

川南地区茅口组一段储集空间定量表征<sup>\*</sup>尤东华<sup>1</sup> 张力钰<sup>1</sup> 李 蓉<sup>2</sup> 宋晓波<sup>2</sup> 俞凌杰<sup>1</sup> 周凌方<sup>1</sup> 蒋小琼<sup>1</sup>

1 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

2 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

**摘 要** 二叠系茅口组一段是四川盆地重要的勘探领域之一, 其以源储一体的泥质碳酸盐岩为典型特征, 相关不同类型孔隙的发育程度是当前普遍关注的问题之一。通过对川南地区 3 口钻井取心段 60 件样品的孔隙度测定、全岩矿物 X 衍射分析、总有机碳含量分析与部分样品的氩离子抛光扫描电镜观察, 开展不同类型孔隙相对贡献的定性定量表征, 并分析其之间的相关关系及控制因素对孔隙发育的影响。定量研究结果显示, GS1、JH1 井样本以有机质相关孔隙为主, 而 TY1 井样本黏土矿物相关孔隙与有机质相关孔隙均具有重要贡献。统计分析表明, 黏土矿物含量介于 15%~50% 之间、TOC 含量大于 1% 时, 孔隙度超过 2% 的样本数最多; 对于低黏土矿物含量 (<10%) 的泥灰岩而言, 其孔隙发育程度主要受总有机碳含量与有机孔发育程度的控制; 孔隙度与总有机碳含量之间呈正相关, 相关系数高达 0.87; 随着黏土矿物含量的增加, 黏土矿物相关孔隙对总孔隙度的贡献明显提高。四川盆地川南地区茅口组一段泥质碳酸盐岩储集空间的发育主要受黏土矿物与总有机碳含量的控制, 这一认识对进一步评价不同地区储集层发育的差异性具有重要意义。

**关键词** 泥质灰岩 碳酸盐岩 定量表征 茅口组 四川盆地

**第一作者简介** 尤东华, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事碳酸盐岩储层地质学研究。E-mail: youdh.syky@sinopec.com。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: A

## Quantitative characterization of reservoir space in the first member of Maokou Formation, Southern Sichuan Basin

YOU Donghua<sup>1</sup> ZHANG Liyu<sup>1</sup> LI Rong<sup>2</sup> SONG Xiaobo<sup>2</sup>YU Lingjie<sup>1</sup> ZHOU Lingfang<sup>1</sup> JIANG Xiaoqiong<sup>1</sup>

1 Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Jiangsu Wuxi 214126, China

2 Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China

**Abstract** The first member of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin, characterized by argillaceous carbonate rocks that exhibit both source and reservoir properties, making it a significant area for exploration. This study focuses on the development and characteristics of various pore types within these rocks. In this study, the qualitative and quantitative characterizations of pore types and their

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金企业创新发展联合基金 (编号: U24B6001, U19B6003) 和中国石油化工股份有限公司科技项目 (编号: P22214-3, P22073) 联合资助。[Co-funded by the Enterprise Innovation and Development Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (Nos. U24B6001, U19B6003) and the Scientific and Technological Project of Sinopec (Nos. P22214-3, P22073)]

收稿日期: 2024-10-07 改回日期: 2025-02-09

correlations and controlling factors were studied in detail. This was achieved through the measurement of porosity, X-ray diffraction analysis of whole-rock minerals, and total organic carbon (TOC) content analysis of 60 core samples from three wells in the southern Sichuan Basin. Additionally, qualitative observations were performed using argon ion polishing scanning electron microscopy on selected samples. Quantitative results indicate that samples from wells GS1 and JH1 are predominantly composed of organic-related pores, whereas samples from well TY1 exhibit substantial contributions from both clay mineral-related and organic-related pores. Statistical analysis reveals that when clay mineral content ranges between 15% and 50%, and TOC content exceeds 1%, the highest number of samples with porosity greater than 2% is observed. For marlstone with low clay mineral content ( $<10\%$ ), pore development is primarily controlled by TOC content and the degree of organic pore development. A clear positive correlation exists between porosity and TOC content, with a correlation coefficient as high as 0.87. As clay mineral content increases, the contribution of clay mineral-related pores to total porosity becomes more significant. Overall, the development of argillaceous carbonate reservoir space in the first member of the Maokou Formation is primarily influenced by clay mineral and TOC content. These findings have important implications for evaluating regional differences in reservoir development.

**Key words** argillaceous limestone, carbonate, quantitative characterization, Maokou Formation, Sichuan Basin

**About the first author** YOU Donghua, born in 1980, an associate researcher, is engaged in research on carbonate reservoir. E-mail: youdh.syky@sinopec.com.

四川盆地二叠系茅口组天然气勘探开发已有 60 余年历史，主要集中于茅口组二段—三段礁滩相、茅口组顶部古岩溶储集层和白云岩储集层（马永生等，2010；胡明毅等，2012；周进高等，2016）。近年来，多口钻井在茅口组一段（简称“茅一段”）获得工业油气流，如 TT1 井、DS1 井、JS1 井与 YH1 井等，因此茅一段被认为是一种“源储一体”的新类型油气藏（胡东风等，2020；郭彤楼，2021）。川南地区 DS1HF 井在茅一段累计产气超千万方，开发效果良好（郭彤楼，2021）。烃源岩相关参数研究表明，茅一段具有形成大型气藏的物质基础（江青春等，2012；胡东风等，2020；郭彤楼，2021）。

茅一段以具有一定含量黏土矿物的泥灰岩为典型标志，该类岩石通常被描述为“眼球状”灰岩/“瘤状”灰岩，国际学术界将其归属于“灰岩—泥灰岩韵律（limestone-marl alternations）”。针对茅一段的研究，主要集中在构造—沉积背景、烃源岩特征、储集空间类型与储集性能、油气成藏要素等（Li *et al.*, 2018；胡东风等，2020；苏成鹏等，2020, 2021b；郭彤楼，2021；李蓉等，2021；Meng *et al.*, 2022）方面。在茅一段泥灰岩储层表

征方面，以描述黏土矿物成岩收缩缝、有机孔等微观储集空间发育特征为主，其次为孔隙度、渗透率参数与孔隙结构参数分析（胡东风等，2020；韩月卿等，2022；王佳蕊等，2022；李蓉等，2024）。关于不同类型孔隙的相对贡献亦有涉及（夏文谦等，2023），但缺乏定量的分析。

本研究对川南地区 3 口钻井（JH1、TY1、GS1 井）岩心样品的孔隙度与有机碳含量、黏土矿物、碳酸盐矿物含量进行三元线性拟合计算，结合样品氩离子扫描电镜定性分析结果，开展不同类型孔隙相对贡献的定量表征，这对单井纵向选层、测试、求产均具有重要意义。

## 1 地质背景

四川盆地隶属于华南克拉通，中二叠世位于赤道附近，沉积层序变化与古特提斯洋的演化密切相关（Chen *et al.*, 2018；Meng *et al.*, 2022）。从构造—沉积演化史看，中二叠世四川盆地范围内的志留系、泥盆系—石炭系均遭受到广泛的剥蚀，总体形成南高北低的古地貌格局。中二叠世栖霞组沉积期，四川盆地形成台地与台内坳陷均发育的沉积格架（李大军等，2016；黄涵宇等，2017），而茅口

组沉积期总体继承了栖霞组沉积期的古地理格局。基于区域沉积背景、茅一段横向地层厚度的变化,结合茅一段无明显台缘礁滩发育的特征,前人认为茅一段沉积期为碳酸盐岩缓坡沉积环境(图 1-a)(胡东风等, 2020; 张培先等, 2021), 并进一步划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡。茅一段沉积期相当于 Roadian 阶晚期至 Wordian 阶 (Gao *et al.*, 2020; 匡明志等, 2024), 该阶段总体表现为海平面向上变浅的三级旋回 (胡明毅等, 2012), 期间出现多次海平面升降的高频旋回, 与同时期全球海平面变化基本一致 (Haq and Schutter, 2008; 张运波等, 2013; Meng *et al.*, 2022; 匡明志等, 2024)。不同沉积环境下的茅一段地层厚度具有一定差异(图 2), 其中内缓坡钻遇的地层厚度偏小(如 JH1 井 100 m), 外缓坡较大(如 GS1 井 141 m, JY66-1 井 129.5 m), 中缓坡厚度介于前两者之间 (TY1 井 111 m)。可能是受到沉积古地貌的影响, 自外缓坡向内缓坡茅一段具沉积上超的特点, 内缓坡沉积缺少部分茅一段底部地层。

茅口组自下而上总体由灰岩—泥灰岩韵律层向厚层灰岩转变, 局部发育厚度不等的白云岩, 含有

一定量的硅质结核、硅质条带。茅一段以灰岩—泥灰岩韵律为典型标志, 伽马测井曲线 (GR) 对灰岩泥质含量变化具有一定的响应, 而电阻率曲线 (RD/RS) 对岩性变化的响应亦较为明显 (图 1-b)。茅一段进一步可分为上、下 2 个部分: 上部以厚层灰岩为主, 仅局部夹薄层灰质泥岩; 下部“高电阻段”灰岩通常以方解石为主, 含少量黏土矿物, 生物碎屑主要为浅水厚壳的腹足类、腕足类、有孔虫, 而“低电阻段”泥灰岩以黏土矿物与方解石为主, 含少量硅质矿物, 生物碎屑主要为较深水薄壳的腕足类、有孔虫。茅一段岩性在横向上也发生一定变化, 外缓坡泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩相对较多, 如图 2 中 GS1 井以及 JY66-1 与 JY205-2 井 (郭彤楼, 2021; 赵培荣, 2021), 内缓坡与中缓坡主体则以含泥灰岩与泥质灰岩为主。海平面升降导致的水深变化, 对茅一段岩性在纵横向上的变化影响显著, 以泥质含量变化最为明显。

