

皖南地区二叠系孤峰组页岩中高密度含甲烷包裹体特征及其地质意义

董 敏^{1,2,3}, 王宗秀^{1,2,3}, 董 会⁴, 张林炎^{1,2,3}, 宋 微⁵, 郭迎春^{1,2,3}, 李 小 诗^{1,2,3}, 冯兴强^{1,2,3}, 马立成^{1,2,3}, 季长军^{1,2,3}
DONG Min^{1,2,3}, WANG Zongxiu^{1,2,3}, DONG Hui⁴, ZHANG Linyan^{1,2,3}, SONG Wei⁵, GUO Yingchun^{1,2,3}, LI Xiaoshi^{1,2,3}, FENG Xingqiang^{1,2,3}, MA Licheng^{1,2,3}, JI Changjun^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;

4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Lab of Shale Oil and Gas Geological Survey, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, Chinese Geological Survey, Beijing 100081, China;*

4. *Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shannxi, China;*

5. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*

DONG M, WANG Z X, DONG H, et al. , 2020. The characteristics and geological significance of high-density methane-bearing inclusions in the Permian Gufeng Formation shale, southern Anhui [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 872-880. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.068

Abstract: Samples of quartz veins were collected from the Permian Gufeng Formation siliceous shale fractures along the Changqiao profile, Jingxian County in southern Anhui. Inclusion composition analysis, thermodynamic temperature measurement, and laser Raman spectroscopy were carried out on the samples, and high-density methane inclusions were detected. The measured displacements of laser Raman scattering peak ν_1 of the inclusions vary from 2910.6~2911.2 cm^{-1} , and densities of the methane inclusions were calculated as 0.2295~0.2618 g/cm^3 , indicating characteristics of high-density methane inclusions. The two-phase vapor-liquid brine inclusions coexisting with the methane inclusions have homogenization temperatures ranging from 216.8 $^{\circ}\text{C}$ to 242.3 $^{\circ}\text{C}$. The combination of methane inclusion composition by laser Raman spectroscopy with the simulation of high-density methane inclusions using the equation of state of supercritical methane system shows that the trapping pressure at 216.8 $^{\circ}\text{C}$ was 76~95 MPa. By calculating the density of the high-density methane inclusion and the capture pressure, it reveals the evidence for high-pressure methane yield in the Permian Gufeng Formation highly evolved siliceous shale in geological history, and provides scientific grounds for the exploration and evaluation of Permian shale gas in southern Anhui.

Key words: southern Anhui; Permian Gufeng Formation; high-density methane inclusions; laser Raman spectroscopy

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41672201); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190085)
第一作者简介: 董敏 (1983-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事构造地质和油气地质研究。E-mail: dongminy@ sina. com
收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-29; 责任编辑: 吴芳
引用格式: 董敏, 王宗秀, 董会, 等, 2020. 皖南地区二叠系孤峰组页岩中高密度含甲烷包裹体特征及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 872-880. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.068

摘 要: 对皖南地区泾县昌桥剖面的二叠系孤峰组硅质页岩裂缝石英脉中流体包裹体进行了显微激光拉曼光谱测试、热力学温度测定及拉曼光谱图谱解析, 观测到了高密度甲烷包裹体。利用甲烷包裹体的拉曼散射峰 ν_1 位移 $2910.6\sim 2911.2\text{ cm}^{-1}$, 计算得到甲烷包裹体密度为 $0.2295\sim 0.2618\text{ g/cm}^3$, 具有高密度甲烷包裹体特征。含甲烷组分的气液两相盐水包裹体均一温度分布在 $216.8\sim 242.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于气液两相盐水包裹体与甲烷包裹体是共生的, 通过状态方程热力学计算高密度甲烷包裹体在共生气液两相盐水包裹体最小温度 $216.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的捕获压力为 $76\sim 95\text{ MPa}$ 。对甲烷流体包裹体密度和捕获压力的计算, 揭示了区域内二叠系孤峰组高演化程度的硅质页岩在地史演化过程中存在高压甲烷流体产出的证据, 为开展皖南地区二叠系页岩气勘探评价提供了科学依据。

关键词: 皖南地区; 二叠系孤峰组; 高密度甲烷包裹体; 激光拉曼光谱分析

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

0 引言

近年来中国在下扬子地区积极推进页岩气的勘探开发。2017 年在下扬子皖南地区孤峰向斜西翼部署实施了泾页 1 井 (宋腾等, 2017), 在上二叠统大隆组底部—龙潭组顶部发育页岩气赋存的优质层段, 有良好的页岩气显示; 2019 年在下扬子皖南地区宣城泾县实施的皖泾地 1 井, 在下三叠统殷坑组获得油气重要发现。下扬子地区的页岩气成藏具有成熟度高、构造复杂的特点, 寻找有利页岩气勘探区一直备受地质学家关注, 亟待开展下扬子皖南地区的页岩气成藏条件及页岩气勘探评价等方面的研究。

流体包裹体记录了流体演化过程中的地质信息, 广泛应用于油气成藏期次、成藏条件和成藏机理研究 (欧光习等, 2006; 刘德汉等, 2010, 2013; 施伟军和席斌斌, 2016; 斯尚华等, 2018;

严礼宇等, 2019; 徐旺林等, 2019)。通过流体包裹体可以精确恢复储层古温压演化过程, 文章对皖南地区泾县二叠系孤峰组硅质页岩裂缝充填的石英脉中流体包裹体成分进行显微激光拉曼光谱测试、冷热台均一温度测定及拉曼光谱图谱解析, 发现了高密度甲烷包裹体, 通过计算甲烷包裹体密度和捕获压力, 讨论了皖南地区泾县孤峰组硅质页岩裂缝石英脉中发育甲烷包裹体的地质意义。

