



含油气流体包裹体测试与应用问题综述

覃 军,赵 洪,刁 慧,马 清,黄 山

中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335

摘 要:在梳理含油气盆地流体包裹体测试常用技术以及流体包裹体在油气成藏研究中应用现状的基础上,结合塔里木盆地、准噶尔盆地、东海陆架盆地流体包裹体分析测试及应用研究经验,提出石英次生加大边中包裹体的可测性、均一温度测试对象的选取、后期演化对包裹体颜色分析的影响、肉眼鉴别包裹体荧光颜色的误差等包裹体分析测试时需注意的问题;提出包裹体 GOI 值受地应力场、储层非均质性等多重因素影响,在用于充注强度或古油藏研究时需谨慎;提出非连续埋藏型储层中包裹体均一温度数据的利用需要充分结合圈闭演化、输导体系演化、烃源岩生排烃演化等成藏条件演化,不宜简单利用均一温度厘定成藏期次。

关键词:流体包裹体;石英次生加大边;荧光颜色;均一温度;油气成藏

ANALYSIS, TESTING AND APPLICATION OF OIL-GAS-BEARING FLUID INCLUSIONS: A Review

QIN Jun, ZHAO Hong, DIAO Hui, MA Qing, HUANG Shan

Shanghai Branch of CNOOC Co., Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: With a review on the current situation of testing techniques and application for fluid inclusion from petroliferous basins in oil and gas accumulation study, combined with the research experience in Tarim Basin, Junggar Basin and East China Sea Shelf Basin, this paper discusses the measurability of inclusions in quartz secondary enlargement edge, the selection of homogenization temperature test objects, the influence of later evolution on inclusion color analysis, as well as the error of visual identification of inclusion fluorescence colors. Since the GOI value of inclusions is affected by multiple factors such as in-situ stress field and heterogeneity of reservoir, the method should be carefully used in the study of filling strength or paleo-reservoir. It is suggested that the utilization of inclusion homogenization temperature data in discontinuous buried reservoirs be fully combined with the evolution of reservoir forming conditions such as trap evolution, transport system evolution and hydrocarbon generation and expulsion evolution of source rocks. It is not propose to simply use homogenization temperature to determine the reservoir forming stages.

Key words: fluid inclusion; secondary enlarged edge of quartz; fluorescent color; homogenization temperature; oil-gas accumulation

0 引言

包裹体是指在矿物结晶过程中,在晶格缺陷或穴窝中捕获的保留了原始成矿信息的流体,由于其可以

反映流体充注时地质环境的各种信息,因此对于恢复地质历史具有现实意义^[1]。1960 年召开的国际地质学大会成立了矿物流体包裹体委员会(COFFI),标志着

收稿日期:2021-12-17;修回日期:2022-02-27。编辑:张哲。

基金项目:中国海油“七年行动计划”东海专项课题“丽水凹陷在生产气田保产及新领域勘探开发关键技术研究”(CNOOC-KJ135 ZDXM 39 SH02)。

作者简介:覃军(1987—),男,硕士,工程师,从事海洋油气勘探研究,通信地址 上海市长宁区通协路 388 号 A 座,E-mail/qinjun2@cnooc.com.cn

流体包裹体技术研究在全世界范围内的发展^[2],包裹体研究之初多应用于内生矿床研究,直至20世纪80年代随着测试技术的长足进展,开始应用于沉积岩与油气矿床相关研究。

中国直至20世纪80年代后期才开展了含油气盆地流体包裹体的相关研究^[3],主要目的为追溯构造演化史、沉积演化史、成岩演化史以及油气成藏史。本文在含油气盆地流体包裹体研究现状梳理的基础上,结合塔里木盆地、准噶尔盆地、东海陆架盆地开展油气包裹体研究的实例,讨论目前含油气流体包裹分析测试以及其在油气成藏研究中需注意的问题,供石油地质研究工作者参考和讨论。

1 流体包裹体分析测试技术概况

1.1 分析测试技术现状

含油气流体包裹体分析测试技术归结起来有流体包裹体岩相学分析、流体包裹体测温、流体包裹体成分分析、流体包裹体古压力恢复四大类,其中技术难度较大的是流体包裹体岩相学分析和流体包裹体成分分析,最易因主观原因导致出错的是流体包裹体岩相学分析和流体包裹体测温。在含油气盆地研究中,流体包裹体岩相学分析的核心是流体包裹体组合(FIA)、荧光颜色以及含油包裹体颗粒指数(GOI)的确定。FIA代表宿主矿物中同一个生长带(同期微裂隙、石英同期加大边等)同时捕获的一系列流体包裹体,是记录矿物单次流体捕获事件的最小单位^[4-6]。FIA的常规研究手段是显微镜下观察,近年来随着技术的发展,阴极发光技术^[7]、红外显微成像技术^[8]、包裹体同位素测年等技术^[9]逐渐应用到包裹体岩相学研究中,提高了FIA研究的可靠性。包裹体岩相学中荧光颜色被广泛应用于油气成熟度和充注期次的研究中^[10-11],颜色鉴定的主要手段为镜下肉眼鉴别以及红外光谱测定,目前绝大多数以镜下肉眼鉴别为主,鲜见大批量开展包裹体红外光谱测定的文献报道。GOI常被用于判别古油藏或油气充注强度,其测试手段主要通过UV激发荧光显微镜下观察和单偏光镜下观察来确定荧光包裹体颗粒数与总颗粒数的比值,结果受测试者主观因素影响较大。包裹体均一温度反映包裹体形成时的古温度下限,是恢复地史、研究世代关系的最常用参数,目前包裹体均一温度测定技术已较为成熟,主要利用冷热台

