

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.021>



泸州区块深层页岩裂缝脉体发育特征及成脉流体活动

姚程鹏¹, 伏海蛟^{1*}, 马英哲², 严德天¹, 汪虎¹, 李跃国¹, 王佳伟¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国石油西南油气田分公司气田开发管理部, 四川成都 610051

摘要: 裂缝脉体中蕴藏着天然裂缝演化与古流体充注活动等重要信息, 对于深层页岩气保存条件也有指示意义。针对泸州区块龙马溪组深层页岩裂缝脉体, 综合运用光学薄片、阴极发光、流体包裹体及微区原位等分析手段, 分析了裂缝脉体的发育特征, 研究了成脉流体活动及其成岩环境演化, 探讨了页岩气保存条件。研究发现, 深层页岩裂缝脉体主要为石英与白云石或方解石组成的复合脉体, 不同矿物之间表现出较复杂的切割关系, 盐水包裹体与高密度甲烷包裹体大量发育, 且裂缝脉体主要形成于还原性环境。整体看来, 构造抬升背景下, 深层页岩裂缝开始形成且处于不断开启或闭合过程, 3期不同性质的古流体多次充注胶结, 较封闭的成岩体系对深层页岩气的保存有利。

关键词: 泸州区块; 龙马溪组; 深层页岩; 裂缝脉体; 页岩气; 保存条件; 油气地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)05-1684-10

收稿日期: 2022-01-05

Development Characteristics of Deep Shale Fractured Veins and Vein Forming Fluid Activities in Luzhou Block

Yao Chengpeng¹, Fu Haijiao^{1*}, Ma Yingzhe², Yan Detian¹, Wang Hu¹, Li Yueguo¹, Wang Jiawei¹

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Gas Field Development and Management Department, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China

Abstract: Fracture veins contain important information such as natural fracture evolution and paleo-fluid injection activities, which is also indicative of the preservation conditions of deep shale gas. In this paper, the development characteristics of fractures and veins in the deep shale of Longmaxi Formation in Luzhou block were analyzed by means of optical thin section, cathode luminescence, fluid inclusion and in-situ microanalysis, and the activity of vein-forming fluid and its diagenetic environment evolution were studied, and the preservation conditions of shale gas were discussed. It is found that the deep shale fracture vein is mainly a composite vein composed of quartz, dolomite or calcite, showing a complex cutting relationship between different minerals, a large number of brine inclusions and high-density methane inclusions are developed, and the fracture vein is mainly formed in a reducing environment. On the whole, under the background of tectonic uplift, the deep shale fractures began to form and were in the process of continuous opening or closing. The three stages of paleo-fluid with different properties were filled and

基金项目: 中国石油科技创新基金资助项目(No.2019D-5007-0107); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No.41902173); 国家自然科学基金面上基金资助项目(No.4217020846)。

作者简介: 姚程鹏(1997—), 男, 四川眉山人, 硕士研究生。ORCID: 0000-0003-0870-8196. E-mail: 1592988926@qq.com

* 通讯作者: 伏海蛟, E-mail: fuhj@cug.edu.cn

引用格式: 姚程鹏, 伏海蛟, 马英哲, 严德天, 汪虎, 李跃国, 王佳伟, 2022. 泸州区块深层页岩裂缝脉体发育特征及成脉流体活动. 地球科学, 47(5): 1684—1693.

Citation: Yao Chengpeng, Fu Haijiao, Ma Yingzhe, Yan Detian, Wang Hu, Li Yueguo, Wang Jiawei, 2022. Development Characteristics of Deep Shale Fractured Veins and Vein Forming Fluid Activities in Luzhou Block. *Earth Science*, 47(5): 1684—1693.

cemented for many times, and the closed diagenetic system was favorable for the preservation of the deep shale gas.

Key words: Luzhou block; Longmaxi Formation; deep shale; fractured vein body; shale gas; preservation condition; petroleum geology.

四川盆地页岩气资源十分丰富,多个区块中-浅层页岩气($<3\text{ 500 m}$)勘探开发已取得了重大进展,勘探开发技术也日趋成熟(舒志恒,2018)。据自然资源部数据,截止2020年初,四川盆地南部(以下简称川南地区)长宁、威远、太阳等页岩气田新增探明地质储量均超过千亿立方米,其中,宁216-宁209井区、威208和太阳-大寨地区页岩气新增探明地质储量为7 409.7亿立方米,技术可采储量为1 784.45亿立方米,累计探明地质储量为1.06万亿立方米,形成了川南地区万亿立方米页岩气大气田。随着中-浅层页岩气勘探开发技术不断成熟,深层页岩($>3\text{ 500 m}$)作为页岩气勘探的接替区块,在多个区块也取得了新的进展。其中,泸州区块作为川南地区深层页岩气勘探开发的重点目标区,上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组下段为主要页岩气产层,该段富有机质页岩厚度大、品质优,勘探开发潜力大(董大忠等,2010;梁超等,2012;唐鑫,2018;潘占昆等,2019)。天然裂缝作为页岩气主要储集空间和渗流通道,其充填的脉体能够反映裂缝活动及地质时期古流体活动的重要地质信息,对于页岩气富集和保存条件也具有重要的指示意义(Evans, 1995; Gale *et al.*, 2014; Nie, 2020; Yang, 2021)。一般来说,天然裂缝的脉体研究主要集中在2个方面,一是通过对裂缝脉体进行岩相学观察,研究充填脉体的类型、期次以及形成的先后顺序;二是针对脉体本身矿物及其中所捕获的流体包裹体进行地球化学特征分析,探讨脉体成因、古流体的活动期次以及成脉流体地球化学性质等。在川南地区,早期针对裂缝脉体的研究多围绕中-浅层页岩开展,关于深层页岩裂缝脉体发育特征、形成期次以及古流体活动等内容研究较少,导致深层页岩裂缝脉体的形成机制不够明确。基于此,本文以川南地区泸州区块龙马溪组深层页岩裂缝为主要研究对象,针对裂缝脉体开展岩相学观察、流体包裹体均一温度测定以及激光拉曼光谱分析等,计算盐水包裹体盐度和甲烷包裹体密度,揭示流体包裹体发育特征;此外,结合盆地数值模拟结果,分析该区深层页岩裂缝形成及地质时期古流体的充注过程,探讨其对页岩气富集保存的影响,有望为泸州区块深层页岩气的勘探开发提供一

