

川南地区下寒武统筇竹寺组细粒岩沉积作用 对储集层特征的影响^{*}

陈 鑫^{1,2} 杨学锋^{1,2} 李 博^{1,2} 张成林^{1,2} 谢圣阳^{1,2}
王高翔^{1,2} 何沅翰^{1,2} 陈 雷³ 秦何星³

1 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院, 四川成都 610051

2 页岩气地质评价与高效开发四川省重点实验室, 四川成都 610213

3 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

摘 要 川南地区下寒武统筇竹寺组储集层品质差异显著。纹层作为细粒岩最基本的沉积构造单元, 是储集层非均质性的关键控制因素, 然而其成因机制及对储集层品质的差异化控制机理尚不明确。综合运用岩心观察、薄片分析、扫描电镜及孔隙结构测试等方法, 系统识别了川南地区下寒武统筇竹寺组的纹层类型及其沉积作用, 评价其对储集层特征的影响。研究识别出悬浮沉积、底流沉积、风暴沉积和重力流沉积 4 种沉积作用类型: 悬浮沉积作用发育水平状长英质纹层和块状构造, 形成硅质页岩相, 具有总有机碳含量 (TOC) 高 (平均 2.22%)、孔隙度大 (平均 3.91%), 为最优储集层类型; 底流沉积呈硅质—黏土韵律互层, TOC 与孔隙度居中 (分别平均为 1.48%, 3.08%); 风暴沉积与重力流沉积因高能事件和陆源输入增强, TOC 与孔隙度显著降低 (分别平均为 0.62%, 2.85%)。垂向上, 筇竹寺组经历多期海侵—海退旋回, 1 小层、3 小层底部和 5 小层处于高海平面阶段, 以悬浮沉积为主, 具高 TOC、高硅质、高孔隙度特征, 为最有利页岩气富集层段。研究揭示了沉积作用对储集层非均质性的系统控制机理, 为川南地区页岩气有利层段优选提供了地质依据。

关键词 细粒岩 沉积作用 纹层 非均质性 页岩气 筇竹寺组 川南

第一作者简介 陈鑫, 男, 1993 年生, 博士, 工程师, 主要从事页岩气开发地质研究。E-mail: chenx_2023@petroChina.com.cn。

中图分类号: P534.41 文献标志码: A

Controls of sedimentary processes on reservoir quality in fine-grained rocks of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin

CHEN Xin^{1,2} YANG Xuefeng^{1,2} LI Bo^{1,2} ZHANG Chenglin^{1,2} XIE Shengyang^{1,2}
WANG Gaoxiang^{1,2} HE Yuanhan^{1,2} CHEN Lei³ QIN Hexing³

1 Shale Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Branch Company, Chengdu 610051, China

2 Shale Gas Geological Evaluation and Efficient Development Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

3 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

^{*} 国家科技重大专项 (编号: 2025ZD1404106) 和西南油气田分公司科技项目 (编号: 25XNYTSJ035) 联合资助。[Co-funded by the National Science and Technology Major Project (No. 2025ZD1404106) and PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company Research Project (No. 25XNYTSJ035)]

收稿日期: 2025-11-01 改回日期: 2025-12-22

Abstract Reservoir quality of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin is highly heterogeneity. Laminae, as the fundamental sedimentary structural units of fine-grained rocks, are the primary controls on reservoir heterogeneity. However, their genetic mechanisms and reservoir-controlling effects remain insufficiently understood. In this study, we integrate core observation, thin-section analysis, scanning electron microscopy (SEM), and pore structure characterization to systematically classify lamina types, interpret their depositional processes in the Qiongzhusi Formation of the Southern Sichuan Basin, and evaluate their control over reservoir quality. Four types of depositional processes are identified: suspension settling, bottom-current deposition, storm deposition, and gravity flow deposition. Suspension settling deposits exhibit horizontally laminated felsic laminae and massive bedding, forming siliceous shale facies with high total organic carbon (TOC, average 2.22%) and porosity (average 3.91%), which represent the optimal reservoir type. In contrast, bottom-current deposits feature siliceous-clay rhythmic interbeds, with moderate TOC (average 1.48%) and porosity (average 3.08%). Storm deposits and gravity-flow deposits exhibit significantly lower TOC (average 0.62%) and porosity (average 2.85%) due to high-energy depositional events and increased terrestrial input. Vertically, the Qiongzhusi Formation underwent multiple transgressive-regressive cycles. Sub-layers 1, 3, and 5, deposited during highstand phases, are dominated by dominant suspension settling, and feature high TOC, siliceous enrichment, and elevated porosity, making them the most favorable intervals for shale gas accumulation. This study provides a systematic understanding of elucidates the depositional controls on reservoir heterogeneity, offering critical geological constraints for optimizing shale gas sweet spots in the Southern Sichuan Basin.

Key words fine-grained rocks, sedimentary processes, laminations, heterogeneity, shale gas, Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin

About the first author CHEN Xin, born in 1993, is a Ph.D. and an engineer. He is mainly engaged in shale gas development geology. E-mail: chenx_2023@petroChina.com.cn.

0 引言

四川盆地是中国页岩气增储上产的主战场,近年来尤其在川南地区,深层—超深层下寒武统筇竹寺组页岩气勘探取得重要进展。资 201 井以 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产气量刷新了世界最古老工业化页岩气藏的日产气纪录,金页 1HF、金页 3HF 等井相继实现高产工业气流,标志着川南地区下寒武统筇竹寺组深层页岩气在“高产验证—规模评价”方面取得关键突破(何骁等, 2024b; 雍锐等, 2024)。基于“槽—隆”富集模式的成功应用,该套页岩储集层已具备规模化开发前景(郭彤楼等, 2024; 何骁等, 2024a)。然而,不同构造区带与层段之间页岩储集层品质差异显著,成为制约高效开发的关键因素(江凯禧等, 2014; 赵建华等, 2019; 熊亮等, 2024)。

纹层作为细粒岩最基本的沉积构造单元,被认

为是储集层非均质性的关键控制因素(施振生等, 2020; 李一凡等, 2021)。Schieber 等(2010)通过水槽实验揭示了黏土絮凝体在动水环境下同样可以形成纹层结构,这一发现打破了细粒岩必须在静水环境沉积的传统认识。基于此, Lazar 等(2015)建立了成因导向的细粒岩纹层分类体系,将纹层几何形态、组成特征与沉积过程进行了有机结合。由此,纹层被认为是细粒岩在不同沉积环境与水动力条件下形成的最直接物质记录,其层理形态、颗粒组构、有机质赋存方式及矿物分异等特征完整地保留了沉积过程的关键信息(Schieber *et al.*, 2010; Bohacs *et al.*, 2014)。不同类型纹层在组成与结构上的差异,不仅控制有机质的富集与保存,还制约矿物组合和孔隙结构的演化(Li *et al.*, 2017; Woo *et al.*, 2021; 武瑾等, 2023),从而导致储集层物性呈现显著的非均质性。因此,建立纹层类型与沉积作用的对应关系,并进一步揭

示其对有机质富集、孔隙结构与含气性的协同控制，是认识细粒岩储集层差异机制的关键。

近年来，川南地区已成为下寒武统筇竹寺组页岩气勘探开发的重点区域（何骁等，2024b；杨学锋等，2025）。筇竹寺组纹层按连续性和结构形态可划分为板状纹层、条带状纹层、微波状纹层和透镜状纹层等多种类型（熊敏等，2022；熊亮等，2023）。然而，这些纹层类型的成因机制及其与特定沉积作用的对应关系目前尚不明确，进而导致不同纹层类型对储集层 TOC 富集、孔隙结构发育和含气性的差异化控制机理认识不足，直接制约了对川南地区下寒武统筇竹寺组储集层非均质性及其对页岩气富集规律差异的认识。

本研究以川南地区下寒武统筇竹寺组为目的层系，综合运用岩心观察、薄片分析、扫描电镜、高压压汞、低温氮气吸附等多种技术方法，系统识别纹层类型并建立其与沉积作用的对应关系，进而评估其控储作用，旨在：（1）识别筇竹寺组细粒岩主要纹层类型及其对应的沉积作用；（2）分析不同纹层类型对储集层有机质丰度（TOC）、孔隙结构和含气性的控制作用；（3）探讨沉积作用、纹层特征与储集层非均质性之间的潜在联系。本研究相比前人的主要创新是建立了“沉积作用—纹层类型—储集层品质”的系统关联，而非仅停留在纹层描述层面。

1 地质背景

晚震旦世到早寒武世期间，川南地区的构造—沉积格局主要受控于贯穿四川盆地中西部的南北向伸展断裂系统——“绵阳—长宁”拉张槽（或称德阳—安岳裂陷槽），为当时最重要的沉降—沉积中心之一（何骁等，2024a；杨一茗等，2024）。槽内水体深、水动力弱且环境相对封闭，表现为典型的深水陆棚或槽盆环境，是富含有机质的细粒沉积物（黑色页岩）大规模发育和保存的核心区域。下寒武统筇竹寺组厚度总体呈现中部厚（可达 500 m 以上）、向东部和西部逐渐减薄的条带状分布特征，受“绵阳—长宁”拉张槽控制（图 1-a）。

依据古生物发育等特征，下寒武统筇竹寺组可划分为第一段和第二段，其中第一段可见 *Lapworthella-Tannuolina-Sinosachites* 小壳化石带，第二段可见 *Eoredlichia-Wud-inggaspis* 三叶虫化石带（钱

逸，1999）。再依据地震解释、岩性与矿物组合特征及测井电性响应（王红岩等，2025），将第一段划分为第一 1 亚段和第一 2 亚段，其中第一 1 亚段包括 1 小层、2 小层、3 小层、4 小层 4 个小层，第一 2 亚段包括 5 小层、6 小层 2 个小层，第二段包括 7 小层、8 小层 2 个小层（图 1-b）。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）。

