60~1.13。将红绿熵与主峰波长作关系图,3种颜色的油

包裹体在 $Q_{650/500} - \lambda_{\max}$, $Q_{1535} - \lambda_{\max}$ 关系图中, 明显分布在 3 个区(图 4), 也说明至少存在 3 种成熟度的原油, 对应于三期油气充注。从包裹体的数目来看, 黄色-黄绿色成熟原油的数量最多, 蓝白色高成熟原油次之, 橙色低熟油数量最少, 反映了不同充注阶段原油的供给能力。相对荧光强度和包裹体数量均说明, 第二期油气充注量最大, 研究区下一步勘探对象, 应着重于易于在该时期捕集油气的区带和圈闭。

3.3 流体包裹体均一温度分布

与烃类包裹体同幕的盐水包裹体均一温度, 代表了流体充注时的最低温度, 常被用来作为划分油气成

藏幕次的依据^[33-38]。本次研究, 对油包裹体及其同期盐水包裹体的均一温度进行了测定, 并按以下两个原则对同幕次包裹体进行了确认。一是具有相同产状和相似气/液比, 二是相似产状和气/液比的包裹体均一温度小于 15℃。根据 7 块含油包裹体及其伴生盐水包裹体的显微测温结果, 橙色油包裹体均一温度分布在 74.0~87.6℃, 其同期盐水包裹体均一温度为 92.6~112.2℃; 黄色-黄绿色油包裹体的均一温度为 87.2~115.3℃, 同期盐水包裹体均一温度为 106.4~143.7℃(主要分布在 120~140℃); 蓝白色油包裹体的均一温度为 101.7~120.8℃, 同期盐水包裹体均一温度为 143.2~162.7℃(表 2)。

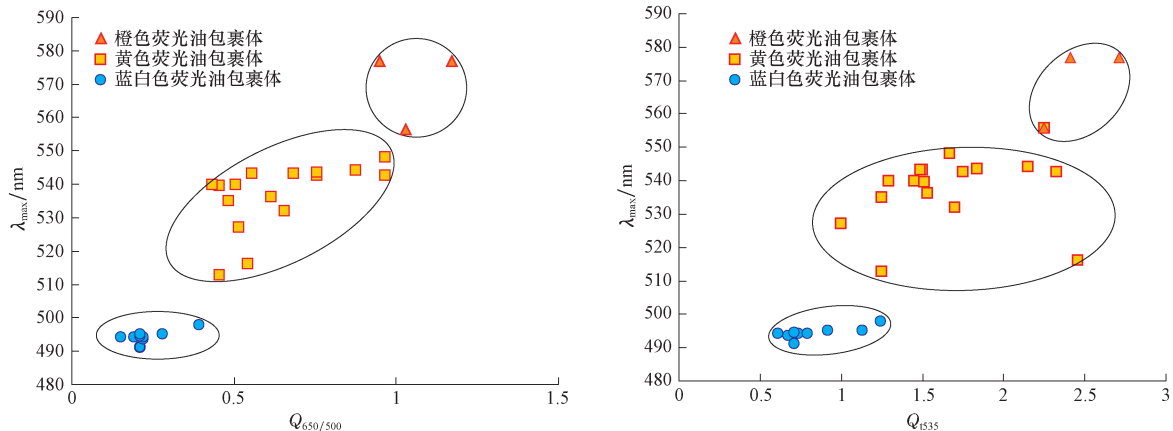


图 4 渤南洼陷沙四段油包裹体各显微荧光参数关系

Fig. 4 Relations of micro-beam flourescent spectra parameters $\lambda_{\max}$, $Q_{650/500}$ and Q_{1535} of oil inclusions in the Es⁴ of the Bonan Subsag
a. $Q_{650/500} - \lambda_{\max}$ 关系; b. $Q_{1535} - \lambda_{\max}$ 关系

表 2 渤南洼陷沙四段流体包裹体均一温度

Table 2 Homogenization temperature of fluid inclusions from the Es⁴ of the Bonan Subsag