## 2 样品采集与分析

本次研究采集了 3 口钻井共 60 件样品, 其中

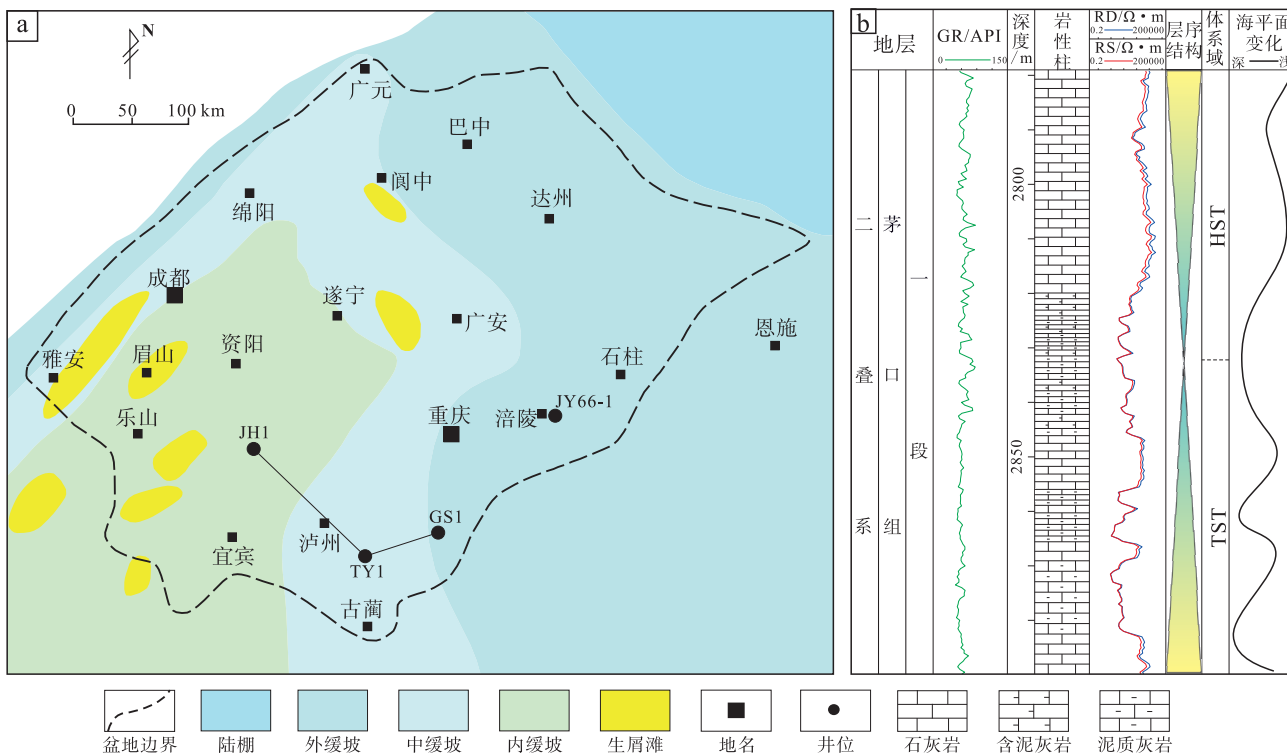


图 1 四川盆地茅一段沉积相图 (a, 据李蓉等, 2024; 有修改) 与 TY1 井综合柱状图 (b, 据孟宪武等, 2024; 有修改)

Fig. 1 Sedimentary facies (a, modified from Li *et al.*, 2024) and comprehensive column (b, modified from Meng *et al.*, 2024) of the first member of Maokou Formation of Well TY1 in Sichuan Basin

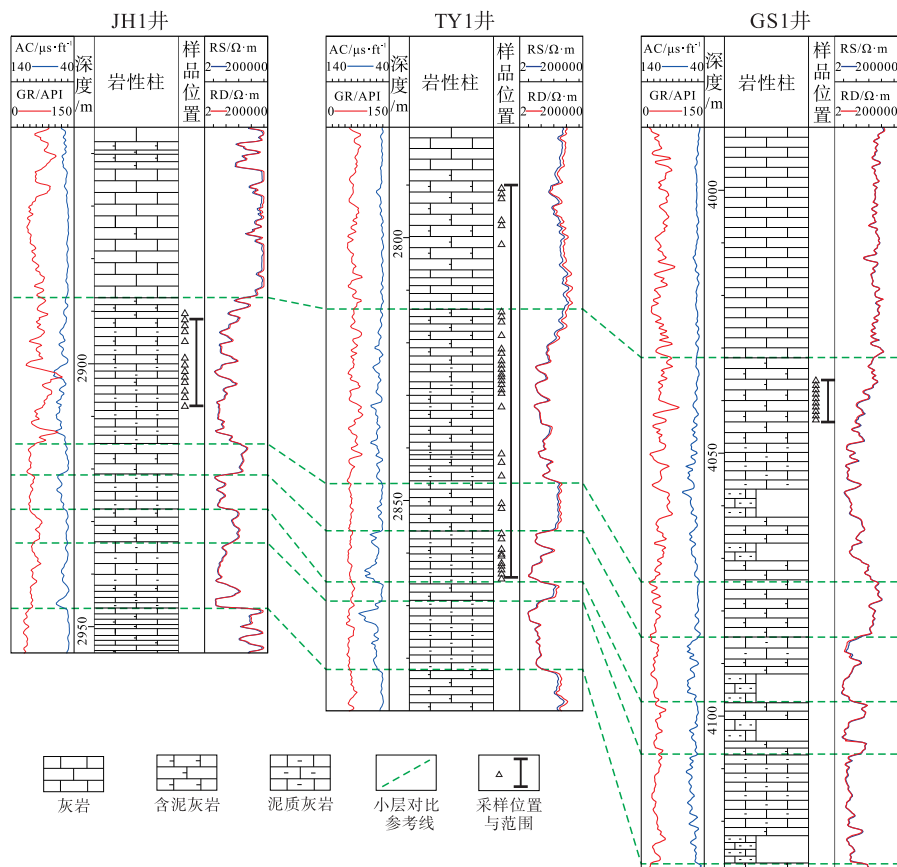


图 2 四川盆地 JH1-TY1-GS1 井茅一段样品相对位置与井间小层对比

Fig. 2 Stratigraphic correlation of the first member of Maokou Formation among Wells JH1-TY1-GS1, Sichuan Basin

GS1 井 10 件、JH1 井 13 件、TY1 井 37 件(图 2)。依次开展了柱塞样氦气法孔隙度测定、全岩矿物 X 衍射分析、总有机碳含量 (TOC) 测试, 部分样品通过扫描电镜观察不同类型孔隙相对发育程度。在进行全岩矿物 X 衍射分析和总有机碳含量 (TOC) 测试前, 需将样品粉碎、研磨至粒径  $150\ \mu\text{m}$  供总有机碳分析, 再将剩余样品研磨至所有颗粒粒径小于  $40\ \mu\text{m}$ , 并用背压法制成测量试片, 以保证测面平整而供全岩矿物 X 衍射分析。

孔隙度测试采用的是  $2.5\ \text{cm}$  直径柱塞样, 测试仪器为 QK-98 气体孔隙度测定仪, 主要依据 GB/T 29172-2012 通过气体法—液体法组合进行孔隙度测试。首先通过液体浮力法获取样品总体积, 再通过双室气体法 (氦气) 测量岩石骨架体积。岩石骨架体积的测量基于气体膨胀进入孔隙平衡后的压力与骨架体积之间的体积标定拟合曲线 (10 个标定点) 进行。孔隙度  $5.5\%$  的标准样品测量  $1\ \text{h}$  误差范围不超过  $0.01\%$ , 实际样品不超过  $0.1\%$ 。

总有机碳含量使用 TP4-04-03 CS-230 碳硫分析仪进行。样品分析前需先通过标样 AR875 (TOC 为  $0.80\%$ )、AR872 (TOC 为  $0.16\%$ )、501-024 (TOC 为  $3.34\%$ ) 对碳硫分析仪进行校准, 此次测试共插入了 14 件标样, 其测量结果与参考值完全一致。约 10 件样品插入 1 件重复样来评估可靠性, 重复样误差不超过  $0.02\%$ 。

全岩矿物衍射使用 D8 A25 X 射线衍射仪, 装备铜靶, 电压  $40\ \text{kV}$ , 电流  $40\ \text{mA}$ , 步长  $0.02^\circ$ , 扫描角度  $3^\circ\sim 45^\circ$ , 扫描速度  $0.8\ \text{s/步}$ 。利用 Jade 6.0 软件获得 X 衍射谱图分析, 依据矿物的衍射峰积分强度与参比强度计算黏土矿物含量、碳酸盐矿物 (方解石+白云石) 含量。尽管通过 X 衍射方法获得的矿物含量误差通常相对较大 (约  $5\%$ ), 但由于本次研究涉及的黏土矿物与碳酸盐矿物均属于样品的主要矿物, 故其含量变化能够真实反映样品之间的差异性。

进行扫描电镜分析的样品需先进行氩离子抛

光, 再通过 Helios 650 聚焦离子束扫描电镜进行观察与拍照。分析过程中, 电压 2~10 kV, 电流 50~800 pA。黏土矿物、碳酸盐矿物与有机质的区分主要依据背散射成像的灰度差异, 并结合能谱分析确定。

### 3 不同类型孔隙的定量表征

#### 3.1 主要储集空间类型

已有大量研究指出, 四川盆地茅一段储集空间以黏土矿物成岩收缩缝、有机孔、矿物颗粒粒缘缝、碳酸盐矿物次生溶蚀孔隙为主(胡东风等, 2020; 赵培荣, 2021; 苏成鹏等, 2021b; 李蓉等, 2024)。此外, 还发现少量缝洞型储集空间(孟宪武等, 2024)。

