

谢通,陈威,潘诗洋,等.鄂西地区二叠系大隆组含气页岩岩相类型及储层特征.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1154-1176. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230076.

Xie Tong, Chen Wei, Pan Shiyang, et al. Lithofacies Types and Reservoir Characteristics of Gas-Bearing Shale of Permian Dalong Formation in Western Hubei. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1154-1176. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230076.

鄂西地区二叠系大隆组含气页岩 岩相类型及储层特征

谢通¹, 陈威¹, 潘诗洋², 石万忠^{3,4}, 王亿¹, 张焱林¹, 段轲¹, 任志军¹

1. 湖北省地质调查院, 武汉 430034

2. 湖北省地质实验测试中心, 武汉 430034

3. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074

4. 构造与油气资源教育部重点实验室(中国地质大学), 武汉 430074

摘要:为研究鄂西地区上二叠统大隆组含气页岩岩相类型和储层特征,本文以鄂西地区恩施市恩地2井钻井岩心为研究对象,利用X-射线衍射全岩矿物分析(XRD)、总有机碳(TOC)质量分数测定、镜质体反射率(R_o)测定、干酪根镜检、场发射扫描电镜(FE-SEM)观察、 CO_2 和 N_2 吸附实验、页岩含气量测定、微量元素测定等方法开展精细研究。结果显示:鄂西地区二叠系大隆组主要发育的岩相类型包括硅质岩相、黏土质硅质岩相和混合质硅质岩相,其中黏土质硅质岩相是大隆组有机碳质量分数最高的岩相类型;大隆组页岩孔隙类型多样,微孔和介孔贡献了页岩主要的孔隙体积和孔比表面积;高有机碳和高黏土矿物有利于页岩气的聚集和页岩中微小孔隙(孔径 <50 nm)系统的建立,微孔和介孔中的吸附气是总含气量的重要组成部分。以含气量和有机碳质量分数为指标建立鄂西二叠系大隆组页岩评价标准,黏土质硅质岩相和混合质硅质岩相为II₁类优势岩相类型,硅质岩为II₂类页岩气优势岩相类型,恩地2井1241.0~1250.4 m井段为页岩气“甜点段”。页岩微量元素和有机碳质量分数关系表明大隆组高有机质含量是高古生产力和水体还原环境的共同结果,其中高古生产力是有机质富集的主要原因。

关键词:鄂西地区;大隆组;页岩岩相;孔隙结构;含气性;储层

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230076

中图分类号: P586

文献标志码: A

Lithofacies Types and Reservoir Characteristics of Gas-Bearing Shale of Permian Dalong Formation in Western Hubei

Xie Tong¹, Chen Wei¹, Pan Shiyang², Shi Wanzhong^{3,4}, Wang Yi¹,
Zhang Yanlin¹, Duan Ke¹, Ren Zhijun¹

收稿日期: 2023-03-30

作者简介: 谢通(1990—),男,工程师,主要从事非常规油气地质调查及页岩气储层方面的研究, E-mail: xie901126@163.com

通信作者: 陈威(1990—),男,高级工程师,主要从事油气地质调查方面的研究, E-mail: 317333356@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130803);湖北省地质局科研项目(KJ2023-16, KJ2023-14)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(42130803) and the Science and Research Project of Hubei Geological Bureau(KJ2023-16, KJ2023-14)

1. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China
2. Hubei Geological Research Laboratory, Wuhan 430034, China
3. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

Abstract: To study the lithofacies types and reservoir characteristics of gas-bearing shale in the Upper Permian Dalong Formation in western Hubei area, the drilling cores of Endi 2 Well were taken as the research object and analyzed by whole rock X-ray diffraction, organic carbon content, vitrinite reflectance, kerogen microscopy, field emission scanning electron microscopy, carbon dioxide and nitrogen physical adsorption experiments, shale gas content and trace elements. The results show that the main lithofacies types of the Permian Dalong Formation in western Hubei include siliceous rocks, clayey siliceous rocks and mixed siliceous rocks, and the clayey siliceous lithofacies has the highest average organic carbon content. The shale of Dalong Formation has multiple pore types. Micropores and mesopores contribute to the main pore volume and specific surface area of shale. High organic carbon and clay mineral content are conducive to the accumulation of shale gas and the establishment of micro-pore system (pore size < 50 nm) in shale, and the adsorbed gas in micropores and mesopores is an important part of the total gas content. This paper established the evaluation criteria of Permian Dalong Formation shale in western Hubei based on gas content and TOC. The results show that clayey siliceous lithofacies and mixed siliceous lithofacies are II_1 class advantageous lithofacies types, siliceous lithofacies are II_2 class advantageous lithofacies types, and the 1 241.0 - 1 250.4 m section of Endi 2 Well is the “sweet section” of shale gas. The relationship between trace elements and organic carbon content of shale shows that the high organic matter content of Dalong Formation is the joint result of high productivity and water reduction environment, and the high ancient productivity is the main reason for the enrichment of organic matter.

Key words: western Hubei area; Dalong Formation; shale lithofacies; pore structure; gas-bearing property; reservoir

0 引言

中国是美国之外最大的页岩气生产国,近10年来,国内石油公司在四川盆地及其邻区实现了页岩气的有效开发和利用^[1]。鄂西地区紧邻四川盆地,近些年多家企事业单位在宜昌、恩施等地区开展了针对震旦系—侏罗系多套页岩层系的调查评价工作,并在寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组和二叠系大隆组获得了页岩气发现^[2-3]。湖北省二叠系页岩气研究起步较晚,人们对其认识较薄弱,目前仅2019年和2021年在湖北恩施地区先后实施的恩地1井和恩地2井在二叠系大隆组获得了显著的页岩气发现^[4-5],2021年中国石化在湖北利川红星地区钻探的HY1井,在二叠系页岩获得了日产气 $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[6],页岩气试采效果显著。这不仅打破了中国南方页岩气“一层独辉”的局面,也为鄂西地区二叠系页岩气的勘探开发奠定了基础。

页岩岩相研究是页岩气勘探开发的基础,岩相主要受沉积环境的控制,其划分方案多样,大多以矿物组分为基础,进而引入有机质丰度、沉积构造、古生物等因素进行综合分类,不同类型的岩相储层特征具有差异性,岩相研究对于优质储层划分具有指导意义^[7-10]。页岩气主要以吸附态或者游离态赋存于页岩储层孔隙中,具有自生自储、源储一体的特点^[1]。页岩储层研究是页岩气勘探与开发的核心问题,主要包括有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度、岩石矿物成分、储集物性特征等多个方面^[11],全面多角度研究页岩储层,总结页岩气富集机理,是页岩气高效勘探的必要手段。

前人对于鄂西地区二叠系大隆组富有机质页岩岩相类型和储层综合研究较少,大多成果仅以地层露头剖面资料为基础,露头样品风化程度较高,测试结果不准确,且缺少关键的含气量数据,对下一步勘探开发指导意义不足。恩地2井位于鄂西地区恩施

市,在 1 204 ~1 256 m 井段钻遇二叠系大隆组富有机质页岩,并获取了完整的岩心。恩地 2 井大隆组平均含气量为 3.0 m³/t,最大含气量达到 5.9 m³/t,截至 2022 年,恩地 2 井是鄂西地区解吸含气量最高的页岩气调查井。本文以恩地 2 井岩心为研究对象,先利用岩心观察、偏光显微镜观察、X-射线衍射全岩矿物分析(XRD)等方法对大隆组地层岩相进行研究,然后采用总有机碳(TOC)质量分数测定、镜质体反射率(R_o)测定、场发射扫描电镜(FE-SEM)观察、岩石孔隙度测定、岩石渗透率测定、CO₂和 N₂吸附实验、页岩含气量测定等手段,分析大隆组储层特征及优势岩相类型,最后根据岩石地球化学特征,探讨大隆组有机质富集机理,并开展该钻井页岩岩相划分、储层特征研究,确定优势岩相,以期对后续鄂西地区二叠系页岩气开发提供参考。

1 地质背景

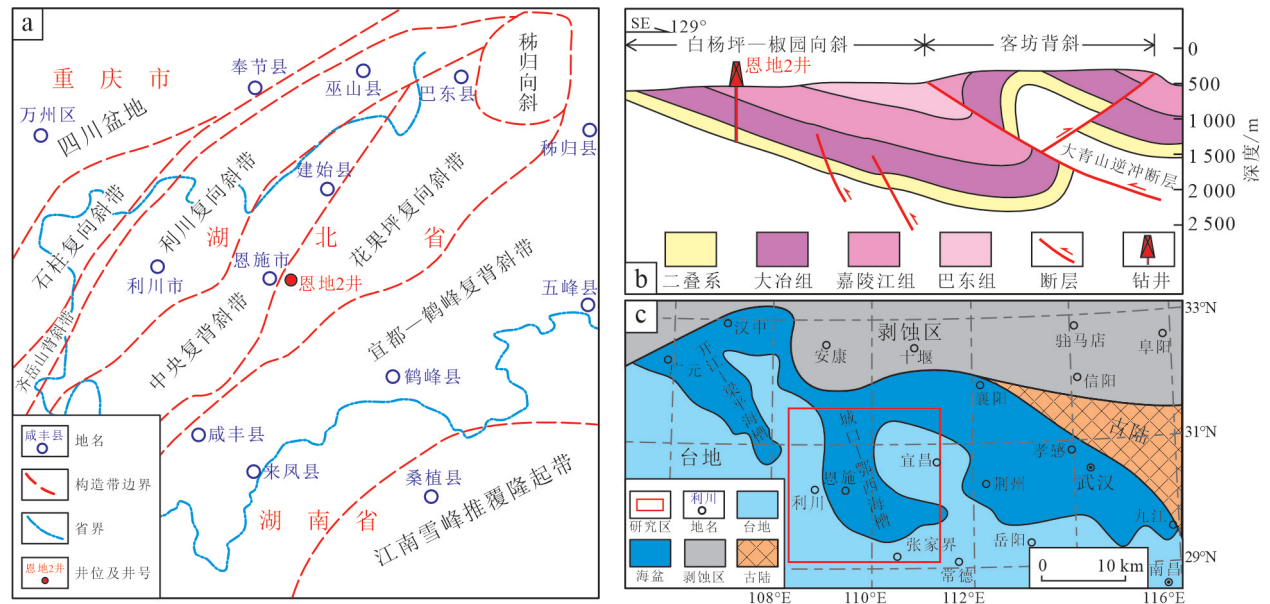
研究区位于湖北省西南部地区(图 1a),构造上属于中扬子区,西邻四川盆地,东南接江南雪峰推覆隆起带。侏罗纪末期的燕山褶皱运动造成了全区的强烈变形,形成了以北东向和北北东向为主的褶皱和断裂构造^[13]。恩地 2 井位于花果坪复向斜带西部、白杨坪—椒园向斜带中段,受白杨坪—椒园向斜

东侧大青山逆冲断层影响,该向斜呈现为西侧宽缓、东侧较紧闭的形态(图 1b)。已部署的二维地震剖面显示,该区二叠系大隆组地震同相轴振幅较强且连续分布,未表现出明显的构造变形和破碎特征,可认为该区大隆组页岩构造保存条件较好。

晚二叠世,古特提斯洋打开,中上扬子区发生了大规模的陆内裂陷,研究区西侧发育开江—梁平海槽,研究区内发育城口—鄂西海槽(图 1c)。在构造拉张作用背景下,城口—鄂西海槽一直保持到二叠纪末期^[13-14],该裂陷槽主要分布在重庆奉节—湖北恩施—湖南张家界一带,走向为南南东—北北西方向。晚二叠世在裂陷槽内沉积了深水盆地相的黑色富含硅质和碳质的泥页岩,裂陷槽两侧主要沉积了碳酸盐岩台地相的灰色厚层含生物屑灰岩,利川地区局部沉积呈点状或条带状分布的生物礁灰岩。

2 样品采集及测试方法

恩地 2 井位于晚二叠世裂陷槽内沉积区,大隆组发育了富有机质页岩,从测井曲线(图 2)可见深色泥岩段自然伽马表现为异常高值,深侧向和浅侧向电阻率值偏低;灰岩段自然伽马值偏低,深侧向和浅侧向电阻率较高,其中 1 215.0 ~1 256.0 m 井段



a 据文献[12]修编;c 据文献[14]修编。

图 1 鄂西地区构造纲要图(a)、过恩地 2 井构造剖面图(b)和晚二叠世中上扬子地区沉积相图(c)

Fig.1 Tectonic zoning map of western Hubei (a), structure profile cross Endi 2 Well (b) and Late Permian sedimentary facies map of Middle and Upper Yangtze region (c)

