

中国含油气地层流体包裹体研究进展及应用*

侯孟芮¹, 杨曙光^{1,2}, 李鑫^{1†}, 韦波³, 王刚², 傅雪海⁴, 苏红梅⁵, 贾超⁶

(1. 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆维吾尔自治区煤田地质局 煤层气研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830091; 3. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830009; 4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 5. 新疆维吾尔自治区煤田地质局 一五六煤田地质勘探队, 新疆 乌鲁木齐 830047; 6. 新疆维吾尔自治区能源安全监测中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 流体包裹体分析是油气藏机理研究的有效手段之一。本文从含油气地层流体包裹体的研究对象、研究思路、研究进展及其在油气资源成藏机理的应用四个方面进行归纳研究, 梳理含油气地层流体包裹体研究现状、研究成果与现存问题。根据含油气盆地流体包裹体的相态、分布空间及物化性质, 可指示油气资源生排烃时期、烃源岩成熟度、油气运移路径、成藏时间、古油藏判别, 并为油气成藏机制判别提供依据。含油气盆地流体包裹体的分析研究以封闭体系、均一体系、等容体系三大假设为前提, 通过恢复分析流体包裹体物化性质并结合流体包裹体形成地质动态过程, 可指示油气资源成藏效应与富集程度差异性。流体包裹体均一温度不能精准限定油气成藏时间, 建议结合磷灰石裂变径迹、碳酸盐岩U-Pb定年与流体包裹体定年结果, 可更准确地限定油气成藏时间。深层-超深层流体包裹体均一温度不能代表捕获最小温度, 建议采用激光拉曼光谱-显微测温法, 结合包裹体PVTx体系, 可有效限定包裹体压力参数, 解决最小捕获温度问题。激光拉曼光谱无法测定液态烃包裹体有机成分含量, 建议使用紫外光源或785 nm激光器的拉曼光谱仪, 以减少液态烃包裹体的荧光干扰。

关键词: 含油气地层; 流体包裹体; 研究方法; 油气资源指示

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.12.20.0001

中图分类号: TU521.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)05-0535-015

引文格式: 侯孟芮, 杨曙光, 李鑫, 韦波, 王刚, 傅雪海, 苏红梅, 贾超. 中国含油气地层流体包裹体研究进展及应用[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(5): 535-549.

英文引文格式: HOU Mengrui, YANG Shuguang, LI Xin, WEI Bo, WANG Gang, FU Xuehai, SU Hongmei, JIA Chao. Characterization of fluid inclusions in hydrocarbon bearing formations and their resource indication effects[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(5): 535-549.

Characterization of Fluid Inclusions in Hydrocarbon Bearing Formations and Their Resource Indication Effects

HOU Mengrui¹, YANG Shuguang^{1,2}, LI Xin¹, WEI Bo³, WANG Gang²,
FU Xuehai⁴, SU Hongmei⁵, JIA Chao⁶

(1. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Pronosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Coalbed Methane Research and Development Center, Xinjiang Coalfield Geological Bureau, Urumqi Xinjiang 830091, China; 3. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Limited Liability Company, Urumqi Xinjiang 830009, China; 4. School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 5. No.156 Geological Exploration Team, Xinjiang Uygur Autonomous Region Coalfield Geology Bureau, Urumqi Xinjiang 830047, China; 6. Energy Monitoring Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, Urumqi Xinjiang 830002, China)

* 收稿日期: 2024-12-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区天山英才计划“新疆前陆冲断带深部煤系天然气形成机制与富集机理”(2022TSYCCX0043), “新疆富油煤地质成因与薄层富油煤原位热解提取煤基油气基础研究”(2022TSYCLJ0021); 新疆维吾尔自治区科技重大专项“利用二氧化碳提高新疆难开采煤层气采收率技术体系研发”(2022A03015-3)。

作者简介: 侯孟芮(1998—), 女, 硕士生, 从事非常规油气勘探开发的研究, E-mail: 945172648@qq.com.

† 通讯作者: 李鑫(1990—), 男, 教授, 主要从事非常规油气勘探开发的研究, E-mail: lixinwaxj@xju.edu.cn.

Abstract: Fluid inclusion analysis serves as an effective tool for investigating hydrocarbon reservoir mechanisms. This study systematically reviews hydrocarbon-bearing fluid inclusions in sedimentary strata through four aspects: research targets, methodological frameworks, research advancements, and applications in hydrocarbon accumulation mechanisms. It summarizes the current research status, key achievements, and unresolved challenges in this field. The phase states, spatial distribution, and physicochemical properties of fluid inclusions in petroliferous basins constrain key parameters including hydrocarbon generation/expulsion timing, source rock maturity, migration pathways, reservoir formation timing, and paleo-reservoir identification, and provide critical constraints for hydrocarbon accumulation mechanisms. Fluid inclusion analysis in petroliferous basins is based on three fundamental assumptions: closed system, homogeneous system, and isochoric system. By reconstructing the physicochemical properties of fluid inclusions and integrating their geodynamic formation processes, this approach effectively constrains hydrocarbon accumulation efficiency and heterogeneity in enrichment degrees. The homogenization temperatures of fluid inclusions cannot independently constrain hydrocarbon accumulation timing. Integrating apatite fission-track analysis, carbonate U-Pb dating, and fluid inclusion chronology are recommended to improve temporal calibration accuracy. Homogenization temperatures of fluid inclusions in deep to ultra-deep reservoirs fail to represent minimum entrapment temperatures. Application of laser Raman spectroscopy coupled with microthermometry, integrated with *PVTx* modeling, is recommended to precisely constrain pressure parameters and resolve ambiguities in minimum entrapment temperatures. Laser Raman spectroscopy cannot reliably quantify the organic composition of liquid hydrocarbon-bearing fluid inclusions. It is recommended to utilize Raman spectrometers equipped with UV excitation sources or 785 nm lasers to mitigate fluorescence interference in such inclusions.

Key words: oil and gas bearing stratum; fluid inclusions; research methodology; oil and gas resource indication

0 引言

流体包裹体是矿物形成中或形成后被包裹在矿物晶格缺陷和空穴中的成矿流体^[1-5]。含油气盆地中的流体包裹体有大气降水、地层水、气态烃、液态烃,他们在漫长的地质历史中发生了运移和聚集,在成岩过程中保留了不同时期的流体包裹体记录^[1,6-11]。流体包裹体的分析和研究已经成为含油气盆地流体运移和成藏研究的重要内容,可用于识别油气藏、确定运移途径、限定成藏时期、分析成藏条件,模拟油气成藏过程^[12-14]。通过包裹体的岩相观察、显微测温、成分分析与同位素定年等方法,对开展油气资源评价、分析油藏地球化学、判识油气流体类型与成藏期次、揭示流体来源等研究具有重要作用^[15-19]。

烃类流体包裹体实际上是微观的油气藏,烃类流体包裹体的记录在时间尺度上并非连续的记录,而是一系列特定地质时间零星的相对瞬时记录的集合。油气生成运移和聚集保存经历了漫长的地质时间,从几个百万年至几百个百万年的动态演化过程,时间和空间尺度上的局限性导致流体包裹体在分析油气运移路径方面存在一定问题;如早期发生生排烃的含油气地层经过造山作用后发生地层抬升,在经历后期沉降后发生二次生烃,此时对流体包裹体进行观察研究的难度就会增加,仅使用包裹体一种约束条件,能对油气充注成藏进行分析,而难以分析油气运移路径。

我国油气资源成藏条件复杂,为提高流体包裹体在油气勘探中的应用成效,本文系统归纳了含油气地层流体包裹体的研究思路、物化特征、来源成因及其资源指示效应,归纳梳理了含油气地层流体包裹体研究目前存在的问题和攻关方向,以期为我国复杂油气资源勘探提供流体包裹体方面的研究思路和建议。

1 含油气地层流体包裹体研究对象与形成过程

1.1 研究对象

含油气地层流体包裹体的主要研究对象是碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层、火山岩储集层中赋存的流体包裹体^[20]。研究流体包裹体的目的是获得包括温度、压力、盐度、成分、稳定同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$ 等)、流体捕获时间(Sm-Nd同位素法、Rb-Sr同位素法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素法、U-Pb同位素法)等在内的反映流体包裹体形成演化物理化学条件的重要参数。根据Roedder划分标准,流体包裹体可分为原生包裹体、次生包裹体和假次生包裹体^[7];卢焕章等^[1]对含油气地层中的流体包裹体按照不同的分类依据进行分类,本文对含油气盆地中流体包裹体的分类进行了总结归纳(表1)。

含油气地层中,流体包裹体组分研究是一个关键的方向,涉及油气生成、运移、储集等多个环节。油气流体包裹体一般赋存在砂岩或碳酸盐岩中,在石英加大边、方解石、碳酸盐岩胶结物中较为常见。油气流体包裹体成分一般包括气烃、轻烃、重烃、盐水等。通过分析油气流体包裹体,可识别油气藏和运移途径,限定成藏期

次,分析成藏条件和油气充注时流体成分相态.含油气地层中流体包裹体组分分析在油气资源研究中具有重要指示作用,其研究内容、目标及趋势均指向更深入地理解油气成藏过程,以提高油气资源勘探和开发的效率和准确性.