下寒武统筇竹寺组沉积相在纵向与横向上均表现出显著分异特征，自槽内深水泥质陆棚向槽外浅水砂泥质陆棚系统性过渡（图 1-a）。不同层段间泥质、硅质与粉砂质成分比例及沉积结构发生系统性变化，不同小层间岩性与沉积相带频繁交替，记录了物源供给、构造沉降及海平面变化的多期波动过程。复杂的沉积演化使下寒武统筇竹寺组细粒岩形成了多样化的纹层类型及其组合，为后续探讨纹层发育特征及其控储机制奠定了重要的地质基础。

2 样品采集与分析

本研究以川南地区下寒武统筇竹寺组为研究对象，选取筠连—长宁—泸州一带的典型钻井（如 Z2 井、Z5 井、Z7 井等）岩心样品 60 余件，涵盖第一₁亚段（1-4 小层）、第一₂亚段（5-6 小层）及第二段（7-8 小层）多个层段，代表槽内深水至槽外浅水多种沉积相类型。采样过程中依据岩性、层理及纹层特征进行系统描述，并尽量在相同层位开展对比取样，以确保样品的代表性与可比性。

岩心及薄片观察采用显微镜与岩相学分析相结合的方法，识别纹层构造、颗粒组构及矿物组合特征。选取具有代表性的样品开展 X 射线衍射（XRD）测试，以确定主要矿物类型及含量；总有机碳含量（TOC）分析采用 LECO CS-230 仪进行，用于定量表征有机质丰度（wt.%）并辅助判识沉积环境差异。扫描电镜（SEM）观察分析孔隙类型与有机质赋存特征；部分样品进行低温氮气吸附与高压压汞实验，以定量表征孔隙结构，因数据分布特征，TOC 采用中位值表征，孔隙度采用算术平均值。

综合利用岩心、薄片、XRD、TOC、SEM 及孔

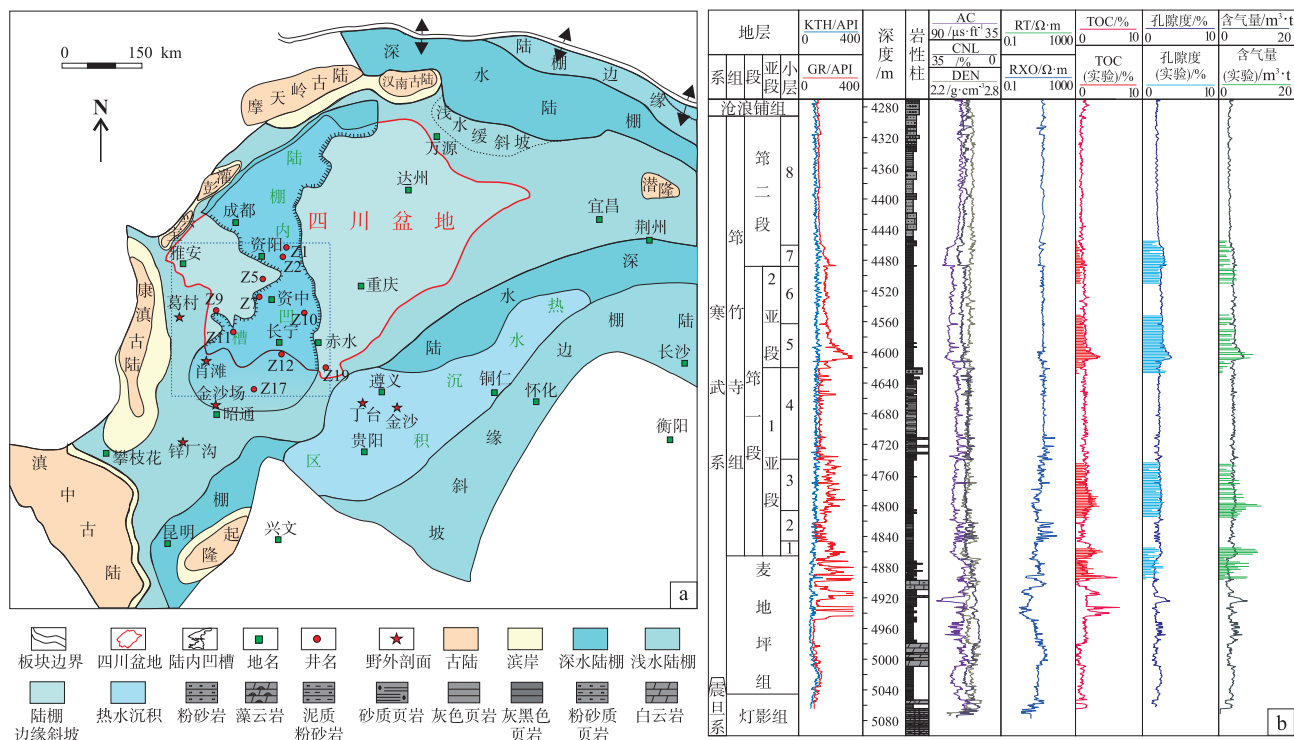


图 1 四川盆地及周缘寒武纪筇竹寺期岩相古地理 (a) 与 Z2 井地层综合柱状图 (b) (据范海经等, 2021; 有修改)

Fig. 1 Lithofacies-paleogeography during the Cambrian Qiongzhusi Formation of Sichuan Basin (a) and vicinity stratigraphic column of Well Z2 (b) (modified from Fan *et al.*, 2021)

隙结构分析等多种方法, 从宏观—微观多尺度 (岩心和显微尺度)、物质组成 (矿物与有机质) 及孔隙结构特征 3 个层面揭示下寒武统筇竹寺组纹层类型与沉积作用特征, 为后续研究沉积过程对储集层非均质性的控制机制提供基础数据与分析支撑。

3 纹层发育特征及其沉积作用

通过系统的岩心观察和薄片鉴定, 可识别出多种由不同水动力强度与物源供给条件控制形成的纹层组合, 其对应的沉积作用主要包括悬浮沉积、底流沉积、风暴沉积及重力流沉积 4 种沉积作用类型 (唐佰强等, 2025)。

3.1 悬浮沉积作用

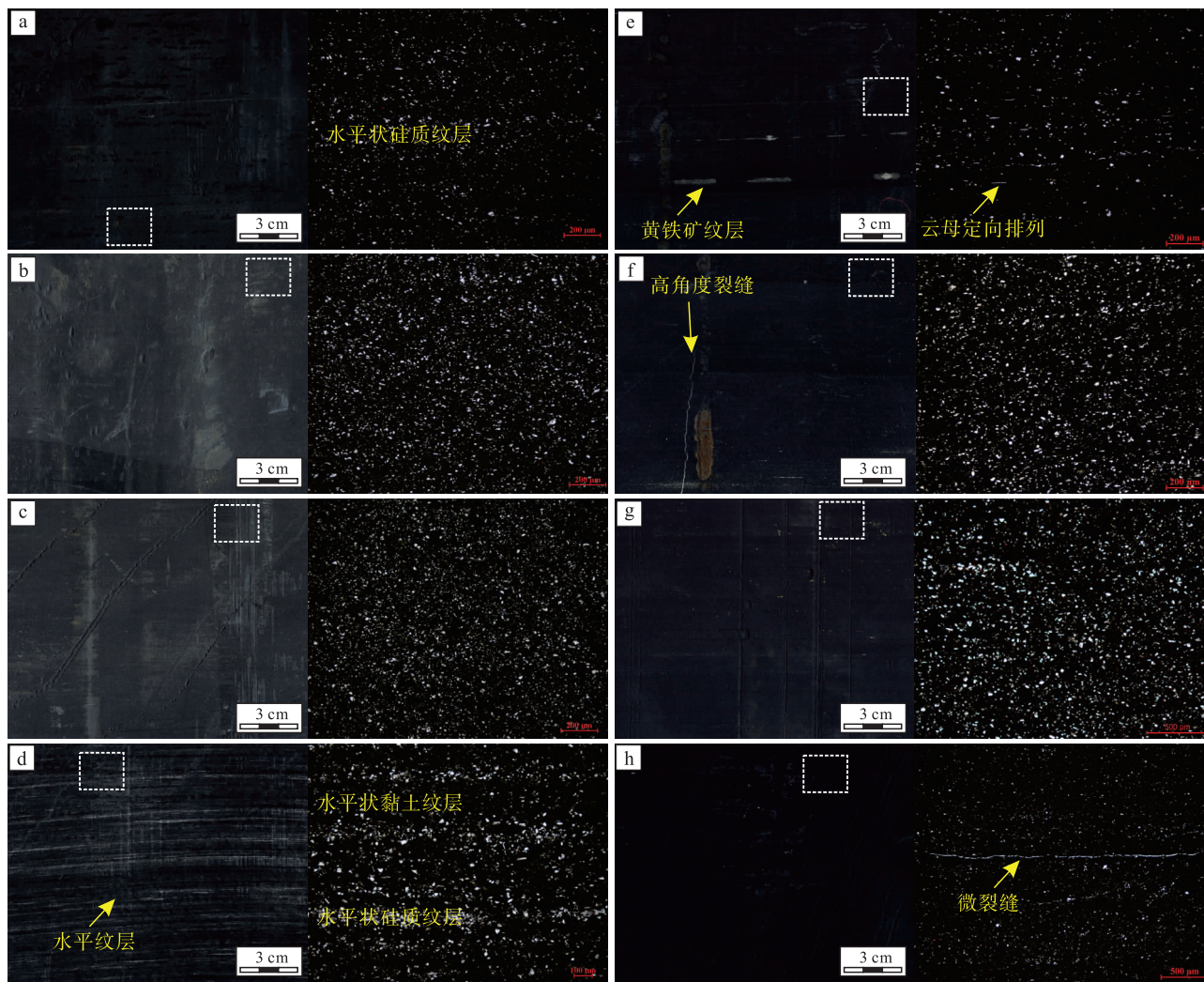
悬浮沉积作用主要见于筇竹寺组的 1、3、5、7 小层。小层的岩性以灰黑色页岩与灰黑色粉砂质页岩为主, 岩心尺度上多呈块状—弱层理构造, 局部可见隐约的水平状长英质纹层 (图 2-a 至 2-d)。弱层理构造主要表现为纹层厚度极薄、界面不清或宏观上不易辨识明显分带; 在薄片尺度仍可识别硅

