

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.03.004

流体包裹体记录的原油裂解成气温度： 以湖北宜昌地区水井沱组为例

李培军^{1,2}, 陈孝红¹, 刘秀岩^{3*}, 张保民¹

LI Pei-Jun^{1,2}, CHEN Xiao-Hong¹, LIU Xiu-Yan^{3*}, ZHANG Bao-Min¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

3. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China;

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

摘要:原油裂解气是中国南方海相页岩气的主要来源之一,确定原油向天然气转化的温度对页岩气成藏研究具有重要意义。前人主要基于生烃模拟实验和动力学方程来模拟原油裂解的温度条件,但是依然缺乏直接的地质记录。本次研究通过对湖北宜昌地区水井沱组页岩中白云石脉和方解石脉流体包裹体岩相学观察、显微测温和激光拉曼光谱等手段来识别代表早期原油裂解的沥青+气两相包裹体,通过其同期盐水包裹体的均一温度来约束原油向湿气裂解的温度。结果表明早期油包裹体形成在白云石脉充填之后、方解石脉充填之前,与其伴生的盐水包裹体平均均一温度指示原油裂解的最低温度为142.1℃。分析认为,研究区白云石脉形成于加里东晚期至海西晚期,原油快速裂解成气在海西运动晚期(300 Ma)开始,方解石脉则形成于燕山早期(140~120 Ma);鄂西地区水井沱组台内泻湖区由于缺乏岩家河组沉积,构造作用造成水井沱组早期形成的页岩油气沿白云石脉向下进入灯影组顶部白云岩储层,对寒武系页岩气成藏以及天然气成藏具有重要的制约作用。

关键词:页岩气;原油裂解;海相页岩;水井沱组;湖北宜昌地区

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)03-0408-09

Li P J, Chen X H, Liu X Y and Zhang B M. 2022. Fluid Inclusion Record Oil Cracking Temperature: Case Study of the Shuijingtuo Formation in the Yichang Area, Hubei. *South China Geology*, 38(3):408-416.

Abstract: Gas from oil cracking is one of the main sources of marine shale gas in South China. Determination of the temperature of oil cracking into gas is of great significance to the study of the process of shale gas accumulation. Previously, the temperature conditions of oil cracking were mainly based on hydrocarbon simulation experiments and dynamic equations, but the direct geological records are still not sufficient. Through petrographic observation, microthermometry and laser Raman spectroscopy, this study has identified the existence of the bitumen-bearing gas-liquid inclusions, indicative of early oil cracking and restricts the cracking

收稿日期:2021-9-24;修回日期:2021-11-20

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190558)和古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放基金(PEL-202210)

第一作者:李培军(1990—),男,博士,从事页岩气地质调查和油气成藏过程研究,E-mail:125307359@qq.com

通讯作者:刘秀岩(1995—),男,博士研究生,从事油气成藏过程研究,E-mail:liuxiuyan@cug.edu.cn

temperature with the homogenization temperatures of the coevally trapped aqueous inclusions. The results show that the early-stage oil inclusions have been trapped later than the precipitation of dolomites and earlier than that of the calcites filling the veins, with the coeval aqueous inclusions homogenizing at 142.1°C, which indicates the lowest cracking temperature of the crude oil. Combined with other information, it is deduced that the dolomite has been precipitating from the late Caledonian to the late Hercynian orogeny, during which point the oil started cracking rapidly (300 Ma). Calcite veins have been formed at the early stage of the Yan-shan orogeny (140~120 Ma). The Shuijingtuo formation in the lagoon facies in south Hubei lacks the deposition of Yanjiahe formation, therefore caused by tectonic movements, the migration of early shale oil generated from the Shuijingtuo formation into the dolomite reservoir of the uppermost part of the Dengying formation through dolomite veins, which provides essential constraints to the shale gas accumulation and other natural gas accumulation in the Cambrian strata.

Key words: shale gas; oil cracking; marine shale; Shuijingtuo formation; the Yichang area, Hubei

继涪陵气田五峰组—龙马溪组获得高产页岩气流之后,与其成因和有机质组成相似的寒武纪水井沱组(C_2s)页岩被认为是未来页岩气接替领域重要的勘探目标。近年来,基于“页岩气在古隆起边缘聚集”的理论,水井沱组页岩气在湖北宜昌地区获得突破,宜页1井产量达 $6.03 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (陈孝红等, 2018)。前人研究表明,水井沱组页岩气为典型的干气,干燥系数达0.99,且为二次裂解形成(罗胜元等, 2019a);岩石热声发射实验表明,水井沱组经历的最高古温度为293~324 °C(张建坤等, 2014),在此温度下,烃源岩早期生成的原油已经全部裂解为甲烷并形成残余沥青,岩层中已经失去了对早期原油的全部记录,因此对于原油裂解成气温度的约束主要来源于动力学方程模拟(Tan J Q et al., 2013; Zhao W Z., 2017)。尽管Mangenot et al. (2021)提出了运用团簇同位素确定甲烷成因的方法,然而,这种方法的实施要求样品中的甲烷包裹体产状简单及成因单一,难以应用于流体活动复杂的水井沱组页岩。因此,对于水井沱组页岩气形成过程中原油初次裂解温度的确定,目前依然缺乏准确的地质记录。