1 皖南地区地质概况

下扬子皖南地区位于安徽省南部, 西边界为郯庐断裂, 东边界为江绍断裂, 面积约为 $4\times 10^4\text{ km}^2$ (图 1)。皖南地区在晋宁期形成基底变形, 后期经过多期构造叠加, 构造改造强烈, 构造演化及改造过程的复杂性和多样性制约了该区的页岩气调查 (李亚辉等, 2010)。

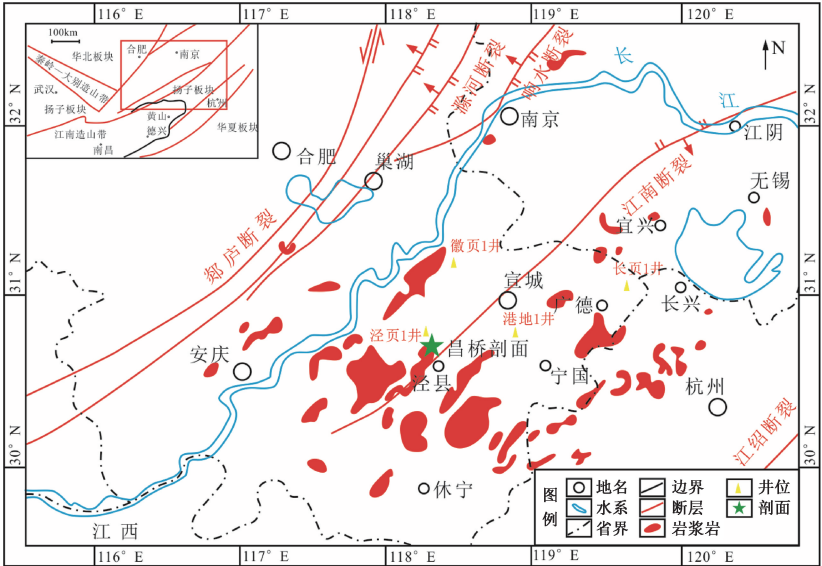


图 1 皖南地区泾县昌桥剖面位置图

Fig. 1 Location map of the Changqiao profile, Jingxian County, southern Anhui

皖南地区孤峰组是指栖霞组与龙潭组之间的薄层硅质页岩，富含锰质结核，菊石、放射虫等化石发育（胡世忠，2000）。孤峰组的正层型位于皖南泾县孤峰镇，泾县地区的二叠系自下而上发育栖霞组、孤峰组、龙潭组和大隆组，孤峰组与下伏栖霞组呈平行不整合接触，与上覆龙潭组呈假整合接触（黄保家等，2013）。结合下扬子地区的沉积背景分析，二叠系沉积时期皖南地区总体处于拗陷盆地阶段，从孤峰组开始海平面上升，暗色泥岩开始沉积，在此基础上，上升流使海水为缺氧水体，生物成因的硅质岩和暗色泥岩互层。孤峰组晚期海平面开始下降，龙潭组时期，该区的物源供给充足，发生海侵过程，形成三角洲前缘沉积相。下扬子皖南地区的孤峰组在横向上厚度起伏变化较大，厚度区间在1~50 m左右，沉积相为深水盆地相。

皖南地区孤峰组的有机质丰富，TOC 普遍大

于2%，有机碳质量分数为1.2%~12.3%，属于优质烃源岩，生烃条件好，具有生成页岩油气的潜力（黄保家等，2013；徐菲菲等，2019）。孤峰组页岩中石英的含量高，脆性指数较大，具有良好的可压性，因此该区孤峰组具备较好的页岩气的形成和富集条件。

泾县昌桥剖面出露了较为完整的下三叠系和二叠系，发育缓倾单斜构造，无明显的褶皱、断层等变形构造特征，对此开展了剖面的精细剖析，建立了剖面的下三叠系—二叠系柱状图（图2）。昌桥剖面孤峰组硅质页岩的TOC值分布在3.2%~4.8%之间， R_o 值分布在0.8%~2.2%（宋腾等，2019），热演化程度高，处于成熟—高成熟阶段，有利于页岩气的生成和聚集。此次研究系统采集二叠系大隆组、龙潭组和孤峰组的泥页岩样品中的脉体进行了流体包裹体测试。

