

川东北南江地区 大隆组页岩孔隙结构特征 及控制因素

苏泽昕

中国石化勘探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年8月8日; 录用日期: 2023年9月19日; 发布日期: 2023年9月26日

摘要

为明确川东北南江地区二叠系大隆组海相页岩孔隙结构特征及控制因素, 选取LB1井大隆组岩心作为研究对象, 通过扫描电镜、低温氮吸附、高压压汞及FIB三维扫描对比实验分析, 对页岩孔隙类型和结构进行定量表征。实验表明: LB1井大隆组页岩以有机孔为主, 形态主要为墨水瓶状, 孔隙连通性相对较差; 孔径主要分布在 $<2\text{ nm}$ 和 $10\sim 50\text{ nm}$, 比表面积平均 $27.2\text{ m}^2/\text{g}$; 有机质丰度、粘土矿物含量与页岩孔隙度及微孔、中孔孔隙有较好正相关性, I型干酪根有机质孔隙发育程度大于II₁型, 斑脱岩发育情况与Ba含量较好对应, 表明TOC、有机质类型、粘土矿物及凝灰质矿物含量是控制南江地区大隆组页岩孔隙发育的主要控制因素。本文为南江地区新层系二叠系大隆组页岩气勘探突破提供理论支撑。

关键词

南江, 大隆组, 页岩, 孔隙类型, 孔隙结构

Pore Structure Characteristics and Controlling Factors of Dalong Formation Shale in Nanjiang Area, Northeastern Sichuan Basin

Zexin Su

Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 8th, 2023; accepted: Sep. 19th, 2023; published: Sep. 26th, 2023

Abstract

In order to clarify the pore structure characteristics and controlling factors of Permian Dalong Formation marine shale in Nanjiang area of northeastern Sichuan, the core of Dalong Formation in Well LB1 was selected as the research object, and the pore types and structures of shale were quantitatively characterized by scanning electron microscopy, low temperature nitrogen adsorption, high pressure mercury injection and FIB three-dimensional scanning comparative experimental analysis. The result shows that the shale of the Dalong Formation in Well LB1 is dominated by organic pores, the shape is mainly ink-bottle, and the pore connectivity is relatively poor. The pore size is mainly distributed in <2 nm and 10~50 nm, and the average specific surface area is 27.2 m^2/g . The organic matter abundance and clay mineral content have a good positive correlation with shale porosity, micropore and mesopore volume. The development degree of type I kerogen organic matter pore is greater than that of type II₁, and the development of bentonite is well corresponding to the content of Ba, indicating that TOC, organic matter type, clay mineral content and tuffaceous mineral content are the main controlling factors for the development of shale pores in the Dalong Formation in Nanjiang area. This paper provides theoretical support for the breakthrough of shale gas exploration in the Permian Dalong Formation of the new strata in Nanjiang area.

Keywords

Nanjiang Area, Dalong Formation, Shale, Pore Type, Pore Structure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

美国页岩气的成功开发, 不仅使美国从天然气进口国变成出口国, 还改变了世界能源供应格局[1] [2]。受北美页岩气成功开发的影响, 我国对页岩气勘探高度重视。目前, 我国已成为全球第三大页岩气生产国, 页岩气已成为我国天然气增储上产的重要领域。随着对五峰组 - 龙马溪组页岩勘探程度的不断提升, 其有利目标逐渐减少, 因此亟需对页岩气新层系、新领域进行积极探索[3] [4] [5]。

四川盆地川东北地区二叠系页岩具有分布面积广、类型多、埋深适中的特点, 该地区以深水沉积为主, 纵向上发育茅口组三段、吴家坪组二段、大隆组三套富有机质泥页岩[6]。经过前期钻井勘探, 多口井在二叠系海相页岩层段均钻遇良好油气显示, 且试获高产页岩气流, 解释了二叠系海相页岩巨大的勘探潜力[7] [8]。孔隙是页岩气赋存的主要储集空间, 目前前人对南江地区大隆组地层研究程度较低, 孔隙发育特征及主控因素仍需进一步研究。

本文选用南江地区 LB1 井大隆组页岩储层钻井岩心, 通过开展低温氮吸附、高压压汞、扫描电镜分析及 FIB 三维扫描分析, 识别了大隆组页岩孔隙类型, 并在分析页岩孔隙结构特征的基础上, 结合页岩有机质丰度、有机质类型及矿物组分, 明确了大隆组页岩孔隙控制因素, 以期为下步南江地区大隆组页岩气勘探突破提供理论支撑。

2. 区域地质概况

研究区位于四川盆地北缘米仓山前带, 归属于扬子板块的西北缘。其北侧为秦岭造山带南缘的米仓

山冲断构造带，东北侧为大巴山弧形冲断构造带，西北侧为龙门山造山带。南江地区广元 - 开江 - 梁平陆棚晚二叠世以继承性深水沉积为主，大隆组发育高 GR 深水陆棚相优质页岩，岩性主要为灰黑色硅质页岩，常夹薄层深灰色泥质灰岩[9] [10] [11]。纵向上优质页岩段主要发育在大隆组一段②~⑤小层；横向上受控于沉积相带的分布。南江地区大隆组深水陆棚相主要分布在南江中部，厚度介于 20~30 m，有机质丰度高，TOC 平均 8.30%，热演化程度适中，镜质体反射率(Ro)平均为 1.98%，孔隙度平均为 4.3%，为页岩气勘探有利层段(图 1)。