表 1 含油气地层中烃类流体包裹体的分类方案

| 分类对象 | 分类依据 | 类别 | 参考文献 |
|--------------------|-----------------------|-----------|---------|
| 含油气地层中的 烃类流体包裹体 | 地质条件和地质环境、 形成时间的关系 | 原生包裹体 | [20] |
| | | 次生包裹体 | |
| | 物理相态 | 纯液相烃包裹体 | [21-23] |
| | | 多相纯液相烃包裹体 | |
| | | 气相烃包裹体 | |
| | | 沥青包裹体 | |
| | 成岩矿物世代关系 | 气液两相烃包裹体 | [1] |
| | | 第一世代烃包裹体 | |
| | | 第二世代烃包裹体 | |
| | | 第三世代烃包裹体 | |
| 第四世代烃包裹体 | | | |
| 油气成分的成熟度 | 第 n 世代烃包裹体 | [1] | |
| | 重(稠)油包裹体 | | |
| | 中质油包裹体 | | |
| | 轻质油包裹体 | | |
| | 凝析油气包裹体 | | |
| | | 湿气包裹体 | |
| | | 干气包裹体 | |

含油气地层中流体包裹体来自流体物质不断产生、运移、聚集和被成岩矿物捕获的过程,按照成因可分为继承性包裹体和成岩包裹体两大类.继承性包裹体存在于沉积岩的陆源碎屑岩颗粒中,对盆地物源有指示作用,但不能反映成岩后的物理化学条件变化,在含油气地层中一般不做研究.成岩包裹体是在成岩过程中封存于各种成岩自生矿物中的包裹体,根据包裹体与含该包裹体的主矿物之间的生成关系又可分为原生包裹体、次生包裹体,原生包裹体是在主矿物生长期间捕获的,次生包裹体是主矿物沉淀析出结束后形成的^[5,21,24].

1.2 形成过程

油气在运移成藏过程中较容易捕获封闭于成岩矿物晶格缺陷或愈合裂缝中形成的烃类包裹体^[25].研究其形成过程可指示油气充注时地层的物理化学条件,为分析油气成藏条件提供有利依据.在多种包裹体中挑选出符合均一体系、封闭体系及等容体系三大基本原则的流体包裹体才能进行有效的流体包裹体研究.

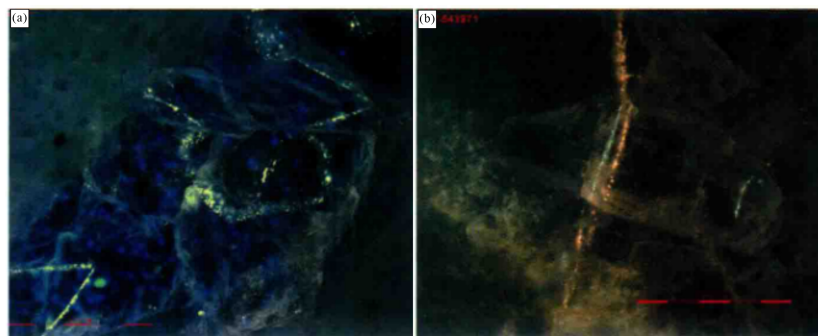


图 1 含油气地层中紫外光下包裹体岩相学照片^[13]

注:(a)为方解石脉中黄色荧光原生包裹体;(b)为愈合缝中褐色和蓝色荧光次生包裹体

含油气地层中常用成岩包裹体指示成岩地质流体特征,这与包裹体的形成过程有关.在早期生排烃阶段,烃类包裹体多为未成熟或低成熟烃类包裹体,成岩作用主要为压实作用、裂隙作用和早期胶结作用.在晚期生

排烃阶段,包裹体多为成熟或高成熟烃类包裹体,成岩作用主要是次生加大和晚期胶结作用^[26].在生油岩中烃类的原生运移阶段或是油气在储集层中聚集的次生运移阶段沉积物只要发生结晶或重结晶作用,就能在晶体中形成包裹体.悬浮的油滴分布在盐水溶液中,在包裹体捕获形成过程中,盐水溶液和油可单独捕获,也可一起被捕获.所以烃包裹体常与盐水溶液包裹体共生^[20].

原生包裹体(图1(a))是在矿物结晶过程中被捕获的包裹体,与赋存的矿物同时形成,为油气初次运移提供了直接证据.矿物形成后,由于压力变化或构造运动等外力影响因素,使完好的晶体产生裂隙,这些裂隙会再捕获后期成矿介质并实现封闭,形成次生包裹体(图1(b)).次生包裹体是油气次生运移聚集演化的直接标志.

1.3 流体包裹体性质应用前提及示例

卢焕章等^[1]结合流体包裹体热力学体系与其环境的关系,将流体包裹体分为三种体系:孤立体系、封闭体系与开放体系.包裹体形成后其中物质有没有发生渗漏,是判断包裹体是否为封闭体系的依据.研究烃类包裹体测温条件时,提出测温应满足以下三个条件:密闭封存体系、均一体系、等容体系.当满足上述条件时,可利用烃包裹体及其共生的盐水包裹体指示含油气盆地中油气资源形成时的物理化学条件.

张新乐等^[27]先对鄂尔多斯盆地泾河油田中油包裹体同期的盐水包裹体进行均一温度测试,根据均一温度直方图(70~85 °C、95~105 °C、115~125 °C)将包裹体分为三期,再把三期均一温度投影到埋藏史图上,得到三期油充注时间(139~120 Ma、120~110 Ma、110~96 Ma).刘德汉等^[28]利用四川盆地中高密度甲烷包裹体拉曼光谱计算出甲烷包裹体拉曼镜质体反射率($R_{M}VR_o$)范围为3.07%~3.85%,多数大于3.15%.

利用以包裹体热力学为基础的盐度-均一温度法与等容线图解恢复出油气成藏时的古流体压力,从而推断出油气藏形成时的温压条件^[29].解巧明^[30]根据包裹体的均一温度和盐度利用包裹体等容体系恢复油气注充时的古压力(图2),结果显示淮南地区紫泥泉组浅黄色荧光油气充注时期古压力为18.55~26.32 MPa,蓝白色油气充注时期古压力为39.41~48.47 MPa,头屯河组淡蓝色荧光油气充注时期古压力为49.40~62.82 MPa.

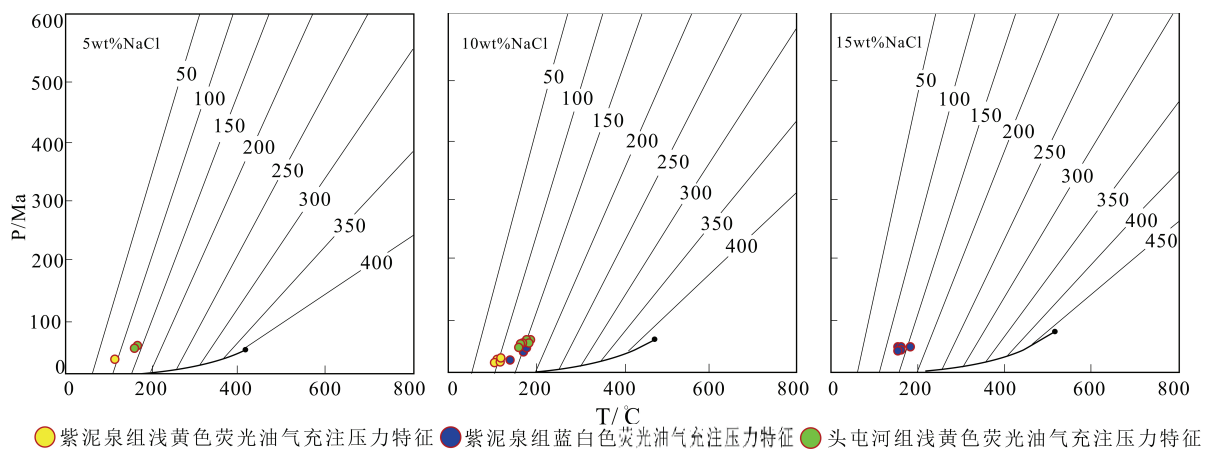


图2 淮南地区流体包裹体等容线图解法古流体压力恢复结果^[30]

2 含油气地层流体包裹体研究方法

包裹体岩相学(光学显微镜、电子探针、扫描电镜等)、显微测温法(均一法、冷冻法)、压力分析法(流体包裹体自身 PVT_x 性质)、成分分析法(气相色谱、液相色谱、显微激光拉曼光谱、热释-色谱-质谱分析技术、稳定同位素和放射性同位素等)、测年法($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年)是流体包裹体研究的主要方法^[31-35].