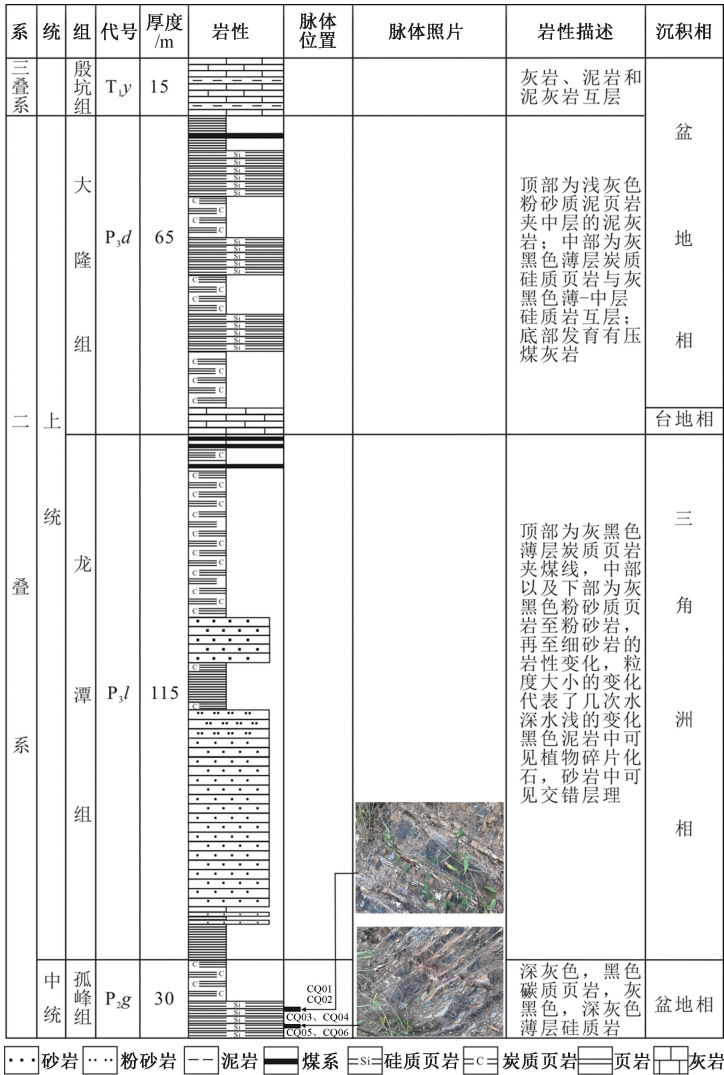


图2 皖南地区昌桥剖面下三叠系—二叠系柱状图

Fig. 2 Histogram of Lower Triassic-Permian strata in the Changqiao profile in southern Anhui

2 样品信息与测试方法

对皖南地区二叠系 21 个样品的流体包裹体进行测试, 在孤峰组硅质页岩裂缝的石英脉中发现甲烷包裹体。该样品采自于下扬子皖南泾县的昌桥剖面二叠系中统孤峰组, 大地坐标: $N30^{\circ}44'38''$, $E118^{\circ}23'7''$, 位于昌桥镇的金家荡山村口, 孤峰组岩性以炭质页岩和硅质页岩为主, 网状裂缝发育。

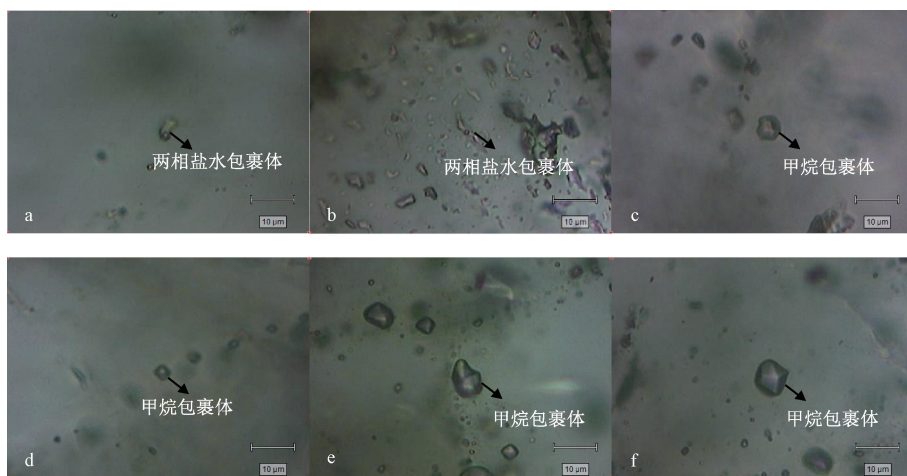
将裂缝石英脉样品进行两面抛光, 制成厚度 $50\sim80\ \mu\text{m}$ 的包裹体光片, 在岩相观察的基础上, 采用英国 Renishaw 公司 InVia 型激光拉曼光谱仪进行流体包裹体分子成分和结构的微区分析。激光拉曼光谱的数据选用 1800 光栅的拉曼采集, 获得信号峰, 进行包裹体的成分判断, 拉曼光谱仪测试, 经过单晶硅校正, 拉曼光谱特征峰偏移小于 $0.01\ \text{cm}^{-1}$ 。实验中选取石英脉中与甲烷包裹体同

期的气液两相盐水包裹体, 运用 THMS600 高精度冷热台进行温度测定, 经过标准样品校正, 其温度误差为 $\pm 0.1\ ^{\circ}\text{C}$ 。在此基础上进行了拉曼谱图解析, 实验工作均在中国地质调查局西安地质调查中心激光拉曼光谱实验室完成。

3 分析测试结果与讨论

3.1 流体包裹体组分特征

对皖南地区孤峰组甲烷包裹体岩相进行显微观察, 样品采集的部位已标注在剖面柱状图中(图 2)。含有甲烷组分的气液两相盐水包裹体为次生包裹体(图 3a、3b), 在透射光显微镜下显示为灰黑色, 且透明度较低, 形态多呈不规则状。单相甲烷包裹体为次生包裹体(图 3c—3f), 在透射光显微镜下显示为半透明、透明, 形态多样, 有圆形、椭圆形和不规则形状, 其大小主要为 $5\sim8\ \mu\text{m}$, 呈现单个孤立状或定向排列分布特征。



a—b—石英脉中分布的两相盐水包裹体; c—f—石英脉中分布的单相甲烷包裹体

图 3 皖南地区孤峰组方解石脉中两相盐水包裹体和甲烷包裹体产出和形态特征

Fig. 3 Production and morphological characteristics of two-phase brine inclusions and methane inclusions in the calcite veins of the Gufeng Formation, Changqiao profile in southern Anhui

