

文章编号: 1671-1505(2025)03-0714-17 DOI:10.7605/gdtxb.2025.02.007

海相富有机质页岩储集层特征、成因类型和机制： 以川南长宁五峰组—龙马溪组为例*

廖崇杰^{1,2} 陈雷^{1,2} 古志斌³ 刘丙晓³
杨莉⁴ 谭秀成^{1,2,5} 熊敏^{1,2} 曹剑⁶

- 1 天然气地质四川省重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500
2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 四川成都 610500
3 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川成都 610051
4 四川页岩气勘探开发有限责任公司, 四川成都 610051
5 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500
6 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

摘要 以四川盆地南部长宁地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例, 通过对各井的矿物组分、总有机碳 (TOC) 含量、孔隙度、含气性和沉积古地貌特征研究, 对海相富有机质页岩的储集层成因机制进行分析。研究发现: (1) 五峰组主要发育碳酸盐矿物和硅质矿物, 页岩 TOC 含量、孔隙度和含气性均相对较低/较差; 龙马溪组龙一₁ 亚段下部页岩以硅质矿物为主, TOC 含量、孔隙度和含气性均表现最好; 龙一₁ 亚段上部主要以黏土矿物为主, TOC 含量、孔隙度和含气性均较低/较差。(2) 将五峰组—龙马溪组海相页岩储集层划分为 3 个大类: 基质孔隙型储集层、黏土裂缝型储集层和有机孔型储集层, 其中基质孔隙型储集层主要发育在五峰组, 有机孔型储集层主要发育在龙一₁ 亚段下部, 龙一₁ 亚段上部则以发育黏土裂缝型储集层为主, 研究表明有机孔型储集层孔隙度高、含气性好, 是最优质的海相页岩气储集层。(3) 依据残留厚度和补偿厚度印模法, 以下二叠统梁山组底界面为依据绘制出龙马溪组沉积前古地貌格局, 通过对龙一₁ 亚段下部储集层特征与古地貌格局对比, 表明古隆起控制优质烃源岩、斜坡区控制优质储集层, 古隆起与陆源输入联合控制脆性矿物分布。研究提供了一种新的海相富有机质页岩储集层勘探新思路, 结果将有助于丰富中国南方海相页岩气富集理论。

关键词 富有机质页岩 储集层特征 成因类型 成因机制 古地貌 奥陶系 四川盆地

第一作者简介 廖崇杰, 男, 1998 年生, 博士研究生, 主要从事非常规油气地质和沉积学的学习与研究。
E-mail: chongjie98@163.com。

通讯作者简介 陈雷, 男, 1985 年生, 教授, 主要从事非常规油气地质和层序地层学研究。E-mail: cl211@126.com。

中图分类号: TE122.2 文献标志码: A

Characteristics, genetic types and mechanisms of marine organic-rich shale reservoirs: a case study of the Wufeng–Longmaxi Formations in Changning area, southern Sichuan Basin

* 国家自然科学基金项目(编号: 42372173)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42372173)]

收稿日期: 2024-03-14 改回日期: 2024-05-31

LIAO Chongjie^{1,2} CHEN Lei^{1,2} GU Zhibin³ LIU Bingxiao³
 YANG Li⁴ TAN Xiucheng^{1,2,5} XIONG Min^{1,2} CAO Jian⁶

1 Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Research Branch of Southwest Petroleum University, Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu 610500, China

3 Sichuan Changning Gas Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China

4 Sichuan Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China

5 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

6 School of Geosciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract This study investigates the genetic mechanisms of marine organic-rich shale reservoirs through an integrated analysis of mineral composition, total organic carbon (TOC), porosity, gas content, and sedimentary paleogeomorphology in the Upper Ordovician Wufeng Formation (O_3w) to Lower Silurian Longmaxi Formation (S_1l_1) within the Changning area, southern Sichuan Basin. The results show that: (I) Carbonate minerals and siliceous minerals are mainly developed in the O_3w , and the TOC, porosity and gas content of the shale are relatively poor; The shale in the bottom of S_1l_1 is dominated by siliceous minerals, and its TOC, porosity and gas content are the best. The upper S_1l_1 is dominated by clay minerals, and its TOC, porosity and gas content are poor. (II) Marine shale reservoirs of O_3w and S_1l_1 can be divided into three categories: matrix-porosity reservoirs (dominant in O_3w , avg. porosity 3.1%), clay-fracture reservoirs (prevalent in lower S_1l_1 , avg. porosity 5.8%) and organic-porosity reservoirs (characteristic of upper S_1l_1 , avg. porosity 2.3%). Organic-porosity reservoirs represent the optimal marine shale gas reservoirs, characterized by high porosity and excellent gas-bearing capacity. (III) The pre-depositional paleogeomorphic pattern of the Longmaxi Formation is drawn based on the bottom interface of the lower Permian Liangshan Formation by the residual thickness and compensation thickness impression method. The comparative study of reservoir characteristics and paleogeomorphic pattern in the bottom of S_1l_1 proves that the paleouplift controls the high-quality source rocks, the slope area controls the high-quality reservoirs, and the distribution of brittle minerals is controlled jointly by the paleouplift and terrigenous input. Comprehensive analysis shows that the high quality shale gas reservoir mainly develops in the paleogeomorphic slope area. This systematic approach advances exploration strategies for marine shale reservoirs and enhances theoretical understanding of shale gas enrichment mechanisms in southern China.

Key words organic-rich shale, reservoir characteristics, genetic types, genetic mechanism, palaeogeomorphology, Ordovician, Sichuan Basin

About the first author LIAO Chongjie, born in 1998, a Ph.D. student, is mainly engaged in study and research on unconventional oil and gas geology and sedimentology. E-mail: chongjie98@163.com.

About the corresponding author CHEN Lei, born in 1985, is a professor at Southwest Petroleum University. He is mainly engaged in researches on unconventional petroleum geology and sequence stratigraphy. E-mail: cl211@126.com.

1 概述

随着中国南方海相页岩气勘探开发取得重大突破, 目前四川盆地及其周缘的上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组已实现规模有效开发 (Chen *et al.*, 2020; 邹才能等, 2021)。自 2012 年至今,

四川盆地在长宁、威远、昭通、涪陵和威荣等 3500 m 以浅的页岩气田已获得巨大产量, 截至 2023 年, 中国页岩气产量达到 $250 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。同时, 中深层领域由中石化部署的金石 103HF 探井在川南寒武系筇竹寺组获得高产工业气流, 日产达

到 $25.86 \times 10^4 \text{ m}^3$, 这标志着中国海相页岩气勘探开发迈入新台阶和新领域。因此, 深入研究海相富有机质页岩储集层特征和成因类型对推动中国其他地区和其他地层的海相页岩气勘探开发具有重要意义。

海相页岩储集层研究一直以来受到地质学者的广泛关注 (Chen *et al.*, 2023; Xiong *et al.*, 2023), 现阶段已经明确其是发育以硅质矿物、碳酸盐矿物和黏土质矿物为主且孔隙类型主要为纳米—微米级有机质孔隙的天然气的储集层 (陈增裕等, 2023; 任官宝等, 2023), 并认识到有机质孔是页岩气主要的赋存空间 (郭旭升等, 2014), 也是页岩气藏与其他气藏类型的主要差异之一, 目前已经认识到优质页岩储集层与矿物组分 (Liu *et al.*, 2022)、岩相类型 (Wu *et al.*, 2024)、有机质含量 (Feng *et al.*, 2023) 和有机质成熟度 (Chang *et al.*, 2022) 之间均存在联系。然而对于中国南方海相页岩气储集层特征、成因和分布仍然缺乏充分的认识和系统的评价, 导致对于海相页岩气储集层的成因机制的认识不够明确, 制约了中国海相页岩气储集层进一步的预测及评价。

为明确海相富有机质页岩储集层特征、成因类型及成因机制, 本次研究以四川盆地长宁地区五峰组—龙马溪组为例, 通过岩石学、沉积学和有机地球化学, 结合沉积期古地貌和页岩气勘探开发实践, 分析海相富有机质页岩的储集层特征, 探讨优质海相页岩储集层的成因类型, 明确优质储集层成因机制, 通过本次研究以对海相页岩气勘探开发提供理论依据和指导。

2 地质背景

本次研究区域位于四川盆地的南部, 研究区涵盖乐山市的南部以及宜宾市的大部分地区 (图 1-a), 构造位置位于川南低陡褶皱带, 东部为川湘凹陷断褶带, 西部边界为华蓥山断裂, 南部为娄山褶皱带 (廖梓翔等, 2023)。研究区五峰组—龙马溪组埋深较小, 大部分地区介于 2500 ~ 3500 m 之间 (陈雷等, 2023)。

晚奥陶世—早志留世, 受全球海平面变化和区域构造活动等地质事件的综合影响, 上扬子地区在四川盆地及其周缘逐渐形成了由乐山—龙女寺古隆起、黔中隆起和雪峰隆起等隆起带所夹持的半局限

的沉积环境 (图 1-a) (施振生等, 2023), 该时期隆凹相间且相对滞留的沉积环境致使水体上下对流受限, 沉积物和有机质在停滞缺氧的沉积环境下得到良好的保存, 上扬子地区沉积了大套的五峰组—龙马溪组海相富有机质黑色页岩 (刘伟等, 2012; 陈旭等, 2017; Chen *et al.*, 2023)。其厚度一般介于 40 ~ 100 m 之间, 在四川盆地南部的泸州地区附近和东南部的涪陵—丁山一带最为发育 (郭彤楼和张汉荣, 2014; 陈雷等, 2023)。

五峰组在全区主要发育黑色富笔石的硅质页岩和含灰硅质页岩, 仅在靠近古隆起的地区发育灰质页岩或粉砂质页岩, 该套页岩厚度一般小于 10 m (聂海宽等, 2017), 部分地区在五峰顶部可见发育大量赫南特贝的“观音桥段”, 该小层岩性以灰岩和泥质灰岩为主, 厚度均小于 1 m (王玉满等, 2016)。而龙马溪组则以沉积大套的黑色富笔石富有机质页岩为特征 (王红岩等, 2021), 根据电性和岩性特征通常将龙马溪组分为龙一段和龙二段, 龙一段以黑色和灰黑色薄层状或块状硅质页岩为主, 纹层和裂缝在龙一段大量发育 (王高翔等, 2022); 龙二段自下而上发育灰绿色或黄绿色页岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩或泥质灰岩, 相较于龙一段该段自下而上砂质含量有增大的趋势, 构成向上变粗序列 (蔡苏阳等, 2021), 而其中龙一段作为现阶段页岩气勘探的主力目标, 又划分为龙一₁ 亚段和龙一₂ 亚段, 并在此基础上将龙一₁ 亚段划分成 4 个小层 (图 1-b) (郭伟等, 2022), 其中龙一₁¹ 小层和龙一₁² 小层作为最富有机质的层段, 是本次研究的重点。