流体包裹体技术自二十世纪末兴起至今,已经被成功地应用于常规油气藏的勘探开发研究(刘秀岩等, 2020; Liu X Y et al., 2020, 2022; Wang Q R et al., 2020),近年来也逐渐被应用于非常规油气领域的研究(Nie H K et al., 2020)。尽管在高热演化程度下,早期捕获的油包裹体已经全部变为沥青包裹

体,但是沥青和甲烷共存于同一包裹体中很可能反映该包裹体为早期的油或者油+湿气包裹体。因此,本次研究采用流体包裹体岩相学、显微测温、激光拉曼光谱等技术方法来识别从早期油包裹体热演化而来的沥青+甲烷包裹体及其同期盐水包裹体,并计算其形成时的物理化学条件,旨在为原油裂解动力学模型的建立提供依据,为页岩气勘探开发提供指导。

1 地质概况

湖北宜昌页岩气勘探区位于扬子地台中部,包括宜昌、恩施、荆州、襄阳、荆门和神农架等地,面积约 $8.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区寒武纪早期继承了震旦纪晚期的构造格局,整体西低东高(图1a)。寒武纪初期,整个扬子地台发生了大规模的海侵,水体自东向西逐渐加深(图1c),沉积相依次可分为局限台地相、泻湖相、礁滩相、台缘礁相、斜坡相和陆棚相。宜昌地区寒武系发育完整,在震旦纪灯影组(Z_2d)之上依次沉积岩家河组(C_1y)、水井沱组(C_2s)和石碑组(C_2sp)(图1b)。灯影组为台地—浅滩相沉积的砂屑白云岩,是重要的储层;水井沱组页岩为滨浅海相沉积,厚度为50~140 m,有机碳(TOC)含量高,有机质类型主要为I型干酪根,极具生烃潜力(罗胜元等, 2019b; 许露露等, 2021),是主要的烃源岩;石碑组为浅水陆棚相泥岩,为区域盖层(罗胜元等, 2020)。自寒武纪早期以来,研究区经历了加里东、

海西、印支、燕山和喜山等多期次的构造运动,但是,受黄陵刚性基底的影响,各期次构造活动并未对水井沱组页岩造成强烈的变形和破坏(陈孝红等,2019)。

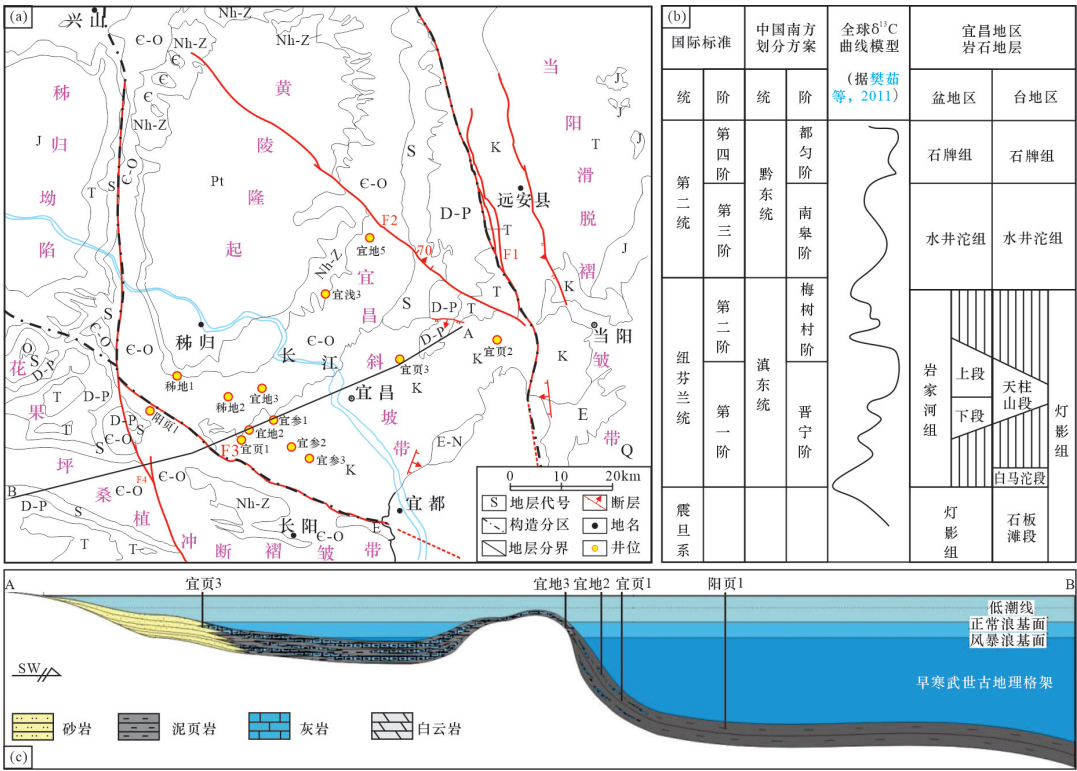


图1 宜昌地区构造图(a)、地层柱状图(b)及寒武纪初期沉积格架剖面图(c)

Fig. 1 The tectonic map of Yichang area (a) stratigraphy column (b) and cross section of the Early Cambrian in Yichang area (c)

2 样品采集与测试方法

本次研究选取了宜页3井水井沱组的9块含脉体页岩样品,在沉积相上属于局限台地—泻湖相(图1a和1c)。所有测试均在中国地质大学(武汉)“构造与油气资源”教育部重点实验室完成,具体包括:(1)透射光—冷阴极发光对应观察,所用仪器为Nikon 80I显微镜配备RELIOTRON III冷阴极发光台,工作电流300~500 mA,工作电压5~8 kV;(2)流体包裹体显微测温度,所用仪器为Nikon 80I显微镜配备Linkam THMS600型冷热台,经已知成分的人工合成包裹体校正,测定误差为±0.1 ℃,初始升温速率为5 ℃/min,待包裹体接近相变时降为1 ℃/min;(3)激光拉曼光谱分析,所