测试,其也是不破坏包裹体而获取参数的最主要测试手段之一,应用最为广泛。但含油气盆地中用于成藏研究的包裹体均一温度可测试对象或可利用对象尚有争议,多数学者认为盐水包裹体均一温度最能反映古地温^[12-21],部分学者认为油气包裹体均一温度亦可能代表开始成藏时的古地温^[22]。流体包裹体成分分析技术包括非破坏性和破坏性两类手段。非破坏性手段主要有紫外荧光、激光拉曼光谱、傅立叶变换红外光谱、X射线荧光等定性-半定量分析技术;破坏性分析手段包括激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析(LA-ICP-MS)、显微激光热解气相色谱-质谱分析、二次离子质谱分析(SIMS)等定量分析技术^[23-26]。值得注意的是,包裹体成分分析技术一般针对单个包裹体测试,群包裹测试由于可能存在的多期、多来源的流体混杂在一起,得到的测试结果应用于地质研究时存在较大困难,甚至引起错误的地质认识。流体包裹体古压力恢复是在测温 and 成分分析的基础上利用PVTx数值模拟法实现的,该方法应用广泛,但受成分获取精度以及包裹体形成后可能发生的次生变化等问题制约,模拟计算结果也存在不确定性^[27-28]。

1.2 应用现状

流体包裹体在油气成藏研究中的应用归结起来有两大方面:一是利用岩相学相关参数、均一温度、古压力等研究油气充注期次及充注时代,以及相应的古油藏发育史或油气藏改造史;二是利用包裹体成分分析结果追溯油气来源。例如李俊威等^[29]通过镜下观察发现羌塘盆地昂达尔错地区中侏罗统布曲组在裂缝充填的方解石脉中和方解石晚期微裂隙中分别发育两组流体包裹体,且两组包裹体的发育丰度、产状、气液比均有明显区别,从而厘定该区存在两期充注。张育民^[30]通过镜下观察发现塔里木盆地卡塔克隆起斜坡区奥陶系碳酸盐岩储层的白云石次生加大边、孔隙和缝洞中亮晶方解石胶结矿物、切穿矿物颗粒及加大边的构造微裂隙中发育3组包裹体,且3组包裹体颜色不同,从而厘定该区存在3期油气充注。王京红等^[31]根据储层中包裹体GOI值研究发现准噶尔盆地腹部车莫隆起区侏罗系由于喜马拉雅期的掀斜作用引起了侏罗纪末期形成的古油气藏的调整。

研究充注期次及时代的另一种最常见方法为将流体包裹体均一温度和储层埋藏史-热史恢复相结

合,通过考察均一温度分布频率获取充注期次,根据均一温度与埋藏史-热史投点结合确定充注时代。例如刘润川等^[32]根据与油气包裹体伴生的盐水包裹体均一温度结合埋藏史-热史分析得出,鄂尔多斯盆地南部延长组储层的两期充注分别在早白垩世中期和晚期。

由于实验成本较高以及油气来源研究方法的多样性(如油气样与烃源岩样直接对比分析、砂岩抽提物分析等),目前含油气盆地流体包裹体成分分析研究开展相对较少,较为普遍的是采用相对经济的激光拉曼光谱法等开展定性-半定量研究。例如徐陈杰^[33]利用激光拉曼分析明确东海陆架盆地西湖凹陷中央洼陷花港组的气体包裹体成分主要为甲烷;税蕾蕾等^[34]利用激光拉曼分析查明了莺歌海盆地乐东 10 区发育 3 种不同成分的包裹体。

2 油气包裹体分析测试需注意的问题

2.1 石英加大边中包裹体的可测性

由于长石与胶结物的包裹体密封性较差,国内外

研究者在包裹体研究中均强调封闭在石英次生加大边中油气包裹体均一温度的测试对于成藏研究的重要性^[35-36]。包裹体测试中的石英加大边有二层含义,一是围石英颗粒尘线发育的包裹体,二是加大边中的包裹体。准噶尔、东海陆架等多个含油气盆地的包裹体数据研究表明,石英加大边所封闭的油气包裹体测温可信度较低,其温度变化大且不能反映真正的成藏期次。油气被次生石英加大所封闭形成包裹体后,刚性颗粒中存在较多的油气孔洞导致石英颗粒整体刚性有所下降,特别是在石英加大边部分,更容易被压裂。随着储层中石英含量的增加,刚性颗粒的压实作用更强,石英加大边后期被压裂、包裹体被破坏的现象更为明显。母源砂体经历后期充分的分选而导致石英等刚性颗粒含量高,软岩屑含量低,受到压实作用时石英颗粒具有较好的支撑作用而保存有较好的油气储集空间。但与此同时,石英颗粒受到的压力更大,具有包裹体的石英颗粒往往也更容易产生加大后的破裂(图 1)。这也导致石英含量越高的储层石英加大边中的包裹体越容易遭受后期应力破坏,导致测试结果可信度降低。