井号	取样深度/m	油包裹体 荧光颜色	包裹体宿主矿物	成因	油包裹体均一温度/℃	同期盐水均一温度/℃
新罗 39	2 924. 40	橙色	石英颗粒内裂纹	次生	74. 0 ~ 74. 9/74. 50	92. 6 ~ 110. 8/95. 3
义 160	3 594. 57	橙色	石英颗粒内裂纹	次生	72. 3 ~ 72. 6/72. 50	98. 7 ~ 106. 5/102. 5
义 172	4 041. 50	橙色	石英颗粒内裂纹	次生	77. 6 ~ 87. 6/82. 98	102. 3 ~ 112. 2/107. 5
义东 39	3 155. 90	黄绿色	石英颗粒内裂纹	次生	109. 2 ~ 120. 3/116. 50	120. 7 ~ 135. 1/128. 4
新罗 39	2 924. 40	黄色	石英颗粒内裂纹	次生	88. 6 ~ 101. 3/95. 10	106. 4 ~ 120. 2/117. 5
义 110	3 366. 00	黄色	方解石胶结物	原生	114. 6 ~ 115. 3/115. 00	129. 6 ~ 139. 5/135. 1
义 160	3 594. 57	黄色	石英颗粒内裂纹	次生	93. 9 ~ 94. 8/92. 49	125. 7 ~ 143. 7/138. 9
义东 341	3 701. 00	黄色	石英颗粒内裂纹	次生	87. 2 ~ 96. 5/91. 90	112. 3 ~ 124. 2/117. 4
义 172	4 041. 50	蓝白	石英颗粒内裂纹	次生	101. 7 ~ 111. 5/107. 70	156. 8 ~ 162. 7/160. 0
义 172	4 041. 50	蓝白	石英颗粒加大边	原生	108. 7 ~ 109. 1/108. 90	160. 0
义东 261	4 023. 25	蓝白	石英颗粒内裂纹	次生	113. 0 ~ 120. 8/117. 20	149. 6 ~ 158. 4/156. 3
义东 341	3 701. 00	蓝白	石英颗粒内裂纹	次生	112. 2 ~ 113. 7/112. 95	143. 2 ~ 152. 2/147. 7

注:表中均一温度数据为最小值~最大值/平均值。

总体而言,橙色荧光油包裹体及其同期盐水包裹体的均一温度最为集中,黄色-黄绿色油包裹体及其同期盐水包裹体均一温度分布范围最宽。相同荧光颜色油包裹体及其同期盐水包裹体均一温度的差异,多与流体被俘获时的深度有关。所以不同构造位置和(或)深度样品的均一温度不宜直接对比,需要结合取样井的沉积埋藏史、热演化史及取样深度,确定流体充注与包裹体形成的时间。

4 油气充注期次确定

在取样井沉积埋藏史与热演化史叠合图上,绘制油包裹体的同期盐水包裹体均一温度等值线与取样点埋深变化线,两线交点对应的地质时间,即可视为流体包裹体形成与油气充注的时间。以义172井为例,利用PetroMod软件绘制了其沉积埋藏史图并标注古地温曲线(图5),在图上绘制了橙色、蓝白色荧光油包裹体的同期盐水包裹体的平均均一温度(107.5℃,160℃)等值线M,N,以及取样深度(4 041.5 m)的埋深变化线D,取样点埋深变化线D与均一温度等值线M,N

的交点所对应的地质年龄,即流体包裹体形成与原油充注时间。可以看出,D与N交于d,对应的地质时间0.5 Ma,即为第三期蓝白色荧光原油的充注时间。D与M有a,b,c 3个交点,说明取样点在埋藏过程中经历过3次107.5℃的地层温度。结合研究区烃源岩演化史,以及沙四段埋藏过程^[20],可以确定橙色油包裹体形成时间应为a点对应的28.6 Ma,即在东营组沉积末期(地层抬升剥蚀之前),渤南洼陷已有少量低熟油供给。