3 海相页岩储集层特征

3.1 矿物组分特征

对长宁地区五峰组—龙马溪组 19 口评价井的 X 射线衍射 (XRD) 全岩分析结果表明, 海相富有机质页岩矿物组成成分较为复杂, 但主要由硅质矿物 (石英+长石)、碳酸盐矿物 (方解石、白云石) 和黏土矿物组成 (图 2), 其中硅质矿物最为发育, 平均含量占比接近 50%, 达到了 49.6%, 其次为黏土矿物, 平均占比 26.9%, 碳酸盐矿物相对较少, 平均占比为 21.7%。

纵向上, 以 N16 井为例, 五峰组页岩显示出

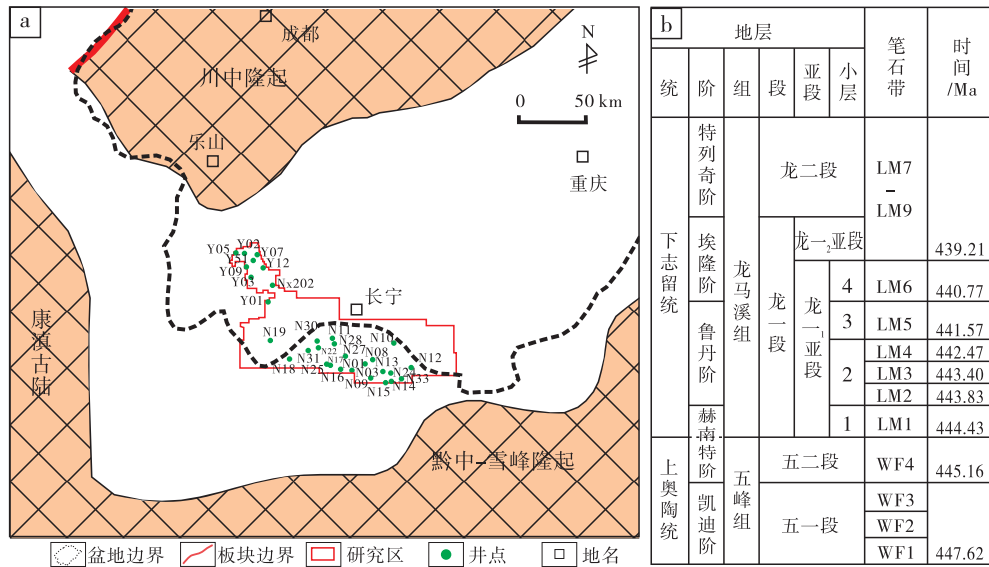


图 1 四川盆地南部长宁地区位置及其周缘奥陶纪末—志留纪初沉积格局 (a; 据刘伟等, 2012; 施振生等, 2023; 修改) 及五峰组—龙马溪组地层序列 (b; 据陈旭等, 2015; 陈雷等, 2023; 修改)

Fig. 1 Location of Changning area and the late Ordovician-early Silurian sedimentary pattern in southern Sichuan Basin and its periphery (a; modified from Liu *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2023) and stratigraphic sequence of the Wufeng-Longmaxi Formations (b; modified from Chen *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2023)

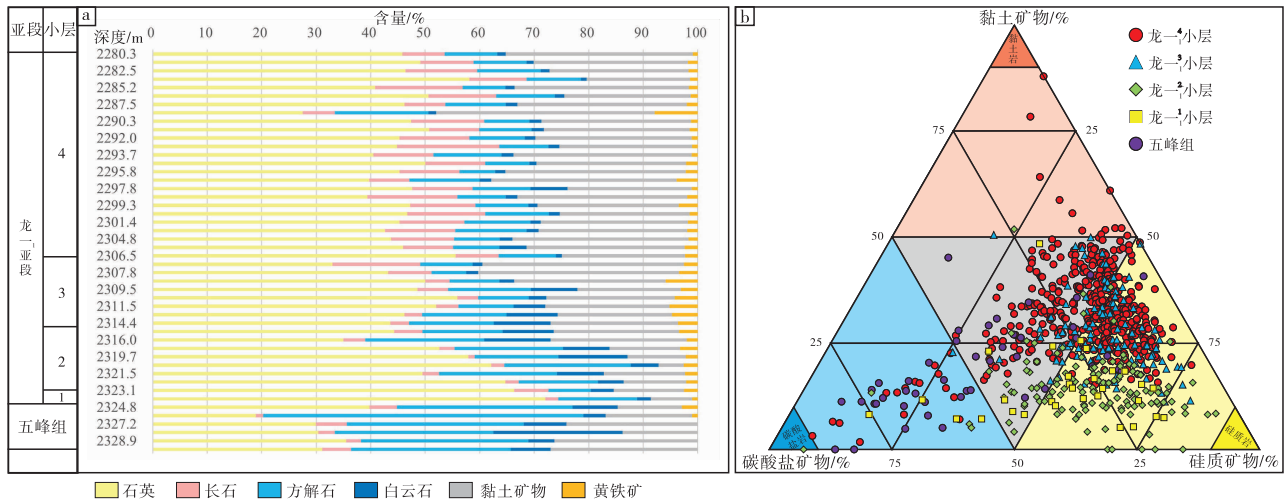


图 2 川南长宁地区五峰组—龙一₁亚段全岩矿物组成垂向变化特征(N16井)(a)和黏土矿物、硅质矿物和碳酸盐矿物三端元图(b)
Fig. 2 Longitudinal variation characteristics of whole rock mineral composition (Well N16) (a) and three-terminal diagram of clay minerals, siliceous minerals and carbonate minerals in O₃w-S₁l₁¹ (b), Changning area, southern Sichuan Basin

下部硅质矿物含量高、向上碳酸盐矿物增多的趋势。进入龙马溪组之后, 页岩碳酸盐矿物含量急剧减少, 硅质矿物在龙一₁小层—龙一₃小层底部发育, 龙一₃小层顶部和龙一₄小层硅质矿物含量降低, 大量发育黏土矿物(图 2-a)。黏土矿物—硅质矿物—碳酸盐矿物三端元图表明, 五峰组样品大多分布在靠近碳酸盐矿物和硅质矿物一端, 硅质矿

物端主要为龙一₁—龙一₃小层投点, 龙一₄小层的样品投点则大部分处于 3 种类型矿物均发育的端元(图 2-b)。

平面上, 基于龙一₁小层和龙一₂小层页岩矿物组分含量, 对石英和黏土矿物 2 种发育程度较高的矿物类型进行平面展布研究。发现长宁地区石英矿物分布具有明显的分区分带特征, 主要在中部地

区和东南部地区发育。龙一₁¹小层到龙一₂²小层有明显的中部和东南部发育程度较低、而西北部发育程度增高的趋势,其中 Y06 和 Y07 井附近表现最明显,从龙一₁¹小层石英含量低于 30% 增加到龙一₂²小层 50% 左右的石英含量(图 3);黏土矿物总体显示出与石英矿物耦合分布的特征,石英矿物分布高的地区,黏土矿物往往含量相对较低(图 3)。总体上,长宁地区龙一₁¹小层和龙一₂²小层黏土矿物发育程度相差不大,均是东南方向最为发育,其次南部从龙一₁¹小层到龙一₂²小层有明显的发育程度增加的趋势,N40 和 YS109 井及其附近的黏土矿物含量接近 30%,其次西南方向的黏土矿物含量也较高,整体上向北黏土矿物含量降低,Y05 和 Y06 井附近均低于 10%(图 3)。

3.2 有机碳含量特征

有机碳含量是页岩气生烃生气、聚集成藏的重要控制因素之一(Kennedy *et al.*, 2002; 赵建华等, 2016),本次研究对研究区 16 口井共计 647 个页岩样品进行了有机碳含量测定。结果表明,五峰组页岩 TOC 含量相对龙一₁ 亚段稍低,最高仅为 5.16%,平均含量为 2.57%,且只有不到 50% 的样品 TOC 含量大于 3%;龙一₁¹小层 TOC 含量在五峰组—龙马溪组处于峰值,该小层平均 TOC 含量为 4.00%,且 TOC 含量介于 1.39%~7.08% 之间;龙一₂²小层和龙一₃³小层 TOC 含量相差不大,平均 TOC 含量分别为 3.84% 和 3.87%,且龙一₂²小层和龙一₃³小层样品 TOC 含量大部分都处于 3%~6% 之间;龙一₄⁴小层 TOC 含量最低,平均 TOC 含量仅为 2.21%,且有 77% 的样品 TOC 含量小于 3%(图 4)。

对龙一₁¹小层和龙一₂²小层 TOC 平面富集情况进行了研究,可以看出龙一₁¹小层长宁东南方 N12 井和西南方 N31 井附近均存在 TOC 含量高点,整体上 TOC 主要在长宁东部和长宁西南部地区含量较高,长宁西部和长宁北部则 TOC 含量相对较低;而到龙一₂²小层,长宁东部地区高 TOC 含量区同样存在,此外在长宁西北部 Y02 井周缘发生 TOC 含量增加的趋势,成为西北部 TOC 含量较高区域(图 5)。

3.3 储集空间及孔隙度特征

3.3.1 储集空间类型及孔隙结构特征

长宁地区五峰组—龙马溪组富有机质海相页岩

储集空间类型较为复杂,通过扫描电镜观察,在研究区页岩中识别出多种成因-形貌类型孔隙,基于产状将孔隙分为残余原生孔隙(图 6-b)、不稳定矿物溶蚀孔(图 6-a)、微裂缝(图 6-c)、黏土矿物层间孔隙(图 6-d, 6-e)、有机质孔隙(图 6-f, 6-g, 6-h) 和生物孔(图 6-i) 等。