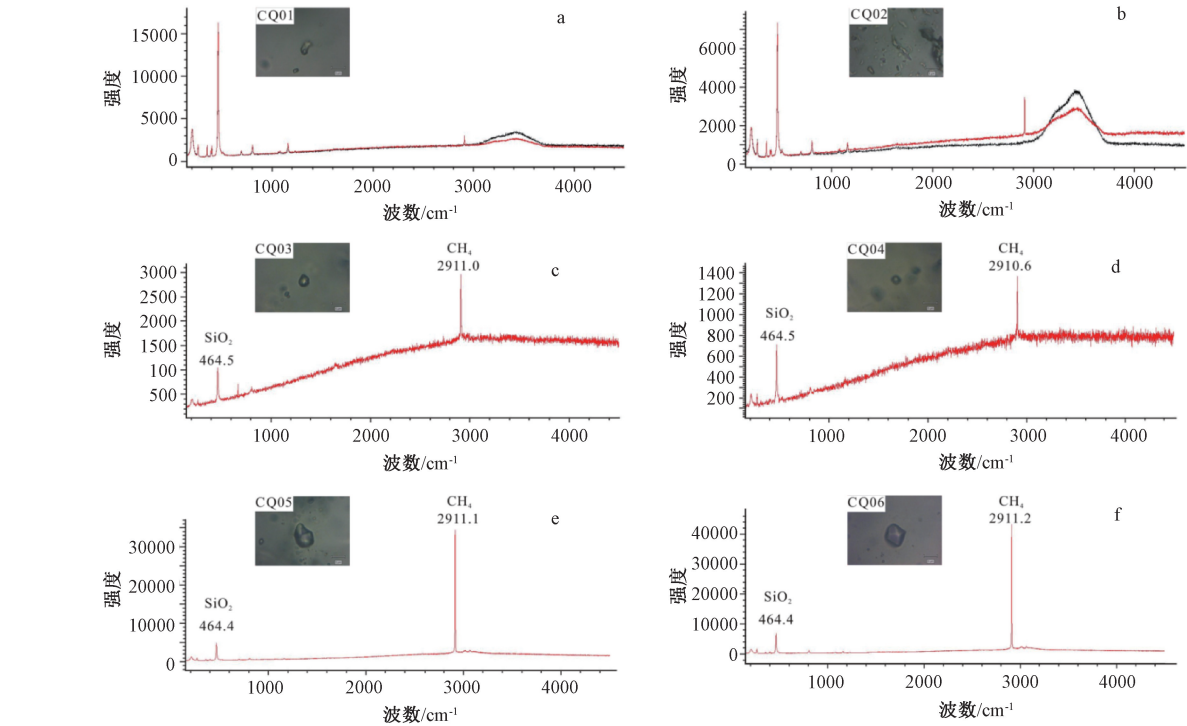
在包裹体岩相观察的基础上, 选用形态比较规则且保存完整的包裹体进行拉曼光谱测定, 孤峰组硅质页岩的石英脉流体包裹体的气相成分主要为 CH_4 , 液相成分主要为 CH_4 和 H_2O 。

流体包裹体激光拉曼光谱图(图 4)的谱图解析结果显示, 样品 CQ01 和 CQ02 的显微激光拉曼光谱是气液两相包裹体, CQ01 的气相成分中 CH_4 占 100%, 液相成分中 CH_4 占 0.03%、 H_2O 占 99.97%; CQ02 的气相成分中 CH_4 占 100%, 液相

成分中 CH_4 占 0.02%、 H_2O 占 99.98%。样品 CQ03、CQ04、CQ05 和 CQ06 的显微激光拉曼光谱是单相甲烷包裹体, 拉曼谱图解析获得样品的甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移分布在 $2910.6\sim2911.2\ \text{cm}^{-1}$, 具有高浓度甲烷包裹体谱图特征, 其中 CQ03 的甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移为 $2911.0\ \text{cm}^{-1}$, CQ04 的甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移为 $2910.6\ \text{cm}^{-1}$, CQ05 的甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移为 $2911.1\ \text{cm}^{-1}$, CQ06 的甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移为 $2911.2\ \text{cm}^{-1}$ 。单相甲

烷包裹体拉曼谱图中的甲烷散射峰为主要特征峰，其他的拉曼峰主要反映了含包裹体宿主矿物为石英。拉曼光谱解析揭示，昌桥剖面二叠系孤峰组硅质页岩裂缝石英脉的流体成分单一。借助

于激光拉曼光谱解析，不仅可以对包裹体的成分和组分进行分析，还可以根据甲烷拉曼光谱图中散射峰 ν_1 位移，计算甲烷包裹体的密度和捕获压力。



a—b—气液两相包裹体，红线表示气相，黑线表示液相；c—f—单相甲烷包裹体，红线表示液相

图4 皖南地区孤峰组方解石脉的流体包裹体激光拉曼光谱图

Fig. 4 Laser Raman spectra of fluid inclusions in the calcite veins of the Gufeng Formation in southern Anhui

3.2 流体包裹体显微测温

在冷热台上对含有甲烷组分的气液两相盐水包裹体进行温度测定，获得气液两相包裹体的均一温度分布在 216.8~242.3℃，其温度直方图如图5所示。气液两相盐水包裹体的均一温度较高，且集中分布在 240~245℃ 的范围内，说明该区的脉体形成时埋深较深，结合皖南地区的构造运动背景分析，在燕山期该区经历大规模隆升，孤峰组裂缝中方解石脉的高温气液两相包裹体还可能与构造裂缝的形成和古流体的活动有关（高键等，2015）。样品中的甲烷包裹体与高温气液两相包裹体共生，说明包裹体形成于饱和甲烷的不混溶两相系统，气液两相盐水包裹体测温的最小均一温度可以代表单相甲烷包裹体的捕获温度（Goldstein and Reynolds, 1994；席斌斌等，2016；李文等，2018）。

