

基于包裹体 PVT_x 数值模拟恢复油藏古温压

——存在的问题、对策及应用实例

席斌斌^{1,2,3}, 蒋宏^{1,2,3}, 许锦^{1,2,3}, 陈强路^{1,2,3}, 尤东华^{1,2,3}

(1. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:包裹体 PVT_x 数值模拟是恢复油藏古温压的重要手段。由于无法精确地确定油包裹体的组成, 以及油包裹体成分在地质演化过程中可能发生不可逆的次生变化, 现有方法恢复的古温压存在不确定性。一般而言, 与油包裹体伴生的盐水包裹体成分相对简单, 且遭受次生蚀变影响的概率较低。因此, 尝试将伴生的盐水包裹体作为独立的地质压力计在塔里木盆地顺南地区 SN1 井进行了应用研究。包裹体岩相学研究显示, SN1 井高角度裂缝充填的方解石中, 发育大量遭受过次生蚀变的含沥青包包裹体及伴生的盐水包裹体。包裹体古温压恢复显示, 伴生的盐水包裹体呈现异常高的均一温度(超过 170 °C), 均一压力波动范围大, 且存在异常高压(39.1 MPa 起, 甚至超过 165.8 MPa)。上述现象可能与热流体活动和原油充注后所经历的裂解增压过程有关。基于盐水包裹体均一压力的最低值, 结合该地区埋藏史和热演化史分析, 推测热液活动时间为海西期。上述认识与该地区 NE 向走滑断裂活动具有较好的时空匹配关系。综上所述, 油包裹体伴生的盐水包裹体作为独立的地质压力计, 可以用来恢复油藏古温压的演化轨迹, 并限定古流体活动的时间, 能够在一定程度上弥补现有方法的不足。

关键词: 含甲烷盐水包裹体; 古温度; 古压力; PVT_x 模拟; 顺南地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE135

文献标识码: A

Reconstruction of paleo-temperature and pressure of oil reservoirs based on PVT_x simulation: problems, strategies and case studies

XI Binbin^{1,2,3}, JIANG Hong^{1,2,3}, XU Jin^{1,2,3}, CHEN Qianglu^{1,2,3}, YOU Donghua^{1,2,3}

(1. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The PVT_x simulation of fluid inclusions is a valuable method for the reconstruction of paleo-temperature and pressure of oil reservoir. Since the accurate composition of oil-bearing inclusion is very difficult to be obtained and the composition may be altered during secondary alteration processes, it may cause uncorrected results. Compared to oil-bearing inclusion, the composition of accompanied aqueous inclusion is relatively simple and could hardly be affected during secondary alteration processions. As a result, accompanied aqueous inclusions were applied to reconstruct the paleo-temperature and pressure of well SN 1 in the South Shuntuoguole area of Tarim Basin. Gas-oil-bitumen bearing inclusions and aqueous inclusions are co-existed in calcite veins of well SN 1. The homogenization temperatures of aqueous inclusions were higher than 170 °C, and the homogenization pressure of aqueous inclusions is significantly fluctuating from 39.1 MPa to over 165.8 MPa. The unusually high homogenization temperature of aqueous inclusions may be caused by hydrothermal fluid activity while the fluctuation of homogenization pressure of aqueous inclusions may be caused by oil cracking. The lowest homogenization pressure of aqueous inclusion was applied to determine the charge time of hydrothermal fluid, which is Hercynian. The charging time of hydrothermal fluid is in accordance with the active time of NE-trending strike-slip faults in the South Shuntuoguole area. Thus, the co-existing

收稿日期: 2021-05-07; 修订日期: 2021-07-29。

作者简介: 席斌斌(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事流体包裹体地质学研究。E-mail: xibb.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金委员会企业创新发展联合基金集成项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(U19B6003)和中国石化基础前瞻课题“深部碳酸盐岩储层地质作用机理及定量表征关键技术研究”(JC-2020-KT002-3)。

aqueous inclusions potentially can be applied to reconstruct the paleo-temperature and pressure of oil reservoir to make up the deficiency of present methods.

Key words: CH₄-bearing aqueous inclusion; paleo-temperature; paleo-pressure; PVTx simulation; South Shuntuo area; Tarim Basin

恢复油气藏的流体古温压是确定油气成藏期次、反演油气演化过程研究的重要内容。流体包裹体 PVTx 数值模拟可以恢复其捕获时地层流体的温压条件,是研究油气藏古温压的重要手段之一^[1-8]。由于难以获取油气包裹体的精确组成^[9],油气包裹体古温压的恢复存在较大困难。为了解决上述问题,APLIN 等^[1]提出了利用油气包裹体均一温度、气液比以及假定的初始组分迭代计算获取油气包裹体等容线,进而与伴生盐水包裹体均一温度相交获取油气包裹体捕获温度、压力的方法。THIERY 等^[2,10]在 APLIN 等^[1]计算模型的基础上,简化了油气包裹体初始成分的表达方式,提出了利用 α (C₁₀₊组分的分布及含量)、 β (甲烷含量)两个组分参数替代油气包裹体初始成分进行古温压恢复的方法。上述两种方法提出后,在北海^[10-14]、塔里木盆地^[3]等多个地区进行了应用,在重建油气藏 PVT 演化史研究方面起到了重要作用。

尽管如此,由于现有技术存在无法精确地获取油包裹体组成,且油包裹体捕获后可能发生次生变化等问题,造成上述方法所获取的油包裹体等容线的准确性及适用性难以满足研究需要^[9,15-16]。与油包裹体相比,伴生的盐水包裹体成分简单,可以利用显微测温、拉曼光谱等手段进行限定。尤其是近年来激光拉曼在包裹体定量分析研究中的持续发展,使测定盐水包裹体中微量甲烷含量成为可能^[17-20]。因此,一些学者将含甲烷盐水包裹体做为独立的地质压力计,并应用于气藏古温压恢复研究,取得了一系列较为理想的应用效果^[21-24]。

然而,含甲烷盐水包裹体能否作为独立的地质

压力计应用于油藏古温压恢复,仍需进一步研究。本文剖析了油包裹体古温压恢复方法及存在问题,并以塔里木盆地顺南地区 SN1 井样品为例,对油气包裹体伴生的盐水包裹体进行了激光拉曼成分分析,开展了 PVTx 数值模拟,以期对油藏包裹体古温压恢复提出新的研究思路。