黏土矿物相关的孔/缝在茅一段泥灰岩中非常发育, 特别是黏土含量高的样品。绝大多数黏土为富镁层状硅酸盐矿物(Cai *et al.*, 2019), 前人研究认为此类孔/缝主要是在海泡石向滑石转化过程中形成的(李蓉等, 2021; 苏成鹏等, 2021b)。茅一段泥灰岩具有较高的有机碳含量, 热演化程度较高( $R_o$  介于 1.71%~2.18%之间), 扫描电镜下可观察到固态沥青内发育大量有机孔(Wang *et al.*, 2023)。在碳酸盐矿物颗粒的边缘还发育具有一定延伸长度的粒缘缝(胡东风等, 2020; 郭彤楼, 2021; 苏成鹏等, 2021b), 其形成可能主要与不同类型矿物之间的物理化学性质差异相关。可观察到黏土矿物通常分布于碳酸盐矿物颗粒之间, 由于碳酸盐矿物极易受到压溶作用的影响, 故如果碳酸盐矿物颗粒之间没有黏土矿物, 其在漫长的埋藏成岩过程中一般会胶结在一起。在构造抬升等应力作用下, 碳酸盐矿物会形成一定微裂缝, 这与泥页岩中脆性矿物的粒缘缝显著不同。碳酸盐矿物极易发生重结晶、溶解再沉淀等成岩后生变化, 故在碳酸盐矿物内部可观察到一定量的次生溶蚀孔隙(苏成鹏等, 2021b)。

综上, 茅一段的储集空间以黏土矿物相关孔隙、有机孔与碳酸盐矿物相关孔隙为主, 分别代表了黏土矿物、有机质与碳酸盐矿物三者对基质孔隙的相对贡献。

#### 3.2 不同类型孔隙相对贡献的定量表征

前人通过建立页岩孔隙的岩石物理模型, 表征脆性矿物、有机质和黏土矿物对总孔隙度的相对贡

献(王道富等, 2013; 王玉满等, 2014)。夏文谦等(2021)借鉴这种方法, 以 JY66-1 井为例对茅一段储集空间进行了定量分析, 认为脆性矿物相关孔隙贡献比例最高。本次研究亦借鉴该方法, 基于样品孔隙度与有机碳含量、黏土含量及碳酸盐矿物含量的关系, 采用三元线性拟合的方法表征茅一段不同类型储集空间的相对贡献。

笔者利用三元线性方程对孔隙度(因变量)、总有机碳含量(自变量 1)、黏土含量(自变量 2)、碳酸盐矿物含量(自变量 3)进行拟合分析获取线性方程, 分别获取有机质、黏土矿物、碳酸盐矿物三者对储集空间的贡献系数(自变量系数  $K$ )。

线性方程如下所示:

$$\Phi = K_1 \times A_{\text{Clay}} + K_2 \times A_{\text{TOC}} + K_3 \times A_{\text{Carbonate}}$$

式中  $\Phi$  为孔隙度(%)或总孔容 $\times 100$  (ml/g),  $A_{\text{Clay}}$ 、 $A_{\text{TOC}}$ 、 $A_{\text{Carbonate}}$  分别为黏土矿物、有机质与碳酸盐矿物(方解石+白云石)含量,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、分别为各自的贡献系数, 通过相关系数( $R^2$ )评估拟合线性方程的可靠性。

依据贡献系数可获得各样品的拟合孔隙度值, 并将其与实际测量结果对比, 查看拟合方程有效性。依据各自贡献系数、含量与拟合孔隙度的比值, 计算不同类型孔隙的相对贡献。

对 TY1 井、JH1 井和 GS1 井样品数据分别进行了拟合分析, 结果如下:

GS1 井:  $\Phi = 0.05686(K_1) \times A_{\text{Clay}} + 1.35205(K_2) \times A_{\text{TOC}} + 0.00075(K_3) \times A_{\text{Carbonate}}$  ( $R^2 = 0.95$ ), 实际样品的拟合孔隙度值与实测孔隙度值相关系数达 0.83。

TY1 井:  $\Phi = 0.05049(K_1) \times A_{\text{Clay}} + 0.99556(K_2) \times A_{\text{TOC}} + 0.00143(K_3) \times A_{\text{Carbonate}}$  ( $R^2 = 0.87$ ), 实际样品的拟合孔隙度值与实测孔隙度值相关系数为 0.61。

JH1 井:  $\Phi = 0.01802(K_1) \times A_{\text{Clay}} + 1.82122(K_2) \times A_{\text{TOC}} + 0.00247(K_3) \times A_{\text{Carbonate}}$  ( $R^2 = 0.96$ ), 实际样品的拟合孔隙度值与实测孔隙度值相关系数达 0.86。

从拟合效果看, GS1 井与 JH1 井三元线性拟合的相关系数以及拟合孔隙度与实测孔隙度的相关系数均较高, TY1 井样品三元线性拟合的相关系数略低(0.87), 拟合孔隙度与实测孔隙度相关系数相对偏低(0.61)。由此可见, 依据矿物相对百分含量、总有机碳含量进行三元线性拟合提供了一种孔隙贡献定量方法, 但样品的复杂性与差异性一定程度上影响了拟合效果。为进一步验证拟合结果是否

可靠, 本次研究通过抽取不同孔隙度、不同有机碳含量的样品在氩离子抛光后进行扫描电镜分析, 定性观察不同类型孔隙相对发育的程度, 分析相对贡献拟合计算的合理性。

3 口井茅一段样品中不同类型孔隙的占比如图 3 所示。定量拟合结果显示, GS1 井(图 3-a)、JH1 井(图 3-b) 茅一段样品以有机质相关孔隙占主导, 其孔隙贡献平均值分别为 74.9%、68.4%; 黏土矿物相关孔隙具有一定的贡献, 其孔隙贡献平均值分别为 20.6%、9.5%; TY1 井(图 3-c) 黏土矿物相关孔隙与有机质相关孔隙均具有重要贡献,

其孔隙贡献平均值分别为 42.5%、48.3%。结合取样位置(图 2) 与孔隙纵向分布范围(图 3), 笔者认为茅一段低黏土含量的含泥灰岩以有机质相关孔隙占主导, 而黏土含量较高层段黏土矿物相关孔隙的贡献逐渐增大(图 3-c)。

## 4 讨论

### 4.1 孔隙度与黏土矿物含量、有机质丰度的统计关系

共分析了 8 口井中的茅一段样品黏土矿物含量

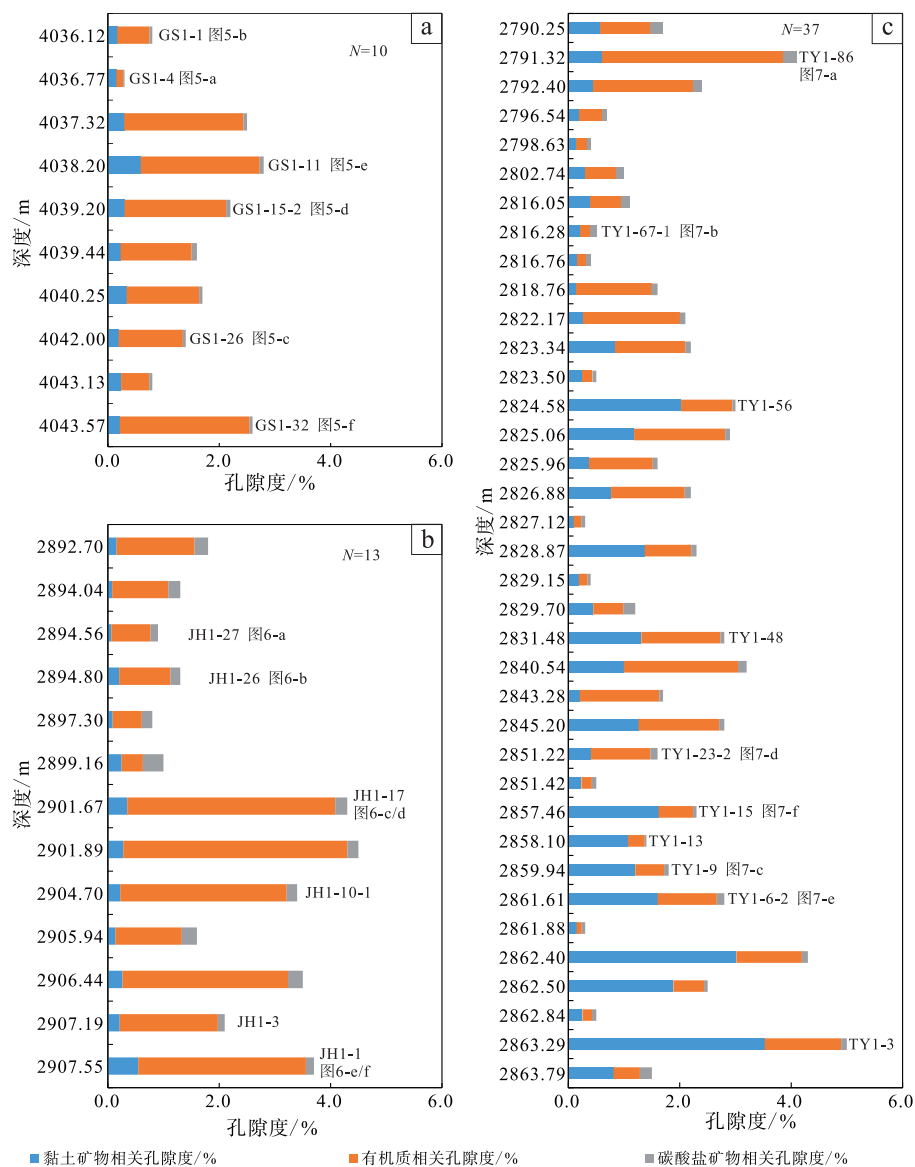


图 3 川南地区茅一段不同类型孔隙对孔隙度的相对贡献

Fig. 3 Relative contribution of different types of pores to the porosity in the first member of Maokou Formation, southern Sichuan Basin

与柱塞样孔隙度 (195 组)、总有机碳含量与柱塞样孔隙度之间 (83 组) 的关系 (图 4-a, 4-c), 发现其总体上具有一定的相关关系。对不同黏土矿物含量、总有机碳含量区间内不同孔隙度范围的样本数及其相对百分含量 (图 4-b, 4-d) 统计发现: 当黏土含量介于 15%~50% 之间时, 孔隙度 > 2% 的样本数相对含量较高, 占 65% (图 4-b); 当 TOC 含量 > 1% 时, 孔隙度 > 2% 的样本数相对含量最高, 占 78% (图 4-d)。由此可见, 茅一段储集空间与储集物性主要受黏土矿物含量和有机质含量的影响。