用仪器为JY/Horiba LabRam HR800,激光输出功率为400~500 mW,测试前,用硅片将拉曼峰位移校正至520.7 cm⁻¹。

3 结果

3.1 岩相学观察

岩心观察发现,宜页3井水井沱组页岩发育多条构造裂缝,以垂直于层面为主(图2a、2d),裂缝面平整,缝宽普遍小于1 mm,垂向延伸距离较长,少量斜交于层面,且裂缝较不规则,垂向延伸距离稍短(图2g),多组裂缝被多期白云石和方解石充填。由于脉体充填矿物中混有大量的泥质和有机质,在透射光下局部透光性较差,呈灰黑色或黄褐色(图2b、2e、2h)。阴极光下,方解石呈橘黄色和亮黄色

(图2f和2i),白云石呈红色和暗红色(图2c和2i)。阴极光颜色的不同代表成矿流体中Fe/Mn比值的差异,因此,可以粗略地反映流体活动的幕次。结合岩心观察和阴极发光镜下矿物接触关系,宜页3井水井沱组主要经历了4期流体活动,分别为两期富镁流体活动和两期富钙流体活动。富镁流体早于富钙流体活动,形成了两期白云石脉,其中早期白云

石发暗褐红色阴极光,矿物包裹大量泥质导致透光性较差;晚期白云石发亮红色阴极光,透光性相对较好。富钙流体形成的早期方解石发亮橘黄色阴极光,透光性较好,晚期方解石发暗橙色阴极光,透光性相对较差(图2f和2i)。除此之外,围岩中含大量发红色阴极光的白云石胶结物,也表明方解石脉体形成于区域白云岩化之后(图2i)。

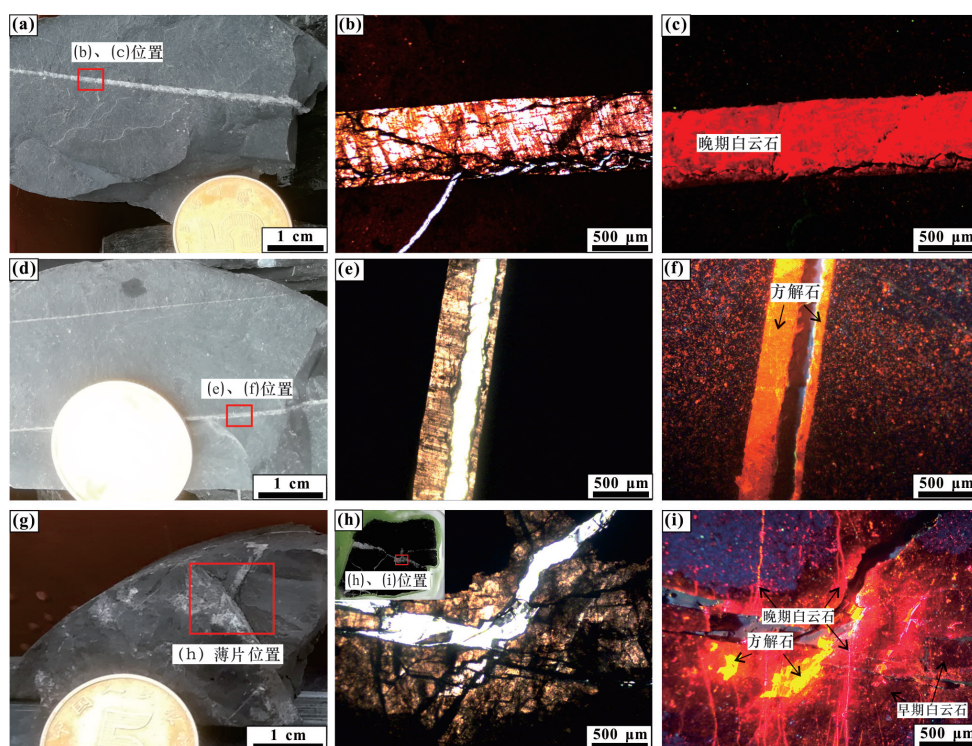


图2 宜昌地区宜页3井水井沱组页岩脉体岩相学照片

Fig. 2 Petrography photographs of the veins in the Shuijingtuo Formation in well Yiye 3 in Yichang area
a、d、g为岩心照片;b、e、h为透射光下薄片照片;c、f、i为阴极光下薄片照片;a、b、c-3019.76 m,白云石脉;d、e、f-3021.45 m,方解石脉;g、h、i-3053.70 m,多期脉体叠加

3.2 包裹体类型

镜下观察发现,白云石脉体相比于方解石脉体较“干净”,“干净程度”主要受矿物中沥青和泥质等暗色物质含量决定,其中暗色物质含量按晚期白云石→早期方解石→晚期方解石→早期白云石的顺序逐渐增多,其中早期白云石包裹物主要为围岩中泥质成分,其它三类矿物“干净程度”则主要受沥青包裹体的含量影响。晚期白云石中沥青包裹体多沿着脉体中白云石环带方向分布(图3a),或局部呈片状散布在白云石晶粒中(图