通过扫描电镜镜下观察发现,不同的矿物组分和有机质含量差异会造成明显的孔隙特征差异(Chen *et al.*, 2022)。龙一₁¹小层和龙一₂²小层的高 TOC 含量段页岩在有机质演化生气后能够发育更多的有机质孔隙(图 6-f 至 6-h),而富黏土矿物的页岩段则大量发育黏土矿物层间裂缝(图 6-d)。

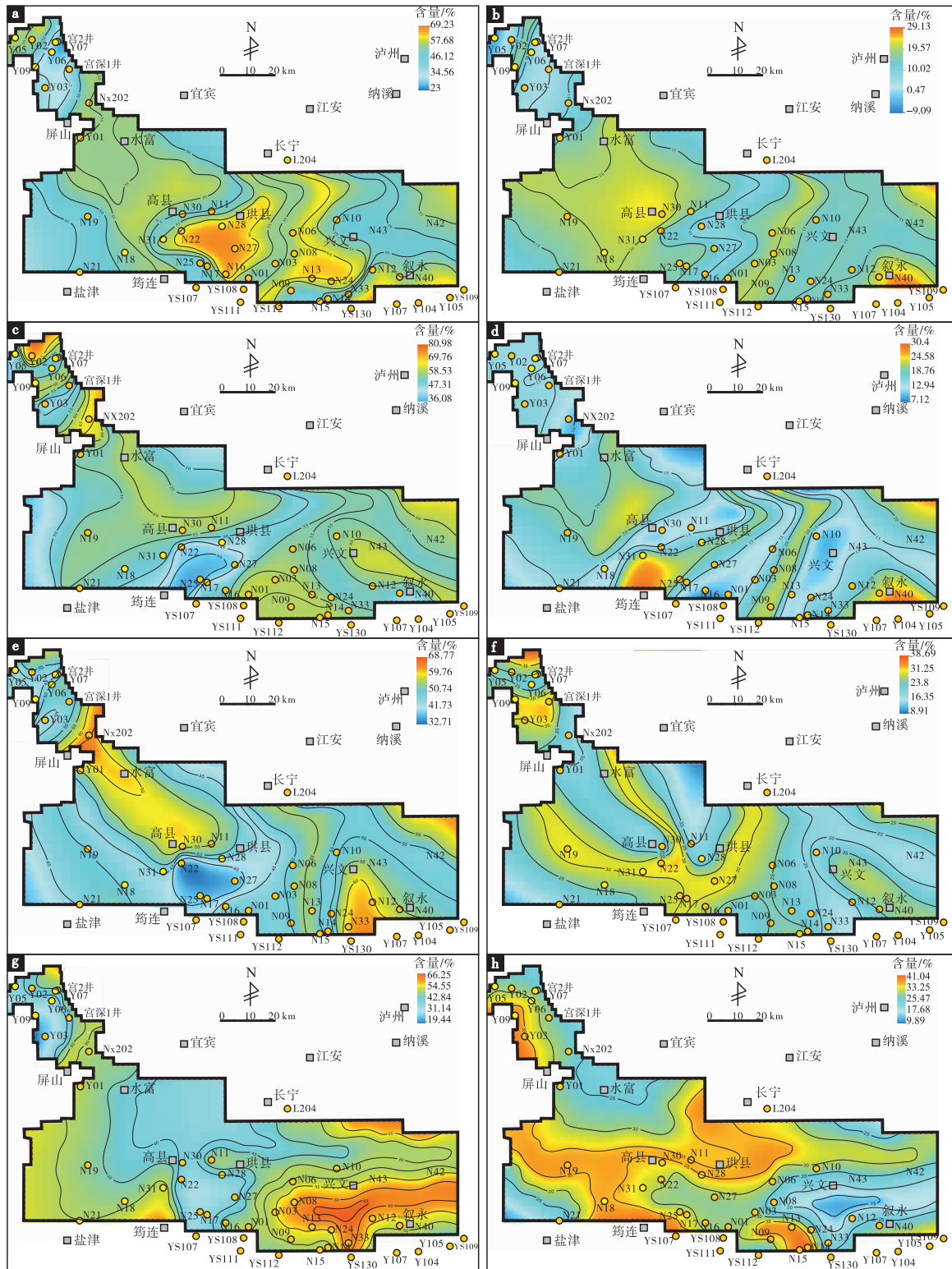
3.3.2 孔隙度特征

长宁地区页岩样品液体饱和法孔隙度测试结果表明:五峰组平均孔隙度最差,仅为 3.74%,且有 45% 的样品孔隙度小于 3%;龙一₁¹小层孔隙度最优,92% 的样品孔隙度超过 3%,且最高孔隙度为 9.71%,平均孔隙度达 5.60%;龙一₂²小层孔隙度较低,平均孔隙度为 4.83%,57% 的样品孔隙度在 3%~6% 之间;龙一₃³小层孔隙度表现仅次于龙一₁¹小层,平均孔隙度为 5.43%,最高孔隙度大于 9%,且 84% 的样品孔隙度大于 3%;龙一₄⁴小层孔隙度同样较低,平均孔隙度为 4.44%,其中 24% 的样品孔隙度小于 3%(图 7)。

长宁地区龙一₁¹小层高孔隙度发育区主要位于西部 Y05 井、Y02 井周缘以及长宁中部 N27 井、N01 井、N09 井、N33 井附近区域,龙一₂²小层高孔隙度区域范围大幅缩减,仅在西北部存在高孔隙度发育区域,N09 井周缘孔隙度则有明显降低趋势(图 8)。

3.4 含气性特征

依据现场对长宁地区 16 口井五峰组—龙马溪组 1 亚段实测含气量数据,通过直线回归计算,长宁地区五峰组页岩含气性最差,平均仅为 1.62 m³/t,五峰组样品中,94% 的样品含气性小于 3 m³/t;龙一₁¹小层含气性最好,平均含气量接近 3 m³/t,达到 2.99 m³/t,且 55% 的样品含气量大于 3 m³/t;龙一₂²小层和龙一₃³小层含气性差异不大,平均含气量均大于 2 m³/t,分别为 2.48 m³/t 和 2.33 m³/t,2 个小层 90% 以上的样品含气量均大于 1 m³/t;龙一₄⁴小层含气性同样较差,平均含气量仅



a—龙-1¹ 小层页岩石英含量平面展布图；b—龙-1¹ 小层黏土矿物含量平面展布图；c—龙-1² 小层石英含量平面展布图；d—龙-1² 小层黏土矿物含量平面展布图；e—龙-1³ 小层石英含量平面展布图；f—龙-1³ 小层黏土矿物含量平面展布图；g—龙-1⁴ 小层石英含量平面展布图；h—龙-1⁴ 小层黏土矿物含量平面展布图

图 3 川南长宁地区龙马溪组龙-1¹ 小层—龙-1⁴ 小层矿物成分平面展布

Fig. 3 Plane distribution of mineral composition in S₁l₁¹⁻⁴—S₁l₁⁴, Changning area, southern Sichuan Basin

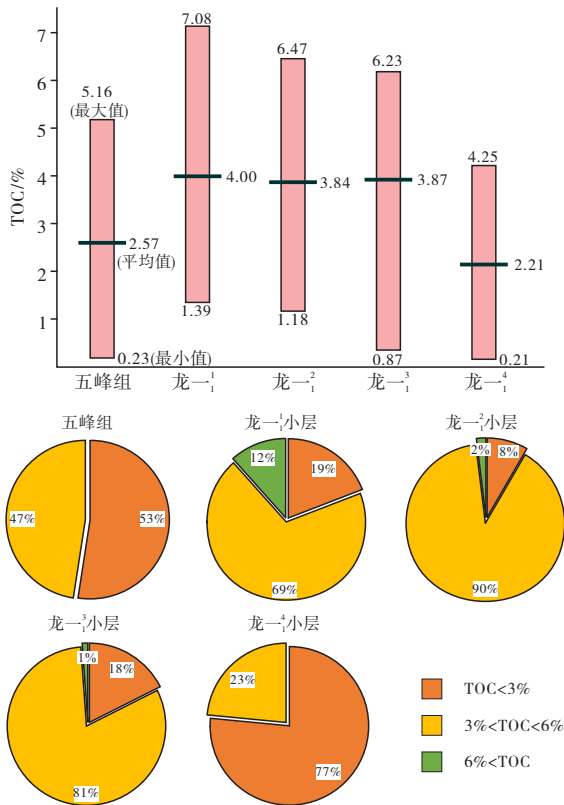


图 4 川南长宁地区五峰组—龙一₁亚段各小层 TOC 含量等值线图和扇形图

Fig. 4 Histograms and fan diagrams of TOC content of each layer of O_{3w}-S_{1l1}, Changning area, southern Sichuan Basin

为 1.64 m³/t, 且 95% 以上的样品含气量小于 3 m³/t(图 9)。

4 储集层成因类型和分布特征

4.1 储集层成因类型

根据岩心观察、镜下鉴定和全岩衍射结果, 在储集空间类型分析的基础上, 结合页岩的成岩作用的改造因素, 对海相页岩储集层进行成因类型划分, 将研究层段页岩储集层划分为基质孔隙型储集层、黏土裂缝型储集层和有机孔型储集层 3 大类(表 1)。

基质孔隙型储集层的储集空间均为常规油气藏中的孔隙类型, 对应常见的碎屑岩和碳酸盐岩中的粒内孔、粒间孔和微裂缝等, 因此基于孔隙产状和前人对常规储集层的划分基础, 将基质孔隙型储集层的储集空间划分为残余原生孔隙(图 6-b)、不稳定矿物溶蚀孔(图 6-a)和构造微裂缝

(图 6-c)。残余原生孔隙的储集空间多为脆性矿物颗粒支撑、颗粒间未被充填的原生孔和脆性矿物颗粒与黏土矿物之间的残余孔; 溶蚀孔以碳酸盐矿物、长石等不稳定矿物因溶解或溶蚀作用形成的次生溶孔为主; 构造微裂缝则与构造活动相关, 长宽不定, 随机性很大。

