

四川盆地德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩 岩相特征与沉积—成岩控储机理*

廖崇杰^{1,2} 陈 雷^{1,2} 陈 鑫³ 秦何星⁴ 熊 敏^{1,2}
郑 健⁵ 谭秀成^{1,2,6} 曹 剑⁷

- 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 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院, 四川成都 610051
4 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518000
5 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川成都 610051
6 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
7 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

摘 要 四川盆地南部德阳—安岳裂陷槽下寒武统筇竹寺组作为中国深层页岩气核心勘探层系, 其页岩岩相分异机制、储集层品质主控因素尚不明确, 制约甜点区精准预测。针对该问题, 本研究以裂陷槽南段筇竹寺组为对象, 通过岩心观察、矿物组分分析、有机地球化学测试、孔隙定量表征及沉积动力学分析, 系统揭示岩相展布规律与沉积—成岩控储机理。结果表明: (1) 研究区主要发育含黏土硅质页岩相(S-4)、混合硅质页岩相(S-2)、硅质页岩相(S-1)及含黏土/硅混合质页岩相(M-4)4类岩相, 纵向呈“硅质递减—黏土递增”演化序列, 横向分异受“裂陷中心—槽缘斜坡—槽外高部位”古地貌分区控制, 槽内以S-1、S-2为主, 槽缘斜坡过渡为S-2与S-4组合, 槽外高部位则以S-4、M-4为主; (2) 硅质页岩相(S-1)具有高脆性矿物含量(>90%)、原生孔隙保存完整及微裂缝发育特征, 各项储集层参数显著优于其他岩相, 且含气性显著高于含黏土的S-4和M-4相, 是筇竹寺组页岩优质储集层核心岩相类型; (3) 古地貌通过调控水动力强度与物质供给, 主导沉积作用类型及成岩路径差异: 裂陷槽中心以低能悬浮沉积促进硅质生物富集与微石英转化, 形成抗压实储集层; 槽缘斜坡通过底流沉积引入陆源黏土, 诱发蒙脱石—伊利石转化(S-I反应), 导致孔隙衰变; 槽外高部位由于风暴和重力流高能沉积抑制有机质保存, 并叠加钙质压溶—再胶结作用, 导致储集层严重劣化。研究成果明确了沉积古地貌、沉积动力学和成岩作用对页岩储集层品质的约束规律, 为深层页岩气勘探提供了“古地貌—沉积—成岩—储集层”协同评价框架。

关键词 四川盆地 德阳—安岳裂陷槽 筇竹寺组 岩相分异 控储机理 古地貌 沉积—成岩作用

第一作者简介 廖崇杰, 男, 1998年生, 博士研究生, 主要进行非常规油气地质和沉积学学习和研究。
E-mail: chongjie98@163.com。

通讯作者简介 陈雷, 男, 1985年生, 教授、博士生导师, 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: P588.2; P512.2 文献标志码: A

Lithofacies characteristics and sedimentation-diagenesis controls

* 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: 2025-10-19 改回日期: 2025-11-29

on reservoir quality of the Qiongzhusi Formation shale in southern Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

LIAO Chongjie^{1,2} CHEN Lei^{1,2} CHEN Xin³ QIN Hexing⁴ XIONG Min^{1,2}
ZHENG Jian⁵ TAN Xiucheng^{1,2,6} CAO Jian⁷

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

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

³ Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China

⁴ CNOOC Co., Ltd., Shenzhen Branch, Guangdong Shenzhen 518000, China

⁵ Sichuan Changning Gas Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China

⁶ State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

⁷ School of Geosciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin serves as a core exploration interval for deep shale gas in China. However, the mechanisms governing shale lithofacies differentiation and the main controlling factors of reservoir quality remain unclear, which restricts the accurate prediction of sweet spots. To address this issue, this study focuses on the Qiongzhusi Formation in the southern segment of the rift trough, and systematically reveals the spatial distribution pattern of lithofacies and the sedimentation-diagenesis controls on reservoir formation through core observation, mineral composition analysis, organic geochemical testing, quantitative pore characterization, and sedimentodynamic analysis. The results show that: (1) Four main types of lithofacies are developed in the study area, namely clay-bearing siliceous shale facies (S-4), mixed siliceous shale facies (S-2), siliceous shale facies (S-1), and clay/silicon mixed shale facies (M-4). Vertically, they exhibit an evolutionary sequence of “decreasing siliceous content and increasing clay content”, while their lateral differentiation is controlled by the palaeogeomorphic zoning of “rift center—trough margin slope—extra-trough high area”: siliceous lithofacies (S-1, S-2) dominate within the rift trough, the trough margin slope transitions to a combination of S-2 and S-4, and the extra-trough high area is dominated by S-4 and M-4; (2) The siliceous shale facies (S-1) is characterized by high brittle mineral content (>90%), well-preserved primary pores, and developed microfractures. All its reservoir parameters are significantly superior to those of other lithofacies, and its gas-bearing property is notably higher than that of the clay-involved S-4 and M-4 facies, making it the core lithofacies type for high-quality reservoirs of the Qiongzhusi Formation shale; (3) Palaeogeomorphology dominates the types of sedimentary processes and differences in diagenetic pathways by regulating hydrodynamic intensity and material supply: in the rift trough center, low-energy suspension sedimentation promotes the accumulation of siliceous organisms and the transformation of biogenic silica to microquartz, forming anti-compaction reservoirs; in the trough margin slope, bottom current sedimentation introduces terrigenous clay, triggering montmorillonite-to-illite transformation (S-I reaction) and leading to pore degradation; in the extra-trough high area, high-energy sedimentation driven by storms and gravity flows inhibits organic matter preservation, and the superposition of calcareous pressure dissolution-recementation further results in severe reservoir deterioration. This study clarifies the constraint laws of sedimentary palaeogeomorphology, sedimentodynamics, and diagenesis on shale reservoir quality, and provides a “palaeogeomorphology-sedimentation-diagenesis-reservoir” synergistic evaluation framework for deep shale gas

exploration.

Key words Sichuan Basin, Deyang-Anyue rift trough, Qiongzhusi Formation, lithofacies differentiation, reservoir-controlling mechanisms, palaeogeomorphology, sedimentation-diagenesis

About the first author LIAO Chongjie, born in 1998, Ph.D. candidate, 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 an associate professor at Southwest Petroleum University. He is mainly engaged in researches on unconventional petroleum geology and sequence stratigraphy. E-mail: cl211@126.com.

0 引言

早寒武世是全球古地理格局重建与生命演化研究的关键窗口期。在 Rodinia 超大陆裂解与 Gondwana 大陆汇聚的构造背景下,四川盆地南部在早寒武世筇竹寺期发育了区域性的德阳—安岳裂陷槽(Zou *et al.*, 2024),为深水陆棚相黑色页岩沉积提供了得天独厚的古地理条件。这一构造响应与寒武纪大爆发主幕具有显著的时空耦合性:小壳动物群繁盛促使海洋食物网结构升级,浮游生物摄食效率提升使有机质沉降速率提高 3~5 倍,而深水陆棚条件下硫化缺氧水体则抑制了有机质降解,这些因素致使筇竹寺组形成厚度达 100~600 m 的富有机质页岩层(Cai *et al.*, 2019; 雍锐等, 2024)。在此背景下,近期筇竹寺组的勘探测试取得历史性突破——资 201 井测试获日产 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流,成为全球首例埋深超 4600 m、年龄逾 0.52 Ga 的超深层页岩气藏(何晓等, 2024)。这一发现不仅刷新了古老页岩油气成藏理论,更对全球古老页岩系统勘探具有里程碑意义。

当前,沉积学—岩石学—地球化学等多学科交叉方法已在全球页岩气研究中形成系统范式(祁灵等, 2025)。例如:Guo 和 Zhang (2014) 通过构造演化分析与地球化学指标耦合,揭示了四川盆地焦石坝页岩气田“阶梯运移、背斜富集、断裂—滑脱面控缝、箱状成藏”的高产富集模式;Xiong 等 (2023) 阐明天文轨道通过调控上升流强度、陆源稀释效应和缺氧环境,控制不同阶段有机质富集机制;Wu 等 (2024) 构建“海平面—岩相—地球化学”响应模型,揭示页岩非均质性成因机制并实现优质岩相横向预测。而在国际研究中,海相页岩案例更是深化了多学科融合的认识,Slatt 和 O'Brien (2011) 利用扫描电镜与矿物定量分析揭示美国 Barnett 页岩石英质岩相(石英含量大于

35%)中纳米级有机质孔群(孔径 50~200 nm)是游离气核心储集空间;Sageman 等 (2003) 基于生物生产力—保存条件—沉积速率三因素耦合模型,阐明泥盆纪 Kačák 缺氧事件通过增强有机质保存效率驱动富有机质页岩形成;Jarvie (2012) 通过硫同位素分馏 ($\delta^{34}\text{S} = -5\text{‰} \sim +15\text{‰}$) 与动力学模拟,量化硫化水体环境对 Woodford 页岩生烃周期的延缓效应达 30%。上述研究虽已深刻揭示沉积环境对岩相发育及有机质富集过程的控制作用,但未充分考虑不同岩相的矿物组分差异在成岩过程中所经历的差异化改造,而这种差异化改造会直接影响到孔隙的保存效率,进而导致储集层品质的分异,最终致使其难以阐明深层高成熟页岩在强成岩改造背景下储集层非均质性形成的核心机制;另一方面,古地理格局、沉积、成岩与储集层特征的关联性尚未明确,这种逻辑链条的缺失,造成了深层页岩储集层品质主控机制的认知盲区。

因此,本研究以四川盆地南部筇竹寺组页岩为对象,基于沉积学、岩石学、有机地球化学和多尺度孔隙表征及原位微区分析技术,重点解决以下关键问题:(1) 基于构造—沉积分异格局与矿物组合特征,划分页岩岩相类型,并揭示其空间展布规律;(2) 系统对比分析筇竹寺组页岩岩相储集性能差异,明确优势页岩岩相类型及其储集层发育机理;(3) 综合评价沉积环境对页岩储集层品质的控制作用,阐明储集层非均质性形成的主控地质要素。研究成果不仅为全球前寒武系—下古生界页岩油气勘探提供理论支撑,更对中国实现深层页岩气战略接替具有重要实践价值。

1 区域地质概况

四川盆地作为扬子克拉通西北缘多旋回叠合盆地,其菱形构造格架受周缘断裂体系控制,形成川

西低陡、川北低陡、川中低平、川西南低缓、川东高陡和川南低陡 6 个构造单元 (刘树根等, 2011)。研究区主体位于川南低陡构造带与川西南低缓构造带, 构造演化经历前震旦纪基底固结、古生代一早中生代海相台地发育及晚中生代前陆盆地改造三大阶段 (郭正吾等, 1996), 其中早寒武世筇竹寺期受德阳—安岳裂陷槽控制形成“两隆夹一凹”的构造—沉积分异格局: 裂陷槽呈北西—南东向哑铃状展布 (图 1-a), 槽内发育深水陆棚相富有机质页岩 (TOC>3%), 最大沉积厚度达 666 m (南江地区), 与周缘川北摩天岭—汉南古陆、川西泸定—滇中古陆的滨岸浅水陆棚相 (厚度小于 200 m) 及川东北城口台缘缓斜坡相 (厚度大于 1340 m) 形成显著差异 (魏国齐等, 2015; 范海经等, 2021)。筇竹寺组与下伏灯影组白云岩/麦地坪组含磷硅质白云岩岩系均呈不整合接触, 接触界面可见古岩溶风化壳, 局部可见含磷硅质结核的底砾岩层 (邓宾等, 2022; 杨雨然等, 2024),

其非均质性受控于裂陷槽四阶段演化 (坳陷雏形—裂陷扩展—充填沉降—构造消亡; 张本健等, 2023), 槽内缺氧分层水体与同生断裂硅质热液注入耦合, 形成高硅 ($\text{SiO}_2>60\%$)、高有机质丰度页岩层段, 而裂陷槽周缘的滑塌沉积与古陆边缘砂泥互层则揭示了构造—沉积—热液多因素耦合对页岩储集层发育的协同控制 (刘树根等, 2016; 贾智彬等, 2018), 塑造了筇竹寺组高硅、高有机质页岩层段与非均质储集层特征。

筇竹寺组地层划分方面, 目前学界存在不同方案, 主要包括两分法和三分法 (郭彤楼等, 2024; Zou *et al.*, 2024)。本研究基于具有明确时代意义的古生物化石组合, 将筇竹寺组划分为第一段 (对应三分法的筇一段—筇二段) 和第二段 (对应三分法中的筇三段), 其中第一段可见 *Lapworthella-Tannuolina-Sinosachites* 小壳化石带, 第二段可见 *Eoredlichia-Wudinggaspis* 三叶虫化石带 (钱逸, 1999), 此外, 根据测井、TOC 和岩性分析, 再将