GS1 等 3 口井茅一段取样范围基本覆盖了研究层位岩性差异, 对比分析其孔隙发育与黏土矿物含量、有机质丰度差异的关系, 对深入认识孔隙发育的控制因素具有重要意义。从实际样品情况看, GS1 井 11 个样品的黏土含量均低于 10%, 黏土含量与总有机碳含量之间基本不具有相关性 (图 5-a), 表明相较于纯生物灰岩, 含泥灰岩的黏土矿物对有机质的富集不具有明显控制作用, 孔隙度与有机碳含量的相关系数  $R^2$  达 0.81 (图 5-b), 表明 GS1 井孔隙度主要受有机碳含量、

有机孔发育程度的控制。JH1 井 13 个样品的孔隙度与有机碳含量的相关系数  $R^2$  为 0.87 (图 5-c), 黏土矿物含量与孔隙度、总有机碳含量具有一定的相关关系, 相关系数分别为 0.47 与 0.48 (图 5-d, 5-e), 揭示其孔隙度变化主要受有机碳含量、有机孔发育程度控制, 但黏土矿物可能对有机质富集具有重要意义。从 TY1 井黏土矿物含量与有机碳、孔隙度与黏土矿物含量、孔隙度与有机碳关系来看 (图 5-f, 5-g, 5-h), 它们之间的相关系数均较低, 表明其孔隙度的高低更可能是受多重因素的协同影响。

#### 4.2 有机质丰度对孔隙发育的影响

茅一段碳酸盐岩总体富含有机质, 如 JY66 井 85 个样本 TOC 含量平均为 0.62%, 其中含泥灰岩与泥质灰岩中 TOC > 0.5% 的样本超过 80%, 达到有效烃源岩评价标准 (胡东风等, 2020)。扫描电镜下亦观察到, 有机孔及 TOC 含量与孔隙度、总孔容呈显著的正相关 (夏文谦等, 2023)。本次研究数据亦揭示, 孔隙度与 TOC 具有一定的正相关, 且 TOC 含量大于 1% 时样品孔隙度超过 2% 的样本

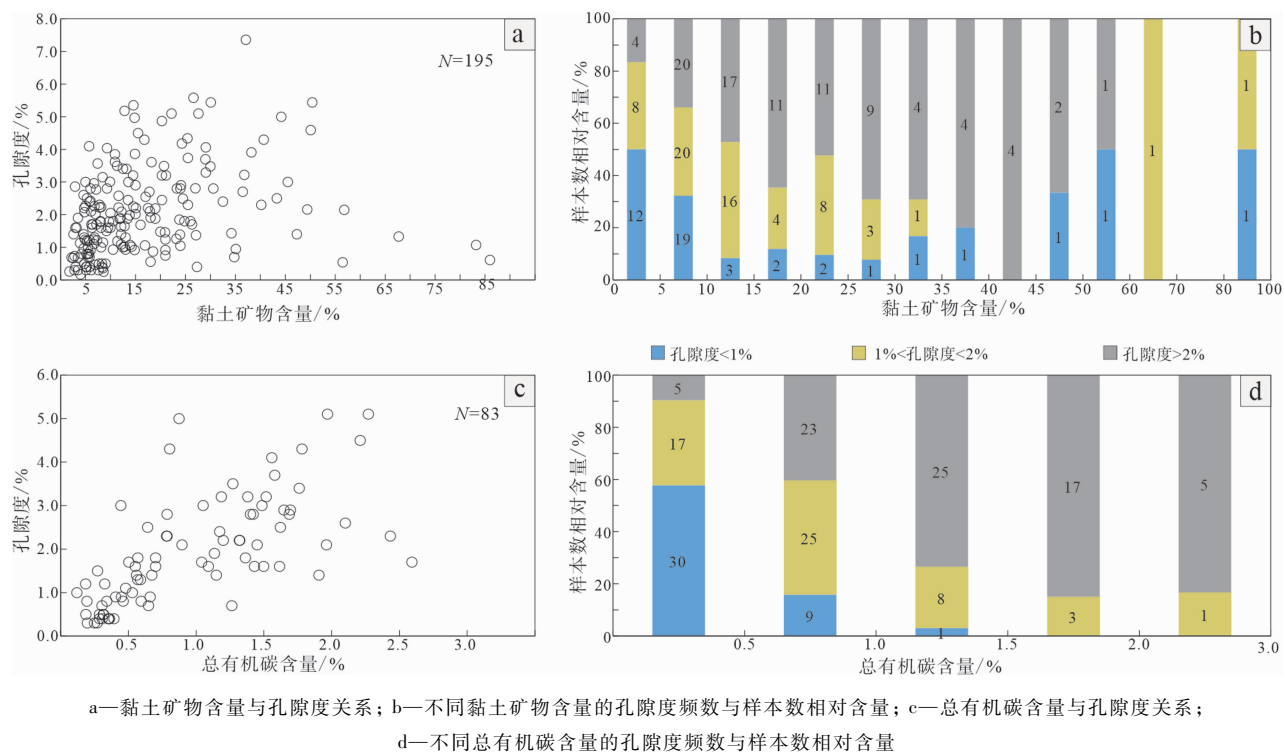
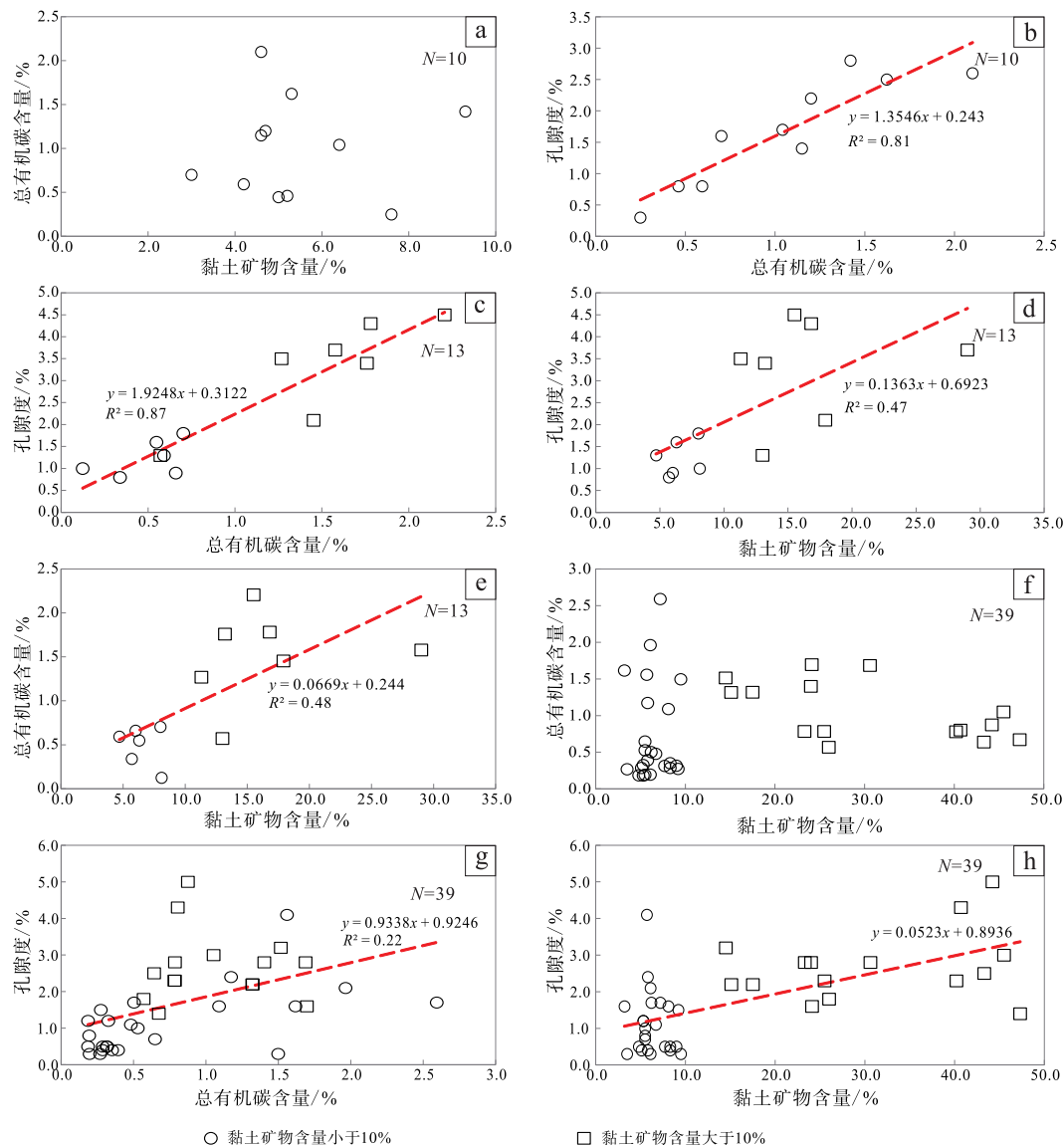


图 4 川南地区茅一段黏土矿物含量、总有机碳含量与孔隙度关系以及相对含量

Fig. 4 Relationship chart among clay mineral content, total organic carbon content, and porosity, as well as relative percentage in the first member of Maokou Formation, southern Sichuan Basin