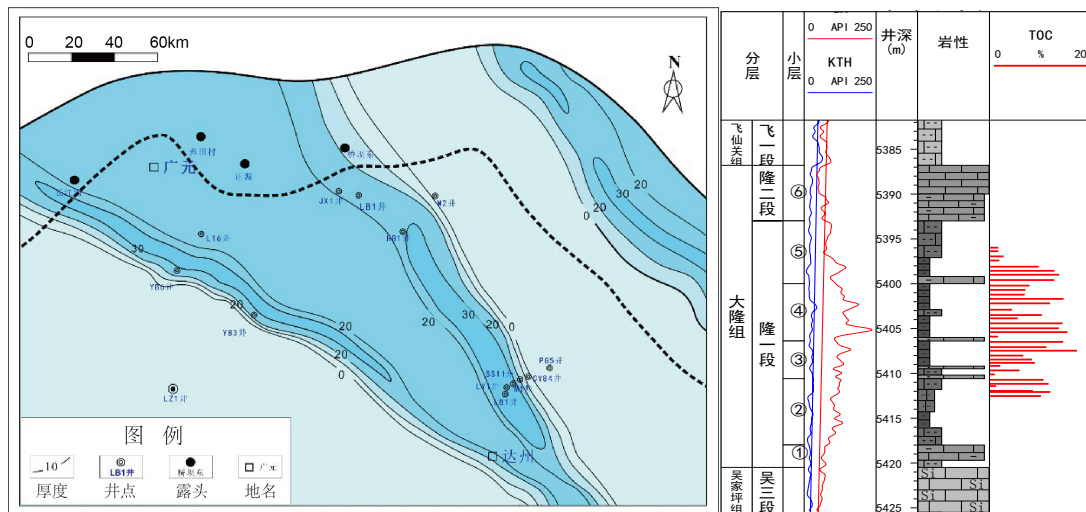


Figure 1. Shale thickness of Dalong Formation in northeastern Sichuan and histogram of Well LB1
图 1. 川东北地区大隆组页岩厚度及 LB1 井柱状图

3. 页岩孔隙发育特征

3.1. 孔隙类型

氩离子抛光扫描电镜可以有效识别泥页岩储集空间类型及其赋存状态。南江地区泥页岩储集空间主要分为有机孔、无机孔与微裂缝，整体孔隙广泛分布，以有机孔为主导，微裂缝较少发育(图 2)。

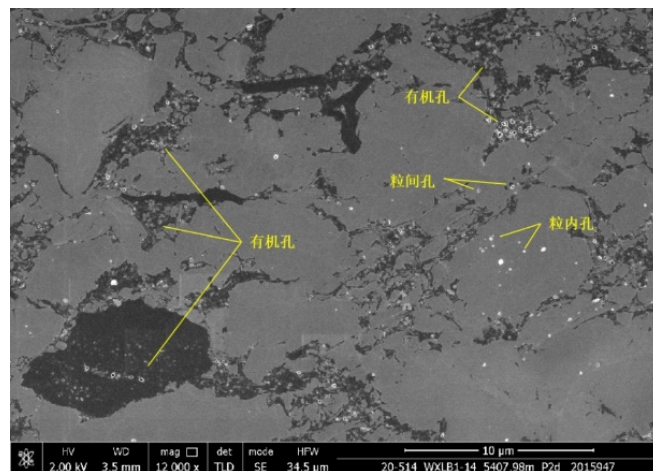


Figure 2. The pore types of Dalong Formation shale in Well LB1
图 2. LB1 井大隆组页岩孔隙类型

对研究区样品的 MAPS 大面积氩离子抛光扫描电镜分析显示, 样品分析区域内有机质含量高, 顺层分布的有机质条带发育, 有机质呈碎屑团块状和填隙状分布, 有机质碎屑团块内孔隙发育差; 有机质条带和填充在粘土矿物间的有机质内孔隙发育较好, 发育较多微孔隙; 碎屑颗粒边缘和粘土间微缝发育。孔隙主要为有机质孔隙, 其次为粒缘缝(图 3)。

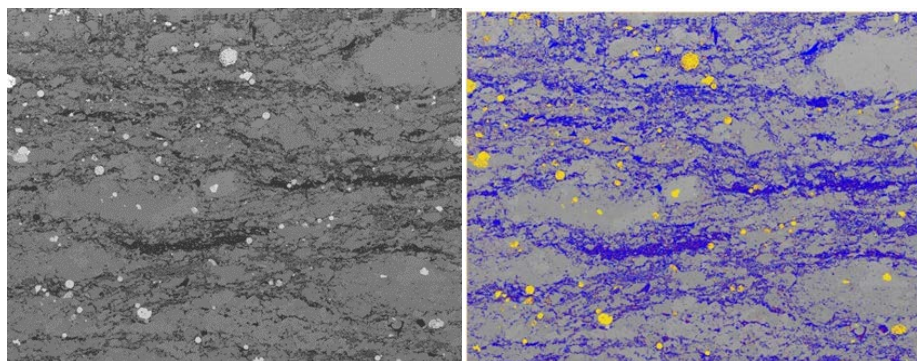
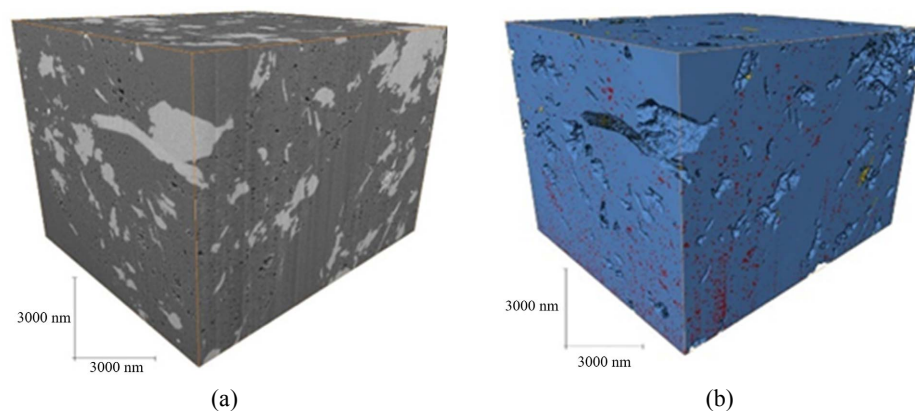