3b),沥青包裹体大小从几微米到十几微米不等,表明两者的形成具有一定的时间耦合关系。方解石脉体中的沥青包裹体丰度明显高于白云石脉体,同时,晚期方解石中的沥青包裹体丰度高于早期方解石(图3c、3d)。根据各矿物中烃类包裹体的丰度不同,可以大致确定与该矿物沉淀同期的烃类流体活动强度,早期白云石脉形成时间较早,区内干酪根还未开始生烃,晚期白云石形成时期含烃流体的活动强度较弱;而之后的方解石脉形成时,含烃流体活动逐渐增强;最后一期具

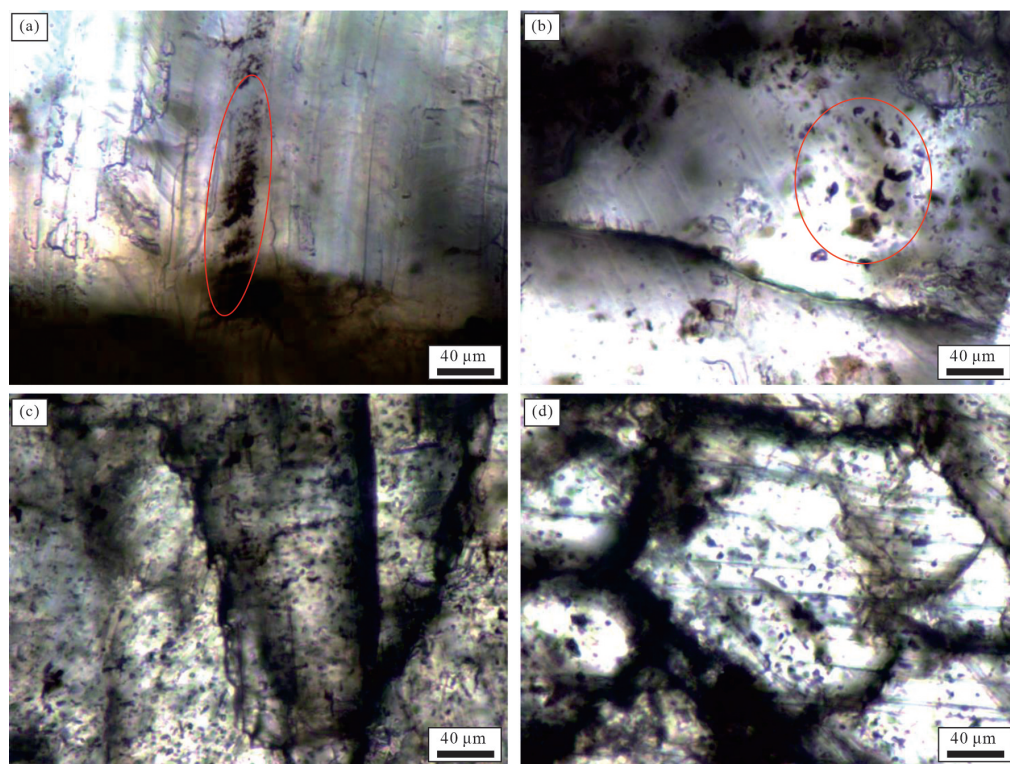


图3 宜昌地区水井沱组页岩脉体中烃类包裹体照片

Fig. 3 Photographs of hydrocarbon inclusions in veins of the Shuijingtuo shale in Yichang area

a-3024.1 m, 白云石脉体中沿白云石生长方向分布的沥青包裹体; b-3020.24 m, 白云石中呈片状分布的沥青包裹体; c-3005.17 m, 早期橘黄色阴极光方解石中密集散乱分布的沥青包裹体; d-3005.17 m, 晚期亮黄色阴极光方解石中散乱分布的沥青包裹体

亮黄色阴极光特征的方解石沉淀时,含烃流体活动强度达到最大。

在显微镜下很难将纯沥青包裹体和沥青+甲烷包裹体区分开,因此本研究将拉曼光谱应用于烃类包裹体的鉴定。在宜页3水井沱组脉体中通过拉曼光谱检测到了大量的纯沥青包裹体以及少量的沥青+甲烷包裹体,没有检测到纯甲烷包裹体;其中,纯沥青包裹体在方解石脉体中大量发育,具有典型的特征拉曼双峰,分别在 1324cm^{-1} (D峰) 和 1595cm^{-1} (G峰) 附近(图4a);沥青+甲烷包裹体仅在白云石脉中检测到,沥青的特征拉曼双峰分别在 1327cm^{-1} 和 1598cm^{-1} 附近,甲烷的特征拉曼峰位移为 2911cm^{-1} 左右,沥青+甲烷包裹体的拉曼光谱同时具有沥青特征双峰和甲烷峰位移(图4b)。

3.3 显微测温

对水井沱组页岩脉体中的流体包裹体进行均一温度测试并绘制成均一温度分布直方图(图5)。结果表明,白云石脉体中原生盐水包裹体均一温

度为 $115.2\sim 145.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均为 $130.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 次生盐水包裹体均一温度范围为 $126.8\sim 159.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均为 $142.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 早期方解石(具橘黄色阴极光特征)中原生盐水包裹体均一温度范围为 $133.9\sim 150.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均为 $142.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 次生盐水包裹体均一温度范围为 $98.7\sim 118.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均为 $107.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 晚期方解石(具亮黄色阴极光特征)中原生盐水包裹体均一温度为 $125.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 次生盐水包裹体均一温度为 $100.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 讨论