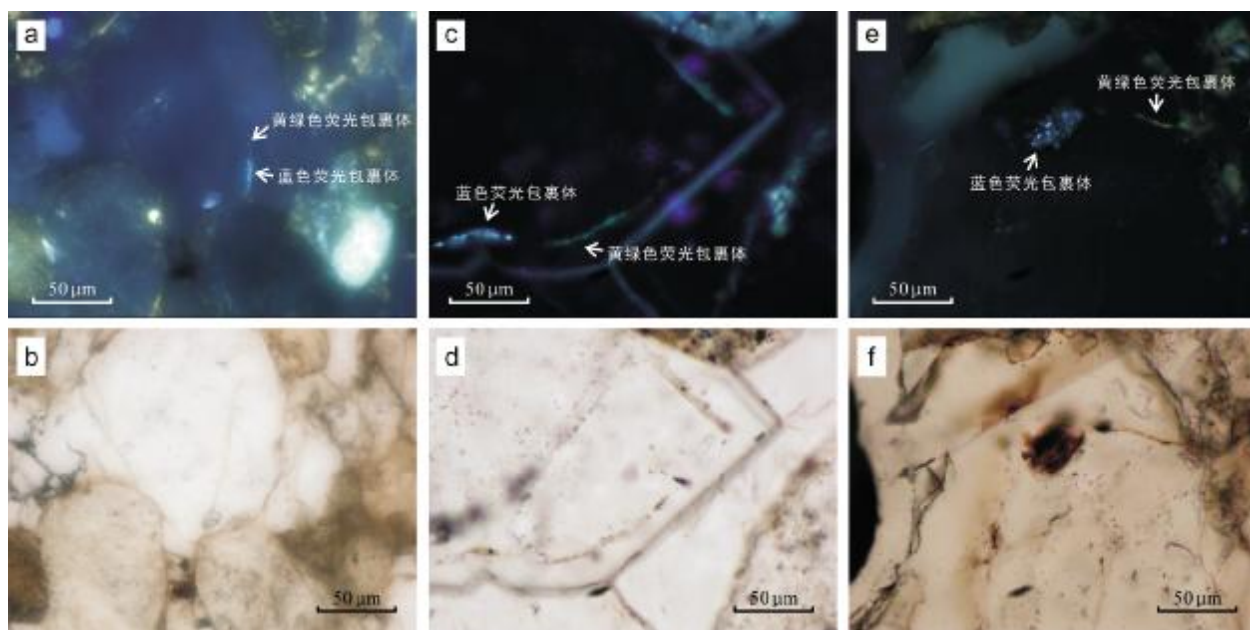


图 1 石英加大边内捕获包裹体晚期被破坏显微照片

Fig. 1 Microphotographs showing late destruction of trapped inclusions in quartz enlarged edge

a—石英加大边内不同颜色的荧光包裹体, X 井 5959.73 m, 荧光(fluorescent inclusions of various colors in the enlarged edge of quartz, X well, 5959.73 m, fluorescent); b—同 a, 单偏光 (same sample as “a”, plane-polarized light); c—石英加大边内不同颜色的荧光包裹体, X 井 4666.7 m, 荧光(fluorescent inclusions of various colors in the enlarged edge of quartz, X well, 4666.7 m, fluorescent); d—同 c, 单偏光(same sample as “c”, PPL); e—石英加大边遭受局部破坏, 早期形成的油包裹体发生沥青化作用, X 井 4220.5 m, 荧光(enlarged edge of quartz locally damaged, early formed oil inclusions asphaltized, X well, 4220.5 m, fluorescent); f—同 e, 单偏光(same sample as “e”, PPL)

此外,在对准噶尔盆地中部莫西庄、征沙村、沙湾3个不同地区侏罗系的储层包裹体样品分别进行测温的过程中,也发现石英加大边中包裹体破裂的概率远大于其他部位。在实测过程中发现,尽管石英加大边中出现不同颜色的荧光及沥青包裹体,但是其伴生盐水包裹体均一温度都集中在120℃左右,说明石英加大边中荧光颜色各异的包裹体极有可能是晚期受到破坏作用导致的,此时出现不同颜色的荧光包裹体不宜作为油气多期充注的直接证据(图2)。

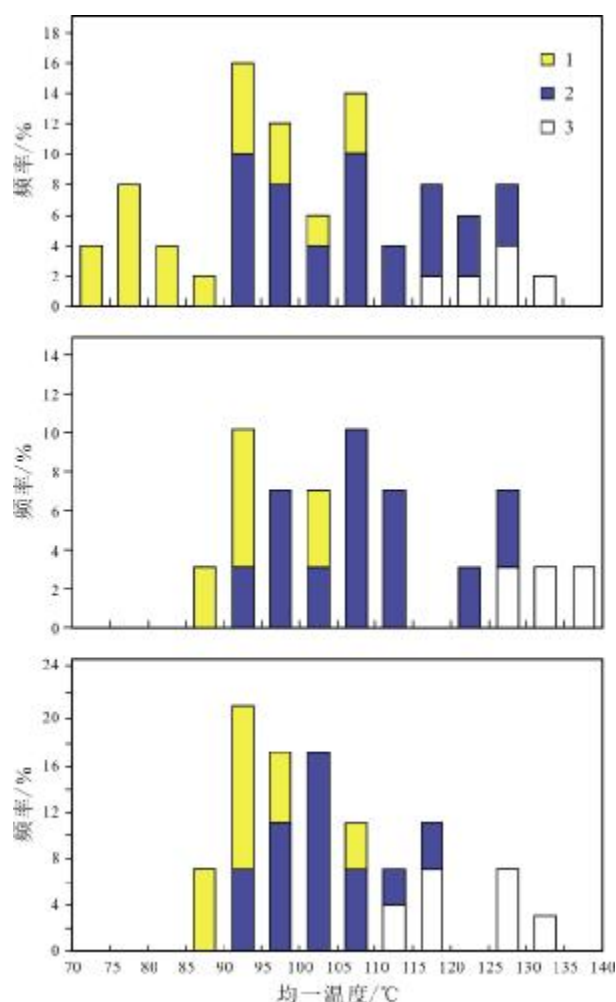


图2 准噶尔盆地中部不同地区侏罗系包裹体均一温度

Fig. 2 Homogenization temperature of Jurassic inclusions in different areas of central Junggar Basin

1—黄色荧光包裹体(yellow fluorescent inclusion); 2—蓝色荧光包裹体(blue fluorescent inclusion); 3—白色荧光包裹体(white fluorescent inclusion)

2.2 切穿石英微裂隙中测温对象的选取

切穿石英微裂隙中的包裹体是最常见的均一温度

测试对象。由于构造演化或构造应力场的转变,同一石英颗粒中往往在不同时期出现不同方向的多条微裂隙,它们均有可能捕获流体包裹体。针对这类包裹体测温时应注意包裹体组合的识别,首先判断含油气包裹体与盐水包裹体的伴生关系,然后对二者分别测温。形成均一温度数据报告时,根据微裂隙的发育方向和切割关系,将同期的油气包裹体与盐水包裹体分别标识以供研究人员使用。若将某一宿主矿物中所有微裂隙中的盐水包裹体测温结果混在一起,会导致错误的判断。例如东海陆架盆地西湖凹陷,不同井中多条微裂隙含包裹体,但仅有个别微裂隙中的包裹体见荧光(图3),此时若将多条微裂隙中的盐水包裹体测温数据混测在一起,极容易让研究人员作出多期油气充注的错误判断。