2.1 包裹体岩相学

含油气盆地中的流体包裹体主要存在于碎屑矿物的微裂隙、孔洞及胶结物中,为成岩包裹体中的次生包裹体;同时,存在成岩与生烃共同作用形成的如胶结物中的含油气成分原生包裹体.岩相学观察法主要采用光学显微镜、荧光显微镜和阴极发光仪,用于分析包裹体的形态、类型及空间分布特征,可获取包裹体的形成期次,反映流体的先后顺序,有助于分析油气的形成或者运移路径^[36-38].

2.2 包裹体显微测温法

主要使用光学显微镜上安装的显微冷-热两用台、测温台和光源等设备,用于研究温度升高或降低时气液

两相比例变化与相变过程等内容,可获取包裹体的均一温度、盐度等信息,反映当时充注流体的物理化学特征,有助于分析油气的成藏温度条件^[39-41]。

2.3 包裹体压力分析法

主要利用流体包裹体自身性质,基于流体状态方程(Equation of State, EOS)及包裹体数据处理软件获取烃类包裹体等容线方程,再求得盐水包裹体等容线与烃类包裹体等容线的交点对应的压力,获得流体包裹体捕获压力,即恢复油气藏形成时的储层压力。例如,张洪瑞等^[42]采用流体包裹体观测技术以及盐度-均一温度法和PVTx模拟法,恢复了准噶尔盆地阜康凹陷三工河油气藏的储层压力。

2.4 包裹体成分分析法

拉曼光谱仪、傅里叶红外光谱仪、显微荧光光谱仪、激光剥蚀-等离子质谱仪(LA-ICP-MS)、稳定同位素制样系统与气相色谱仪联合使用,用于成分确定分析,确定不同地层空间位置无机成分的含量,有助于分析油气的形成环境及成熟度演化。

拉曼光谱在测定固体有机质散射中出现的D峰和G峰特征峰信息,可以反映地质样品中含碳固体有机质的热演化程度^[43-45]。拉曼参数包括代表 ν_G - ν_D 两个特征峰的位移差(cm^{-1})、G峰和D峰的高度比 G_h/D_h 等,可分别用于估算成熟至高成熟阶段的碳化固体有机质样品的 $R_{\text{mc}}R_o\%$ (固体有机质的拉曼光谱分析参数计算的反射率)和过成熟至粒状石墨化以前的碳化固体有机质样品的 $R_{\text{mc}}R_o\%$ ^[46-47]。基于拉曼成熟度测试方法可观测计算不同期次产状沥青镜质体反射率特征,为气藏调整-埋藏生烃过程模拟提供古温标参数^[48]。与拉曼光谱定量分析相比,傅里叶红外光谱对流体包裹体定量分析可减少实验结果的误差^[49]。

张甯^[13]将稳定同位素制样系统与气相色谱仪相连接,提取了塔里木盆地塔北地区喜马拉雅期形成的第Ⅲ期和晚海西期形成的第Ⅱ期烃包裹体,测出全油碳同位素分别为-26.2‰、-31.5‰,分别对应陆相原油和海相原油。陈彦鄂等^[50]利用热释-色谱-质谱分析技术与离线分析(Molecular Composition of Inclusion, MCI)对澳大利亚Halibut油田人工合成包裹体、澳大利亚Jabiru油田和塔河油田烃类包裹体样品进行了烃类组分分析,两种方法结果显示芳烃化合物的成熟度参数仅有微小差异,两种方法均适用于烃类包裹体的成分分析。

2.5 包裹体测年法

含油气地层中,最常用的包裹体测年法是寻找赋存在石英矿物中的盐水包裹体,对其中的Ar元素进行⁴⁰Ar/³⁹Ar定年,可获取烃类包裹体的形成时间,有助于分析油气充注时间。

2.6 不同方法总结

含油气地层中流体包裹体研究方法归纳见表2。岩相学法为包裹体研究中最基础且重要的方法,所观测到的包裹体形态、类型及空间分布特征最直观。显微测温法可以获得较多的流体参数,如成藏时期的流体温度、盐度、压力等信息,从而绘制PVTx相图。成分分析法主要运用拉曼光谱来测定有机成分含量,此方法要求包裹体大小为10 μm 以上,较难寻找;进行激光拉曼光谱测定时,会受到荧光干扰,难以测定液态烃包裹体成分。包裹体同位素法对实验仪器精度要求较高,测年法主要测试石英矿物中的烃类包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar定年。

表 2 含油气地层中流体包裹体方法总结

| 方法 | 研究对象 | 获取参数 | 应用 |
|-------|--------------|----------------|--------------|
| 岩相学法 | 包裹体镜下特征 | 包裹体形态、类型及空间分布 | 反映油气藏期次或运移路径 |
| 显微测温法 | 气液两相包裹体相变过程 | 包裹体的均一温度、冰点等信息 | 反映油气的成藏物理条件 |
| 压力分析法 | 包裹体捕获压力 | 包裹体形成时的压力信息 | 反映油气形成时的压力信息 |
| 成分分析法 | 包裹体成分 | 激光拉曼或荧光光谱图 | 反映成藏流体形成时的成分 |
| 同位素法 | 包裹体中所含的稳定同位素 | 稳定同位素范围 | 准确反映油气藏形成环境 |
| 测年法 | 石英矿物中的烃类包裹体 | 烃类包裹体形成的时间 | 较容易寻找测试包裹体 |

含油气地层中,结合不同的流体包裹体方法测试结果可得到相应的油气资源指示(图3)。首先,通过岩相学的方法对包裹体进行初步判断,用其荧光特性可以对油气藏期次进行初步划分。其次,使用显微测温法、测年法以及成分分析法与岩相学法相结合,可判断油气藏形成期次或者限定油气藏形成时间。最后,通过不同的方法对含油气地层中的“微油藏”综合分析,可判断出油气藏成藏时的物理、化学条件。