Figure 3. MAPS large area scanning electron microscope analysis of shale reservoir structure of Dalong Formation in Well LB1

图 3. LB1 井大隆组页岩储集结构 MAPS 大面积扫描电镜分析

FIB-SEM 切片成像技术是研究页岩内部结构的有效和便捷的方法, 对于页岩而言, FIB-SEM 切片成像可三维重构出页岩的颗粒矿物、孔隙发育、有机质分布等特征[12]。对研究区页岩 CT 扫描后进行 FIB-SEM 三维重构, 可分析出样品有机质内部的孔隙特征。孔隙直径主要分布在 <math><30\text{ nm}</math>, 直径 50~200 nm 的孔隙所占体积相对较大。

通过 FIB 扫描电镜和 MAPS 等分析, 研究区大隆组页岩主要以有机孔为主(占比 > 50%), 而粒间孔、晶间孔、粒缘微裂缝等较欠发育(图 4)。



(a) 三维图像重构结果; (b) 组分分割结果, 红色为孔隙 2.72%, 蓝色为有机质 78.43%, 黄色为黄铁矿 0.1%, 基质矿物 18.74%

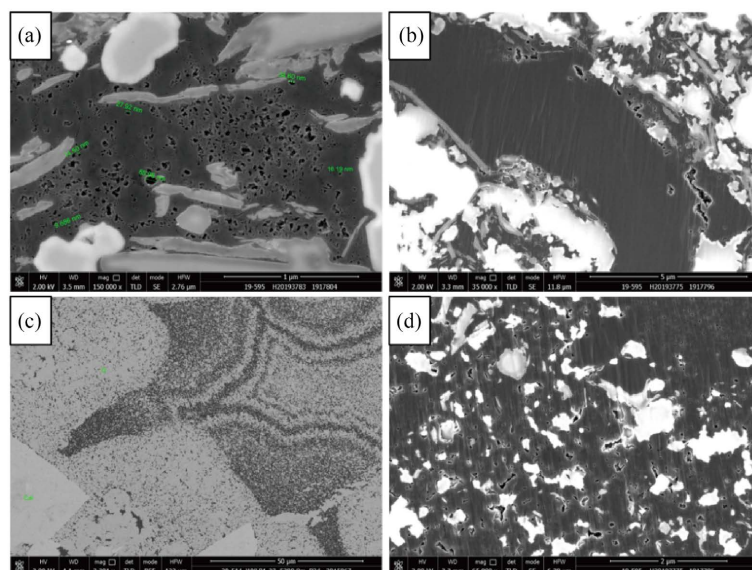
Figure 4. FIB-SEM three-dimensional analysis of Dalong Formation shale in Well LB1

图 4. LB1 井大隆组页岩 FIB-SEM 三维分析

① 有机孔

有机孔指赋存于有机质内的孔隙, 是页岩储层区别于常规油气储层的主要判别指标, 也是页岩气储

层的主要储集空间类型[13][14]。有机孔虽为泥页岩储集空间的主要贡献体,但分布特征具有较强的非均质性。例如,整体泥页岩中分布大量层状有机质大颗粒(可能为层状藻类体),内部发育大量海绵状有机孔,有的呈条带状的镜质组有机质颗粒内部孔隙较欠发育,孔径主要分布于 1~100 nm (图 5(a), 图 5(b)); 可见具有生物结构的环形有机质,其通常与石英、方解石、磷灰石及黄铁矿等矿物相伴生,内部发育大量海绵状有机孔,孔径主要分布于 5~200 nm (图 5(c), 图 5(d))。



(a) 层状有机质内发育海绵状有机孔, 5402.91 m, LB1 井; (b) 条带状有机质内发育少量有机孔, 5398.57 m, LB1 井; (c) 赋存于生物腔体内部的有机孔, 5406.18 m, LB1 井; (d) 赋存于生物腔体内部的有机孔, 5398.57 m, LB1 井

Figure 5. The development characteristics of organic pores in shale of Well LB1

图 5. LB1 井页岩有机孔发育特征图

② 无机孔

无机孔指赋存于矿物颗粒内部或边缘的孔隙,主要包括粒间孔、粘土矿物孔、次生溶蚀孔等。常见的粒间孔主要指石英、黄铁矿等矿物晶粒间存在的纳米级孔隙,孔径介于 20~200 nm (图 6(a)); 粘土矿物孔常形成于片状粘土矿物之间,具有形状不规则、吸附性较强、集中发育的特点; 次生溶蚀孔常形成于长石、方解石、黄铁矿、金红石等易溶矿物中,是被有机质在脱羟基作用下产生的酸性液体溶蚀形成,包括粒间溶孔和粒内溶孔(图 6(b), 图 6(c))。