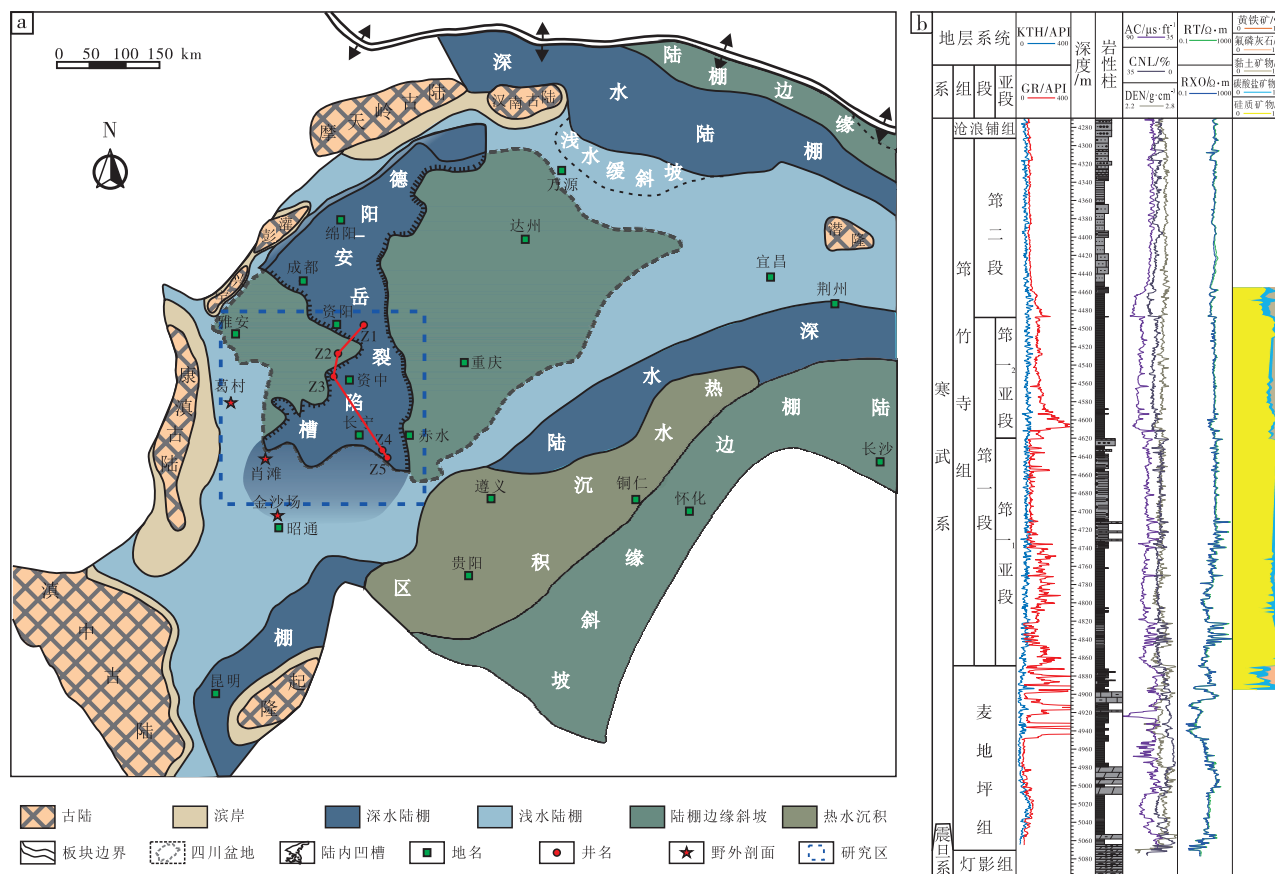


图 1 上扬子地区早寒武世筇竹寺期沉积相平面展布 (a; 据赵建华等, 2019) 与 Z1 井综合柱状图 (b)

Fig. 1 Planar distribution of sedimentary facies of the depositional period of Qiongzhusi Formation in the Upper Yangtze Region (a; after Zhao *et al.*, 2019), and comprehensive columnar section of Well Z1 (b)

第一段划分为第一₁亚段和第一₂亚段。其中第一₁亚段岩性主要包括灰色、黑色页岩和灰色粉砂质页岩，第一₂亚段岩性主要是黑色页岩，第二段岩性主要包括黑色、灰色页岩、灰色砂质页岩、灰色灰质泥岩和灰色泥质灰岩(图 1-b)。该划分方案与三分法相比更强调第一段内部的非均质性，更有效地区分和刻画第一₂亚段是页岩气富集的主体层段。

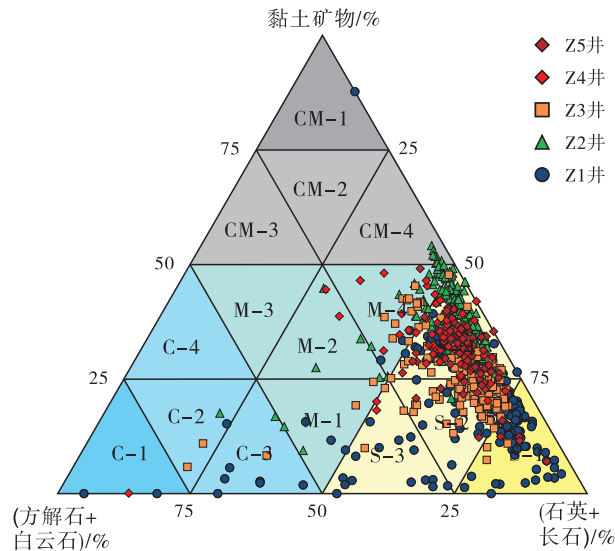
2 页岩岩相类型及特征

2.1 页岩岩相划分原则

本次筇竹寺组页岩岩相研究遵循矿物组分主导的三端元划分方案(吴蓝宇等, 2016), 以硅质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物(方解石+白云石)及黏土矿物的质量分数为分类核心。当单一矿物类别占比超过 50% 时, 分别定义为硅质页岩相(S)、灰质页岩相(C)或黏土质页岩相(CM); 若 3 类矿物含量均介于 25%~50%, 则归为混合质页岩相(M)。在此基础上, 通过引入次要矿物含量阈值(如硅质矿物 25%~50%、黏土矿物 25%~50% 等), 进一步划分出 16 种亚类岩相(图 2)。例如, 含黏土硅质页岩相(S-4)以硅质矿物 50%~75%、黏土矿物 25%~50% 为特征, 反映硅质主控背景下黏土输入的过渡环境; 混合硅质页岩相(S-2)则以硅质矿物 50%~75%、碳酸盐矿物<25% 为标志, 代表高能沉积体系中硅质与黏土的动态平衡。该分类体系不仅整合了岩石矿物学特征, 还耦合了沉积环境响应(如硅质富集指示生物硅生产或陆源碎屑输入)及储集层工程属性(如脆性矿物含量控制裂缝扩展潜力), 为页岩气储集层精细评价提供了系统的岩石学框架(陈吉和肖贤明, 2013; 赵建华等, 2016; 刘雨迪等, 2024)。

2.2 筇竹寺组主要岩相类型

通过川南地区筇竹寺组 433 件样品的 X 衍射全岩分析数据投点(图 2)和岩石学分析研究, 发现研究区主要发育 4 类优势岩相: 含黏土硅质页岩相(S-4)、混合硅质页岩相(S-2)、硅质页岩相(S-1), 以及含黏土/硅混合质页岩相(M-4), 其中大部分样品点分布在含黏土硅质页岩相(S-4)(图 2)。不同页岩岩相的矿物组成、岩石结构及储集性能呈现显著差异。



黏土质页岩相: CM-1 (黏土质页岩相); CM-2 (混合黏土质页岩相); CM-3 (含灰黏土质页岩相); CM-4 (含硅黏土质页岩相)。灰质页岩相: C-1 (灰质页岩相); C-2 (混合灰质页岩相); C-3 (含硅灰质页岩相); C-4 (含黏土灰质页岩相)。硅质页岩相: S-1 (硅质页岩相); S-2 (混合硅质页岩相); S-3 (含灰硅质页岩相); S-4 (含黏土硅质页岩相)。混合质页岩相: M-1 (含灰/硅混合质页岩相); M-2 (混合质页岩相); M-3 (含黏土/灰混合质页岩相); M-4 (含黏土/硅混合质页岩相)。

图 2 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩岩相三端元图解(底图据吴蓝宇等, 2016)

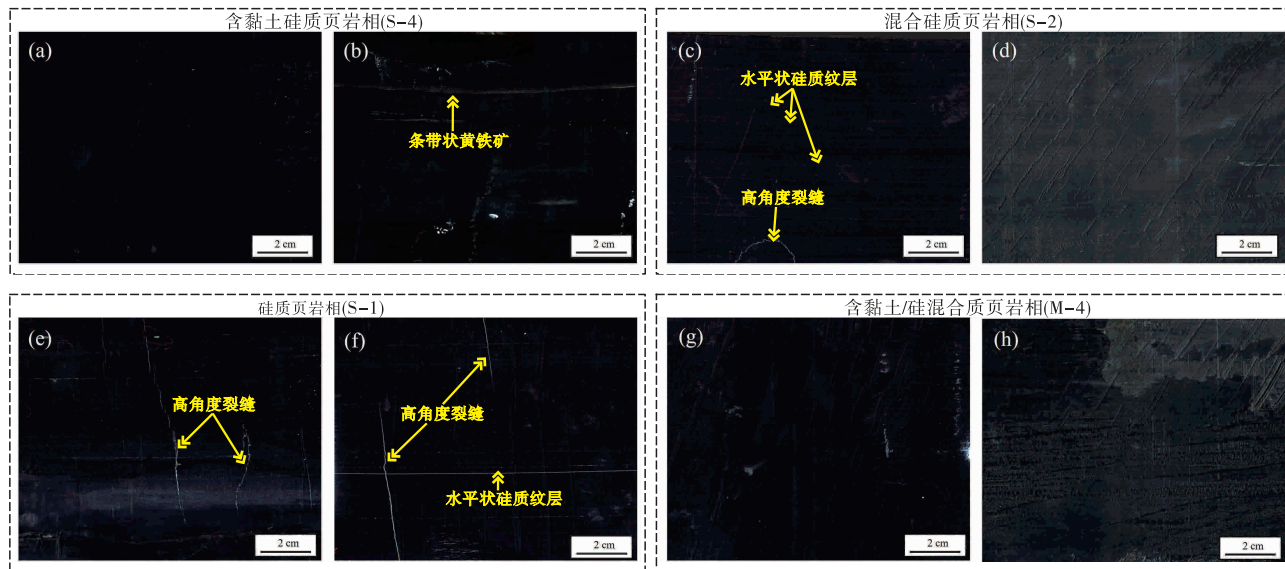
Fig. 2 Triangular diagram of shale lithofacies for the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough (Base map after Wu et al., 2016)

2.2.1 含黏土硅质页岩相(S-4)

作为研究区最发育的岩相类型(占比大于 60%), 其硅质矿物含量介于 50.4%~73.5% (均值 62.1%), 黏土矿物 25.8%~49.1% (均值 37.4%), 碳酸盐矿物含量小于 12.9%。岩心表现为灰黑色页岩(图 3-a), 发育毫米级黄铁矿条带(图 3-b), 镜下可见棱角一次棱角状石英与长石颗粒(粒径 10~50 μm) 无序分布于黏土矿物构成的基质中(图 4-b), 颗粒间以点接触为主, 部分样品可见方解石胶结物(图 4-a), 偶见顺层微裂缝。GR 测井响应呈稳定低值(均值 100 API 左右), 曲线平直。

2.2.2 混合硅质页岩相(S-2)

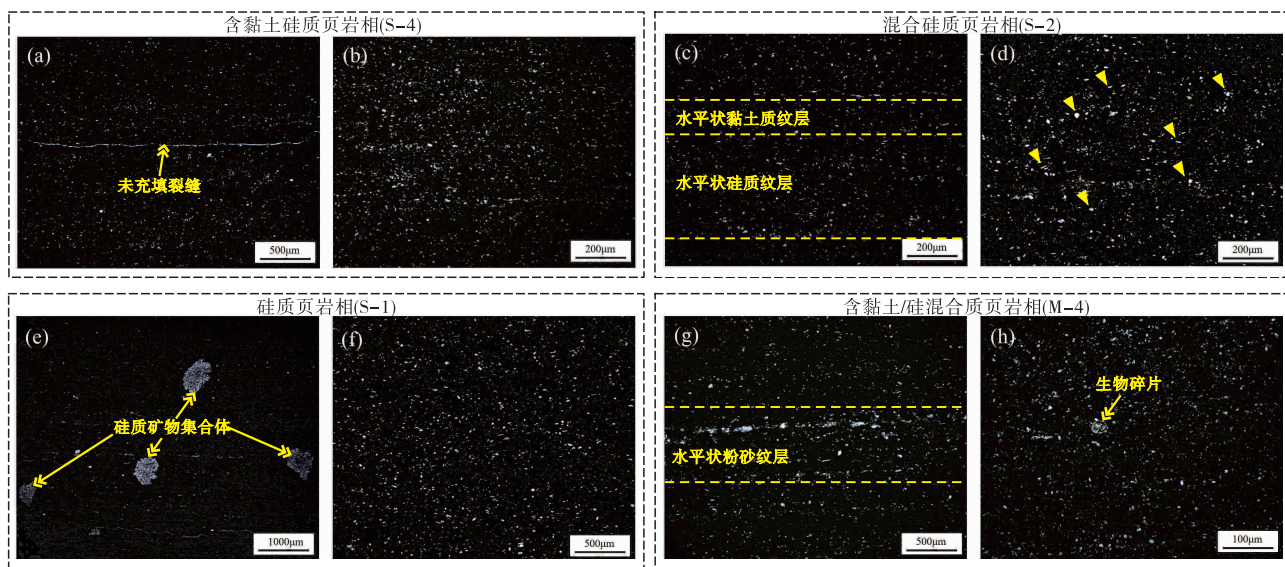
混合硅质页岩相的硅质矿物含量处于 55.3%~74.9% (均值 70.8%), 黏土矿物含量小于 24.8%, 碳酸盐矿物含量小于 23.6%。岩性以灰黑色—深灰色页岩为主(图 3-c; 图 4-d), 发育水平



a—Z1 井, 4478.31~4478.44 m, 第二段, 灰黑色页岩; b—Z3 井, 4459.94~4460.06 m, 第一₁亚段, 灰黑色页岩; c—Z1 井, 4783.72~4783.87 m, 第一₁亚段, 灰黑色页岩; d—Z3 井, 4346.12~4346.31 m, 第一₂亚段, 深灰色页岩; e—Z1 井, 4860.63~4860.76 m, 第一₁亚段, 灰黑色页岩; f—Z1 井, 4769.93~4770.11 m, 第一₁亚段, 灰黑色页岩; g—Z1 井, 4471.17~4471.40 m, 第二段, 灰黑色页岩; h—Z3 井, 4233.98~4234.16 m, 第二段, 深灰色页岩