4.1 原油裂解温度

流体包裹体显微测温技术是目前恢复白云石形成温度的主要方法,但是由于白云石中盐水包裹体普遍较小且形状不规则,因此在数据数量上相对较少(胡作维等,2012)。本次研究在白云石脉体中检测到沥青+甲烷包裹体的存在,表明白云石脉体形成时间早于烃源岩生烃演化过程中原油向湿气

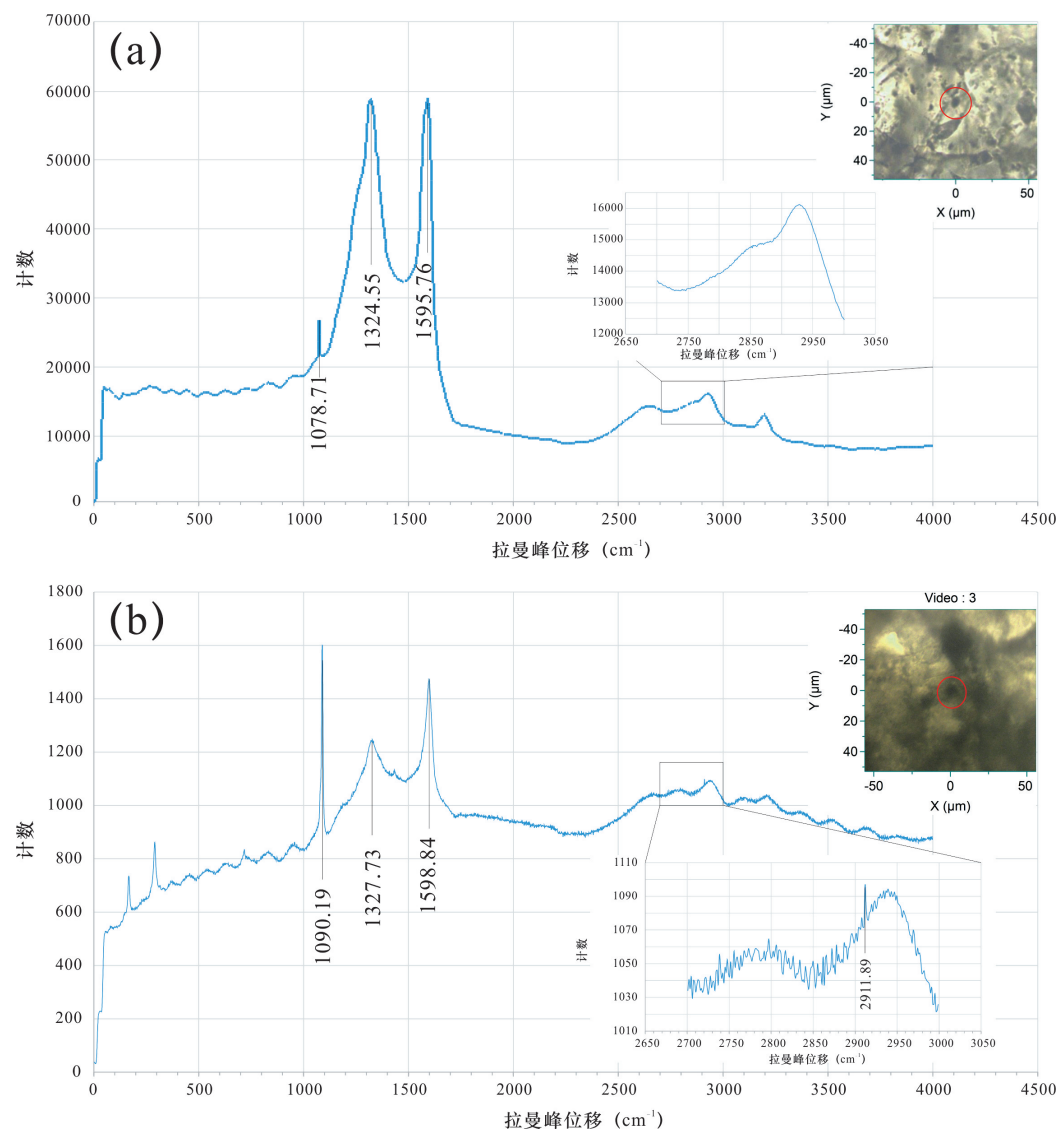


图4 沥青包裹体(a)和沥青+甲烷包裹体(b)拉曼光谱图

Fig. 4 Raman spectrum of bitumen (a) and bitumen + methane (b) inclusions

a-3005.17 m, 方解石脉体中纯沥青包裹体; b-3053.70 m, 白云石脉体中沥青+甲烷两相包裹体.