质—黏土的平行细纹层与矿物弱定向排列特征, 块状构造段内部物质均匀、组分和结构无明显分异现象, 粒度一致, 无较大颗粒。另外, 岩心常见黄铁矿结核和黄铁矿纹层发育 (图 2-e)。局部可见高角度裂缝发育, 多被方解石充填 (图 2-f)。

镜下观察显示, 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基质中, 水平纹层通常表现为水平状黏土纹层与水平状长英质纹层互层发育 (图 2-d)。长轴矿物 (片状云母) 呈定向排列。

该类沉积段 TOC 含量较高, 介于 1.7%~7% 之间, 平均为 2.8%。X 射线衍射分析显示, 硅质矿物含量介于 50.4%~85.5% 之间, 平均为 62.1%, 黏土矿物含量介于 2.8%~49.1% 之间, 平均为 37.4%。

该类纹层主要形成于低能、还原性强的深水陆棚沉积环境。其形成机制被认为水体能量较低且循环缓慢, 水动力条件弱, 导致细粒碎屑物质 (如泥、粉砂) 通过悬浮作用持续沉降 (Bohacs *et al.*, 2014)。通常出现在风暴浪基面以下的深水陆棚区域, 沉积速率缓慢, 水体分层稳定 (Macquaker



a—Z7 井, 井深 4461.43 m, 1 小层, 灰黑色页岩, 隐约可见水平纹层; b—Z7 井, 井深 4433.00 m, 3 小层, 灰黑色页岩, 块状构造; c—Z7 井, 井深 4343.36 m, 灰黑色页岩, 5 小层, 块状构造; d—Z7 井, 井深 4219.94 m, 灰黑色页岩, 发育少量水平纹层; e—Z2 井, 井深 4856.92 m, 1 小层, 灰黑色页岩, 岩心可见黄铁矿纹层, 镜下可见云母定向排列; f—Z2 井, 井深 4794.16 m, 3 小层, 灰黑色页岩, 岩心可见高角度裂缝, 块状构造; g—Z2 井, 井深 4598.00 m, 5 小层, 灰黑色页岩, 块状构造; h—Z2 井, 井深 4478.44 m, 灰黑色页岩, 镜下可见微裂缝发育, 块状构造。白色虚线框代表右侧薄片位置

图 2 川南地区筇竹寺页岩悬浮沉积作用对应的纹层特征

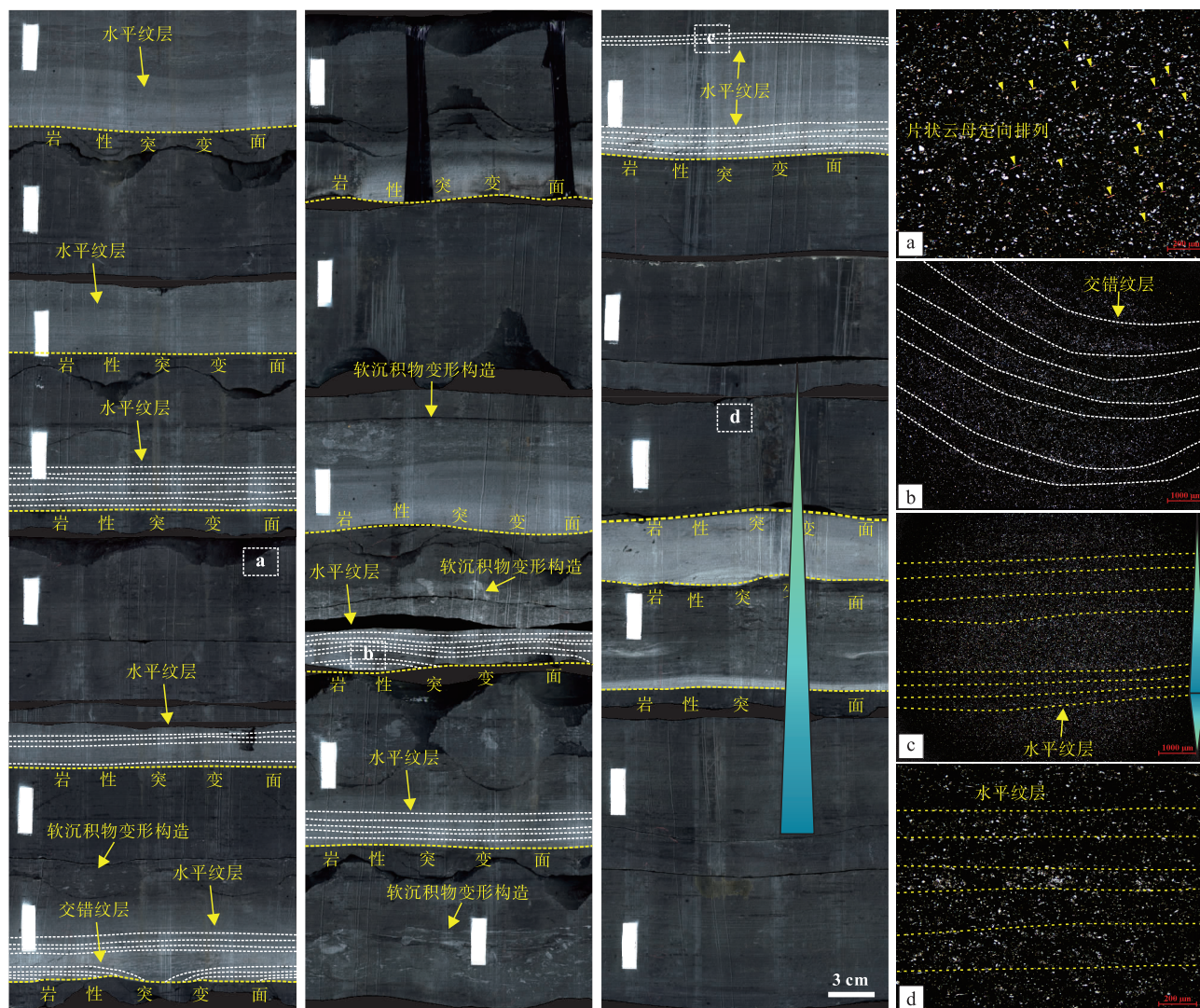
Fig. 2 Laminae formed by suspension settling of the Qiongzhusi Formation shale, southern Sichuan Basin

et al., 2010)。沉积速率长期处于欠补偿状态, 细粒沉积物 (如黏土级颗粒) 在絮凝机制作用下形成纹层状构造, 其内部缺乏粒度变化, 分选作用较弱, 纹层边界模糊不清 (Schieber *et al.*, 2010)。这种以细粒物质为主、分选性良好的沉积特征, 是深水区水动力弱、悬浮沉积作用占主导的典型标志 (李华和何幼斌, 2017)。另外, 高 TOC 含量和黄铁矿发育更反映了较为还原的深水沉积环境, 为有机质在缺氧条件下的富集与有效保存提供了有利条件 (Tyson, 2001; 黄梓桑等, 2021)。

3.2 底流沉积作用

底流沉积作用在研究区筇竹寺组 2、3、4、6 小层较为发育, 与悬浮沉积共同构成全区全层段广泛发育的沉积作用类型。

典型底流沉积岩心段宏观特征表现为: 灰白色粉砂岩与灰色泥质粉砂岩呈互层状展布, 其底部常可见清晰的岩性突变面 (图 3 中黄色虚线标识), 标志着底流事件的开始, 常见灰白色、粒度相对较粗的粉砂岩或泥质粉砂岩突变式地覆盖在下伏颜色较



Z7 井, 井深 4423.06~4418.20 m, 3 小层; 白色虚线框代表右侧薄片位置, 单偏光

图 3 川南地区筇竹寺组页岩底流沉积作用对应的纹层特征

Fig. 3 Laminae characteristics associated with traction current deposition in the Qiongzhusi Formation shale, southern Sichuan Basin

深、粒度较细的泥岩或页岩之上。序列中下部以灰白色粉砂岩或灰色泥质粉砂岩为主, 这些层段内部发育指示水流牵引作用的沉积构造, 如水平纹层和低角度交错纹层(图 3 中箭头标示)。部分层段可见软沉积物变形构造(图 3), 这可能与底流快速沉积导致的负荷作用有关 (Owen, 1987)。序列向上, 随着底流能量减弱, 粒度可能逐渐变细 (尽管完整的粒序在图中并非处处完美展现), 最终过渡为颜色更深 (如灰黑色) 的粉砂质页岩或页岩, 这些细粒层段内部以水平纹层为主, 代表了底流活动间歇期的悬浮沉积 (Rebesco *et al.*, 2014)。序列的顶部也常以岩性突变面结束, 被下一次底流事件或背景悬浮沉积覆盖。

镜下观察显示, 硅质矿物均匀分布于黏土质矿物之中, 片状矿物 (如云母) 显示定向排列 (图 3-a), 反映水流作用 (Schieber, 2016)。典型的微观构造包括低角度交错纹层(图 3-b 白线勾勒)和水平纹层构造(图 3-c, 3-d 黄线标识)。水平状长英质纹层与水平状黏土质纹层呈韵律性互层发育, 反映了沉积过程中水动力的周期性增强与减弱 (Lazar *et al.*, 2015)。可见逆粒序结构(图 3-d), 指示海退过程中水动力增强 (Pickering *et al.*, 1986)。