根据上述方法,获取了每个同期盐水包裹体形成的地质时间(原油充注时间),并按其对应的原油包裹体荧光颜色,标注到统一的时间轴上,进行不同井之间原油充注期次的划分与对比(图6)。可以看出,3种荧光油包裹体的充注时间区分明显,其中第一期发橙色荧光低熟油的充注时间为30.7~27.7 Ma,对应于东营组沉积末期,数量少且充注时间集中。根据徐兴友等的研究^[20],该时期洼陷中心部位沙四段温度已超过110℃,最高达130℃(渤深4井),沙四上亚段普遍进入生烃门限,能够提供低熟油气。只是受由于喜马拉雅运动Ⅱ幕影响,地层抬升剥蚀,导致生、排烃中断,

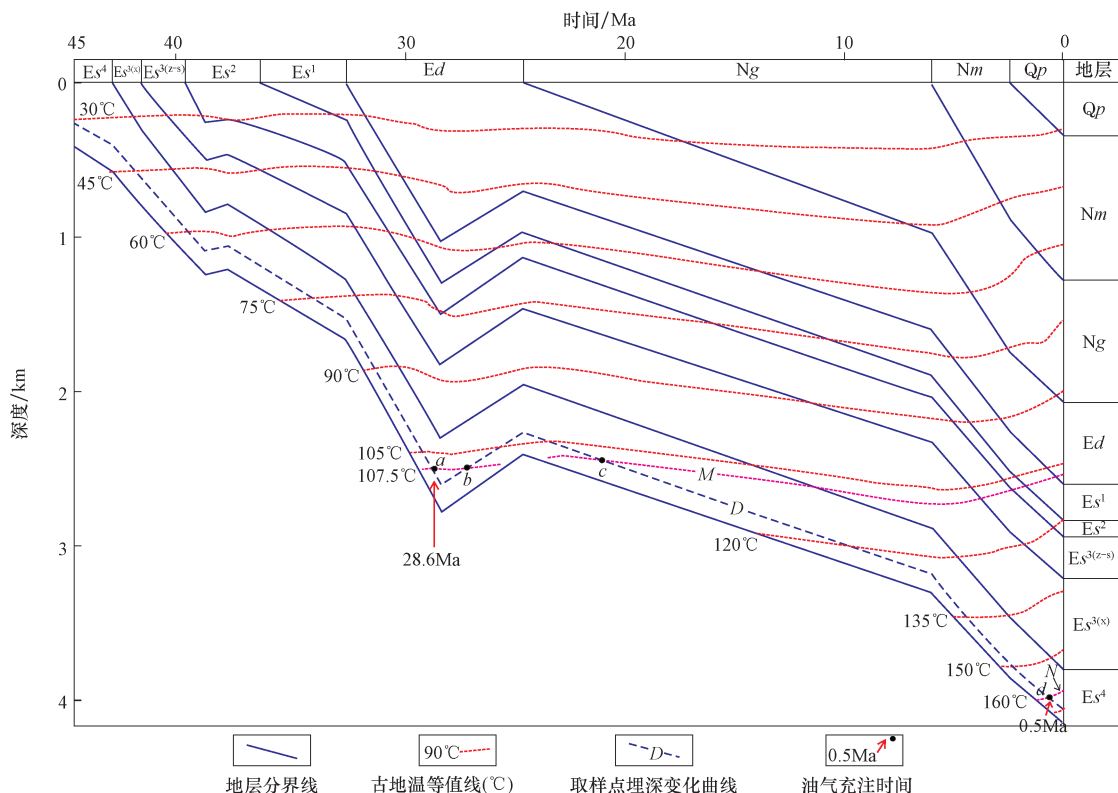


图5 沉积埋藏与热演化史确定油气充注时间(义172井)

Fig. 5 Hydrocarbon charging dating by sedimentary burial and thermal evolution history (Well Yi172)

Qp. 平原组;Nm. 明化镇组;Ng. 馆陶组;Ed. 东营组;Es¹. 沙河街组一段;Es². 沙河街组二段;Es^{3(Z-S)}. 沙河街组三段中上亚段;Es^{3(X)}. 沙河街组三段下亚段;Es⁴. 沙河街组四段