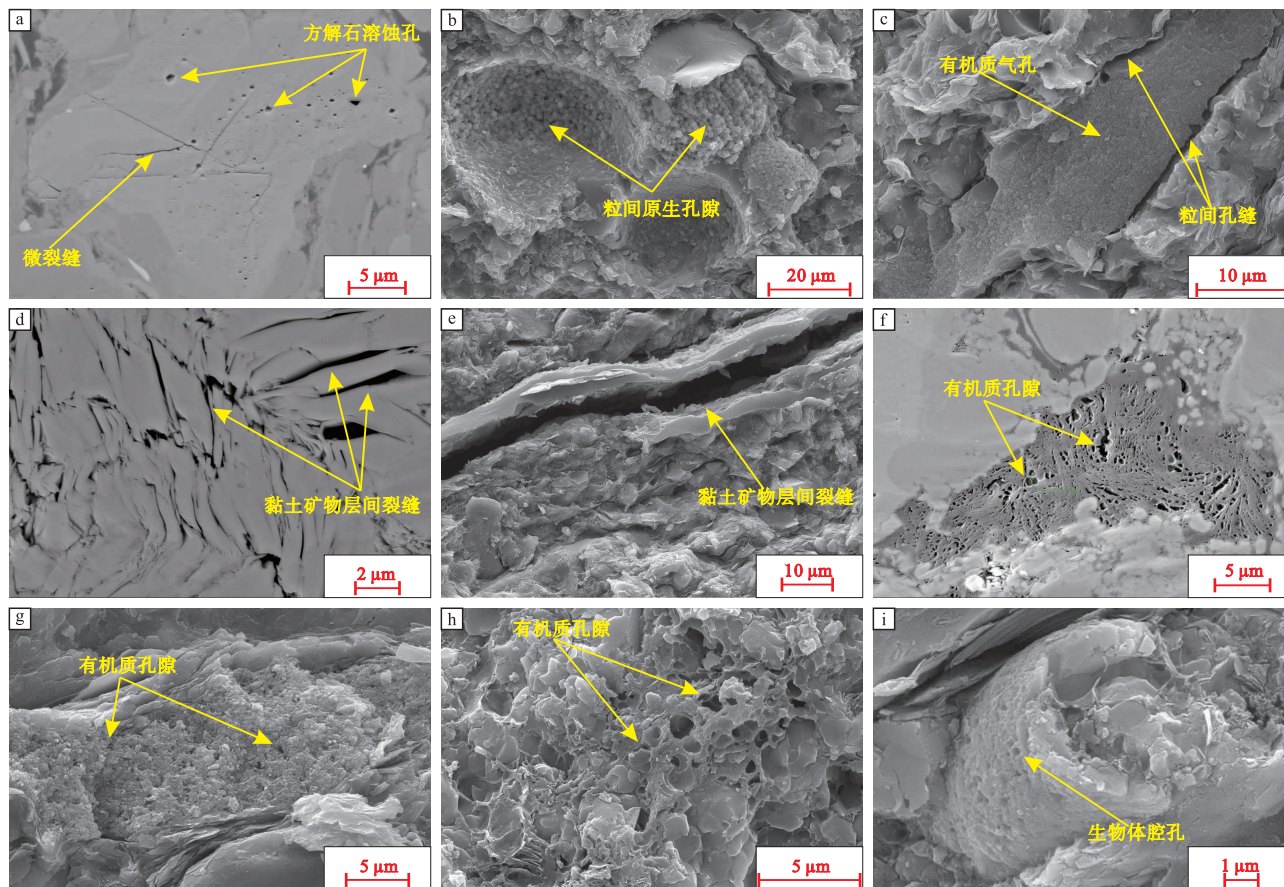
黏土裂缝型储集层页岩中的黏土矿物在成岩阶段发生脱水转化(主要为蒙脱石向伊利石的转化), 在变化过程中, 伴随黏土矿物的结构及其化学性质发生改变, 析出了大量的层间水和结构水, 形成大量的黏土矿物层间裂缝(图 6-d, 6-e)。

有机孔型储集层主要分布在 TOC 含量较高的层段。在高过成熟阶段, 有机质因热降解和热裂解而大量排烃, 进而形成微孔, 这些微孔多为微米级甚至纳米级, 孔径大部分集中在 2~50 nm 之间(图 6-f 至 6-h)。生物孔则来自于有机生烃母质自身所具有的各种孔隙, 可见有低等生物体腔孔或高等植物的组织孔(图 6-i), 同属原生孔隙。

4.2 储集层分布特征

为进一步厘清不同类型的储集层分布特征, 对长宁地区取心井岩心进行了扫描电镜观察和储集空间发育情况的标定。结果表明, 海相富含有机质页岩在不同沉积环境下沉积了不同的矿物组分, 从而导致不同地区和不同层位发育完全不同的储集空间和储集层类型。

纵向上, 五峰组由于大量发育的碳酸盐矿物易受到溶蚀作用(赵东方等, 2022), 储集空间主要以不稳定矿物溶蚀孔为主, 其次为残余原生孔隙、微裂缝和有机质孔, 为基质孔隙型储集层; 龙一¹小层硅质矿物大量发育的同时, TOC 含量在研究层位中达到最大值, 该小层大量发育有机质孔, 且由于生物硅和草莓状黄铁矿的大量存在, 生物孔和残余原生孔隙在该小层同样大量发育; 龙一²小层情况与龙一¹小层类似, 但因为龙一²小层黏土矿物的增加导致硅质矿物的相对减少, 从而残余原生孔隙、不稳定矿物溶蚀孔和生物孔发育频率大大减少, 但依然以有机孔型储集空间为主, 龙一¹小层和龙一²小层均发育有机孔型储集层; 龙一³小层分为 2 个部分, 其底部储集层类型和储集空间类型依然与龙一²小层保持一致, 但在龙一³小层顶部黏土矿物含量大量增加, 对有机质造成了一定程度



a—N16 井, 五峰组, 2322.02 m, 发育方解石溶蚀孔和微裂缝; b—N33 井, 龙—² 小层, 3191.09 m, 发育黄铁矿间原生孔隙; c—N28 井, 龙—³ 小层, 3449.59 m, 有机质和矿物间发育粒间孔隙; d—N16 井, 龙—⁴ 小层, 2297.44 m, 黏土矿物层间裂缝大量发育; e—N33 井, 龙—² 小层, 3195.87 m, 发育黏土矿物层间裂缝; f—N16 井, 龙—² 小层, 2314.16 m, 有机质孔大量发育; g—N30 井, 龙—² 小层, 3299.97 m, 有机质孔大量发育; h—N28 井, 龙—¹ 小层, 3470.11 m, 有机质孔大量发育; i—N33 井, 龙—² 小层, 3191.09 m, 生物体腔表面发育孔隙

图 6 川南长宁地区五峰组—龙马溪组储集空间类型

Fig. 6 Reservoir space types of the Wufeng-Longmaxi Formations in Changning area, southern Sichuan Basin

量发育黏土矿物层间裂缝, 虽然部分遭到充填, 但仍是不可忽视的储集层类型; 基质孔隙型储集层在五峰组至龙—³ 小层底部均有发育, 但由于该类储集层的储集空间大多不连通, 仅发育在矿物表面, 难以形成优质的联通孔隙, 因此属于较差的储集层类型(图 10)。

5 储集层成因机制

通常认为, 海相富有机质页岩优质储集层受多种因素叠合控制 (Jarvie *et al.*, 2007; Fishman *et al.*, 2012; Kuila *et al.*, 2014)。根据前述结果可以发现, 不同储集层类型的矿物组分和有机质丰度差异富集特征明显, 其中硅质矿物和黏土矿物组分以及有机质丰度是影响页岩储集层的重要因素。由

于页岩的矿物组分和有机质丰度与沉积环境之间密切相关, 并且大量学者已经证实, 奥陶纪末—志留纪初由于都匀运动的挤压作用, 上扬子地区形成由川中、黔中和雪峰隆起所夹持的水体封闭性较强的“三隆夹一凹”的大区域沉积格局 (孙莎莎等, 2018), 该时期沉积水体因全球冰盖发育的影响, 海平面下降, 最大水深范围处于 10 ~ 30 m 之间 (耿良玉, 1984; 陈雷等, 2023), 且随着进一步研究, 越来越多的学者发现龙马溪组沉积时期存在一系列的水下隆起 (梁峰, 2018; 王同等, 2018; 施振生等, 2022)。因此本次以龙马溪组沉积前的古地理格局为基础, 探讨沉积古地貌与储集层成因机制间的关联性。同时因为龙—³ 小层沉积时期研究区附近的三大隆起区开始逐渐扩大, 致使沉积古

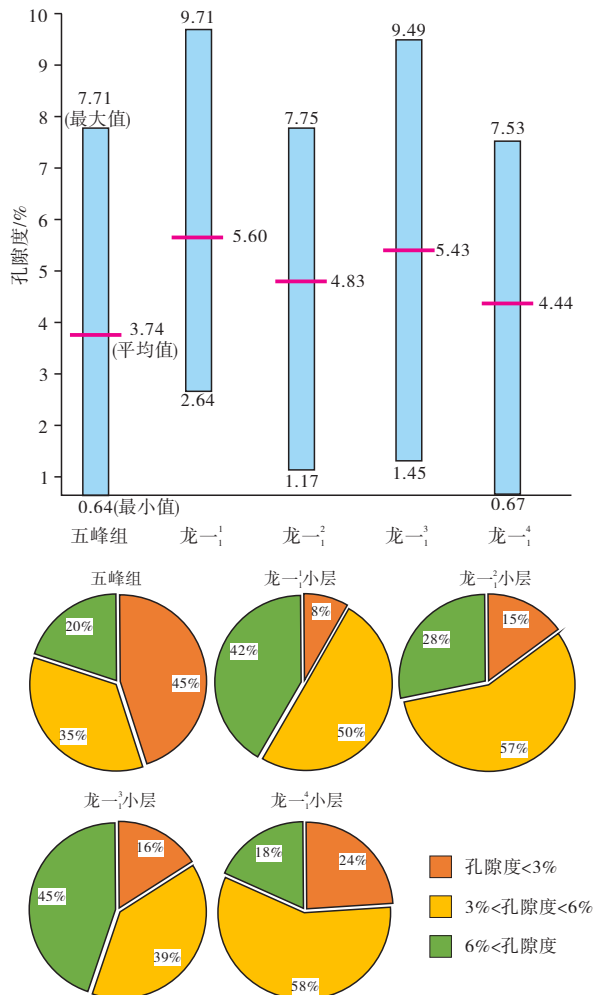


图 7 川南长宁地区五峰组—龙一₁亚段各小层孔隙度直方图和孔隙度分布扇形图

Fig. 7 Histograms and fan diagrams of porosity of each layer of $O_3w-S_1l_1^1$, Changning area, southern Sichuan Basin