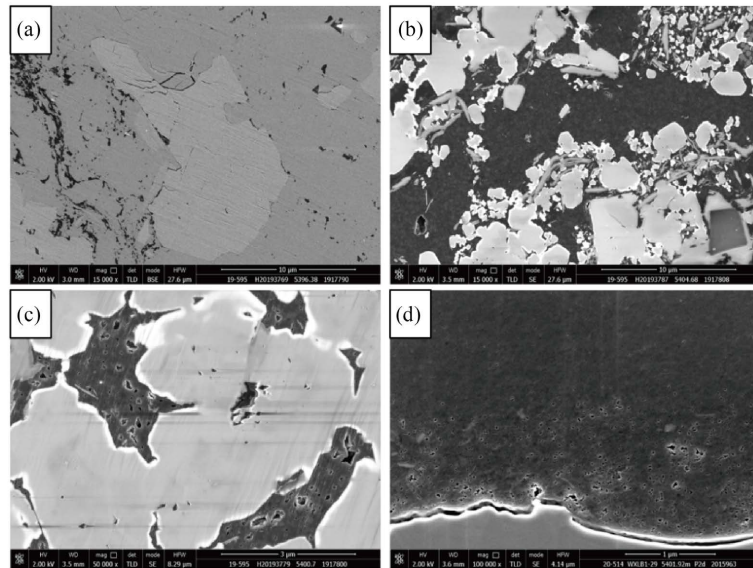
③ 微裂缝

微裂缝包括矿物或有机质边缘缝和内部缝 2 种类型。边缘缝一般未见充填,裂缝宽度主要介于 0.02~1 μm , 裂缝长度与矿物或有机质大小相关; 内部缝多具有一定的幅度,部分呈平行状或羽列状连续排列分布(图 6(d))。

3.2. 孔隙形态

IUPAC 将滞后环分为 4 大类,即 H1, H2, H3, H4, 每一种滞后环形态对应于一种孔隙形状(图 7)。氮气吸脱附测试得到的大隆组页岩的滞后环表现出墨水瓶形态(图 8), 近似于 H2 型滞后环,说明孔隙间连通性较差,孔隙结构极不均匀[15][16]。前人研究表明,五峰组-龙马溪组中高生物石英含量且以有机孔为主导的页岩通常表现为椭圆形的墨水瓶结构,因此可以认为具有相同特征的大隆组页岩也是以有机

孔为主导。该现象与扫描电镜、FIB-SEM 中得出的认识一致。



(a) 粒间孔, 5396.38 m, LB1 井; (b) 粘土矿物孔, 5404.68 m, LB1 井; (c) 次生溶蚀孔, 5400.70 m, LB1 井; (d) 有机质边缘缝, 5396.38 m, LB1 井

Figure 6. The development characteristics of inorganic pores and micro-fractures in shale of Well LB1

图 6. LB1 井页岩无机孔及微裂缝发育特征

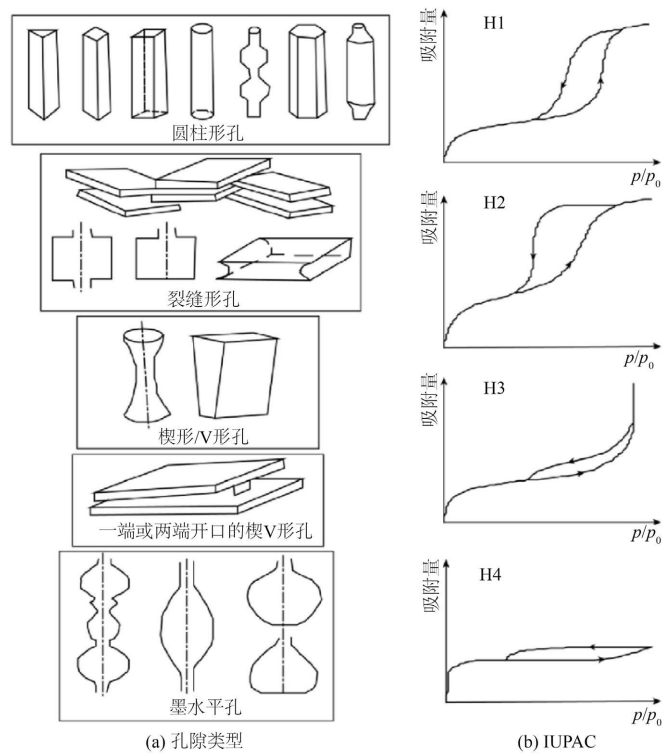
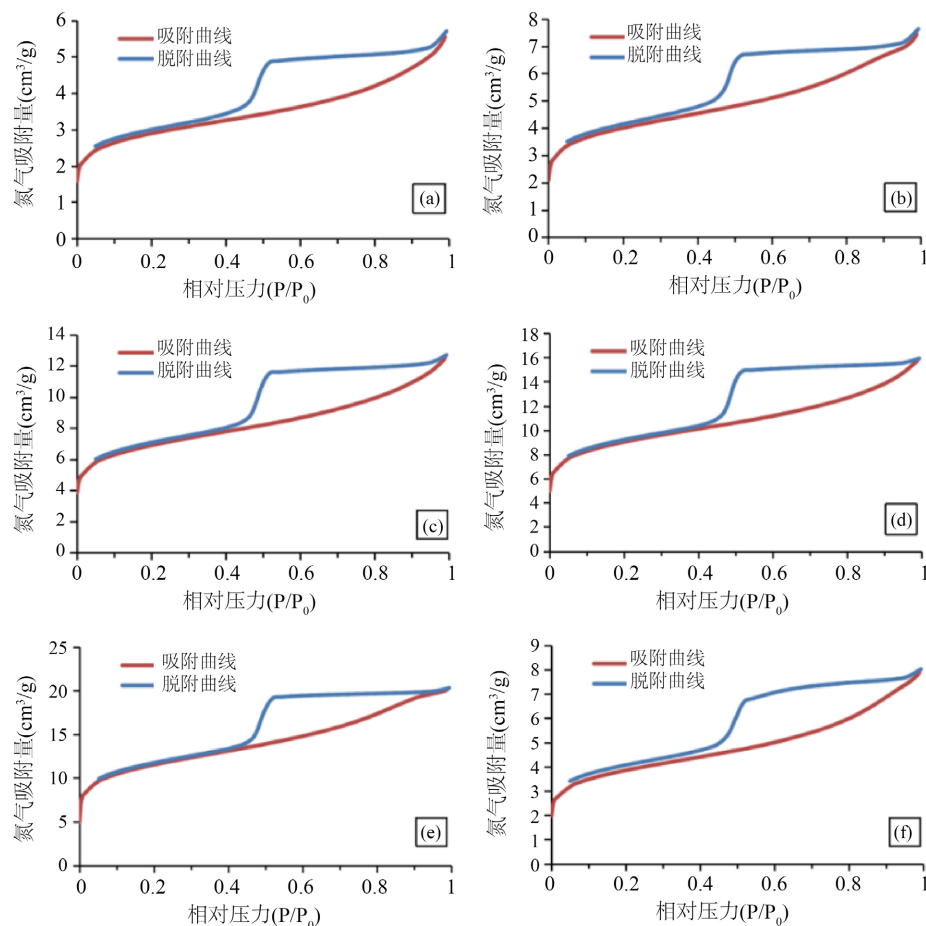