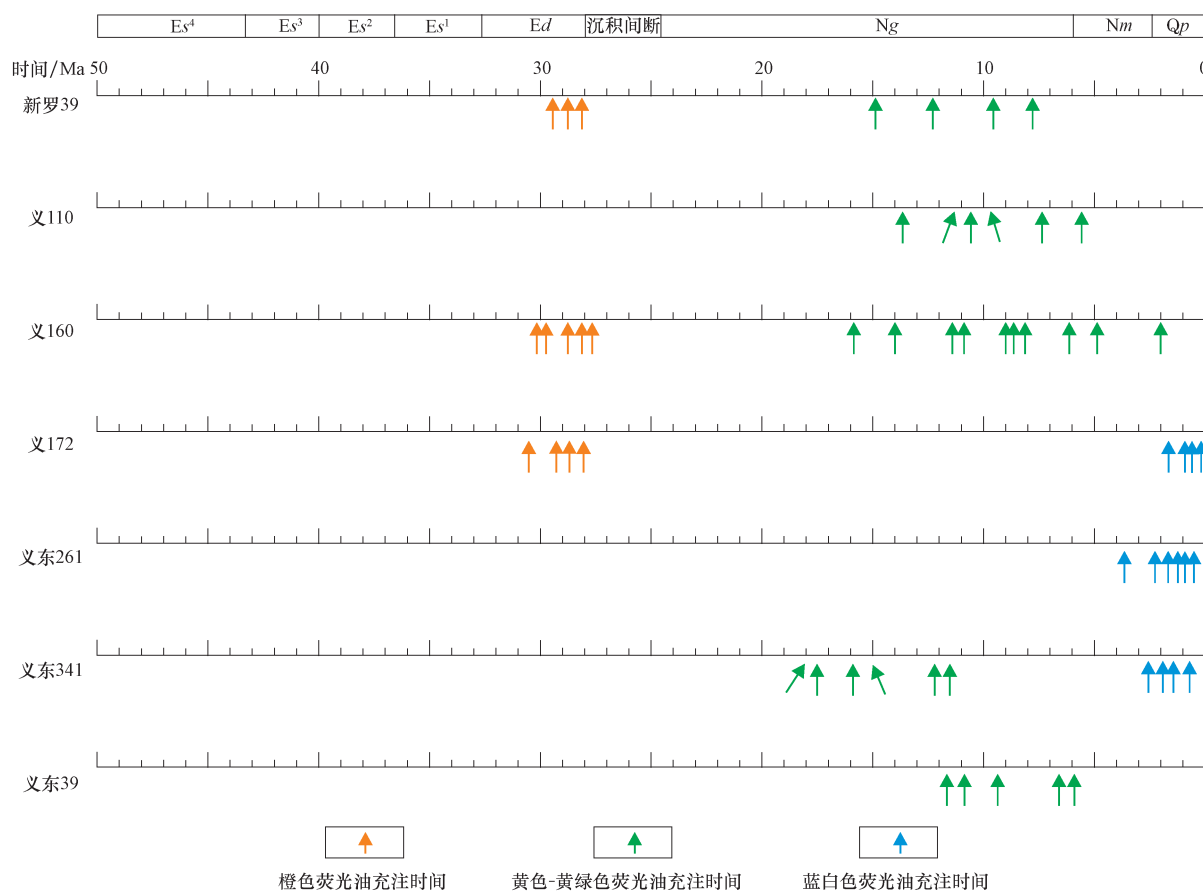


图6 渤南洼陷沙四段充注期次划分与成藏时期

Fig. 6 Oil charge stages subdivision and hydrocarbon accumulation periods of the Es⁴ time in the Bonan Subsalt