该类沉积段 TOC 含量介于 0.9%~1.7% 之间, 平均为 1.3%。矿物组成以石英、长石和黏土矿物为主, 石英含量在 35%~55% 之间, 黏土矿物含量在 20%~40% 之间。

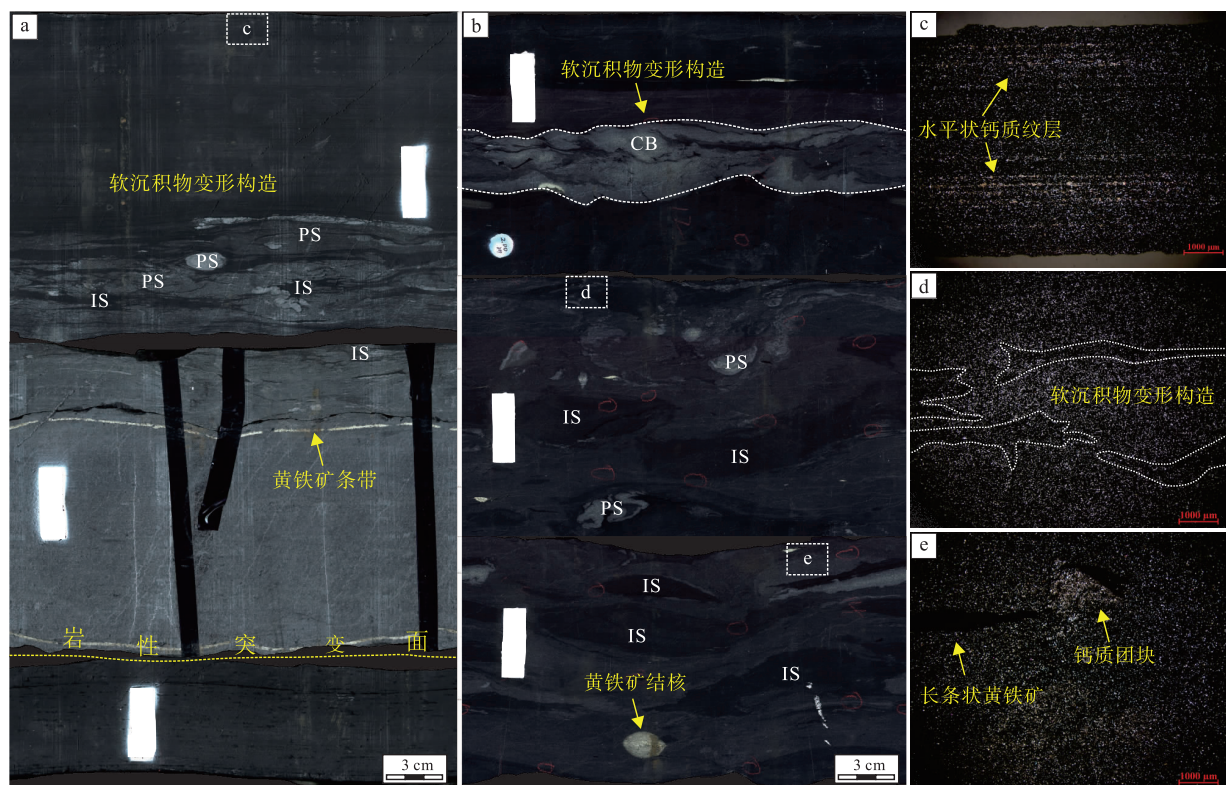
图 3 展示的岩性突变面、牵引构造（水平与交错纹层、矿物定向排列）以及韵律性互层构成了识别底流沉积重要的标志组合（Stow and Faugères, 2008）。突变面指示了底流事件的侵蚀性基底或能量的骤变。其上发育的水平 and 低角度交错纹层，以及镜下矿物的定向排列，是沉积物在底流拖拽下发生滚动、跃移和定向堆积的直接产物，清晰地记录了古水流的动力过程（Schieber, 2016）。尤为重要的是亮色（富粉砂/硅质）与暗色（富泥/黏土）纹层的韵律性互层，则直观反映了底流能量的脉动或周期性变化（Gonthier *et al.*, 1984）。强能量阶段沉积较粗颗粒形成亮色层，弱能量或间歇期则以悬浮沉积或细粒搬运为主形成暗色层。这种韵律性是区别于均质悬浮沉积的关键特征（李华和何幼斌, 2017）。

3.3 风暴沉积作用

风暴沉积作用主要体现在筇竹寺组的 3、4、6、

8 小层。典型的风暴沉积层段在岩心上显示出独特的构造组合（图 4）。其底部常可见侵蚀面或岩性突变面（如图 4-a 底部黄色虚线所示），标志着风暴事件对先前沉积物的改造。岩性常以灰色粉砂岩或泥质粉砂岩为主，中部主要发育软沉积物变形构造（图 4-b），表现为不规则的揉皱变形，由于风暴形成快速沉积作用，而上覆水体循环造成应力不均衡，导致沉积物容易发生变形。在镜下可以观察到软沉积物变形构造（图 4-d）和钙质团块（图 4-e）；上部主要发育水平纹层，风暴流速逐渐降低，水动力逐渐减弱，悬浮的细粒沉积物开始沉降，在安静的水体环境下形成水平纹层，镜下可见水平状钙质纹层（图 4-c），表明了水体相对较浅。最为显著的特征是发育软沉积物变形构造，包括球枕构造（PS）、侵入构造（IS）以及包卷层理（CB）表现为不规则的揉皱变形（图 4-a, 4-b, 4-d）。

微观尺度上的软沉积物变形构造（图 4-d）也清晰可见，显示出沉积物在未固结时经历的揉皱和



a—Z7 井，井深度 4441.97~4440.79 m，3 小层，岩心可见软沉积物变形构造；b—Z2 井，井深 4805.1~4804.83 m，3 小层，岩心可见软沉积物变形构造；c—Z7 井，井深 4440.79 m，3 小层，镜下可见水平状钙质纹层，单偏光；d—Z2 井，井深 4805.02 m，3 小层，镜下可见软沉积物变形构造，单偏光；e—Z2 井，井深 4804.90 m，3 小层，镜下可见长条状黄铁矿和钙质团块，单偏光。

PS：球枕构造，IS：侵入构造，Cb：包卷层理。b、d 据廖崇杰等，2026

图 4 川南地区筇竹寺组页岩风暴沉积作用对应的纹层特征

Fig. 4 Laminae characteristics associated with storm deposition in the Qiongzhusi Formation shale, southern Sichuan Basin

变形。此外,镜下可见钙质团块(图 4-e)以及长条状或团块状的黄铁矿(图 4-e)。部分层段可见水平状钙质纹层(图 4-c),可能指示了浅水环境中碳酸盐物质的输入或早期胶结。

该类沉积段 TOC 含量较低,多小于 1.5%。矿物组成中碳酸盐矿物含量相对较高,石英含量在 35%~60%之间。

图 4 中大量发育的球枕构造、侵入构造和包卷层理,是风暴快速沉积和水体扰动导致沉积物失稳变形的关键证据(Molina *et al.*, 1998; Owen, 2003; Owen and Moretti, 2011)。风暴流的强水动力条件能够冲刷和改造陆棚沉积物,并将相对粗粒的物质(粉砂)搬运到通常为静水环境的区域,形成高能事件沉积层(Duke, 1990; Myrow and Southard, 1996)。在高峰期,风暴浪冲破正常浪基面,侵蚀滨岸沉积物,形成底部突变接触和块状构造;衰减期风暴流将浅水区粗粒碎屑搬运至深水区,快速沉积与应力不均叠加导致软沉积物变形构造发育;停息期恢复细粒悬浮沉积,形成上部水平纹层和钙质纹层(Dott and Bourgeois, 1982)。更重要的是,风暴过程往往伴随着水体的混合和氧气的输入,破坏了稳定的缺氧环境,抑制有机质保存,导致 TOC 偏低(Pedersen and Calvert, 1990; Macquaker and Bohacs, 2007)。同时将浅水区钙质碎屑搬运至深水区,使碳酸盐矿物相对富集(Jelby *et al.*, 2020)。

3.4 重力流沉积作用

沉积物重力流是由重力驱动的高密度流体系统,包括碎屑流、颗粒流、液化流及浊流等类型(Mulder and Alexander, 2001; Shanmugam, 2020)。在研究区筇竹寺组页岩中,以浊流沉积最为常见,主要发育在 2、4、6、8 小层(图 5),本节讨论的重力流以浊积流为主。

浊流沉积在岩心上常可见典型的鲍马序列特征(Bouma *et al.*, 1962; Lowe, 1982),尽管可能不完整。研究区主要观察到鲍马序列的 A 段和 D 段:

A 段位于序列底部,含砾递变层,岩性主要为灰色粉砂岩,发育块状构造,底部见冲刷—充填构造,与下伏的灰黑色页岩呈不规则的突变接触(图 5-a, 5-b)。同时,镜下可观察到典型的递变层理,即颗粒由下向上逐渐变细,表现出正粒序特

征(图 5-c, 5-e)。

D 段位于序列上部,岩性主要为灰色泥质粉砂岩或灰色粉砂质泥岩,主要发育水平纹层(图 5-a, 5-b)。镜下可见水平状长英质纹层与水平状黏土质纹层互层发育(图 5-d, 5-f)。

该类沉积段 TOC 含量较低,介于 0.07%~1.84%之间,平均为 0.62%。矿物组成以石英、长石为主,石英含量在 35%~60%之间,黏土矿物含量在 15%~25%之间。