些地质依据。

1 地质概况与样品信息

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发育而来的(聂海宽等,2020),物源主要来自于康滇古陆,经历了多期构造演化旋回,下志留统龙马溪组页岩在四川盆地经历了早期深埋藏、后期强抬升的地质演化过程(潘占昆等,2019)。其中,泸州区块位于四川盆地南部,即齐岳山断裂带以西、华蓥山断裂带以东之间的区域(唐鑫,2018;潘占昆等,2019)(图1)。泸州区块地质属性为川南低陡褶皱带,该区构造格局的形成与造山带的水平挤压作用有关。此外,泸州区块褶皱和断层比较发育,伴生发育大量的天然裂缝,对于页岩气的富集与保存可产生重要影响(郭卫星等,2021)。勘探实践表明,泸州区块下志留统龙马溪组地层现今埋深主要在4 500 m以浅,岩性主要为黑色炭质页岩和硅质页岩,沉积环境为深水陆棚环境(马新华,2018),其与下伏奥陶系五峰组观音桥段生物介壳灰岩整合接触;由于沉积水体变浅,龙马溪组第1段至第5段页岩有机质含量和硅质含量降低,黏土含量变高(陈旭等,2015;聂海宽等,2017;何治亮等,2020;周政等,2020)。

本次研究中,所有页岩岩心样品均采自川南地区泸州区块一口深层页岩气井(Y-101),采样层位为龙马溪组地层,具体样品信息见表1。由图2可知,该区深层页岩裂缝多为高角度构造缝,且多被方解石、白云石或石英等矿物所充填,岩心可见裂缝长度在5~10 cm,开度则变化较大,约2 mm~2 cm,裂缝发育多与页岩层面垂直高角度相交。

2 深层页岩裂缝脉体光学与阴极发光特征

通过对脉体中矿物的光学与阴极发光特征进行观察,认为泸州区块深层页岩裂缝脉体主要表现为石英与方解石或白云石等矿物组成的复合脉,含少量的纯石英脉。其中,石英在透射光下无色,透明度较差,半自形-他形粒状,晶粒粗大,裂纹极其发育,在阴极发光镜下不发光(图3a₂);方解石在单偏

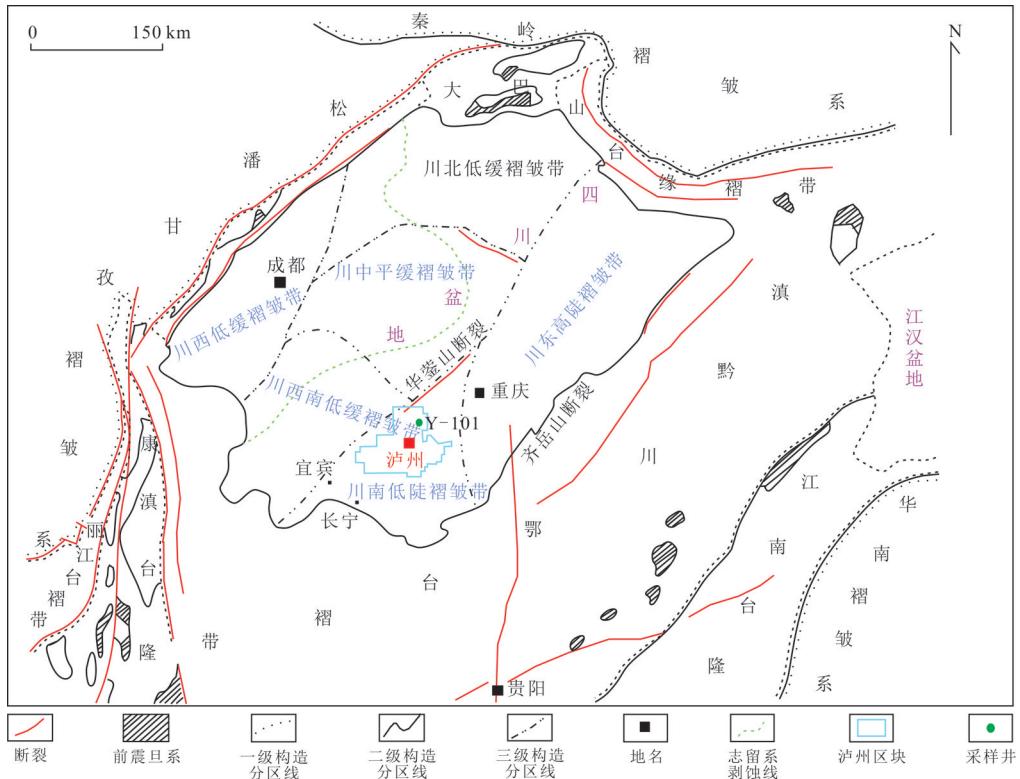


图1 四川盆地南部泸州区块构造位置(据马新华,2018修改)

Fig.1 Tectonic location map of Luzhou block, Sichuan basin (according to Ma, 2018)

表1 样品信息表

Table 1 The sampling location

井号	样品编号	采样层位	深度(m)	主要脉体类型	脉体产状
Y-101	A	龙马溪组	4 080.60	石英脉	高角度
	B	龙马溪组	3 861.00	石英脉、石英和方解石复合脉	高角度
	C	龙马溪组	3 860.76	石英脉、石英和白云石复合脉	高角度

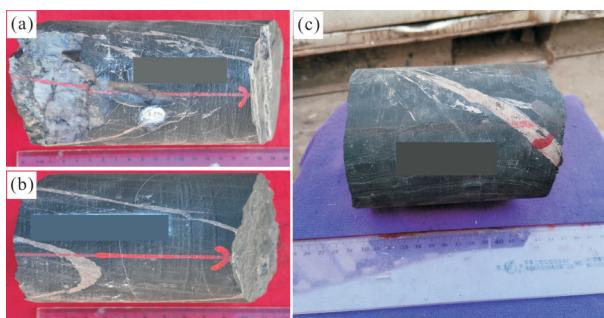


图2 研究区龙马溪组页岩裂缝脉体特征

Fig.2 The characteristics of shale fractures in the Longmaxi Formation in the study area

光下无色且透明度差,发育1~2组解理,正交偏光下呈菱形消光,在阴极发光呈橙红色,细脉状产出(图3c₁~3c₂)；白云石在透射光下无色,透明度较差,晶粒细小,充填石英,在阴极发光呈