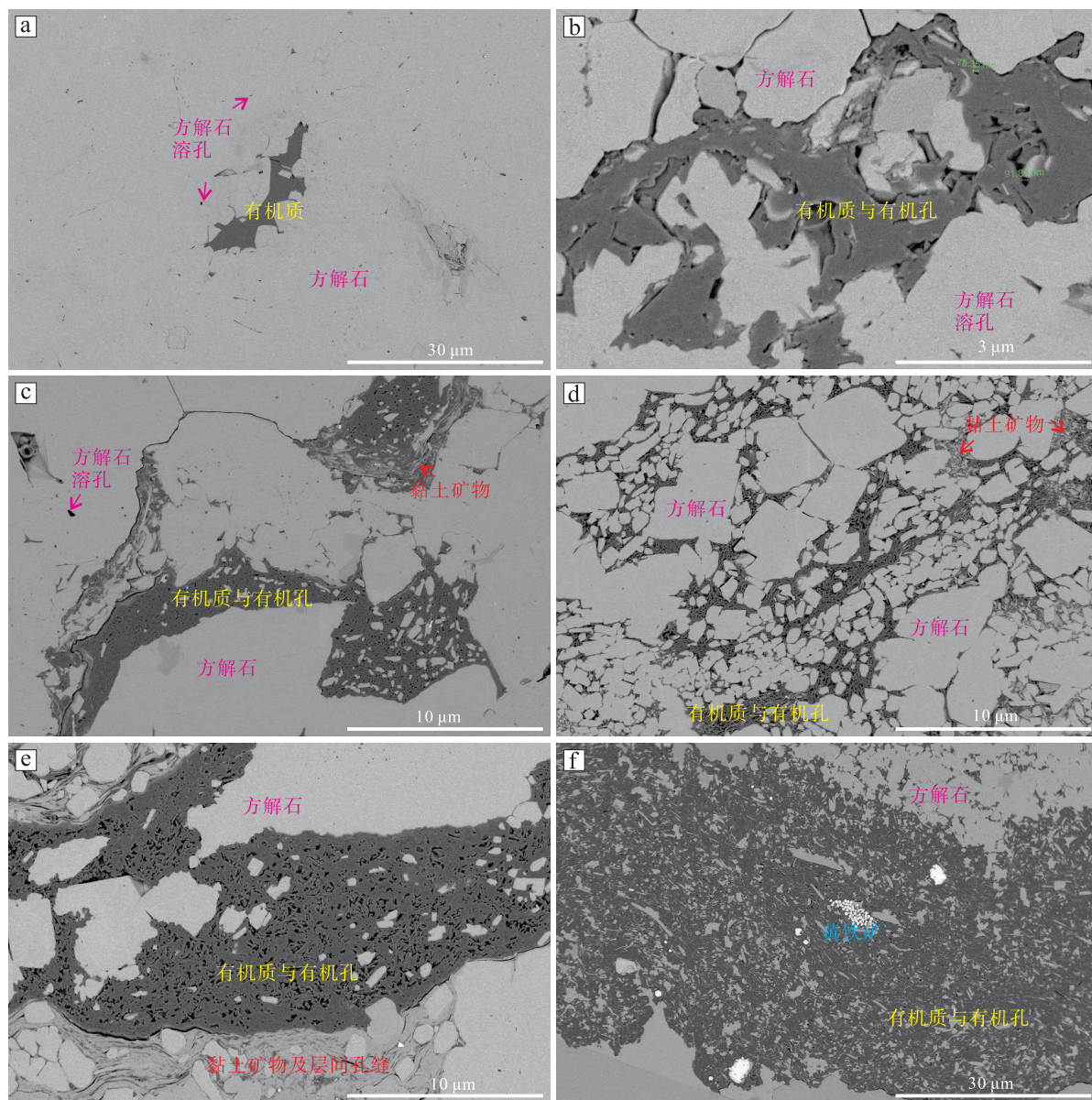
a/b—GS1 井; c/d/e—JH1 井; f/g/h—TY1 井

图 5 川南地区茅一段孔隙度、总有机碳含量、黏土含量之间的相关关系

Fig. 5 Correlation among porosity, total organic carbon content, and clay content in the first member of Maokou Formation, southern Sichuan Basin

数最多(图 4)。GS1 井与 JH1 井孔隙度与 TOC 的相关系数高达 0.81 与 0.87 (图 5), 这与孔隙定量分析结果(图 3-a, 3-b) 相吻合。从扫描电镜图像观察结果看, GS1 井低有机碳含量样品具有相对较低的孔隙度(图 6-a, 6-b), 有机碳含量高、有机孔发育的样品具有较高的孔隙度(图 6-d, 6-e, 6-f)。有机孔发育一定程度上影响了孔隙发育水平, 即部分有机碳含量较高的样品, 有机孔并不发育, 导致孔隙度相对偏低(图 6-c)。JH1 井具有类似特点, 低黏土含量 (6.0%、13%)、低有机碳含

量 (0.66%、0.57%) 样品的孔隙度相对偏低(图 7-a, 7-b), 且有机孔发育程度影响了孔隙度相对高低。高黏土含量 (16.8%、29%)、高有机碳含量 (1.78%、1.58%) 样品的孔隙度 (4.3%、3.7%) 相对较高(图 7-c, 7-d, 7-e, 7-f), 揭示有机质丰度、有机孔发育程度控制了孔隙发育。黏土矿物含量的增加可能对有机富集具有积极意义, 也使得黏土矿物相关孔隙对总孔隙度的贡献增加。TY1 井低黏土矿物含量样品 (<10%) 的有机碳含量、有机孔发育程度影响了样品孔隙度大小, 如图



a—样品 GS1-4, 黏土矿物含量 7.6%、总有机碳含量 0.25%、孔隙度 0.3%, 孔隙不发育; b—样品 GS1-1, 黏土矿物含量 4.2%、总有机碳含量 0.59%、孔隙度 0.8%, 发育少量孔隙; c—样品 GS1-26, 黏土矿物含量 4.6%、总有机碳含量 1.15%、孔隙度 1.4%, 有机孔较发育; d—样品 GS1-15-2, 黏土矿物含量 4.7%、总有机碳含量 1.2%、孔隙度 2.2%, 有机孔较发育; e—样品 GS1-11, 黏土矿物含量 9.3%、总有机碳含量 1.42%、孔隙度 2.8%, 有机孔发育; f—样品 GS1-32, 黏土矿物含量 4.6%、总有机碳含量 2.1%、孔隙度 2.6%, 有机孔发育

图 6 川南地区 GS1 井茅一段样品氩离子电镜下孔隙发育特征差异

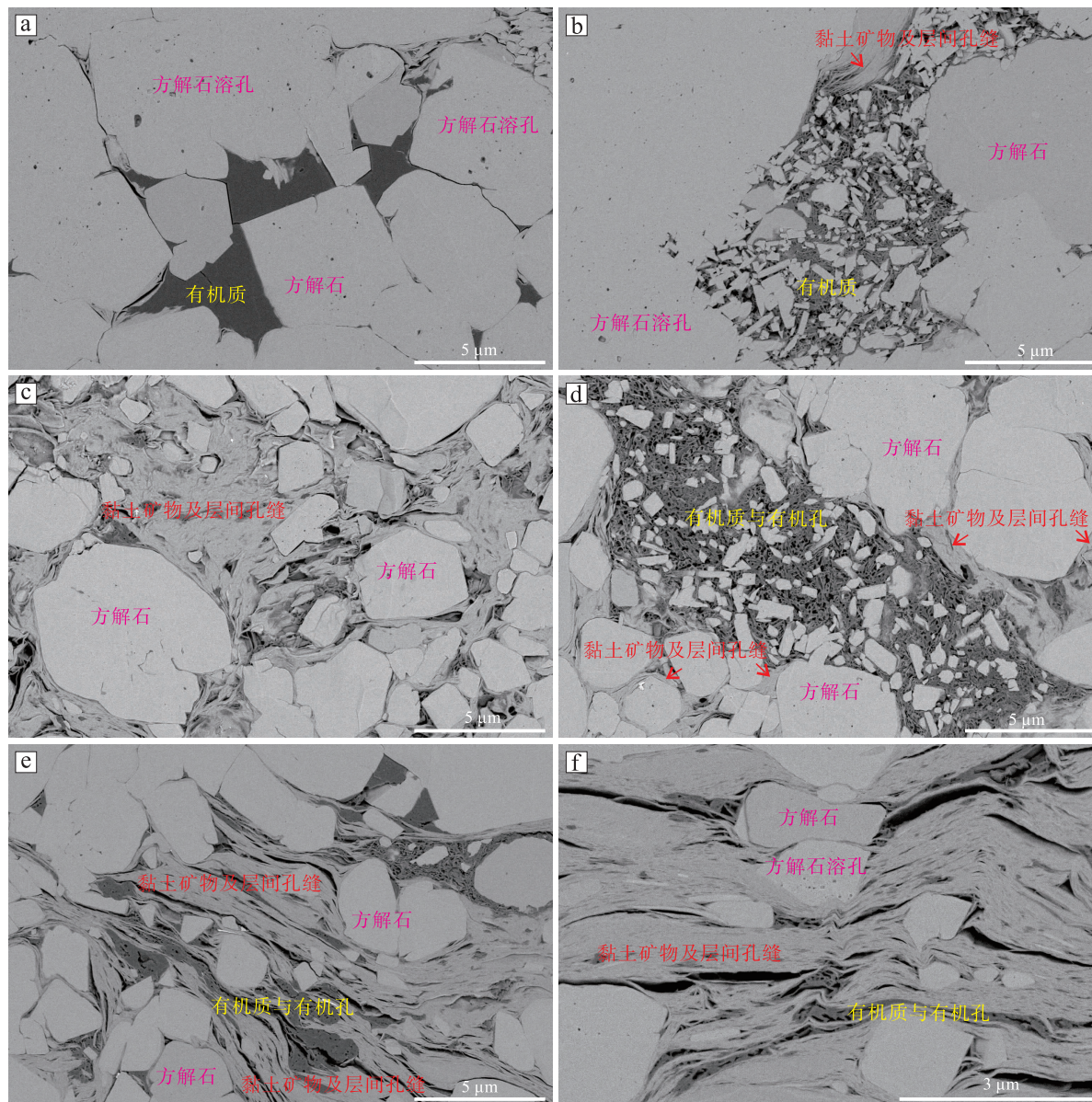
Fig. 6 Differences in pore development characteristics under argon ion electron microscopy of samples in the first member of Maokou Formation in Well GS1, southern Sichuan Basin