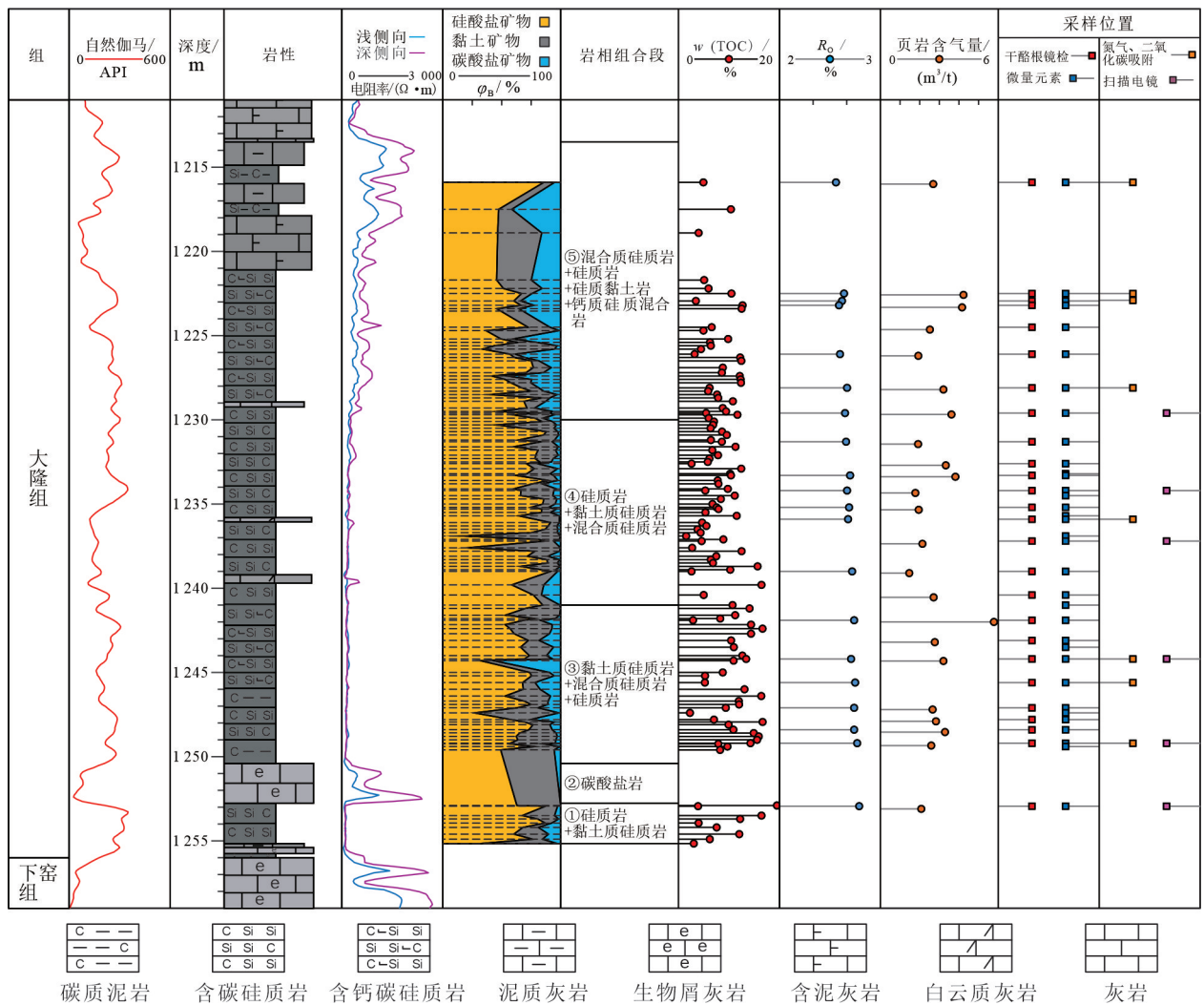


图 2 恩地 2 井大隆组高含气层段综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of high gas bearing section of Dalong Formation in Endi 2 Well

获得页岩含气量较高,本次研究实验样品主要来自恩地 2 井大隆组含气层段。共完成 120 件岩心样品总有机碳含量测定、X-射线衍射全岩矿物分析;34 件样品干酪根显微组分分析;26 样品件镜质体反射率测定;6 件样品氩离子抛光场发射扫描电镜观察;7 件样品二氧化碳和氮气吸附实验用于孔隙结构分析;23 件页岩现场含气量测定实验;35 件样品微量元素分析,样品位置如图 2 所示。

页岩 X-射线衍射全岩矿物分析,依据《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2018)^[15],在电压 40 kV、电流 40 mA 的条件下,采用理学 SmartLab SE 型 X 射线衍射仪进行。有机碳质量分数测定,依据《沉积岩中总有机碳的测定》(GB/T 19145—2022)^[16],采用日本岛津 TOC-L CPH SM5000 总有机碳分析仪进

行。干酪根显微组分测试,依据《透射光—荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法》(SY/T 5125—2014)^[17],采用 DMLD 型显微镜进行。镜质体反射率(R_o)测试,依据《沉积岩中镜质体反射率测定方法》(SY/T 5124—2012)^[18],采用德国 Leica MPM-80 体视显微镜进行。场发射扫描电镜观察采用 EVO LS 15 扫描电子显微镜系统,依据《油气储层砂岩样品扫描电子显微镜分析方法》(GB/T 18295—2001)^[19]进行。低温低压二氧化碳和氮气吸附测试均采用 Quantachrome 仪器公司的 Autosorb IQ3 全自动比表面吸附仪,二氧化碳吸附测试以二氧化碳为吸附质,测定相对压力在 0~0.03 区间内对应的气体吸附量,应用 DFT (density functional theory)模型处理数据,主要分析微孔孔隙体积和微孔比表面积;氮气吸附测试在液氮温度

(-195.8 °C)下测定氮气在不同压力下的吸附量和脱附量,应用 BJH (Barret-Joyner-Halenda) 模型计算孔隙体积及比表面积等相应参数。页岩微量元素分析,依据《硅酸盐岩石化学分析方法:第30部分:44个元素量测定》(GB/T 14506.30—2010)^[20],采用电感耦合等离子体质谱仪进行。以上样品测试均在武汉新生纪科技有限公司完成。

页岩含气量测定采用重庆地质矿产研究院生产的页岩含气量测定仪,岩心从井口取出后首先放置在密封的钢制解吸罐内,然后用软管连接解吸罐和含气量测定仪,收集岩心逸出的气体并计算气体体积,再根据页岩起始解吸速率和损失气时间计算损失气量。本次采用的页岩总含气量为解吸气和损失气之和。该实验在钻井现场自然环境下完成,最终得到的气体体积均换算为标准状态(20 °C, 101.325 kPa)下的体积。

3 矿物特征与岩相划分

3.1 矿物组分

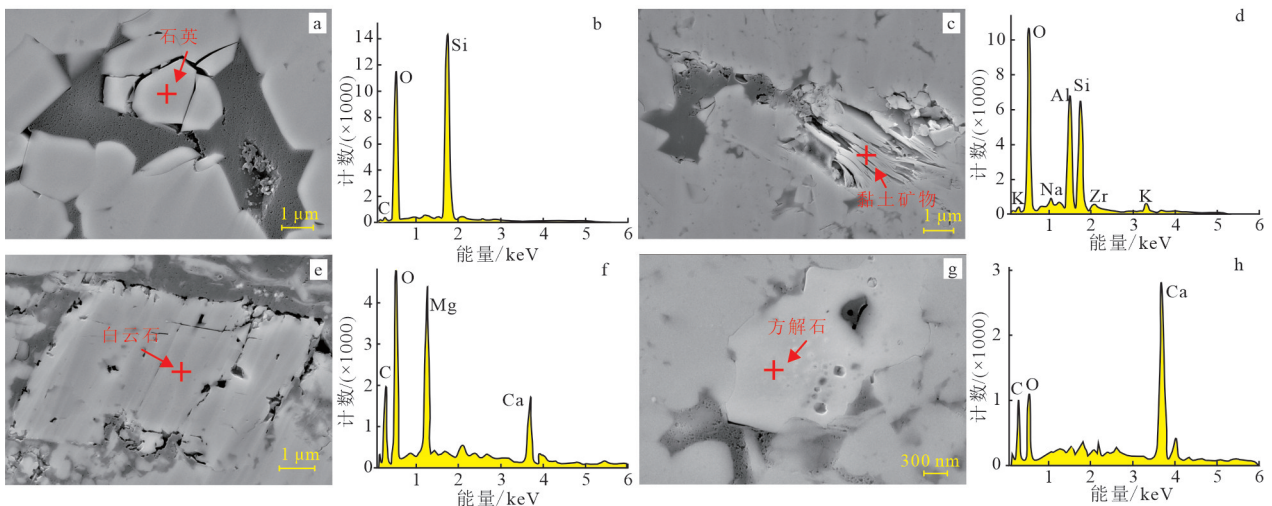
恩地2井大隆组页岩矿物组分以石英、黏土矿物、斜长石、方解石、白云石、黄铁矿和赤铁矿为主,个别样品检测出少量钾长石、菱铁矿、铁白云石和硬石膏。扫描电镜下石英通常呈不规则的多边形,偶见微裂缝发育,矿物粒径普遍介于1~10 μm之间,边缘呈次圆一次棱角状,能谱分析主要元素为O和Si(图3a、b);黏土矿物大多呈条带状或絮状,具有

成层性和较好的晶型结构,能谱分析主要元素为O、Al和Si(图3c、d);白云石一般呈较规则的四边形,矿物粒径为1~20 μm,矿物内和矿物边缘常发育溶蚀孔洞,能谱分析主要元素为O、Mg和Ca(图3e、f);方解石多呈不规则的多边形,矿物粒径为1~10 μm,矿物内常发育大小不一的溶蚀孔洞,能谱分析主要元素为C、O和Ca(图3g、h)。

由各矿物体积分数统计结果可知:石英体积分率为9.7%~87.2%,是大隆组页岩最主要的矿物成分,平均体积分数高达56.8%;黏土矿物体积分数为4.7%~80.0%,平均体积分数可达20.9%;斜长石体积分率为0.9%~22.9%,平均体积分率为6.5%;方解石体积分率为0.2%~38.4%,平均体积分率为7.3%;白云石体积分率为0.2%~48.6%,平均体积分率为3.9%;黄铁矿体积分率为0.8%~14.7%,平均体积分率为3.8%。由矿物组分分析结果可知,大隆组富有机质页岩层段是一套以石英和黏土矿物为主的硅质泥页岩。

3.2 岩相划分方案

富有机质页岩大多形成于凝缩段,一般具有非均质性较强的特点,划分页岩岩相类型对于预测储层“甜点段”有着重要的意义。国内外学者^[21-24]在页岩岩相划分方面所采用的方法还未形成统一标准,根据不同区域不同地层页岩特征,划分依据包括矿物成分、沉积结构、有机质丰度和生物特征等。国内学者^[25-26]已对扬子地区志留系龙马溪组页岩开



a、b. 石英;c、d. 黏土矿物;e、f. 白云石;g、h. 方解石。“+”为能谱扫描位置。

图3 扫描电镜下矿物特征(a、c、e、g)及能谱图(b、d、f、h)

Fig.3 Mineral characteristics in SEM (a, c, e, g) and energy disperse spectrum (b, d, f, h)

展了较深入的页岩岩相划分研究,主要采用三端元图解划分岩相。鄂西地区晚二叠世主要沉积了黑色—灰黑色薄层状含碳硅质泥岩,发育水平层理,钻井岩心和野外露头均未见到典型的沉积构造特征层段差异性,因此本次研究以硅酸盐矿物(石英+长石)、碳酸盐岩矿物(方解石+白云石)、黏土矿物三端元图解划分大隆组页岩岩相,共划分出4个岩相组合(大类)和16个岩相(类),具体划分方案见表1。

3.3 岩相特征

按照岩相划分方案^[23-24]分类统计恩地2井大隆组页岩岩相类型,结果(表1)显示大隆组富有机质页岩层段主要岩相组合为硅酸盐岩类,包括硅质岩相(S)、黏土质硅质岩相(S-1)和混合质硅质岩相(S-2),三者体积分数分别为35.8%、23.3%和21.7%。其他岩相组合多以夹层形式发育于大隆组地层中,单层厚度一般小于5 cm,钙质硅质岩相(S-3)、如硅质黏土岩相(CM-3)、黏土质硅质混合岩相(M-2)、钙质硅质混合岩相(M-3)等。相较于湖北宜昌和重庆涪陵地区龙马溪组页岩^[27-28](图4a)和美国典型页岩^[29]矿物组成(图4b)特征,恩地2井大隆组硅酸盐矿物体积分数较高,大隆组富有机质

页岩硅酸盐矿物(石英+长石)体积分数普遍超过50%(表1),碳酸盐矿物和黏土矿物体积分数较少。

根据岩相垂向分布特征,可将恩地2井大隆组富有机质页岩层段划分为5个岩相组合段(图2、表2)。如表2所示:第②岩相组合段内岩性为灰色含生物屑粉晶灰岩,不含气,本文不作详细讨论;①③④⑤组合段内硅质岩相、黏土质硅质岩相、混合质硅质岩相为主要岩相类型,对这三种岩相特征详细阐述如下。