图 3 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩主要岩相岩心环扫特征

Fig. 3 Core circumferential scanning characteristics of main shale lithofacies of the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough



a—Z3 井, 4453.10 m, 第一₁亚段, 单偏光, 可见被茜素红染色的方解石胶结物; b—Z3 井, 4459.9 m, 第一₁亚段, 单偏光; c—Z1 井, 4810.71 m, 第一₁亚段, 单偏光; d—Z3 井, 4346.12 m, 第一₂亚段, 单偏光, 黄色指示云母呈微定向排列; e—Z1 井, 4860.63 m, 第一₁亚段, 单偏光; f—Z1 井, 4768.23 m, 第一₁亚段, 单偏光; g—Z3 井, 4387.36 m, 第一₁亚段, 单偏光; h—Z3 井, 4234.16 m, 第二段, 单偏光

图 4 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩主要岩相镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of main shale lithofacies of the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

状硅质—黏土纹层（间距 0.1~0.5 mm），但肉眼岩心纹层辨识度极低，无清晰的层理分层特征（图 3-c），局部见方解石充填的高角度裂缝（开度 50~200 μm ）。微观上隐约可见水平状硅质纹层与水平状黏土质纹层互层发育（图 4-c），反映静水悬浮沉降主导的低能环境；云母呈微定向排列（图 4-d），颗粒分选磨圆较差，以次圆状为主。该岩相 GR 曲线主要呈现齿状尖峰，数值多介于 100~200 API。

2.2.3 硅质页岩相（S-1）

该岩相以硅质矿物 75.1%~92.9%（均值 80.1%）为特征，黏土矿物含量小于 20.9%，碳酸盐矿物含量小于 22.5%。岩心显示为灰黑色页岩中发育密集网状裂缝（密度 4~8 条/m），部分被后期方解石全充填（图 3-e；图 4-f）。偏光显微镜揭示硅质集合体（生物硅成因）呈蜂窝状结构，指示深水陆棚—盆地相低能环境，生物硅供应充足，陆源稀释弱，颗粒结构成熟度较低、分选中等、磨圆中等，见少量云母呈微定向排列（图 4-e，4-f）。GR 测井响应高值（普遍大于 200 API），曲线呈现指形或正向齿形。

2.2.4 含黏土/硅混合质页岩相（M-4）

含黏土/硅混合质页岩相的硅质矿物含量为 42.8%~49.9%，黏土矿物 25.6%~49.7%，碳酸盐矿物含量小于 24.8%。岩性为块状灰黑色—深灰色页岩，缺乏明显沉积构造（图 3-g，3-h）。微观下可见水平状硅质纹层和黏土纹层呈互层状叠置发育，黏土矿物（伊利石+绿泥石）包裹硅质颗粒形成“黏土—硅质”复合基质，颗粒间呈点—线接触，分选磨圆较差，见圆状疑似生物碎片，这可能与风暴或重力流再搬运浅水物质有关，云母呈微定向排列（图 4-g，4-h）。该岩相 GR 曲线同样较为平直，GR 值也较低，但略高于含黏土硅质页岩相，这可能与黏土矿物富集导致的天然放射性增强有关。

2.3 筇竹寺组页岩岩相分布规律

由于川南地区筇竹寺组页岩所处的地质时期和沉积环境区域之间存在差异，研究区页岩的岩相分布呈现显著的纵向演化和横向分异特征，其空间分异主要受古地貌格局、沉积环境及构造活动的协同控制。

在纵向序列上，筇竹寺组整体表现为“硅质递减—黏土递增”的演化规律。第一₁亚段中下部以硅质矿物主导（占比>70%），主要发育高脆性、裂缝密集的硅质页岩相（S-1）和混合硅质页岩相（S-2），反映早期高能沉积环境或生物硅富集背景，向上至第一₁亚段顶部和第一₂亚段，随着黏土矿物占比逐渐增加（>20%），该部分主要发育含黏土硅质页岩相（S-4）和混合硅质页岩相（S-2），这表明海平面上升导致陆源输入增强及生物硅生产减弱；而到了第二段，从底部可以明显看出黏土矿物和碳酸盐矿物的急剧增加，该时期以含黏土硅质页岩相（S-4）和含黏土/硅混合质页岩相为主（图 5；图 6）。

横向分布上，岩相分异受德阳—安岳裂陷槽构造地貌控制：Z1 井位于裂陷槽沉积中心（构造低部位），低陆源输入与强生物硅沉积导致硅质矿物含量达 64%，岩相以硅质页岩相和混合硅质页岩相（S-1、S-2）为主，发育连续水平纹层；Z2 和 Z3 井处于槽缘构造斜坡带，显示出黏土矿物显著增加的趋势（47%~54%），岩相过渡为含黏土硅质页岩相（S-4）与混合硅质页岩相（S-2），岩性上表现为硅质—黏土纹层韵律互层特征，指示中等水动力条件下差异沉降作用；Z4 和 Z5 井位于裂陷槽外缘构造高部位，相对较高能的水体带来更多陆源黏土物质，岩相以含黏土/硅混合质页岩相（M-4）与含黏土硅质页岩相（S-4）主导，平均 TOC 较低且储集性能弱化（图 6）。该分布模式揭示由构造低部位向高部位迁移中，陆源黏土稀释效应渐强，硅质生物沉积贡献递减。

3 岩相储集层差异分析

3.1 有机质特征

总有机碳含量（TOC）作为有机质丰度的核心评价参数，不仅是页岩生烃潜力的关键指标，更通过其与矿物组成、孔隙结构的协同演化，深刻影响页岩储集层的含气性与可压性（陈孝红等，2018）。为明确不同页岩岩相的 TOC 分异规律，本研究针对四川盆地南部筇竹寺组 5 口系统取心井的 580 个页岩样品，采用碳硫分析仪开展了高精度 TOC 测试。

分析结果表明，硅质页岩相（S-1）展现出显

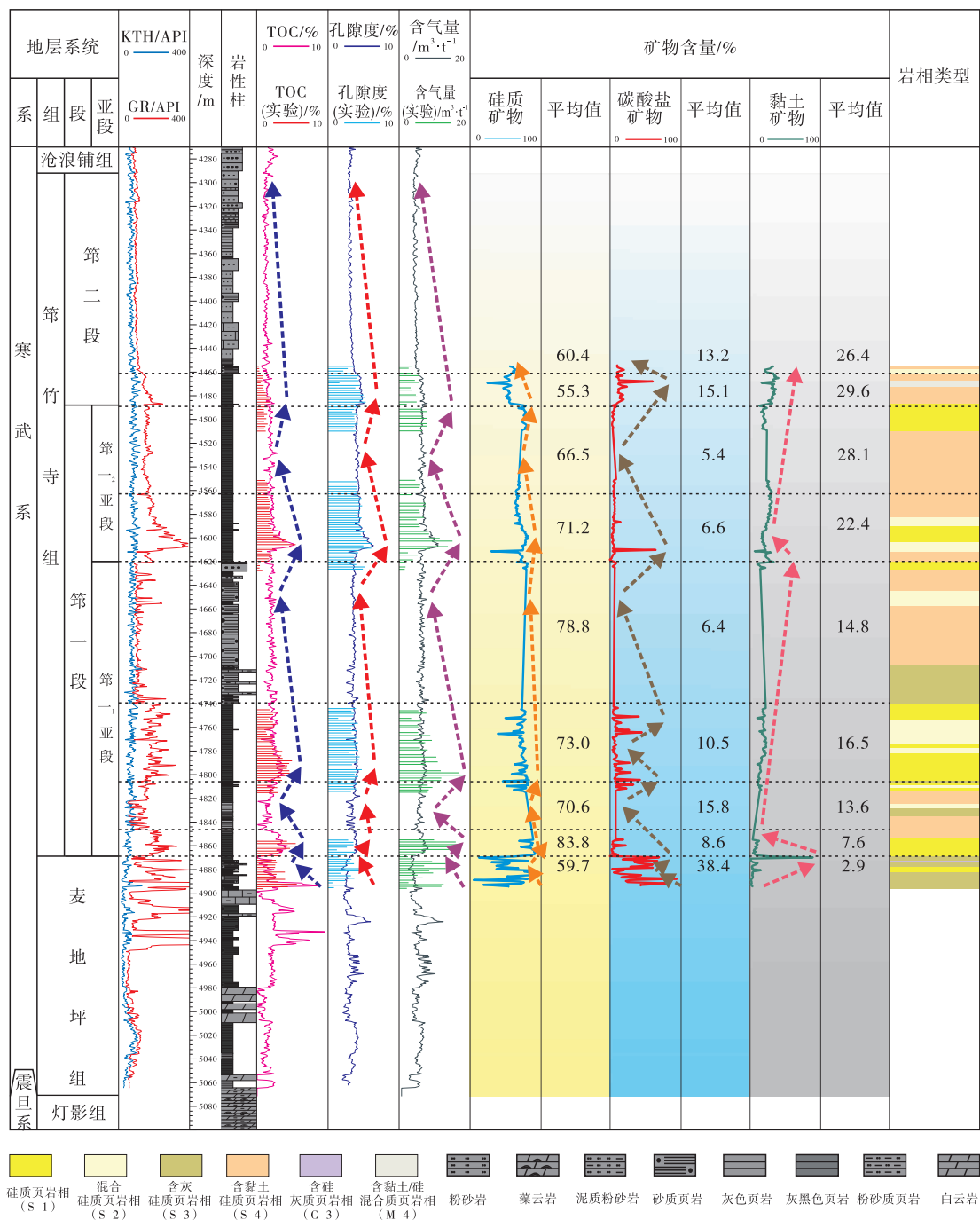


图 5 德阳—安岳裂陷槽南段 Z1 井筇竹寺组岩相综合柱状图

Fig. 5 Comprehensive lithofacies column of the Qiongzhusi Formation in Well Z1 in southern Deyang-Anyue rift trough

著的生烃优势，其总有机碳含量（TOC）平均值为 2.38%，其中 77% 的样品 TOC 超过 1% 的工业下限标准，30% 的样本 TOC 突破 3% 的高值阈值，对应的四分位距（IQR）为 1.32%~3.39%，表征该岩相在硅质主控背景下具备最优的有机质富集能力。混合硅质页岩相（S-2）TOC 均值降至 1.81%，TOC>1% 和 TOC>3% 的样本比例分别降为 68% 和

18%，IQR 降低至 0.75%~2.64%，揭示其生烃潜力较 S-1 相弱化。含黏土硅质页岩相（S-4）与含黏土/硅混合质页岩相（M-4）的 TOC 均值进一步下降至 1.46% 和 1.08%，仅 8% 和 2% 的样本 TOC 突破 3% 阈值，对应的 IQR 分别为 0.79%~1.99% 和 0.75%~1.25%，反映黏土组分的介入对有机质富集产生显著抑制作用（图 7；图 8-a）。

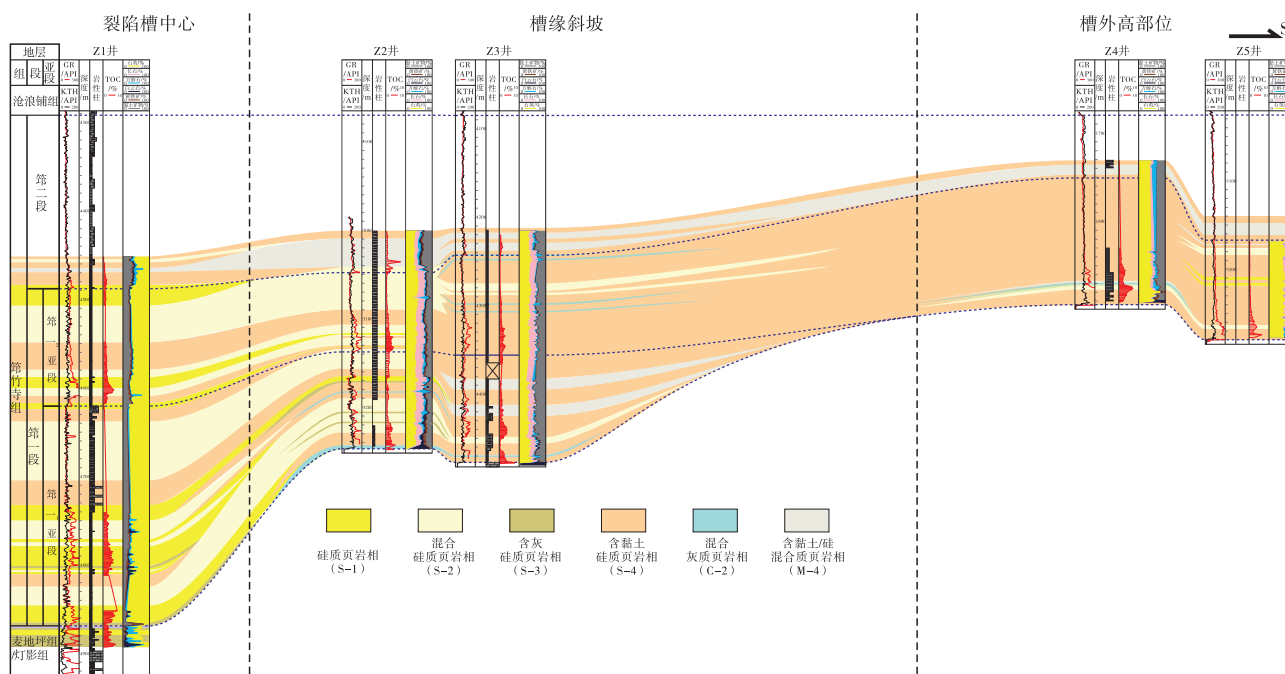


图 6 德阳—安岳裂陷槽过 Z1 井-Z2 井-Z3 井-Z4 井-Z5 井筇竹寺组岩相连井剖面 (剖面位置如图 1 所示)