8-a 样品中高有机碳含量 (TOC=1.56%)、高有机孔导致孔隙度高达 4.1%, 而图 8-b 样品为低有机碳含量 (TOC=0.19%), 则孔隙度较低 (0.5%)。图 8-d 样品中虽然 TOC 亦高达 1.09%, 但扫描电镜下有机孔则不发育, 相应样品孔隙度亦不高 (1.6%)。由此可见, 对于低黏土矿物含量、相对较纯的碳酸盐岩而言, 有机质丰度及其有机孔发育

程度是影响并控制其孔隙度变化的主要因素。

#### 4.3 黏土矿物含量对孔隙发育的影响

黏土矿物是影响茅一段岩性、电性变化的重要组分。已有研究表明, 茅一段黏土矿物主要由自生成因海泡石及其成岩产物 (混层黏土矿物、滑石) 构成 (苏成鹏等, 2021a; 宋金民等, 2022)。黏土



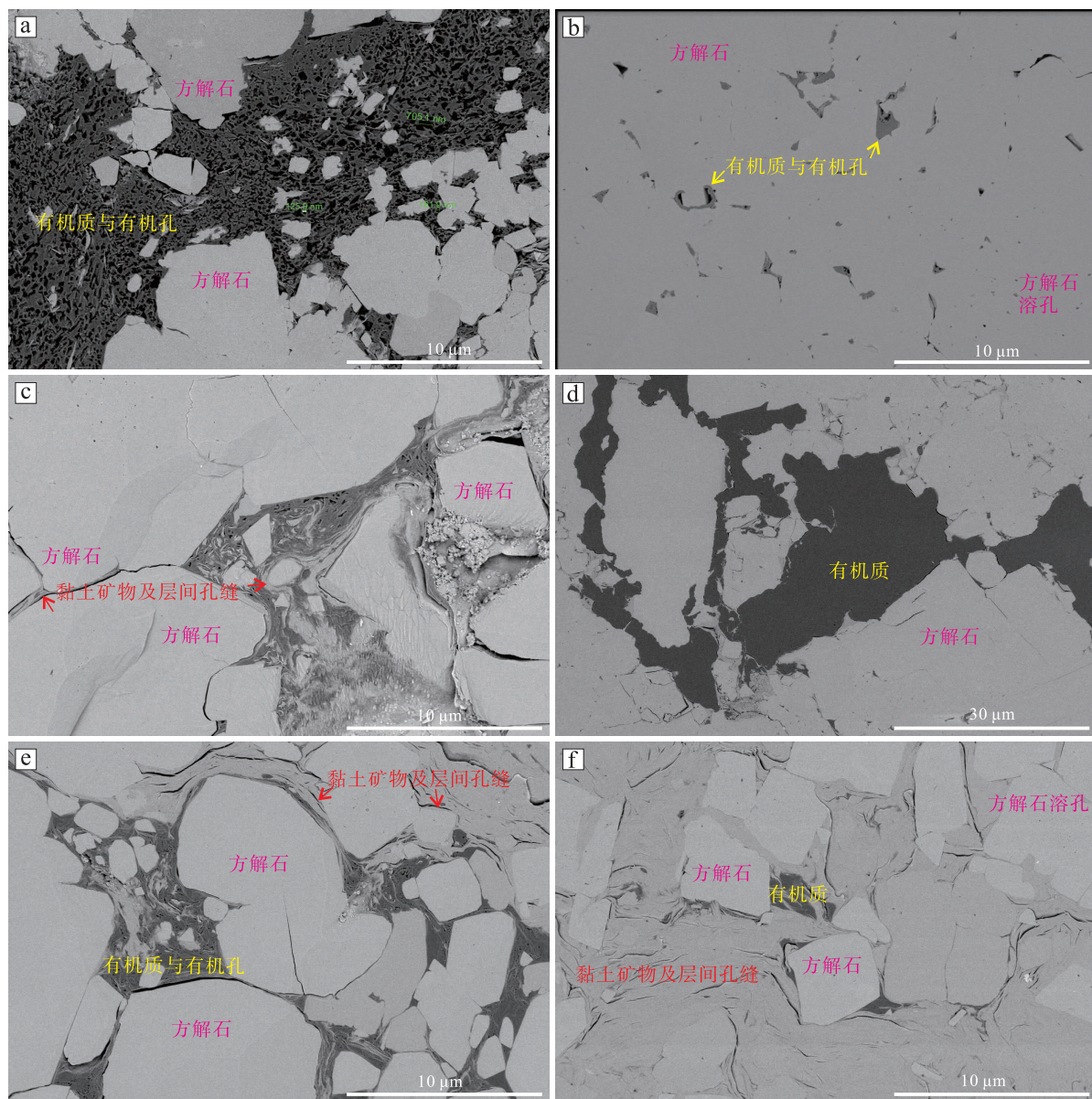
a—样品 JH1-27, 黏土含量 6.0%、有机碳含量 0.66%、孔隙度 0.9%, 有机孔相对不发育; b—样品 JH1-26, 黏土含量 13%、有机碳含量 0.57%、孔隙度 1.3%, 有机孔为主且黏土矿物相关贡献增加; c—样品 JH1-17, 黏土含量 16.8%、有机碳含量 1.78%、孔隙度 4.3%, 有机孔与黏土矿物相关孔隙均较发育; d—与 c 为同一样品, 有机孔极其发育; e—样品 JH1-1, 黏土含量 29%、有机碳含量 1.58%, 孔隙度 3.7%, 黏土矿物相关孔隙与有机孔均较发育; f—样品 E 中局部放大, 可见黏土矿物相关孔隙与有机孔均较为发育

图 7 川南地区 JH1 井茅一段样品氩离子电镜下孔隙发育特征差异

Fig. 7 Differences in pore development characteristics under argon ion electron microscopy of samples in the first member of Maokou Formation in Well JH1, southern Sichuan Basin

矿物成岩演化过程产生的收缩孔缝构成了黏土矿物相关孔隙 (胡东风等, 2020; 郭彤楼, 2021; 李蓉等, 2021)。从孔隙度与黏土矿物含量之间的关系看 (图 4-a, 4-b), 黏土含量与孔隙度之间有一定的相关关系, 当黏土含量位于 15%~50% 之间时, 孔隙度 > 2% 的样本数最多。JH1 井与 TY1 井的相

关分析数据亦具有相似特点 (图 5-d, 5-h)。高黏土矿物含量 (>10%) 样品并不意味着有机碳含量的协同变化。从孔隙定量的相对贡献看, 黏土矿物相关孔隙的相对贡献明显增大 (图 3-c), 如图 8-c, 8-e, 8-f 样品的 TOC 含量均较低 (0.57%、0.79%、0.78%)、孔隙度则较高 (1.8%、2.8%、



a—样品 TY1-86, 黏土矿物含量 5.7%、有机碳含量 1.56%、孔隙度 4.1%, 有机孔非常发育; b—样品 TY1-67-1, 黏土矿物含量 4.8%、有机碳含量 0.19%、孔隙度 0.5%, 发育少量孔隙; c—样品 TY1-9, 黏土矿物含量 26%、有机碳含量 0.57%、孔隙度 1.8%, 黏土矿物相关孔隙较发育; d—样品 TY1-23-2, 黏土矿物含量 8.1%、有机碳含量 1.09%、孔隙度 1.6%, 有机孔不发育; e—样品 TY1-6-2, 黏土矿物含量 23.3%、有机碳含量 0.79%、孔隙度 2.8%, 黏土矿物相关孔隙发育; f—样品 TY1-15, 黏土矿物含量 40.2%、有机碳含量 0.78%、孔隙度 2.3%, 黏土矿物相关孔隙发育

图 8 川南地区 TY1 井茅一段样品氩离子电镜下孔隙发育特征差异

Fig. 8 Differences in pore development characteristics under argon ion electron microscopy of samples in the first member of Maokou Formation in Well TY1, southern Sichuan Basin

2.3%)，表明高黏土矿物含量的泥灰岩中黏土矿物相关孔隙影响并控制着孔隙度的大小。黏土矿物的抗压实能力较弱，在黏土矿物含量超过 50% 的样品（灰质泥岩、含灰泥岩）中往往具有较低的孔隙度（图 4）。

其他因素如碳酸盐矿物裂缝、次生溶蚀等，一定程度上影响了相关孔隙发育程度（苏成鹏等，2021b；李蓉等，2024；孟宪武等，2024）。此次研究并未发现其与总孔隙度变化存在明确的相关关系。

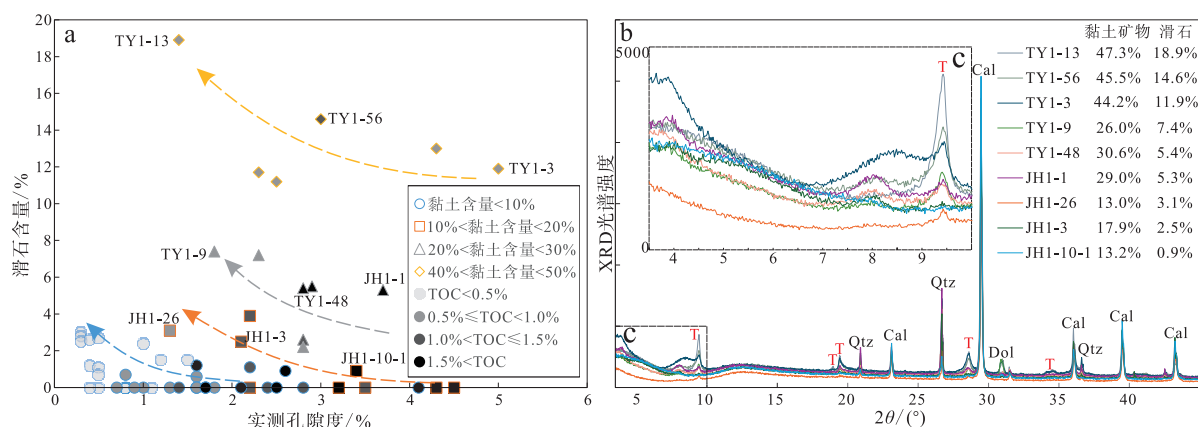
#### 4.4 有机质演化与黏土矿物成岩对孔隙发育的影响

有机质相关孔隙的形成受多种因素的控制,如有机质类型、有机质成熟度、成岩作用等(聂海宽等, 2022)。川西南地区茅一段等效镜质体反射率为 1.8%~2.0% (李蓉等, 2021), 川东南涪陵地区 1.71%~2.18% (胡东风等, 2020), TY1 井实测等效镜质体反射率达 2.06%~2.24%, GS1 井实测等效镜质体反射率达 2.48%。从区域构造埋藏史与有机质成熟度分析看, 四川盆地茅一段有机质均达到了高成熟阶段, 局部地区达到过成熟阶段。已有研究表明, 有机成熟度达到 1.2% 开始产生有机孔, 超过 2.0% 则有机孔则大量发育 (Chen and Xiao, 2014)。从实际样品看(图 6-a; 图 7-a; 图 8-d), 部分有机质不发育有机孔, 可能与其特定有机质类型相关。茅一段低成熟度样品热模拟实验揭示当样品处于高成熟—过成熟阶段 (1.54%~2.17%), 有利于孔隙发育 (Wang *et al.*, 2023)。