1 原理及计算步骤

对于油—水不混溶体系而言,由于同期形成的油包裹体以及盐水包裹体捕获时处于相同的温度以及压力条件,因此二者等容线的交点即为捕获温度(T_i)和捕获压力(P_i)^[1,25-26]。PIRONON^[26]总结了油—水包裹体等容线相交的三种情况:(1)包裹体捕获时,水溶液和原油中的气体处于不饱和状态, T_i 和 P_i 为两类包裹体在液相区等容线的交点(图 1a)。在这种情况下,油包裹体和盐水包裹体的均一温度(T_h)和均一压力(P_h)要低于 T_i 和 P_i ;(2)包裹体捕获时,水溶液和原油中的气体处于气体饱和状态,包裹体等容线的交点与“泡点曲线”的交点重合(图 1b)。此时,油包裹体和盐水包裹体的 T_h 和 P_h 等于 T_i 和 P_i 。气藏中包裹体捕获时与此种情况类似,只不过与水溶液伴生的是天然气而非原油;(3)包裹体捕获时,水溶液中的气体处于饱和状态而原油中的气体处于不饱和状态,包裹体等容线的交点与盐水包裹体泡点曲线重合(图 1c)。在上述情况下,油包裹体的 T_h 和 P_h 要低于 T_i 和 P_i ,而盐水包裹体的 T_h 和 P_h 等于 T_i 和 P_i 。

如前文所述,油包裹体古温压恢复方法的关键是获取两类包裹体的 T_h 、 P_h 以及其等容线。对于

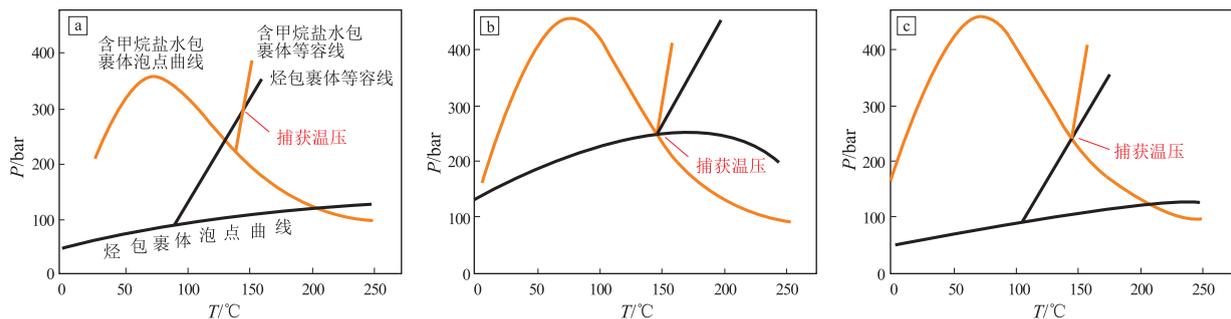


图1 油包裹体与盐水包裹体等容线相交图

据文献[26],有修改。

Fig.1 Intersection of isochors of co-existing petroleum and aqueous inclusions

油包裹体而言,一般采用 APLIN 等^[1]或 THIERY 等^[2,10]的方法进行求解,即利用激光共聚焦扫描显微镜以及包裹体冷热台,分别测定油包裹体在室温下的气液比(F_v)以及 T_h ,给定油包裹体的初始成分或 α 、 β 值,结合 VTfinc 或 PIT (FIT-Oil) 软件进行热力学计算,获得油包裹体的 P_h 以及等容线。对于盐水溶液包裹体而言,一般近似地看作 H_2O -NaCl 体系,利用包裹体冷热台测定的 T_h 以及冰点温度(T_{ice}),结合 Fincor 或 Fluids 软件计算获得盐水包裹体的 P_h 以及等容线。

2 存在的问题

油气包裹体古温压恢复是利用可获得的热力学参数进行热力学计算的过程,因此所获取的参数是否准确将直接影响计算结果的准确性。目前进行油气包裹体古温压恢复所用到的参数主要包括包裹体的均一温度、冰点温度、气液比以及组成。均一温度以及冰点温度的测试相对成熟,能够获得准确的数据。虽然应用激光共聚焦测定的油气包裹体气液比可能会受包裹体形状、大小等影响,但是在选择合适的包裹体以及图像处理方法的前提下,还是可以获得比较满意的结果的^[27]。

包裹体的组成是限定包裹体等容线、泡点曲线等的关键参数之一,由于受测试手段的限制,现有的方法仍然采用“假定成分”来代替油包裹体的真实成分,这就使得获得的等容线可能存在一定的误差。光谱实验分析以及热力学模拟结果均证实在地层温压,尤其是高温高压条件下原油中可能会溶解一定数量的水(图2)。显然,溶解

态水的存在亦可能会对油包裹体等容线的斜率造成影响^[15,28-29]。

随着我国油气勘探向深层拓展,以顺北油气田为代表的(超)深层油气藏逐渐被揭示。在深层高温高压条件下,早期捕获的油气包裹体因热裂解等而导致其成分发生不可逆的次生变化^[16],造成现有的油藏包裹体古温压恢复方法无法应用。

相对于油包裹体而言,与其伴生的盐水包裹体成分简单,主要由水、NaCl 等电解质以及少量的 CH_4 等挥发分组成^[9]。尽管如此,如果在计算盐水包裹体等容线时忽略了水溶液中溶解的微量甲烷,也会产生较大的误差^[17-18]。

3 油藏古温压恢复的对策

如图 1 所示,对于第二以及第三种情况而言,伴生盐水包裹体的均一温度以及均一压力即为捕获压力,因此伴生盐水包裹体可以作为独立的地质压力计恢复捕获温压。对于第一种情况而言,伴生盐水包裹体的均一温度以及均一压力要小于捕获温度以及捕获压力,虽然不能单独利用伴生盐水包裹体恢复捕获温压,但是仍然可以用以限定最低捕获温压值^[1]。

如前文所述,获得伴生盐水包裹体溶解的微量的 CH_4 含量是准确恢复其均一压力的关键。伴生盐水包裹体中 CH_4 含量的定量分析方法主要有两种:一是直接分析法,即冷热台测温与激光拉曼原位分析相结合,在包裹体均一时收集甲烷以及水的拉曼光谱,求得甲烷与水的拉曼峰面积比值($I(CH_4)/I(H_2O)$)。然后,根据 $I(CH_4)/I(H_2O)$ 、NaCl 含量以及 CH_4 含量的关系式(或标准曲线)求得包裹体中 CH_4 的含量^[17-18];二是间接分析法,即在室温下获得盐水包裹体气泡中 CH_4 的拉曼位移,再根据甲烷拉曼位移与压力的关系式(或标准曲线)求得室温下包裹体内压,最后结合包裹体盐度以及均一温度,利用状态方程计算得到包裹体中甲烷的含量^[20-24,30]。上述两种方法各有优缺点,从测定实验数据的难易程度来看,第二种方法要优于第一种方法。因为均一条件下 CH_4 以溶解态分布在整个包裹体中,而室温条件下甲烷集中在包裹体的气泡中,显然光斑作用在气泡上更容易检测出包裹体中甲烷的信号。需要指出的是,在甲烷含量相对较低以及矿物本底干扰较强的情况下,第一种方法甚至无法获取甲烷的拉曼信号(图 3)。从建立标准曲线的难易程度来看,第二种方法也要优于第一种方法。因为第一种方法的标准曲线需要同时