橘黄色(图3f₂)。

由镜下观察可知,粗宽石英脉体占据主体,充填于裂缝大部分区域,且石英脉体破裂形成的缝隙常被白云石所充填(图3a₁, 3a₂),树枝状或细脉状白云石脉体可与石英颗粒伴生发育(图3b₁, 3b₂, 3e₁、3e₂),白云石脉体常与围岩呈突变接触关系(图3f₁, 3f₂)；与此同时,石英脉体常与方解石脉体呈接触发育关系(图3c₁, 3c₂, 3d₁, 3d₂),可见明显的石英细脉刺穿方解石脉体(图3c₁, 3c₂)。对比分析认为,复合脉体中不同矿物之间切割关系较为复杂,主要表现为白云石切割石英或石英切割方解石,反映了不同矿物之间沉淀胶结的先后顺序。换言之,在石英和白云石组成的复合脉体中,白云石形成时间晚于石英；在石英和方解石组成的复合脉体中,石英形成时间应该晚于方解石。

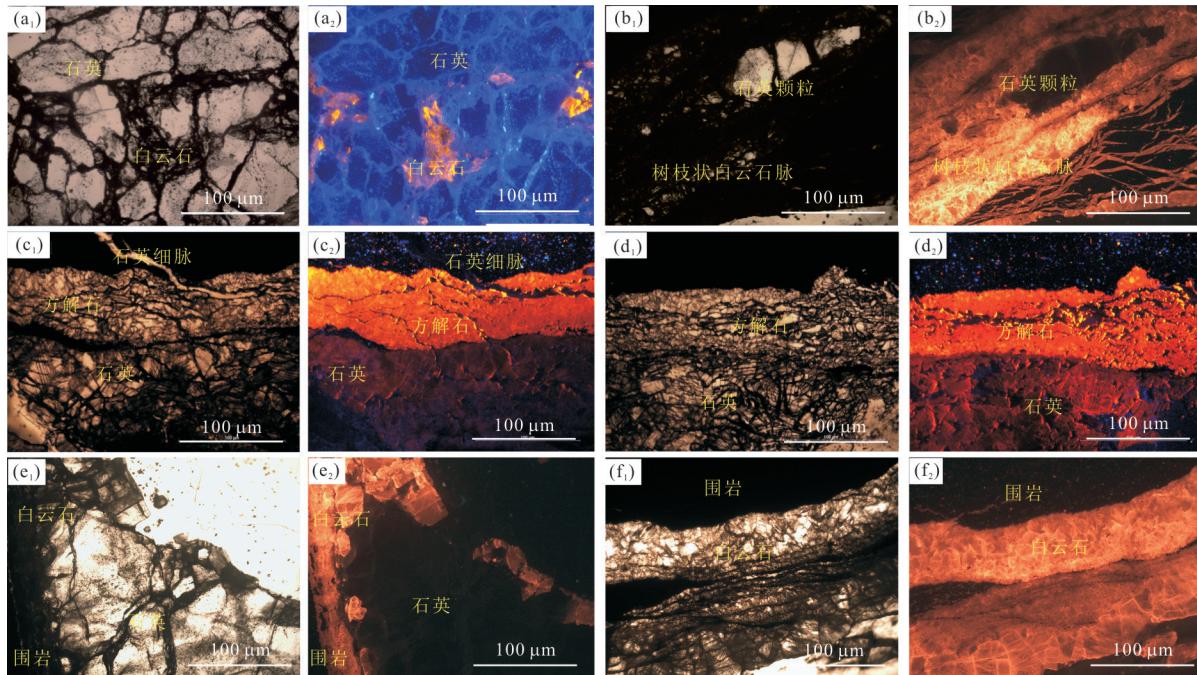


图3 裂缝脉体镜下光学和阴极发光特征

Fig.3 Optical and cathodoluminescence characteristics of the fracture veins

X_1 为普通光学特征; X_2 为阴极发光特征。a. 石英颗粒间的孔洞可见细碎白云石颗粒;b. 树枝状白云石,且白云石脉中见石英颗粒;c. 石英细脉刺穿方解石脉体;d. 方解石脉体与石英脉体直接接触;e. 白云石脉体发育于石英脉体与围岩间;f. 粗宽白云石脉体

3 深层页岩裂缝脉体中流体包裹体发育特征

3.1 流体包裹体岩相学特征

由流体包裹体薄片观察可知,流体包裹体组合为单相态的烃类包裹体和两相盐水包裹体(图4)。镜下观察发现,石英脉体在形成过程中捕获了大量甲烷包裹体及伴生的盐水包裹体,呈群状或分散状分布于石英颗粒或石英愈合缝中(图4a~4c);与此同时,发育于白云石和方解石颗粒内的流体包裹体个体极小且数量不多(图4d~4i)。其中,气液两相盐水包裹体以椭圆、不规则多边形、菱形等形态为主,群状或带状产出于石英愈合缝、石英、方解石和白云石颗粒中,长轴为2~35 μm,主体为4~20 μm,气液比大多在10%~20%,气相占比小的盐水包裹体(中间或边缘小气泡)常发生“气跳”现象;此外,甲烷包裹体数量多、分布广,形态多以不规则四边形状、纺锤状或椭圆状为主,呈群状、带状密集分布,常与盐水包裹体伴生发育,甲烷包裹体大小相差较大,长轴多在4~30 μm,呈带状、线状、群状或孤立状,具有“透镜”聚光效应,即甲烷包裹体边缘

壁薄呈黑色,中间厚呈亮白色,且透明度低。

3.2 流体包裹体激光拉曼测试

众所周知,激光拉曼光谱是分析宿主矿物与流体包裹体成分的可靠手段之一(李文等,2018)。为准确获取流体包裹体的成分,本文选取了石英脉体中不同相态、形态规则且未破损的流体包裹体进行了激光拉曼测试。激光拉曼测试结果表明,流体包裹体气相成分为甲烷或含CO₂甲烷,液相成分为水。

在甲烷包裹体的激光拉曼谱图中,除明显甲烷拉曼散射特征峰之外,部分谱图中可见到强度很弱的CO₂拉曼散射特征峰,表明部分甲烷包裹体中含有少量的CO₂。图5a为含CO₂甲烷包裹体的激光拉曼谱图,被检测的甲烷包裹体为不规则长方形,长轴为16 μm,谱图中显现出强度很高的甲烷拉曼散射特征峰(波数为2 912 cm⁻¹)以及强度相当低的CO₂拉曼散射特征峰(波数为1 282 cm⁻¹、1 394 cm⁻¹)。