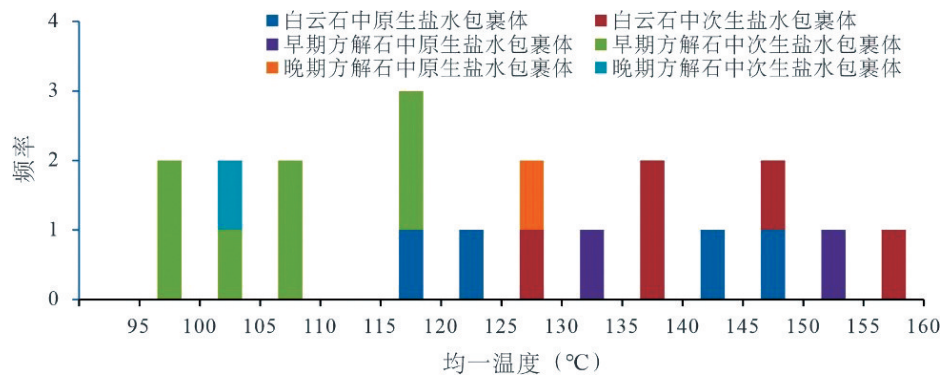


图5 宜昌地区水井沱组页岩脉体中流体包裹体均一温度直方图

Fig. 5 Diagram of homogenization temperatures of fluid inclusions in veins in the Shuijingtuo shale in the Yichang area

裂解的时间,同时与沥青+甲烷包裹体伴生的白云石脉体中次生盐水包裹体的均一温度可以代表原油向湿气裂解时的最低温度。本次测得白云石脉体中原生盐水包裹体平均均一温度为 130.5 °C,次生盐水包裹体平均均一温度为 142.1 °C,表明在地层温度达到 130.5 °C 之前,烃源岩生成的原油暂未开始向湿气裂解,原油裂解的最低温度应该略高于 142.1 °C。[Tan J Q et al. \(2013\)](#)在对重庆和贵州的寒武系黑色页岩及澳洲乔治娜盆地寒武系黑色页岩的生烃模拟研究时指出,烃源岩开始生烃温度为 120 °C,而结束生烃温度为 165 °C,其中,当温度达到 152 °C 时,液态烃开始快速向气态烃转化,代表原油的二次裂解发生在地温达到 152 °C 时左右。[Zhao W Z et al. \(2017\)](#)对松辽盆地白垩纪页岩进行生烃模拟研究,结果表明烃源岩中的液态烃在 135 °C 开始裂解,在 170 °C 达到裂解高峰,终止于 200 °C。可以注意到,本次研究得到的代表原油最低裂解温度的包裹体平均均一温度(142.1 °C)与模拟的裂解开始温度(152 和 135 °C)极为接近,考虑到不同模拟实验中烃源岩类型的不同($T_{\max}$ 和 HI 差异较大),可能导致原油裂解温度存在差异,本次研究认为,宜昌地区寒武系水井沱组页岩生烃过程中原油向湿气裂解的温度略高于 142.1 °C。

4.2 方解石脉的地质意义

本次研究通过镜下观察和拉曼光谱分析在方解石脉中检测到了大量的沥青包裹体,却未检测到任何甲烷包裹体,表明方解石脉体形成之后并未发生大规模页岩气逸散,页岩储层内仅发生残留沥青的运移和捕获。岩相学观察表明水井沱组页岩中方解石脉形成于白云石脉之后,即形成于原油裂解阶段之后,方解石脉脉壁平直,属于典型的构造活动伴生脉,显示其受后期构造挤压作用影响较弱。

水井沱组页岩覆盖于灯影组白云岩之上,灯影组储层内含充足的富镁流体,是水井沱组页岩早期白云石脉体形成的主要流体来源;然而,方解石脉是富钙流体活动的产物,研究区内寒武系石龙洞组(C_2s)和天河板组(C_2t)灰岩储层是潜在的富钙流体储集层,宜地 2 井天河板组裂缝型天然气藏的发现揭示了区内普遍发育连接天河板组与水井沱组

页岩的垂向裂缝([曾雄伟等, 2016](#)),因此,页岩中方解石脉可能是上部流体作用形成的。

烃源岩生烃过程中,原岩中聚集着大量的原油,并形成超压环境,后期的构造活动使水井沱组页岩的保存条件被破坏,大量的早期油气在泄压的过程中通过开启的裂缝排出,因此白云石脉中可见大量由早期油气裂解形成的甲烷+沥青包裹体。随着早期生成的油气大量排出,页岩中烃类流体急剧减少,晚期构造作用形成的方解石脉中仅捕获了流动性较差的沥青包裹体,这种沥青包裹体并非由早期捕获的油包裹体裂解而来,而是残余沥青或干酪根裂解产生的“运移沥青包裹体”,该类纯沥青包裹体与早期原油裂解沥青包裹体拉曼峰存在明显差异,其拉曼双峰 D 峰和 G 峰强度基本相当,属于典型的过成熟沥青([图 4a](#))([房忱琛等, 2015](#))。

方解石脉的形成表明在区域构造应力的作用下,水井沱组烃源岩与上覆天河板组和石龙洞组灰岩储层相互沟通,为区域寒武系天然气藏的形成提供了有效运移通道;但是,宜页 3 井的方解石脉烃类包裹体检测和天河板组-石龙洞组钻探气显结果表明,尽管具有良好的运移通道,但由于该地区早期油气在向上通道形成之前已向下大量运移,因此并未形成良好的天然气藏;进一步分析认为,宜页 3 井区缺失的寒武系岩家河组致密层可能是形成寒武系页岩气藏和天然气藏的重要底板条件([陈孝红等, 2018](#))。

4.3 脉体形成时代

在前人对宜昌地区震旦纪以来区域地层对比研究的基础上([湖北省地质调查院, 2007](#)),结合黄陵隆起和当阳复向斜等宜昌周缘地区的构造抬升史([沈传波等, 2009](#); [李天义等, 2012](#); [葛翔等, 2016](#)),初步建立了宜昌地区宜页 3 井地层埋藏抬升过程。[郭彤楼等\(2005\)](#)和[李天义等\(2012\)](#)基于多口钻井的地温剖面和样品热导率测试,以及大量锆石和磷灰石裂变径迹、镜质体反射率测试数据,建立了中扬子地区当阳复向斜古热流值演化史,通过对比研究,本文模拟了宜页 3 井水井沱组黑色页岩的热史和生烃演化史([图 6](#))。