前人将黏土矿物相关孔隙(成岩收缩缝/滑石缝)的形成归功于滑石化作用, 提出茅一段沉积型海泡石转变为滑石, 导致黏土矿物层间孔缝的形成(胡东风等, 2020; 李蓉等, 2021)。但最新研究发现, 滑石含量与孔隙度之间基本不具有相关性, 高滑石含量的样品孔隙度不一定高(李蓉等, 2024)。扫描电镜条件下, 依据能谱分析数据鉴别海泡石、滑石及其混层矿物类别需要非常谨慎。从海泡石向滑石成岩的“脱水、排硅”过程看, 随

着成岩作用的加强, 黏土矿物比表面积降低, 必然导致相关孔隙逐渐减少。依据样本 X 衍射图谱中的黏土矿物与滑石特征峰位置及强度, 计算其质量百分含量, 其中无滑石响应峰的样本赋值为 0 (图 9-a 中位于横坐标上的样本点)。分析本次研究的 60 件样本数据中实测孔隙度与滑石含量的关系(图 9), 结果表明不同有机碳含量区间内, 黏土矿物中随滑石含量的增加孔隙度呈明显降低趋势(图 9-a), 代表性样本 X 衍射谱中黏土矿物与滑石响应峰强度具有显著差异性(图 9-b, 9-c)。同时, 有机碳含量较高的样本 (TOC>1.0%), 其实测孔隙度总体偏高(图 9-a), 揭示出有机质成熟、过成熟过程中有机孔的发育对总孔隙的贡献。茅一段原始有机质或外源烃类在高成熟—过成熟阶段产生的裂解气, 会进入黏土矿物的格架并形成有效支撑体系(胡东风等, 2020)。茅一段以方解石为代表的碳酸盐矿物在成岩过程极易发生溶解—沉淀, 其结构支撑性低于页岩气系统的脆性矿物石英、长石等。

基于对四川盆地茅一段沉积、成岩与成烃过程的综合理解, 建立了其微观孔隙演化模式(图 10)。沉积阶段, 黏土矿物主要为沉积型黏土矿物——海泡石(苏成鹏等, 2021a)与原始有机质的富集; 成油阶段, 海泡石转化为混层黏土矿物(常称为富镁蒙脱石), 有机质成熟生油并进入了混层黏土矿物层间孔隙; 原油裂解生气阶段, 混层黏土矿物进一步成岩, 导致滑石矿物的产生与部分层间孔隙的消失, 原油发生裂解形成固态沥青质与大量甲烷



a—实测孔隙度随滑石含量变化的趋势图; b—代表性样本(图 a)的 X 衍射谱; c—黏土矿物主峰(图 b 中局部放大)响应特征。

T: 滑石; Qtz: 石英; Cal: 方解石; Dol: 白云石

图 9 川南地区茅一段样品滑石含量与孔隙度关系

Fig. 9 Relationship between content of talc and porosity of samples in the first member of Maokou Formation, southern Sichuan Basin

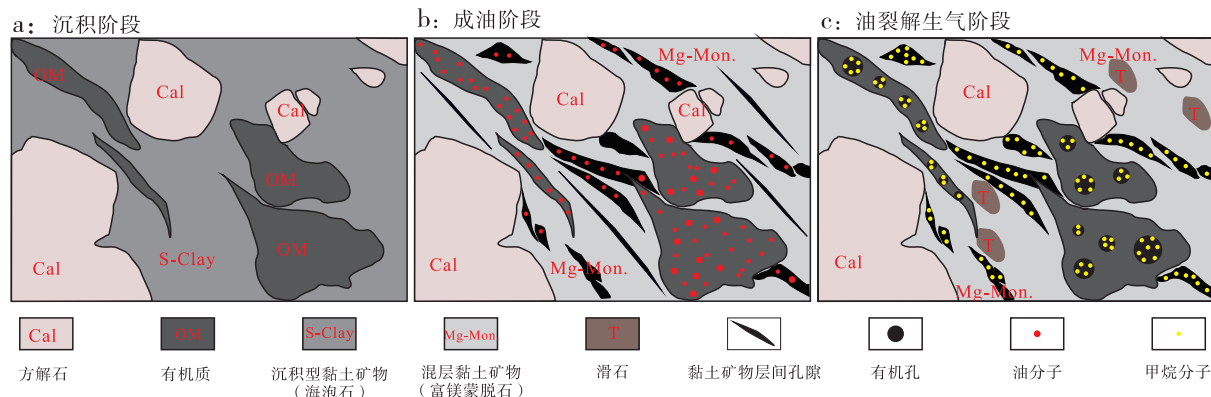


图 10 川南地区茅一段微观孔隙演化模式

Fig. 10 Micropore evolution model of the first member of Maokou Formation, southern Sichuan Basin

气体，支撑了黏土矿物层间孔隙与有机孔。

## 5 结论

1) 四川盆地 GS1、JH1 井茅口组一段样本以有机质相关孔隙为主，而 TY1 井黏土矿物相关孔隙与有机质相关孔隙均具有重要贡献。结合样本位置与分布范围，进一步揭示出低黏土含量的含泥灰岩、灰岩以有机质相关孔隙为主，高黏土含量的泥质灰岩中黏土矿物相关孔隙相对贡献明显增加。

2) 大量样本的孔隙度与黏土矿物含量、总有机碳含量的统计分析揭示，黏土矿物含量介于 15%~50% 之间或 TOC 含量大于 1% 时，孔隙度超过 2% 的样本数最多，揭示黏土矿物与有机质对茅一段孔隙具有最重要的贡献。

3) 对于低黏土矿物含量的含泥灰岩而言，其孔隙发育程度主要受总有机碳含量与有机孔发育程度的控制。孔隙度与总有机碳含量具有明确的正相关关系，相关系数高达 0.87。随着黏土矿物含量的增加，黏土矿物相关孔隙对孔隙的贡献明显提高，在高黏土含量的泥质灰岩中其贡献可达 70% 以上。

## 参考文献 (References)

- 郭彤楼. 2021. 四川盆地碳酸盐岩源岩气地质特征与勘探前景. 西南石油大学学报(自然科学版), 43(1): 1-16. [Guo T L. 2021. Geological characteristics and exploration prospect of carbonate source rock gas in Sichuan Basin. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 43(1): 1-16]
- 韩月卿, 李双建, 韩文彪, 赵红琴, 刘光祥, 郝运轻. 2022. 川东南地区

中二叠统茅口组灰泥灰岩储层孔隙特征. 石油实验地质, 44(4): 666-676. [Han Y Q, Li S J, Han W B, Zhao H Q, Liu G X, Hao Y Q. 2022. Pore characteristics of marl reservoir in Maokou Formation of Middle Permian, southeastern Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 44(4): 666-676]

胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 杨威, 刘满仓. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测. 石油勘探与开发, 39(1): 45-55. [Hu M Y, Hu Z G, Wei G Q, Yang W, Liu M C. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development, 39(1): 45-55]

胡东风, 王良军, 张汉荣, 段金宝, 夏文谦, 刘珠江, 魏全超, 王昆, 潘磊. 2020. 碳酸盐岩烃源岩气藏的发现及其油气地质意义: 以四川盆地涪陵地区中二叠统茅口组一段气藏为例. 天然气工业, 40(7): 23-33. [Hu D F, Wang L J, Zhang H R, Duan J B, Xia W Q, Liu Z J, Wei Q C, Wang K, Pan L. 2020. Discovery of carbonate source rock gas reservoir and its petroleum geological implications: a case study of the gas reservoir in the first Member of Middle Permian Maokou Formation in the Fuling area, Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 40(7): 23-33]

黄涵宇, 何登发, 李英强, 王贝. 2017. 四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化. 岩石学报, 33(4): 1317-1337. [Huang H Y, He D F, Li Y Q, Wang B. 2017. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1317-1337]

江青春, 胡素云, 汪泽成, 池英柳, 杨雨, 鲁卫华, 王海真, 李秋芬. 2012. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区. 石油学报, 33(6): 949-960. [Jiang Q C, Hu S Y, Wang Z C, Chi Y L, Yang Y, Lu W H, Wang H Z, Li Q F. 2012. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions. Acta Petrologica Sinica, 33(6): 949-960]