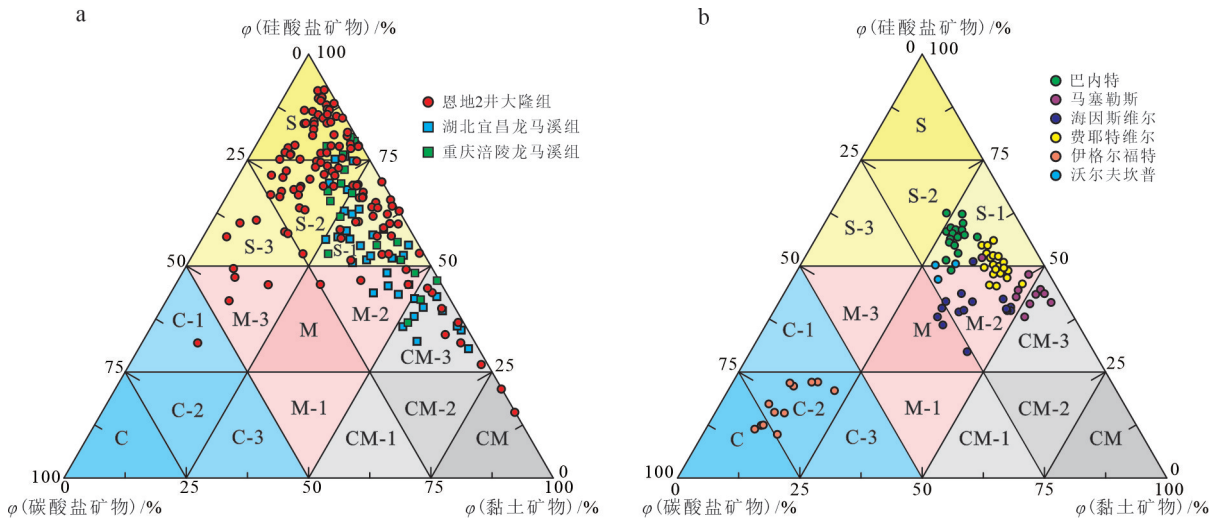
3.3.1 硅质岩相

该岩相类型在恩地2井大隆组第①和第④岩相组合段(1 252.8~1 255.2 m, 1 230.0~1 241.0 m)岩相占比较高(表2)。该岩相中石英平均体积分数为75.2%,长石平均体积分数为4.7%,方解石平均体积分数为3.9%,白云石平均体积分数为2.0%,黄铁矿平均体积分数为3.1%,黏土矿物平均体积分数为11.1%。该岩相类型岩心为黑色(图5a),发育水平层理,见少量深灰色钙质纹层,局部见数条高角度裂隙(图5b),裂隙宽度一般不超过3 mm,均被方解石完全充填,岩心硬度大,较脆,大多沿层理面和高角度裂隙碎裂成数厘米的小块。镜下观察石英多呈

表1 恩地2井大隆组页岩类型划分方案

Table 1 Lithofacies classification scheme of shale in Dalong Formation of Endi 2 Well

岩相组合 (大类)	岩相分类		矿物组分体积分数/%		
	岩相(类)	代号	硅酸盐矿物 (石英+长石)	碳酸盐岩矿物 (方解石+白云石)	黏土矿物
硅酸盐岩类	硅质岩	S	>75	0~25	0~25
	黏土质硅质岩	S-1	50~75	0~25	25~50
	混合质硅质岩	S-2	50~75	0~25	0~25
	钙质硅质岩	S-3	50~75	25~50	0~25
碳酸盐岩类	碳酸盐岩	C	0~25	>75	0~25
	黏土质碳酸盐岩	C-1	0~25	50~75	25~50
	混合质碳酸盐岩	C-2	0~25	50~75	0~25
	硅质碳酸盐岩	C-3	25~50	50~75	0~25
黏土岩类	黏土岩	CM	0~25	0~25	>75
	钙质黏土岩	CM-1	0~25	25~50	50~75
	混合质黏土岩	CM-2	0~25	0~25	50~75
	硅质黏土岩	CM-3	25~50	0~25	50~75
混合岩类	混合质页岩	M	25~50	25~50	25~50
	钙质黏土质混合岩	M-1	0~25	25~50	25~50
	黏土质硅质混合岩	M-2	25~50	0~25	25~50
	钙质硅质混合岩	M-3	25~50	25~50	0~25



a 图数据来自文献[27-28]; b 图数据来自文献[29]。

图 4 页岩矿物组成三端元图解

Fig.4 Ternary diagram of shale mineral composition

表 2 恩地 2 井大隆组岩相分布统计

Table 2 Lithofacies distribution of Dalong Formation in Endi 2 Well

岩相组合段	井深/m	主要岩相组合	岩相占比
⑤	1 213.5~1 230.0	混合质硅质岩+硅质岩+硅质黏土岩+钙质硅质混合岩	混合质硅质岩 25%, 硅质岩 24%, 硅质黏土岩 12%, 钙质硅质混合岩 12%, 钙质硅质岩 12%, 黏土质硅质混合岩 9%, 黏土质硅质岩 6%
④	1 230.0~1 241.0	硅质岩+黏土质硅质岩+混合质硅质岩	硅质岩 60%, 黏土质硅质岩 22%, 混合质硅质岩 11%, 黏土岩 5%, 硅质黏土岩 2%
③	1 241.0~1 250.4	黏土质硅质岩+混合质硅质岩+硅质岩	黏土质硅质岩 41%, 混合质硅质岩 34%, 硅质岩 13%, 钙质硅质岩 3%, 硅质碳酸盐岩 3%, 硅质黏土岩 3%, 黏土质硅质混合岩 3%
②	1 250.4~1 252.8	碳酸盐岩	碳酸盐岩 100%
①	1 252.8~1 255.2	硅质岩+黏土质硅质岩	硅质岩 45%, 黏土质硅质岩 33%, 硅质黏土岩 11%, 混合质硅质岩 11%

不定形隐晶质结构, 部分为微晶结构, 可见大量圆状-椭圆状硅质放射虫(图 5c), 反映出生物硅是大隆组硅质来源之一。

3.3.2 黏土质硅质岩相

该岩相在恩地 2 井大隆组第③岩相组合段(1 241.0~1 250.4 m)岩相占比最高(表 2、图 5d)。该岩相中石英平均体积分数为 48.2%, 长石平均体积分数为 9.2%, 方解石平均体积分数为 3.0%, 白云石平均体积分数为 2.4%, 黄铁矿平均体积分数为 6.6%, 黏土矿物平均体积分数为 30.6%。该岩相岩心为黑色-灰黑色, 水平层理较发育, 发育星点状黄

铁矿或透镜状黄铁矿集合体(图 5e), 局部见腕足生物碎片, 放射虫富集层(单层 1~5 cm)较发育, 局部发育高角度裂缝和层理缝, 被方解石完全充填, 该段岩心硬度和脆性较硅质岩相明显减小, 岩心较完整。镜下黏土质通常表现为深色鳞片状或网状分布(图 5f)。

3.3.3 混合质硅质岩相

该岩相在恩地 2 井大隆组第③和第⑤岩相组合段(1 241.1~1 250.4 m, 1 213.5~1 230.0 m)岩相占比较高(表 2)。该岩相类型石英平均体积分数为 58.7%, 长石平均体积分数为 7.4%, 方解石平均体

积分数为 10.3%，白云石平均体积分数为 4.0%，黄铁矿平均体积分数为 4.8%，黏土矿物平均体积分数为 14.8%。该岩相岩心为黑色—灰黑色(图 5g)，发育水平层理(图 5h)，夹较多灰质夹层，夹层中见生物屑(图 5i)，发育高角度裂隙和层理缝，被方解石完全充填。该井段岩相类型多，纵向变化快。镜下方解石通常为泥晶—微晶结构，层理清晰，部分样品中见腕足生物化石碎片顺层分布，并被方解石交代。

4 储层特征

4.1 有机地球化学特征

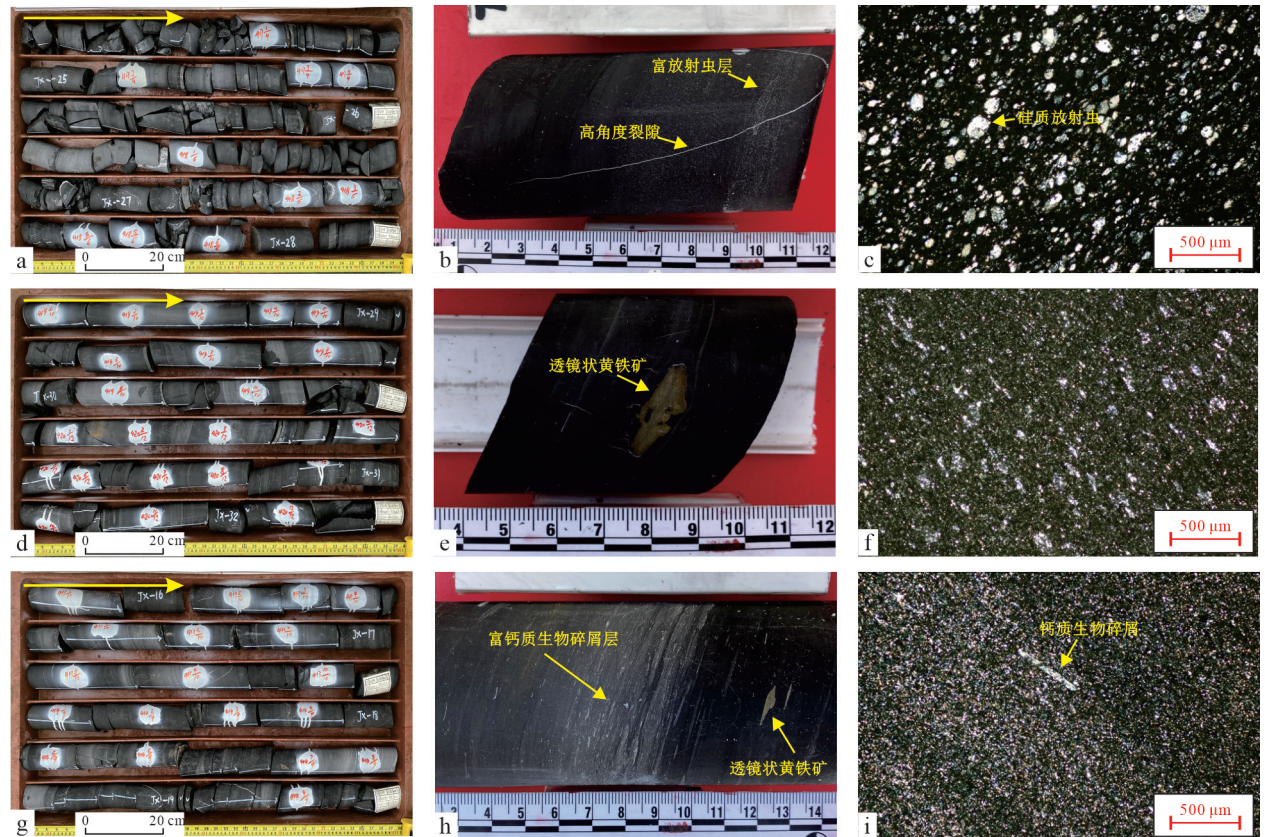
4.1.1 有机质类型

在生物显微镜下将恩地 2 井大隆组页岩干酪根

样品放大 400~600 倍进行观察，可见干酪根主要由棉絮状、团粒状腐泥组无定形体和少量无结构镜质体组成(图 6)。测得 I 型干酪根样品 26 件，类型指数^[17]平均值为 89.5，II₁型干酪根样品 8 件，类型指数平均值为 77.5；说明研究区大隆组有机质主要来源于藻类、海洋浮游生物和少量孢子等，生烃潜力较大。大隆组页岩岩心和镜下观察均发现大量硅质放射虫等生物化石，表明大隆组具较高的初级生产力。前人^[30]研究表明无定形有机质内常形成孔隙且面孔率高，是优质的页岩孔隙类型。

4.1.2 总有机碳质量分数

鄂西地区二叠系大隆组富有机质页岩具有有机碳质量分数显著高于扬子地区其他海相页岩层系的特点，前人^[31]在湖北建始、恩施、鹤峰一带采集的页



a. 岩心为黑色，硬且脆，多呈破裂状，恩地 2 井 1 236.2 ~ 1 242.2 m；b. 灰黑色含碳硅质岩相，发育一条高角度裂缝，1 232.9 m；c. 富有机质硅质岩相，见较多圆状—椭圆状硅质放射虫，1 237.6 m，正交偏光；d. 岩心为黑色—灰黑色，夹钙质条带，岩心较完整，1 242.2 ~ 1 248.2 m；e. 黑色含碳黏土质硅质岩相，水平层理，发育一处透镜状黄铁矿集合体，发育高角度细小裂缝，1 248.0 m；f. 富有机质黏土质硅质岩相，见较多黑色网状黏土质，1 247.8 m，正交偏光；g. 岩心为黑色—灰黑色，夹钙质条带，岩心较完整，1 224.2 ~ 1 230.2 m；h. 深灰色—灰黑色混合质硅质岩相，见水平层理和波状层理，发育较多生物碎屑，局部见透镜状黄铁矿，1 224.1 m；i. 混合质硅质岩相，发育富方解石条带，见生物屑，1 217.3 m。