3.3 甲烷包裹体密度计算

根据包裹体岩相显微观察以及显微激光拉曼光谱图解析，图4的CQ03、CQ04、CQ05和CQ06

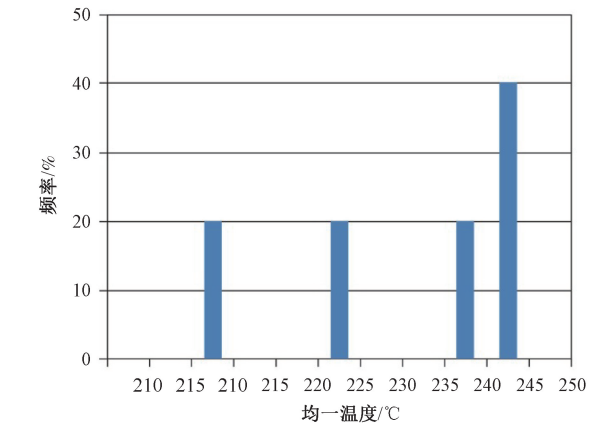


图5 皖南地区气液两相的流体包裹体均一温度统计直方图

Fig. 5 Statistical histogram of homogenization temperatures of two-phase brine inclusions in southern Anhui

具有明显的甲烷特征峰和强度，通过甲烷拉曼散射峰 ν_1 位移，可计算包裹体的密度。不少学者（Thomas et al., 1990；Seitz et al., 1993a, 1993b,

1996; Hansen et al., 2001a, 2001b; Lu et al., 2007) 通过玻璃毛细管系统中不同压力条件下测定甲烷拉曼散射峰位移, 进而探讨了甲烷拉曼散射峰位移与甲烷包裹体密度、压力的关系。根据实验结果, 拟合了纯甲烷包裹体甲烷拉曼散射峰位移与甲烷包裹体密度存在线性关系, 并得到如下公式:

$$\rho = - 5.17331 \times 10^{-5} D^3 + 5.53081 \times 10^{-4} D^2 - 3.51387 \times 10^{-2} D \quad (1)$$

式中: ρ 为甲烷包裹体密度, g/cm^3 ; $D = v_1 - v_0$, v_1 为拉曼光谱实测的甲烷拉曼散射峰位移, 而 v_0 是指压力接近 0 时的甲烷包裹体的甲烷拉曼散射峰位移, 文中 v_0 采用实验室标定的甲烷拉曼散射峰位移量为 2916.95 cm^{-1} , 这个值会根据实验室校正方法而有所不同。

该公式只适用于甲烷含量在 90%~100% 的甲烷包裹体的密度计算, 文中为单相甲烷包裹体, 因此通过公式计算得到皖南地区孤峰组方解石脉中单相甲烷包裹体密度为 $0.2295 \sim 0.2618\text{ g}/\text{cm}^3$ 。甲烷的临界密度为 $0.162\text{ g}/\text{cm}^3$ (刘斌和沈昆, 1999), 皖南地区甲烷包裹体密度明显高于甲烷临界密度, 属于超临界高密度甲烷包裹体。

3.4 高密度甲烷包裹体形成压力

流体包裹体记录地质信息, 是计算古油气藏储层中流体古温压条件的重要依据, 但是进行包

裹体捕获压力计算的时候, 常常受到包裹体组分影响很大, 由于天然矿物流体包裹体中单组分的包裹体较为少见, 而多组分的流体包裹体很难确定单个包裹体的组分含量, 因此使用多组分包裹体进行压力模拟计算可能不够精确 (Chen et al., 2007; 刘德汉等, 2010, 2013; 高键等, 2015)。皖南地区单相甲烷包裹体的发现, 提高了计算包裹体捕获压力的精确度。根据甲烷的拉曼特征峰位移来计算甲烷包裹体的捕获压力。在激光拉曼谱图中甲烷拉曼特征峰位移由 2918 cm^{-1} 至 2910 cm^{-1} , 所对应的压力可以由小于 0.1 MPa 逐渐增加到约 $60 \sim 70\text{ MPa}$, 压力与位移呈指数关系 (卢焕章等, 2004)。此次研究样品的甲烷包裹体拉曼位移主要为 2911 cm^{-1} 左右 (表 1), 常温下所对应的压力分布在 $30 \sim 40\text{ MPa}$ 。通过超临界甲烷状态方程 (Duan et al., 1992a, 1992b; 平宏伟等, 2014; 陈勇等, 2006), 模拟计算获得了气液两相盐水包裹体最小均一温度 $216.8\text{ }^\circ\text{C}$ 下的高密度甲烷包裹体的捕获压力为 $76 \sim 95\text{ MPa}$ (表 1)。结合临近调查区的泾页 1 井埋藏史获得二叠系孤峰组的古埋深约为 4500 m , 静水压力取 $0.011\text{ MPa}/\text{m}$, 估算孤峰组硅质页岩岩层古压力系数约为 1.5。此次研究计算获得的甲烷包裹体的密度和捕获压力, 对于下扬子皖南地区页岩气勘探评价以及页岩气与超压关系研究有着重要地质意义。

表 1 皖南地区二叠系孤峰组裂缝方解石脉甲烷包裹体拉曼位移、密度及捕获压力计算结果
Table 1 Calculation results of Raman displacement, density and capture pressure of methane inclusions in fractured calcite veins of the Permian Gufeng Formation in southern Anhui