两相盐水包裹体的激光拉曼谱图中,液相部分可见H₂O的拉曼散射特征峰,气相部分可见到强度很高的CH₄和强度较弱的CO₂的拉曼散射特征峰。图5b为两相盐水包裹体的激光拉曼谱图,被测定的气-液两相盐水包裹体呈菱形,气液比约为20%,长

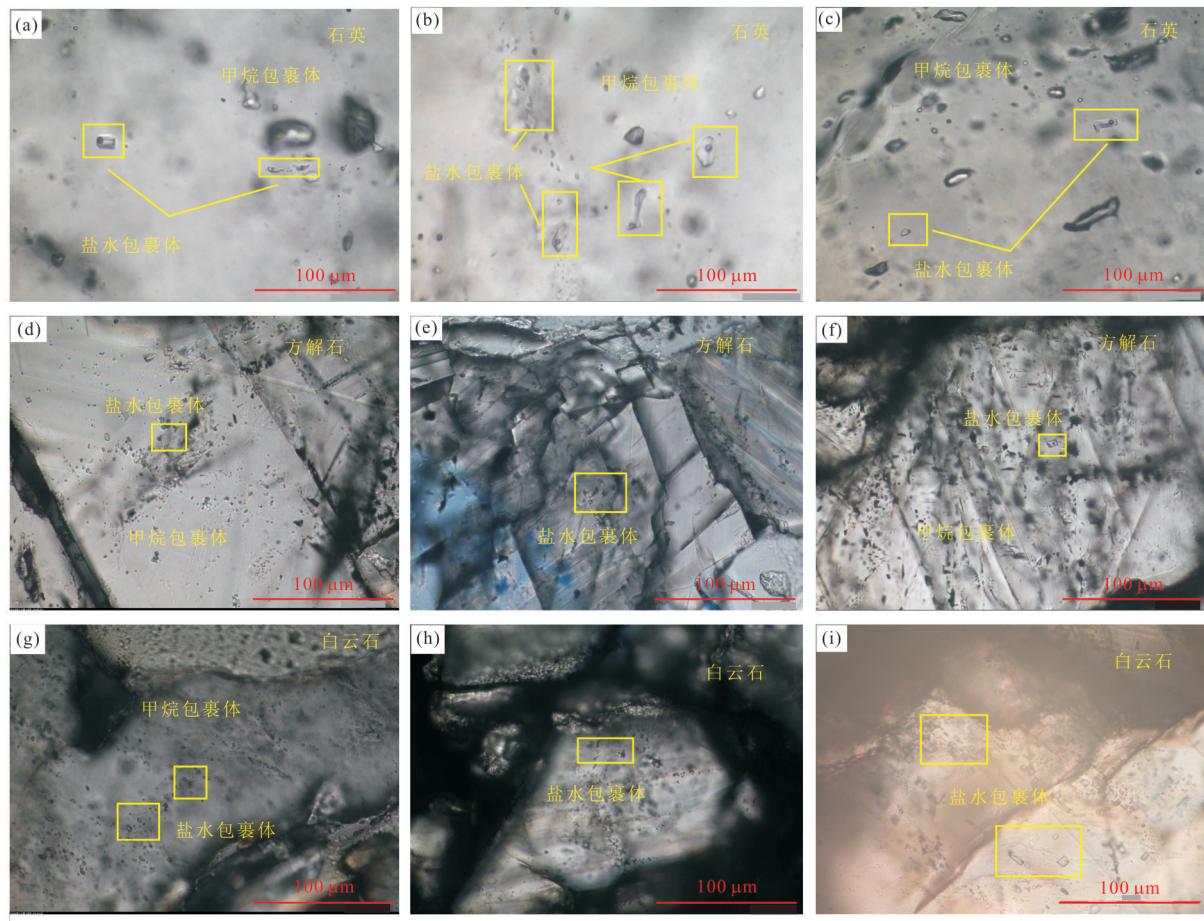


图4 深层页岩裂隙脉体中流体包裹体产状和形态特征

Fig.4 Occurrence and morphological characteristics of fluid inclusions in deep shale fracture veins

a~c. 龙马溪组, 4 080.60 m, 石英中气态烃及其伴生盐水包裹体(a、b发育于石英愈合缝中,c发育于石英颗粒中); d~e. 龙马溪组, 3 861.00 m, 方解石中气态烃及其伴生盐水包裹体; g~i. 龙马溪组, 3 860.76 m, 白云石中气态烃及其伴生盐水包裹体

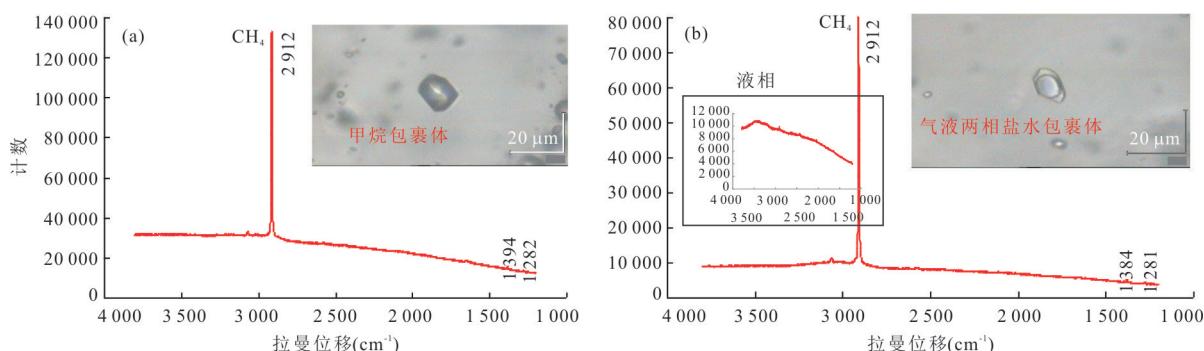


图5 石英脉体内甲烷包裹体和盐水包裹体的激光拉曼光谱图

Fig.5 Laser Raman spectra of methane and brine inclusions in quartz veins

a. 甲烷包裹体的激光拉曼图, 表现出明显甲烷拉曼散射特征峰;b. 盐水包裹体的激光拉曼图, 液相部分可见H₂O的拉曼散射特征峰, 气相部分可见到强度很高的CH₄和强度较弱的CO₂的拉曼散射特征峰