图 5 恩地 2 井大隆组页岩岩心和薄片照片

Fig.5 Core and thin section photos of shale in Dalong Formation Endi 2 Well

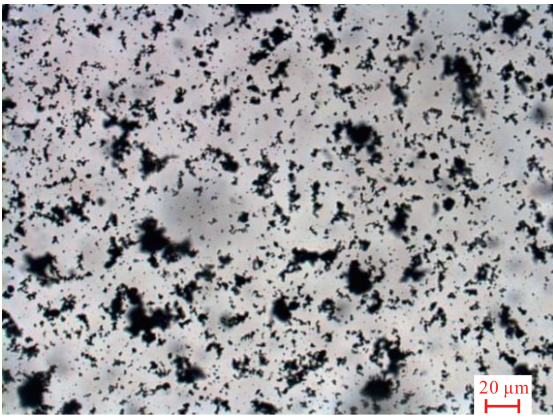


图 6 大隆组页岩样品无定形有机质图像

Fig. 6 Unstructured organic matter of shale in Dalong Formation

岩样品有机碳质量分数大多超过 4%。恩地 2 井大隆组有机碳质量分数介于 1.5%~19.5%之间,平均值为 8.9%,其中在 1 239.0~1 254.0 m 井段,平均有机碳质量分数高达 10.9%。综合分析页岩不同矿

物组分和有机碳质量分数之间的关系(图 7)可知: $w(\text{硅酸盐矿物})$ 在 0~60%区间与 $w(\text{TOC})$ 呈正相关关系, $w(\text{硅酸盐矿物})$ 在 60%~100%区间与 $w(\text{TOC})$ 呈负相关关系(图 7a); $w(\text{黏土矿物})$ 在 0~30%区间与 $w(\text{TOC})$ 呈正相关关系, $w(\text{黏土矿物})$ 在 40%~100%区间与 $w(\text{TOC})$ 呈负相关关系(图 7b); $w(\text{碳酸盐岩矿物})$ 与 $w(\text{TOC})$ 之间未显示出明显的相关性(图 7c)。虽然硅酸盐矿物和黏土矿物在不同体积分数区间表现出与 $w(\text{TOC})$ 不同的相关性,但 $w(\text{硅酸盐矿物})$ 在 0~40%和 $w(\text{黏土矿物})$ 在 40%~100%区间样品占比较小,可认为不具有统计学意义。主体数据投影位置显示,大隆组页岩 $w(\text{TOC})$ 与 $w(\text{硅酸盐矿物})$ 呈弱负相关关系,与 $w(\text{黏土矿物})$ 呈较明显的正相关关系。统计得出大隆组 $w(\text{TOC})$ 最高的岩相是黏土质硅质岩(图 7d),即 $w(\text{硅酸盐矿物})$ 约 60%, $w(\text{黏土矿物})$ 约 30%, $w(\text{碳酸盐岩矿物})$ 小于 5%的岩相类型;可见任何一种单一矿物类型高度富集均不利于有机质的富集。

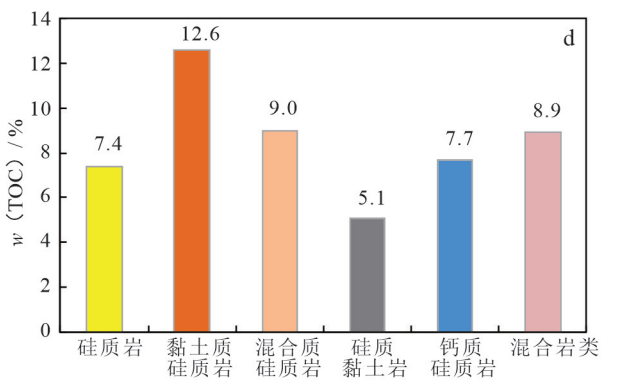
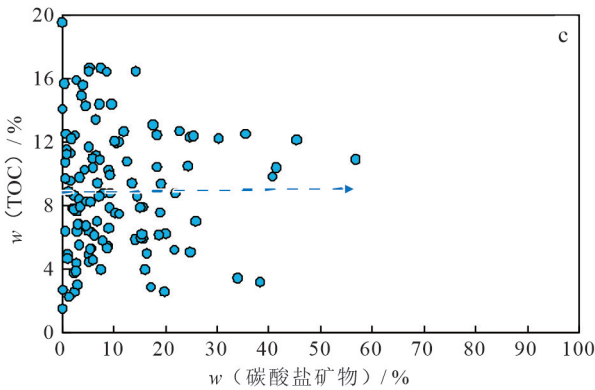
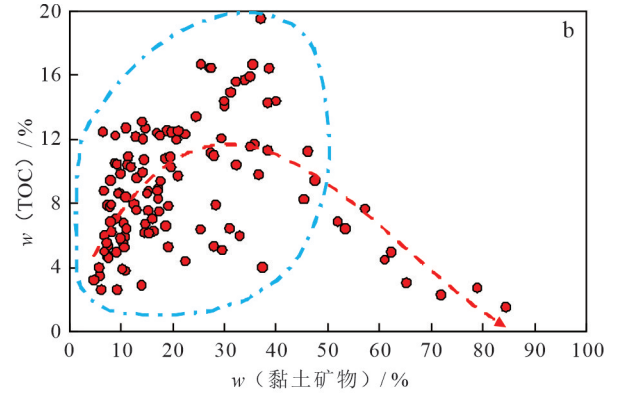
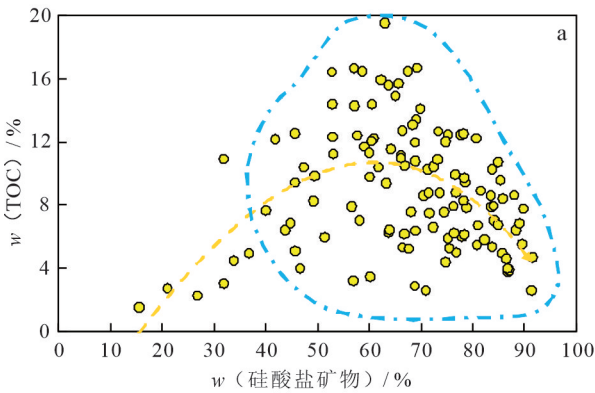


图 7 大隆组 $w(\text{TOC})$ 与矿物组成关系图(a、b、c)和不同岩相类型平均 $w(\text{TOC})$ 统计直方图(d)

Fig.7 Correlation between $w(\text{TOC})$ and mineral compositions (a, b, c), histogram of $w(\text{TOC})$ statistics for different lithofacies types (d) in Dalong Formation

4.1.3 有机质成熟度




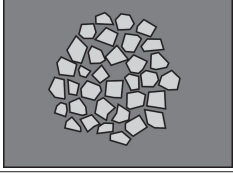


镜质体反射率测定结果显示,恩地2井大隆组页岩 R_o 为2.53%~2.79%,处于过成熟阶段早期,干酪根已经进入裂解生干气阶段;与四川盆地志留系龙马溪组 R_o 值(平均值为2.1%~3.0%)相近^[32],过成熟阶段是较有利于页岩气成藏的成熟度阶段。

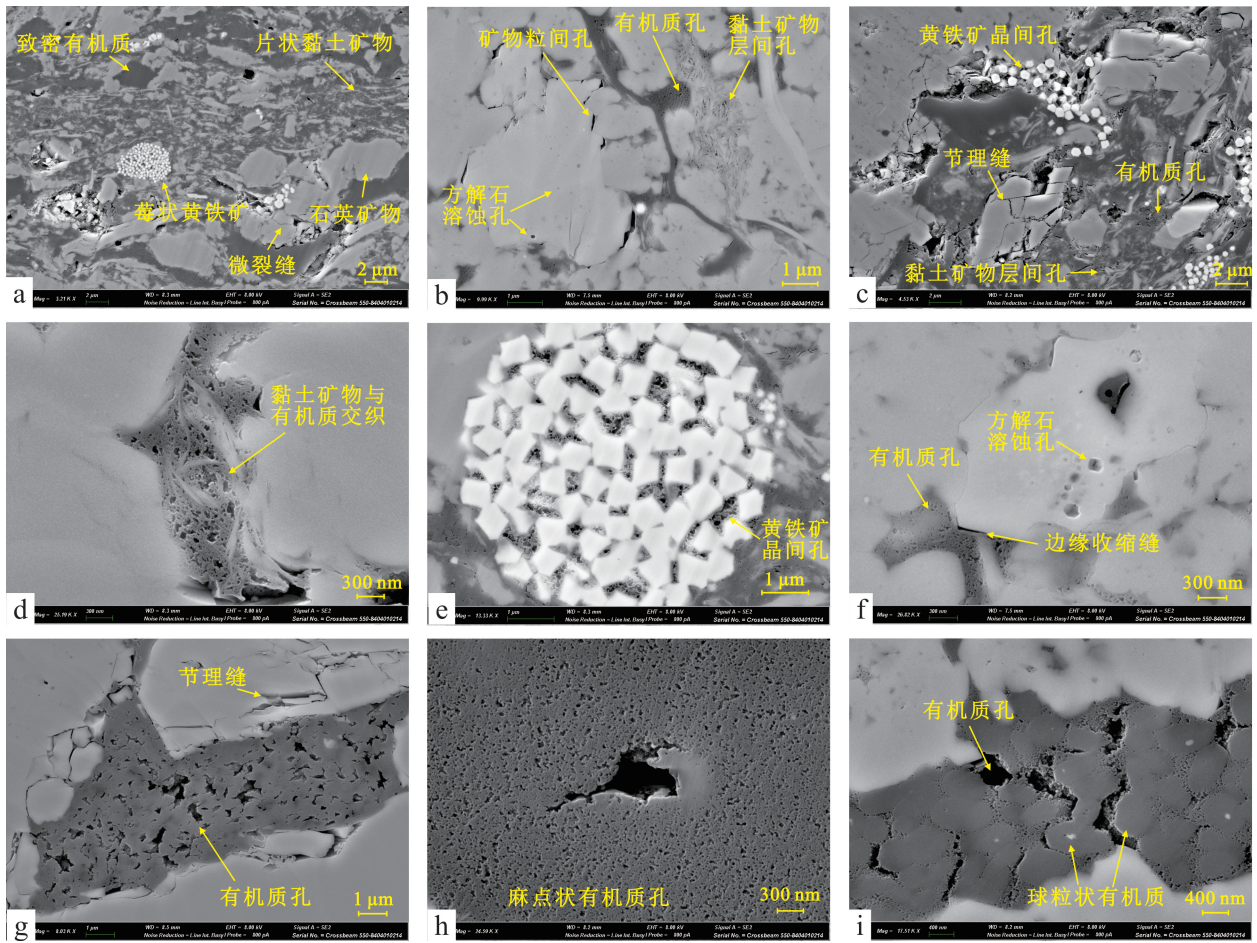
4.2 孔隙结构

扫描电镜观察表明,大隆组富有机质页岩发育的孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔和微裂缝等,其中粒内孔主要包括溶蚀孔、黏土矿物层间孔和黄铁矿晶间孔,各孔隙类型特征如表3和图8所示,其中粒间孔和有机质孔是大隆组富有机质页岩分布最广的孔隙类型。大隆组石英、方解石等脆性矿物

体积分数较高,矿物间常形成大小不一的粒间孔,尤其是以石英为主的硅质矿物形成的刚性孔隙骨架,刚性孔隙骨架可以减少在成岩过程中孔隙被压实改造。大隆组页岩有机质体积分数高,大多与黄铁矿和黏土矿物交织共生,主要呈条带状或破碎状充填在矿物粒间或裂缝内,当 $R_o \geq 0.6\%$ 时,因生烃热演化过程中的有机质消耗和成分收缩,有机质内常发育孔隙,有机质孔是大隆组泥页岩最主要的孔隙类型。观察发现大隆组的有机质大多难以辨别其生物的原始结构,因此大隆组页岩中的有机质孔隙属于次生有机质孔隙,是有机质热演化和烃类排出机制致使有机质内形成椭圆形麻点状或撕裂状的孔隙。大隆组有机质孔孔径分布在1~200 nm之间,大量的微

表3 大隆组页岩样品孔隙类型及特征
Table 3 Pore types and characteristics of Dalong Formation shale samples