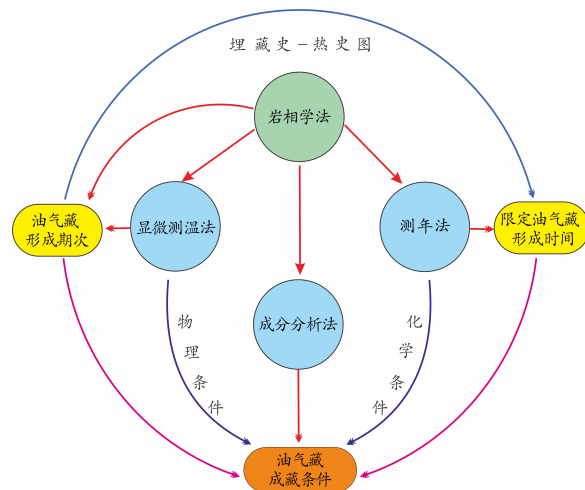


图3 含油气地层中流体包裹体使用方法及其资源指示效应

3 含油气地层流体包裹体的应用

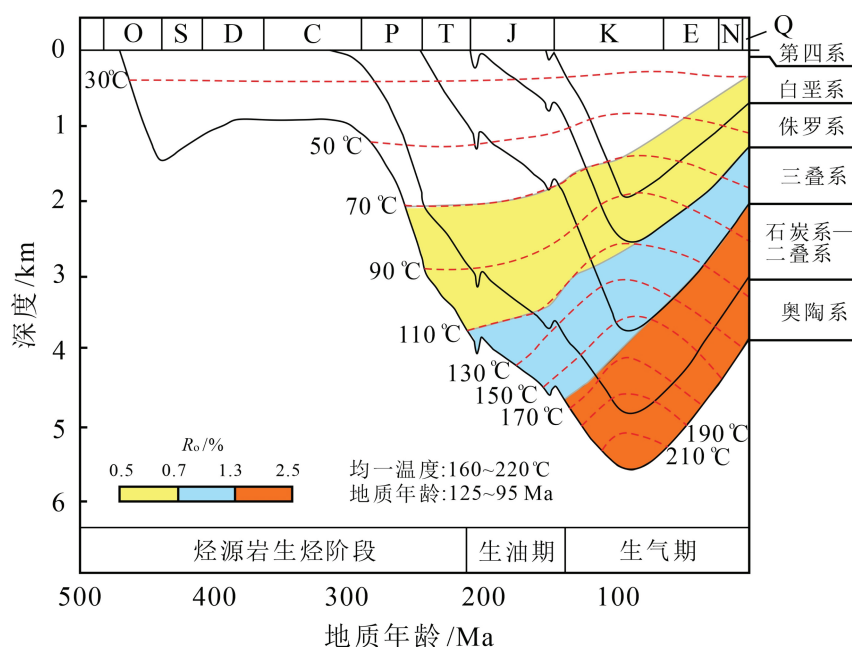
3.1 生排烃指示效应

3.1.1 荧光特性指示烃源岩成熟度

含油气地层中烃源岩生成的原油及烃类包裹体中饱和烃与芳香烃的比值和API°会随成熟度增加而增加,其荧光颜色逐渐蓝移:红色→橙色→黄色→蓝色→亮蓝色^[51-53].徐勤琪等^[54]在荧光显微镜下观察到,在碳酸盐岩发育方解石脉体的储层流体包裹体中,存在蓝色、浅黄色和黄色三种荧光颜色的油包裹体,其荧光光谱测试出的荧光参数也呈现三个范围.根据荧光随成熟度变化规律,推测多旋回盆地海相碳酸盐岩油气藏(塔河油田盐下地区)奥陶系碳酸盐岩储层中的油气资源为三种不同成熟度.

3.1.2 温度特征指示烃类充注

含油气地层中,常使用和烃包裹体伴生的盐水包裹体均一温度指示捕获温度,进而推测油气充注时期.吴小力等^[55]通过流体包裹体的岩相学观察以及测试出含硫化氢气体流体包裹体的均一温度,并结合埋藏史-热演化史图(图4),推测鄂尔多斯盆地马家沟组的天然气是上古生界煤系烃源岩和奥陶系(125~95 Ma)海相烃源岩在热演化过程中达到高成熟-过成熟阶段(均一温度:160~220℃; R_o : 1.3%~2.5%)时形成的.

图4 鄂尔多斯盆地Tao112井马家沟组含硫化氢流体包裹体的形成时间与烃源岩生烃期的关系^[55]

3.2 运移指示效应

3.2.1 地层水运移

根据含油气地层中流体包裹体岩相学特征、成分、温度和盐度等特征, 结合包裹体空间位置可推测油气生成时流体活动强度, 再结合地层水矿化度演化及油气藏埋藏演化史图可推测油气成藏时间. 吴宇辰等^[56]发现石英颗粒中存在沸腾包裹体组合(断裂泄压的间接证据), 包裹体盐度随温度增加呈下降趋势, 且在浅层分布较多偏高盐度的盐水包裹体、深层留下较多偏低温的盐水包裹体. 结合包裹体和现今地层水矿化度数据, 吴宇辰等^[56]认为渤海湾盆地东濮凹陷文留地区沙河街组自24 Ma至今, 地层水矿化度呈升高的演化趋势, 且经历了两期(30~22 Ma和8~0 Ma)油气成藏(图5). 包裹体均一温度限定的油气成藏高峰期、地层水淡化期、地层压力泄压期三者高度耦合, 以此推测流体运移方向: 烃源岩中出现超压, 导致出现断层和裂缝, 烃类流体和淡化地层水随着运移通道进入储层.

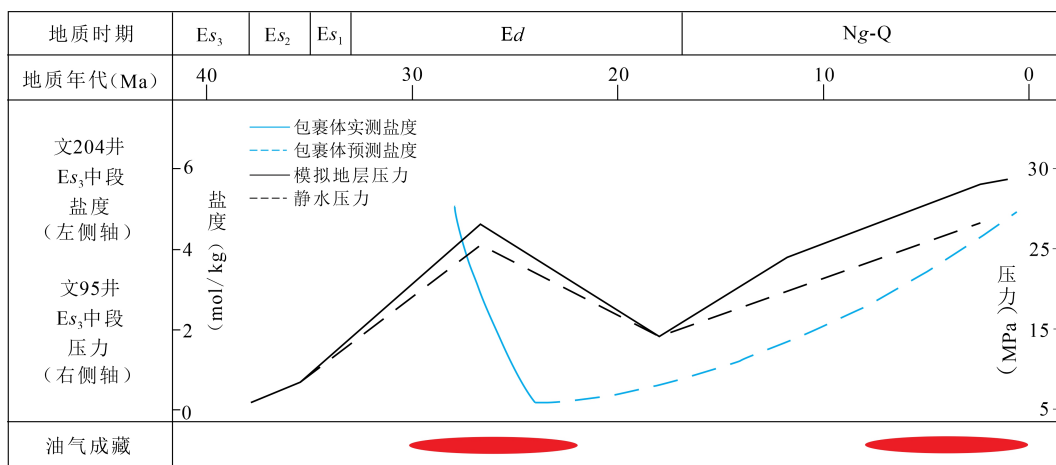


图5 渤海湾盆地东濮凹陷文留地区沙河街组油气成藏时期^[56]

3.2.2 气体运移

含油气地层中, 可以利用流体包裹体方法恢复和解析天然气运聚成藏地球化学机制和过程^[57]. 陶士振等^[58]检测出鄂尔多斯盆地上古生界流体包裹体气体组分含量以及气体同位素, 对比现今的气藏中气体相关参数得出: 上古生界流体包裹体中气体比现今气藏中的天然气同位素组成变化范围大(图6). 这反映出上古生界包裹体中捕获的天然气总体上比现今气藏中的气体成分及时空分布具有更大的广泛性, 体现多期次、多阶段的充注结果.

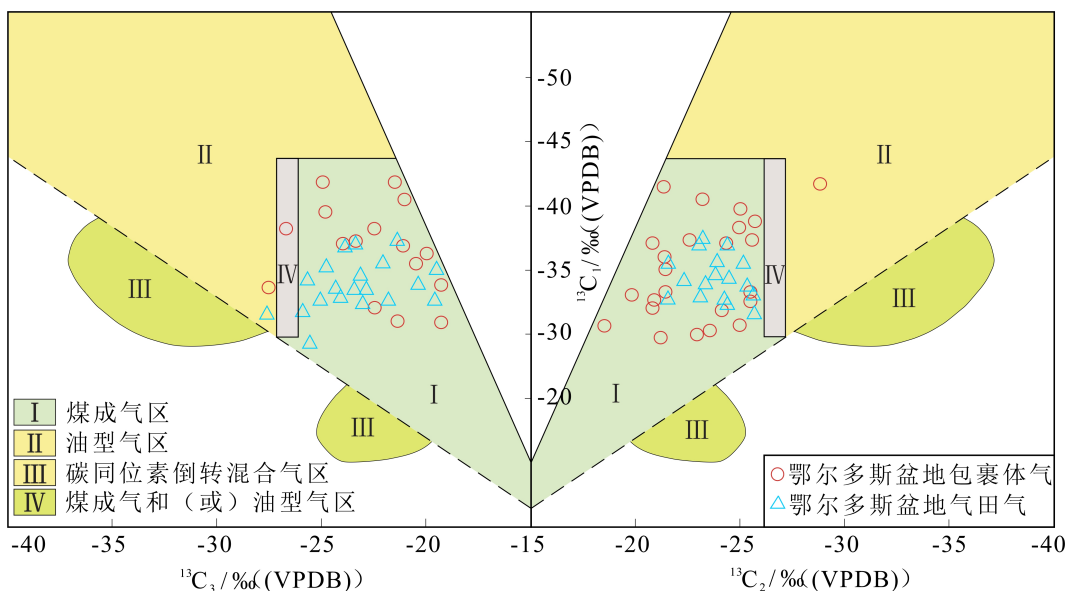


图6 鄂尔多斯盆地上古生界流体包裹体气体 $\delta^{13}C_1$ - $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}C_3$ 相关图^[58]

3.2.3 油气运移

含油气地层中,根据烃类包裹体岩相学观察、荧光特性、共生盐水包裹体最低均一温度及埋藏史图推测油气充注时间,再根据油气藏的生-储-盖配置以及地质构造可判断油气运移方向.薛一帆等^[59]根据塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带奥陶系碳酸盐岩储层中的烃类包裹体岩相学观察和荧光特性将包裹体分为三期:原生黄绿色油包裹体、原生绿色油包裹体、次生蓝白色油包裹体.选取烃类包裹体共生的盐水包裹体最小均一温度结合埋藏史图确定三期油包裹体捕获时间分别为452 Ma、364 Ma、279 Ma,结合方解石U-Pb同位素法确定研究区三期油气成藏时间.根据前人研究结果及油气藏生-储-盖配置以及地质构造资料推测油气运移路径(图7).