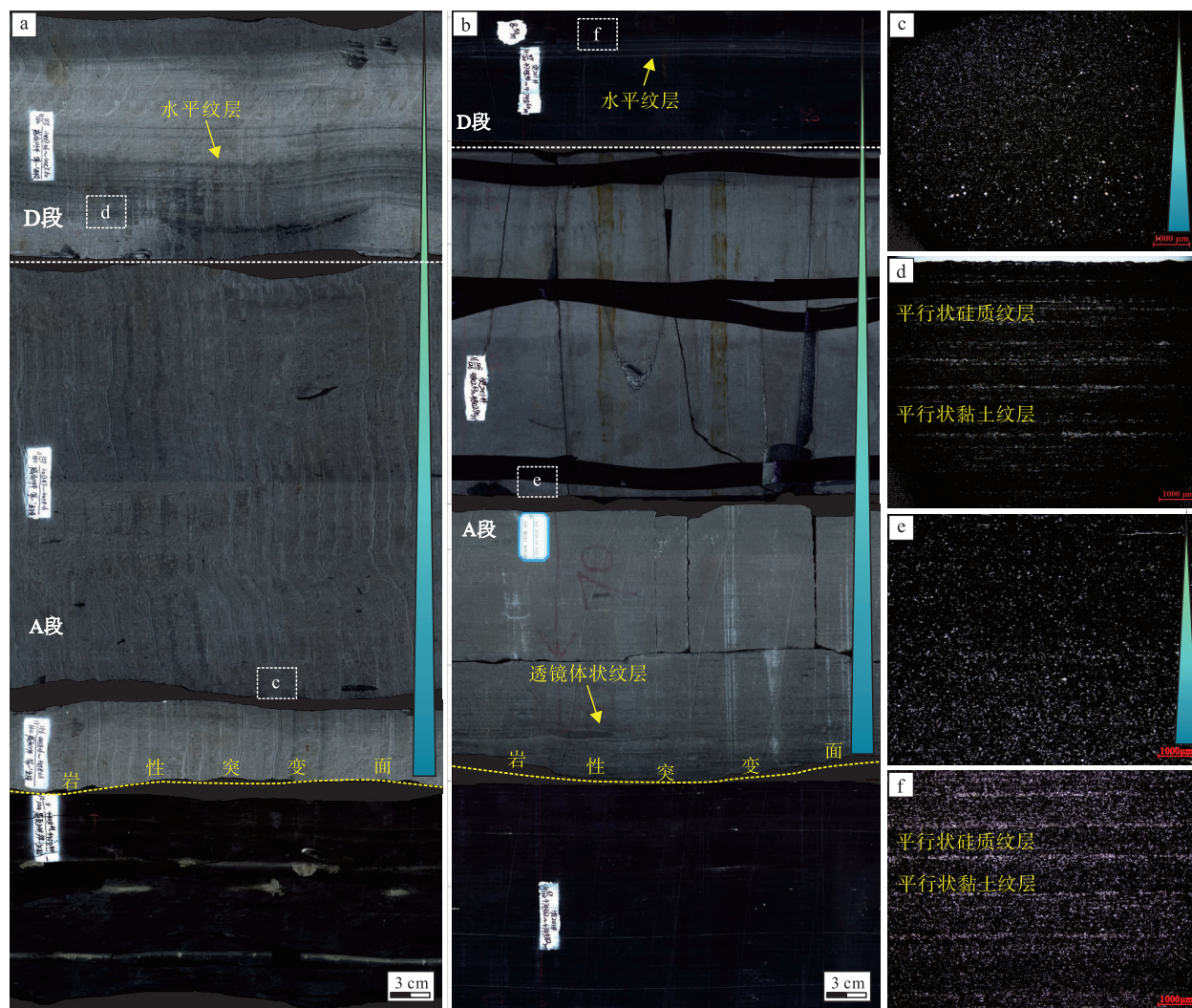
底部的冲刷—充填构造、突变接触界面和正粒序结构是识别浊流的关键标志,反映了浊流从高能快速搬运到低能缓慢沉积的演化过程(Bouma *et al.*, 1962; Talling *et al.*, 2012; 李利阳, 2015; Shanmugam, 2020)。A 段(含砾递变层)和 D 段(水平纹层泥质粉砂岩)记录了浊流高能阶段粗粒物质的快速堆积和低能阶段细粒物质的悬浮沉降过程(Mulder and Alexander, 2001)。当海平面快速下降时,低位体系域发育导致陆源碎屑通过重力流持续输入深水环境(Catuneanu *et al.*, 2011)。浊流搬运的大量陆源碎屑稀释有机质浓度,并通过快速埋藏改变氧化还原条件,使底层水间歇性氧化,加速有机质降解,导致 TOC 显著降低(Tyson, 2001; 赵文智等, 2020; Hage *et al.*, 2022)。

4 沉积作用对储集层特征的影响

筇竹寺组纹层受多种沉积动力交替控制:槽内静水悬浮沉积利于有机质富集,底流、风暴与重力流等事件沉积则导致物质混杂、分选差异与结构破碎,形成显著层内一层间非均质特征,使有机质、矿物组合与孔隙结构系统分异,进而主控储集层品质差异。下文将从矿物—岩相、TOC 与孔隙结构 3 方面论证其影响。

4.1 对矿物组分和岩相类型的控制

本研究主要选取吴蓝字等(2016)提出的矿物组分三端元划分方案(图 6),过硅质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物(方解石+白云石)、黏土矿物的三端元划分方案,可以将页岩划分出 4 种岩相组合和 16 种页岩岩相。各个岩相组合细分如下: M-1 为含灰/硅混合质页岩相; M-2 为混合质页岩相; M-3 为含黏土/灰混合质页岩相; M-4 为含黏土/硅混合质页岩相; S-1 为硅质页岩相; S-2 为混



a—Z7 井, 井深 4458.23~4457.46 m, 2 小层, 岩心可见正粒序, 顶部可见水平纹层; b—Z2 井, 井深 4750.22~4749.13 m, 2 小层, 岩性突变面之上可见透镜体状纹层, 顶部可见水平纹层; c—Z7 井, 井深 4458.16 m, 2 小层, 镜下可见递变纹层, 正交偏光; d—Z7 井, 井深 4457.6 m, 2 小层, 镜下可见平行状长英质纹层与平行状黏土纹层互层, 单偏光; e—Z2 井, 井深 4749.16 m, 2 小层, 镜下可见递变纹层, 单偏光; f—Z2 井, 井深 4748.46 m, 2 小层, 镜下可见平行状长英质纹层与平行状黏土纹层互层, 单偏光

图 5 川南地区筇竹寺组页岩浊流沉积作用对应的纹层特征

Fig. 5 Laminae characteristics associated with turbidity current deposition in the Qiongzhusi Formation shale, southern Sichuan Basin

合硅质页岩相; S-3 为含灰硅质页岩相; S-4 为含黏土硅质页岩相; C-1 为灰质页岩相; C-2 为混合灰质页岩相; C-3 为含硅灰质页岩相; C-4 为含黏土灰质页岩相; CM-1 为黏土质页岩相; CM-2 为混合黏土质页岩相; CM-3 为含灰黏土质页岩相; CM-4 为含硅黏土质页岩相。

川南地区筇竹寺组页岩矿物组分以硅质矿物为主(平均 64.0%), 黏土矿物次之(平均 28.2%), 碳酸盐矿物含量相对较少(平均 13.6%)。基于页岩岩相的三端元分类方案(Gamero-Diaz *et al.*, 2013; 吴蓝宇等, 2016), 研究区主要发育硅质页岩相(S-1)、混合硅质页岩相(S-2)、含黏土硅质页岩相(S-4)和含黏土/硅混合质页岩相(M-4) 4 种岩相类型(图 7)。

4.1.1 硅质页岩相(S-1)

该岩相以高硅低黏为特征(硅质为 75%~93%, 黏土为 0%~21%), 层理平直、结构致密, 缺乏牵引构造, 主要发育于 1、3、5 小层。其细粒、均质、无扰动特征表明沉积环境静稳, 对应悬浮沉积作用。低能缺氧条件下, 陆源输入弱、生物硅富集, 细粒沉降形成高硅质和低黏土矿物组合, 为优质脆性储集层的物质基础(Milliken and Ol-

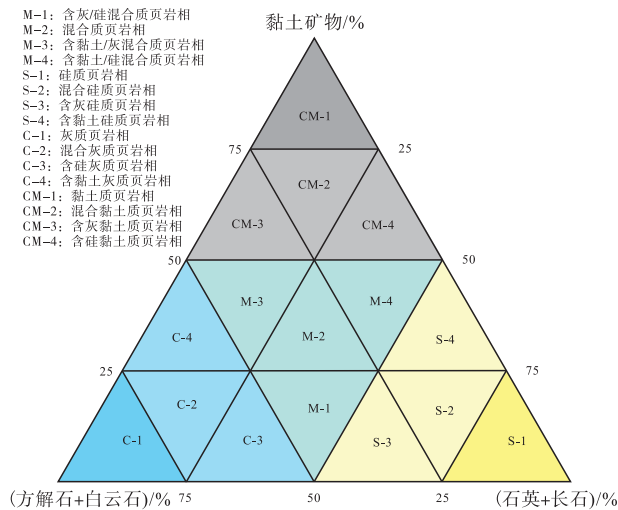


图 6 川南筇竹寺组页岩岩相划分方案

(据吴蓝宇等, 2016)

Fig. 6 Lithofacies classification scheme of the Qiongzhusi

Formation shale, southern Sichuan Basin

(after Wu *et al.*, 2016)son, 2017; Khan *et al.*, 2019)。

4.1.2 混合硅质页岩相 (S-2)