2.3 包裹体后期演化对分析的影响

虽然流体包裹体和宿主矿物保留了流体充注成藏时的原始地质信息,但不可忽视的是,油气成藏后的构造应力场、地温场演化等因素,均会导致油气包裹体产生较多的次生变化。例如,成藏过程中充注的重质、中质、轻质油在包裹体中均会经历一定程度的后期演化,每个流体包裹体在有限的独立温压系统内,轻烃、非烃及分散状沥青质在外界温度的变化下会发生分异及裂解,一方面改变油气的相态,使其由一相或二相演化为三相,另一方面导致沥青质分散在包裹体壁或内部而改变其荧光性,如原油发生一定程度的裂解,少量沥青质分散或附着在包裹体壁上产生“暗室效应”,影响了荧光的发散和显示甚至造成沥青包裹体的出现,此时传统荧光颜色由褐色→黄色→绿色→蓝白色→白色转换代表地质意义上油的成熟度变化的结论就应该慎用;同时,当包裹体发生后期变化之后,利用包裹体成分分析技术取得的流体地球化学数据(如同位素、烃类组分、生物标志化合物等)也要慎重使用。

此外,目前国内对于包裹体的荧光颜色判断有相当一部分依然采用镜下肉眼鉴定,而忽视了此方法存在的偏差。例如,同一荧光包裹体在不同倍数目镜下观测时,因为色散效应导致荧光颜色有所变化(图4)。另外,电子显微镜CCD拍摄时,不同的饱和度、对比度及白平衡等参数变化会导致荧光颜色有所差异,因此包裹体测试及应用包裹体颜色开展相关分析时应尽量进行荧光光谱的测定。

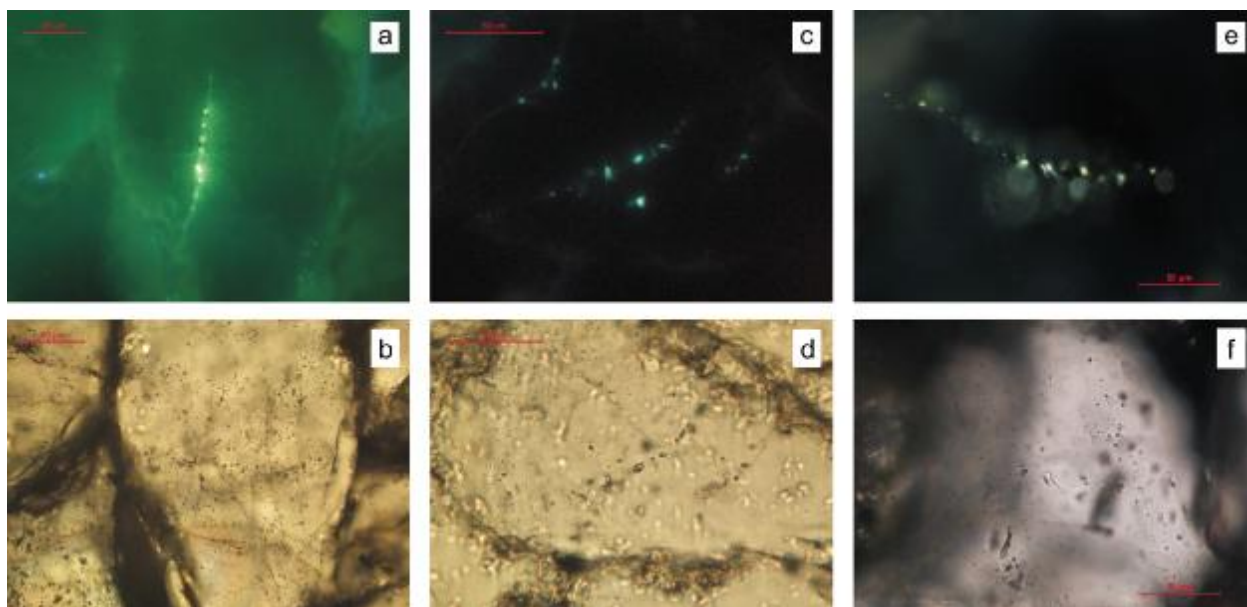


图3 东海陆架盆地西湖凹陷流体包裹体显微照片

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

a—沿切穿石英颗粒微裂隙分布的黄绿色包裹体, X1井 4402 m, 荧光 (yellowish green inclusions along the microcracks in quartz, X1 well, 4402 m, fluorescent); b—多条切穿石英颗粒的微裂隙中均含包裹体, X1井 4402 m, 单偏光 (inclusions in multiple microcracks cutting through quartz, X1 well, 4402 m, PPL); c—沿同一方向切穿石英颗粒的3条微裂缝分布的蓝绿色包裹体, X2井 4690.47 m, 荧光 (bluish green inclusions along 3 microcracks in quartz with the same direction, X2 well, 4690.47 m, fluorescent); d—多条切穿石英颗粒的微裂隙中均含包裹体, X2井 4690.47 m, 单偏光 (inclusions in multiple microcracks cutting through quartz, X2 well, 4690.47 m, PPL); e—沿切穿石英颗粒微裂隙分布的黄色包裹体, X3井 4125 m, 荧光 (yellow inclusions along the microcracks in quartz, X3 well, 4125 m, fluorescent); f—多条切穿石英颗粒的微裂隙中均含包裹体, X3井 4125 m, 单偏光 (inclusions in multiple microcracks cutting through quartz, X3 well, 4125 m, PPL)