轴约为8 μm, 谱图中CH₄呈现出窄而强度高的特点, H₂O的拉曼散射特征峰(波数为3 566.765 6 cm⁻¹)表现出宽而强度弱的特点, 除此未见其他比较明显的拉曼散射特征峰。

3.3 盐水包裹体均一温度与盐度测定

对石英、方解石以及白云石等3种宿主矿物中盐水包裹体进行显微测温, 可知该区盐水包裹体均一温度分布范围较广, 主要分布于133.3~237.4 °C,

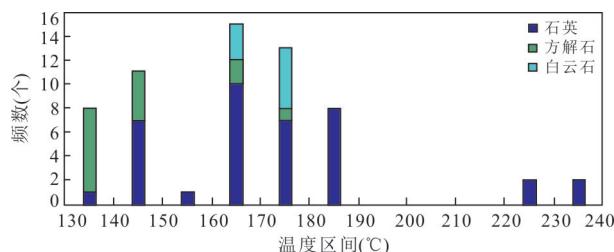


图6 裂缝脉体中3种矿物颗粒中盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig. 6 Histogram of homogenization temperature distribution of saline inclusions in quartz, dolomite and calcite in the fracture veins

平均值为167.04 ℃(图6),且明显存在3个温度集中区间。其中,第1个均一温度峰值位于140~150 ℃(较低温度),第2个峰值集中于160~170 ℃(中温度),第3个峰值则分布于220~230 ℃(高温度)。对不同宿主矿物进行分类分析可知,不同宿主矿物中盐水包裹体均一温度分布范围以及集中区间存在明显差异。其中,石英中盐水包裹体均一温度主要集中于140~150 ℃、160~190 ℃、220~240 ℃三个温度区间,这与裂缝脉体的光学与阴极发光特征相吻合(即复合脉体中石英脉多期次发育)。与此同时,方解石中盐水包裹体均一温度则主要集中于130~150 ℃,白云石中盐水包裹体均一温度主要集中于160~180 ℃。对比分析可知,石英中盐水包裹体均一温度分布范围最为广泛且存在多个温度集中区间,方解石与白云石中盐水包裹体均一温度分布范围则较为局限,反映了不同矿物结晶充填裂缝时埋深条件以及古流体温度的差异。换言之,石英矿物充填裂缝主要发育于3期不同埋深、不同温度的古流体存在时期,白云石与方解石矿物充填可能分别形成于埋深逐渐减小、古流体温度逐渐降低的构造抬升背景下。

盐水包裹体冰点与盐度测定结果如表2所示。其中,冰点值测试所选盐水包裹体均来自于宿主矿物石英中,共成功测得13个盐水包裹体的冰点温度,其他盐水包裹体由于个体太小难以有效获取。统计分析表明,盐水包裹体冰点温度范围较广,约为-6.1~-12.7 ℃,对应盐度范围为9.4%~16.7%,属于高盐度盐水包裹体,表明其形成后期受低矿化度流体的影响较小,成岩体系封闭性总体较好。由石英脉体中盐水包裹体均一温度和盐度交汇图可知,盐水包裹体均一温度-盐度分布范围呈现明显的分带现象,分别为:较低温度-较高盐度区

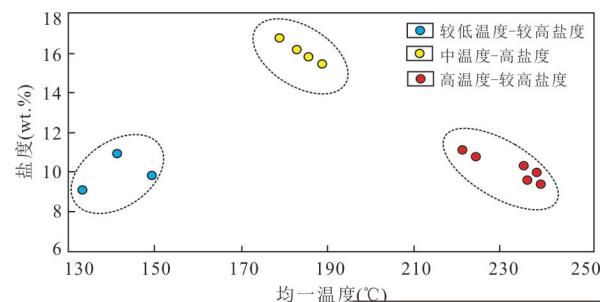


图7 石英脉中包裹体均一温度-盐度交汇图

Fig.7 Plot of inclusion homogenization temperature and salinity in quartz veins

间、中温度-高盐度区间以及高温度-较高盐度区间(图7)。

3.4 甲烷包裹体密度测定

甲烷包裹体密度主要通过甲烷包裹体激光拉曼位移参数计算获得,Zhang et al.(2016)根据实验结果拟合提出了适用于甲烷密度小于0.55 g/cm³的甲烷拉曼散射峰位移与甲烷密度的线性关系:

$$D = \nu - \nu_0 = 211.3\rho^4 - 73.238\rho^3 + 24.477\rho^2 - 29.0632\rho, \quad (3-1)$$

其中,ρ为甲烷包裹体密度,g/cm³;ν为测试所得的甲烷拉曼散射特征峰波数,cm⁻¹;ν₀为压力接近于0时的甲烷拉曼散射特征峰波数(ν₀主要受实验室校正方法的影响,本文ν₀值采用中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室激光拉曼实验室标定值2 917.58 cm⁻¹),cm⁻¹(Zhang et al., 2016;李文等,2018)。

通过对复合脉体中甲烷包裹体数据点进行采集,可知甲烷包裹体拉曼散射峰波数ν分布在2 911.6~2 912.8 cm⁻¹。通过上式,计算求得甲烷包裹体的密度值分布在0.186~0.246 g/cm³,均高于甲烷的临界密度0.162 g/cm³,表现出甲烷密度较高的特征,表明裂缝形成以及脉体胶结多发生在页岩气产气高峰阶段,也说明裂缝脉体的形成环境具有较好封闭性。

4 深层页岩裂缝脉体中矿物的微量元素地球化学特征

研究表明,V/Cr、Ni/Co、U/Th和V/(V+Ni)等微量元素参数比对于沉积环境的判别效果较好,在氧化环境下分别小于2.5、0.75和0.46,在还原环境下分别大于4.25、7.1.25和0.6,在弱氧化-还原环境下则分别居于2~4.25、5~7、0.75~1.25和0.46~

表 2 石英脉体中气液两相盐水包裹体均一温度、盐水包裹体冰点值及盐度统计

Table 2 Statistics of homogenization temperature, freezing point value and salinity of gas-liquid saline inclusions in quartz veins