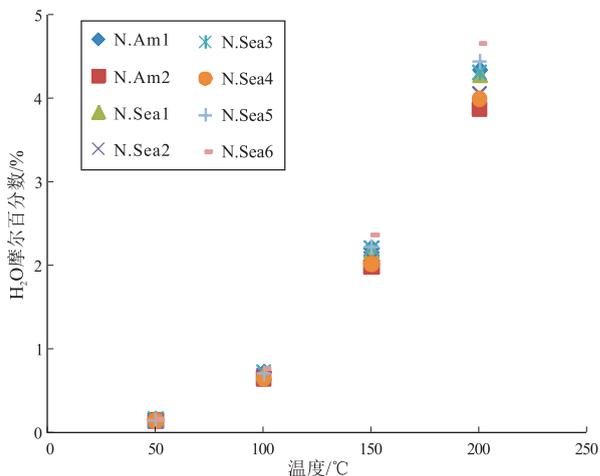


图 2 不同温压条件下原油中水的溶解度变化
原油组分来源于文献[1]。

Fig.2 Solubility of water in oil at different temperatures and pressures

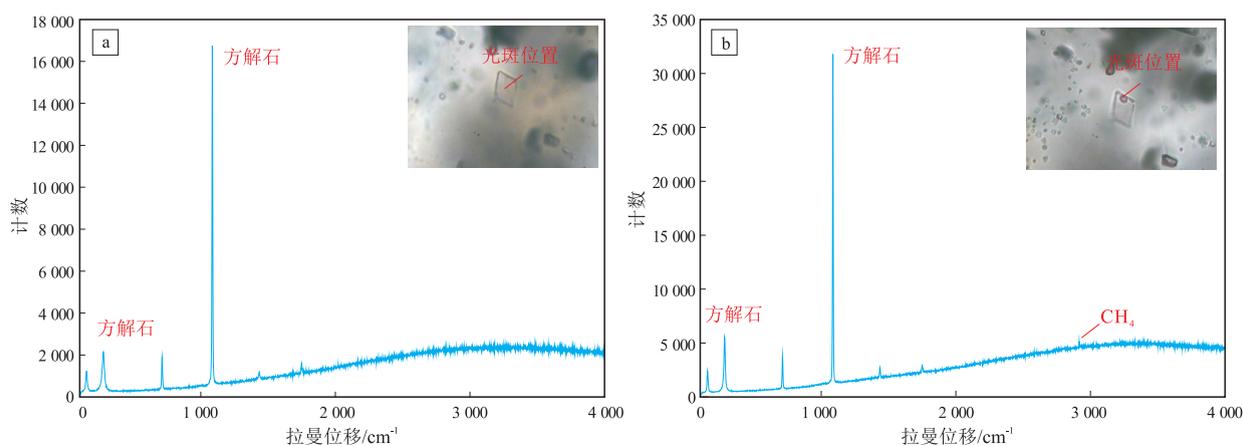


图3 室温及均一温度条件下四川盆地普光5井方解石中含 CH_4 盐水包裹体拉曼光谱
a.均一温度条件下拉曼光谱,未检出 CH_4 拉曼峰;b.室温下拉曼光谱,气泡中可以检出 CH_4 拉曼峰

Fig.3 Raman spectra of CH_4 -bearing aqueous inclusions under ambient temperature and homogenization temperature in calcite veins of well Puguang 5, Sichuan Basin

考虑温度、压力以及盐度对甲烷拉曼峰面积的影响,因此需要建立多条标准曲线并且需要进行外推。而第二种方法只需要考虑压力的影响,不需要考虑温度以及盐度的变化。从最终获取 CH_4 含量的计算过程的复杂程度来看,第一种方法要优于第二种方法,因为将 $I(\text{CH}_4)/I(\text{H}_2\text{O})$ 代入 $I(\text{CH}_4)/I(\text{H}_2\text{O})$ 、 NaCl 含量以及 CH_4 含量的关系式,便可以直接获得包裹体中的 CH_4 含量,而第二种方法还需要进行复杂的热力学计算,才能获得包裹体中 CH_4 的含量,一般需要借助计算机编程对上述计算过程实现程序化处理^[31]。在收集包裹体的拉曼光谱时,油气包裹体主要的寄主矿物方解石通常具有较高的背景值,并且沉积盆地中捕获的盐水包裹体中甲烷含量一般较低,因此,笔者认为第二种方法更适合于与油包裹体伴生的盐水包裹体中 CH_4 含量的测定。

在测定了伴生盐水包裹体中 CH_4 的含量之后,结合测得的均一温度以及冰点温度,便可以利用DUAN等^[32]的 CH_4 - H_2O - NaCl 体系的状态方程,计算得到伴生盐水包裹体的均一温度以及均一压力,即(最低)捕获温压^[20]。

4 应用实例

本次研究选取塔里木盆地顺南地区SN1井为例进行应用研究。该井位于顺托果勒低隆南部的顺南斜坡,为顺托低隆与古城墟隆起之间的过渡带,其西南以塔中I号断裂带为界,东北与满加尔坳陷相邻。该地区处于塔里木盆地相对稳定的古构造单元,褶皱变形弱,寒武系—古近系发育齐全^[33-35]。寒武系玉尔吐斯组泥质烃源岩、中下奥

陶统鹰山组—中奥陶统一间房组碳酸盐岩与巨厚(3 000 m左右)的上奥陶统却尔却克组泥岩形成良好的“源—储—盖”匹配关系。顺南地区以产出天然气为主,干燥系数较高,在0.95以上,呈现典型的过成熟干气属性^[36]。在部分钻井中可见少量凝析油,原油地化分析检测出高金刚烷含量以及完整的低聚硫代金刚烷系列,指示其可能经历了极强的原油裂解作用以及中等强度的TSR反应^[37]。

镜下观察发现,SN1井一间房组岩心以泥晶灰岩为主,发育少量高角度(与层面夹角为 $70^\circ \sim 85^\circ$)裂缝,缝宽在0.5~5 mm之间,多被方解石全充填(图4a)。在高角度裂缝发育附近部位可见基质灰岩被柱状石英交代的现象(图4b-c),上述现象被认为是灰岩遭受热液改造的标志^[38-40]。在高角度裂缝充填的方解石中,包裹体较发育,以气液两相盐水包裹体以及含沥青烃包裹体为主,二者多伴生分布(图4d-i),推测为同期捕获的产物。气液两相盐水包裹体在透射光下为无色,气液比在15%左右,室温下气泡的激光拉曼光谱可见尖锐的 CH_4 峰(图5a-b)。含沥青烃包裹体在透射光下为无色—浅褐色,液态烃在荧光下发蓝绿色荧光。沥青呈团块状或沿包裹体壁分布,透射光下呈黑色,不发荧光。拉曼光谱分析显示,沥青的拉曼光谱呈典型的“D—G”以及“D’—G’”双峰形态(图5c-d)^[41-43]。