Figure 7. IUPAC hysteresis loop type and its corresponding pore morphology (Changed from Chen Shangbin, 2012)

图 7. IUPAC 滞后环类型及其对应的孔隙形态(改编自陈尚斌, 2012)



(a) 5402.58 m, LB1 井; (b) 5401.42 m, LB1 井; (c) 5409.37 m, LB1 井; (d) 5407.98 m, LB1 井; (e) 5405.82 m, LB1 井; (f) 5403.88 m, LB1 井

Figure 8. Characteristics of nitrogen adsorption and desorption curves of Dalong Formation shale in Well LB1
图 8. LB1 井大隆组页岩氮气吸脱附曲线特征

3.3. 孔隙结构定量表征

从研究区样品的低温氮吸附和高压压汞实验分析结果来看, 南江地区大隆组页岩孔隙以中孔和微孔为主, 比表面积平均 $27.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 。其中, 微孔孔体积占比介于 23.4%~48.9%, 平均值为 41.4%; 中孔孔体积占比介于 46.4%~63.5%, 平均值为 53.7%; 大孔孔体积占比相对较低, 平均值为 4.9% (图 9)。

4. 讨论

4.1. 有机质对孔隙发育的影响

有机质在页岩中占有一部分空间, 并且有机质是页岩有机质孔隙发育的原始物质基础, 因此有机质丰度和有机质类型可以决定有机质孔隙发育程度的高低[17]。

4.1.1. 有机质丰度

对研究区大隆组页岩进行数据整理和分析后, 发现页岩孔隙度、总孔体积、微孔孔体积、中孔孔体积与有机质丰度呈正相关, 这揭示了二叠系海相页岩孔隙以有机孔为主, 且有机孔主要为微孔、中孔, 与扫描电镜观察结果相吻合(图 10)。

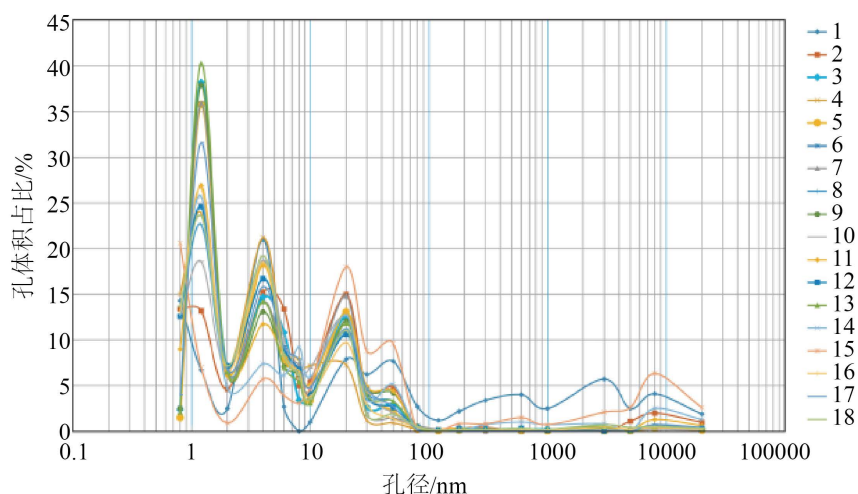


Figure 9. Pore size distribution of Dalong Formation shale in Well LB1
图 9. LB1 井大隆组页岩孔径分布