测试包裹体号	均一温度(℃)	冰点温度(℃)	盐度(%)	赋存矿物
3-1	133.3	-5.91	9.1	石英
2-1	141.5	-7.32	10.9	石英
2-2	149.2	-6.44	9.8	石英
1-1	182.6	-12.2	16.2	石英
1-2	188.5	-11.4	15.4	石英
1-3	185.4	-11.8	15.8	石英
1-4	178.5	-12.7	16.7	石英
1-5	234.7	-6.8	10.3	石英愈合缝
1-6	237.4	-6.5	9.9	石英愈合缝
1-7	220.6	-7.5	11.1	石英愈合缝
1-8	235.7	-6.3	9.6	石英愈合缝
1-9	238.4	-6.1	9.4	石英愈合缝
1-10	223.5	-7.2	10.8	石英

0.6 之间(胡修棉和王成善, 2001). 由于石英具有性脆硬度高的物理性质, 对紫外激光吸收较弱, 在剥蚀的过程中激光不易穿透石英, 若使用较强的激光则石英颗粒易发生碎裂. 因此, 本次研究主要针对方解石与白云石两种矿物

进行微区原位分析, 通过对捕获不同期次流体包裹体的宿主矿物(方解石和白云石)进行微量元素测定, 进而还原不同期次流体包裹体形成过程中的氧化还原环境变化.

由表 3 和图 8 可知, 方解石与白云石矿物中大部分测试点位的 V/Cr、Ni/Co、U/Th 和 V/(V+Ni) 参数比值均分别大于 4.25、7、1.25 和 0.6, 表现出较明显的还原环境特征; 此外, 方解石中 C2-1-4、C3-1-5 和 C3-2-5 三个测试点位 V/Cr、Ni/Co、U/Th 和 V/(V+Ni) 参数比值则分别介于 2~4.25、5~7、0.75~1.25 和 0.46~0.6 之间, 表现出一定的弱氧化-还原环境. 由地温梯度可知, 古埋深越大、古流体温度越高. 由前文分析可知, 白云石矿物主要发育于中温度的古流体, 其对应较大的埋深与较好的还原性环境; 方解石矿物主要形成于低温度的古流体, 对应于相对较浅的埋深以及一定的氧化性条件. 换言之, 方解石沉淀时, 地层应该处于构造抬升背景下, 体系环境中有一定的氧逸度(即氧气在一个地质体系中的分压), 导致方解石矿物表现出一定的弱氧化性; 随后, 碳酸盐矿物胶结作用导致裂缝愈合, 地质体系中的游离氧耗尽, 由弱氧化环境逐渐演化为还原环境. 整体看来, 泸州区块深层页岩裂缝脉体主要形成于封闭性较好的还原性环境, 这与前面讨论的盐水包裹体盐度与甲烷包裹体密度等分析结果相吻合.

表 3 裂缝脉体微量元素特征参数表(10^{-6})

Table 3 Characteristic parameters of trace elements in fracture veins (10^{-6})

测试点位	V/Cr	Ni/Co	U/Th	V/(V+Ni)	氧化还原环境	矿物	捕获流体包裹体的温度
C2-1-4	/	6.524	/	0.501	弱氧化-还原	方解石	较低温度区间
C2-1-6	4.328 11	8.923	1.264 47	0.636	还原	方解石	较低温度区间
C2-1-7	4.708 86	9.943	1.550 5	0.725	还原	方解石	较低温度区间
C3-1-4	4.588 2	8.433	1.190 6	0.704	还原	白云石	中温度区间
C3-1-5	2.216 27	6.269	1.168 48	0.56	弱氧化-还原	方解石	较低温度区间
C3-1-7	3.926 23	7.583	1.389 15	0.605	还原	白云石	中温度区间
C3-2-2	6.007 83	7.176	1.757 75	0.777	还原	方解石	较低温度区间
C3-2-3	7.149 45	8.823	1.323 81	0.616	还原	白云石	中温度区间
C3-2-4	4.482 49	8.108	1.290 14	0.576	还原	白云石	中温度区间
C3-2-5	3.748 66	6.695	0.762 35	0.477	弱氧化-还原	方解石	较低温度区间
C3-2-6	4.523 05	8.271	1.400 31	0.701	还原	白云石	中温度区间
C3-2-7	4.403 73	7.018	1.306 93	0.617	还原	白云石	中温度区间

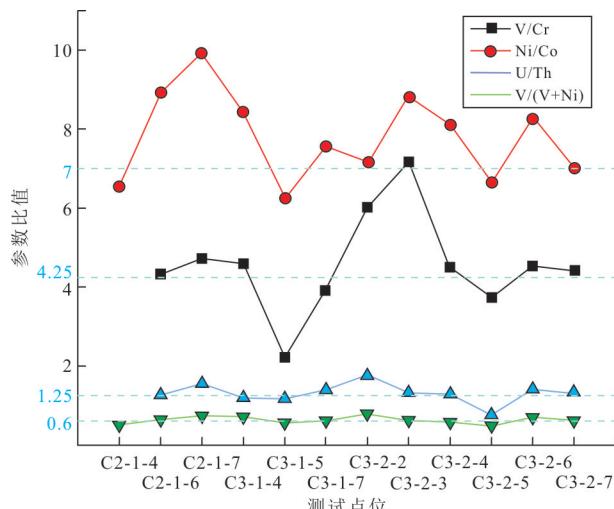


图8 裂缝脉体氧化还原环境判别参数分布特征

Fig.8 Distribution characteristics of discriminant parameters in redox environment of fractured veins

5 成脉流体活动及其成岩环境演化

一般认为,页岩储层中天然裂缝的形成、古流体活动以及脉体沉淀之间具有同期性(刘力等,2019)。基于此,本文以泸州区块深层页岩裂缝中充填脉体为切入点,主要通过对石英矿物中盐水包裹体均一温度和盐度与甲烷包裹体密度等进行综合分析,结合白云石与方解石矿物的微区原位分析结果,系统探讨天然裂缝形成过程、成脉流体活动及

其成岩环境演化。此外,基于泸州区块地层层序、岩层厚度、钻录井岩性、古今地温梯度以及剥蚀厚度等地质数据,结合区域构造背景和沉积演化特征,以Ro为约束条件,运用BasinMod模拟软件恢复了泸州区块地层埋藏史与热演化史(图9)。由数值模拟结果可知,泸州区块志留系龙马溪组页岩达到最大埋深约为6 000 m,最高地层温度超过200 °C。