前人研究^[16]表明,烃包裹体中的沥青主要有两种成因:一种为“偶然捕获”成因,即包裹体捕获时沥青已经存在,沥青以“杂质”的形式与烃类一起捕获;另一种为热演化成因,即包裹体捕获时并不含有沥青,捕获同时或捕获后受后期埋深、热流体活动等热事件的影响,包裹体内的烃类发生热裂

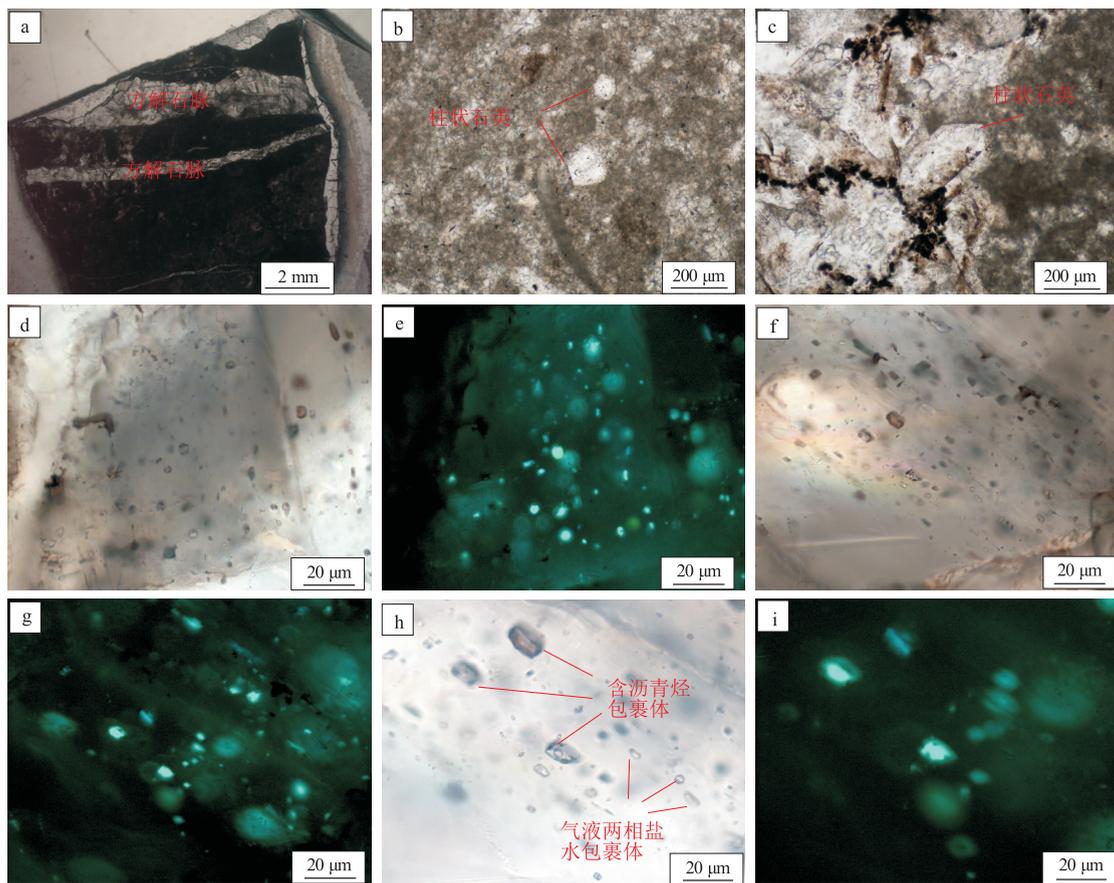


图 4 塔里木盆地顺南地区 SN1 井奥陶系储层包裹体照片

a.样品中发育方解石脉;b,c.样品中发育柱状石英;d,f,h.方解石脉中发育含沥青烃包裹体以及伴生的气液两相盐水包裹体;e,g,i 分别为 d,f,h 对应的荧光照片

Fig.4 Micro-photographs of fluid inclusions in Ordovician reservoirs in well SN 1, South Shuntuoguole area, Tarim Basin

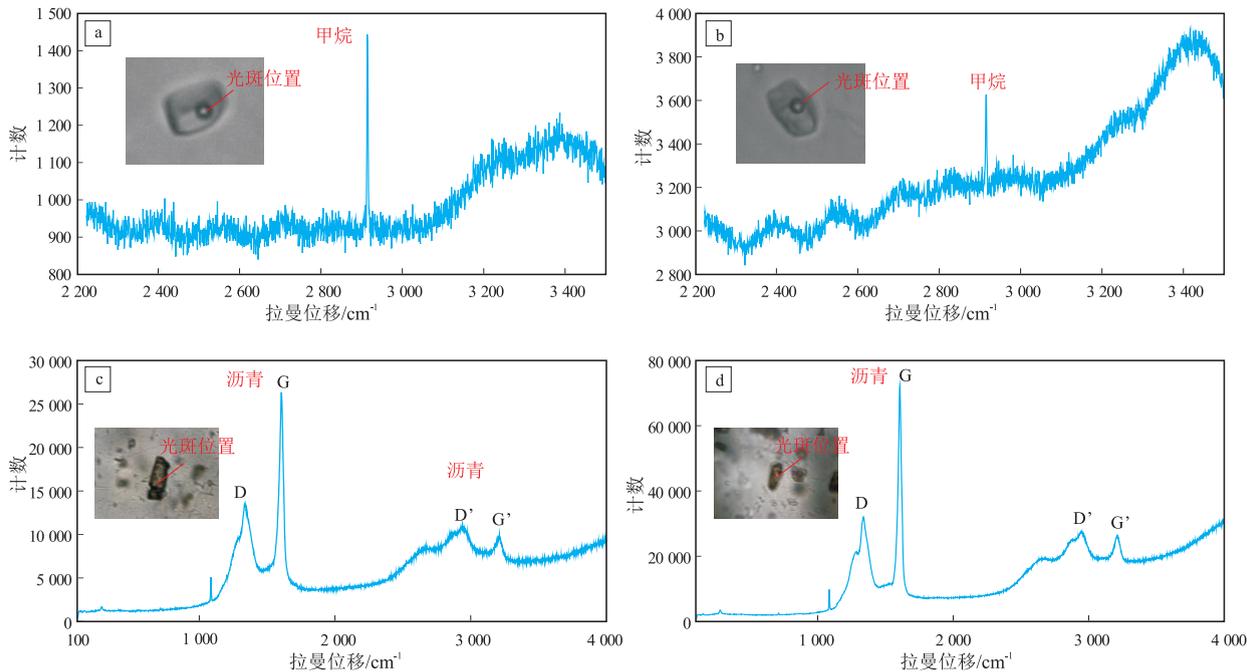


图 5 含沥青烃包裹体以及气液两相盐水包裹体拉曼光谱

a,b.气液两相盐水包裹体中气泡的拉曼光谱;c,d.含沥青烃包裹体的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra of two-phase aqueous inclusions and gas-oil-bitumen bearing inclusions