这也是橙色低熟油充注数量有限、充注时间集中的原因。第二期发黄色-黄绿色荧光成熟油充注时间主要是18.0~5.0 Ma,时间跨度长、数量多,从荧光光谱形态上推测应是沙四上亚段和沙三下亚段两套烃源岩贡献,两套烃源岩相继成熟供给原油,是充注数量大、时间跨度长的原因。第三期蓝白色荧光高熟油充注时间为3.8 Ma,根据研究区主要烃源岩演化史^[22,26],推测应主要来自沙四上亚段烃源岩,少量为沙三下亚段贡献。

5 结论

1) 渤南洼陷沙四段储层中发育橙色、黄色-黄绿色、蓝白色3种荧光油包裹体,它们荧光光谱特征存在明显差异。橙、黄-黄绿和蓝白色油包裹体荧光光谱主峰波长($\lambda_{\max}$)分别为555.76~576.88,513.25~555.76和491.13~497.93 nm,红绿熵 $Q_{650/500}$ 分布在0.21~0.39,0.43~0.96和0.95~1.17, Q_{1535} 值分布在2.25~2.71,0.99~2.45和0.60~1.13,指示沙四段存在低熟、成熟和高成熟3种成熟度的原油。

2) 发橙色、黄色-黄绿色、蓝白色荧光油包裹体均一温度分别为74.0~87.6,87.2~115.3,101.7~120.8℃,它们的同期盐水包裹体可主要分为95~112,120~140,145~160℃等3个充注幕次,对应早、中、晚3期油气充注过程。

3) 在取样井沉积埋藏史与热演化史叠合图上,绘制均一温度等值线与取样点埋深变化线,确定出发橙色、黄色-黄绿和蓝白色荧光原油的充注时间分别为30.7~27.7,18.0~5.0和3.8~0 Ma,目前发现的油气主要是第二、三期充注的结果。

致谢:在包裹体测试及成文过程中,得到了中国地质大学(武汉)资源学院石油系微观烃类检测实验室陈红汉教授及其团队成员的帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 朱光有,金强,戴金星,等. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究[J]. 石油与天然气地质,2004,25(2):209-215.
Zhu Guangyou, Jin Qiang, Dai Jinxing, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 209-