Fig. 6 Lithofacies well-tie profile of the Qiongzhusi Formation across wells Z1-Z2-Z3-Z4-Z5 in Deyang-Anyue Rift Trough (see Fig. 1 for profile location)

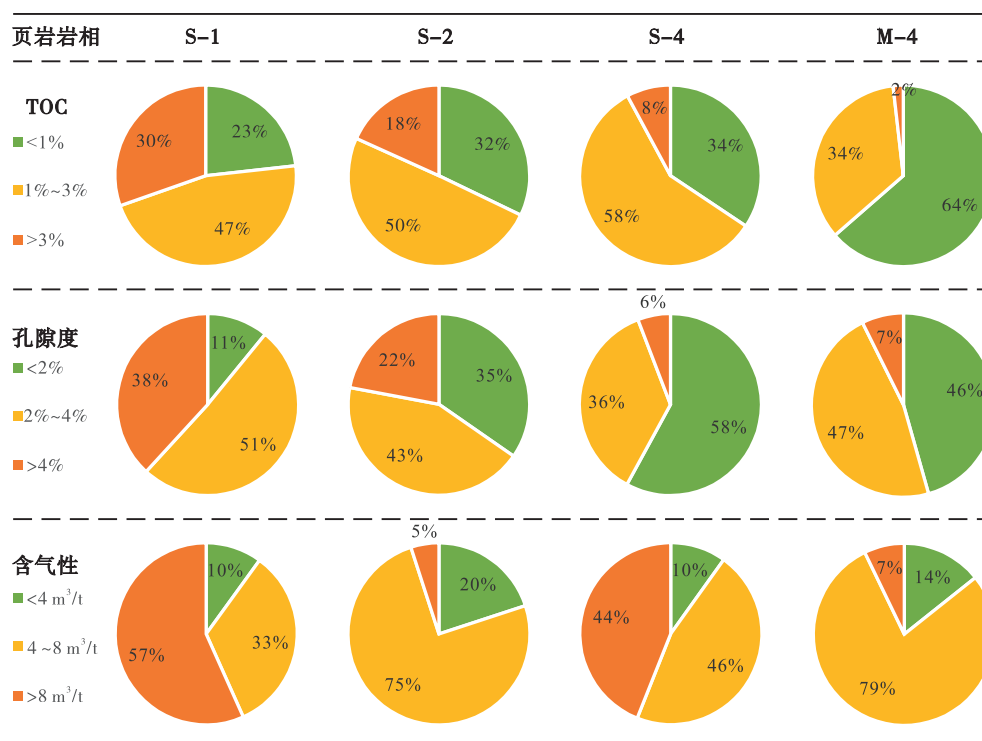


图 7 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组不同页岩岩相类型 TOC、孔隙度和含气性饼状图

Fig. 7 Pie charts of TOC, porosity, and gas-bearing property for different shale lithofacies types of the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

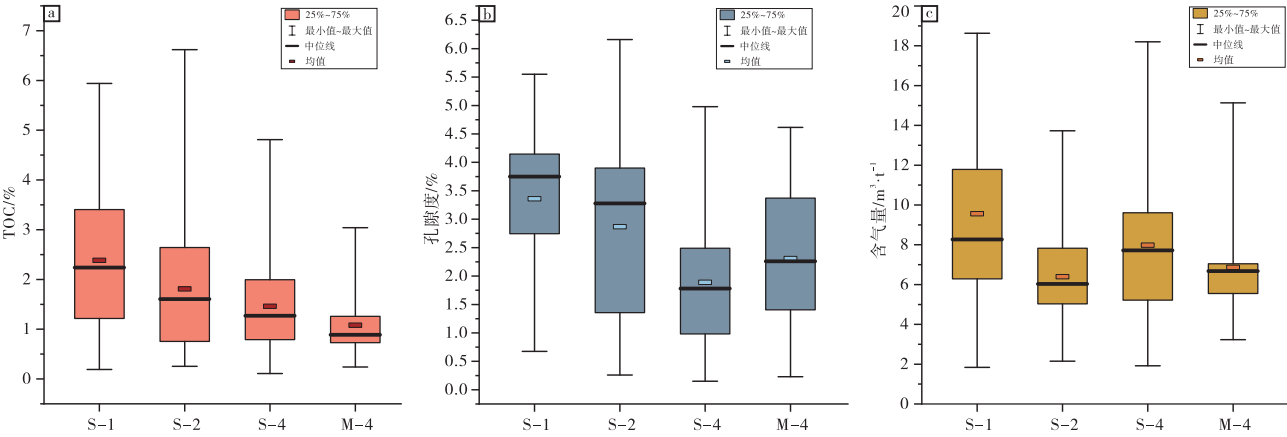


图 8 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组不同页岩岩相类型 TOC (a)、孔隙度 (b) 和含气性 (c) 箱线图
Fig. 8 Box plots of TOC (a), porosity (b), and gas-bearing property (c) for different shale lithofacies types of the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

3.2 储集层空间特征及孔隙发育规律

3.2.1 储集空间特征

对页岩样品进行扫描电镜观察后发现,川南地区筇竹寺组页岩微观储集空间分为有机孔、无机孔和微裂缝 3 大类,其中无机孔包括黏土矿物层间孔、脆性矿物粒间孔、粒内溶蚀孔和黄铁矿晶间孔,微裂缝则分为成岩收缩缝、构造微裂缝和溶蚀缝(表 1)。与五峰—龙马溪组页岩不同,筇竹寺组页岩有机孔发育程度相对较低,其储集空间类型以黏土矿物层间孔、粒内溶蚀孔、成岩收缩缝和构造微缝等无机孔和微裂缝为主。

对不同岩相储集空间分析则发现,岩相控储效应显著制约孔隙空间分布规律。高 TOC 岩相类型(例如 S-1、S-2 和 S-4)往往更发育有机质孔隙;而 M-4 由于黏土矿物含量更高则大量发育黏土矿物层间裂隙;脆性矿物含量更高的岩相(主要为 S-1 和 S-2)相较其他岩相类型更发育脆性矿物粒间孔、构造微裂缝和粒内溶蚀孔缝;黄铁矿晶间孔发育程度与黄铁矿息息相关,而通常在更还原的沉积环境下硅质矿物和黄铁矿含量占比更多(王东升等, 2022; 张立杨, 2023),因此 S-1 和 S-2 是黄铁矿晶间孔最发育的岩相类型;而成岩收缩缝作为跨岩相发育的孔隙类型,在各类岩相中均保持一定的面孔率,显示其形成机制主要受控于区域成岩演化进程(图 9)。

3.2.2 孔隙度特征

孔隙度作为页岩储集层储集能力的核心评价参

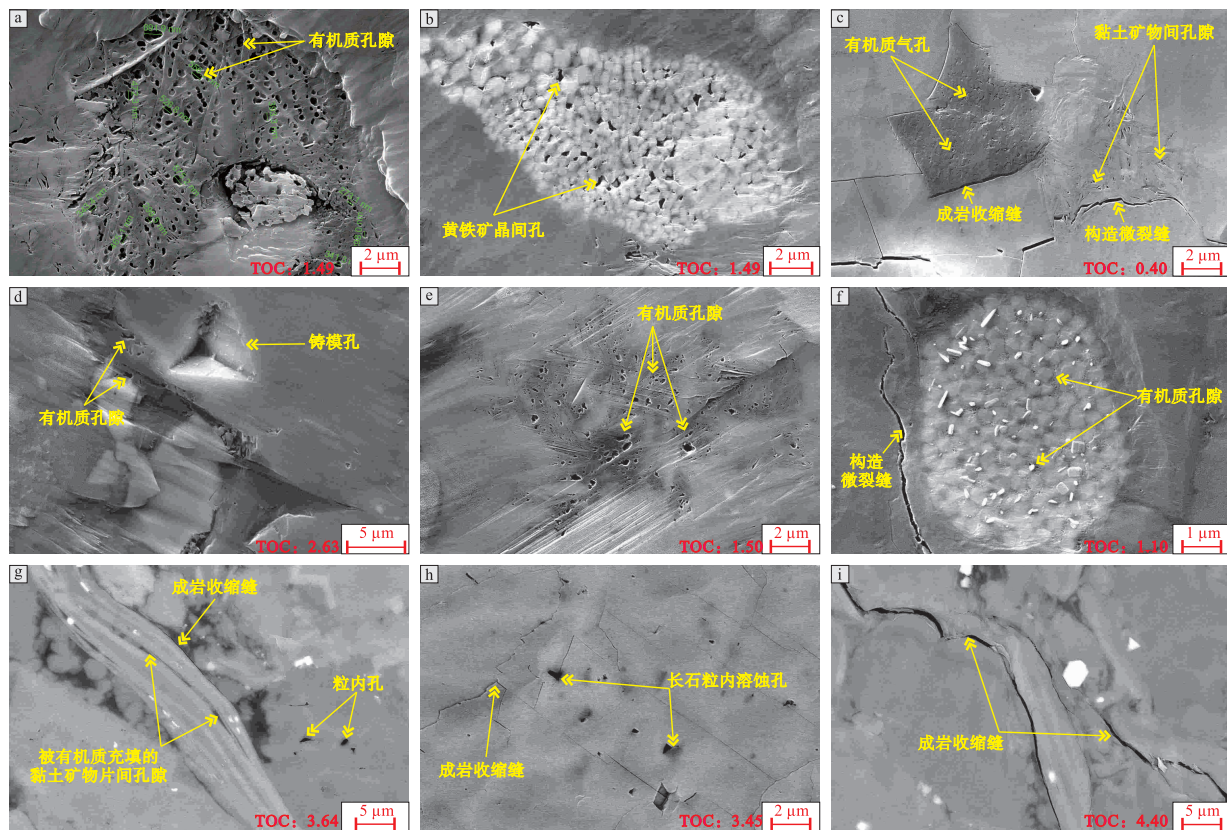
表 1 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩微观储集空间类型 (据蒲泊伶等, 2014; 有修改)

Table 1 Classification of microscopic reservoir space in the Qiongzhusi Formation shale in southern Deyang-Anyue rift trough (Modified from Pu *et al.*, 2014)

	孔隙类型	发育程度	发育岩相类型
	有机质孔	发育中等	S-1,S-2,S-4
无机孔	黏土矿物层间裂隙	发育普遍	M-4
	脆性矿物粒间孔	发育较少,连通性差	S-1,S-2
	粒内溶蚀孔	发育较多,连通性差	S-1,S-2
	黄铁矿晶间孔	发育较多,连通性差	S-1,S-2
微裂缝	构造微裂缝	发育较多,连通性好	S-1,S-2
	溶蚀缝	发育较少,连通性好	S-1,S-2
	成岩收缩缝	发育较多,连通性差	S-1,S-2, S-4,M-4

数,不仅是表征储集空间丰度的关键指标,更通过其与纳米级多尺度孔隙结构(如介孔主导的孔径分布、有机质孔与矿物基质孔的协同发育)的协同演化,深刻影响页岩储集层的渗透率与流体赋存状态(王继超等, 2023; 曹琰等, 2024)。

本次研究基于四川盆地南部筇竹寺组 5 口井的 633 块页岩样品测试数据,通过饼图与箱线图联合分析,系统揭示了硅质页岩相(S-1)、混合硅质页岩相(S-2)、含黏土硅质页岩相(S-4)及含黏土/硅混合质页岩相(M-4)的孔隙度分异特征。分析结果显示:硅质页岩相(S-1)展现出最优的储集性能,平均孔隙度为 3.36%,其中 38% 的样本孔隙度超过 4% 的高值阈值,89% 的样本达



a—Z3 井, 4229.81 m, 第二段, M-4, 有机质孔隙大量发育; b—Z3 井, 4229.81 m, 第二段, M-4, 黄铁矿晶间孔大量发育; c—Z3 井, 4240.51 m, 第二段, M-4, 发育纳米级有机质气孔和黏土矿物间孔隙, 可见成岩收缩缝和构造微裂缝; d—Z3 井, 4328.8 m, 第一₂亚段, S-2, 有机质孔隙少量发育, 可见铸模孔; e—Z3 井, 4357.92 m, 第一₁亚段, S-4, 有机质孔隙大量发育; f—Z3 井, 4424.31 m, 第一₁亚段, S-4, 有机质充填黄铁矿晶间孔, 热演化后发育有机质孔隙, 见构造微裂缝; g—Z3 井, 4437.10 m, 第一₁亚段, S-4, 发育黏土矿物间孔隙, 被有机质充填, 见成岩收缩缝和粒内溶蚀孔; h—Z3 井, 4456.53 m, 第一₁亚段, S-2, 发育较多长石粒内溶蚀孔, 可见成岩收缩缝; i—Z3 井, 4472.01 m, 第一₁亚段, S-1, 发育成岩收缩缝。a~i 均为扫描电镜照片

图 9 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩不同岩相储集空间

Fig. 9 Reservoir spaces of different shale lithofacies in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

到页岩气勘探下限标准 ($>2\%$), 箱线图统计参数显示其四分位距 (IQR) 为 $2.79\% \sim 4.14\%$, 揭示该岩相在硅质主控背景下具备良好的原生孔隙保存能力; 混合硅质页岩相 (S-2) 孔隙度次之, 平均值为 2.87% , 饼图数据显示 65% 的样本孔隙度大于 2% , 其中高值区 ($>4\%$) 占比显著低于 S-1 相, 箱线图 IQR 跨度达 $1.38\% \sim 3.90\%$, 其离散程度较 S-1 相增加 21% , 反映混合矿物组分对孔隙结构的非均质性改造作用; 含黏土硅质页岩相 (S-4) 与含黏土/硅混合质页岩相 (M-4) 表现出明显的孔隙发育抑制效应, S-4 相平均孔隙度 (1.89%) 较 S-2 相下降 34% , 仅 42% 的样本达到勘探下限; M-4 相虽平均孔隙度略高 (2.31%), 但 IQR 降低至 $1.45\% \sim 3.35\%$, 其 54% 的达标样本