样号	产出层位	宿主矿物	包裹体类型	拉曼位移峰/ cm^{-1}	压力/ MPa	密度/ (g/cm^3)	均一温度/ $^\circ\text{C}$	捕获压力/ MPa
CQ03	孤峰组	裂缝方解石脉	甲烷包裹体	2911.0	33.7881	0.2386	216.8	80.9
CQ04	孤峰组	裂缝方解石脉	甲烷包裹体	2910.6	39.7498	0.2618	216.8	95.0
CQ05	孤峰组	裂缝方解石脉	甲烷包裹体	2911.1	32.9272	0.2345	216.8	78.6
CQ06	孤峰组	裂缝方解石脉	甲烷包裹体	2911.2	31.8064	0.2295	216.8	76.0

4 地质意义

下扬子皖南地区二叠系沉积时期, 泾县位于沉积中心, 发育优质烃源岩, 有机质丰度高, 经过成烃演化, 现今孤峰组硅质页岩处于过成熟演化阶段。皖南地区孤峰组裂缝石英脉的高密度甲烷包裹体的产出, 可能反映孤峰组页岩气具有原油裂解气藏的重要特征。根据测试获得孤峰组裂缝石英脉中高密度甲烷包裹体的密度为 $0.2295 \sim$

$0.2618\text{ g}/\text{cm}^3$, 计算其在 $216.8\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下捕获压力为 $76 \sim 95\text{ MPa}$, 说明孤峰组在捕获甲烷包裹体的时期具有超压特征。

昌桥剖面孤峰组的有机质类型以 II—III 型为主, TOC 为 $3.2\% \sim 4.8\%$, R_o 为 $0.8\% \sim 2.2\%$, 处于高过成熟阶段, 有利于烃类生成。一方面由于孤峰组属于自生自储的页岩储层, 在原油裂解生气的过程中, 生成的液态烃类向密度更低的气态烃转化, 储层中的烃类体积快速增加导致压力增大; 另一方面是孤峰组为硅质页岩储层, 其顶底

板为泥岩,具有页岩泥岩的生储盖组合,原油裂解形成干气,顶底板泥岩的岩性致密,渗透性差,导致源岩内油气排出运移不畅形成超压(刘若冰, 2015; 郭彤楼, 2016; Gao et al., 2019),为孤峰组硅质页岩储层的生烃增压创造了有利条件。

皖南地区经历了复杂的构造改造,且中生代以来,岩浆活动十分显著,对有机质的热演化有很大影响,受到岩浆烘烤的作用,烃类的保存尤为重要。该区燕山期构造抬升使孤峰组抬升,生烃演化基本停止,储层内的超压处于构造调整阶段,盆地内构造稳定区为孤峰组硅质页岩的超压得以保存创造有利条件(胡东风等, 2014),而构造复杂地区由于经历强烈的构造改造作用,发育大量断裂,储层中超压逐步遭受破坏。

综上所述,皖南地区的孤峰组超压主要是生烃作用引起的储层增压与构造抬升阶段构造稳定区储层保压共同作用的结果。下扬子皖南地区页岩气预测有利区可将超压作为一个指标进行页岩气勘探评价(刘洪林等, 2016),由于下扬子地区有机质成熟度高,构造运动强烈,断裂发育,保存条件差,寻找超压的稳定构造区有利于提高页岩选区的准确性。

5 结论

对皖南地区泾县昌桥剖面二叠系孤峰组硅质页岩裂缝中石英脉的流体包裹体进行显微激光拉曼光谱测试、冷热台测温以及拉曼光谱图谱解析,发现了高密度甲烷包裹体,并进行了甲烷包裹体密度和捕获压力计算,得到以下结论:

(1) 甲烷包裹体的拉曼散射峰位分布在 $2910.6 \sim 2911.2 \text{ cm}^{-1}$ 之间,计算得到甲烷包裹体密度为 $0.2295 \sim 0.2618 \text{ g/cm}^3$,而甲烷的临界密度为 0.162 g/cm^3 ,因此具有高密度甲烷包裹体特征。

(2) 含甲烷组分的气液两相盐水包裹体的均一温度分布在 $216.8 \sim 242.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据甲烷包裹体的拉曼散射峰位移,通过状态方程热力学计算,获得高密度甲烷包裹体在 $216.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的捕获压力为 $76 \sim 95 \text{ MPa}$,估算压力系数约为 1.5,反映该区孤峰组在捕获甲烷包裹体的时期具有超压特征。

(3) 甲烷包裹体的甲烷拉曼特征峰位移在 2911 cm^{-1} 时浓度很高,并且很少含有其他非烃组分,通过计算甲烷包裹体密度和捕获压力,揭示

了皖南地区二叠系孤峰组高演化黑色硅质页岩在地史演化过程中存在富含高压甲烷的流体现象。该区孤峰组储层超压可能主要是生烃作用引起的储层增压与构造抬升阶段构造稳定区的储层保压共同作用的结果。昌桥剖面孤峰组硅质页岩裂缝石英脉中高密度甲烷包裹体的发现,温压条件的计算,以及超压证据的分析,为皖南地区页岩气勘探评价提供了重要依据。

致谢: 中国石油大学(华东)的陈勇老师和中国地质大学(武汉)的平宏伟老师在甲烷包裹体捕获压力计算过程中提供了许多帮助;审稿专家对本论文进行了认真的审阅,提出了宝贵的建设性修改意见,特此一并表示衷心感谢!