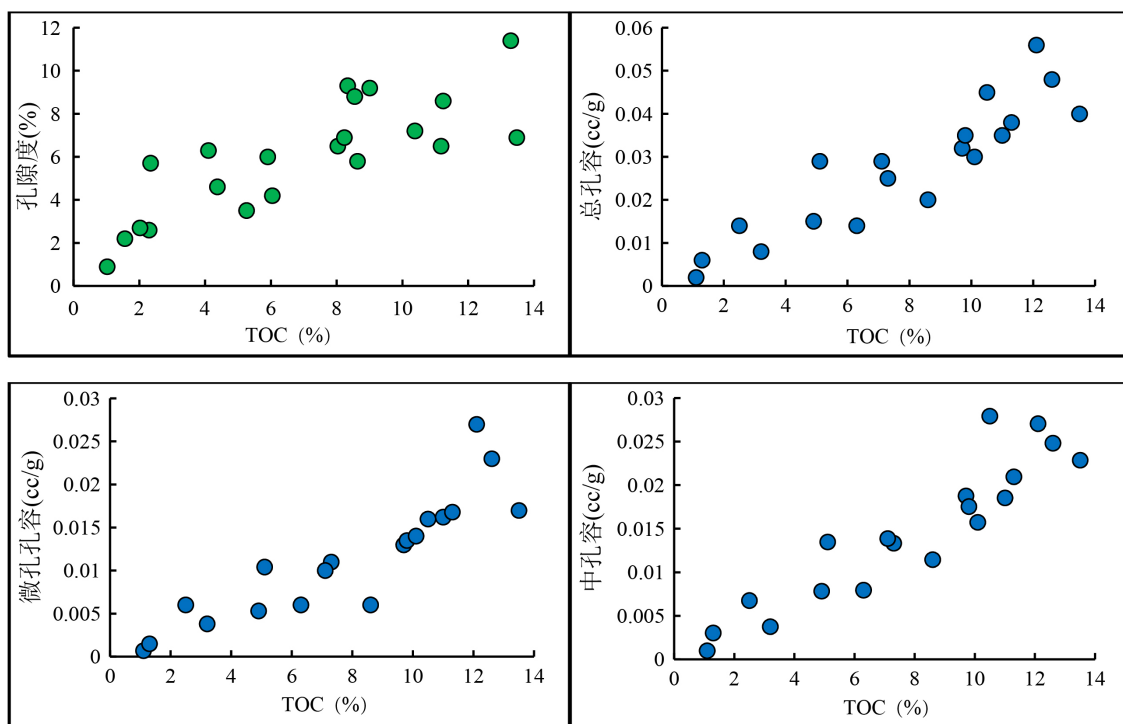
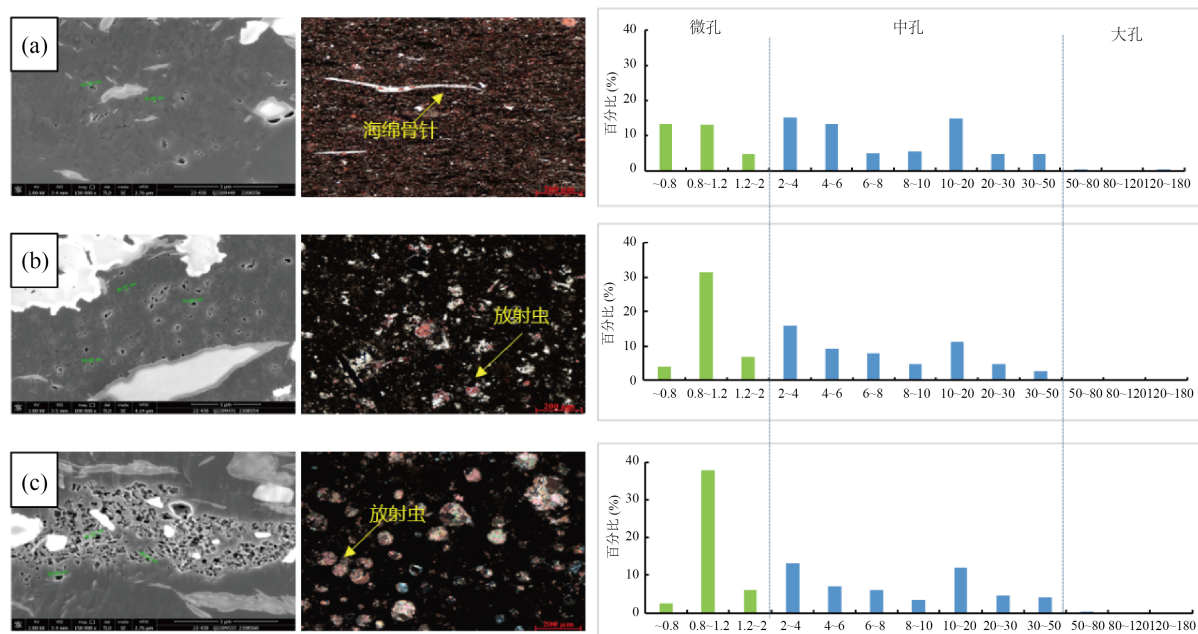


Figure 10. The correlation diagram of TOC and pore development characteristics of Dalong Formation shale in Well LB1
图 10. LB1 井大隆组页岩孔隙类型