孔隙类型	孔隙形态及孔径	示意图	分布特征
粒间孔	不规则多边形、狭缝型, 100~10 000 nm		形成于石英、长石、方解石、黄铁矿等脆性矿物颗粒间
溶蚀孔	圆形或椭圆形, 50~300 nm		形成于方解石、白云石、长石等矿物内部或边缘
粒内孔 黏土矿物层间孔	狭缝型、网状, 50~1 000 nm		形成于伊利石、绿泥石等片状黏土矿物层间
黄铁矿晶间孔	不规则多边形, 100~1 000 nm		形成于莓状黄铁矿微晶颗粒间,有时被有机质或黏土矿物充填
有机质孔	椭圆形、撕裂状、麻点状, 1~200 nm		各种无机孔隙内充填的有机质内大多可见
微裂缝	狭缝形,网状缝, 50~500 nm		多见于脆性矿物内或边缘



a. 黏土质硅质岩有机质与黏土矿物、黄铁矿伴生, 1 249.2 m; b. 混合质硅质岩发育多重孔隙类型, 1 244.2 m; c. 黏土质硅质岩有机质与黏土矿物、黄铁矿伴生, 1 253.0 m; d. 石英矿物粒间黏土矿物与有机质交织, 1 234.2 m; e. 黏土质硅质岩中黄铁矿晶间孔内充填有机质, 1 249.2 m; f. 混合质硅质岩中发育方解石溶蚀孔和有机质孔, 1 244.2 m; g. 硅质岩中石英矿物粒间充填有机质, 有机质孔隙较发育, 1 237.2 m; h. 硅质岩中有机质孔呈不规则麻点状, 1 229.6 m; i. 硅质岩中有机质呈球粒状紧密排列, 有机质孔主要发育在球粒边缘, 1 229.6 m。

图 8 恩地 2 井大隆组样品孔隙形态及发育特征 FE-SEM 图像照片

Fig. 8 FE-SEM pictures of morphology and development characteristics in Dalong Formation of Endi 2 Well shale samples

孔和介孔均形成于有机质孔内, 增加了气体吸附比表面积, 且其油性表面更有利于烃类气体的吸附^[33]。

恩地 2 井大隆组页岩氮气、二氧化碳吸附实验结果(表 4)显示页岩中微孔(孔径 < 2 nm)、介孔($2\text{nm} \leq \text{孔径} < 50$ nm)和宏孔(≥ 50 nm)均有发育, 孔隙体积和孔比表面积均表现出由大隆组顶至底逐渐增大的趋势。大隆组页岩孔隙中介孔是页岩孔隙总体积的主要贡献者, 计算得知平均贡献为 69%, 微孔平均贡献为 23%, 宏孔平均贡献为 8%(图 9a); 微孔是页岩孔隙总比表面积的主要贡献者, 计算得知平均贡献为 60%, 介孔平均贡献为 39%, 宏孔平均贡献小于 1%(图 9b)。

统计各孔隙参数与矿物成分之间的关系(图 10)发现, 恩地 2 井大隆组页岩 BET 比表面积, 微孔

和介孔的孔隙体积、孔比表面积均与黏土矿物体积分数呈正相关(图 10a、b、c、e、f), 并与碳酸盐矿物和硅酸盐矿物呈负相关, 而宏孔的孔隙体积和孔比表面积与各矿物组成无明显的相关性(图 10d、g)。统计孔隙参数与 $w(\text{TOC})$ 的关系发现, 页岩微孔、介孔孔隙体积与 $w(\text{TOC})$ 呈明显正相关性, 页岩 BET 比表面积、微孔比表面积、介孔比表面积与 $w(\text{TOC})$ 均呈明显的正相关性, 而宏孔的孔隙体积和孔比表面积均未与 $w(\text{TOC})$ 表现出明显的相关性(图 10h、i)。以上结果表明, 微孔和介孔是大隆组页岩气最主要的赋存空间类型, 页岩中黏土矿物和有机碳的富集有利于页岩在成岩与生烃演化过程中微孔和介孔的形成。吸附是页岩气聚集的主要方式之一, 当页岩气吸附在孔隙表面, 由于其特殊的

物理状态,不容易在构造演化中流失,微孔和介孔这种纳米级孔隙可为页岩气的储集提供大量的可吸附表面,是页岩优质的储集孔隙类型,因此微孔和介孔的发育程度是判断页岩储集条件的重要标准之一。

4.3 含气性

资料^[34]显示,湖北恩施地区地温梯度约 1.8 °C/hm。本次页岩含气量测定实验共经过两个温度的解吸阶段,分别为 38 °C(地温阶段)和 90 °C(高温阶段)(图 11,表 5)。38 °C 为模拟钻井大隆组地层温度(即地温阶段),此阶段解吸速度用于计算含气量测定实验开始前页岩气损失气量;90 °C 高温加热是为了加速页岩气的解吸附过程,以满足钻探工程进度要求。含气量测定实验开始后,当地温阶段单小时收集气体体积小于 $50 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 时,则开始高温解吸阶段;当高温解吸阶段单小时收集气体体积小于 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 时,则结束整个含气量测定实验。该实验现场得到了岩心初始气体解吸附速度、损失时间、解吸附时间、解吸附气量和岩心质量等数

据。先利用初始气体解吸附速率和损失时间计算出损失气量,再用损失气量加岩心解吸附气量,最后结合岩心样品质量计算出单位质量岩心含气量,含气量单位为 m^3/t 。

页岩气解吸附遵循由宏孔至微孔、由游离气至吸附气的过程^[35-36]。损失气时间和地温阶段解吸初期,释放的气体主要是页岩中裂缝和连通性较好的宏孔中的游离气;地温阶段解吸中期主要是页岩宏孔、微裂隙和少量介孔中的游离气和吸附气;高温解吸阶段是本次实验的关键阶段,释放的气体主要来自介孔和微孔的吸附气,该阶段是一个漫长的气体扩散释放过程,高温可以降低页岩的吸附量,加速解吸附过程^[35]。本次解吸实验高温阶段解吸气量可以反映出页岩小孔径内的吸附气量,统计可知,恩地 2 井大隆组高温阶段解吸气含量占总含气量比例平均为 53%,高温解吸气占比与黏土矿物体积分数、 $w(\text{TOC})$ 和含气量均表现正相关性(图 12a、b);证明大隆组微孔和介孔中的吸附气是总含气量的重

表 4 大隆组样品岩相类型、孔隙体积、孔比表面积、矿物组成和 $w(\text{TOC})$

Table 4 Lithofacies, pore volume, pore specific surface area, mineral composition, and $w(\text{TOC})$ in Dalong Formation samples

样品深度/m	岩相类型	BET 比表面积 / (m^2/g)	孔隙体积 / $(10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g})$			孔比表面积 / (m^2/g)			矿物体积分数 / %			$w(\text{TOC}) / \%$
			微孔	介孔	宏孔	微孔	介孔	宏孔	硅酸盐矿物	黏土矿物	碳酸盐矿物	
1 215.9	S	28.46	3.58	15.76	2.47	11.87	11.09	0.11	85.70	9.12	5.18	4.94
1 222.5	S-2	38.52	7.25	24.59	1.71	23.83	16.43	0.07	66.84	8.83	24.33	10.50
1 222.9	S-3	20.33	5.16	15.95	1.85	16.06	10.05	0.08	60.16	5.89	33.94	3.46
1 228.1	S-2	31.06	7.00	21.46	3.99	21.97	13.66	0.18	66.77	14.52	18.70	6.17
1 244.2	S-2	51.89	10.43	27.24	2.02	34.40	20.83	0.08	69.04	24.51	6.46	13.41
1 245.6	S-2	23.89	5.91	16.84	2.14	17.77	11.42	0.09	67.63	10.65	21.72	5.24
1 249.2	S-1	51.75	11.85	28.24	2.43	37.89	19.76	0.11	57.11	38.36	4.53	14.27

注: BET 为 Brunauer、Emmett 和 Teller 三位科学家的首字母组合; BET 吸附是指多层吸附,这也符合材料的实际吸附。

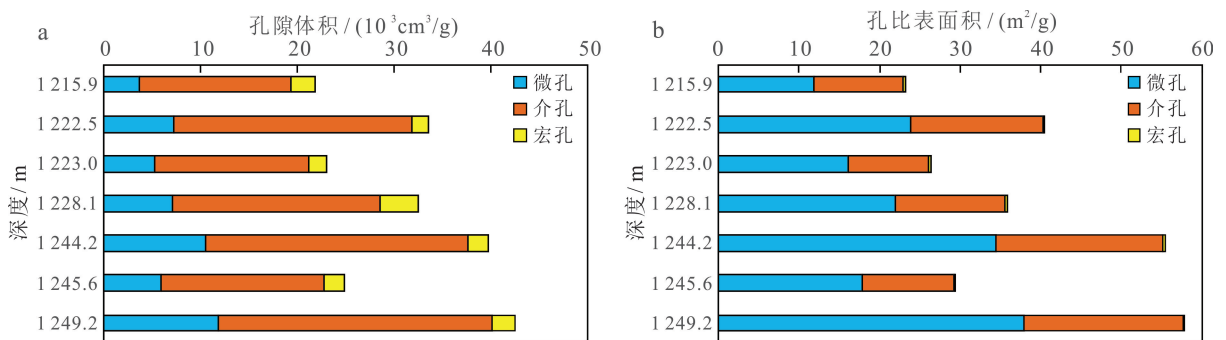


图 9 大隆组页岩样品不同孔径孔隙体积、孔比表面积占比直方图

Fig.9 Pore volume and surface area histograms within different pore diameter ranges of Dalong Formation shale samples

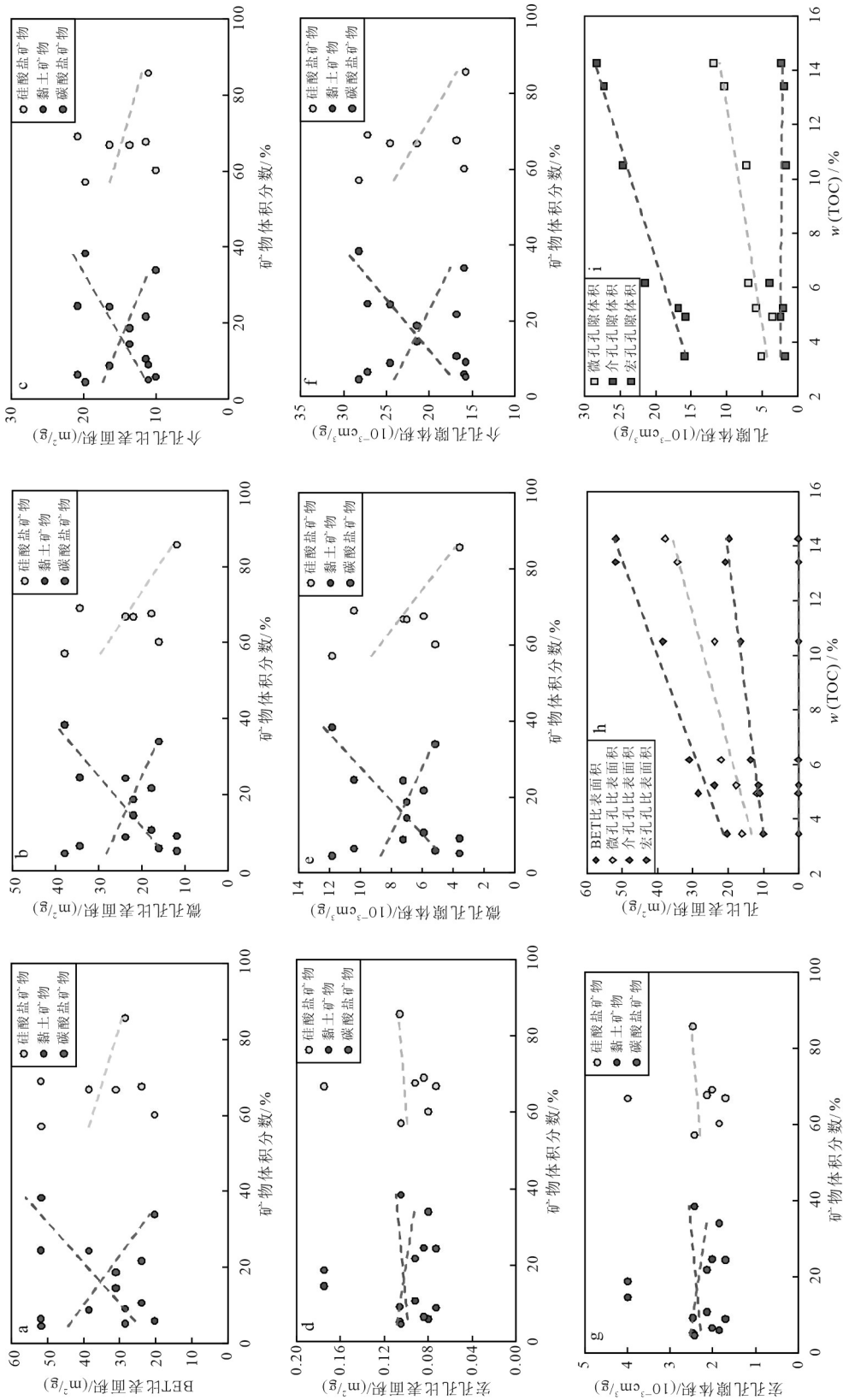


图 10 大隆组页岩样品矿物组成、 $w(\text{TOC})$ 和孔隙参数关系图
 Fig.10 Correlation between mineral compositions $w(\text{TOC})$ and pore parameters of Dalong Formation shale samples