3 包裹体在油气成藏研究中需注意的问题

3.1 古油藏的判断

包裹体 GOI 值是目前应用较广的油气运移及古油藏油水界面确定的依据,一般认为小于 1% 为水带, 1%~5% 为运移通道, 5%~10% 为古油藏, 其研究方法在国内已有一定程度的应用^[37]。但在准噶尔盆地研究中发现, 砂岩储层的纵向非均质性也能够导致包裹体 GOI 值变化, 甚至高低值交替出现。这种变化特征并不一定是古油藏界面的反映, 如准噶尔盆地中部某区块三工河组储层存在较强的非均质性, 岩石成分控制了储层的物性发育。推测古油藏形成后, 上部物性较差, 塑性岩屑含量高, 导致后期石英等刚性颗粒破裂难以捕获流体包裹体; 而油藏下部石英刚性含量高、软岩屑含量低的优质储层砂岩后期更容易破裂, 因而更容易捕获流体包裹体, 导致其 GOI 大于油藏上部 (图 5)。正是这种砂岩储层的非均质性导致古油藏难以确定, 因此不能将 GOI 纵向高低作为古油藏的油水界面。在研

究古油藏及古油气运移充注强度时, 由于储层中烃包裹体的丰度、颗粒荧光的数量与强度等受多种因素控制, 例如不同地区的油气输导类型、不同类型储层受到地层应力的程度 (应力强度越大、微裂隙越多, 捕获概率越大)、储层中的油气饱和度、矿物生长的水化学条件等, GOI 值也不能直接作为充注强度或古油藏发育的证据。

3.2 成藏期次的厘定

将包裹体均一温度与单井埋藏史、热史综合研究, 厘定油气成藏期已成为广泛的研究手段。在连续埋藏或储层地温从古至今连续升温时, 包裹体均一温度能够反映充注期次的早晚关系, 均一温度较低的先充注, 均一温度较高的后充注。此时通过统计不同包裹体组合均一温度的分布频率就能反映油气成藏期次, 但是在后期构造沉降-抬升复杂区, 或者盆地基底热流波动较大的地区, 此方法容易得出错误认识, 不宜作为厘定成藏期的唯一方法, 而应综合构造、烃源岩热演化、

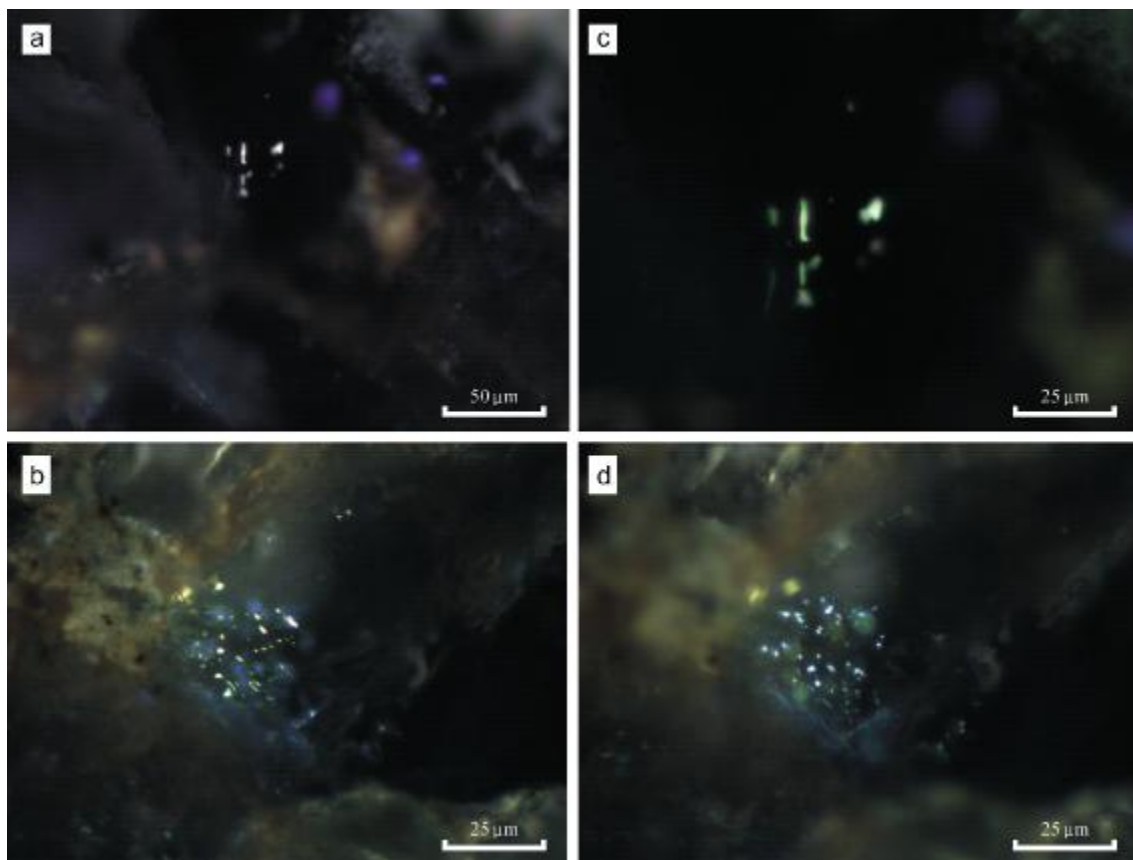


图4 不同倍数及调整物镜前后肉眼下观察包裹体荧光颜色变化

Fig. 4 Fluorescence color changes of inclusions under microscope in different multiples and objective lens

a—K井 4135.32 m, $\times 50$, 荧光, 肉眼观察呈白色(K well, 4135.32 m, 50 times, fluorescent, white by naked eye); b—同 a, $\times 100$, 荧光, 肉眼观察呈黄绿色(same sample as “a”, 100 times, yellowish green by naked eye); c—K井 3865.32 m, $\times 100$, 荧光, 肉眼观察呈黄绿色(K well, 3865.32 m, 100 times, fluorescent, yellowish green by naked eye); d—同 c, 调整物镜后肉眼观察呈蓝白色(same as sample “c”, blue and white after adjusting objective lens)

油气源对比等资料进行综合分析. 例如, 东海陆架盆地丽水-椒江凹陷中部的某气田, 在上古新统明月峰组底部储层中检测到的包裹体均一温度频率分布呈单峰态, 主频约 90°C , 反映一期充注, 但是将该均一温度投点到单井埋藏史-热史图上存在两个时间交点(图6), 第一个交点在早始新世(50~48 Ma), 第二个交点在晚始新世(40~38 Ma), 此时仅依据包裹体均一温度与热史的关系厘定成藏期就会出现争议. 根据气田期构造演化分析, 该气田背斜构造形成于晚始新世 43 Ma 以来的抬升反转期, 且上古新统储层不具备自生烃条件, 油气来源于中、下古新统的烃源岩贡献, 而沟通储层和烃源岩的通源断裂也形成于抬升反转期, 在此之前明月峰组不具备发生油气运移和充注的地质条件, 由此判定该气田成藏期应在第二个交点, 即晚始新世(40~38 Ma)时期.