中高值区 ($>4\%$) 占比低于 7% , 揭示黏土矿物对孔隙空间的充填破坏作用, 值得注意的是, M-4 相的孔隙度平均值 (2.31%) 与 S-4 相 (1.89%) 有显著差异, 暗示硅质组分占比的细微变化可显著改善黏土质页岩的储集性能 (图 7; 图 8-b)。这种孔隙度—岩相的耦合规律, 为页岩储集层品质分级评价提供了重要地质依据, 其中硅质主导的 S-1 相兼具高孔隙度与强非均质性特征, 是页岩气开发的优选层段。

3.3 含气性特征

页岩含气性是勘探评价的核心地质指标, 其空间分布特征直接决定资源丰度、保存条件优劣及压裂改造效果, 为甜点区优选和产能预测提供关键依

据(刘莉等, 2018)。

基于筇竹寺组 161 块页岩样品的含气性测试数据, 不同岩相表现出显著差异: 硅质页岩相 (S-1) 以 $9.56 \text{ m}^3/\text{t}$ 的平均含气量居于首位, 其中 57% 的样品含气量超过 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ ($\text{IQR} = 6.38 \sim 11.78 \text{ m}^3/\text{t}$), 仅 10% 样品低于 $4 \text{ m}^3/\text{t}$, 显示出优质储集层的典型特征; 含黏土硅质页岩相 (S-4) 以 $7.98 \text{ m}^3/\text{t}$ 的平均值次之, 44% 样品达到 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上 ($\text{IQR} = 5.06 \sim 7.79 \text{ m}^3/\text{t}$); 而混合硅质页岩相 (S-2) 和含黏土/硅混合质页岩相 (M-4) 的含气性显著弱化, 平均值分别为 $6.40 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $6.87 \text{ m}^3/\text{t}$, 其中超过 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的样品占比不足 10% (S-2 为 5%, M-4 为 7%), 且低值样品比例攀升至 14% ~ 20% (IQR 分别为 $5.06 \sim 7.79 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $5.70 \sim 7.02 \text{ m}^3/\text{t}$) (图 7; 图 8-c)。该数据分布特征表明硅质页岩相 (S-1) 具有最优的天然赋存能力, 可作为甜点段优选的核心指标。

3.4 优势岩相类型

基于四川盆地南部筇竹寺组的系统研究, 不同页岩岩相展现出显著的储集层特征差异。硅质页岩相 (S-1) 总有机碳含量 (TOC) 平均值达 2.38%, 77% 样品超过工业下限 ($\text{TOC} > 1\%$), 显示出高效的有机质富集能力; 其平均孔隙度为 3.36%, 38% 样本孔隙度超过 4%, 89% 达到勘探下限 (孔隙度大于 2%), 硅质矿物主导的刚性骨架有效抑制成岩压实作用, 利于原生孔隙保存, 且大量发育的微裂缝 (宽度 $1 \sim 10 \mu\text{m}$) 与有机质孔 (孔径 $5 \sim 50 \text{ nm}$) 共同构成连通的孔隙系统; 含气性方面, 硅质页岩相 (S-1) 平均含气量为 $9.56 \text{ m}^3/\text{t}$, 低值样本 (含气量小于 $4 \text{ m}^3/\text{t}$) 仅占 10%, 其高脆性矿物含量 (硅质矿物含量大于 75%) 与区域超压环境协同促进了游离气的富集。相比之下, 混合硅质页岩相 (S-2) 和含黏土硅质页岩相 (S-4) 的储集层特征显著弱化, 其 TOC 平均值分别降至 1.81% 和 1.46%, 孔隙度分别为 2.87% 和 1.89%, 含气量分别为 $6.40 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $7.98 \text{ m}^3/\text{t}$, 属次优岩相。含黏土/硅混合质页岩相 (M-4) 则因矿物组分混杂及黏土充填作用, 其 TOC 平均值、孔隙度及含气量均低于其他岩相类型, 为最差岩相。综合对比表明, 硅质页岩相 (S-1) 在生烃潜力、储集性能及含气性方面均显著优于其他岩相, 被确定为该区页岩气勘探开发的核

心优势岩相。勘探实践证实了上述结论, 例如资 201 井试气产量高达 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其开发层段即以 S-1 和 S-2 相为主; 同时, 该岩相的高脆性指数与复杂缝网压裂改造形成协同增产效应, 进一步支撑了其优势地位(袁俊亮等, 2013)。

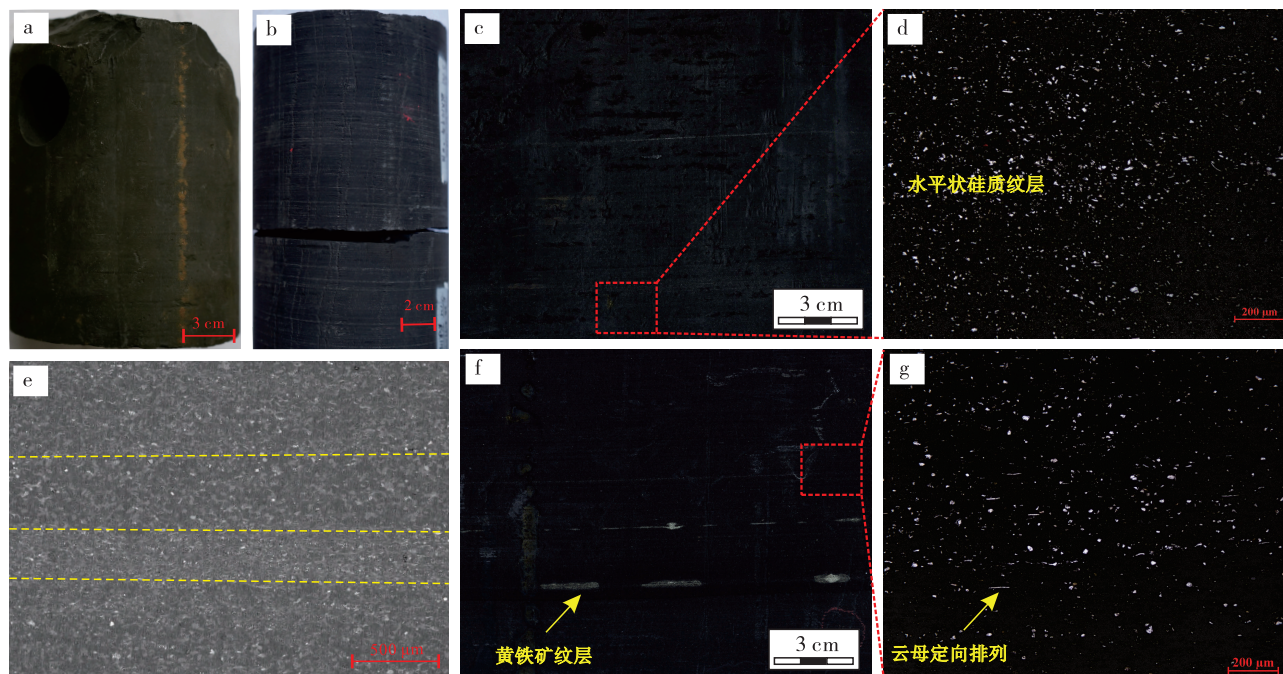
4 筇竹寺组岩相控储模式

4.1 沉积—岩相耦合机制

沉积作用是细粒碎屑物质受水动力条件控制的搬运与堆积过程, 其类型及特征直接受控于古水深、底流活动、风暴事件及重力流事件等动力学机制(董太禄, 1996; 陈安清等, 2020; 曹光耀等, 2024)。通过岩心观察、薄片鉴定及层序解析, 在研究区识别出悬浮沉积、底流沉积、风暴沉积和重力流沉积等 4 类典型沉积作用。

悬浮沉积又称为絮凝沉积, 是河流或三角洲汇入海洋后, 较粗的砂质碎屑因重力作用在近岸快速堆积, 而黏土级颗粒则以胶体形式长期悬浮于海水中, 这些细粒物质受洋流驱动可迁移至离岸数十至数百公里的远海区域, 最终在电解质作用下, 颗粒通过絮凝作用形成微团聚体并在半深海至深海环境中缓慢堆积 (Potter *et al.*, 2005; Schieber, 2016)。悬浮沉积在筇竹寺组最为常见, 岩性以灰黑色泥页岩和粉砂质泥岩为主, 沉积构造多见块状层理 (图 10-a, 10-c) 和水平状纹层 (图 10-b), 岩心可见黄铁矿发育 (图 10-f)。镜下可以观察到筇竹寺组页岩主要由硅质矿物和黏土质矿物组成, 呈现粉砂质—泥质结构, 粉砂级的石英、长石颗粒呈弱纹层状或均匀状分布在黏土质之中, 水平纹层通常表现为水平状黏土纹层与水平状硅质纹层互层发育 (图 10-d; 图 11-e), 镜下可见长轴矿物 (片状云母) 呈定向排列 (图 10-g)。整体呈现出低水体能量、细粒物质主导、分选良好的深水悬浮沉积特征。

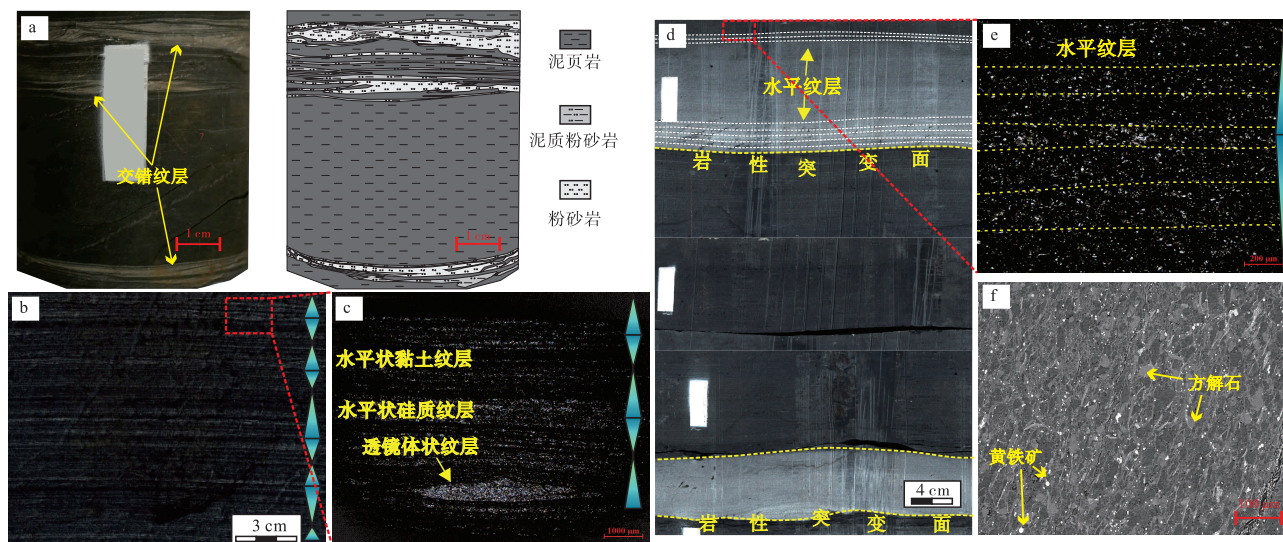
底流沉积受温盐循环、风力或潮汐动力驱动, 在底流作用强烈时期, 较强的水动力条件会对下伏泥页岩产生冲刷作用, 形成侵蚀面和滞积层, 而在底流作用较弱时期, 水流能量波动导致多期泥质与粉砂质薄互层沉积, 呈现韵律性层理特征 (Faugères and Stow, 1993; MacQuaker *et al.*, 2010; Bohacs *et al.*, 2014)。研究区筇竹寺组的底流沉积



a—Z3 井, 4432.79~4432.97 m, 灰黑色页岩, 块状层理; b—Z3 井, 4298.90~4299.10 m, 灰黑色页岩, 见水平纹层; c—Z3 井, 4461.43 m, 灰黑色页岩, 隐约可见水平纹层; d—c 图局部偏光显微镜放大, 可见水平状硅质纹层; e—Z3 井, 4240.51 m, 扫描电镜, 可见明显水平纹层发育; f—Z3 井, 4433 m, 灰黑色页岩, 块状构造, 发育黄铁矿; g—f 图局部偏光显微镜放大, 可见云母微定向排列

图 10 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组悬浮沉积岩心及镜下特征

Fig. 10 Core and microscopic characteristics of suspended sediments in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough



a—Z3 井, 4405.22~4405.40 m, 灰黑色页岩, 发育交错纹层; b—Z3 井, 4239.39 m, 灰黑色页岩, 可见水平状纹层, 呈现双粒序递变层理; c—b 图局部偏光显微镜放大, 见透镜状纹层; d—Z3 井, 4420.85~4423.06 m, 灰黑色—灰色页岩, 灰白色粉砂岩与灰色泥质粉砂岩呈互层状展布, 可见岩性突变面; e—d 图局部偏光显微镜放大, 水平纹层发育; f—Z3 井, 4228.33 m, 扫描电镜, 可见方解石颗粒和黄铁矿, 矿物见定向排列