地貌进一步发生变化，所以本次研究主要将龙一₁小层—龙一₂小层的储集层特征与古地貌进行对比研究。

5.1 古地理格局对页岩有机质丰度的控制

由于海西运动早期盆地基底整体遭受的抬升剥蚀，四川盆地泥盆系和石炭系大面积缺失，致使四川盆地二叠系沉积前形成准平原化格局，并导致川南地区下二叠统梁山组与下志留统韩家店组形成不整合接触（童崇光，1992；胡明毅等，2012）。大面积整体的抬升剥蚀导致全盆地具有相似的剥蚀量，因此本次研究直接基于梁山组沉积期的准平原化格局，结合构造分析使用残余厚度法和补偿厚度印模法分别计算出龙马溪组的残余厚度和印模厚

度，从而计算出龙马溪组沉积时的相对沉积厚度（朱正平等，2019），进行古地理格局推演，结果发现在龙马溪组沉积前，长宁地区呈现出西部次高、中部低、东部高的隆凹相间的水下微古地貌格局（图 11）（韦国栋等，2023）。

通过古地貌格局与长宁地区龙一₁小层和龙一₂小层的 TOC 等值线图对比研究（图 5；图 11），发现 TOC 含量分布与古地貌具有较好的耦合作用，平面图上表现为隆起区及其周缘页岩 TOC 含量高，洼陷区 TOC 含量较低。该现象与前人研究认为的水体越深 TOC 越富集（拜文华等，2019）相悖，说明 TOC 富集的主控因素并非是水体深度，而可能是因为溶解氧含量和光照强度会随着水深而减小，从而导致隆起区的较浅水环境下浮游植物、藻类和生物等相较水下洼地更加发育（吴锋等，2012），造成隆起区和斜坡区的初级生产力更高（Lin *et al.*, 2024）。另外，在安静的潟湖环境下，15~20 m 存在“最小含氧带”（Woolnough, 1937；李鹤等，2017；俞焰等，2017）。这与三大隆起区夹持的水动力条件较弱、水体处于相对停滞的研究区背景类似，致使在斜坡区沉积下来的有机质得到了良好的保存。因此古隆起区域及其附近因较高的初级生产力和良好的保存条件导致有机质更为发育、TOC 含量更高。

5.2 古地理环境对页岩矿物组分的控制

海相富有机质页岩中矿物类型与古地貌之间同样存在耦合关系。对长宁地区石英的等值线图研究发现，高石英含量主要发育在斜坡区，低洼地带石英含量较低（图 3-a, 3-c；图 11）。这与前人研究发现硅质矿物主要在深水环境中发育的观点完全不同，这是因为矿物组分中的硅质矿物主要来源于陆源硅质和生物硅质，一方面，由于古地貌高地更容易受到南边陆源输入的影响，导致古地貌斜坡区沉积了大量的陆源硅质；另一方面，由于龙马溪组初期，全球冰盖的因素导致海洋环境中水体温度尚未均一，水体中大量冷、热水相遇，形成冷涡，而冷涡所造成的上升流能将海洋下层的营养盐携带至海洋上层，从而促进上层水体的初级生产力大大提高，从而导致硅质生物在海洋表层大量发育，目前已经有学者研究发现，现代海洋的冷涡发育区，硅质放射虫在水深 0~25 m 大量发育（胡维芬等，

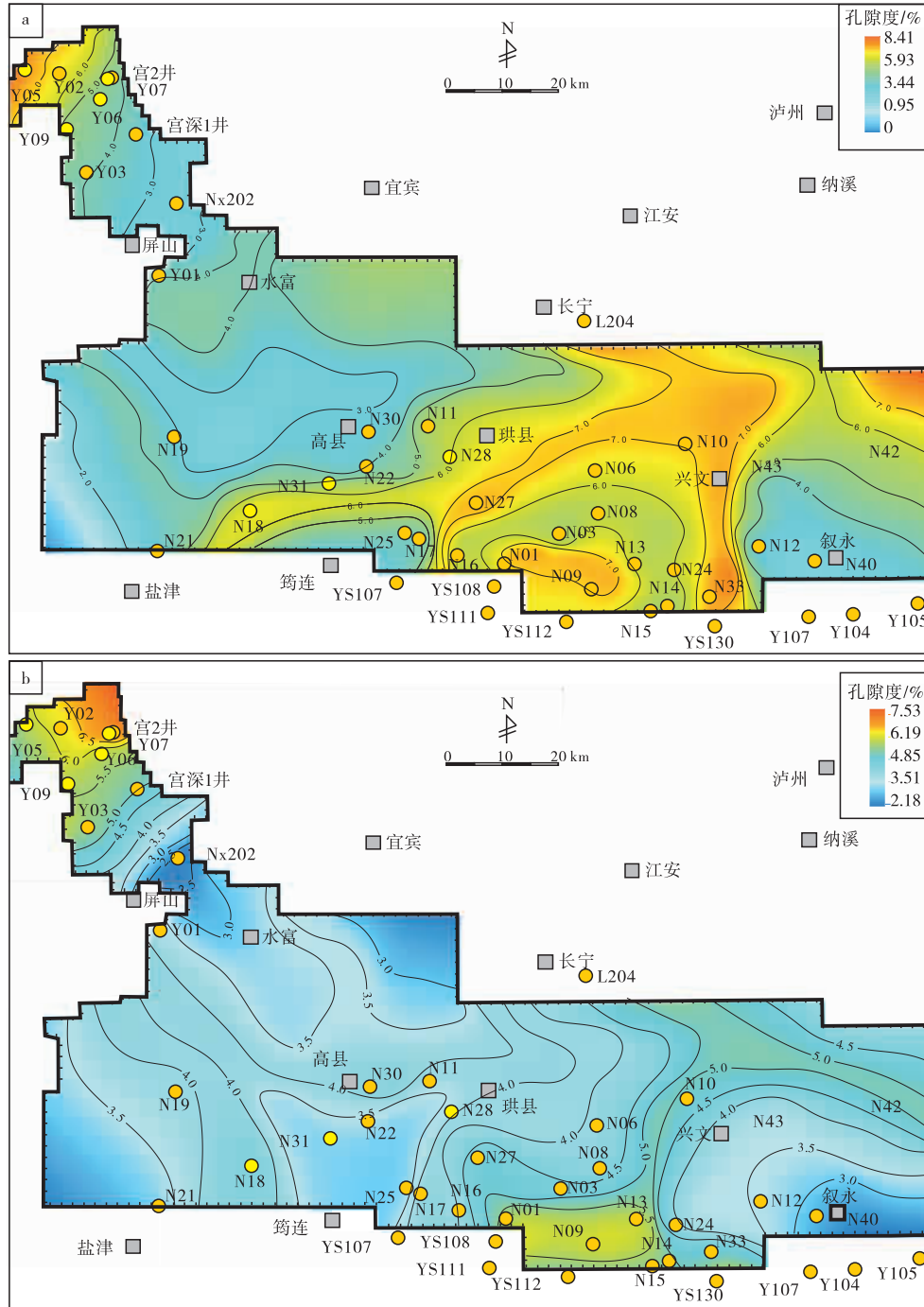


图 8 川南长宁地区龙一¹ 小层 (a) 和龙一² 小层 (b) 孔隙度平面展布图

Fig. 8 The $S_{1l_1}^{l_1-1}$ (a) and $S_{1l_1}^{l_1-2}$ (b) planar distribution maps of porosity in shale, Changning area, southern Sichuan Basin

2015; 苏德辰等, 2022), 证实了该类现象出现的可能性。在上述 2 种因素的叠加控制下, 古地貌斜坡区保存了大量的硅质矿物。

另外, 对黏土矿物组分的对比研究中, 同样表现出受到古地貌控制的现象, 黏土矿物在东南部的隆起区极为发育, 而在西部次隆区和其余洼陷区含

量低(图 3-b, 3-d; 图 11), 这与东部隆起区受到东南方向黔中隆起物源区影响有关, 说明页岩中影响黏土矿物含量的原因主要来源于陆源供给, 而研究区中部分斜坡区具有较高黏土矿物含量则与浊流相关(何佳伟等, 2021; 郭伟等, 2022), 大量浊流沉积造成隆起区以外的位置同样发育较高的黏

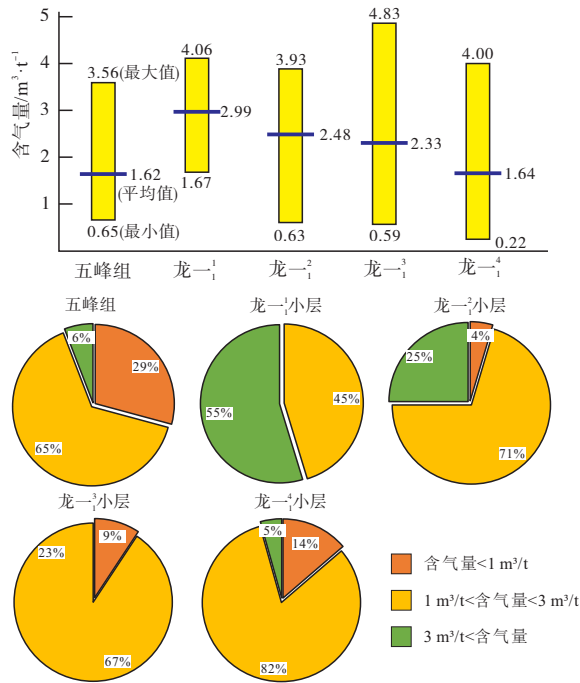


图 9 川南长宁地区五峰组—龙一₁亚段各小层含气性等值线图和扇形图

Fig. 9 Isograms and fan diagrams of gas content in each layer of $O_3w-S_1l_1^1$, Changning area, southern Sichuan Basin

土矿物含量。

综上所述可以发现,古地理格局中的水下古隆起控制了有机质的富集和保存,而在古隆起附近的斜坡区域则大量发育硅质矿物,黏土矿物则主要受制于水上隆起物源区的距离,离物源越近的区域黏土矿物通常更加发育。

5.3 古地理格局对页岩孔隙的控制

沉积古地貌与页岩孔隙度对比研究发现,高孔隙度多发育在斜坡部位,长宁西部和东南部等斜坡区均有较高的孔隙度(图 8; 图 11)。通过对 TOC 含量和孔隙度平面展布对比研究发现,TOC 总体