4 结论及建议

(1) 石英次生加大边中的包裹体最易因构造应力场演化而发生破裂, 发生破裂的概率与储层石英含量正相关, 选取其作为测试对象时应首先确定加大边的完整性. 包裹体形成后也可能因地温场演化导致其中流体发生裂解和相变, 从而引起次生颜色及成分变化, 选取测试对象时要谨慎. 同时要注意肉眼观察包裹体颜色的误差, 尽可能开展光谱测定.

(2) 流体包裹体 GOI 值受地应力强度、储层非均质性受多重因素影响, 不宜作为某一地区油气充注强度或古油藏发育的直接证据, 应在地质背景研究的基础上谨慎应用 GOI 值. 在储层非连续埋藏的地区不宜简单通过均一温度在地温史上的投点厘定成藏期次, 应充分结合圈闭发育史、输导体系演化史、烃源岩生排烃史等地质过程进行综合判定.

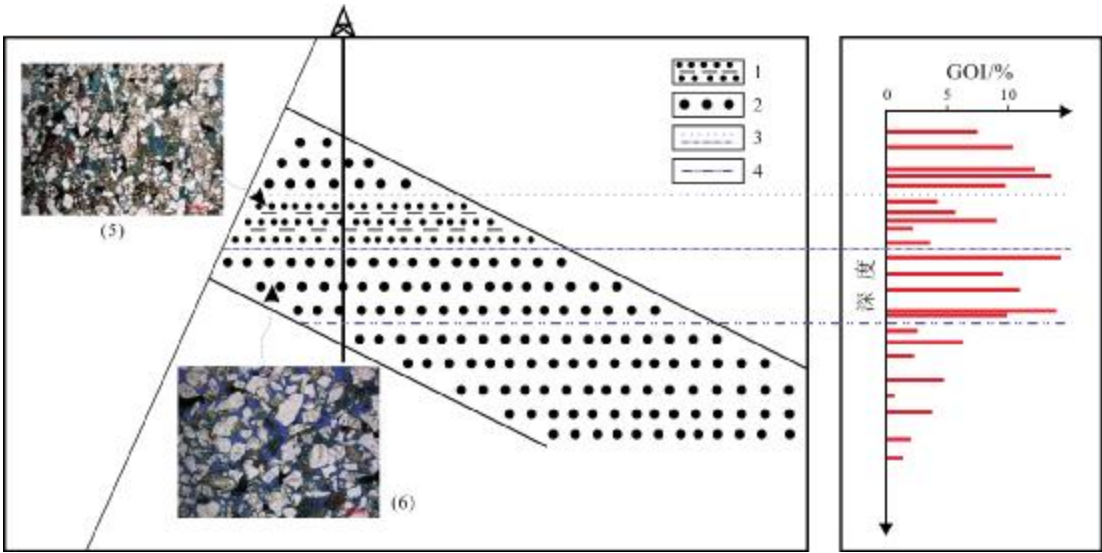


图 5 非均质储层 GOI 值纵向分布特征

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of GOI value in heterogeneous reservoir

1—差储层 (poor-quality reservoir); 2—优质储层 (high-quality reservoir); 3—储层非均质界面 (heterogeneous interface of reservoir); 4—古油藏界面 (paleo-reservoir interface); 5—差储层岩石铸体薄片显微照片 (rock cast thin section of poor-quality reservoir); 6—优质储层岩石铸体薄片显微照片 (rock cast thin section of high-quality reservoir)

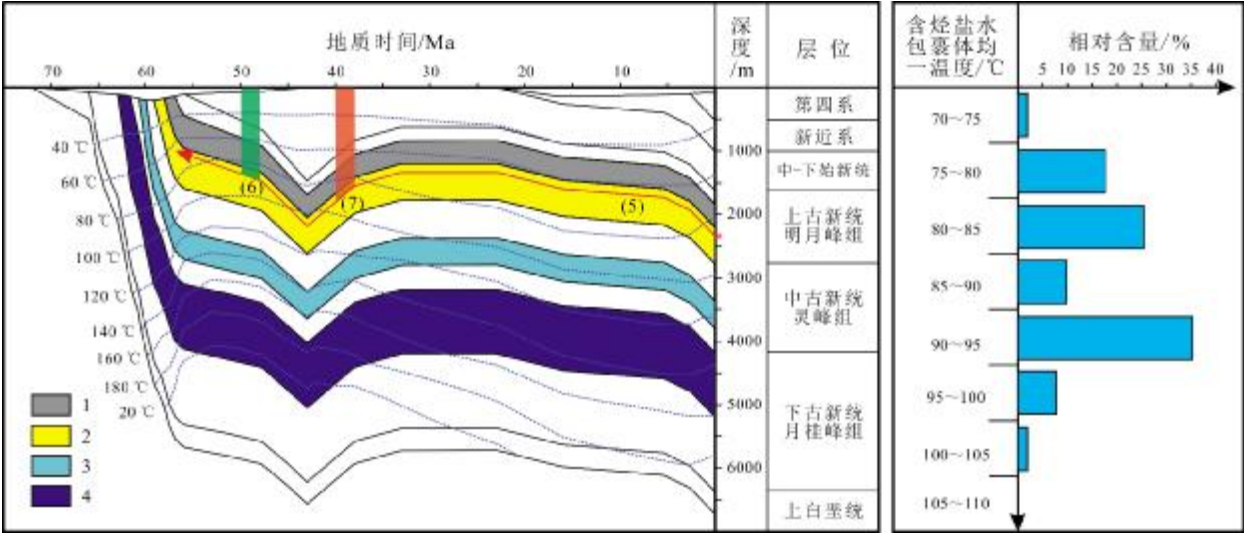


图 6 东海陆架盆地丽水-椒江凹陷 L 气田充注史分析

Fig. 6 Analysis of filling history of L gas field in Lishui Jiaojiang sag, East China Sea Shelf Basin