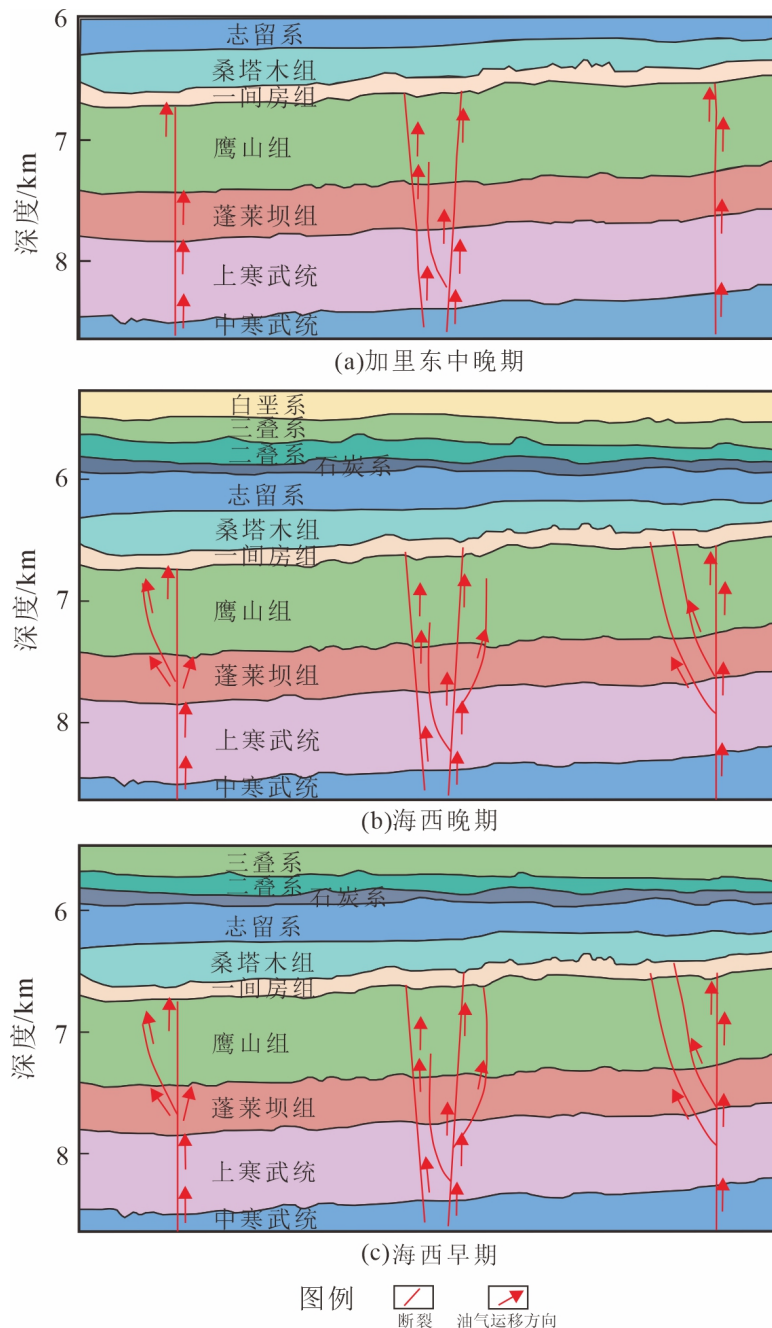


图7 塔里木盆地富满油田北部油气运移路径^[59]

3.3 成藏过程指示效应

在宏观分析油气分布特征的前提下,以烃源岩地球化学特征为基础,以流体包裹体分析为手段,判断储层油气藏充注时间及期次,结合油气藏动力分析,进而梳理油气藏要素的耦合关系,最终恢复油气成藏过程^[60-65].

3.3.1 流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar定年指示成藏时间

同构造期形成石英脉中的石英原生包裹体年龄可代表断层形成的年龄, 次生包裹体的年龄代表断层形成之后构造断层再次活动的年龄. 构造断层在油气成藏过程中起输导作用, 原生包裹体年龄可指示油气藏开始成藏的时间, 次生流体包裹体代表油气成藏后的另一次流体活动, 限定了断层晚期活动的时间及发生油气藏成藏改造作用的时间^[25,31,66-69].

Qiu等^[69]对松辽盆地白垩纪营城组三口井中石英矿物中的流体包裹体(次生包裹体)进行⁴⁰Ar/³⁹Ar定年(图8), 并对冯子辉等^[70]估算的成藏时间(100~65 Ma)进行更正, 结果显示松辽盆地深层天然气藏成藏时间为(42.4±0.5) Ma(三组样品平均年龄).

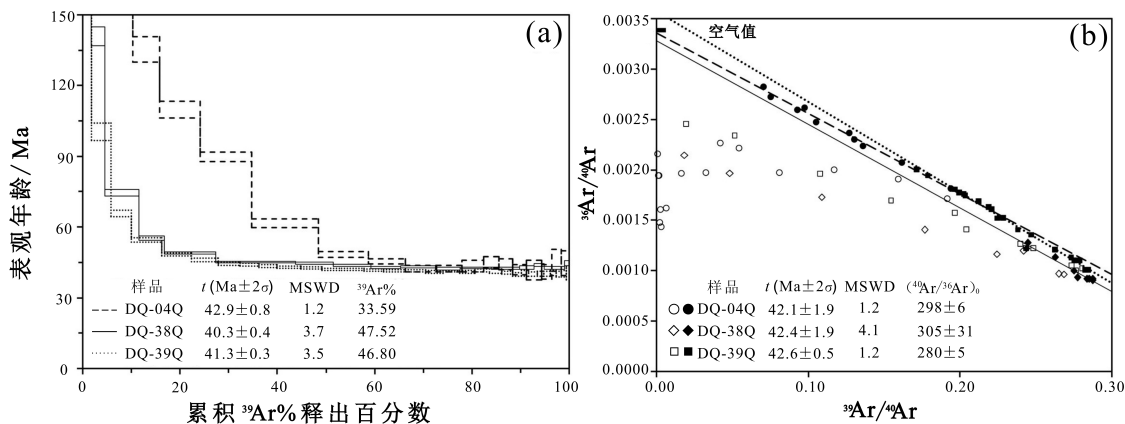


图8 松辽盆地深层⁴⁰Ar/³⁹Ar逐级击碎石英样品的年龄谱和反等时线^[69]

注:(a)为⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄谱;(b)为⁴⁰Ar/³⁹Ar反等时线

3.3.2 判别古油气藏

Eadington等^[71]针对砂岩储层油气藏提出烃包裹体颗粒指数(Grains containing Oil Inclusions, GOI)计算方法, 来反映储层含油饱和度、区分砂岩油藏不同的油水气层, 再结合油水界面和充注历史评价古油藏. 陈哲龙等^[72]对二连盆地地下白垩系储层中流体包裹体的GOI指数进行统计, 发现在盆地近缓坡带和陡坡洼带, 使用GOI指数评价含油饱和度较为准确(含油饱和度越高, GOI指数越大); 在较远洼缓坡带, GOI指数评价油气充注强度的方法不适用(含油饱和度高, GOI指数低). 推测较远洼缓坡带距离油气源较远, 经过较长搬运距离, 致使GOI指数评价充注强度方法不适用.