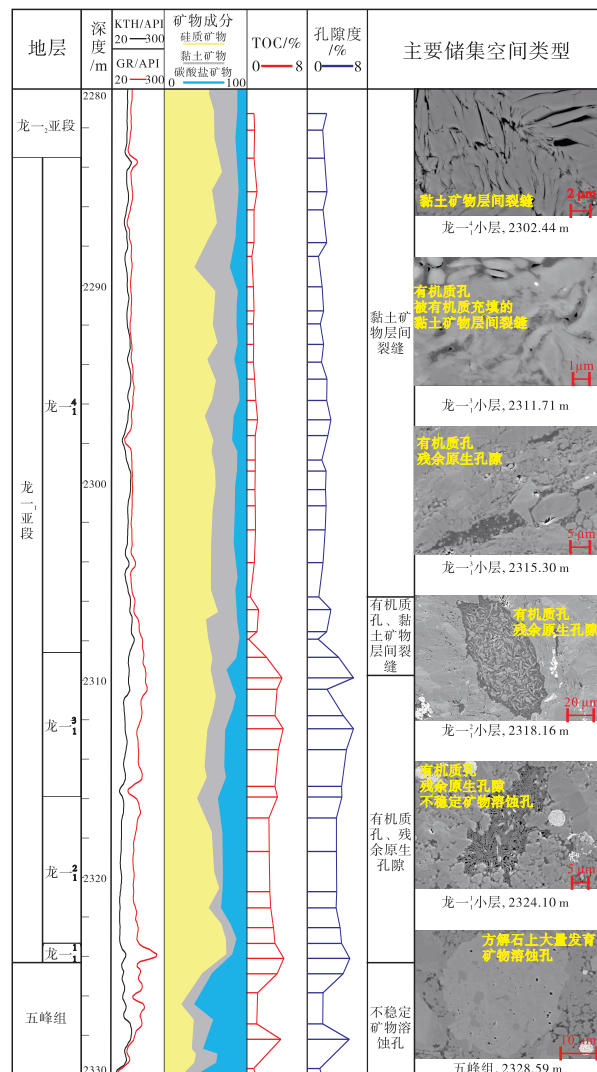


图 10 川南长宁地区 N16 井五峰组—龙马溪组龙一₁亚段储集层发育综合柱状图

Fig. 10 Comprehensive histogram of reservoir development of $O_3w-S_1l_1^1$ in Well N16 in Changning area, southern Sichuan Basin

上与孔隙度呈现正相关性,这说明高 TOC 含量对于有机质孔隙的发育和页岩在深成作用阶段热裂解

表 1 海相富有机质页岩储集层类型及特征

Table 1 Types and characteristics of marine organic-rich shale reservoirs

储集层类型	主要储集空间	成因机制
基质孔隙型储集层	残余原生孔隙	脆性矿物颗粒间未被充填的粒内孔隙;脆性矿物分散于片状黏土矿物中,脆性颗粒与黏土矿物之间粒间孔隙
	不稳定矿物溶蚀孔 微裂缝	碳酸盐矿物和长石等不稳定矿物因溶解(或溶蚀)作用而形成的次生溶孔 构造作用下形成或脆性矿物与韧性矿物之间形成的裂缝
黏土裂缝型储集层	黏土矿物层间裂缝	成岩阶段,黏土矿物发生脱水转化而析出大量的层间水和结构水,形成微裂隙
有机孔型储集层	有机质孔	有机质因热降解和热裂解而发生大量的排烃,进而形成微孔
	生物孔	生物遗体中的空腔或生物钻孔

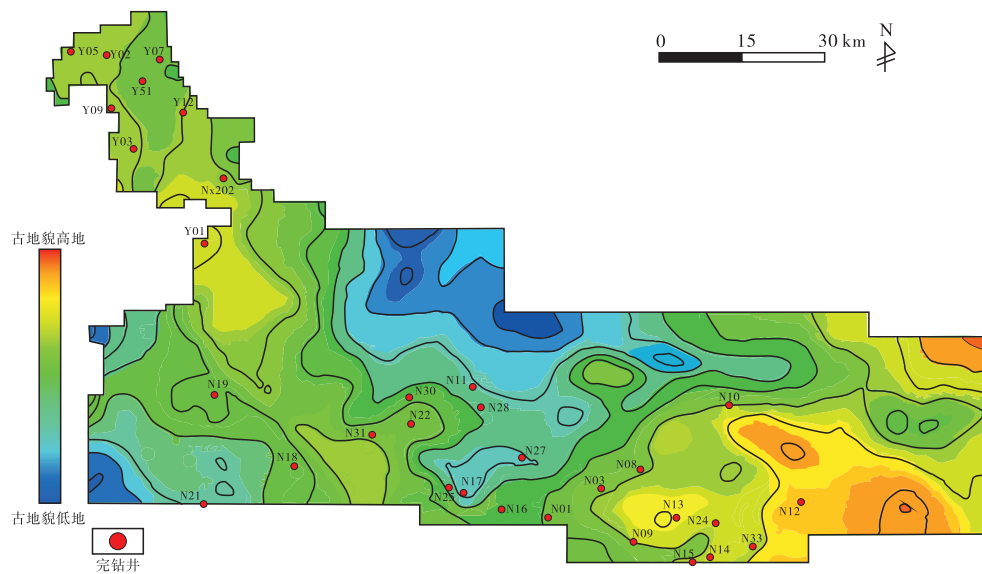


图 11 川南长宁地区龙马溪组沉积前古地貌格局 (据韦国栋等, 2023)

Fig. 11 Predepositional palaeogeomorphic pattern of the Longmaxi Formation in Changning area, southern Sichuan Basin (from Wei *et al.*, 2023)

形成页岩气是密不可分的 (Wang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023), 而针对 Nx202 井、N16 井-N17 井和 N12 井-N40 井范围内存在的 3 个异常低孔隙区域, 通过研究表明异常低孔隙区域与构造挤压带下大量孔隙遭到压实有关 (Li *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2016; Ju *et al.*, 2018), 例如处于褶皱发育区的 N16 井和构造相对稳定的 N01 井, 两者 TOC 含量相差不大, 但 N16 井在强烈的挤压作用下, 孔隙发生大量的坍塌, 导致 N16 井孔隙度远低于 N01 井 (图 12)。此外, 同样对石英含量与孔隙度平面展布进行对比, 可见石英与孔隙度之间存在较好的耦合关系, 高石英含量区同样是高孔隙度发育区, 而针对长宁背斜褶皱发育区 N16 井和 N17 井龙一₁-龙一₂ 小层不同石英平均含量 (61.69% 和 51.05%), 更高石英含量的 N16 井平均孔隙度为 4.32%, 大于 N17 井的 3.49%, 证明脆性石英颗粒对页岩的储集空间在压实作用下的保护作用。而高 TOC 含量由于主要发育在隆起区及其周缘, 而高石英含量区域同样处于古地貌斜坡区, 这证实了隆起区附近的斜坡区是高孔隙度发育的重要区域。

整体上看, 高 TOC 含量对于有机质孔隙的发育和页岩在深成作用阶段热裂解形成页岩气是密不可分的, 这说明有机质富集仍是优质储集层类型形

成的主要原因 (Loucks and Reed, 2014), 这解释了有机孔型储集层是最为优质的页岩气储集层的原因; 其次脆性石英颗粒对储集层的保护作用也是必不可少的 (Bowker, 2003), 同时, 石英颗粒还对后期开采页岩气的可压裂性起到重要的作用, 有学者甚至认为页岩气的有利区石英平均含量应达到 30% 以上。另外, 在页岩气勘探开发中, 还应考虑到构造复杂区域对储集层的保护或破坏作用 (Liang *et al.*, 2017; 张灿, 2019)。

综上所述, 海相富有机质页岩储集层的差异性是由古地貌控制下的矿物成分多样性和有机质富集程度导致的储集层非均质性造成的。研究区海相富有机质页岩在隆起区附近 TOC 含量高, 斜坡区石英含量高, 靠近物源区则富集黏土矿物, 隆起区高 TOC 产气并保存在斜坡区的高硅质矿物的优质有机孔型储集层中, 基于此提出海相富有机质页岩储集层三元耦合理论, 即古隆起控制优质烃源岩、斜坡区控制优质储集层和古隆起与陆源输入联合控制脆性矿物分布。这一认识可以推广至具有相似沉积背景地区的海相富有机质页岩的优质储集层勘探预测, 通过沉积期古地貌恢复以预测页岩气优质储集层分布。

6 结论

1) 四川盆地南部长宁地区上奥陶统五峰组一

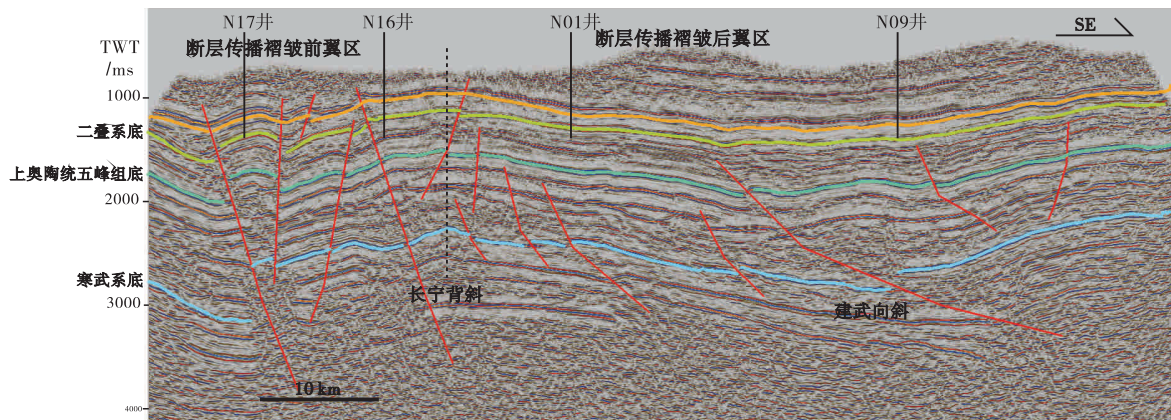


图 12 川南长宁地区 N17 井-N16 井-N01 井-N09 井地震剖面

Fig. 12 Seismic cross section of Well N17-Well N16-Well N01-Well N09 in Changning area, southern Sichuan Basin