解而生成的沥青。第一种情况捕获的沥青,在同一期包裹体中随机分布,甚至可见纯沥青包裹体与不含沥青的包裹体伴生的现象。第二种情况生成的沥青,在同一期包裹体中均有发育。SN1 井几乎每个含烃包裹体中都含有沥青(图 4d-i),推测含沥青烃包裹体中的沥青应为第二种成因。

由于 SN1 井含沥青烃包裹体遭受了次生蚀变,其组成已不能代表捕获时的状态,因此本次研究选取与上述含沥青烃包裹体伴生的气液两相盐水包裹体进行古温压恢复。包裹体均一温度以及冰点温度测定采用英国 Linkam 公司生产的 MDSG600 型地质冷热台与德国蔡司公司生产的 Axioskop40 型偏光/荧光显微镜组成的显微测温系统完成。激光拉曼分析采用日本 Horiba LabRam HR Evolution 型显微共焦快速扫描成像拉曼光谱仪,激光波长为 532 nm,源激光功率为 100 mW,样品表面激光功率控制在小于 1 mW,狭缝为 50 μm,光栅为 600 g/mm,曝光时间为 10 s,采谱范围为 100~4 000 cm⁻¹。在收集盐水包裹体气泡中 CH₄ 的拉曼信号同时,采集氙灯的拉曼信号作为内标,对 CH₄ 的拉曼位移进行标定。室温下,CH₄ 拉曼位移与压力的关系根据席斌斌等^[19-24,26-44]的方法进行标定。

包裹体均一温度测试表明,有超过半数的气液两相盐水包裹体在均一前(约 180 °C)发生了爆裂,只有少数包裹体能够成功测定均一温度,其分布范围为 170~185 °C(表 1)。包裹体内外压差过

大是造成测温过程中包裹体发生爆裂的主要原因^[45-46],SN1 井包裹体爆裂现象普遍,说明包裹体捕获时可能存在较高的压力。本次研究利用“间接分析法”对上述盐水包裹体中甲烷的含量以及均一压力进行了计算,结果表明未发生爆裂的盐水包裹体均一压力分布范围为 39.1~109.4 MPa,而发生爆裂的盐水包裹体最大均一压力超过 165.8 MPa(表 1)。

综上所述,SN1 井伴生盐水包裹体呈现出高温高压以及压力波动大的特征。对比该地区热埋藏史^[16]发现,上述包裹体的均一温度已超过该地区所经历的最高古地温(~165 °C)。除此之外,在裂缝附近的基质灰岩中发现了热液改造的标志矿物(柱状石英),说明热流体活动可能是造成包裹体均一温度异常高的主要原因。除捕获时地层流体压力波动外,包裹体捕获后遭受的再平衡改造过程,亦可能造成同期捕获的包裹体的均一压力存在较大的波动范围^[47-48]。本次研究有超过一半的包裹体受爆裂的影响而无法获得准确的均一温度,因此无法严格地用“同一包裹体组合(FIA)中,90%的均一温度数据的差别在 10~15 °C 以内,是包裹体未发生再平衡改造的强力证据^[47]”的标准来判识包裹体是否经受了再平衡改造过程,但是未爆裂的包裹体均一温度分布范围符合未发生再平衡改造判识标准,以及同一包裹体组合中未爆裂的包裹体与爆裂的包裹体常常同时存在,说明 SN1 井包裹体均一压力分布范围应该是真实反映了捕获时

表 1 塔里木盆地顺南地区 SN1 井盐水包裹体古温压恢复结果

Table 1 Reconstruction of paleo-temperature and pressure of aqueous inclusions in well SN 1, South Shuntuoguole area, Tarim Basin

编号	$v_{real}^{Ne_1}/cm^{-1}$	$v_{real}^{Ne_2}/cm^{-1}$	$v_{meas}^{Ne_1}/cm^{-1}$	$v_{meas}^{Ne_2}/cm^{-1}$	$v_{meas}^{CH_4}/cm^{-1}$	$v_{corr}^{CH_4}/cm^{-1}$	$T_H/°C$	$T_{ice}/°C$	P_0/MPa	P_H/MPa	备注
10-g			2 836.58	2 933.65	2 915.73	2 916.02	182		4.86	82.1	
14-g			2 835.62	2 932.67	2 914.96	2 916.23	180		3.76	57.3	
15-g			2 835.69	2 932.70	2 915.01	2 916.24	180	-23.1	3.70	56.1	
16-g	2 836.98	2 933.92	2 836.41	2 933.47	2 915.76	2 916.23	173	-22.6	3.75	56.9	未爆裂
17-g			2 836.40	2 933.45	2 915.91	2 916.40	185		2.90	39.1	
25-g			2 835.95	2 933.02	2 914.80	2 915.72	170		6.25	109.4	
8-g			2 836.29	2 933.38	2 915.48	2 916.04			4.73	>79.3	
9-g			2 835.82	2 932.94	2 915.05	2 916.06			4.65	>77.5	
12-g			2 835.89	2 932.92	2 914.62	2 915.63			6.65	>118.3	
20-g			2 836.67	2 933.74	2 915.02	2 915.22			8.67	>149.0	
21-g	2 836.98	2 933.92	2 836.51	2 933.57	2 915.24	2 915.61	>180		6.76	>120.2	爆裂
22-g			2 836.46	2 933.53	2 914.46	2 914.87			10.07	>165.8	
23-g			2 836.25	2 933.37	2 915.44	2 916.02			4.87	>82.5	
24-g			2 836.10	2 933.17	2 914.58	2 915.35			8.07	>141.0	
26-g			2 835.78	2 932.85	2 914.55	2 915.64			6.62	>117.8	