- 215.
- [2] 陈红汉,吴悠,丰勇,等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J]. 石油与天然气地质,2014,35(6):806-819.
Chen Honghan, Wuyou, Feng Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):806-819.
- [3] 罗泉,姜振学,李卓,等. 英买力地区中生界-新生界油气藏石油包裹体特征及成藏期次[J]. 石油学报,2015,36(1):60-66.
Luo Xiao, Jiang Zhenxue, Lizhuo, et al. The properties of petroleum inclusions and stages of hydrocarbon accumulation in Mesozoic-Cenozoic reservoirs in Yinmaili area of Tabei uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1):60-66.
- [4] 任战利,刘丽,崔军平,等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(4):502-506.
Ren Zhanli, Liu Li, Cui Junping, et al. Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4):502-506.
- [5] 王飞宇,金之钧,吕修祥,等. 含油气盆地成藏期分析理论和新方法[J]. 地球科学进展,2002,17(5):754-762.
Wang Feiyu, Jin Zhijun, Lu Xiuxiang, et al. Timing of petroleum accumulation: theory and new methods[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(5):754-762.
- [6] 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,2005,16(5):545-551.
Zhao Mengjun, Song Yan, Zhang Shuichang, et al. The geological meaning by the study on oil & gas accumulation process[J]. Nature Gas Geoscience, 2005, 16(5):545-551.
- [7] Tilley B J, Nesbitt B E, Longstaffe F J. Thermal history of Alberta deep basin; comparative study of fluid inclusion and vitrinite reflectance data[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10):1206-1222.
- [8] 于岚,李文涛,陈红汉,等. 临清坳陷东部石炭-二叠系流体包裹体特征及油气充注期次研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6):26-32.
Yu Lan, Li Wentao, Chen Honghan, et al. Characteristics of fluid inclusions and hydrocarbon charging period of Carboniferous-Permian reservoirs in the eastern Linqing depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(6):26-32.
- [9] Roedder E. Fluid inclusions[J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 12:646.
- [10] Parnell J, Middleton D, Honghan Chen, et al. The use of integrated fluid inclusion studies in constraining oil charge history and reservoir compartmentation; examples from the Jeanne d'Arc Basin, offshore Newfoundland[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18:535-549.
- [11] George S C, Ruble TE, Dutkiewicz A, et al. Assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16:451-473.
- [12] Munz I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: Systematics, analytical methods and applications[J]. Lithos, 2001, 55:195-212.
- [13] Przyjalowski M A, Ryder A G, Feely M. Analysis of hydrocarbon-bearing fluid inclusions (HCFI) using time-resolved fluorescence spectroscopy[J]. Optical Sensing and Spectroscopy, 2005, 5826:173-184.
- [14] 赵艳军,陈红汉. 油包裹体荧光颜色及其成熟度关系[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2008,33(1):91-96.
Zhao Yanjun, Chen Honghan. The relationship between fluorescence colors of oil inclusions and their maturities[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(1):91-96.
- [15] 陈红汉. 单个油包裹体显微荧光特性与热成熟度评价[J]. 石油学报,2014,35(3):584-590.
Chen Honghan. Microspectrofluorimetric characterization and thermal maturity assessment of individual oil inclusion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3):584-590.
- [16] 苏奥,陈红汉,平宏伟. 次生作用对原油和油包裹体荧光颜色及光谱参数的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(3):668-673.
Su Ao, Chen Honghan, Ping Hongwei. Secondary Alterations Influence on Fluorescence Color and Spectral Parameters of Crude Oil and Oil Inclusion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(3):668-673.
- [17] 吴富强,李后蜀,胡雪,等. 渤南洼陷沙四上亚段含油气系统探讨[J]. 石油勘探与开发,2002,29(3):29-31.
Hagemann H W, Hollerbach A. The fluorescence behavior of crude oils with respect to their thermal maturation and degradation[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3):473-480.
- [18] 张枝焕,曾艳涛,张学军,等. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷原油地球化学特征及成藏期分析[J]. 石油实验地质,2006,28(1):54-58.
Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, Zhang Xuejun, et al. The geochemistry characteristics and accumulation history of crude oil in the Bonan sub-sag of the Zhanhua sag, the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1):54-58.
- [19] 卢浩,蒋有录,刘华,等. 沾化凹陷渤南洼陷油气成藏期分析[J]. 油气地质与采收率,2012,19(2):5-8.
Lu Hao, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Study on formation stages of oil-gas reservoirs in Bonan sub-sag, Zhanhua sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2):5-8.
- [20] 徐兴友,徐国盛,秦润森. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(2):113-120.
Xu Xingyou, Xu Guosheng, Qin Ruisen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of Member 4 of Shahejie Formation in Bonan sag, Zhanhua depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(2):113-120.
- [21] 朱光有,金强,丁浩,等. 济阳坳陷沾化断陷湖盆沙河街组生烃系统特征[J]. 天然气工业,2003,23(增刊):10-12.
Zhu Guangyou, Jin Qiang, Ding Hao, et al. Hydrocarbon-generation system characteristics of Shahejie formation in Zhanhua sag of Jiyang depression[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(Sup.):10-12.
- [22] 王培荣,徐冠军,张大江,等. 烃源岩与原油中轻馏分烃的对比—以胜利油田东营-沾化凹陷为例[J]. 石油与天然气地质,2013,34(1):1-10.
Wang Peirong, Xi Jianjun, Zhang Dajiang, et al. Correlation of light hydrocarbons between source rock and crude oil: an example from Dongying and Zhanhua depressions in Jiyang subbasin, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1):1-10.3.