1—盖层 (caprock); 2—储层 (reservoir); 3—海相烃源岩 (marine source rock); 4—湖相烃源岩 (lacustrine source rock); 5—包裹体位置 (inclusion location); 6—第一交点 (first intersection); 7—第二交点 (second intersection)

参考文献 (References):

[1] 欧光习, 李林强, 孙玉梅. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 1-11.
Ou G X, Li L Q, Sun Y M. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary Basins [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 1-11.

[2] 潘雪峰. 储层流体包裹体技术研究与应用 [D]. 成都: 西南石油大学, 2013: 1-10.

[3] 施继锡, 李本超, 傅家谟, 等. 有机包裹体及其与油气的关系 [J]. 中国科学 (B 辑), 1987, 17(3): 318-325.

Shi J X, Li B C, Fu J M, et al. Organic inclusions and their relationship with oil and gas [J]. Science China Chemistry, 1987, 17(3): 318-

325. (in Chinese)
- [4] Goldstein R H, Reynolds T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[M]. Tulsa, Oklahoma: SEPM, 1994: 1-199.
- [5] 韩鹏飞, 杨兴科, 张文高, 等. 陕西平利大磨沟-闹阳坪萤石矿床流体包裹体特征[J]. 地质与资源, 2014, 23(3): 284-287.
- Han P F, Yang X K, Zhang W G, et al. Characteristics of fluid inclusions of the Damogou-Naoyangping fluorite deposit in Shaanxi Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(3): 284-287.
- [6] 强娟, 曹红霞, 吴海燕, 等. 延长探区下古生界马家沟组储层流体包裹体特征[J]. 地质与资源, 2013, 22(2): 125-128.
- Qiang J, Cao H X, Wu H Y, et al. Characteristics of fluid inclusions in the Lower Paleozoic Majiagou reservoir in Yanchang exploring area [J]. Geology and Resources, 2013, 22(2): 125-128.
- [7] 赖勇. 山东文登金矿成矿条件及成矿过程——阴极发光技术在包裹体研究中的应用[J]. 矿床地质, 1995, 14(3): 281-289.
- Lai Y. Metallogenic conditions and processes of the Wendeng gold deposit, Shandong Province: The application of cathodo-luminescence to fluid inclusion study[J]. Mineral Deposits, 1995, 14(3): 281-289.
- [8] 格西, 苏文超, 朱路艳, 等. 红外显微镜红外光强度对测定不透明矿物中流体包裹体盐度的影响: 以辉锑矿为例[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 366-371.
- Ge X, Su W C, Zhu L Y, et al. A study on the influence of infrared light source intensity on salinity of fluid inclusion in opaque mineral by using infrared microthermometry: In the case of stibnite [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(3): 366-371.
- [9] 邱华宁, 白秀娟. 流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术与应用[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 685-697.
- Qiu H N, Bai X J. Fluid inclusion $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique and its applications[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 685-697.
- [10] 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 Y J, Chen H H. 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.
- [11] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 利用流体包裹体方法分析白云凹陷 LW3-1-1 井油气充注期次和时间[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(1): 52-56.
- Zhu J Z, Shi H S, Pang X, et al. Hydrocarbon fluid inclusion in studies of periods and times of hydrocarbon charging in well LW3-1-1, Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(1): 52-56.
- [12] 杨德相, 陈勇, 李小冬, 等. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务潜山油气成藏的流体包裹体证据[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1325-1336.
- Yang D X, Chen Y, Li X D, et al. Evidence from fluid inclusions for hydrocarbon accumulation of Yangshuiwu buried hill in Langgu sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1325-1336.
- [13] 赵洪, 罗晓容, 张立宽, 等. 准噶尔盆地中部 1 区块三工河组流体包裹体特征及对油气多期充注-调整过程的指示[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 466-476.
- Zhao H, Luo X R, Zhang L K, et al. A sign to the multi-phases hydrocarbon charge and adjustment: Fluid inclusion study from the Sangonghe formation in the No. 1 block, the middle Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 466-476.
- [14] 李博, 崔军平, 李莹, 等. 伊陕斜坡吴起地区延长组油气成藏期次分析[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(6): 21-28.
- Li B, Cui J P, Li Y, et al. Hydrocarbon accumulation phases of Yanchang Formation in Wuqi area, Yishan slope [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 21-28.
- [15] 李朝阳, 魏琳, 刁慧, 等. 西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 196-208.
- Li C Y, Wei L, Diao H, et al. Hydrocarbon source and charging characteristics of the Pinghu formation in the Kongqueing structure, Xihu depression[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 196-208.
- [16] 陈智远, 孟宪武, 沈开元, 等. 川西地区雷口坡组四段天然气成藏过程分析[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(3): 1-9.
- Chen Z Y, Meng X W, Shen K Y, et al. Analysis of gas accumulation process of the fourth member of Leikoupo Formation, western Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(3): 1-9.
- [17] 王少飞, 陈梦娜, 赵靖舟, 等. 苏里格气区盒 8 段流体包裹体特征及古压力恢复[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 94-100, 120.
- Wang S F, Chen M N, Zhao J Z, et al. Fluid inclusion characteristics and paleo-pressure recovery of the He-8 Member in the Sulige gas field, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(1): 94-100, 120.
- [18] 刘成川, 王园园, 赵爽, 等. 彭州气田雷口坡组流体包裹体特征及成藏期次[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 17-21.
- Liu C C, Wang Y Y, Zhao S, et al. Study on fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation periods of Leikoupo Formation in Pengzhou gasfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(6): 17-21.
- [19] 徐佑德, 王林, 刘子超, 等. 车排子地区火山岩油藏流体包裹体特征与成藏期次[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 545-550.
- Xu Y D, Wang L, Liu Z C, et al. Characteristics of fluid inclusions and time frame of hydrocarbon accumulation for volcanic reservoirs in Chepaizi uplift [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(5): 545-550.
- [20] 金秋月, 范彩伟, 胡林, 等. 涪西南凹陷油源精细对比与成藏期次[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 11-18.
- Jin Q Y, Fan C W, Hu L, et al. Fine correlation of oil sources and hydrocarbon accumulation stages in Weixinan depression[J]. Journal