References

- CHEN Y, ZHOU Y Q, YAN S Y, et al., 2006. The application of laser Raman spectroscopy to obtaining internal pressure of fluid inclusions [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27 (1): 69-73. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y, ZHOU Y Q, ZHANG L P, et al., 2007. Discovery of CH_4 -rich high-pressure fluid inclusions hosted in analcime from Dongying depression, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56 (4): 311-314.
- DUAN Z H, MØLLER N, GREENBERG J, et al., 1992a. The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strength from 0 to $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and from 0 to 1600 bar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (4): 1451-1460.
- DUAN Z H, MØLLER N, WEARE J H, 1992b. Molecular dynamics simulation of PVT properties of geological fluids and a general equation of state of nonpolar and weakly polar gases up to 2000 K and 20,000 bar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (10): 3839-3845.
- GAO J, HE S, YI J Z, 2015. Discovery of high density methane inclusions in Jiaoshiba shale gas field and its significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 36 (3): 472-480. (in Chinese with English abstract)
- GAO J, ZHANG J K, HE S, et al., 2019. Overpressure generation and evolution in Lower Paleozoic gas shales of the Jiaoshiba region, China: implications for shale gas accumulation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 844-859.
- GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J, 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals [M]. Tulsa, USA: Society for Sedimentary Geology: 199.
- GUO T L, 2016. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (3): 317-326. (in Chinese with English abstract)
- HANSEN S B, BERG R W, STENBY E H, 2001a. High-pressure measuring cell for Raman spectroscopic studies of natural gas [J]. *Applied Spectroscopy*, 55 (1): 55-60.

- HANSEN S B, BERG R W, STENBY E H, 2001b. Raman spectroscopic studies of methane-ethane mixtures as a function of pressure [J]. *Applied Spectroscopy*, 55 (6): 745-749.
- HU D F, ZHANG H R, NI K, et al., 2014. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shales in southeastern margins of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 34 (6): 17-23. (in Chinese with English abstract)
- HU S Z, 2000. New Consideration of Gufeng formation by stratigraphy check up [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 21 (1): 63-68. (in Chinese with English abstract)
- HUANG B J, SHI R F, ZHAO X B, et al., 2013. Geological conditions of Paleozoic shale gas formation and its exploration potential in the South Anhui, Lower Yangtze area [J]. *Journal of China Coal Society*, 38 (5): 877-882. (in Chinese with English abstract)
- LI W, HE S, ZHANG B Q, et al., 2018. Characteristics of paleo-temperature and paleo-pressure of fluid inclusions in shale composite veins of Longmaxi Formation at the western margin of Jiaoshiba anticline [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 39 (4): 402-415. (in Chinese with English abstract)
- LI Y H, DUAN H L, TAN Y, 2010. Structural division of marine Mesozoic-Paleozoic in Lower Yangtze region and its significance for petroleum exploration targets [J]. *Journal of Geomechanics*, 16 (3): 271-280. (in Chinese with English abstract)
- LIU B, SHEN K, 1999. Thermodynamics of fluid inclusions [M]. Beijing: Geological Publishing House: 27-83. (in Chinese)
- LIU D H, DAI J X, XIAO X M, et al., 2009. High density methane inclusions in Puguang Gasfield: Discovery and a T - P genetic study [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (24): 4714-4723.
- LIU D H, XIAO X M, TIAN H, et al., 2013. Multiple types of high density methane inclusions and their relationships with exploration and assessment of oil-cracked gas and shale gas discovered in NE Sichuan [J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (1): 64-71. (in Chinese with English abstract)
- LIU H L, WANG H Y, FANG C H, et al., 2016. The formation mechanism of over-pressure reservoir and target screening index of the marine shale in the South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (2): 48-54. (in Chinese with English abstract)
- LIU R B, 2015. Analyses of influences on shale reservoirs of Wufeng-Longmaxi formation by overpressure in the south-eastern Part of Sichuan basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (4): 817-827. (in Chinese with English abstract)
- LU H Z, FAN H R, NI P, et al., 2004. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press: 230-239. (in Chinese)
- LU W J, CHOU I M, BURRUSS R C, et al., 2007. A unified equation for calculating methane vapor pressures in the CH_4 - H_2O system with measured Raman shifts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (16): 3969-3978.
- OU G X, LI L Q, SUN Y M, 2006. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- PING H W, CHEN H H, RÉGIS T, 2014. Prediction model of petroleum inclusion trapping pressure constrained by methane mole content [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39 (1): 79-90. (in Chinese with English abstract)
- SEITZ J C, PASTERIS J D, CHOU I M, 1993a. Raman spectroscopic characterization of gas mixtures; I, Quantitative composition and pressure determination of CH_4 , N_2 and their mixtures [J]. *American Journal of Science*, 293 (4): 297-321.
- SEITZ J C, PASTERIS J D, CHOU I M, 1996. Raman spectroscopic characterization of gas mixtures; II, Quantitative composition and pressure determination of the CO_2 - CH_4 system [J]. *American Journal of Science*, 296 (6): 577-600.
- SEITZ J C, PASTERIS J D, MORGAN G B, 1993b. Quantitative analysis of mixed volatile fluids by Raman microprobe spectroscopy—a cautionary note on spectral resolution and peak shape [J]. *Applied Spectroscopy*, 47 (6): 816-820.
- SHI W J, XI B B, 2016. Calculation of paleo-pressure in gas reservoirs using fluid inclusions [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 38 (1): 128-134. (in Chinese with English abstract)
- SI S H, ZHAO J Z, MENG Q A, et al., 2018. The fluid inclusion Paleo pressure characteristics and geological implications of Gaotaizi tight reservoir in Qijia area of Songliao basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 51-59. (in Chinese with English abstract)
- SONG T, CHEN K, LIN T, et al., 2019. Study on geological conditions of upper Permian shale oil and gas in Lower Yangtze area of southern Jiangsu-Anhui Province [J]. *Geological Survey of China*, 6 (2): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- SONG T, LIN T, CHEN K, et al., 2017. The discovery of shale gas in Upper Permian transitional facies at Jingye-1 well in Lower Yangtze region [J]. *Geology in China*, 44 (3): 606-607. (in Chinese with English abstract)
- THOMAS A V, PASTERIS J D, BRAY C J, et al., 1990. H_2O - CH_4 - NaCl - CO_2 inclusions from the footwall contact of the Tanco granitic pegmatite: Estimates of internal pressure and composition from microthermometry, laser Raman spectroscopy, and gas chromatography [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (3): 559-573.
- XI B B, TENGGER, YU L J, et al., 2016. Trapping pressure of fluid inclusions and its significance in shale gas reservoirs, southeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 38 (4): 473-479. (in Chinese with English abstract)
- XU F F, ZHANG X H, HUANG Z Q, et al., 2019. Characteristics of the Dalong and Gufeng Formation shale reservoirs in Ningguo depression, lower Yangtze Region, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46 (2): 180-190. (in Chinese with English abstract)
- XU W L, HU S Y, LI N X, et al., 2019. Characteristics and exploration directions of inner gas source from the middle assemblage of Ordovician in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 40 (8): 900-913. (in Chinese with English abstract)
- YAN L Y, ZHENG Y, WANG C M, et al., 2019. Application of fluid inclusions methodology in the shale gas study: A review [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (S1): 103-107. (in Chinese with English abstract)