4.1.2. 有机质类型

通过对研究区样品进行扫描电镜观察和干酪根镜检可以发现，南江地区大隆组页岩有机质类型对孔径分布有一定的控制作用。LB1 井 II₁ 型有机质页岩样品，扫描电镜照片中硅质生物含量较低，有机孔相对欠发育，大孔占比相对较高(图 11(a)，图 11(b))；I 型有机质页岩样品，扫描电镜中可见大量放射虫等硅质生物，有机孔发育状况良好，微孔占比较高(图 11(c))。

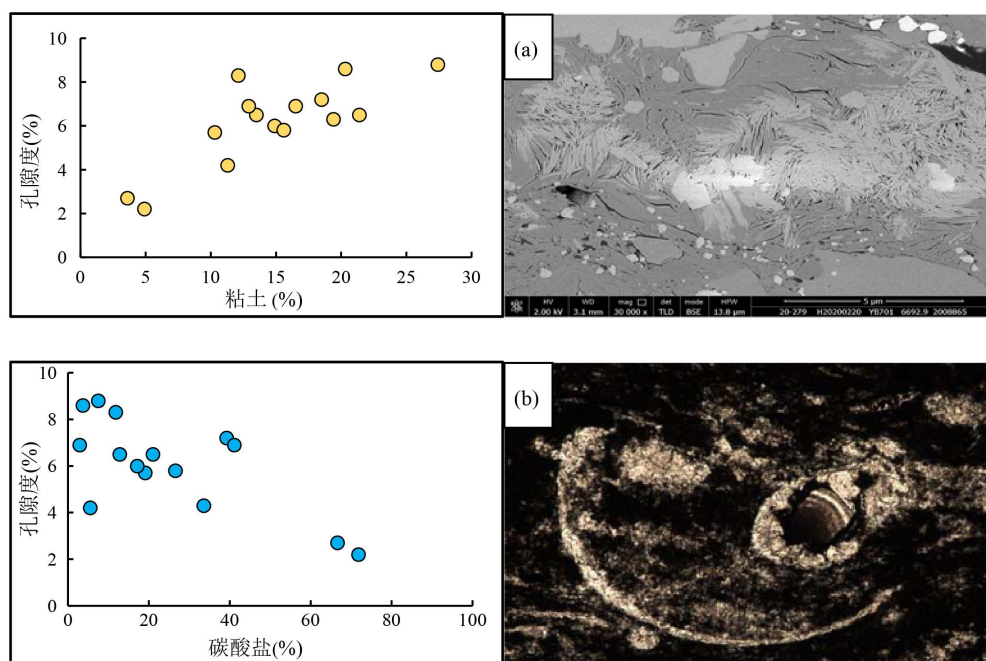


(a) II₁型有机质页岩, LB1井, 5398.6 m, 有机孔欠发育, 可见少量海绵骨针, 微孔占比30%, 大孔占比7%; (b) II₁型有机质页岩, LB1井, 5401.5 m, 有机孔相对欠发育, 可见少量放射虫, 微孔占比43%, 大孔占比5%; (c) I型有机质页岩, LB1井, 5407.6 m, 有机孔发育良好, 可见大量放射虫, 微孔占比47%, 大孔占比3%。

Figure 11. Organic matter type and pore size distribution characteristics of Dalong Formation shale in Well LB1
图 11. LB1 井大隆组页岩有机质类型与孔径分布特征

4.2. 矿物组分对孔隙发育的影响

通过对研究区样品测试数据分析, 南江地区页岩孔隙度与粘土矿物含量呈明显正相关性, 碳酸盐岩矿物含量呈一定的负相关性, 而硅质矿物含量与孔隙度相关性较差(图 12)。



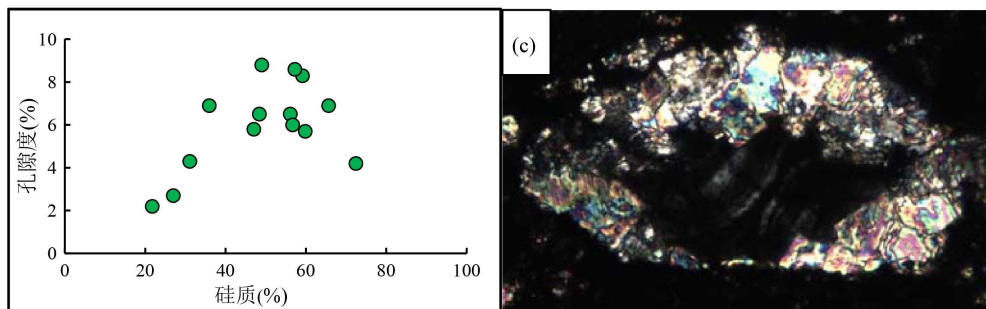


Figure 12. The effect of mineral composition on pore development of Dalong Formation shale in Well LB1

图 12. LB1 井大隆组页岩矿物组分对孔隙发育的影响

粘土矿物在成岩转化过程中易形成粘土矿物孔，且高粘土页岩段的高有机质丰度也会促进有机孔的发育(图 12(a))。碳酸盐岩矿物在成岩过程中会发生胶结作用和重结晶作用从而堵塞孔隙，同时高灰质页岩段的有机质丰度也较低，因此碳酸盐岩矿物并不利于孔隙的形成(图 12(b))。LB1 井孔隙度与硅质矿物相关性较差，揭示了南江地区大隆组页岩的硅质成因较复杂；同时，部分特高硅质矿物含量页岩段的孔隙度较低，说明晚期硅质矿物的胶结与交代作用，使泥页岩储层微孔隙遭到破坏，整体储集性能受到影响(图 12(c))。