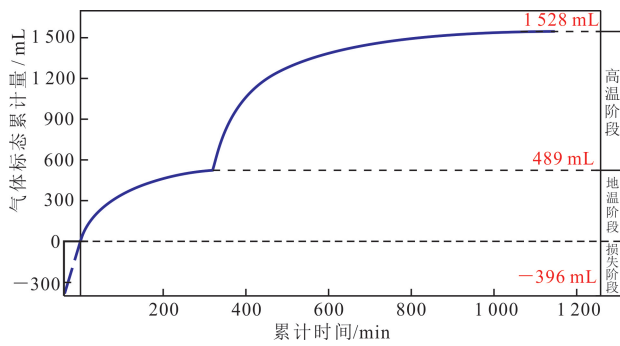


图 11 恩地 2 井大隆组岩心解吸实验曲线图

Fig.11 Desorption experiment diagram of core from Dalong Formation in Endi 2 Well

要组成部分,高体积分数的黏土矿物和有机质有利于大隆组微小孔隙系统的建立。恩地 2 井在 1 215.0~

1 253.0 m 层段岩心含气量介于 1.6~5.9 m³/t 之间,平均值为 3.0 m³/t,总含气量与 ω (TOC) 呈较明显的正相关关系(图 12c)。结合全岩 X-射线衍射矿物数据分析,恩地 2 井大隆组总含气量与黏土矿物体积分数呈正相关关系,与硅酸盐矿物呈负相关关系,与碳酸盐矿物没有较明显的相关性(图 12d);也可说明黏土矿物是研究区大隆组页岩气富集的关键矿物类型。

5 页岩气富集优势岩相

国内外目前大多观点^[3,8,27-28]认为,形成具有商业开采价值的页岩气基本条件包括高含气量、高有机质丰度、较高热成熟度和高硅质矿物。鄂西地区大隆组页岩 R₁ 介于 2.2%~2.8% 之间,总体

表 5 大隆组岩心解吸实验数据

Table 5 Desorption data of core in Dalong Formation

样品编号	损失气时间/ min	样品深度/ m	样品质量/ g	解吸气量/(10 ⁻³ m ³)				含气量/ (m ³ /t)
				地温	高温	损失气	总气量	
JX-1	28	1 216.0	850	947	1 175	246	2 368	2.8
JX-2	23	1 222.6	660	1 125	1 498	262	2 885	4.4
JX-3	40	1 223.3	625	822	1 423	408	2 653	4.2
JX-4	28	1 224.6	660	468	1 038	227	1 733	2.6
JX-5	23	1 226.2	915	662	950	177	1 789	2.0
JX-6	29	1 228.2	705	720	1 376	226	2 322	3.3
JX-7	21	1 229.7	540	434	1 339	200	1 973	3.7
JX-8	29	1 231.4	595	397	586	258	1 241	2.1
JX-9	21	1 232.7	530	481	1 161	208	1 850	3.5
JX-10	45	1 233.4	390	489	643	396	1 528	3.9
JX-11	32	1 234.3	645	379	584	259	1 222	1.9
JX-12	24	1 235.3	645	483	664	194	1 341	2.1
JX-13	35	1 237.4	790	470	1 019	319	1 808	2.3
JX-14	23	1 239.1	655	367	489	193	1 049	1.6
JX-15	37	1 240.5	655	653	895	318	1 866	2.8
JX-16	24	1 242.0	630	1 197	2 247	298	3 742	5.9
JX-17	51	1 243.2	710	818	856	423	2 097	3.0
JX-18	35	1 244.3	620	604	1 147	333	2 084	3.4
JX-19	28	1 247.2	620	542	960	246	1 748	2.8
JX-20	22	1 247.9	870	851	1 536	191	2 578	3.0
JX-21	50	1 248.5	840	794	1 656	490	2 940	3.5
JX-22	39	1 249.4	725	558	1 128	308	1 994	2.8
JX-23	30	1 253.1	700	559	753	285	1 597	2.3

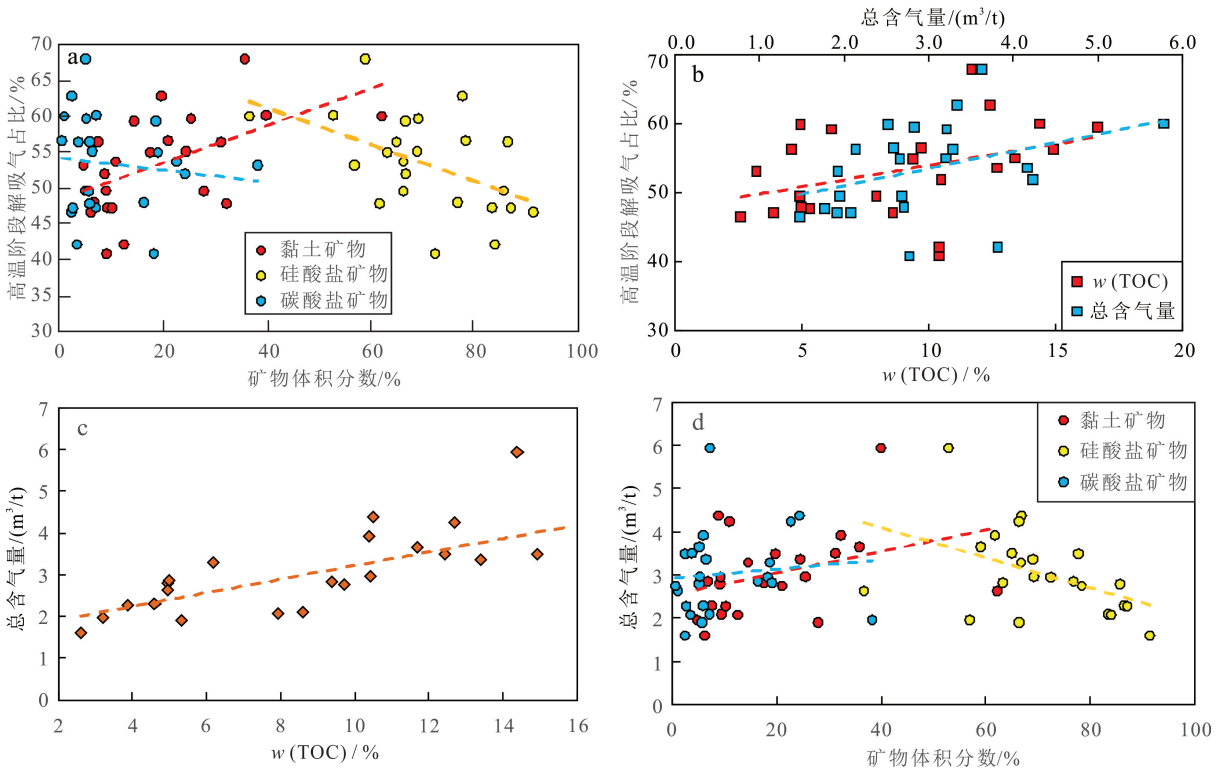


图 12 高温阶段解吸气占比与矿物体积分数(a),高温阶段解吸气占比与总含气量、 $w(\text{TOC})$ (b),总含气量与 $w(\text{TOC})$ (c)和总含气量与矿物体积分数(d)关系图

Fig.12 Correlation between proportion of desorption gas at high temperature stage and mineral composition (a), between proportion of desorption gas at high temperature stage and gas content, $w(\text{TOC})$ (b), between gas content and $w(\text{TOC})$ (c), between gas content and mineral composition (d)

处于过成熟阶段早期,是较有利于页岩气成藏的成熟度阶段。恩地2井矿物组分数据示,恩施地区大隆组含气层段页岩硅质含量高,硅酸盐矿物体积分数平均达到66%。因此页岩成熟度和硅质矿物体积分数为本次评价的常量指标,页岩含气量和有机碳质量分数是评价主要参考的变量指标。

页岩含气量是判断页岩的是否具有经济开采价值的最有效、最直接的指标。北美已商业开发的页岩气层含气量主要为1~9 m³/t,中国南方页岩气田志留系龙马溪组海相页岩的含气量为2~3 m³/t^[28],鄂西地区目前已实施的10余口针对二叠系的页岩气地质调查井现场解吸含气量为1~6 m³/t,大多为2~4 m³/t。国内外油气田常用标准^[27, 37]认为I类优势岩相的页岩含气量>4 m³/t,II类优质岩相的页岩含气量为2~4 m³/t。恩地2井页岩含气量测定实验中有3个样品含气量超过4 m³/t,其中2个样品岩相类型为混合质硅质岩,1个样品岩相类型为黏土质硅质岩,其余岩相类型样品平均含

气量均未超过4 m³/t;为了进一步划分,将含气量介于3~4 m³/t之间定义为II₁类优质岩相,含气量介于2~3 m³/t之间的定义为II₂类优质岩相。

国内外学者根据不同地区和不同层位页岩气勘探开发实践总结出了不同的有机碳质量分数评价标准,目前大多学者认为具有商业开采潜力的页岩气藏 $w(\text{TOC})$ 应不小于2%^[28],如果页岩的有效厚度较小,则商业开采的 $w(\text{TOC})$ 下限应进一步提高。鄂西地区二叠系大隆组页岩有机碳质量分数高,有效页岩层段相对较薄(<30 m),由图12c可知恩地2井总含气量与 $w(\text{TOC})$ 呈正相关,当页岩样品 $w(\text{TOC})$ 超过10%,页岩含气量显著增加,平均可达3.7 m³/t, $w(\text{TOC})$ 小于10%的页岩样品,平均含气量为2.4 m³/t, $w(\text{TOC})$ 小于4%的页岩样品,平均含气量仅为1.9 m³/t;因此本次评价认为湖北恩施地区大隆组I类优势岩相的页岩 $w(\text{TOC})$ 应大于10%,II类优质岩相的页岩 $w(\text{TOC})$ 分布在4%~10%之间,其中4%~7%为II₂类,7%~10%为II₁类。统计结果

(表6)显示:恩地2井大隆组黏土质硅质岩相 $w(\text{TOC})$ 平均为12.6%,达到I类优势岩相标准;混合质硅质岩相和硅质岩相 $w(\text{TOC})$ 平均分别为9.0%和7.4%,均达到II₁类优势岩相标准。

选取 $w(\text{TOC})$ 和总含气量指标评价下限作为综合评价结果,认为鄂西恩施地区二叠系大隆组黏土质硅质岩相和混合质硅质岩相属于II₁类页岩气优势岩相,硅质岩相属于II₂类页岩气优势岩相类型,黏土质硅质岩有机碳质量分数较混合质硅质岩更高;因此黏土质硅质岩相为鄂西恩施地区二叠系大隆组页岩气富集最优质岩相类型。恩地2井黏土质硅质岩相和混合质硅质岩相占比最高的井段位于1 241.0~1 250.4 m,该井段灰岩夹层少,大隆组富有机质页岩 $w(\text{TOC})$ 平均为11.1%,含气量平均为3.5 m³/t,最大可达5.9 m³/t,是湖北恩施地区大隆组页岩气最有利的层段,亦可称为“甜点段”。确定页岩储层“甜点段”对于页岩气的高效开发至关重要。

6 有机质富集机理探讨

含气量是判断页岩是否经济可采的关键指标^[27]。综合本次研究的各项数据,认为湖北恩施地区二叠系大隆组 $w(\text{TOC})$ 直接影响含气量(图10a), $w(\text{TOC})$ 是评判鄂西地区大隆组页岩优劣最有效的指标之一;因此大隆组有机碳富集机理是值得探讨的方向,包括影响大隆组页岩有机碳富集的主要因素是高古生产力还是缺氧环境,以及高有机碳质量分数是否与富硅质的特性相关等。前人^[38-40]对扬子地区晚二叠世硅质成因看法各异,通过元素地球化学特征分析,得出的结论主要包括生物成因、热液成因、上升流成因等。笔者认为恩施地区二叠系大隆组高硅质的形成主要与峨眉山地幔柱活动和相伴生的热液活动相关;鄂西恩施地区晚

二叠世位于裂隙槽内部,硅质岩沉积于碳酸盐岩补偿界面之下,海底热液携带富硅的营养物质上涌,致使该时期藻类、放射虫等硅质生物繁盛,在大隆组岩心上可以观察到富硅质放射虫的条带;海水富硅是晚二叠世硅质生物繁盛和大隆组页岩富硅的根本原因,也是硅质生物繁盛的主要原因,恩地2井大隆组硅酸盐矿物体积分数与 $w(\text{TOC})$ 并未呈明显的正相关关系,反而部分极高硅酸盐矿物体积分数样品有机碳质量分数较低,因此笔者认为大隆组有机质富集与硅质事件无直接关系。