注: $v_{real}^{Ne_1}$ 和 $v_{real}^{Ne_2}$ 为氙灯两条标准谱线的理论值,cm⁻¹; $v_{meas}^{Ne_1}$ 和 $v_{meas}^{Ne_2}$ 为氙灯两条标准谱线的实测值,cm⁻¹; $v_{meas}^{CH_4}$ 为CH₄的拉曼位移实测值,cm⁻¹; $v_{corr}^{CH_4}$ 为经氙灯校正后的CH₄的拉曼位移值,cm⁻¹; T_H 为包裹体的均一温度,°C; T_{ice} 为包裹体的冰点温度,°C; P_0 为室温下包裹体的内压,MPa; P_H 为包裹体的均一压力,

MPa。本文使用的CH₄拉曼位移的校正公式为: $v_{corr}^{CH_4} = \left(\frac{v_{real}^{Ne_1} - v_{meas}^{Ne_1}}{v_{meas}^{Ne_1} - v_{meas}^{Ne_2}} \right) \times (v_{meas}^{CH_4} - v_{meas}^{Ne_2}) + v_{real}^{Ne_2}$ 。

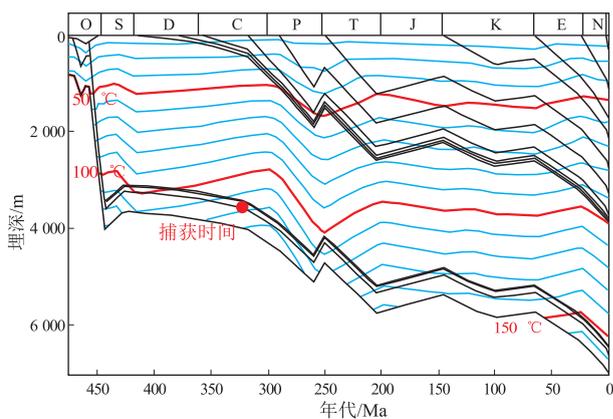


图 6 塔里木盆地顺南地区 SN1 井热液活动时间投影图
底图据文献[16]。

Fig.6 Trapping time of hydrothermal fluid in well SN 1,
South Shuntuo area, Tarim Basin

地层流体的压力波动情况。前人研究表明原油裂解成气是一个压力快速增高的过程,原油裂解的起始阶段即可形成超过 20 MPa 的超压^[49]。据 SN1 井发育大量含沥青烃包裹体以及该地区原油地化指标呈现出极强的热裂解特征^[37],推测 SN1 井原油充注后所经历的裂解增压过程可能是造成伴生盐水包裹体均一压力呈现出异常高压以及波动大的主要原因。

包裹体均一温度(或捕获温度)与热埋藏史结合是确定流体活动时间的常用手段,但是由于 SN1 井与热液活动相关的盐水包裹体均一温度超过了该地区所经历的最高古地温,因此无法直接应用上述方法确定热液活动时间。如前文所述,SN1 井盐水包裹体古压力的波动记录了原油裂解过程中压力的变化,因此表 1 中均一压力的最低值(39.1 MPa)可能最接近原油未裂解时的孔隙流体压力。本研究尝试利用上述压力最低值,按照 10 MPa/km 的静水压力梯度,换算成古埋深并投影到该地区热埋藏史图上,大致确定热液活动时间为海西期(图 6)^[16]。前人研究表明,顺南地区加里东期—海西期活动的 NE 向走滑断裂向下切穿寒武系底界,是油气及热流体运聚的主要通道^[33,50-56],上述认识与本次研究所获得的热液活动时间具有较好的时空匹配关系。

5 结论

(1) 受油包裹体组分无法精确测定以及油包裹体遭受次生蚀变后组成发生不可逆变化等因素的影响,现有的油藏包裹体古温压恢复方法所获取的油包裹体等容线的准确性及适用性存在不确定性。

(2) 与油包裹体相比,伴生盐水包裹体组成相对简单且遭受次生蚀变影响的概率较小,可以作为独立的地质压力计,应用于油藏包裹体古温压恢复,该方法尤其适用于(超)深层层系中经历了明显次生蚀变的油藏古温压恢复,能够在一定程度上弥补现有方法的不足。

(3) 塔里木盆地顺南地区 SN1 井发育遭受过次生蚀变的含沥青烃包裹体以及伴生的盐水包裹体。伴生的盐水包裹体古温压恢复结果表明 SN1 井包裹体呈现高温高压以及压力波动范围大的特点,推测原油充注后受热流体活动的影响经历了原油裂解增压的过程。

(4) SN1 井均一压力的最低值与热埋藏史图结合,大致确定了热液活动时间为海西期,上述认识与该地区 NE 向走滑断裂活动存在较好的时空匹配关系。

(5) 与油包裹体伴生的盐水包裹体可以作为独立的地质压力计用于油藏古温压恢复,具有较广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] APLIN A C, MACLEOD G, LARTER S R, et al. Combined use of confocal laser scanning microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16(2): 97-110.
- [2] THIÉRY R, PIRONON J, WALGENWITZ F, et al. PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000(69-70): 701-704.
- [3] 刘德汉, 宫色, 刘东鹰, 等. 江苏句容—黄桥地区有机包裹体形成期和捕获温度—压力的 PVTsim 模拟计算 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1435-1448.
LIU Dehan, GONG Se, LIU Dongying, et al. Investigation on the phases of organic inclusion from Gourong-Huangqiao region, Jiangsu Province, and its trapped temperature & pressure calculated by PVTsim modeling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(5): 1435-1448.
- [4] 张俊武, 邹华耀, 李平平, 等. 含烃盐水包裹体 PVT 模拟新方法及其在气藏古压力恢复中的应用 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 102-108.
ZHANG Junwu, ZOU Huayao, LI Pingping, et al. A new PVT simulation method for hydrocarbon-containing inclusions and its application to reconstructing paleo-pressure of gas reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(1): 102-108.
- [5] 张鑫, 陈汉江, 孔令涛, 等. 泌阳凹陷深凹区古流体压力演化与油气充注耦合关系 [J]. *地球科学*, 2020, 45(5): 1769-1781.
ZHANG Xin, CHEN Honghan, KONG Lingtao, et al. The coupling