在研究过程中，本文还发现斑脱岩的发育情况与孔隙发育情况呈一定的正相关性(图 13)。

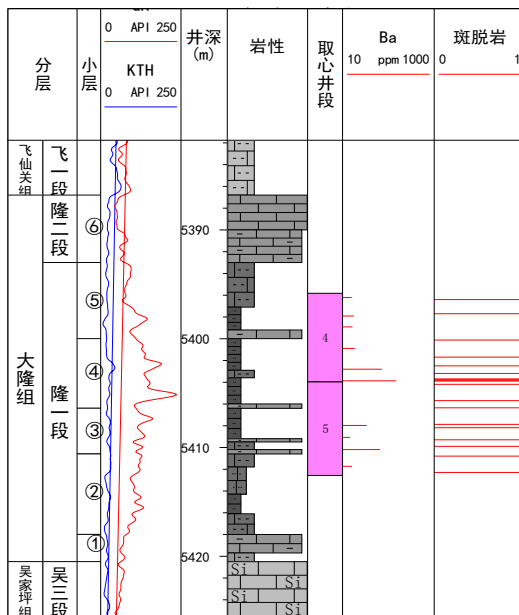


Figure 13. The bentonite distribution histogram of Dalong Formation in LB1 well

图 13. LB1 井大隆组斑脱岩分布情况柱状图

一方面，斑脱岩发育条数与 Ba 含量存在较好的对应关系，这揭示了凝灰质富集期火山热液活动频繁，带来大量营养物质，生物繁盛，古生产力提高，有利于有机质富集，从而促进了有机孔的发育(图 14)；另一方面，凝灰质矿物由于脱玻化作用易形成无机孔，凝灰质相关骨架对有机孔起到了支撑作用，利于

孔隙发育与保存(图 14)。

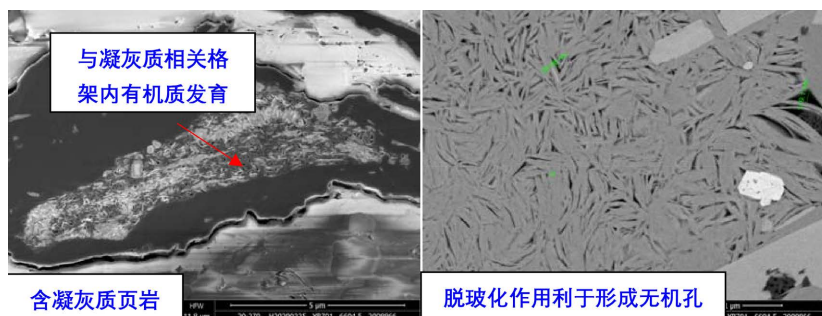


Figure 14. The control effect of tuffaceous minerals on pore development in Dalong Formation shale of Well LB1

图 14. LB1 井大隆组页岩凝灰质矿物对孔隙发育的控制作用

5. 结论

1) 南江地区大隆组页岩以有机孔发育为主，粒间孔、晶间孔、粒缘微裂缝等欠发育；形态主要为墨水瓶状，孔隙连通性相对较差；页岩孔隙微孔和中孔较为发育。

2) 南江地区大隆组页岩孔隙发育受有机质影响程度较大。有机质丰度是微孔和中孔发育的重要控制因素；相对以 II₁ 型有机质为主的页岩，以 I 型有机质为主的页岩有机孔更发育，微孔占比更高。

3) 南江地区大隆组页岩孔隙发育受矿物组分含量控制。孔隙度与粘土矿物含量呈明显正相关，与碳酸盐岩矿物含量呈负相关。凝灰质矿物的富集对孔隙发育同样具有一定促进作用。

参考文献

- [1] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008(6): 136-140, 159-160.
- [2] 郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 172-182. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022271>
- [3] 郭旭升, 蔡勋育, 刘金连, 等. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 12-22.
- [4] 马新华, 张晓伟, 熊伟, 等. 中国页岩气发展前景及挑战[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 491-501.
- [5] 龙胜祥, 卢婷, 李倩文, 等. 论中国页岩气“十四五”发展思路与目标[J]. 天然气工业, 2021, 41(10): 1-10.
- [6] 李飞, 刘珠江, 陈斐然, 等. 川东北地区二叠系大隆组泥岩硅质成因及对可压性影响[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(2): 349-358.
- [7] 胡德高, 周林, 包汉勇, 等. 川东红星地区 HY1 井二叠系页岩气勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 241-252.
- [8] 姜鹏飞, 吴建发, 朱逸青, 等. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 91-109.
- [9] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江-梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326-331.
- [10] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地开江-梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 32-36, 162-163.
- [11] 王威, 石文斌, 付小平, 等. 川北二叠系大隆组页岩气勘探潜力及方向[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 892-899, 956.
- [12] 王晓琦, 金旭, 李建明, 等. 聚焦离子束扫描电镜在石油地质研究中的综合应用[J]. 电子显微学报, 2019, 38(3): 303-319.
- [13] 聂海宽, 张光荣, 李沛, 等. 页岩有机孔研究现状和展望[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1770-1787.

- [14] 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 等. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 687-699.
- [15] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-444. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2012.03.007>
- [16] 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 等. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素——以川南-黔北 XX 地区龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1048-1059.
- [17] 王鹏威, 刘忠宝, 张殿伟, 等. 川东地区二叠系海相页岩有机质富集对有机质孔发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 379-392.