Zhang等^[73]在GOI指数评价古油藏的基础上, 针对碳酸盐岩储层中油气藏提出碳酸盐岩有效网格法(Effective Grid containing Oil Inclusions, EGOI)指示油气藏饱和度, 通过塔里木盆地碳酸盐岩储层中烃包裹体进行验证, 得出EGOI指数与GOI指数判别古油藏的结果一致(表3).

表3 GOI和EGOI指数判别古油藏

| GOI/% | 砂岩储层含油饱和度 | EGOI/% | 碳酸盐储层含油饱和度 |
|-------|-----------|--------|------------|
| ≥5 | 古油层 | ≥5 | 古油层 |
| 1~5 | 古运移通道 | 1~5 | 含油层或油水层 |
| ≤1 | 水层 | ≤1 | 水层或干层 |
| | | ≥3或3~5 | 晚成藏的古油层 |

4 含油气地层流体包裹体研究存在的问题

4.1 流体包裹体均一温度不能精准限定油气成藏时间

流体包裹体的形成演化是一个复杂的地质过程, 会受到多种因素的影响. 例如, 在油气形成后, 包裹体受到后期地质作用影响会再次演化, 此时的包裹体不能指示同期形成油气的形成演化, 包裹体均一温度确定的成藏时间是相对的. 建议将储层砂岩中磷灰石裂变径迹结果或碳酸盐岩U-Pb定年与流体包裹体定年结果综合分析, 两个及以上条件限定成藏时间较为准确.

4.2 深层-超深层流体包裹体均一温度不能代表捕获最小温度

在深层-超深层的油气储层或在相对较浅的地层形成后期再埋深成现今的深层-超深层包裹体,由于包裹体的捕获压力较大,容易出现包裹体再平衡现象,造成包裹体均一温度发生改变,此时的均一温度并不能代表包裹体形成时的捕获最小温度.建议根据包裹体研究的三大体系原则,利用其 PVT_x 性质,采用激光拉曼光谱-显微测温结合的方式,限定不同组分包裹体压力参数,以此解决最小捕获温度的问题.

4.3 激光拉曼光谱无法测定液态烃包裹体有机成分含量

液态烃包裹体有机成分含量无法用激光拉曼光谱测定.由于受荧光干扰,激光拉曼光谱对液态烃的有机成分几乎无法测定.在原有激光拉曼光谱仪上再配备一套紫外光源设备,或使用具备785 nm激光器的激光拉曼光谱仪,才能有效避免液态烃包裹体受荧光干扰的问题.

5 结论与展望

流体包裹体是研究油气资源的有效工具,本文对含油气地层中流体包裹体本身及其指示的油气资源进行了系统归纳分析研究,主要结论如下:

(1) 含油气地层中,运用不同的流体包裹体研究方法可得到不同的油气资源指示.首先,通过岩相学的方法对包裹体进行初步判断,用其荧光特性可以对油气藏进行初步划分;其次,使用显微测温法、测年法、同位素法以及成分分析法与岩相学法相结合,可判断油气藏形成期次或者限定油气藏形成时间;最终,通过不同的方法对含油气地层中的“微油藏”综合分析,可判断出油气藏成藏时的物理、化学条件.

(2) 对含油气地层中流体包裹体进行研究,可以利用其特征指示油气资源效应.利用烃包裹体共生的盐水包裹体来指示烃类充注时间;利用烃包裹体在紫外光照射下呈现的荧光特性不同颜色指示烃源岩成熟度;根据包裹体 PVT_x 之间的转化关系计算出的温度、压力、盐度及组分特征用于推测油气资源运移路径,也可以用于指示油气成藏时间、判别古油藏类型,并为分析油气成藏模式提供依据.

(3) 根据前人对含油气盆地中流体包裹体的研究提出了三个存在的问题及研究方向.包裹体均一温度不能精准限定油气成藏时间,深层-超深层流体包裹体均一温度不是捕获最小温度,激光拉曼光谱无法测定液态烃包裹体有机成分含量,并针对上述问题提出了相应的解决方案.

随着科技不断进步,流体包裹体研究将面临更多的机遇和挑战;流体包裹体的研究结果将随着技术提升和设备更新变得更加精确可靠,对包裹体形成演化机制的认识也会更加深入.后续包裹体的研究将会融合不同尺度的分析,在油气系统模拟软件中建立流体包裹体数据的算法,实现含油气地层中流体包裹体原始数据与模拟数据相互约束,更科学精确地分析流体包裹体与油气藏之间的意义.流体包裹体研究与石油天然气地质学的交叉研究逐渐深入,包裹体将为油气勘探和开发提供更有利的科学证据.未来,流体包裹体的研究将为油气行业的可持续发展作出更大贡献.

参考文献:

- [1] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LU H Z, FAN H R, NI P, et al. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 王飞宇,冯伟平,关晶,等. 含油气盆地流体包裹体分析的关键问题和意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(3): 441-450.
WANG F Y, FENG W P, GUAN J, et al. Key questions of the fluid inclusion analysis in petroliferous basins and their significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(3): 441-450. (in Chinese)
- [4] 张文淮,陈紫英. 流体包裹体地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
ZHANG W H, CHEN Z Y. Geology of fluid inclusions[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993. (in Chinese)
- [5] 刘德汉,肖贤明,田辉,等. 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 491-501.
LIU D H, XIAO X M, TIAN H, et al. Fluid inclusion types and their geological significance in petroliferous basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 491-501. (in Chinese)
- [6] RAYMOND C M. Hydrocarbon fluid inclusions in quartz[J]. AAPG Bulletin, 1957, 41(5): 950-952.

- [7] ROEDDER E. Fluid inclusions[M]//RIBBE P H. Reviews in mineralogy (Vol. 12). Washington D C: Mineralogical Society of America, 1984.
- [8] PAGEL M, WALGENWITZ F, DUBESSY J. Fluid inclusions in oil and gas-bearing sedimentary formations[C]//IFP Exploration Research Conference. 1 (1985). Paris: Technip, 1986: 565-583.
- [9] GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[M]. Houston: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1994.
- [10] 刘德汉. 包裹体研究: 盆地流体追踪的有力工具[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 149-154.
LIU D H. Fluid inclusion studies: An effective means for basin fluid investigation[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 149-154. (in Chinese)
- [11] SAMSON I, ANDERSON A, MARSHALL D. Fluid inclusions: Analysis and interpretation[M]. Fredericton: Mineralogical Association of Canada, 2003.
- [12] 陈勇. 流体包裹体激光拉曼光谱分析方法及应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2015.
CHEN Y. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis and applications[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2015. (in Chinese)
- [13] 张甯. 含油气盆地流体包裹体分析技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
ZHANG N. Analysis technology and application of fluid inclusions in petroliferous basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 沈传波, SELBY D, 梅廉夫, 等. 油气成藏定年的Re-Os同位素方法应用研究[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4): 87-93.
SHEN C B, SELBY D, MEI L F, et al. Advances in the study of Re-Os geochronology and tracing of hydrocarbon generation and accumulation[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(4): 87-93. (in Chinese)
- [15] 药璜, 孙楠. 应用于流体包裹体CO₂碳同位素组成的拉曼光谱定量研究探讨[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1032-1040.
YAO Y, SUN Q. Raman quantitative measurements for carbon isotopic composition in CO₂-rich fluid inclusion: A preliminary study[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1032-1040. (in Chinese)
- [16] 施继锡, 余孝颖. 碳酸盐岩中包裹体有机质特征与非常规油气评价[J]. 矿物学报, 1996, 16(2): 103-108.
SHI J X, YU X Y. Characteristics of organic matter in carbonate rocks and unconventional evaluation of oil and gas[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1996, 16(2): 103-108. (in Chinese)
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 陈涛, 杨怀宇, 王秀红. 盆缘复杂油性地层油藏油气运移路径判识方法[C]//2022油气田勘探与开发国际会议论文集 I. 2022年, 11月16日-18日. 中国, 陕西, 西安. IFEDC, 2022: 21-23.
CHEN T, YANG H Y, WANG X H. Identification method of oil and gas migration path in complex oil reservoir at basin margin[C]//Proceedings of the 2022 International Field Exploration and Development Conference (IFEDC) I. November, 16-18, 2022. Xi'an, Shaanxi, China. IFEDC, 2022: 21-23. (in Chinese)
- [19] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探(第2版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
JIANG Y L, ZHA M. Petroleum and natural gas geology and exploration (2nd ed)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [20] 陈昭年. 石油与天然气地质学(第2版)[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
CHEN Z N. Petroleum and natural gas geology (2nd ed)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese)
- [21] 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(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 in China (Series B), 1987(3): 318-325. (in Chinese)
- [22] HOLLISTER L S, CRAWFORD M L. Fluid inclusions: Applications to petrology[M]//GHENT E D, HOLLISTER L S, CRAWFORD M L. Short course handbook (Mineralogical Association of Canada) Vol. 6. Calgary: Mineralogical Association of Canada, 1981.
- [23] 危国亮, 张小芹, 席翔涛, 等. 有机包裹体及其研究方法[J]. 吐哈油气, 2000, 5(4): 29-31+98.
WEI G L, ZHANG X Q, XI X T, et al. Organic inclusion enclave and its studying method[J]. Tuha Oil & Gas, 2000, 5(4): 29-31+98. (in Chinese)