沉积环境控制着页岩有机碳质量分数,鄂西大隆组页岩沉积在台地拗陷地区缺(贫)氧而富硫的还原环境中,构造运动伴随的上升流提供大量的富硅营养物质,缺氧的环境有利于有机质的保存,陆源碎屑含量整体较低^[38, 41]。恩地2井大隆组有机质类型主要为I型干酪根,镜下观察为弥散状的无定形体,扫描电镜下可以观察到有机质填充在石英、方解石等矿物间,并与层状黏土矿物交互共生。研究^[27]表明,黏土矿物对有机质具有较强的吸附作用,恩地2井大隆组 $w(\text{TOC})$ 与黏土矿物体积分数呈正相关关系,证明了高黏土矿物体积分数有利于有机质的吸附和保存。

古生产力反映了单位水体面积产生有机质的速度^[42],依据大隆组微量元素分析结果,可探讨其沉积环境和古生产力水平。Ni、Zn和Cu通常会以硫化物的形式保存在沉积物中,其质量分数可作为评价初级生产力的替代指标^[43]。恩地2井大隆组中,Ni、Zn和Cu质量分数反映该组中古生产力由底至顶逐渐降低,其中在1 230.0~1 250.0 m井段较高。

U、Mo、V等元素在还原条件下的水体中容易沉积下来,因此其元素质量分数可用来指示水体的氧化还原环境^[44]。另外一些元素的比值也常作为水体的氧化还原指标,如 $V/(V+Ni)$ 、 V/Cr 、 $U/$

表6 大隆组页岩岩相评价

Table 6 Shale lithofacies evaluation of Dalong Formation

岩相类型	$w(\text{TOC})/\%$	TOC 评价结果	总含气量/(m ³ /t)	含气量 评价结果
黏土质硅质岩	5.3~19.5/12.6(28)	I类	1.9~5.9/3.6(6)	II ₁ 类
混合质硅质岩	2.6~13.4/9.0(26)	II ₁ 类	2.8~4.4/3.5(6)	II ₁ 类
硅质岩	2.6~12.5/7.4(43)	II ₁ 类	1.6~3.5/2.5(9)	II ₂ 类

注:1.6~3.5/2.5(9)代表最小值~最大值/平均值(样品数)。其余同。

Th 和 Ni/Co 值^[45-47], 具体来讲: $V/(V+Ni) < 0.46$ 指示水体处于氧化环境, $V/(V+Ni) > 0.60$ 指示水体处于缺氧环境, $V/(V+Ni)$ 在 $0.46 \sim 0.60$ 之间指示水体处于次氧化环境; 当 $V/Cr > 4.25$ 时, 指示水体缺氧, 当 V/Cr 介于 $2.00 \sim 4.25$ 之间时指示水体贫氧环境; $U/Th > 1.25$ 时指示还原环境, $U/Th < 0.75$ 时指示氧化环境; 当 $Ni/Co < 5$ 时, 指示氧化环境, Ni/Co 值介于 $5 \sim 7$ 之间时, 指示贫氧环境, 当 $Ni/Co \geq 7$ 时, 指示缺氧环境。分析大隆组各氧化还原指标值垂向变化特征(表 7, 图 13), 其中 $V/(V+Ni)$ 与 U/Th 值显示大隆组富有机质页岩段完全处于缺氧的还原环境, 仅在局部指示为氧化-还原环境; 而 V/Cr 、 Ni/Co 值显示大隆组主体处于缺氧的还原环境, 但在部分层段存在间歇性氧化-还原环境和氧化环境水体。

结合有机碳质量分数数据分析, 恩地 2 井大

隆组 $w(TOC)$ 与古生产力指标 Ni、Zn 和 Cu 元素质量分数均表现为正相关性(图 14a); $w(TOC)$ 与氧化还原指标 V、Mo 和 Ni/Co(图 14b、c) 指示的还原性呈正相关关系, 与 U、V/Cr 和 U/Th 值指示的水体还原性呈负相关关系, 与 $V/(V+Ni)$ 值无明显相关性。因此认为该区大隆组高有机质含量是高生产力和水体还原环境的共同结果, 其中高生产力是有机质富集的更重要原因。

大隆组中下段(1 239.0 ~ 1 255.0 m) 岩心可以观察到较多灰绿色斑脱岩夹层, 夹层单层厚度 1~3 mm, 研究区二叠世晚期受到峨眉山火山事件影响^[48-50], 火山灰带来大量的营养物质, 使得该时期初级生产力提高, 水体耗氧量增大以及大规模的海侵, 导致底层水体处于缺氧的还原环境, 有机质伴随着的黏土矿物较好地保存下来。

表 7 大隆组微量元素数据

Table 7 Data of trace elements in Dalong Formation

深度/m	$w(TOC)/\%$	$w_B/10^{-6}$						V/(V+Ni)	V/Gr	U/Th	Ni/Co
		Ni	Zn	Cu	V	Mo	U				
1 210.4	2.3	64.4	39.9	30.1	68.6	8.0	1.7	0.5	1.9	0.6	3.6
1 215.9	4.9	108.5	58.7	57.8	513.1	211.9	18.2	0.8	7.9	10.0	8.0
1 222.5	10.5	172.3	98.2	76.4	1 293.6	483.4	17.8	0.9	10.0	9.5	10.8
1 223.0	3.5	101.5	111.5	42.5	733.9	130.1	17.0	0.9	9.3	7.7	5.5
1 223.2	12.7	155.0	113.9	71.6	1 207.3	466.0	23.3	0.9	10.4	5.8	10.1
1 224.5	6.6	154.6	141.1	108.8	808.7	573.4	14.0	0.8	6.3	1.7	10.1
1 226.1	3.2	78.6	53.0	42.9	408.6	109.0	9.2	0.8	7.5	4.8	6.3
1 228.1	6.2	145.0	145.4	87.1	723.3	46.8	8.8	0.8	4.6	1.7	8.0
1 229.6	5.5	104.6	76.2	54.5	483.4	173.8	56.9	0.8	5.7	15.5	7.3
1 231.3	8.6	212.4	109.0	93.1	1 383.0	337.1	24.2	0.9	8.0	8.0	11.8
1 232.6	2.6	83.1	81.8	49.5	416.5	37.1	39.3	0.8	5.8	8.1	5.2
1 233.2	10.3	236.3	167.9	114.3	1 956.4	774.2	40.2	0.9	5.0	4.8	13.0
1 233.3	10.4	254.9	183.7	87.2	1 870.9	699.3	38.1	0.9	6.2	2.0	18.4
1 234.2	5.3	164.3	159.9	116.6	1 062.5	131.3	10.3	0.9	4.6	1.5	9.5
1 234.5	11.2	284.5	246.5	145.6	2 098.7	953.7	39.9	0.9	5.0	5.5	13.3
1 235.2	7.6	134.5	82.6	101.3	1 173.8	150.5	11.9	0.9	4.8	3.5	5.7
1 235.7	11.5	292.6	180.2	144.2	2 121.4	972.8	18.0	0.9	4.9	2.5	11.2
1 235.9	0.3	34.7	345.3	12.6	41.7	16.0	2.1	0.5	0.1	2.7	4.9
1 236.9	1.5	69.3	188.0	49.6	742.0	56.4	16.2	0.9	11.8	0.4	7.7
1 237.2	4.6	122.2	68.2	53.2	722.6	77.0	15.5	0.9	4.6	5.8	3.9
1 239.0	2.6	120.7	61.3	37.6	658.5	155.7	8.2	0.8	6.4	3.4	3.1
1 240.4	5.0	91.9	60.3	36.3	304.2	14.5	3.2	0.8	3.1	1.4	3.9
1 241.0	10.7	227.8	157.8	89.7	1 437.6	298.6	16.8	0.9	6.0	2.3	6.2
1 241.9	2.9	171.5	149.8	134.1	1 478.2	126.5	6.6	0.9	5.6	1.2	9.0

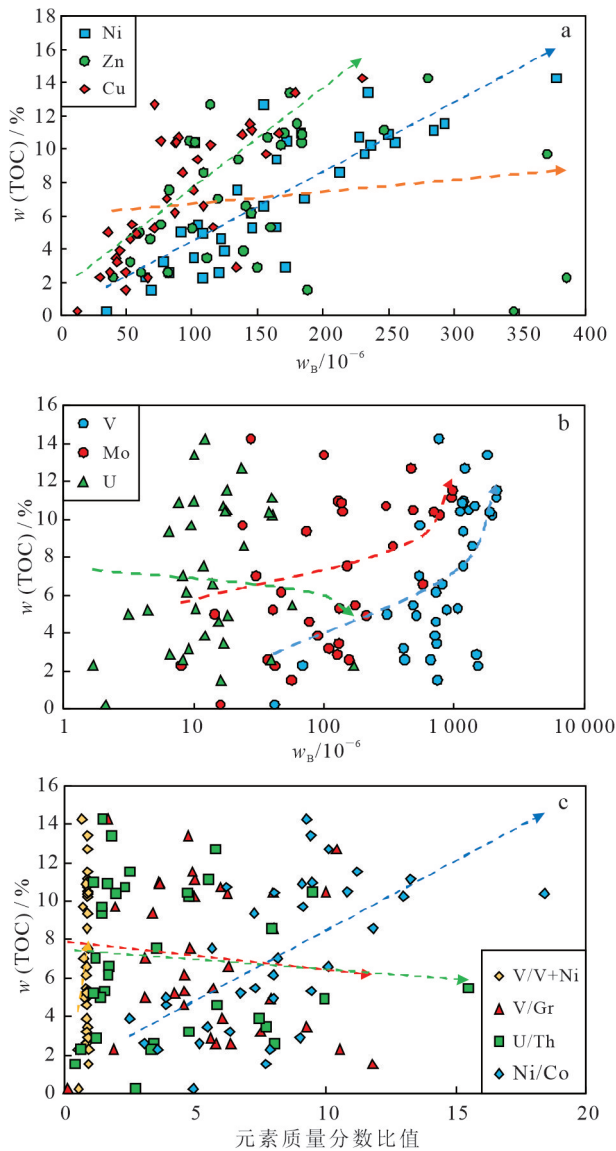


图 14 大隆组 $w(\text{TOC})$ 与古生产力指标 (a)、氧化还原指标 (b、c) 关系图

Fig.14 Correlation between $w(\text{TOC})$ and paleoproductivity indexes (a), redox indexes (b, c) in Dalong Formation

7 结论

1) 鄂西地区上二叠统大隆组富有机质页岩以硅质岩相、黏土质硅质岩相和混合质硅质岩相为主, 大隆组有机质类型主要为 I 型, 有机碳质量分数高, $w(\text{TOC})$ 平均为 8.9%, R_o 为 2.53% ~ 2.79%, 处于裂解生干气阶段。以总含气量和 $w(\text{TOC})$ 建立鄂西二叠系大隆组页岩评价标准, 恩地 2 井大隆组页岩主要属于页岩气 II 类优势岩相, 黏土质硅质岩相

和混合质硅质岩相平均含气量分布在 3.0~4.0 m^3/t 之间, 平均 $w(\text{TOC})$ 大于 7.0%, 为 II₁ 类优势岩相类型, 硅质岩平均含气量分布在 2.0~3.0 m^3/t 之间, 平均 $w(\text{TOC})$ 大于 4%, 为 II₂ 类页岩气优势岩相类型, 恩地 2 井 II₁ 类优势岩相主要分布在井深 1 241.0~1 250.4 m 段, 该段为大隆组页岩气“甜点段”。

2) 大隆组孔隙类型主要包括粒间孔、粒内孔、有机质孔和微裂隙, 孔径由数纳米至数微米均有分布。介孔是大隆组页岩孔隙体积的主要贡献者, 微孔是孔比表面积的主要贡献者。高有机碳质量分数和高黏土矿物体积分数有利于页岩中微小(孔径 < 50 nm)孔隙系统的建立, 微孔和介孔中的吸附气是总含气量的重要组成部分, 大隆组高含气量页岩具有高黏土矿物体积分数和高有机碳质量分数的特征。

3) 鄂西地区二叠系大隆组高硅质含量特征可能与峨眉山地幔柱活动和相伴生的热液活动相关, 硅质热液和上升流是硅质生物繁盛和大隆组页岩富硅的根本原因, 硅质含量与大隆组页岩有机质富集无明显相关性。大隆组硅质页岩高有机质含量是高生产力和水体还原环境的共同结果, 高古生产力是有机质富集的更重要原因。构造演化过程中, 大隆组富硅质页岩中脆性矿物组成的刚性格架可以减少有机质在压实作用和构造挤压作用下孔隙的闭合。因此鄂西地区大隆组优质页岩储层是有利的沉积环境以及后期成岩演化综合作用的结果。

参考文献 (References):

- [1] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议 [J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675-1686.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Dong Dazhong, et al. Scientific and Technological Progress, Development Strategy and Policy Suggestion Regarding Shale Oil and Gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1675-1686.
- [2] 许露露, 温雅茹, 张焱林, 等. 鄂西地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩含气性特征及保存条件 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 395-405.
Xu Lulu, Wen Yaru, Zhang Yanlin, et al. Gas-Bearing Characteristics and Preservation Conditions of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Shale in Western Hubei [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 395-405.