该岩相发育于 2、3、5、6、7 小层，硅质为 55%~75%，黏土为 6%~25%，岩性呈硅质—黏土韵律层理交替反映底流沉积作用；等深流间歇性搬运陆源碎屑并再分选，形成侵蚀—沉积循环 (Stow and Faugères, 2008; Lazar *et al.*, 2015)。适度陆源输入使黏土含量升高，岩石表现出良好的分选性与层内非均质性。

4.1.3 含黏土硅质页岩相 (S-4)

该岩相硅质含量 50%~74%，黏土明显增多 (26%~49%)，冲刷—充填面、软沉积物变形构造 (球枕、侵入、包卷等) 常见，纹层不规则、夹薄层粉砂；在多小层广泛出现。反映风暴沉积与浊流沉积叠加作用，即风暴流的短时高能振荡会产生冲

刷—充填、再悬浮与单层减薄，伴随软沉积变形 (Owen and Moretti, 2011)。高能事件引入大量的陆源碎屑 (Duke, 1990; Myrow and Southard, 1996)，黏土充填脆性颗粒孔隙并增强胶结，导致层内显著的非均质性。

4.1.4 含黏土/硅混合质页岩相 (M-4)

该岩相硅质与黏土含量相当 (各约 45%)，碳酸盐略高 (约 8%)。岩石结构杂乱、颗粒混杂，常见侵蚀底界与正粒序，表明重力流沉积作用主导 (Mulder and Alexander, 2001)。该岩相多形成于海平面下降期，强陆源输入与氧化环境叠加，使 3 类矿物组分趋于均衡分布，储集层品质显著降低。

4.2 对 TOC 的控制

筇竹寺组页岩 TOC 含量整体较高，平均约 2.0%，但在不同沉积作用类型间存在显著差异。TOC 富集程度由高到低依次为：悬浮沉积>底流沉积>风暴沉积>重力流沉积，显示出沉积动力强度与有机质保存之间的明显负相关关系 (图 8)。这一规律与龙马溪组 (黄梓桑等, 2021) 和其他页岩层系的研究结果一致 (张斌等, 2021)，反映了沉积动力对有机质富集的根本性控制作用。

在裂隙槽内静水环境下，悬浮沉积作用占主导。该环境下整体缺氧、还原性强，陆源供给有限，浮游生物生产力高，生物硅持续沉降并促使絮凝沉积形成封闭还原体系，使有机质得以高效富集与保存 (Li *et al.*, 2017)。由此，以悬浮沉积为主的层段，特别是发育硅质页岩相的区域，具有最高的 TOC 含量 (平均可达 2.22%，最高达 7.59%)。这与四川盆地其他区域筇竹寺组深水陆棚相烃源岩的特征相一致 (何晓等, 2024b; 杨学锋等, 2025)。

随动力增强，底流沉积作用开始主控。等深流作为 1 种半永久性的底流 (李华和何幼斌，

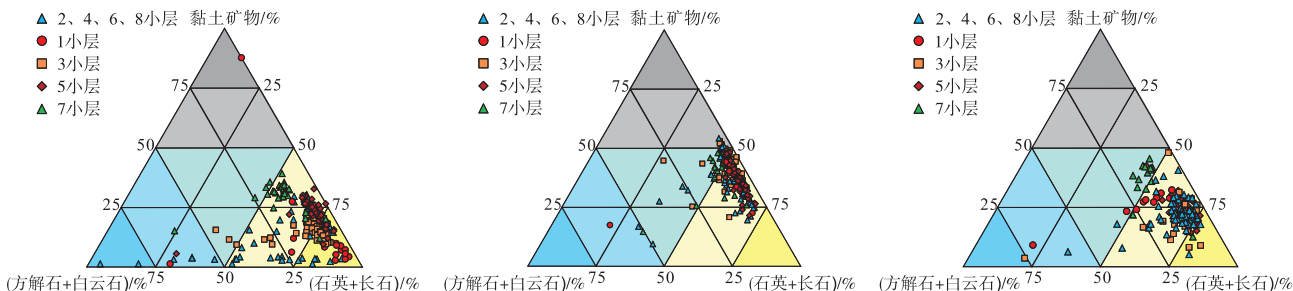


图 7 川南地区 Z2、Z7、Z5 井筇竹寺组页岩岩相三端元图

Fig. 7 Ternary diagram of shale lithofacies in the Qiongzhusi Formation from Wells Z2, Z7, and Z5, southern Sichuan Basin

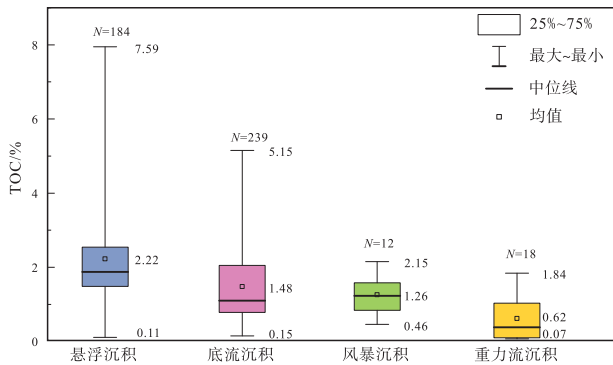


图 8 川南地区筇竹寺组沉积作用类型及其对应的 TOC 关系箱型图

Fig. 8 Boxplot of TOC distribution versus sedimentary process types in the Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin

2017), 间歇性扰动增强水体混合与营养盐再循环, 提高生物生产力但削弱保存效率 (Stow and Faugères, 2008)。TOC 为 0.15%~5.15%, 中位值 1.48%, 表现出中等富集水平。

在斜坡及陆棚边缘, 风暴沉积作用频繁发生, 短时高能流携带陆源碎屑和氧化水体, 稀释有机质并破坏还原条件 (Macquaker and Bohacs, 2007)。TOC 为 0.46%~2.15%, 中位值 1.26%, 但静水恢复期局部仍可形成薄层富集。

浅水区重力流沉积作用最为活跃, 高密度浊流导致沉积稀释与再氧化, 浊流搬运的大量陆源碎屑, 陆源碎屑高速堆积导致有机质被强烈稀释同时还通过快速埋藏改变氧化还原条件, 使底层水间歇性氧化, 加速有机质降解。川南地区筇竹寺组浊流沉积段 TOC 普遍偏低特征 (为 0.07%~1.84%, 中位值 0.62%), 与川东北浅水陆棚区的研究结果相吻合 (赵建华等, 2019; 熊亮等, 2024)。

4.3 对储集特征的控制

对页岩样品进行扫描电镜观察发现, 筇竹寺组页岩储集空间以有机质孔、矿物间孔及微裂缝为主 (图 9), 孔隙类型与孔隙度受沉积作用控制明显 (图 10)。

悬浮沉积主要发生在低能、缺氧的静水环境 (如 1、5、7 小层), 有利于有机质的大量富集与保存, 有机孔发育 (图 9-a, 9-b, 9-c)。同时, 在这种环境下富集的生物成因硅或早期自生硅质矿物, 形成了刚性的骨架, 增强了岩石的抗压实能力, 有助于无机孔隙 (如粒间孔、粒内溶蚀孔)

的保存 (Knapp *et al.*, 2020; 谢小敏等, 2021)。因此, 悬浮沉积主导的层段 (特别是富硅质页岩相 S-1 发育区) 具有相对最高的孔隙度 (平均可达 3.91%)。

底流沉积作用 (常见于 2、3、4、6 小层) 通过水流牵引间歇性搬运了更多的陆源细粒碎屑 (粉砂和黏土)。矿物颗粒之间可形成粒间孔, 黏土矿物也可发育层间孔 (图 9-c, 9-d, 9-e, 9-f)。底流的淘洗作用可能局部改善分选, 有利于孔隙保存, 但带来的黏土也可能在压实作用下堵塞孔隙。相比悬浮沉积, 底流环境通常不利于有机质富集, 故有机孔发育较少。由此, 底流沉积层段的孔隙度处于中等水平 (平均约 3.08%) (图 10)。

风暴事件带来的粉砂或生物碎屑可以形成粒间孔, 但快速堆积和通常伴随的高黏土含量使得这些孔隙在压实作用下难以有效保存 (腾格尔等, 2021)。同时, 风暴扰动和伴随的氧化作用不利于有机质保存, 有机孔发育受限 (Pedersen and Calvert, 1990; Macquaker and Bohacs, 2007)。层间孔隙保存受限, 仅局部脆性颗粒间保留残余空间。因此, 风暴沉积层段的孔隙度相对较低, 平均约 2.83% (图 10)。