模拟结果表明,井区在加里东晚期发生第一次地壳抬升之前,震旦系-下志留统海相连续沉积,古

热流值基本稳定在 $50 \sim 60 \text{ mw/m}^2$ 之间(李天义等, 2012), 水井沱组页岩随着埋深加大成熟度逐渐升高, 最高地层温度达到 140°C (430 Ma), 烃源岩进入中成熟阶段; 加里东晚期-海西晚期, 沉积发生间断, 水井沱组页岩地层温度在 130°C - 140°C 之间徘徊, 烃源岩在此地温的持续作用下开始缓慢热演化, 烃源岩演化至成熟阶段, 大量原油生成, 与此同时, 少量原油在这一漫长的地质历史时期开始了裂解生气; 直到海西晚期(约 300 Ma), 宜昌地区再次大幅沉降, 随着地层的埋深加大, 水井沱组页岩地层温度超过 140°C 并快速增加, 此时, 烃源岩进入

生湿气阶段(图6), 晚期白云石脉形成于 430-300 Ma 之间。裂变径迹资料显示, 黄陵隆起核部中新世代以来第一次构造抬升始于约 200Ma(沈传波等, 2009), 形成了宜昌斜坡区西高东低的单斜构造, 宜页3井井区构造抬升始于中侏罗世, 该期抬升造成该井剥蚀厚度近 3500 m, 构造作用是形成方解石脉的直接原因, 均一温度结果显示, 方解石脉体中次生包裹体温度普遍低于原生包裹体温度, 间接证明了方解石脉形成于地层抬升阶段, 结合埋藏史确定方解石脉形成于燕山运动晚期, 约 140~120 Ma 之间(图6)。

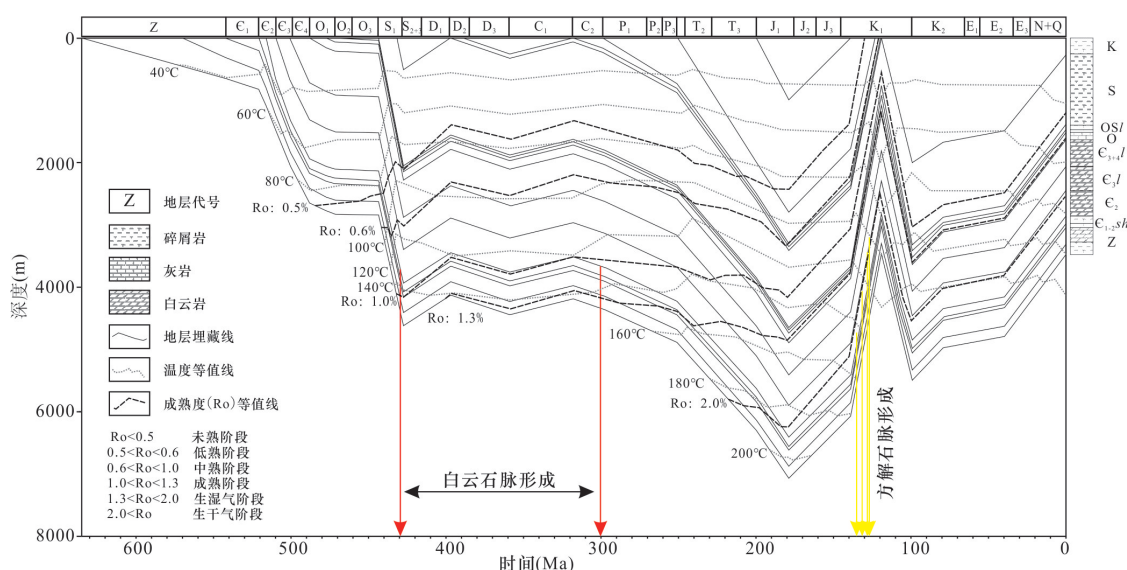


图6 宜页3井寒武系水井沱组埋藏-热演化史及流体活动史图

Fig. 6 Diagram of burial - thermal evolution history and fluid activity history of the Shuijingtuo Formation in Well Yiye3

5 结论

(1) 宜昌地区水井沱组主要发育两期白云石脉和两期方解石脉, 脉体中含有大量的烃类包裹体, 方解石脉中烃类包裹体的丰度明显高于晚期白云石脉; 晚期白云石脉中烃类包裹体以纯沥青包裹体为主, 含少量沥青+甲烷包裹体, 而方解石脉中仅检测到纯沥青包裹体。

(2) 白云石中的沥青+甲烷包裹体指示其为早期的油包裹体经裂解演变而来, 白云石脉的形成时间早于原油向湿气裂解时间; 与沥青+甲烷包裹体

伴生的次生盐水包裹体均一温度表明早期原油运移温度为 $126.8 \sim 159.1^\circ\text{C}$, 平均为 142.1°C , 代表了原油最低裂解温度, 与烃源岩生烃模拟实验中原油裂解温度基本一致。

(3) 白云石脉形成于加里东晚期至海西晚期, 记录了原油向湿气裂解的起始时间; 方解石脉形成于燕山早期地层大规模抬升阶段, 代表了页岩油气藏保存条件的再次破坏时间。同时, 由于区内缺乏岩家河组沉积, 加里东晚期至海西期, 水井沱组页岩油气向下沿灯影组顶部白云岩储层逸散, 造成寒武系页岩气以及天然气难以聚集成藏。