- [3] 刘忠宝,王鹏威,聂海宽,等.中上扬子地区寒武系页岩气富集条件及有利区优选[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(9):3694-3707.
Liu Zhongbao, Wang Pengwei, Nie Haikuan, et al. Enrichment Conditions and Favorable Prospecting Targets of Cambrian Shale Gas in Middle-Upper Yangtze [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3694-3707.
- [4] 谢通,王亿,潘诗洋,等.湖北恩施地1井上二叠统大隆组裂缝发育规律及其对含气性的影响[J].资源环境与工程,2021,35(3):324-328.
Xie Tong, Wang Yi, Pan Shiyang, et al. Fracture Development Law of Upper Permian Dalong Formation and Its Influence on Gas Bearing Property in Well Endi 1, Enshi, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(3): 324-328.
- [5] 谢通,潘诗洋,王亿,等.鄂西恩地1井上二叠统大隆组页岩气富集主控因素分析[J].资源环境与工程,2022,36(2):149-153.
Xie Tong, Pan Shiyang, Wang Yi, et al. Analysis on Main Controlling Factors of Shale Gas Enrichment in Upper Permian Dalong Formation in Well Endi 1, Western Hubei [J]. Resources Environment & Engineering, 2022, 36(2): 149-153.
- [6] 王鹏威,刘忠宝,李雄,等.川东红星地区上二叠统吴家坪组页岩发育特征及其页岩气富集意义[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1102-1114.
Wang Pengwei, Liu Zhongbao, Li Xiong, et al. Development of the Upper Permian Wujiaping Shale in Hongxing Area, Eastern Sichuan Basin, and Its Significance to Shale Gas Enrichment[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1102-1114.
- [7] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative Sequence Stratigraphy and Organic Geochemistry of Gas Shales: Commonality or Coincidence? [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 68-84.
- [8] Koenitzer S F, Davies S J. Depositional Controls on Mudstone Lithofacies in a Basinal Setting; Implications for the Delivery of Sedimentary Organic Matter[J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(3): 198-214.
- [9] Wang Y, Wang X J, Song G Q, et al. Genetic Connection Between Mud Shale Lithofacies and Shale Oil Enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 759-768.
- [10] 王高翔,赵圣贤,陈雷,等.层序格架下页岩岩相非均质性及其储层品质差异性:以四川盆地川南长宁地区五峰组—龙一段页岩为例[J].天然气地球科学,2022,33(10):1675-1690.
Wang Gaoxiang, Zhao Shengxian, Chen Lei, et al. Shale Lithofacies Heterogeneity and the Different of Reservoir Quality Within Sequence Stratigraphic Framework: Case Study of Wufeng Formation-Lower Longmaxi Formation in Changning Area, South Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10): 1675-1690.
- [11] 白卢恒,石万忠,张晓明,等.下扬子皖南宣泾地区二叠系海相页岩特征及其沉积环境[J].地球科学,2021,46(6):2204-2217.
Bai Luheng, Shi Wanzhong, Zhang Xiaoming, et al. Characteristics of Permian Marine Shale and Its Sedimentary Environment in Xuanjing Area, South Anhui Province, Lower Yangtze Area [J]. Earth Science, 2021, 46(6): 2204-2217.
- [12] 舒志国.中扬子湘鄂西区构造演化特征[J].石油天然气学报,2014,36(10):8-12.
Shu Zhiguo. Characteristics of Regional Structural Evolution in the West Hunan-Hubei Area of Middle Yangtze Plate [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(10): 8-12.
- [13] 何治亮,汪新伟,李双建,等.中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J].石油实验地质,2011,33(1):1-11.
He Zhiliang, Wang Xinwei, Li Shuangjian, et al. Yanshan Movement and Its Influence on Petroleum Preservation in Middle-Upper Yangtze Region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 1-11.
- [14] 何幼斌,罗进雄.中上扬子地区晚二叠世长兴期岩相古地理[J].古地理学报,2010,12(5):497-514.
He Youbin, Luo Jinxiong. Lithofacies Palaeogeography of the Late Permian Changxing Age in Middle and Upper Yangtze Region[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(5): 497-514.
- [15] 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法:SY/T 5163—2018[S].北京:石油工业出版社,2018.
Analysis Method for Clay Minerals and Ordinary Non-Clay Minerals in Sedimentary Rocks by the X-ray Diffraction: SY/T 5163—2018[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [16] 沉积岩中总有机碳的测定:GB/T 19145—2022[S].

- 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Determination of Total Organic Carbon in Sedimentary Rock; GB/T 19145—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [17] 透射光—荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法: SY/T 5125—2014[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- Method of Identification Microscopically the Macerals of Kerogen and Indivision the Kerogen Typeby Transmitted-Light and Fluorescence; SY/T 5125—2014[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [18] 沉积岩中镜质体反射率测定方法: SY/T 5124—2012[S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- Method of Determining Microscopically the Reflectance of Vitrinite in Sedimentary; SY/T 5124—2012[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [19] 油气储层砂岩样品扫描电子显微镜分析方法: GB/T 18295—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- Analysis Method of Sandstone Sample of Petroleum and Gas Reservoir by Scanning Electron Microscope; GB/T 18295—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [20] 硅酸盐岩石化学分析方法: 第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks; Part 30: Determination of 44 Elements; GB/T 14506.30—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [21] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale; Lithofacies and Depositional Setting of a Deep-Water Shale-Gas Succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579—601.
- [22] Wang G C, Carr T R. Methodology of Organic-Rich Shale Lithofacies Identification and Prediction: A Case Study from Marcellus Shale in the Appalachian Basin[J]. Computers & Geosciences 2012, 49: 151—163.
- [23] Han C, Jiang Z X, Han M, et al. The Lithofacies and Reservoir Characteristics of the Upper Ordovician and Lower Silurian Black Shale in the Southern Sichuan Basin and Its Periphery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 75: 181—191.
- [24] Wu L Y, Lu Y B, Jiang S, et al. Pore Structure Characterization of Different Lithofacies in Marine Shale: A Case Study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 57: 203—215.
- [25] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 485—497.
- Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies Types and Reservoir Characteristics of Marine Shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling Area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485—497.
- [26] 王曦蒙, 刘洛夫, 汪洋, 等. 川南地区龙马溪组页岩岩相对页岩孔隙空间的控制[J]. 石油学报, 2019, 40(10): 1192—1201.
- Wang Ximeng, Liu Luofu, Wang Yang, et al. Control of Lithofacies on Pore Space of Shale from Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(10): 1192—1201.
- [27] 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等. 四川盆地涪陵气田五峰组—龙马溪组页岩优势岩相[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 189—197.
- Wu Lanyu, Hu Dongfeng, Lu Yongchao, et al. Advantageous Shale Lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling Gas Field of Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 189—197.
- [28] 张保民, 陈孝红, 蔡全升, 等. 鄂西宜昌斜坡带五峰组—龙马溪组页岩优势岩相及其生气潜力[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 943—955.
- Zhang Baomin, Chen Xiaohong, Cai Quansheng, et al. Dominant Shale Lithofacies and Gas Generation Potential Analysis of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Yichang Slope Area, Western Hubei Province[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 943—955.
- [29] Glaser K S, Miller C K, Johnson, et al. Seeking the Sweet Spot: Reservoir and Completion Quality in Organic Shales[J]. Oilfield Review, 2013, 25(4): 16—29.
- [30] 张毅, 郑书黎, 高波, 等. 四川广元上寺剖面上二叠统大隆组有机质分布特征与富集因素[J]. 地球科学, 2017, 42(6): 1008—1025.
- Zhang Yi, Zheng Shucan, Gao Bo, et al. Distribution Characteristics and Enrichment Factors of Organic Matter in Upper Permian Dalong Formation of Shangsi Section, Guangyuan, Sichuan Basin [J].

- Earth Science, 2017, 43(6): 1008 - 1025.
- [31] Liu W Q, Yao J X, Tong J N, et al. Organic Matter Accumulation on the Dalong Formation (Upper Permian) in Western Hubei, South China: Constraints from Multiple Geochemical Proxies and Pyrite Morphology [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 514: 677 - 689.
- [32] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(6): 31 - 41.
- Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Genetic Mechanism of High-Quality Shale Gas Reservoirs in the Wufeng - Longmaxi Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6): 31 - 41.
- [33] 石学文, 吴伟, 胡海燕, 等. 泸州地区深层五峰—龙马溪组页岩气储层全孔径表征及其主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 158 - 172.
- Shi Xuewen, Wu Wei, Hu Haiyan, et al. The Whole Apertures of Deeply Buried Wufeng-Longmaxi Formation Shale and Their Controlling Factors in Luzhou District, Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 158 - 172.
- [34] 廖媛, 袁立为, 王亮, 等. 湖北省地温场特征分析[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(6): 876 - 881.
- Liao Yuan, Yuan Liwei, Wang Liang, et al. The Characteristics of Geothermal Field in Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(6): 876 - 881.
- [35] 郭为, 熊伟, 高树生, 等. 页岩气等温吸附/解吸特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2836 - 2840.
- Guo Wei, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Isothermal Adsorption/Desorption Characteristics of Shale Gas[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2836 - 2840.
- [36] 高和群, 曹海虹, 曾隽. 页岩气解吸规律新认识[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(2): 81 - 86.
- Gao Hequn, Cao Haihong, Zeng Juan. New Understanding of Shale Gas Desorption Law [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 81 - 86.
- [37] 蒋裕强, 付永红, 谢军, 等. 海相页岩气储层评价发展趋势与综合评价体系[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 1 - 9.
- Jiang Yuqiang, Fu Yonghong, Xie Jun, et al. Development Trend of Marine Shale Gas Reservoir Evaluation and a Suitable Comprehensive Evaluation System[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 1 - 9.
- [38] 遇昊, 陈代钊, 韦恒叶, 等. 鄂西地区上二叠乐平统大隆组硅质岩成因及有机质富集机理[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 1017 - 1027.
- Yu Hao, Chen Daizhao, Wei Hengye, et al. Origin of Bedded Chert and Organic Matter Accumulation in the Dalong Formation of Upper Permian in Western Hubei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 1017 - 1027.
- [39] Wu W, Liu W Q, Mou C L, et al. Organic-Rich Siliceous Rocks in the Upper Permian Dalong Formation (NW Middle Yangtze): Provenance, Paleoclimate and Paleoenvironment [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104728.
- [40] Meng Q, Xue W Q, Chen F Y, et al. Stratigraphy of the Guadalupian (Permian) Siliceous Deposits from Central Guizhou of South China: Regional Correlations with Implications for Carbonate Productivity During the Middle Permian Biocrisis[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 228: 104011.
- [41] 王秀平, 牟传龙, 肖朝晖, 等. 湖北鹤峰地区二叠系大隆组黑色岩系特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(3): 382 - 396.
- Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Xiao Zhaohui, et al. Characteristics and Preliminary Study on Genesis of Black Rock Series of Upper Permian Dalong Formation in Hefeng Area, Hubei Province [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(3): 382 - 396.
- [42] 连梦利, 刘达东, 林瑞钦, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境及有机质富集机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3756 - 3772.
- Lian Mengli, Liu Dadong, Lin Ruiqin, et al. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Mechanism of Wufeng - Longmaxi Shale in the Northern Guizhou Area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3756 - 3772.
- [43] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: an Update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12 - 32.
- [44] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship Between Inferred Redox Potential of the Depositional

- Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/2/3): 65 - 82.
- [45] Jones B, Manning D A C. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111 - 129.
- [46] Wilde P, Quinby-Hunt M S, Erdtmann B D. The Whole-Rock Cerium Anomaly: A Potential Indicator of Eustatic Sea-Level Changes in Shales of the Anoxic Facies[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101(1/2): 43 - 53.
- [47] 郑国栋, 孟庆涛, 刘招君. 松辽盆地北部青一段油页岩地球化学特征及其记录的古湖泊学信息[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 392 - 404.
- Zheng Guodong, Meng Qingtao, Liu Zhaojun. Geochemical Characteristics and Paleolimnological Information of Oil Shale in 1st Member of Qingshankou Formation in Northern Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 392 - 404.
- [48] 高秋灵, 陈中强, 张宁, 等. 湖南嘉禾大窝岭剖面晚二叠世吴家坪期—长兴期之交长英质火山作用记录[J]. *地球科学*, 2022, 47(8): 2925 - 2939.
- Gao Qiuling, Chen Zhongqiang, Zhang Ning, et al. Felsic Volcanisms Across the Wuchiapingian-Changhsingian Boundary (Late Permian) in the Dawoling Section, Jiache Area, Hunan Province[J]. *Earth Science*, 2022, 47(8): 2925 - 2939.
- [49] 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 Tianjun, Chen Cong, Zhang Xihua, et al. Evolution of the Paleostucture 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.
- [50] 潘磊, 秦华, 张文睿, 等. 川东南地区二叠系—三叠系碳酸盐岩气藏气源及成因类型[J]. *断块油气田*, 2022, 29(2): 245 - 250.
- Pan Lei, Qin Hua, Zhang Wenrui, et al. Gas Source and Genetic Types of Permian-Triassic Carbonate Gas Reservoirs in Southeast Sichuan [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(2): 245 - 250.