图 11 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组底流沉积岩心及镜下特征

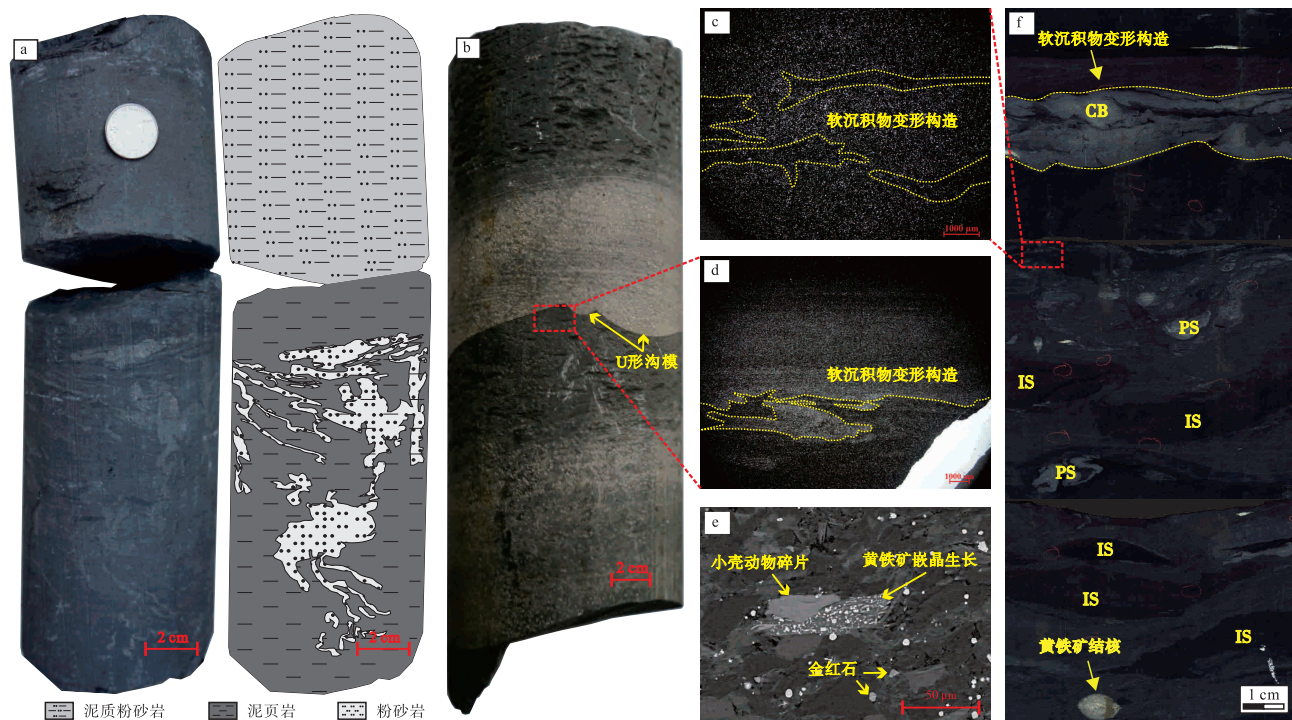
Fig. 11 Core and microscopic characteristics of bottom-current deposits in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

作用同样广泛发育,岩性包括泥页岩、泥质粉砂岩和粉砂岩,水平纹层与交错纹层是该类沉积的典型构造(图 11-a, 11-b, 11-d),部分岩心可见明显的周期性的水平纹层变化,反映等深流的周期性侵蚀—沉积旋回。偏光显微镜观察显示,硅质纹层与黏土质纹层呈双向递变互层,构成典型韵律结构(图 11-c, 11-e)。在扫描电镜下,则可见底流作用导致矿物呈现一定的定向性分布(图 11-f)。

风暴沉积是由热带风暴或强台风驱动的偶发性高能事件(Duke *et al.*, 1991; Xiong *et al.*, 2018),风暴沉积呈现典型事件性二元结构,底部突变接触面与软沉积物变形构造揭示风暴浪对正常浪基面下细粒沉积物的改造作用。研究区风暴沉积岩可见底部冲刷面构造呈不规则的波状起伏,局部可见小型 U 型沟模,且冲刷面上下岩性存在明显差异(图 12-b),揭示了风暴作用前后水体能量的剧烈变化;部分岩心可见包卷层理、球枕构造和侵入构造等软沉积物变形构造(图 12-f),反映未固结沉积物在风暴剪切作用下的塑性响应;偶见生物潜穴

(图 11-a),表明研究区风暴作用强度较低。薄片观察可见大量软沉积物变形构造(图 12-c, 12-d),扫描电镜下则可见小壳动物碎片和金红石等近陆源矿物,佐证了风暴流对浅水物质的撕裂搬运(图 12-e)。

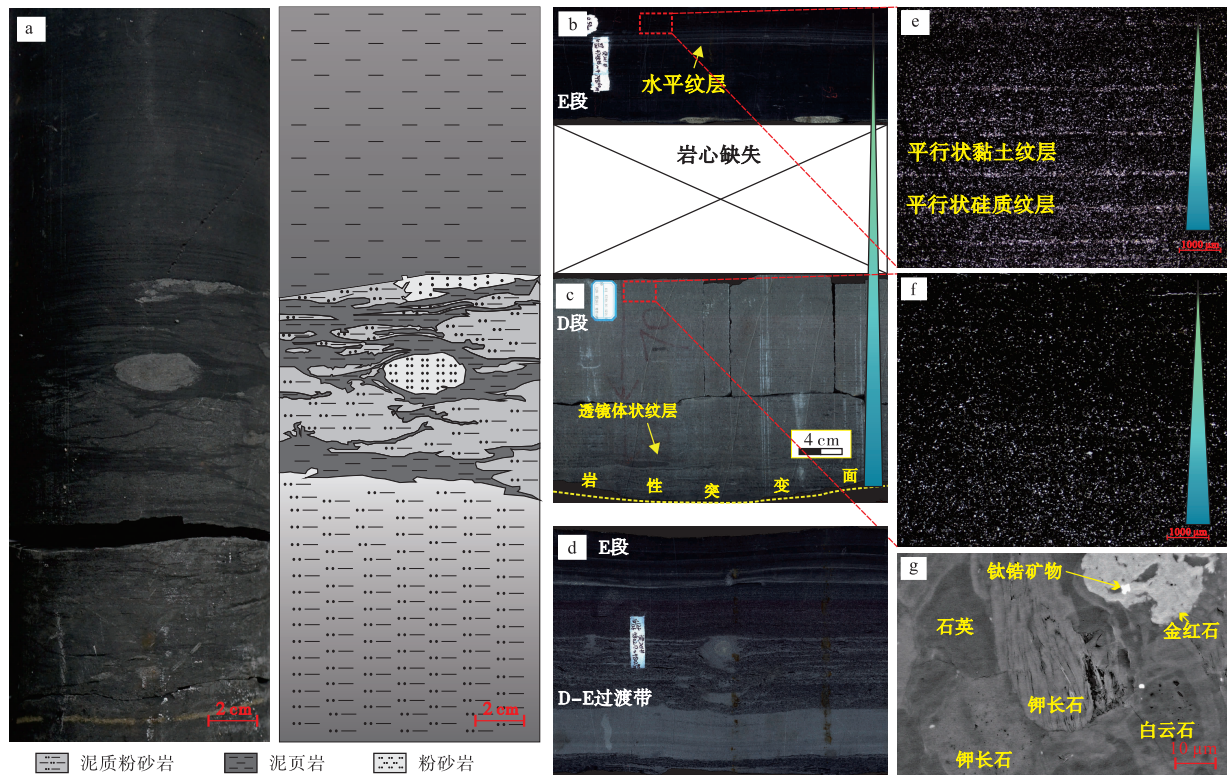
沉积物重力流是由重力主导运移、以砂泥混杂为物质基础的高密度流体系统,该沉积作用以鲍马序列为标志,正粒序递变层与侵蚀充填构造揭示陆源碎屑通过浊流机制向深水区输运的过程(Mulder and Syvitski, 1995; Alexander and Mulder, 2002; Pattison, 2005)。研究区重力流沉积通常缺失鲍马序列的底部,仅可见 D-E 段(图 13-b 至 13-d),这与德阳—安岳裂陷槽位于远源区有关,岩心可见浊流末梢的黑色泥岩碎屑与灰色砂岩无序混合(图 13-a)和粉砂—泥质薄互层的韵律沉积(图 13-c)。薄片观察可见明显的正粒序特征,部分薄片存在黏土纹层和硅质纹层互层(图 14-e, 14-f),扫描电镜下则可见金红石等重矿物,体现重力流的远距离搬运特征(图 14-g)。



a—Z2 井, 3173.32~3173.69 m, 底部为灰黑色泥页岩, 顶部为深灰色泥质粉砂岩, 可见岩性突变和大量生物扰动构造; b—Z3 井, 4445.23~4445.51 m, 岩心见不规则截切面, 局部可见小型 U 型沟模; c—f 图局部偏光显微镜放大, 见软沉积物变形构造; d—b 图局部偏光显微镜放大, 见软沉积物变形构造; e—Z3 井, 4404.51 m, 扫描电镜观察, 可见小壳动物碎片和微小金红石等近岸沉积物; f—Z1 井, 4805.1~4804.83 m, 岩心和薄片均可见软沉积物变形构造, 镜下可见长条状黄铁矿和钙质团块。PS: 球枕构造, IS: 侵入构造, CB: 包卷层理

图 12 德阳—安岳裂陷槽南段第竹寺组风暴沉积岩心及镜下特征

Fig. 12 Core and microscopic characteristics of tempestites in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough



a—Z3 井, 4440.79~4441.29 m, 顶部为灰黑色泥页岩, 底部为深灰色泥质粉砂岩, 中部见泥岩碎屑混杂; b—Z3 井, 4748.46~4748.60 m, 灰黑色页岩, 水平纹层发育; c—Z3 井, 4749.16~4749.40 m, 深灰色粉砂岩, 见透镜状纹层; d—Z3 井, 4802.17~4802.90 m, 发育灰色砂岩与黑色泥岩频繁互层; e—b 图局部偏光显微镜放大, 见平行纹层发育, 正粒序; f—c 图局部偏光显微镜放大, 正粒序; g—Z3 井, 4456.53 m, 扫描电镜, 见重矿物发育

图 13 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组重力流沉积岩心及镜下特征

Fig. 13 Core and microscopic characteristics of gravity flow deposits in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

基于上述研究结果,发现筇竹寺组沉积作用及强度差异与岩相类型息息相关。在垂向层序上,第一₁亚段底部和第一₂亚段底部的悬浮沉积主导区主要发育硅质页岩相(S-1)和混合硅质页岩相(S-2)组合(图 11),其平均硅质矿物含量大于 75%,形成于古裂陷槽内深水缺氧滞留环境。向上至第一₁亚段中上部和第一₂亚段顶部,底流活动增强驱动周期性水动力振荡(Stow, 2002),在低流速期(<5 cm/s)陆源黏土通过黏土絮凝作用(Kranck, 1984)沉降富集,导致硅质矿物稀释并发育含黏土硅质页岩相(S-4)夹混合硅质页岩相(S-2)组合(图 11),岩心可见毫米级泥—硅韵律层及透镜状层理(Shanmugam, 2000),符合等深流黏土选择性滞留机制。而第二段则受到重力流与风暴沉积复合作用影响,黏土矿物和碳酸盐矿物含量增加,岩相演化为含黏土硅质页岩相(S-4)和含黏土/硅混合质页岩相(M-4)组合(图 14)。

这是由于重力流和风暴底流均具有高能搬运特征,可增强黏土矿物的再悬浮能力,导致其在沉积区持续富集(Leonowicz, 2016),此外,风暴作用通过底流侵蚀浅水台地,将生物碎屑和早期成岩的碳酸盐颗粒搬运至深水区(Koralay and Koralay, 2022),形成钙质—硅质互层结构,导致了沉积区碳酸盐矿物含量的增加。

4.2 古地貌约束下的沉积—成岩协同控储模式

综合研究表明,古地貌格局是调控沉积环境、岩相分异及成岩演化的基础前提,其通过“裂陷槽中心—槽缘斜坡—槽外高部位”的分区特征改变古水深、水动力强度及物质供给,再结合沉积作用主导的岩相分异对成岩路径的约束,共同控制页岩储集层发育优劣。裂陷槽中心的深水静水环境通过悬浮沉积形成以硅质生物富集为特征的 S-1 与 S-2 优势岩相(图 15),其稳定的缺氧条件优化有机