abstract)

附中文参考文献

陈勇,周瑶琪,颜世永,等,2006. 激光拉曼光谱技术在获取流体包裹体内压中的应用及讨论 [J]. 地球学报, 27 (1): 69-73.

高键,何生,易积正,2015. 焦石坝页岩气田中高密度甲烷包裹体的发现及其意义 [J]. 石油与天然气地质, 36 (3): 472-480.

郭彤楼,2016. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素 [J]. 石油勘探与开发, 43 (3): 317-326.

胡东风,张汉荣,倪楷,等,2014. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素 [J]. 天然气工业, 34 (6): 17-23.

胡世忠,2000. 对孤峰组的新认识 [J]. 火山地质与矿产, 21 (1): 63-68.

黄保家,施荣富,赵幸滨,等,2013. 下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价 [J]. 煤炭学报, 38 (5): 877-882.

李文,何生,张柏桥,等,2018. 焦石坝背斜西缘龙马溪组页岩复合脉体中流体包裹体的古温度及古压力特征 [J]. 石油学报, 39 (4): 402-415.

李亚辉,段宏亮,谈迎,2010. 下扬子区海相中、古生界地质结构分区及其油气勘探选区意义 [J]. 地质力学学报, 16 (3): 271-280.

刘斌,沈昆,1999. 流体包裹体热力学 [M]. 北京:地质出版社: 27-83.

刘德汉,戴金星,肖贤明,等,2010. 普光气田中高密度甲烷包裹体的发现及形成的温度和压力条件 [J]. 科学通报, 55 (4): 359-366.

刘德汉,肖贤明,田辉,等,2013. 论川东北地区发现的高密度甲烷包裹体类型与油裂解气和页岩气勘探评价 [J]. 地学前缘, 20 (1): 64-71.

刘洪林,王红岩,方朝合,等,2016. 中国南方海相页岩气超压机制

及选区指标研究 [J]. 地学前缘, 23 (2): 48-54.

刘若冰,2015. 超压对川东南地区五峰组—龙马溪组页岩储层影响分析 [J]. 沉积学报, 33 (4): 817-827.

卢焕章,范宏瑞,倪培,等,2004. 流体包裹体 [M]. 北京:科学出版社: 230-239.

欧光习,李林强,孙玉梅,2006. 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, 25 (1): 1-11.

平宏伟,陈红汉,RÉGIS T,2014. 甲烷摩尔含量约束的石油包裹体捕获压力预测模型 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 39 (1): 79-90.

施伟军,席斌斌,2016. 应用包裹体技术恢复气藏古压力 [J]. 石油实验地质, 38 (1): 128-134.

斯尚华,赵靖舟,蒙启安,等,2018. 松辽盆地齐家地区高台子致密油层包裹体古流体压力特征及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 51-59.

宋腾,林拓,陈科,等,2017. 下扬子皖南地区上二叠统 (泾页1井) 发现海陆过渡相页岩气 [J]. 中国地质, 44 (3): 606-607.

宋腾,陈科,林拓,等,2019. 下扬子苏皖南地区上二叠统页岩油气地质条件研究 [J]. 中国地质调查, 6 (2): 18-25.

席斌斌,腾格尔,俞俊杰,等,2016. 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, 38 (4): 473-479.

徐菲菲,张训华,黄正清,等,2019. 下扬子地区宁国凹陷大隆组—孤峰组泥页岩储层特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 46 (2): 180-190.

徐旺林,胡素云,李宁熙,等,2019. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合内幕气源特征及勘探方向 [J]. 石油学报, 40 (8): 900-913.

严礼宇,郑义,王成明,等,2019. 流体包裹体方法在页岩气研究中的应用 [J]. 地质力学学报, 25 (S1): 103-107.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