- [24] 程军蕊. 塔河油田奥陶系地下流体特征与油气藏形成研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
CHENG J R. Study on characteristics of underground fluid and formation of reservoir in Tarim oilfield[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 李宏卫, 曹建劲, 李红中, 等. 油气包裹体在确定油气成藏年代及期次中的应用[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2008, 29(4): 29-35.
LI H W, CAO J J, LI H Z, et al. Application of oil-gas inclusion to the reservoir formation time and accumulation periods of the oil-gas reservoirs[J]. Journal of the Graduates of Sun Yat-sen University(Natural Sciences, Medicine), 2008, 29(4): 29-35. (in Chinese)
- [27] 张新乐, 平宏伟, 杨鑫, 等. 鄂尔多斯盆地南缘泾河油田长7段烃源岩生、排烃期与油气成藏期对比[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 108-121.
ZHANG X L, PING H W, YANG X, et al. Comparison of hydrocarbon generation, expulsion periods, and accumulation periods of source rocks in Member 7 of the Yanchang Formation in the Jinghe oilfield, southern Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 108-121. (in Chinese)
- [28] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 用显微镜和拉曼光谱研究四川盆地高科1井、五科1井、普光5井、普光3井高密度甲烷包裹体特征与天然气成因[J]. 地球化学, 2023, 52(6): 673-684.
LIU D H, XIAO X M, TIAN H, et al. Study on the characteristics of high-density methane inclusions and the origin of natural gas in well Gaoke 1, well Wuke 1, well Puguang 5, and well Puguang 3 in the Sichuan Basin by microscopy and laser Raman spectroscopy[J]. Geochimica, 2023, 52(6): 673-684. (in Chinese)
- [29] 赵必强. 琼东南盆地天然气运聚成藏规律研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2006.
ZHAO B Q. Migration and accumulation patterns of natural gases in the Qiongdongnan Basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [30] 解巧明. 包裹体热力学与数值模拟恢复出的古流体压力及对油气成藏的影响: 以准噶尔盆地南缘呼图壁-阜康地区为例[D]. 西安: 西北大学, 2018.
XIE Q M. Paleo-fluid pressure restored by ways of fluid inclusions thermodynamics and numerical simulation and its effects on hydrocarbon accumulation in: A case study of Hutubi-Fukang area, the southern margin of Junggar Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018. (in Chinese)
- [31] 沈传波, 葛翔, 吴阳, 等. 盆地断层活动定年技术进展及发展趋势[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 735-748.
SHEN C B, GE X, WU Y, et al. Progress and development trends of fault activities dating technologies in basins[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 735-748. (in Chinese)
- [32] 陈家旭. 四川盆地中部和东部震旦系灯影组储层流体演化与油气成藏[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
CHEN J X. Fluid evolution and hydrocarbon accumulation processes of the Sinian Dengying Formation in the central and eastern Sichuan Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023. (in Chinese)
- [33] 马剑, 赵静, 郭娟, 等. 莺歌海盆地乐东10-1区黄流组储层流体包裹体特征及油气成藏期次分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12382-12390.
MA J, ZHAO J, GUO J, et al. Characteristics of fluid inclusion and periods of hydrocarbon accumulation of the Huangliu Formation in the Ledong10-1 area, Yinggehai Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12382-12390. (in Chinese)
- [34] 张佳琦, 赵靖舟, 李军, 等. 鄂尔多斯盆地东南部大宁-吉县区块上古生界盒8段流体包裹体特征及成藏意义[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(3): 34-41+142.
ZHANG J Q, ZHAO J Z, LI J, et al. Characteristic of fluid inclusions in upper Paleozoic He 8 member of Daning-Jixian block, southeastern Ordos Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2024, 39(3): 34-41+142. (in Chinese)
- [35] 李智, 林会喜, 李双建, 等. 川西地区雷口坡组储层流体包裹体特征与成藏期次[J]. 地质科学, 2024, 59(3): 781-791.
LI Z, LIN H X, LI S J, et al. Characteristics of fluid inclusions and hydrocarbon accumulation periods of Leikoupo Formation in western Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(3): 781-791. (in Chinese)

- [36] 禹江. 流体包裹体岩相学研究对成岩成矿的地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(S1): 64.
YU J. Geologic significance of petrographic studies of fluid inclusions for diagenesis and mineralization[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(S1): 64. (in Chinese)
- [37] 李林豪, 范存辉, 赵圣贤, 等. 四川盆地天宫堂地区下志留统龙马溪组天然裂缝特征及形成期次[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 472-482.
LI L H, FAN C H, ZHAO S X, et al. Characteristics and formation stages of natural fractures in Lower Silurian Longmaxi Formation in Tiangongtang area of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 472-482. (in Chinese)
- [38] 李天军, 陈聪, 张玺华, 等. 川西北下二叠统茅口组古构造演化与控藏作用[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 467-477.
LI T J, CHEN C, ZHANG X H, et al. Evolution of the paleostructure and its control on gas reservoir of Lower Permian Maokou Formation in northwest Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(3): 467-477. (in Chinese)
- [39] 吴小力, 李荣西, 李纯泉, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系储层流体包裹体特征及油气成藏史[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 740-748.
WU X L, LI R X, LI C Q, et al. Characteristics of fluid inclusions and hydrocarbon accumulation history in Ordovician reservoir of Yubei area, Tarim Basin[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2017, 53(6): 740-748. (in Chinese)
- [40] 刘志涛, 张晓磊, 田亚铭, 等. 鄂尔多斯盆地马岭-乔川地区长6油层组油藏分布特征及控制因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 379-391.
LIU Z T, ZHANG X L, TIAN Y M, et al. Distribution of oil reservoirs and factors controlling them in Chang-6 oil layer in Maling-Qiaochuan area of Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2024, 51(3): 379-391. (in Chinese)
- [41] 李勇霖, 倪智勇, 李晓光, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区断控气藏差异[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 773-783.
LI Y L, NI Z Y, LI X G, et al. Difference of fault-controlled gas reservoir in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(3): 773-783. (in Chinese)
- [42] 张洪瑞, 刘华, 韩载华, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷三工河组流体包裹体特征与成藏期压力恢复[J]. 地球科学, 2024, 49(7): 2420-2433.
ZHANG H R, LIU H, HAN Z H, et al. Characteristics of fluid inclusions and pressure recovery during hydrocarbon accumulation period in Jurassic Sangonghe Formation in Fukang Sag, Junggar Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(7): 2420-2433. (in Chinese)
- [43] 胡凯, WILKINS R W T. 激光拉曼光谱碳质地温计: 一种新的古地温测试方法[J]. 科学通报, 1992, 37(14): 1302-1305.
HU K, WILKINS R W T. Laser Raman spectroscopy carbonaceous geothermometer: A new method for paleogeothermal testing[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(14): 1302-1305. (in Chinese)
- [44] KELEMEN S R, FANG H L. Maturity trends in Raman spectra from kerogen and coal[J]. Energy & Fuels, 2001, 15(3): 653-658.
- [45] 段菁春, 庄新国, 何谋春. 不同变质程度煤的激光拉曼光谱特征[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 65-68.
DUAN J C, ZHUANG X G, HE M C. Characteristics in laser Raman spectrum of different ranks of coal[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(2): 65-68. (in Chinese)
- [46] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1228-1241.
LIU D H, XIAO X M, TIAN H, et al. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: Methodology and geological applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1228-1241. (in Chinese)
- [47] 陈更生, 石学文, 刘勇, 等. 四川盆地南部地区五峰组-龙马溪组深层页岩气富集控制因素新认识[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 58-71.
CHEN G S, SHI X W, LIU Y, et al. New understandings of the factors controlling of deep shale gas enrichment in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation of the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 58-71. (in Chinese)
- [48] 罗京. 四川盆地东南部下组合多期流体活动与油气成藏过程研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
LUO J. Multi-stage fluid activities and processes of hydrocarbon accumulation in Sinian and Lower Palaeozoic in southeast part of Sichuan Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022. (in Chinese)
- [49] 黄亚浩, 薛一帆, 文志刚, 等. 高温高压条件下单一CO₂体系的傅里叶红外光谱定量模型及天然包裹体应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(8): 2256-2261.
HUANG Y H, XUE Y F, WEN Z G, et al. Quantitative Fourier infrared spectroscopy model of a single CO₂ system under high temperature and pressure and its application to natural inclusions[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(8): 2256-