- relationship between paleofluid pressure evolution and hydrocarbon-charging events in the deep of Biyang Depression, central China[J]. *Earth Science*, 2020, 45(5): 1769–1781.
- [6] 米敬奎,肖贤明,刘德汉,等.利用储层流体包裹体的 PVT 特征模拟计算天然气藏形成古压力:以鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏为例[J].*中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(7): 679–685.
- MI Jingkui, XIAO Xianming, LIU Dehan, et al. Calculation to trapping pressure of inclusions occurring in Upper Paleozoic sandstone reservoir from the Ordos Basin using PVTsim method[J]. *Science in China(Series D:Earth Science)*, 2003, 33(7): 679–685.
- [7] 胡忠良,肖贤明,黄保家.储层包裹体古压力的求取及其与成藏关系研究:琼东南盆地崖 21-1 构造实例剖析[J].*天然气工业*, 2005, 25(6): 28–31.
- HU Zhongliang, XIAO Xianming, HUANG Baojia. Acquisition of fluid inclusion paleo-pressure and its relation to reservoiring: taking Ya 21-1 structure in Qiongdongnan Basin as an example[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(6): 28–31.
- [8] 施伟军,蒋宏,席斌斌.应用储层流体包裹体 PVTx 模拟研究油气成藏期次:以塔里木盆地托甫台地区为例[J].*高校地质学报*, 2012, 18(1): 125–132.
- SHI Weijun, JIANG Hong, XI Binbin. Application of the PVTx simulation of reservoir fluid inclusions to estimate petroleum charge stages: a case study in the Tuoputai area of Tarim Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(1): 125–132.
- [9] 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 Feiyu, FENG Weiping, GUAN Jing, 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.
- [10] THIÉRY R, PIRONON J, WALGENWITZ F, et al. 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 [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(7): 847–859.
- [11] APLIN A C, LARTER S R, BIGGE M A, et al. PVTx history of the North Sea's Judy oilfield [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69–70: 641–644.
- [12] PIRONON J, BOURDET J. Petroleum and aqueous inclusions from deeply buried reservoirs: experimental simulations and consequences for overpressure estimates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(20): 4916–4928.
- [13] TSENG H Y, POTTORF R J. Fluid inclusion constraints on petroleum PVT and compositional history of the Greater Alwyn–South Brent petroleum system, northern North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(7): 797–809.
- [14] TSENG H Y, POTTORF R J. The application of fluid inclusion PVT analysis to studies of petroleum migration and reservoirs [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78–79: 433–436.
- [15] 潘立银,倪培,欧光习,等.油气包裹体在油气地质研究中的应用:概念、分类、形成机制及研究意义[J].*矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(1): 19–28.
- PAN Liyin, NI Pei, OU Guangxi, et al. Application of organic inclusion study in petroleum geology: conception, classification, formation mechanism and significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(1): 19–28.
- [16] 陈强路,席斌斌,韩俊,等.塔里木盆地顺托果勒地区超深层油藏保存及影响因素:来自流体包裹体的证据[J].*中国石油勘探*, 2020, 25(3): 121–133.
- CHEN Qianglu, XI Binbin, HAN Jun, et al. Preservation and influence factors of ultra-deep oil reservoirs in Shuntuoguole area, Tarim Basin: evidence from fluid inclusions [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 121–133.
- [17] DUBESSY J, BUSCHAERT S, LAMB W, et al. Methane-bearing aqueous fluid inclusions: Raman analysis, thermodynamic modelling and application to petroleum basins [J]. *Chemical Geology*, 2001, 173(1/3): 193–205.
- [18] GUILLAUME D, TEINTURIER S, DUBESSY J, et al. Calibration of methane analysis by Raman spectroscopy in H₂O–NaCl–CH₄ fluid inclusions [J]. *Chemical Geology*, 2003, 194(1/3): 41–49.
- [19] QIU Ye, WANG Xiaolin, LIU Xian, et al. In situ Raman spectroscopic quantification of CH₄–CO₂ mixture: application to fluid inclusions hosted in quartz veins from the Longmaxi Formation shales in Sichuan Basin, southwestern China [J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(1): 23–35.
- [20] 席斌斌,申宝剑,蒋宏,等.天然气藏中 CH₄–H₂O–NaCl 体系不混溶包裹体群捕获温压恢复及应用[J].*天然气地球科学*, 2020, 31(7): 923–930.
- XI Binbin, SHEN Baojian, JIANG Hong, et al. The trapping temperature and pressure of CH₄–H₂O–NaCl immiscible fluid inclusions and its application in natural gas reservoir [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(7): 923–930.
- [21] FALL A, EICHHUBL P, CUMELLA S P, et al. Testing the basin-centered gas accumulation model using fluid inclusion observations: southern Piceance Basin, Colorado [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(12): 2297–2318.
- [22] FALL A, EICHHUBL P, BODNAR R J, et al. Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(1/2): 61–75.
- [23] FALL A, BODNAR R J. How precisely can the temperature of a fluid event be constrained using fluid inclusions? [J]. *Economic Geology*, 2018, 113(8): 1817–1843.
- [24] 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.
- [25] LIU D H, XIAO X M, MI J K, et al. Determination of trapping pressure and temperature of petroleum inclusions using PVT simulation software: a case study of Lower Ordovician carbonates from the Lunnan Low Uplift, Tarim Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(1): 29–43.