由前文所述,泸州区块龙马溪组深层页岩裂缝脉体中古流体温度-盐度分布范围明显呈3个区带,表明地质历史时期至少存在3期成脉流体的充注活动。结合泸州区块地层埋藏史,认为第1期流体充注时间为110~85 Ma(即早-晚白垩世),此时龙马溪组地层正处历史最大埋深处(约6 000 m),流体沉淀主要形成石英脉体,该期古流体属于高温-较高盐度流体,成岩体系较为封闭,表现为还原性环境。第2期流体充注时间距今60 Ma左右(即早古近纪),深度约为5 000 m,流体沉淀先期胶结石英,后期白云石顺着石英脉体沉淀形成复合脉;此阶段,地层相对抬升,但脉体结晶形成的矿物具有一定封闭作用,可有效阻隔成岩体系与外界的沟通,古流体盐度相对较高,页岩气的保存条件未遭受明显破坏,仍表现出还原性环境。第3期流体充注时间约30 Ma(即早第三纪),深度约为4 000 m,低温度-较高盐度流体注入,方解石与石英先后沉淀胶结,盐度相对于第2期次稍低,成岩环境演化为弱氧化-还

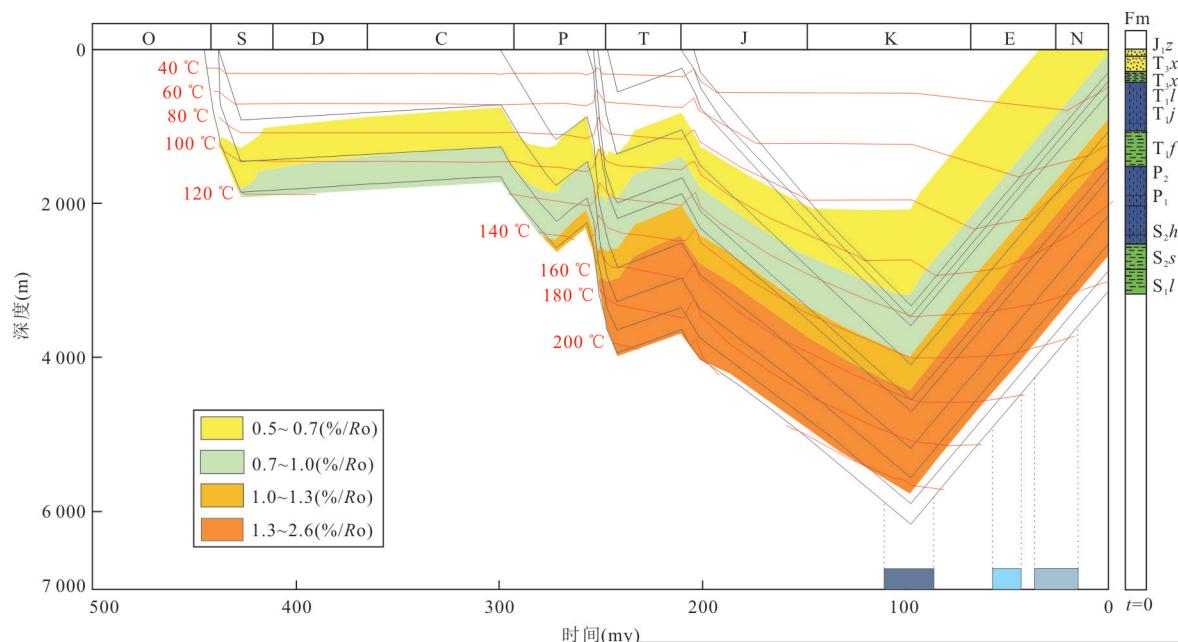


图9 泸州区块埋藏史、热演化史以及均一温度投点图

Fig.9 Burial, thermal evolution history and homogenization temperature projection of Luzhou block

原环境。分析认为,在构造抬升背景下,深层页岩在后期与外界环境可能存在一定的沟通但不强烈,页岩气保存条件未遭受明显破坏,高密度甲烷包裹体的大量出现可证明此观点。

对比泸州区块地层热演化史与石英矿物中盐水包裹体均一温度可知(图9),第1期流体充注时,裂缝脉体中石英矿物在最大埋深处初次捕获盐水包裹体,裂缝的首次开启应在这一过程之前,且石英矿物中高密度甲烷包裹体证明裂缝形成于页岩气大量生成阶段;在后期地质演化过程中,天然裂缝处于不断的开启与闭合过程,不同时期、不同性质的古流体多次充注胶结,石英、白云石和方解石等矿物以一定的顺序充填裂缝形成复合脉体。分析认为,裂缝的开启与闭合可为深层页岩气藏提供储集空间和渗流通道,较封闭的成岩体系对于深层页岩气的富集保存有利。上述研究成果,对于进一步理解泸州区块深层页岩气的富集和保存条件具有一定的理论意义。

6 结论

(1)由脉体的光学与阴极发光特征观察可知,泸州区块龙马溪组深层页岩裂缝脉体主要为石英与方解石或白云石组成的复合脉体,含少量的纯石英脉,且粗宽石英脉占主体,充填于裂缝大部分区域。由复合脉体中不同矿物之间的复杂切割关系可知,在石英和白云石组成的复合脉体中,白云石形成时间晚于石英;在石英和方解石组成的复合脉体中,石英形成时间应该晚于方解石。

(2)泸州区块龙马溪组深层页岩裂缝脉体中发育单相态的高密度甲烷包裹体和气液两相盐水包裹体。其中,3期盐水包裹体分别表现出较低温度—较高盐度、中温度—高盐度和高温度—较高盐度3种特征;此外,甲烷包裹体表现出明显的高密度特征,密度值分布在 $0.186\sim0.246\text{ g/cm}^3$,均高于甲烷的临界密度 0.162 g/cm^3 。方解石和白云石矿物的微量元素特征表明,研究区裂缝脉体主要形成于还原性环境,具有较好的封闭性条件。

(3)由盆地数值模拟可知,泸州区块志留系龙马溪组深层页岩最大埋深约6 000 m,最高地层温度超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。天然裂缝形成后地层处于持续抬升过程,成岩环境由还原环境逐步向弱氧化—还原环境演化,较封闭的成岩体系表明页岩气保存条件较好;此外,天然裂缝处于不断的开启—闭合过程中,3