2261. (in Chinese)
- [50] 陈彦鄂, 张志荣, GREENWOOD P. 油气包裹体分子组成的热释-色谱-质谱分析[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 915-920.
CHEN Y E, ZHANG Z R, GREENWOOD P. Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry analyses of oil-bearing fluid inclusions composition[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 915-920. (in Chinese)
- [51] STASIUK L D, SNOWDON L R. Fluorescence micro-spectrometry of synthetic and natural hydrocarbon fluid inclusions: Crude oil chemistry, density and application to petroleum migration[J]. Applied Geochemistry, 1997, 12(3): 229-241.
- [52] GEORGE S C, RUBLE T E, 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(4): 451-473.
- [53] 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 H H. Microspectrofluorimetric characterization and thermal maturity assessment of individual oil inclusion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 584-590. (in Chinese)
- [54] 徐勤琪, 储呈林, 郭小文, 等. 塔河油田盐下地区原油地球化学特征及不同期次油气成藏贡献[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 111-123.
XU Q Q, CHU C L, GUO X W, et al. Geochemical characteristics of crude oil and contributions to hydrocarbon accumulation in multiple stages in Tahe subsalt area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 111-123. (in Chinese)
- [55] 吴小力, 徐旺林, 李荣西, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组硫化氢成因: 来自流体包裹体的证据[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 250-261.
WU X L, XU W L, LI R X, et al. Genesis of hydrogen sulfide in Ordovician Majiagou Formation, mid-eastern Ordos Basin: Evidence from fluid inclusions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 250-261. (in Chinese)
- [56] 吴宇辰, 刘一锋, 金爱民, 等. 东濮凹陷北部文留地区沙河街组地层水演化与油气成藏模式[J]. 地球科学, 2024, 49(1): 140-154.
WU Y C, LIU Y F, JIN A M, et al. Formation water evolution and hydrocarbon accumulation model of Shahejie Formation in Wenliu area, northern Dongpu depression[J]. Earth Science, 2024, 49(1): 140-154. (in Chinese)
- [57] 陶士振, 米敬奎, 高晓辉, 等. 四川盆地上三叠统须家河组流体包裹体地球化学[J]. 矿物学报, 2013(S2): 492-493.
TAO S Z, MI J K, GAO X H, et al. Geochemistry of fluid inclusions in the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013(S2): 492-493. (in Chinese)
- [58] 陶士振, 杨怡青, 高建荣, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩气及伴生氦气形成演化特征[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 551-565.
TAO S Z, YANG Y Q, GAO J R, et al. The formation and evolution characteristics of tight sandstone gas and associated helium in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 551-565. (in Chinese)
- [59] 薛一帆, 文志刚, 黄亚浩, 等. 深层-超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究: 以塔里木盆地富满油田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 549-559.
XUE Y F, WEN Z G, HUANG Y H, et al. Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone: A case study of Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 549-559. (in Chinese)
- [60] 曹青, 赵靖舟, 赵小会, 等. 鄂尔多斯盆地宜川-黄陵地区马家沟组流体包裹体特征及其意义[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 819-828.
CAO Q, ZHAO J Z, ZHAO X H, et al. Characteristics and significance of fluid inclusions from Majiagou Formation, Yichuan-Huangling area, Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 819-828. (in Chinese)
- [61] 李军, 胡东风, 邹华耀, 等. 四川盆地元坝-通南巴地区须家河组致密砂岩储层成岩-成藏耦合关系[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1164-1178.
LI J, HU D F, ZOU H Y, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and gas accumulation in Xujiahe Formation of Yuanba-Tongnanba area, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1164-1178. (in Chinese)
- [62] 廖响, 徐昉昊, 徐国盛, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带K区平湖组-花港组油气成藏主控因素及成藏模式[J]. 矿物岩石, 2024, 44(4): 138-150.
LIAO X, XU F H, XU G S, et al. Main controls and hydrocarbon accumulation model of the Pinghu Formation-Huagang Formation in area K of the Xihu Sag Pinghu slope zone[J]. Mineralogy and Petrology, 2024, 44(4): 138-150. (in Chinese)
- [63] 杨海军, 石万忠, 杜浩, 等. 库车坳陷博孜-大北地区油气充注期次、成熟度及其对构造圈闭形成时序的指示[J]. 石油学报, 2024, 45(10): 1480-1491.

- YANG H J, SHI W Z, DU H, et al. Hydrocarbon charging periods and maturities in Bozi-Dabei area of Kuqa depression and their indications to the structural trap sequence[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(10): 1480-1491. (in Chinese)
- [64] 李晓光,倪智勇,宋到福,等. 杭锦旗地区二叠系储层油气成藏期次及流体势特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(4): 1110-1123.
- LI X G, NI Z Y, SONG D F, et al. Hydrocarbon accumulation stages and fluid potential characteristics of Permian Reservoirs in Hangjinqi area[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2024, 54(4): 1110-1123. (in Chinese)
- [65] 李超,罗涛,黄亚浩,等. 苏北盆地高邮凹陷花页1井古近系阜宁组裂缝脉体流体演化及其对页岩油充注过程的指示意义[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(2): 228-237.
- LI C, LUO T, HUANG Y H, et al. Fluid evolution of fracture veins of Paleogene Funing Formation in well HY1 in Subei Basin and implications for shale oil filling[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(2): 228-237. (in Chinese)
- [66] 刘昭茜,梅廉夫,邱华宁,等. 中扬子地块南缘半坑古油藏成藏期及破坏期的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束[J]. *科学通报*, 2011, 56(33): 2782-2790.
- LIU Z Q, MEI L F, QIU H N, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology constraints on hydrocarbon accumulation and destruction periods in the Bankeng paleoreservoir in the southern margin of the middle Yangtze block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(33): 2782-2790. (in Chinese)
- [67] 邱华宁,戴檀谟. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定矿物流体包裹体年龄[J]. *科学通报*, 1989(9): 687-689.
- QIU H N, DAI T M. Age determination of mineral fluid inclusions by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989(9): 687-689. (in Chinese)
- [68] 邱华宁. 流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 计时技术及其矿床定年应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1999, 18(2): 71-78.
- QIU H N. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ technique for dating the fluid inclusions by crushing in vacuum and its developing applications on determining the mineralizing ages of the ore deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1999, 18(2): 71-78. (in Chinese)
- [69] QIU H N, WU H Y, YUN J B, et al. High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the gas emplacement into the Songliao Basin[J]. *Geology*, 2011, 39(5): 451-454.
- [70] 冯子辉,任延广,王成,等. 松辽盆地深层火山岩储层包裹体及天然气成藏期研究[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(6): 436-442.
- FENG Z H, REN Y G, WANG C, et al. Study on inclusion of deep buried igneous reservoir and forming period of gas pool in Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(6): 436-442. (in Chinese)
- [71] EADINGTON P J, LISK M, KRIEGER F W. Identifying oil well sites: United States patent 5543616[P]. 1996-08-06.
- [72] 陈哲龙,柳广弟,卢学军,等. 应用流体包裹体研究储层油气充注特征:以二连盆地为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(1): 60-70.
- CHEN Z L, LIU G D, LU X J, et al. Using fluid inclusions to study hydrocarbon charging characteristics of reservoirs: A case study from Erlian Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(1): 60-70. (in Chinese)
- [73] ZHANG N, PAN W L, TIAN L, et al. Using a modified GOI index (effective grid containing oil inclusions) to indicate oil zones in carbonate reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2015, 89(3): 902-910.

责任编辑:岳荣强