参考文献:

- 陈孝红, 危凯, 张保民, 李培军, 李海, 刘安, 罗胜元. 2018. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式 [J]. 中国地质, 45(2): 207-226.
- 樊茹, 邓胜徽, 张学磊. 2011. 寒武系碳同位素漂移事件的全球对比性分析 [J]. 中国科学:地球科学, 41(12):1829-1839.
- 房忱琛, 熊永强, 李芸, 梁前勇, 陈媛. 2015. 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, 44(2): 196-204.
- 葛翔, 沈传波, 梅廉夫. 2016. 低温热年代对黄陵隆起中生代古地形的约束 [J]. 大地构造与成矿学, 40(4): 654-662.
- 郭彤楼, 李国雄, 曾庆立. 2005. 江汉盆地当阳复向斜当深3井热史恢复及其油气勘探意义 [J]. 地质科学, 40(4): 570-578.
- 胡作维, 黄思静, 李志明, Qing Hairuo, 范明, 兰叶芳. 2012. 川东北地区三叠系飞仙关组白云化流体温度 [J]. 中国科学:地球科学, 42(12):1817-1829.
- 湖北省地质调查院. 2007. 1:25万宜昌市幅区域地质调查报告 [R]. 26-133.
- 李天义, 何生, 何治亮, 沃玉进, 周雁, 王芙蓉, 杨兴业. 2012. 中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建 [J]. 石油学报, 33(2): 213-224.
- 刘秀岩, 陈红汉, 张洪安, 徐田武. 多套烃源岩联合供烃下的原油成藏特征及其与压力的耦合关系:以东濮凹陷濮城地区沙河街组为例 [J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2210-2220.
- 罗胜元, 陈孝红, 刘安, 李海. 2019a. 中扬子宜昌地区下寒武统水井沱组页岩气地球化学特征及其成因 [J]. 石油与天然气地质, 40(5):999-1010.
- 罗胜元, 刘安, 李海, 陈孝红, 张森. 2019b. 中扬子宜昌地区寒武系水井沱组页岩含气性及影响因素 [J]. 石油实验地质, 41(1): 56-67.
- 罗胜元, 陈孝红, 岳勇, 李培军, 蔡全升, 杨睿之. 2020. 中扬子宜昌地区沉积-构造演化与寒武系页岩气富集规律 [J]. 天然气地球科学, 31(8):1052-1068.
- 沈传波, 梅廉夫, 刘昭茜, 徐思煌. 2009. 黄陵隆起中-新生代隆升作用的裂变径迹证据 [J]. 矿物岩石, 29(2): 54-60.
- 许露露, 文剑航, 温雅茹, 王亿, 张焱林, 谢通, 任志军, 罗凡, 胡江龙. 2021. 中扬子鄂西地区海相页岩气地质特征及找矿成果综述 [J]. 资源环境与工程, 35(5):611-624.
- 张建坤, 何生, 易积正, 张柏桥, 张士万, 郑伦举, 侯宇光, 王亿. 2014. 岩石热声发射和盆模技术研究中扬子区西部下古生界海相页岩最高古地温和热成熟史 [J]. 石油学报, 35(1): 58-67.
- 曾雄伟, 王传尚, 刘安, 危凯. 2016. 湖北宜昌地区中寒武统天河板组沉积相及其油气意义 [J]. 华南地质与矿产, 32(2): 142-148.
- Liu X Y, Chen H H, Xiao X W, Zhang H A, Wang Y W, Xu T W, Shang P, Kong L T. 2022. Overpressure Evolution Recorded in Fluid Inclusions in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, North China [J]. Journal of Earth Science, 33(4): 916-932.
- Liu X Y, Chen H H, Xiao X W, Zhang H A, Xu T W. 2020. Mixing Characteristics of Oil Inclusions with Different Thermal Maturities in the Wenliu Uplift, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, North China [J]. Journal of Earth Science, 31(6): 1251-1258.
- Mangenot X, Tarantola A, Mullis J, Girard J P, Le V H, Eiler J M. 2021. Geochemistry of clumped isotopologues of CH₄ within fluid inclusions in Alpine tectonic quartz fissures [J]. Earth and Planetary Science Letters, 561: 116792.
- Nie H K, He Z L, Wang R Y, Zhang G R, Chen Q, Li D H, Lu Z Y, Sun C X. 2020. Temperature and origin of fluid inclusions in shale veins of Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin, south China: Implications for shale gas preservation and enrichment [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 193: 107329.
- Tan J Q, Horsfield B, Mahlstedt N, Zhang J C, di Primio R, Vu T A T, Boreham C J, van Graas G, Tocher B A. 2013. Physical properties of petroleum formed during maturation of Lower Cambrian shale in the upper Yangtze Platform, South China, as inferred from PhaseKinetics modelling [J]. Marine and Petroleum Geology, 48: 47-56.
- Wang Q R, Huang H P, Chen H H, Zhao Y T. 2020. Secondary alteration of ancient Shuntuoguole oil reservoirs, Tarim Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 111: 202-218.
- Zhao W Z, Zhang S C, Zhang B, He K, Wang X M. 2017. New insight into the kinetics of deep liquid hydrocarbon cracking and its significance [J]. Geofluids, 2017: 1-11.