下志留统龙马溪组海相富有机质页岩自下而上呈现 3 种类型,第 1 种为五峰组的碳酸盐矿物大量发育的灰质页岩,其 TOC 含量低、孔隙度低、含气性差,储集空间主要发育为残余原生孔隙和不稳定矿物溶蚀孔;第 2 种是龙一₁ 小层和龙一₂ 小层大量发育的硅质页岩,特点为高 TOC 含量、高孔隙度和优质的含气性,储集空间主要为有机质孔,偶见残余原生孔隙;第 3 种为龙一₁ 亚段上半部分的黏土质页岩,储集层呈现出低 TOC 含量、中等孔隙度和差含气性,大量发育黏土矿物层间裂隙型储集空间。

2) 基于成因类型将海相页岩储集层划分为基质孔隙型储集层、黏土裂缝型储集层和有机孔型储集层,发现有机孔型储集层是最优质的储集层类型,其次为黏土裂缝型储集层,基质孔隙型储集层因难以形成连通的孔隙,是最差的储集层。

3) 对古地理格局与储集层特征进行分析对比研究表明,海相富有机质页岩储集层差异性古地貌控制下的矿物成分多样性和有机质富集程度导致的储集层非均质性造成的。提出页岩储集层三元耦合理论,即古隆起控制优质烃源岩、斜坡区控制优质储集层和古隆起与陆源输入联合控制脆性矿物分布,为其他具有相似沉积背景地区的海相富有机质页岩的优质储集层勘探预测提供参考。

参考文献 (References)

拜文华,王强,孙莎莎,梁峰,张琴,昌燕. 2019. 五峰组—龙马溪组页岩地化特征及沉积环境:以四川盆地西南缘为例. 中国矿业大学学报,48(6): 1276-1289. [Bai W H, Wang Q, Sun S S, Liang F, Zhang Q, Chang Y. 2019. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Wufeng-Longmaxi shales: a case study

from southwestern margin of the Sichuan Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 48(6): 1276-1289]

蔡苏阳,肖七林,朱卫平,朱汉卿,陈吉,陈奇,蒋兴超. 2021. 川南龙马溪组页岩储层特征及主控因素. 沉积学报,39(5): 1100-1110. [Cai S Y, Xiao Q L, Zhu W P, Zhu H Q, Chen J, Chen Q, Jiang X C. 2021. Shale reservoir characteristics and main controlling factors of longmaxi formation, southern Sichuan Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 39(5): 1100-1110]

陈雷,谭秀成,郑健,陈鑫,杨扬,熊敏,王高翔,计玉冰. 2023. 上扬子地区龙马溪组黑色富有机质页岩的浅水超覆沉积模式. 古地理学报,25(3): 614-627. [Chen L, Tan X C, Zheng J, Chen X, Yang Y, Xiong M, Wang G X, Ji Y B. 2023. Shallow-water onlap sedimentary mode of black organic-rich shale in the Longmaxi Formation, Upper Yangtze Area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(3): 614-627]

陈旭,樊隽轩,王文卉,王红岩,聂海宽,石学文,文治东,陈冬阳,李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 中国科学: 地球科学,47: 720-732. [Chen X, Fan J X, Wang W H, Wang H Y, Nie H K, Shi X W, Wen Z D, Chen D Y, Li W J. 2017. Gradual progressive distribution model of black graptolite shales of Silurian Longmaxi Formation in Qianyu area. Scientia Sinica(Terrae), 47: 720-732]

陈增裕,刘睿,谭秀成,井翠,聂舟,衡德,江定川,文冉,陈雷,唐余锋,唐奎. 2023. 四川盆地南缘长宁地区五峰组—龙马溪组页岩内多源石英对页岩气富集的意义. 古地理学报,25(4): 920-930. [Chen Z Y, Liu R, Tan X C, Jing C, Nie Z, Heng D, Jiang D C, Wen R, Chen L, Tang Y F, Tang K. 2023. Implications of multi-source quartz on shale-gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi shale of Changning Area in southern margin of Sichuan Basin, China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 920-930]

耿良玉. 1984. 论上扬子区五峰页岩的陆表海成因:兼评远洋成因论. 见:中国古生物学会第十三、十四届学术年会论文选集. 中国科学院南京地质古生物研究所, 12. [Geng L Y. 1984. Discussion on epigenetic genesis of Wufeng shale in Upper Yangtze area: a review of pelagic genesis. 13th and 14th Annual Conventions of

- Palaeontological Society of China. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS, 12]
- 郭彤楼,张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式. 石油勘探与开发, 41(1): 28-36. [Guo T L, Zhang H R. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development, 41(1): 28-36]
- 郭伟,李熙喆,张晓伟,兰朝利,梁萍萍,沈伟军,郑马嘉. 2022. 深水陆棚富有机质页岩沉积微相—微地貌及其对储层的控制作用: 以四川盆地南部五峰组—龙马溪组页岩为例. 石油学报, 43(8): 1089-1106. [Guo W, Li X Z, Zhang X W, Lan C L, Liang P P, Shen W J, Zheng M J. 2022. Sedimentary microfacies and microrelief of organic-rich shale in deep-water shelf and their control on reservoirs: a case study of shale from Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 43(8): 1089-1106]
- 郭旭升,李宇平,刘若冰,王庆波. 2014. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微孔隙结构特征及其控制因素. 天然气工业, 34(6): 9-16. [Guo X S, Li Y P, Liu R B, Wang Q B. 2014. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 34(6): 9-16]
- 何佳伟,谢渊,侯明才,刘建清,何利,芦云飞. 2021. 川西南盐津地区志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义. 古地理学报, 23(6): 1174-1191. [He J W, Xie Y, Hou M C, Liu J Q, He L, Lu Y F. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of the Silurian Longmaxi Formation shale in Yanjin Area, southwestern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(6): 1174-1191]
- 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]
- 胡维芬,张兰兰,陈木宏,曾丽丽,周伟华,向荣,张强,刘世昊. 2015. 南海断面春季活体放射虫生态分布及其对环境的响应. 中国科学: 地球科学, 45(1): 83-98. [Hu W F, Zhang L L, Chen M H, Zeng L L, Zhou W H, Xiang R, Zhang Q, Liu S H. 2015. Distribution of living radiolarians in spring in the South China Sea and its responses to environmental factors. Scientia Sinica (Terrae), 45(1): 83-98]
- 李鹤,黄宝琦,王娜. 2017. 南海北部 MD12-3429 站位海水古生产力和溶解氧含量特征. 古生物学报, 56(2): 238-248. [Li H, Huang B Q, Wang N. 2017. Changes of the palaeo-sea surface productivity and bottom water dissolved oxygen content at MD12-3429, northern South China Sea. Acta Palaeontologica Sinica, 56(2): 238-248]
- 梁峰. 2018. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气富集模式及有利区优选评价. 中国矿业大学(徐州)博士论文. [Liang F. 2018. The research on shale gas enrichment pattern and the favorable area optimizing of Wufeng-longmaxi shale in middle and Upper Yangtze Region. Doctoral dissertation of China University of Mining and Technology(Xuzhou)]
- 廖梓翔,陈伟,余养里. 2023. 四川长宁地区五峰组—龙马溪组构造演化特征. 地质论评, 69(S1): 45-46. [Liao Z X, Chen W, Yu Y L. 2023. Structural evolution characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Changning Area, Sichuan Province. Geological Review, 69(S1): 45-46]
- 刘伟,许效松,余谦,闫剑飞,门玉澎,张海全. 2012. 中上扬子晚奥陶世赫南特期岩相古地理. 成都理工大学学报(自然科学版), 39(1): 32-39. [Liu W, Xu X S, Yu Q, Yan J F, Men Y P, Zhang H Q. 2012. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Hirnantian in the middle-Upper Yangtze Region of China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 39(1): 32-39]
- 聂海宽,金之钧,马鑫,刘忠宝,林拓,杨振恒. 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. [Nie H K, Jin Z J, Ma X, Liu Z B, Lin T, Yang Z H. 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]
- 任官宝,陈雷,计玉冰,程青松. 2023. 昭通东北地区五峰组—龙马溪组龙一1亚段页岩岩相类型及其储层特征. 石油实验地质, 45(3): 443-454. [Ren G B, Chen L, Ji Y B, Cheng Q S. 2023. Shale lithofacies types and reservoir characteristics from Ordovician Wufeng Formation to the first sub-member of the first member of Silurian Longmaxi Formation, northeast Zhaotong Area. Petroleum Geology & Experiment, 45(3): 443-454]
- 施振生,袁渊,赵群,孙莎莎,周天琪,程峰. 2022. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积期古地貌及含气页岩特征. 天然气地球科学, 33(12): 1969-1985. [Shi Z S, Yuan Y, Zhao Q, Sun S S, Zhou T Q, Cheng F. 2022. Paleogeomorphology and oil-bearing shale characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. Natural Gas Geoscience, 33(12): 1969-1985]
- 施振生,王红岩,赵圣贤,周天琪,赵群,祁灵. 2023. 川南地区上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布. 古地理学报, 25(4): 788-805. [Shi Z S, Wang H Y, Zhao S X, Zhou T Q, Zhao Q, Qi L. 2023. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formations in southern Sichuan Basin, China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 788-805]
- 苏德辰,吕洪波,章雨旭,孙爱萍,朱晓青,贺静,袁效奇. 2022. 碳酸盐岩中燧石条带成因争鸣: 以北京西山中元古界雾迷山组为例. 地质论评, 68(5): 1605-1620. [Su D C, Lü H B, Zhang Y X, Sun A P, Zhu X Q, He J, Yuan X Q. 2022. An argument on origin of chert bands in carbonate rocks: a case study of the Mesoproterozoic Wumishan Formation in the Western Hills of Beijing. Geological