期不同性质的古流体多次充注,石英、白云石和方解石等矿物以一定的顺序充填裂缝形成复合脉体。

References

- Chen, X., Fan, J.X., Zhang, Y.D., et al., 2015. Subdivision and Delineation of the Wufeng and Longmachi Black Shales in the Subsurface Areas of the Yangtze Platform. *Journal of Stratigraphy*, 39(4): 351—358 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D.Z., Cheng, K.M., Wang, Y.M., et al., 2010. Forming Conditions and Characteristics of Shale Gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze Region, China. *Oil & Gas Geology*, 31(3): 288—299, 308 (in Chinese with English abstract).
- Evans, M. A., 1995. Fluid Inclusions in Veins from the Middle Devonian Shales: A Record of Deformation Conditions and Fluid Evolution in the Appalachian Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 107(3): 327—339.
- Gale, J. F. W., Laubach, S. E., Olson, J. E., et al., 2014. Natural Fractures in Shale: A Review and New Observations. *AAPG Bulletin*, 98(11): 2165—2216. <https://doi.org/10.1306/08121413151>
- Guo, W.X., Tang, J.M., Ouyang, J.S., et al., 2021. Characteristics of Structural Deformation in the Southern Sichuan Basin and Its Relationship with the Storage Condition of Shale Gas. *Natural Gas Industry*, 41(5): 11—19 (in Chinese with English abstract).
- He, Z.L., Nie, H.K., Hu, D.F., et al., 2020. Geological Problems in the Effective Development of Deep Shale Gas: A Case Study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formations in Sichuan Basin and Its Periphery. *Acta Petrolei Sinica*, 41(4): 379—391 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.M., Wang, C.S., 2001. Summarization on the Studying Methods of the Palaeo-Ocean Dissolved Oxygen. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 65—71 (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. *Acta Petrolei Sinica*, 39(4): 402—415 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C., Jiang, Z.X., Yang, Y.T., et al., 2012. Characteristics of Shale Lithofacies and Reservoir Space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 691—698

- (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., He, S., Zhai, G.Y., et al., 2019. Diagenetic Environment Evolution of Fracture Veins of Shale Core in Second Member of Niutitang Formation in Southern Limb of Huangling Anticline and Its Connection with Shale Gas Preservation. *Earth Science*, 44(11): 3583–3597 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X.H., 2018. Enrichment Laws and Scale Effective Development of Shale Gas in the Southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(10): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H.K., He, Z.L., Liu, G.X., et al., 2020. Genetic Mechanism of High-Quality Shale Gas Reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 40(6): 31–41 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H.K., Jin, Z.J., Ma, X., et al., 2017. Graptolites Zone and Sedimentary Characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and Its Adjacent Areas. *Acta Petrolei Sinica*, 38(2): 160–174 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Z.K., Liu, D.D., Huang, Z.X., et al., 2019. Paleotemperature and Paleopressure of Methane Inclusions in Fracture Cements from the Wufeng-Longmaxi Shales in the Luzhou Area, Southern Sichuan Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 4(3): 242–253 (in Chinese with English abstract).
- Shu, Z. H., 2018. Fracture Feature of Gas-Bearing Shale Intervals of Wufeng-Longmaxi Formation in Fuling Shale Gas Field and Its Effect. *Sino-Global Energy*, 23(11): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X., 2018. Tectonic Control of Shale Gas Accumulation in Longmaxi Formation in the Southern Sichuan Basin (Dissertation). China University of Mining & Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Qiao, S. H., Lu, W. J., et al., 2016. An Equation for Determining Methane Densities in Fluid Inclusions with Raman Shifts. *Journal of Geochemical Exploration*, 171: 20–28.
- Zhou, Z., Liu, W.P., Jiang, L., et al., 2020. Multiple Fluid-Flow of the Wufeng - Longmaxi Formation in the Changning Shale-Gas Field, Southern Sichuan Basin. *Shandong Chemical Industry*, 49(2): 144–147, 151 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W., He, S., Su, A., et al., 2021. Paleo-Temperature and -Pressure Characteristics of Fluid Inclusions in Composite Veins of the Doushantuo Shale (Yichang Area, South China): Implications for the Preservation and Enrichment of Shale Gas. *Energy & Fuels*, 35(5): 4091–4105.

附中文参考文献

- 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 等, 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定. 地层学杂志, 39(4): 351–358.
- 董大忠, 程克明, 王玉满, 等, 2010. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征. 石油与天然气地质, 31(3): 288–299, 308.
- 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等, 2021. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系. 天然气工业, 41(5): 11–19.
- 何治亮, 聂海宽, 胡东风, 等, 2020. 深层页岩气有效开发中的地质问题: 以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组为例. 石油学报, 41(4): 379–391.
- 胡修棉, 王成善, 2001. 古海洋溶解氧研究方法综述. 地球科学进展, 16(1): 65–71.
- 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. 石油学报, 39(4): 402–415.
- 梁超, 姜在兴, 杨镱婷, 等, 2012. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征. 石油勘探与开发, 39(6): 691–698.
- 刘力, 何生, 翟刚毅, 等, 2019. 黄陵背斜南翼牛蹄塘组二段页岩岩心裂缝脉体成岩环境演化与页岩气保存. 地球科学, 44(11): 3583–3597.
- 马新华, 2018. 四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索. 天然气工业, 38(10): 1–10.
- 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等, 2020. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气优质储层成因机制. 天然气工业, 40(6): 31–41.
- 聂海宽, 金之钩, 马鑫, 等, 2017. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征. 石油学报, 38(2): 160–174.
- 潘占昆, 刘冬冬, 黄治鑫, 等, 2019. 川南地区泸州区块五峰组-龙马溪组页岩裂缝脉体中甲烷包裹体分析及古温压恢复. 石油科学通报, 4(3): 242–253.
- 舒志恒, 2018. 涪陵页岩气田五峰组-龙马溪组含气页岩段裂缝发育特征及其影响. 中外能源, 23(11): 30–35.
- 唐鑫, 2018. 川南地区龙马溪组页岩气成藏的构造控制(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.
- 周政, 刘文平, 姜磊, 等, 2020. 川南长宁页岩气田五峰-龙马溪组多期流体活动特征. 山东化工, 49(2): 144–147, 151.