- [23] 宋国奇,王永诗,程付启,等. 济阳坳陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义[J]. 油气地质与采收率,2014,21(5):1-7.
Song Guoqi, Wang Songshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang depression and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 1-7.
- [24] 刘雅利,刘鹏,伊伟. 渤南洼陷沙四上亚段沉积相及有利储集层分布[J]. 新疆石油地质,2014,35(1):39-44
Liu Yali, Liu Peng, Yi Wei. Depositional facies and favorable reservoir distribution of Sha-4 Upper Member of Shahejie formation in Bonan sub-Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1): 39-44
- [25] 刘鹏,宋国奇,刘雅利,等. 渤南洼陷沙四上亚段多类型沉积体系形成机制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3234-3243.
Liu Peng, Song Guoqi, Liu Yali, et al. Mechanism of depositional system in upper fourth member of Shahejie Formation in Bonan sag[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3234-3243.
- [26] 宋国奇,刘华,蒋有录,等. 沾化凹陷渤南洼陷沙河街组原油成因类型及分布特征[J]. 石油实验地质,2014,36(1):33-38.
Song Guoqi, Liu Hua, Jiang Youlu, et al. Genetic types and distribution characteristic of crude oils from Shehejie formation in Bonan sub-sag, Zhanhua sag, Jiyang depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 33-38.
- [27] 斯尚华,陈红汉,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
Si Shanghua, Chen Honghan, Feng Yong, et al. Two sources and three charging events 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.
- [28] 熊万林,陈红汉,云露,等. 塔中隆起北坡顺托果勒区块志留系储层油气充注历史——以顺9井流体包裹体分析为例[J]. 石油学报, 2013, 34(2):239-246.
Xiong Wanlin, Chen Honghan, Yun Lu, et al. Hydrocarbon charging history for Silurian reservoirs of Shuntuoguole block in the north slope of Tazhong uplift, Tarim Basin; constraints from fluid inclusion of Well Shun9[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 239-246.
- [29] Burruss R C. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions[J]. SEPM, 1991, 25(1):1-7.
- [30] 王光辉,张刘平. 显微荧光光谱参数及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(6):48-53.
Wang Guanghui, Zhang Liuping. Parameters of micro-fluorescence spectrum and their application[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2012, 31(6): 48-53.
- [31] Pradier B, Llargu C, Martinez L. Chemical basis of fluorescence alteration of crude oils and kerogens. Microfluorimetry of an oil and its isolated fractions, relationship with chemical structure[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(3):451-460.
- [32] 李荣西,金奎励,廖永胜. 有机包裹体的显微傅立叶红外光谱和荧光光谱测定及其意义[J]. 地球化学, 1998, 27(3):244-250.
Li Rongxi, Jin Kuili, Liao Yongsheng. Analysis of organic inclusions using micro-FT. IR and fluorescence microscopy and significance[J]. Geochimica, 1998, 27(3): 244-250.
- [33] 陈红汉. 油气成藏年代学研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2):143-150
Chen Honghan. Advances in geochronology of hydrocarbon accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 143-150.
- [34] 李纯泉,陈红汉,刘慧民. 利用油包裹体微束荧光光谱判识油气充注期次[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(4):657-662.
Li Chunquan, Chen Honghan, Liu Huimin. Identification of hydrocarbon charging event by using micro-beam fluorescence spectra of petroleum inclusions[J]. Earth Science (Journal of Chian University of Geosciences), 2010, 35(4): 657-662.
- [35] 王爱国,衣丽萍,石磊,等. 单个油包裹体组分研究进展[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2):226-230.
Wang Aiguo, Yi Liping, Shi Lei, et al. Research progress on composition of individual oil inclusion[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 226-230.
- [36] 刘江涛,刘双莲,李永杰,等. 焦石坝地区奥陶系五峰组一志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3):53-57
Liu Jiangtao, Liu Shuanglian, Li Yongjie, et al. Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiaba area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 53-57.
- [37] 施伟军,席斌斌. 应用包裹体技术恢复气藏古压力[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1):128-134.
Shi Weijun, Xi Binbin. Calculation of paleo-pressure in gas reservoirs using fluid inclusions[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 128-134.
- [38] 陈善斌,甘华军,时阳,等. 北部湾盆地福山凹陷烃源岩地球化学特征及地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1):14-19.
Chen Shanbin, Gan Huajun, Shi Yang, et al. Geochemical features and geologic significance of source rocks in Fushan sag, Beibuwan basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 14-19.

(编辑 张玉银)