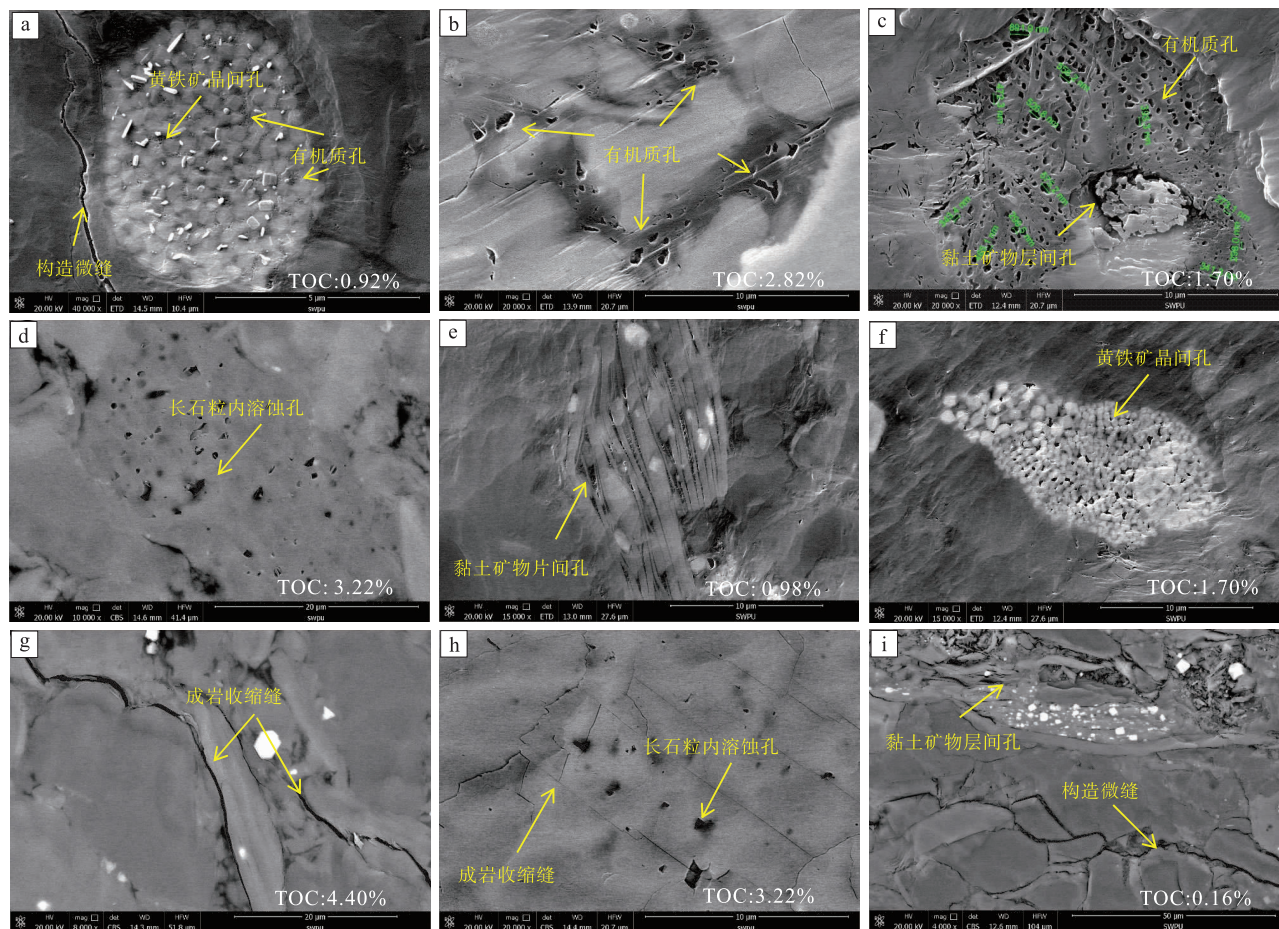
在浅水环境中, 重力流沉积作用导致碎屑快速堆积, 颗粒支撑紧密、压实显著, 仅沿滑塌带或构造应力带形成成岩收缩缝与构造微缝 (图 9-g, 9-h, 9-i)。孔隙度介于 1.39%~4.26% 之间, 平均 2.85%, 为最劣储集层类型 (图 10)。

综上所述, 不同沉积动力条件决定了总有机碳含量、颗粒堆积结构、矿物组合与孔隙形成机制, 从而影响储集层非均质性。

5 沉积演化特征及其对页岩气储集层发育的控制

筇竹寺组页岩储集层的形成与演化受控于不同类型的沉积作用 (悬浮、底流、风暴与重力流) 的交替叠加, 不仅塑造了细粒沉积体系的岩相差异, 也导致储集层物性与含气性沿垂向呈明显分异。通过典型井 Z2 的综合剖面分析 (图 11), 可系统揭示筇竹寺组的沉积演化规律及其对储集层发育与页岩气富集的协同控制。

筇竹寺组在垂向上经历多级海侵—海退旋回,



a—Z7 井, 井深 4424.31 m, 3 小层, 有机质孔; b—Z7 井, 井深 4342.5 m, 5 小层, 有机质孔; c—Z7 井, 井深 4229.81 m 7 小层, 有机质孔; d—Z7 井, 井深 4467.91 m, 1 小层, 粒内溶蚀孔; e—Z7 井, 井深 4298.05 m, 6 小层, 黏土矿物晶间孔; f—Z7 井, 井深 4229.81 m, 7 小层, 黄铁矿晶间孔; g—Z7 井, 井深 4472.01 m, 成岩收缩缝, 1 小层; h—Z7 井, 井深 4456.53 m, 2 小层, 构造微缝与粒内溶蚀孔; i—Z7 井, 井深 4242.38 m, 6 小层, 构造缝

图 9 川南地区筇竹寺组页岩储集空间微观特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of reservoir pore spaces in the Qiongzhusi Formation shale, southern Sichuan Basin

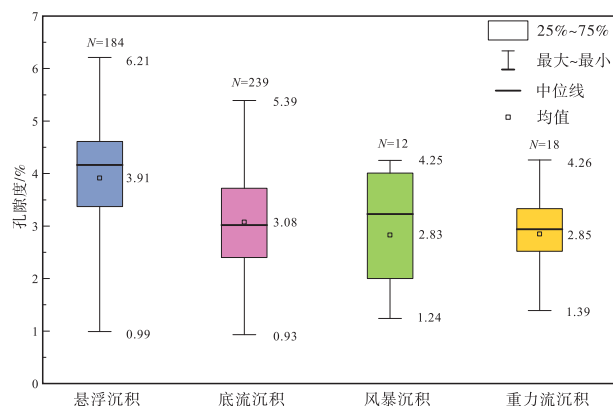


图 10 川南地区筇竹寺组沉积作用与页岩孔隙度关系箱型图

Fig. 10 Boxplot of shale porosity distribution versus sedimentary process types in the Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin

对应深水静稳—底流增强—事件频发—浅水高能 4 个阶段:

1 小层处于海侵初期高海平面阶段, 水体封闭、还原性强, 悬浮絮凝沉积占主导, 形成富有机质硅质页岩, TOC 平均 3.57%, SiO_2 含量 83.8%, 以有机质孔隙和保存较好的无机孔隙为主, 孔隙度为 3%~4%, 含气性最佳 (平均 $10.30 \text{ m}^3/\text{t}$)。

向上至 2 小层, 海平面下降, 底流沉积作用与偶发重力流作用开始介入, 由还原转向贫氧—富氧, 陆源输入增加, 黏土含量上升, 储集空间以无机孔为主。TOC、孔隙度、含气量同步回落。

3 小层沉积期下部延续悬浮沉积特征, TOC 达 2.77%, 孔隙结构良好; 中上部受底流与风暴扰动影响, 陆源输入增加导致有机质稀释, TOC 与含

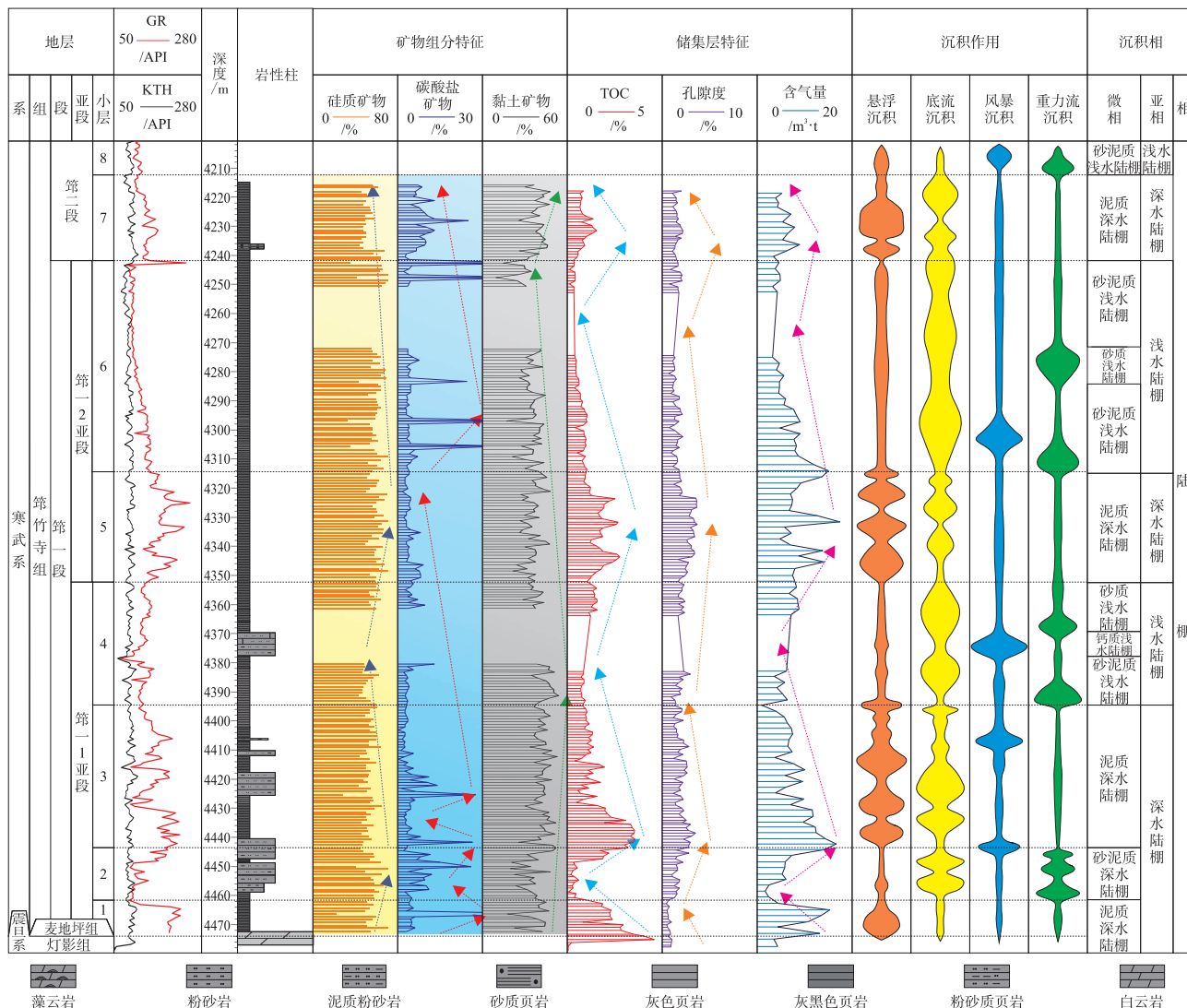


图 11 川南地区 Z2 井筇竹寺组页岩沉积作用与储集层特征关系综合柱状图

Fig. 11 Comprehensive columnar diagram showing relationships between sedimentary processes and reservoir characteristics of the Qiongzhusi Formation shale, Well Z2, southern Sichuan Basin