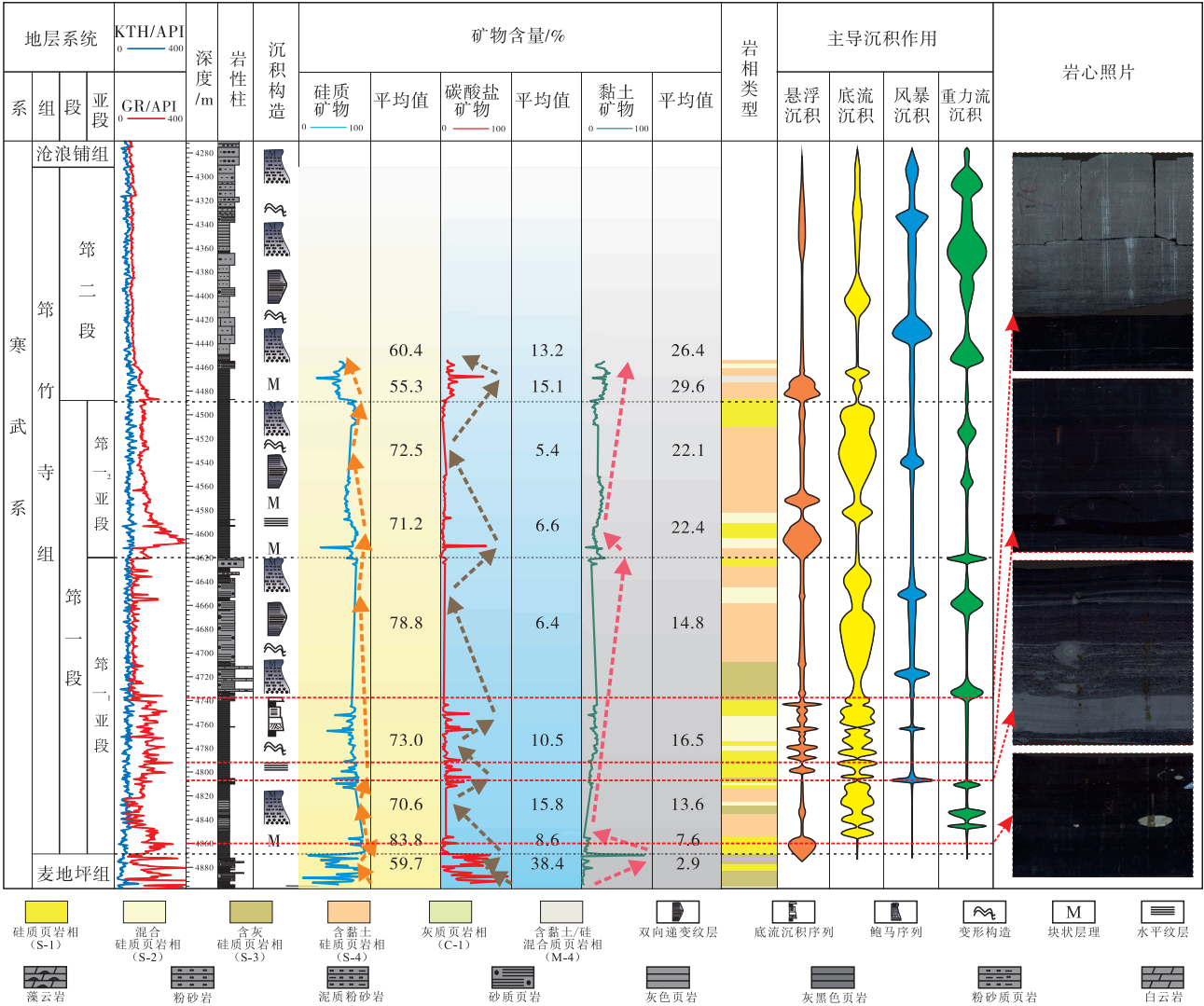


图 14 德阳—安岳裂陷槽南段 Z1 井筇竹寺组页岩岩相及沉积作用综合柱状图

Fig. 14 Comprehensive column of shale lithofacies and sedimentary processes for the Qiongzhusi Formation of Well Z1 in southern Deyang-Anyue rift trough

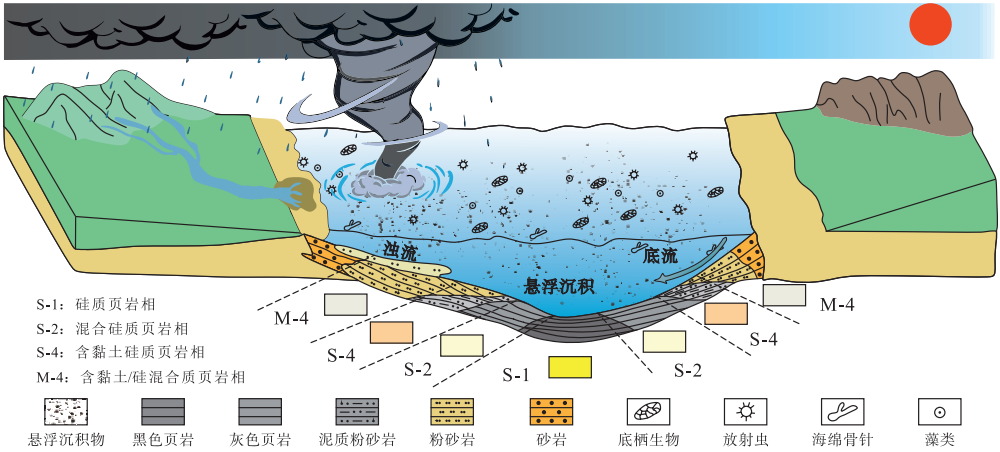
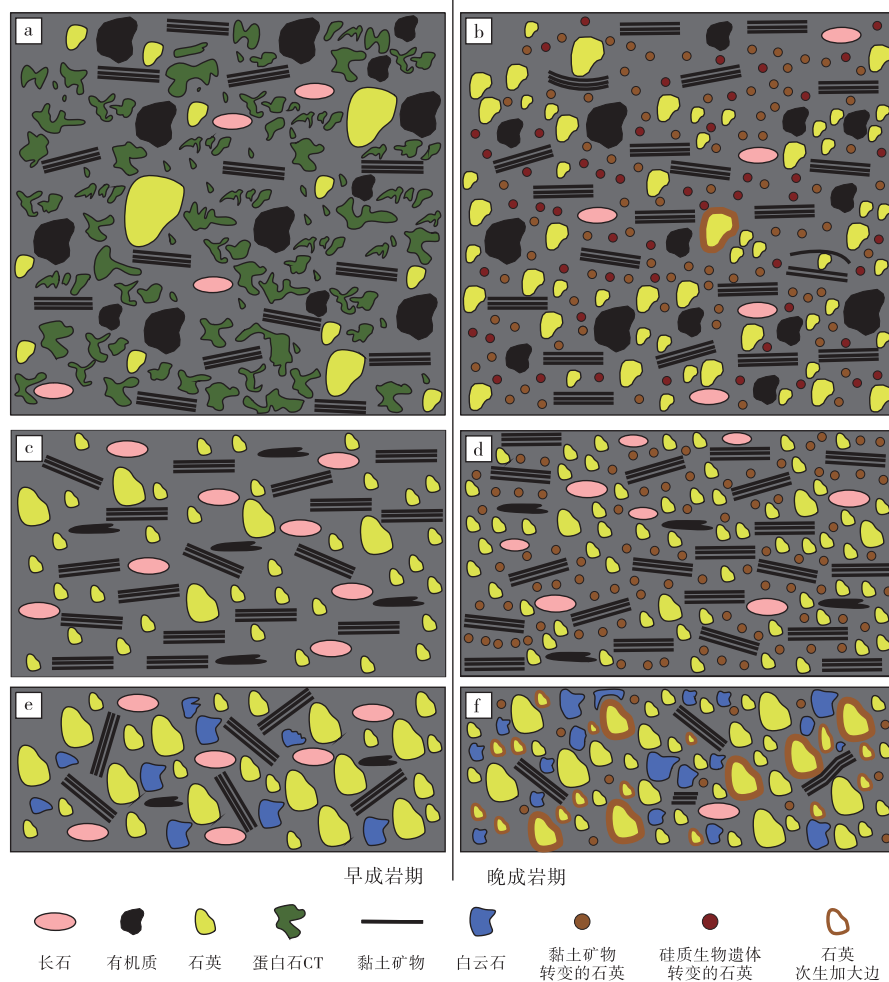


图 15 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组页岩沉积控相模式

Fig. 15 Sedimentation-controlled facies model of shale in the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

质保存；更关键的是，富硅矿物在早成岩阶段经历生物硅溶解—再沉淀转化为蛋白石-CT (Xiong *et al.*, 2018)，并在后期形成由微石英聚集体与硅质纳米球构成的刚性抗压实骨架 (图 4-e; Gao *et al.*, 2024; 刘崇焯等, 2025)，显著提升了孔隙保存能力 (图 16-a, 16-b)。槽缘斜坡带为底流活动频繁的过渡带，由于底流活动的牵引效应引入陆源碎屑干扰，破坏原始缺氧保存环境，形成 S-2 和 S-4 组合的次优储集层类型 (图 15)，并且由于黏土矿物的增多，蒙脱石在埋藏过程中转化为伊利石 (S-I 反应) 释放大量硅质，诱发了石英增生及塑性

变形 (Milliken, 2013) (图 16-c, 16-d)，导致孔隙结构严重衰变。槽外高部位易受风暴—重力流高能扰动，搬运了大量的陆源黏土和碳酸盐碎屑，形成 S-4 与 M-4 相，这导致除高能环境抑制有机质富集和 S-I 反应破坏储集空间外，由于其将生物碎屑和早期成岩的碳酸盐颗粒搬运至深水区，这导致了钙质压溶—再胶结作用，更造成残余孔隙进一步丧失 (图 4-a; 图 16-e, 16-f; Loucks *et al.*, 2012)。综上，研究区储集层发育遵循“古地貌定沉积、沉积定岩相、岩相定成岩、成岩定储集层”的规律，裂陷槽中心的深水低能与硅质抗压实成岩是优质储



a—S-1 和 S-2 岩相组合，埋藏早期来自硅质生物体的硅质软泥（蛋白石-A）由于温度升高和黏土矿物的重定向排列，转化为蛋白石-CT；b—S-1 和 S-2 岩相组合，埋藏晚期，由于生成的蛋白石-CT，以及由伊利石化作用产生的二氧化硅，因高温而溶解，此时当孔隙水中二氧化硅浓度超过石英饱和浓度时，会形成小的石英晶体或在碎屑石英周围形成自生石英增生边；c—S-2 和 S-4 岩相组合，埋藏早期黏土矿物同样被重定向排列；d—S-2 和 S-4 岩相组合，晚埋藏阶段，当孔隙水中二氧化硅浓度超过石英饱和浓度时，同样形成微晶石英；e—S-4 与 M-4 岩相组合，早埋藏阶段可见白云石胶结物在富粉砂质纹层中形成；f—S-4 与 M-4 岩相组合，晚埋藏阶段，除微晶石英以外，还发育被白云石胶结物包裹的石英增生边

图 16 德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组不同岩相类型成岩作用控储模式

Fig. 16 Diagenesis-controlled reservoir models for different lithofacies types of the Qiongzhusi Formation in southern Deyang-Anyue rift trough

集层形成的关键,而槽缘至槽外的水动力增强与破坏性成岩则导致储集层品质逐步衰减,为深层页岩气甜点区优选提供空间维度地质依据。

5 结论

1) 四川盆地德阳—安岳裂陷槽南段筇竹寺组发育含黏土硅质页岩相(S-4)、混合硅质页岩相(S-2)、硅质页岩相(S-1)及含黏土/硅混合质页岩相(M-4)4类岩相;岩相纵向呈“硅质递减—黏土递增”序列,横向分异受德阳—安岳裂陷槽古地貌控制,槽内以硅质岩相(S-1、S-2)为主,槽外过渡为黏土富集岩相(S-4、M-4)。

2) 硅质页岩相(S-1)因高硅质含量(>75%)形成刚性骨架,抑制成岩压实并保护原生孔隙,其TOC(均值2.38%)、孔隙度(均值3.36%)及含气量(均值9.56 m³/t)均显著优于其他岩相,是优质储集层核心发育相。

3) 筇竹寺组沉积作用类型(悬浮、底流、风暴、重力流)通过岩相分异与差异成岩作用控制储集层发育。悬浮沉积下的S-1和S-2相组合形成抗压实硅质骨架,孔隙保存最优;底流作用控制的S-2和S-4相组合因碎屑干扰与黏土塑性变形,孔隙结构严重衰变;风暴沉积和重力流沉积主导的S-4与M-4相因抑制富集及压溶胶结,孔隙严重丧失。研究证实“沉积控相—相控成岩—成岩控储”规律,为深水页岩气甜点预测提供了沉积能量与成岩强度评价框架。

参考文献 (References)

- 曹光耀,刘宇,侯明才,陈安清,徐胜林. 2024. 川南威远地区早寒武世氮循环及古环境意义. 沉积学报,42(6): 2031–2041. [Cao G Y, Liu Y, Hou M C, Chen A Q, Xu S L. 2024. Nitrogen cycle and paleoenvironmental implications in the Weiyuan area, southern Sichuan during the early Cambrian. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(6): 2031–2041]
- 曹琰,金之钧,朱如凯,刘扣其,梁新平. 2024. 富有机质泥页岩孔隙结构研究进展及展望. 沉积与特提斯地质,44(2): 231–252. [Cao Y, Jin Z J, Zhu R K, Liu K Q, Liang X P. 2024. Progress and prospects in the research on pore structures of organic-rich mud shales. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(2): 231–252]
- 陈安清,侯明才,林良彪,邢凤存,徐胜林,钟怡江,杨帅,熊晨,张玺华,文龙,陈洪德. 2020. 上扬子地区寒武纪岩相古地理: 对中国小陆块海相盆地演化特点及其控藏效应的启示. 沉积与特提斯地质,40(3): 38–47. [Chen A Q, Hou M C, Lin L B, Xing F C, Xu S L, Zhong Y J, Yang S, Xiong C, Zhang X H, Wen L, Chen H D.