匡明志, 张小兵, 袁海峰, 陈聪, 张玺华, 彭瀚霖, 徐婷, 肖钦仁, 李天军, 山述娇. 2024. 川中地区茅口组碳酸盐岩层序地层及沉积相

- 特征. 古地理论, 26(5): 1201-1220. [Kuang M Z, Zhang X B, Yuan H F, Chen C, Zhang X H, Peng H L, Xu T, Xiao Q R, Li T J, Shan S J. 2024. Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the Maokou Formation carbonate rocks in central Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(5): 1201-1220]
- 李大军, 陈辉, 陈洪德, 梁虹, 彭才, 夏铭, 段宏臻. 2016. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系. 石油与天然气地质, 37(5): 756-763. [Li D J, Chen H, Chen H D, Liang H, Peng C, Xia M, Duan H Z. 2016. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 756-763]
- 李蓉, 苏成鹏, 石国山, 贾霍甫, 李素华, 余洋. 2021. 川南地区二叠系茅口组一段瘤状灰岩储层成因. 天然气地球科学, 32(6): 806-815. [Li R, Su C P, Shi G S, Jia H F, Li S H, Yu Y. 2021. The genesis of nodular limestone reservoirs of the first period of Maokou Formation of Permian in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(6): 806-815]
- 李蓉, 宋晓波, 苏成鹏, 李素华, 赵黔荣, 朱兰, 林辉. 2024. 川南威远地区二叠系茅口组一段泥灰岩储层特征及其发育主控因素. 石油实验地质, 46(5): 1028-1038. [Li R, Song X B, Su C P, Li S H, Zhao Q R, Zhu L, Lin H. 2024. Characteristics and main controlling factors of the marlstone reservoirs of the first member of Permian Maokou Formation in Weiyuan area, southern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(5): 1028-1038]
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 罗毅, 张学丰. 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向. 石油学报, 31(3): 347-354. [Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, Luo Y, Zhang X F. 2010. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 347-354]
- 孟宪武, 尤东华, 李蓉, 宋晓波, 张力钰, 朱兰. 2024. 四川盆地茅口组一段缝洞充填物特征及成因: 以 A1 井为例. 石油实验地质, 46(3): 483-490. [Meng X W, You D H, Li R, Song X B, Zhang L Y, Zhu L. 2024. Characteristics and genesis of fillings in fracture-cavity space in first member of Permian Maokou Formation, Sichuan Basin; a case study of well A1. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(3): 483-490]
- 聂海宽, 张光荣, 李沛, 丁江辉, 党伟, 孙川翔, 张培先, 王进, 杨超, 李鹏, 王鹏威, 苏海琨. 2022. 页岩有机孔研究现状和展望. 石油学报, 43(12): 1770-1787. [Nie H K, Zhang G R, Li P, Ding J H, Dang W, Sun C X, Zhang P X, Wang J, Yang C, Li P, Wang P W, Su H K. 2022. Research status and prospect on organic matter pores in shale. *Acta Petrolei Sinica*, 43(12): 1770-1787]
- 宋金民, 刘树根, 金鑫, 汪华, 范建平, 江青春, 田小彬, 叶玥豪, 李亚, 李智武, 杨迪, 王佳蕊, 罗平. 2022. 四川盆地中二叠统含海泡石层系源储组合新模式及其油气勘探新领域. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(2): 129-149. [Song J M, Liu S G, Jin X, Wang H, Fan J P, Jiang Q C, Tian X B, Ye Y H, Li Y, Li Z W, Yang D, Wang J R, Luo P. 2022. A new model of source-reservoir association and new fields of oil and gas exploration in the Middle Permian sepiolite bearing strata, Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(2): 129-149]
- 苏成鹏, 谭秀成, 王小芳, 李飞, 芦飞凡, 李明隆, 胡笙. 2020. 四川盆地东部中二叠统茅口组眼球状石灰岩储层特征及成因. 海相油气地质, 25(1): 55-62. [Su C P, Tan X C, Wang X F, Li F, Lu F F, Li M L, Hu S. 2020. Characteristics of eyeball-shaped limestone reservoir and its genesis of the Middle Permian Maokou Formation in East Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(1): 55-62]
- 苏成鹏, 李飞, 谭秀成, 王小芳, 龚峤林, 李明隆, 芦飞凡, 唐浩, 邓嘉婷, 李红. 2021a. 古代碳酸盐岩台地自生泥质组分成因及意义: 以上寺剖面中二叠统茅口组为例. 沉积学报, 39(3): 550-570. [Su C P, Li F, Tan X C, Wang X F, Gong Q L, Li M L, Lu F F, Tang H, Deng J T, Li H. 2021a. Origin and significance of authigenic argillaceous components on the ancient carbonate platform: a case study from the Maokou Formation of the Middle Permian at the Shangsi section, Guangyuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 550-570]
- 苏成鹏, 李蓉, 石国山, 贾霍甫, 宋晓波. 2021b. 四川盆地及周缘中二叠统茅口组一段储集层特征及对油气勘探的启示. 石油勘探与开发, 48(6): 1150-1161. [Su C P, Li R, Shi G S, Jia H F, Song X B. 2021b. Reservoir characteristics of the first member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and its Periphery and inspirations to petroleum exploration, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1150-1161]
- 王道富, 王玉满, 董大忠, 王世谦, 黄金亮, 黄勇斌, 王淑芳, 李新景. 2013. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征. 天然气工业, 33(7): 1-10. [Wang D F, Wang Y M, Dong D Z, Wang S Q, Huang J L, Huang Y B, Wang S F, Li X J. 2013. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Cambrian Qiongzhusi shale, southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 33(7): 1-10]
- 王佳蕊, 宋金民, 刘树根, 范建平, 黄士鹏, 李立基, 金鑫, 冯宇翔, 王俊柯, 王杉杉. 2022. 川东地区茅口组一段微孔特征及其主控因素. 非常规油气, 9(3): 32-41. [Wang J R, Song J M, Liu S G, Fan J P, Huang S P, Li L J, Jin X, Feng Y X, Wang J K, Wang S S. 2022. Micropore characteristics and main controlling factors of the Mao1 Member of Maokou Formation in eastern Sichuan. *Unconventional Oil & Gas*, 9(3): 32-41]
- 王玉满, 董大忠, 杨桦, 何伶, 王世谦, 黄金亮, 蒲泊伶, 王淑芳. 2014. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征. 中国科学(地球科学), 44(6): 1348-1356. [Wang Y M, Dong D Z, Yang Y, He L, Wang S Q, Huang J L, Pu P L, Wang S F. 2014. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, southern Sichuan Basin, China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(6): 1348-1356]
- 夏文谦, 张汉荣, 刘瑾, 汪雷. 2021. 川东南地区茅口组第一段灰泥灰岩储层储集空间构成定量分析. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(4): 435-444. [Xia W Q, Zhang H R, Liu J, Wang L.

2021. Quantitative analysis of the space composition of marlite reservoir in the first member of Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(4): 435-444]
- 夏文谦,刘瑾,俞俊杰,张汉荣,汪建辉,魏富彬,章思遥. 2023. 川东南涪陵地区二叠系茅口组一段泥质灰岩储层特征及主控因素. *矿物岩石*, 43(4): 100-108. [Xia W Q, Liu J, Yu L J, Zhang H R, Wang J H, Wei F B, Zhang S Y. 2023. Characteristics and main controlling factors of argillaceous limestone reservoir in the first Member of Permian Maokou Formation in Fuling area, southeast Sichuan Basin. *Mineralogy and Petrology*, 43(4): 100-108]
- 张运波,王根厚,余正伟,赵宗举,王明健,孙衍鹏. 2013. 四川盆地中二叠统茅口组米兰科维奇旋回及高频层序. *古地理学报*, 15(6): 777-786. [Zhang Y B, Wang G H, Yu Z W, Zhao Z J, Wang M J, Sun Y P. 2013. Milankovitch cycles and high-frequency sequences of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(6): 777-786]
- 周进高,姚根顺,杨光,谷明峰,姚倩颖,江青春,杨柳,杨雨然. 2016. 四川盆地栖霞组一茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带. *天然气工业*, 36(4): 8-15. [Zhou J G, Yao G S, Yang G, Gu M F, Yao Q Y, Jiang Q C, Yang L, Yang Y R. 2016. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 36(4): 8-15]
- 张培先,何希鹏,高全芳,高玉巧,孙斌,蔡潇,何贵松,张志萍,刘娜娜. 2021. 四川盆地东南缘二叠系茅口组一段页岩气藏地质特征及富集模式. *石油与天然气地质*, 42(1): 146-157. [Zhang P X, He X P, Gao Q F, Gao Y Q, Sun B, Cai X, He G S, Zhang Z P, Liu N N. 2021. Geological characteristics and enrichment pattern of Permian Mao 1 Member shale gas reservoirs at the southeastern margin of Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 146-157]
- 赵培荣. 2021. 焦石坝地区茅一段储层特征及天然气勘探潜力. *油气藏评价与开发*, 11(5): 772-781. [Zhao P R. 2021. Reservoir characteristics and gas exploration potential of Permian Mao-1 member of Maokou Formation in Jiaoshiba Area. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 11(5): 772-781]
- Chen F Y, Xue W Q, Yan J X, Wignall P B, Meng Q, Luo J X, Feng Q L. 2018. Alatoconchids: giant Permian bivalves from South China. *Earth-Science Reviews*, 179: 147-167.
- Chen J, Xiao X M. 2014. Evolution of nanoporosity in organic-rich shales during thermal maturation. *Fuel*, 129: 173-181.
- Cai Z X, Li J, Chen H R, Cong F Y, Wu N, Wang L J, Wei Q C, Luo Y P. 2019. Genesis of Mg-phyllsilicate occurrences in the Middle Permian marine successions of South China. *Applied Clay Science*, 181: 105242.
- Gao P, He Z L, Lash G G, Li S J, Xiao X M, Han Y Q, Zhang R Q. 2020. Mixed seawater and hydrothermal sources of nodular chert in Middle Permian limestone on the eastern Paleo-Tethys margin (South China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 551: 109740.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322(5898): 64-68.
- Li J, Cai Z X, Chen H R, Cong F Y, Wang L J, Wei Q C, Luo Y P. 2018. Influence of differential diagenesis on primary depositional signals in limestone-marl alternations: an example from Middle Permian marine successions, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 495: 139-151.
- Meng Q, Xue W Q, Chen F Y, Yan J X, Cai J H, Sun Y D, Wignall P B, Liu K, Liu Z C, Chen D. 2022. 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. *Earth-Science Reviews*, 228: 104011.
- Wang Z H, Ma Z L, Zheng L J, Wang J Y, Wen Z G, Si C Y. 2023. Dynamic evolution characteristics of the "source-reservoir" integration of gray marl and its geological significance to unconventional gas: insights from pyrolysis experiments. *Petroleum Science*, 20(2): 705-720.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)