- [26] PIRONON J. Fluid inclusions in petroleum environments; analytical procedure for PTX reconstruction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1333-1342.
- [27] 高镜涵, 陈勇, 徐兴友, 等. 激光共聚焦扫描显微镜测定烃类包裹体气液比的误差校正研究 [J]. *岩矿测试*, 2015, 34(5): 558-564.
GAO Jinghan, CHEN Yong, XU Xingyou, et al. Error correction of vapour/liquid ratio of hydrocarbon inclusions measured by confocal laser scanning microscope [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(5): 558-564.
- [28] TEINTURIER S, PIRONON J. Experimental growth of quartz in petroleum environment. Part I: Procedures and fluid trapping [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(11): 2495-2507.
- [29] PIRONON J, THIÉRY R, TEINTURIER S, et al. Water in petroleum inclusions: evidence from Raman and FT-IR measurements, PVT consequences [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 663-668.
- [30] MAO Shide, HU Jiawen, ZHANG Dehui, et al. Thermodynamic modeling of ternary $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ fluid inclusions [J]. *Chemical Geology*, 2013, 335: 128-135.
- [31] 张隽, 张家利, 席斌斌, 等. 基于 MFC 应用程序基本框架的 $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ 体系包裹体 PVTx 计算软件开发 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 385-390.
ZHANG Jun, ZHANG Jiali, XI Binbin, et al. Development of PVTx calculation software for $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ system in fluid inclusions based on Microsoft Foundation Class (MFC) program frame [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 385-390.
- [32] DUAN Zhenhao, MAO Shide. A thermodynamic model for calculating methane solubility, density and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and from 1 to 2000 bar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(13): 3369-3386.
- [33] 谷茸, 云露, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油田油气来源研究 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 248-254.
GU Rong, YUN Lu, ZHU Xiuxiang, et al. Oil and gas sources in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 248-254.
- [34] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 207-216.
- [35] 李萌, 汤良杰, 李宗杰, 等. 走滑断裂特征对油气勘探方向的选择: 以塔中北坡顺 1 井区为例 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 113-121.
LI Meng, TANG Liangjie, LI Zongjie, et al. Fault characteristics and their petroleum geology significance: a case study of well Shun-1 on the northern slope of the central Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 113-121.
- [36] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地顺南—古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 753-762.
WANG Tieguan, SONG Daofu, LI Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 753-762.
- [37] 马安来, 金之钧, 朱翠山. 塔里木盆地顺南 1 井原油硫化金刚烷系列的检出及意义 [J]. *石油学报*, 2018, 39(1): 42-53.
MA Anlai, JIN Zhijun, ZHU Cuishan. Detection and research significance of thiadiamondoids from crude oil in well Shunnan 1, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 39(1): 42-53.
- [38] LU Ziyue, CHEN Honghan, QING Hairuo, et al. Petrography, fluid inclusion and isotope studies in Ordovician carbonate reservoirs in the Shunnan area, Tarim Basin, NW China: implications for the nature and timing of silicification [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 359: 29-43.
- [39] YOU Donghua, HAN Jun, HU Wenxuan, et al. Characteristics and formation mechanisms of silicified carbonate reservoirs in well SN₄ of the Tarim Basin [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2018, 36(4): 820-849.
- [40] DONG Shaofeng, YOU Donghua, GUO Zenghui, et al. Intense silicification of Ordovician carbonates in the Tarim Basin: constraints from fluid inclusion Rb-Sr isotope dating and geochemistry of quartz [J]. *Terra Nova*, 2018, 30(6): 406-413.
- [41] 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 Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, 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.
- [42] 房忱琛, 熊永强, 李芸, 等. 原油裂解过程中固体沥青的拉曼光谱演化特征 [J]. *地球化学*, 2015, 44(2): 196-204.
FANG Chenchen, XIONG Yongqiang, LI Yun, et al. Raman spectra characteristics of solid bitumens generated during oil cracking [J]. *Geochimica*, 2015, 44(2): 196-204.
- [43] 王茂林, 肖贤明, 魏强, 等. 页岩中固体沥青拉曼光谱参数作为成熟度指标的意义 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1712-1718.
WANG Maolin, XIAO Xianming, WEI Qiang, et al. Thermal maturation of solid bitumen in shale as revealed by Raman spectroscopy [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9): 1712-1718.
- [44] 席斌斌, 腾格尔, 俞俊杰, 等. 川东南页岩气储层脉体中包裹体古压力特征及其地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 473-479.
XI Binbin, TENGGER, YU Lingjie, et al. Trapping pressure of fluid inclusions and its significance in shale gas reservoirs, southeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 473-479.
- [45] BURLINSON K. Decrepitation in gold exploration. A case history from the Cotan prospect, N. T. [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1991, 42(1): 143-156.
- [46] 徐文刚, 张德会, 席斌斌, 等. 流体包裹体爆裂法测温技术可靠性讨论: 以江西大吉山钨矿为例 [J]. *现代地质*, 2008, 22(5): 757-765.

- XU Wengang, ZHANG Dehui, XI Binbin, et al. Discussions on reliability of the decrepitation technique applied in fluid inclusion studies: taking the Jiangxi Dajishan Tungsten deposit as an example [J]. *Geoscience*, 2008, 22(5): 757-765.
- [47] GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals [M]. *Society for Sedimentary Geology*, 1994: 1-198.
- [48] CHI Guoxiang, DIAMOND L W, LU Huanzhang, et al. Common problems and pitfalls in fluid inclusion study: a review and discussion [J]. *Minerals*, 2021, 11(1): 7.
- [49] 刘雯, 邱楠生, 徐秋晨, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区下寒武统筇竹寺组生烃增压定量评价 [J]. *石油科学通报*, 2018, 3(3): 262-271.
- LIU Wen, QIU Nansheng, XU Qiuchen, et al. The quantitative evaluation of the pressurization caused by hydrocarbon generation in the Cambrian Qiongzhusi Formation of the Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 3(3): 262-271.
- [50] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 257-267.
- HUANG Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 257-267.
- [51] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 878-888.
- DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 878-888.
- [52] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂中段活动特征及其地质意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 990-998.
- DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 990-998.
- [53] 漆立新, 云露. 塔里木盆地碳酸盐岩成藏模式与勘探实践 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 867-876.
- QI Lixin, YUN Lu. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 867-876.
- [54] 吴鲜, 曹自成, 路清华, 等. 塔里木盆地顺北地区白垩系原油成因类型与来源 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 255-262.
- WU Xian, CAO Zicheng, LU Qinghua, et al. Genetic types and sources of Cretaceous crude oil in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 255-262.
- [55] 顾忆, 黄继文, 贾存善, 等. 塔里木盆地海相油气成藏研究进展 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(1): 1-12.
- GU Yi, HUANG Jiwen, JIA Cunshan, et al. Research progress on marine oil and gas accumulation in Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(1): 1-12.
- [56] 顾忆, 万璐璐, 黄继文, 等. “大埋深、高压”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 157-164.
- GU Yi, WAN Yanglu, HUANG Jiwen, et al. Prospects for ultra-deep oil and gas in the “deep burial and high pressure” Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 157-164.

(编辑 韩 彧)

(上接第 885 页)

- [11] 郭超, 刘焯. 多色彩空间下的岩石图像识别研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(18): 247-251.
- GUO Chao, LIU Ye. Recognition of rock images based on Multiple Color Spaces [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(18): 247-251, 255.
- [12] 杨艳梅, 柳娜, 程国建, 等. 基于 Spark 平台的岩石图像聚类分析 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 31(6): 114-118.
- YANG Yanmei, LIU Na, CHENG Guojian, et al. Clustering analysis of rock images based on Spark platform [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2016, 31(6): 114-118.
- [13] MARMO R, AMODIO S, TAGLIAFERRI R, et al. Textural identification of carbonate rocks by image processing and neural network: methodology proposal and examples [J]. *Computers and Geosciences*, 2005, 31(5): 649-659.
- [14] 程国建, 杨静, 黄全舟, 等. 基于概率神经网络的岩石薄片图像分类识别研究 [J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(31): 9231-9235.
- CHENG Guojian, YANG Jing, HUANG Quanzhou, et al. Rock image classification recognition based on probabilistic neural networks [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(31): 9231-9235.
- [15] 刘曦阳. 图像识别技术在古生物化石图像上的应用 [D]. 吉林大学, 2018.
- LIU Xiyang. The application of image recognition technology in paleontological fossil images [D]. *Jilin university*, 2018.
- [16] 岳翔, 呼和, 贾建忠. 一种基于深度学习的有孔虫化石识别方法 [J]. *电脑知识与技术*, 2019, 15(27): 173+178.
- YUE Xiang, HU He, JIA Jianzhong. A method for the identification of foraminifera fossils based on deep learning [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2019, 15(27): 173+178.
- [17] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016: 770-778.

(编辑 徐文明)