- of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2020, 35(4): 11–18.
- [21]刘世豪, 林小云, 刘建. 济源凹陷中生界流体包裹体特征与油气成藏期次[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 55–60.
- Liu S H, Lin X Y, Liu J. Characteristics of fluid inclusions and hydrocarbon accumulation phases of the Mesozoic in the Jiyuan sag [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(4): 55–60.
- [22]赵靖舟. 油气包裹体在成藏年代学研究中的应用实例分析[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 83–89.
- Zhao J Z. Hydrocarbon inclusion analysis: Application in geochronological study of hydrocarbon accumulation [J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(2): 83–89.
- [23]柳少波, 顾家裕. 流体包裹体成分研究方法及其在油气研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 29–33, 98.
- Liu S B, Gu J Y. Analytical methods of fluid inclusions and applications to the study of oil and gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(3): 29–33, 98.
- [24]李素梅, 庞雄奇, 杨海军, 等. 塔中古生界储层中流体包裹体成分分析及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(1): 34–41.
- Li S M, Pang X Q, Yang H J, et al. MCI analysis and its significance of Palaeozoic reservoir in Tarim Central Uplift [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(1): 34–41.
- [25]韩伟, 任战利, 卢进才, 等. 银额盆地石炭–二叠系包裹体成分特征对油气运移的讨论[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1342–1351.
- Han W, Ren Z L, Lu J C, et al. Discussion on hydrocarbon migration based on characteristics of inclusions in Carboniferous–Permian of Yin'e Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1342–1351.
- [26]周慧, 郝爱华, 熊益学, 等. 流体包裹体的研究进展[J]. 矿物学报, 2013, 33(1): 92–100.
- Zhou H, Xi A H, Xiong Y X, et al. Progress in the research on fluid inclusions [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(1): 92–100.
- [27]席斌斌, 蒋宏, 许锦, 等. 基于包裹体 PVTx 数值模拟恢复油藏古温压——存在的问题、对策及应用实例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 886–895.
- Xi B B, Jiang H, Xu J, et al. Reconstruction of paleo-temperature and pressure of oil reservoirs based on PVTx simulation: Problems, strategies and case studies [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 886–895.
- [28]毛鑫, 陈勇, 周瑶琪, 等. 储层烃类包裹体类型识别与 PVT 模拟方法[J]. 岩矿测试, 2020, 29(2): 751–756.
- Mao C, Chen Y, Zhou Y Q, et al. Identification of hydrocarbon inclusion types and PVT simulation methods [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 29(2): 751–756.
- [29]李俊威, 李琦, 夏响华, 等. 运用流体包裹体确定羌塘盆地昂达尔错地区中侏罗统布曲组油气成藏期次和时期[J]. 现代地质, 2016, 30(4): 890–895.
- Li J W, Li Q, Xia X H, et al. Determination of hydrocarbon charging history by diagenetic sequence and fluid inclusions: A case study of the Angdaercuo area in the Qiangtang Basin [J]. Geoscience, 2016, 30(4): 890–895.
- [30]张育民. 塔里木盆地卡塔克隆起斜坡区油气成藏期次研究[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1015–1023.
- Zhang Y M. Petroleum charge history of the slope area of Katake uplift in Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(6): 1015–1023.
- [31]王京红, 杨帆. 车莫古隆起对古油藏及油气调整控制作用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 49–58.
- Wang J H, Yang F. Adjusting and controlling effect of Chepaizi–Mosuowan paleo-uplift on paleo-reservoir and hydrocarbon accumulation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(1): 49–58.
- [32]刘润川, 任战利, 马侃, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组油气成藏期次研究[J]. 现代地质, 2019, 33(6): 1263–1274.
- Liu R C, Ren Z L, Ma K, et al. Classification of hydrocarbon accumulation phases of Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Geoscience, 2019, 33(6): 1263–1274.
- [33]徐陈杰, 叶加仁, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷天然气成藏时期的关键证据: 气烃包裹体[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 64–73.
- Xu C J, Ye J R, Liu J S, et al. Key evidence of gas accumulation period in Xihu sag of the East China Sea Shelf Basin: Gas hydrocarbon inclusion [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 64–73.
- [34]税蕾蕾, 郭来源, 徐新德, 等. 莺歌海盆地乐东 10 区 CO₂ 包裹体特征及其流体充注史[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 835–843.
- Shui L L, Guo L Y, Xu X D, et al. Fluid charging history in Ledong 10 area, Yinggehai Basin, revealed by CO₂ inclusion characteristics [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 835–843.
- [35]卢焕章, 范瑞端, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 371–394.
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004: 371–394. (in Chinese)
- [36]刘德汉, 卢焕章, 肖贤明. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 2007: 32–36.
- Liu D H, Lu H Z, Xiao X M. Oil and gas inclusions and their application in petroleum exploration and development [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2007: 32–36. (in Chinese)
- [37]王飞宇, 师玉雷, 曾花森, 等. 利用油包裹体丰度识别古油藏和限定成藏方式[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 12–18.
- Wang F Y, Shi Y L, Zeng H S, et al. To identify paleo-oil reservoir and to constrain petroleum charging model using the abundance of oil inclusions [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 12–18.