2020. Cambrian lithofacies paleogeographic characteristics of the Upper Yangtze Block: implications for the marine basin evolution and hydrocarbon accumulation of small-scale tectonic blocks in China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(3): 38–47]
- 陈吉,肖贤明. 2013. 南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析. 煤炭学报,38(5): 822–826. [Chen J, Xiao X M. 2013. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic organic-rich shales in China South area. *Journal of China Coal Society*, 38(5): 822–826]
- 陈孝红,危凯,张保民,李培军,李海,刘安,罗胜元. 2018. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式. 中国地质,45(2): 207–226. [Chen X H, Wei K, Zhang B M, Li P J, Li H, Liu A, Luo S Y. 2018. Main geological factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as well as its enrichment patterns. *Geology in China*, 45(2): 207–226]
- 邓宾,李泽奇,张航,鲁鹏达,田腾振,孙玮,姜华,吴娟,张旋,张洁伟,刘树根. 2022. 四川盆地桐湾期不整合面的侵蚀成因地质新证据. 天然气工业,42(11): 13–24. [Deng B, Li Z Q, Zhang H, Lu P D, Tian T Z, Sun W, Jiang H, Wu J, Zhang X, Zhang J W, Liu S G. 2022. New geological evidence for erosive genesis of Tongwan unconformities in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 42(11): 13–24]
- 董太禄. 1996. 渤海现代沉积作用与模式的研究. 海洋地质与第四纪地质,16(4): 43–53. [Dong T L. 1996. Study on modern sedimentation and model in Bohai Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(4): 43–53]
- 范海经,邓虎成,伏美燕,刘四兵,余翰泽,李依林. 2021. 四川盆地下寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应. 沉积学报,39(4): 1004–1019. [Fan H J, Deng H C, Fu M Y, Liu S B, Yu H Z, Li Y L. 2021. Sedimentary characteristics of the lower Cambrian qiongzhusi formation in the Sichuan basin and its response to construction. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 1004–1019]
- 郭彤楼,熊亮,何建华,魏力民,闫亮. 2024. 川南下寒武统筇竹寺组新类型页岩气勘探发现及启示. 西南石油大学学报(自然科学版),46(6): 1–14. [Guo T L, Xiong L, He J H, Wei L M, Yan L. 2024. New type shale gas exploration discovery and enlightenment of the lower Cambrian Qiongzhusi formation in the southern Sichuan Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 46(6): 1–14]
- 郭正吾,邓康龄,韩永辉,刘应楷,殷建棠,王庆国,梁恩宇,李国建,陈昭国,刘宗正,吴春生,赵泽江. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社. [Guo Z W, Deng K L, Han Y H, Liu Y K, Yin J T, Wang Q G, Liang E Y, Li G J, Chen Z G, Liu Z Z, Wu C S, Zhao Z J. 1996. The Formation and Development of Sichuan basin. Beijing: Geological Publishing House]
- 何晓,梁峰,李海,郑马嘉,赵群,刘勇,刘文平. 2024. 四川盆地寒武统筇竹寺组海相页岩气高产井突破与富集模式. 中国石油勘探,29(1): 142–155. [He X, Liang F, Li H, Zheng M J, Zhao Q, Liu Y, Liu W P. 2024. Breakthrough and enrichment mode of marine shale gas in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in high-yield wells in Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(1): 142–155]
- 贾智彬,侯杰杰,孙德强,姜玉涵,赵喆,张自鸣,洪梅,畅哲,董立成.

2018. 热水沉积区黑色页岩稀土元素特征及其地质意义: 以贵州中部和东部地区下寒武统牛蹄塘组页岩为例. 天然气工业, 38(5): 44-51. [Jia Z B, Hou D J, Sun D Q, Jiang Y H, Zhao Z, Zhang Z M, Hong M, Chang Z, Dong L C. 2018. Characteristics and geological implications of rare earth elements in black shale in hydrothermal sedimentation areas: a case study from the Lower Cambrian Niutitang Fm shale in central and eastern Guizhou. *Natural Gas Industry*, 38(5): 44-51]
- 刘莉, 包汉勇, 李凯, 李根, 曾勇, 郑爱维, 熊红丽. 2018. 页岩储层含气性评价及影响因素分析: 以涪陵页岩气田为例. 石油实验地质, 40(1): 58-63, 70. [Liu L, Bao H Y, Li K, Li G, Zeng Y, Zheng A W, Xiong H L. 2018. Evaluation of gas content in shale reservoirs and analysis of influencing factors in Fuling shale gas field. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(1): 58-63, 70]
- 刘树根, 邓宾, 李智武, 孙玮. 2011. 盆地结构与油气分布: 以四川盆地为例. 岩石学报, 27(3): 621-635. [Liu S G, Deng B, Li Z W, Sun W. 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: a case study from Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 621-635]
- 刘树根, 王一刚, 孙玮, 钟勇, 洪海涛, 邓宾, 夏茂龙, 宋金民, 文应初, 吴娟. 2016. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(1): 1-23. [Liu S G, Wang Y G, Sun W, Zhong Y, Hong H T, Deng B, Xia M L, Song J M, Wen Y C, Wu J. 2016. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(1): 1-23]
- 刘荣焯, 陈雷, 白森, 张金武, 乔崇, 程辉, 谭秀成, 秦何星. 2025. 沉积环境对页岩储层弹性特征的影响: 以川南自贡地区龙马溪组页岩为例. 沉积学报, 43(4): 1361-1370. [Liu T X, Chen L, Bai S, Zhang J W, Qiao C, Cheng H, Tan X C, Qin H X. 2025. Influence of Sedimentary Environment on the Elastic Characteristics of Shale Reservoirs: a case study of the Longmaxi Formation in the Zigong area, southern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(4): 1361-1370]
- 刘雨迪, 梁超, 操应长, 吴靖, 韩豫, 谢浩然, 罗子良, 马晓月. 2024. 川南五峰组—龙马溪组页岩岩相特征及沉积作用. 沉积学报, 42(5): 1832-1848. [Liu Y D, Liang C, Cao Y C, Wu J, Han Y, Xie H R, Luo Z L, Ma X Y. 2024. Shale facies characteristics and sedimentation of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(5): 1832-1848]
- 蒲泊伶, 董大忠, 吴松涛, 耳闯, 黄金亮, 王玉满. 2014. 川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(4): 19-25. [Pu B L, Dong D Z, Wu S T, Er C, Huang J L, Wang Y M. 2014. Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 38(4): 19-25]
- 祁灵, 施振生, 王红岩, 周天琪, 李贵中, 赵萌, 程辉, 程自豪. 2025. 黑色页岩物源研究方法、存在问题及未来展望: 以川南地区五峰组—龙马溪组为例. 石油与天然气地质, 46(1): 62-77. [Qi L, Shi Z S, Wang H Y, Zhou T Q, Li G Z, Zhao M, Cheng H, Cheng Z H. 2025. Methodology for research on the provenance of black shales and its problems and prospects: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formations, southern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(1): 62-77]
- 钱逸. 1999. 中国小壳化石分类学与生物地层学. 北京: 科学出版社. [Qian Y. 1999. *Taxonomy and Biostratigraphy of Small Shelly Fossils in China*. Beijing: Science Press]
- 王东升, 张金川, 李振, 全忠正, 牛嘉亮, 丁望, 张聪. 2022. 草莓状黄铁矿的形成机制探讨及其对古氧化—还原环境的反演. 中国地质, 49(1): 36-50. [Wang D S, Zhang J C, Li Z, Tong Z Z, Niu J L, Ding W, Zhang C. 2022. Formation mechanism of framboidal pyrite and its theory inversion of paleo-redox conditions. *Geology in China*, 49(1): 36-50]
- 王继超, 崔鹏兴, 刘双双, 石彬, 党海龙, 黄兴. 2023. 页岩油储层微观孔隙结构特征及孔隙流体划分. 油气地质与采收率, 30(4): 46-54. [Wang J C, Cui P X, Liu S S, Shi B, Dang H L, Huang X. 2023. Microscopic pore structure characteristics and pore fluid division of shale oil reservoirs. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 30(4): 46-54]
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 曾富英, 武赛军. 2015. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征. 天然气工业, 35(1): 24-35. [Wei G Q, Yang W, Du J H, Xu C C, Zou C N, Xie W R, Zeng F Y, Wu S J. 2015. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 24-35]
- 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 刘若冰, 刘晓峰. 2016. 四川盆地涪陵气田五峰组—龙马溪组页岩优势岩相. 石油勘探与开发, 43(2): 189-197. [Wu L Y, Hu D F, Lu Y C, Liu R B, Liu X F. 2016. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 189-197]
- 杨雨然, 石学文, 李彦佑, 何一凡, 朱逸青, 张入化, 徐亮, 杨雪, 杨一茗, 张亦弛. 2024. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽筇竹寺组古地貌. 沉积模式与勘探方向. 中国石油勘探, 29(6): 67-81. [Yang Y R, Shi X W, Li Y Y, He Y F, Zhu Y Q, Zhang R H, Xu L, Yang X, Yang Y M, Zhang Y C. 2024. Paleogeomorphology, sedimentary pattern and exploration orientation of Qiongzhusi Formation in De-yang-Anyue Rift Trough, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(6): 67-81]
- 雍锐, 石学文, 罗超, 钟可塑, 吴伟, 郑马嘉, 杨雨然, 李彦佑, 徐亮, 朱逸青, 何一凡, 陈丽清, 于魏铭. 2024. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气“槽—隆”富集规律及勘探前景. 石油勘探与开发, 51(6): 1211-1226. [Yong R, Shi X W, Luo C, Zhong K S, Wu W, Zheng M J, Yang Y R, Li Y Y, Xu L, Zhu Y Q, He Y F, Chen L Q, Yu W M. 2024. Aulacogen-uplift enrichment pattern and exploration prospect of Cambrian Qiongzhusi Formation shale gas in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1211-1226]
- 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 李大华, 闫伟, 陈朝刚, 程礼军, 陈子剑. 2013. 页岩气储层可压裂性评价技术. 石油学报, 34(3): 523-527. [Yuan J L, Deng J G, Zhang D Y, Li D H, Yan W, Chen C G, Cheng L J, Chen Z J. 2013. Fracability evaluation of shale gas reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 34(3): 523-527]
- 张本健, 和源, 周刚, 严威, 汪华, 曾云贤, 钟原, 李堃宇, 王文之, 黄茂轩. 2023. 德阳—安岳裂陷北段沉积充填过程和充填模式. 天然气勘探与开发, 46(1): 1-10. [Zhang B J, He Y, Zhou G, Yan

- W, Wang H, Zeng Y X, Zhong Y, Li K Y, Wang W Z, Huang M X. 2023. Sedimentary filling process and model of northern Deyang-Anyue rift, Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(1): 1-10]
- 张立杨. 2023. 硅质岩的成因与沉积环境及其在重建洋板块地层中的应用. *地球科学进展*, 38(5): 453-469. [Zhang L Y. 2023. Origin and depositional environment of cherts and their application in reconstructing ocean plate stratigraphy. *Advances in Earth Science*, 38(5): 453-469]
- 赵建华, 金之钧, 金振奎, 温馨, 耿一凯, 颜彩娜, 聂海宽. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境. *石油学报*, 37(5): 572-586. [Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Wen X, Geng Y K, Yan C N, Nie H K. 2016. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 572-586]
- 赵建华, 金之钧, 林畅松, 刘光祥, 刘可禹, 刘忠宝, 张钰莹. 2019. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境. *石油与天然气地质*, 40(4): 701-715. [Zhao J H, Jin Z J, Lin C S, Liu G X, Liu K Y, Liu Z B, Zhang Y Y. 2019. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 701-715]
- Alexander J, Mulder T. 2002. Experimental quasi-steady density currents. *Marine Geology*, 186: 195-210.
- Bohacs K M, Lazar O R, Demko T M. 2014. Parasequence types in shelfal mudstone strata: quantitative observations of lithofacies and stacking patterns, and conceptual link to modern depositional regimes. *Geology*, 42: 131-134.
- Cai Y P, Xiao S H, Li G X, Hua H. 2019. Diverse biomineralizing animals in the terminal Ediacaran Period herald the Cambrian explosion. *Geology*, 47: 380-384.
- Duke W L, Arnott R W C, Cheel R J. 1991. Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: new insights on a stormy debate. *Geology*, 19: 625.
- Faugères J C, Stow D A V. 1993. Bottom-current-controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem. *Sedimentary Geology*, 82: 287-297.
- Gao P, Xiao X M, Hu D F, Lash G G, Liu R B, Zhang B Y, Zhao Y M. 2024. Comparison of silica diagenesis between the lower Cambrian and lower Silurian shale reservoirs in the middle-Upper Yangtze platform (southern China). *AAPG Bulletin*, 108: 971-1003.
- Guo T L, Zhang H R. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiha shale gas field, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41: 31-40.
- Jarvie D M. 2012. Shale resource systems for oil and gas; Part 2: Shale-oil resource systems. In: *Shale Reservoirs: Giant Resources for the 21st Century*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Koralay T, Koralay D B. 2022. Geochemical properties and heavy metal contents of carbonaceous rocks in the Pliocene siliciclastic rock sequence from southeastern Denizli-Turkey. *Open Geosciences*, 14: 1324-1346.
- Kranck K. 1984. The Role of Flocculation in the Filtering of Particulate Matter in Estuaries. Pittsburgh: Academic Press, 159-175.
- Leonowicz P. 2016. Nearshore transgressive black shale from the Middle Jurassic shallow-marine succession from southern Poland. *Facies*, 62: 16.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. *AAPG Bulletin*, 96: 1071-1098.
- MacQuaker J H S, Bentley S J, Bohacs K M. 2010. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: re-appraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions. *Geology*, 38: 947-950.
- Milliken K L. 2013. SEM-based cathodoluminescence imaging for discriminating quartz types in mudrocks. *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, Colorado, USA, 12-14, August 2013.
- Mulder T, Syvitski J P M. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *The Journal of Geology*, 103: 285-299.
- Pattison S A J. 2005. Storm-influenced prodelta turbidite complex in the lower Kenilworth member at hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, U.S.A.: implications for shallow marine facies models. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 420-439.
- Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. 2005. *Mud and Mudstones: Introduction and Overview*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, Ver Straeten C A, Hollander D J, Lyons T W. 2003. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin. *Chemical Geology*, 195: 229-273.
- Schieber J. 2016. Experimental testing of the transport-durability of shale lithics and its implications for interpreting the rock record. *Sedimentary Geology*, 331: 162-169.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s; 1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 285-342.
- Slatt R M, O'Brien N R. 2011. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks. *AAPG Bulletin*, 95: 2017-2030.
- Stow D A V. 2002. *Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics*. London: Geological Society, 464.
- 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 H X, Huang G Q, Fu S Q, Qian P. 2018. Progress in the study of coastal storm deposits. *Ocean Science Journal*, 53: 149-164.
- 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.
- Zou C N, Zhao Z F, Pan S Q, Yin J, Lu G W, Fu F L, Yuan M, Liu H L, Zhang G S, Luo C, Wang W, Jing Z H. 2024. Unveiling the oldest industrial shale gas reservoir: insights for the enrichment pattern and exploration direction of lower Cambrian Shale gas in the Sichuan Basin. *Engineering*, 42: 278-294.

(责任编辑 李新坡)