- Review, 68(5): 1605-1620]
- 孙莎莎, 芮昀, 董大忠, 施振生, 拜文华, 马超, 张磊夫, 武瑾, 昌燕. 2018. 中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世古地理演化及页岩沉积模式. 石油与天然气地质, 39(6): 1087-1106. [Sun S S, Rui Y, Dong D Z, Shi Z S, Bai W H, Ma C, Zhang L F, Wu J, Chang Y. 2018. Paleogeographic evolution of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions and depositional model of shale. Oil & Gas Geology, 39(6): 1087-1106]
- 童崇光. 1992. 四川盆地构造演化与油气聚集. 北京: 地质出版社, 128. [Tong C G. 1992. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 128]
- 王高翔, 赵圣贤, 陈雷, 张鉴, 张成林, 苑术生, 冯江荣, 李博, 谭秀成. 2022. 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. 天然气地球科学, 33(10): 1675-1690. [Wang G X, Zhao S X, Chen L, Zhang J, Zhang C L, Yuan S S, Feng J R, Li B, Tan X C. 2022. 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. Natural Gas Geoscience, 33(10): 1675-1690]
- 王红岩, 施振生, 孙莎莎. 2021. 四川盆地及周缘奥陶系五峰组: 志留系龙马溪组页岩生物地层及其储集层特征. 石油勘探与开发, 48(5): 879-890. [Wang H Y, Shi Z S, Sun S S. 2021. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shale in the Sichuan Basin and surrounding areas, China. Petroleum Exploration and Development, 48(5): 879-890]
- 王同, 张克银, 熊亮, 史洪亮, 董晓霞, 魏力民, 温真桃, 欧阳嘉穗, 李斌, 王浩宇. 2018. 四川自贡地区五峰组—龙马溪组下段古地貌刻画及其油气意义. 石油实验地质, 40(6): 764-770. [Wang T, Zhang K Y, Xiong L, Shi H L, Dong X X, Wei L M, Wen Z T, Ouyang J S, Li B, Wang H Y. 2018. Paleogeomorphology restoration of Wufeng Formation-Lower Member of Longmaxi Formation in Zigong Area of Sichuan Province and its oil and gas significance. Petroleum Geology & Experiment, 40(6): 764-770]
- 王玉满, 董大忠, 黄金亮, 李新景, 王淑芳. 2016. 四川盆地及周边上奥陶统五峰组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义. 石油勘探与开发, 43(1): 42-50. [Wang Y M, Dong D Z, Huang J L, Li X J, Wang S F. 2016. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China. Petroleum Exploration and Development, 43(1): 42-50]
- 韦国栋, 谭秀成, 刘睿, 张康斌, 郑健, 刘洪, 陈雷, 唐奎. 2023. 长宁地区龙马溪组页岩沉积古地貌与页岩气差异富集的耦合机制. 沉积与特提斯地质, 44(2): 253-266. [Wei G D, Tan X C, Liu R, Zhang K B, Zheng J, Liu H, Chen L, Tang K. 2023. The coupling mechanism between geomorphology of shale sedimentary and differential enrichment of shale gas in Longmaxi Formation in Changning area. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 253-266].
- 吴锋, 战金艳, 邓祥征, 林英志. 2012. 中国湖泊富营养化影响因素研究: 基于中国 22 个湖泊实证分析. 生态环境学报, 21(1): 94-100. [Wu F, Zhan J Y, Deng X Z, Lin Y Z. 2012. Influencing factors of lake eutrophication in China: a case study in 22 lakes in China. Ecology and Environmental Sciences, 21(1): 94-100]
- 俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒. 2017. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素. 环境科学, 38(4): 1393-1402. [Yu Y, Liu D F, Yang Z J, Zhang J L, Xu Y Q, Liu J G, Yan G H. 2017. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in thousand-island lake and their influencing factors. Environmental Science, 38(4): 1393-1402]
- 张灿. 2019. 构造挤压对页岩孔隙影响的地质实例与模拟实验研究. 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所)硕士学位论文. [Zhang C. 2019. Influence of tectonic compression on shale pore structure development: a case study and simulation experiments. Masteral dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences]
- 赵东方, 谭秀成, 罗文军, 王小芳, 徐伟, 罗思聪, 唐大海, 罗鑫, 曾伟. 2022. 早成岩期岩溶特征及其对古老深层碳酸盐岩储层的成因启示: 以川中地区磨溪 8 井区灯影组四段为例. 石油学报, 43(9): 1236-1252. [Zhao D F, Tan X C, Luo W J, Wang X F, Xu W, Luo S C, Tang D H, Luo Y, Zeng W. 2022. Karst characteristics at early diagenetic stage and their enlightenment for the origin of ancient deep carbonate reservoirs: a case study of the Member 4 of Dengying Formation in Moxi 8 well area, central Sichuan. Acta Petrolei Sinica, 43(9): 1236-1252]
- 赵建华, 金振奎, 耿一凯, 温馨. 2016. 四川盆地龙马溪组富有机质页岩形成主控因素. 大庆石油地质与开发, 35(2): 140-147. [Zhao J H, Jin Z K, Geng Y K, Wen X. 2016. Main diagenesis controlling factors for Longmaxi organic matter-rich shale in Sichuan Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 35(2): 140-147]
- 朱正平, 罗文军, 潘仁芳, 翁雪波, 金吉能. 2019. 川中高石梯—磨溪地区灯影组四段古地貌恢复及其对储层的控制作用. 中国石油勘探, 24(6): 730-738. [Zhu Z P, Luo W J, Pan R F, Weng X B, Jin J N. 2019. The paleogeomorphology restoration of Simian Deng 4 Member and its control on reservoir formation in the Gaoshiti-Moxi Area in central Sichuan Basin. China Petroleum Exploration, 24(6): 730-738]
- 邹才能, 赵群, 丛连铸, 王红岩, 施振生, 武瑾, 潘松圻. 2021. 中国页岩气开发进展、潜力及前景. 天然气工业, 41(1): 1-14. [Zou C N, Zhao Q, Cong L Z, Wang H Y, Shi Z S, Wu J, Pan S Q. 2021. Development progress, potential and prospect of shale gas in China. Natural Gas Industry, 41(1): 1-14]
- Bowker K. 2003. Recent development of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin. West Texas Geological Society Bulletin, 42: 4-11.
- Chang J Q, Fan X D, Jiang Z X, Wang X M, Chen L, Li J T, Zhu L, Wan C X, Chen Z X. 2022. Differential impact of clay minerals and organic matter on pore structure and its fractal characteristics of marine

- and continental shales in China. *Applied Clay Science*, 216: 106334.
- Chen L, Lu Y C, Li J Q, Guo X S, Jiang S, Luo C. 2020. Comparative study on the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the Jiaoshiha shale gas field and the Pengshui Area in the southeast Sichuan Basin, China. *Geosciences Journal*, 24: 61–71.
- Chen L, Chen X, Tan X C, Hu X T, Wang G X. 2022. Pyrite characteristics and its environmental significance in marine shale: a case study from the Middle Ordovician Wufeng-lower Silurian Longmaxi Formation in the southeast Sichuan Basin, SW China. *Minerals*, 12: 830.
- Chen L, Chen X, Tan X C, Zheng J, Yang Y, Jing C, Zhou H, Wang G X. 2023. Factors controlling organic matter accumulation in the Longmaxi Formation shale, Changning Area, South Sichuan Basin. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9: 89.
- Feng Y, Xiao X M, Gao P, Wang E Z, Hu D F, Liu R B, Li G, Lu C G. 2023. Restoration of sedimentary environment and geochemical features of deep marine Longmaxi shale and its significance for shale gas: a case study of the Dingshan Area in the Sichuan Basin, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 151: 106186.
- Fishman N S, Hackley P C, Lowers H A, Hill R J, Egenhoff S O, Eberl D D, Blum A E. 2012. The nature of porosity in organic-rich mudstones of the Upper Jurassic Kimmeridge Clay Formation, North Sea, offshore United Kingdom. *International Journal of Coal Geology*, 103: 32–50.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91: 475–499.
- Ju Y W, Sun Y, Tan J Q, Bu H L, Han K, Li X S, Fang L Z. 2018. The composition, pore structure characterization and deformation mechanism of coal-bearing shales from tectonically altered coalfields in Eastern China. *Fuel*, 234: 626–642.
- Kennedy M J, Pevear D R, Hill R J. 2002. Mineral surface control of organic carbon in black shale. *Science*, 295: 657–660.
- Kuila U, McCarty D K, Derkowski A, Fischer T B, Topór T, Prasad M. 2014. Nano-scale texture and porosity of organic matter and clay minerals in organic-rich mudrocks. *Fuel*, 135: 359–373.
- Li X S, Ju Y W, Hou Q L, Li Z, Wei M M, Fan J J. 2014. Characterization of coal porosity for naturally tectonically stressed coals in Huaibei coal field, China. *The Scientific World Journal*, 2014: 560450.
- Liang M L, Wang Z X, Gao L, Li C L, Li H J. 2017. Evolution of pore structure in gas shale related to structural deformation. *Fuel*, 197: 310–319.
- Lin D L, Xi Z D, Tang S H, Lash G G, Guo Q L, Wang H Y, Zhu Y M. 2024. Organic matter enrichment in shale deposited proximal to paleo-uplifts and its impact on shale gas exploration. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 633: 111900.
- Liu B, Mastalerz M, Schieber J. 2022. SEM petrography of dispersed organic matter in black shales: a review. *Earth-Science Reviews*, 224: 103874.
- Loucks R, Reed R. 2014. Scanning-electron-microscope petrographic evidence for distinguishing organic matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in mudrocks. *GCAGS Journal*, 3: 51–60.
- Wang H Y, Zhou S W, Li S S, Zhao M, Zhu T. 2022. Comprehensive characterization and evaluation of deep shales from Wufeng–Longmaxi Formation by LF-NMR technology. *Unconventional Resources*, 2: 1–11.
- Wang P W, Liu Z B, Zhang D W, Li X, Liu H T, Zhou L, Li P. 2023. Source rock and reservoir qualities of Middle Jurassic Lianggaoshan lacustrine shale at Fuxing Area, Sichuan Basin: implication for shale-oil enrichment. *Unconventional Resources*, 3: 37–43.
- Woolnough W G. 1937. Sedimentation in barred basins, and source rocks of oil. *AAPG Bulletin*, 21: 1101–1157.
- Wu S C, Chen L, Xiong M, Chen X, Wang G X, Tan X C, Li J. 2024. Depositional conditions of shale lithofacies during the Late Ordovician–Early Silurian in the Upper Yangtze Area, SW China: responses to sea-level changes. *Marine and Petroleum Geology*, 161: 106696.
- Xiong M, Chen L, Tan X C, Chen X, Zheng J, Yang Y, Jing C, Wang G X. 2023. Effects of the astronomical orbital cycle on organic matter accumulation during the Late Ordovician–early Silurian in the Upper Yangtze Area, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 242: 105496.
- Zeng L B, Lyu W Y, Li J, Zhu L F, Weng J Q, Yue F, Zu K W. 2016. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30: 1–9.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)