气性递减。整体表现为由静水沉积向事件沉积的过渡，底部仍具储集层潜力。

4 小层沉积期海平面持续下降，风暴与重力流频繁，沉积能量高、压实强，TOC 仅 0.55%，孔隙发育受限。

5 小层沉积期间经历再一次海侵，沉积环境由高能事件向静水—底流叠加转变，TOC 与孔隙度明显回升，兼具有机孔与无机孔发育，储集层品质优异，是另一重要目标层段。

6-7 小层沉积期受海退与陆源输入增强影响，底流与重力流主导。TOC 为 1.33%~1.15%，黏土增多、压实增强，储集性能下降。

8 小层沉积期进入持续海退浅水环境，风暴与重力流显著，TOC 最低(0.32%)，储气潜力极低。

综合评价表明，1 小层、3 小层底部及 5 小层共同具有高海平面、贫氧—还原环境、悬浮或悬浮—底流混合沉积作用、高 TOC (>2.5%)、高 SiO₂ (>70%) 及较高孔隙度 (>4%) 等特征，具备有机孔与无机孔复合储集空间和优异含气性，为最有利的页岩气富集层段。

6 结论

1) 通过纹层特征识别出川南地区筇竹寺组发育悬浮、底流、风暴及重力流等 4 种沉积作用类

型。悬浮沉积发育水平状长英质纹层和块状构造,底流沉积呈韵律互层,风暴沉积以软沉积物变形构造为标志,重力流沉积呈正粒序特征,各类型纹层构造反映了从低能还原深水环境到高能浅水环境的系统演化。

2) 揭示了沉积作用对储集层品质的差异化控制机制。川南地区筇竹寺组悬浮沉积形成高硅低黏的硅质页岩相,TOC 最高(平均 2.22%)、孔隙度最大(平均 3.91%),有机质孔与无机孔复合发育,为最优储集层类型。随水动力增强,底流、风暴及重力流沉积因陆源输入增加和氧化作用加剧,黏土含量上升、有机质保存效率降低、压实作用增强,导致 TOC 与孔隙度系统性下降,储集层品质明显变差。

3) 川南地区筇竹寺组垂向上经历多期海侵—海退旋回,1 小层、3 小层底部和 5 小层处于海侵高海平面阶段,以悬浮沉积为主,发育硅质页岩相,具有高 TOC(>2.5%)、高硅质(>70%)、高孔隙度(>4%) 和优异含气性(平均 $10.3 \text{ m}^3/\text{t}$) 特征,为最有利页岩气富集层段,可作为水平井靶窗优选的重要地质依据。

参考文献 (References)

- 范海经,邓虎成,伏美燕,刘四兵,余翰泽,李依林. 2021. 四川盆地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]
- 郭彤彬,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]
- 何骁,郑马嘉,刘勇,赵群,石学文,姜振学,吴伟,伍亚,宁诗坦,唐相路,刘达东. 2024a. 四川盆地“槽—隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因. 石油与天然气地质, 45(2): 420–439. [He X, Zheng M J, Liu Y, Zhao Q, Shi X W, Jiang Z X, Wu W, Wu Y, Ning S T, Tang X L, Liu D D. 2024. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen-uplift” tectonic setting, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 420–439]
- 何骁,梁峰,李海,郑马嘉,赵群,刘勇,刘文平. 2024b. 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]
- 黄梓桑,王兴志,杨西燕,朱如凯,崔景伟,卢远征,李勇. 2021. 沉积环境对页岩中有机质富集的约束: 以蜀南地区五峰组—龙马溪组为例. 沉积学报, 39(3): 631–644. [Huang Z S, Wang X Z, Yang X Y, Zhu R K, Cui J W, Lu Y Z, Li Y. 2021. Constraints of Sedimentary environment on organic matter accumulation in shale: a case study of the Wufeng–Longmaxi Formations in the southern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 631–644]
- 江凯禧,彭丽,何文祥,郭清正,姚长华,张曼婷. 2014. 页岩气储层非均质性研究: 以四川盆地寒武统筇竹寺组为例. 海洋地质前沿, 30(8): 47–54. [Jiang K X, Peng L, He W X, Guo Q Z, Yao C H, Zhang M T. 2014. Research of shale gas reservoir heterogeneity: a case of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of the Sichuan Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(8): 47–54]
- 李华,何幼斌. 2017. 等深流沉积研究进展. 沉积学报, 35(2): 228–240. [Li H, He Y B. 2017. Research processes on contourites. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 228–240]
- 李利阳. 2015. 浊流沉积研究的新进展: 鲍马序列、海底扇的重新审视. 沉积与特提斯地质, 35(4): 106–112. [Li L Y. 2015. Current advances in the research of turbidity current deposits: reinterpretation of the Bouma sequence and submarine fan deposits. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(4): 106–112]
- 李一凡,魏小洁,樊太亮. 2021. 海相泥页岩沉积过程研究进展. 沉积学报, 39(1): 73–87. [Li Y F, Wei X J, Fan T L. 2021. A review on sedimentary processes of marine mudstones and shales. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 73–87]
- 廖崇杰,陈雷,陈鑫,秦何星,熊敏,郑健,谭秀成,曹剑. 2026. 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. 古地理学报, 28(5): 1819–1838. [LIAO C J, CHEN L, CHEN X, QIN H X, XIONG M, ZHENG J, TAN X C, CAO J. 2026. Lithofacies characteristics and sedimentation–diagenesis controls on reservoir quality of the Qiongzhusi Formation shale in southern Deyang–Anyue rift though, Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 28(5): 1819–1838]
- 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 Shell Fossils in China*. Beijing: Science Press]
- 施振生,董大忠,王红岩,孙莎莎,武瑾. 2020. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因: 以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例. 石油勘探与开发, 47(4): 829–840. [Shi Z S, Dong D Z, Wang H Y, Sun S S, Wu J. 2020. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: a case study of Member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 829–840]
- 唐佰强,孟庆涛,杨亮,胡菲,谭悦,邢济麟,刘招君,张恩威,董秦玮. 2025. 基于 BSMOTE-SVM 的细粒沉积岩岩相智能预测: 以松辽盆地青山口组一段为例. 古地理学报, 27(4): 937–949. [Tang B Q, Meng Q T, Yang L, Hu F, Tan Y, Xing J L, Liu Z J, Zhang E W, Dong Q W. 2025. Intelligent prediction of fine-grained sedimentary lithofacies based on BSMOTE-SVM: a case study of the Member

- 1 of Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 27(4): 937-949]
- 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 张文涛, 潘安阳, 申宝剑, 王晔, 仰云峰, 高志伟. 2021. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用. *石油勘探与开发*, 48(4): 687-699. [Ten G E, Lu L F, Yu L J, Zhang W T, Pan A Y, Sheng B J, Wang Y, Yang Y F, Gao Z W. 2021. Formation, preservation and connectivity control of organic pores in shale. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4): 687-699]
- 王红岩, 施振生, 赵群, 周天琪, 汪鹏飞. 2025. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布. *煤田地质与勘探*, 53(3): 72-89. [Wang H Y, Shi Z S, Zhao Q, Zhou T Q, Wang P F. 2025. Stratigraphic characteristics and shale gas enrichment interval distribution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region, China. *Coal Geology & Exploration*, 53(3): 72-89]
- 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. Advantagous shale lithofacies of Wufeng Formation—Longmaxi Formation in Fuling Gas Field of Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 189-197]
- 武瑾, 李海, 杨学锋, 赵圣贤, 郭伟, 孙玉平, 刘永畅, 刘兆龙. 2023. 深层海相页岩纹层类型、组合及其对储层品质的影响. *石油学报*, 44(9): 1517-1531. [Wu J, Li H, Yang X F, Zhao S X, Guo W, Sun Y P, Liu Y Y, Liu Z L. 2023. Types and combinations of deep marine shale laminae and their effects on reservoir quality. *Acta Petrolei Sinica*, 44(9): 1517-1531]
- 谢小敏, 刘伟新, 张瀛, 赵迪斐, 唐友军, 申宝剑, 李志明. 2021. 四川盆地地下古生界硅质页岩层系中硅质来源及其对有机质保存的影响初探. *地质论评*, 67(2): 429-440. [Xie X M, Liu W X, Zhang Y, Zhao D F, Tang Y J, Shen B J, Li Z M. 2021. Siliceous source and its influence on organic matter preservation of the two Lower Paleozoic siliceous shale reservoirs in Sichuan Basin. *Geological Review*, 67(2): 429-440]
- 熊亮, 邓虎成, 吴冬, 魏力民, 王同, 周桦, 曹凯旋, 解馨慧, 马若龙, 钟雨菊. 2023. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素. *石油实验地质*, 45(5): 857-871. [Xiong L, Deng H C, Wu D, Wei L M, Wang T, Zhou H, Cao K X, Xie X H, Ma R L, Zhong Y T. 2023. Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(5): 857-871]
- 熊亮, 董晓霞, 魏力民, 王同, 沈杰, 何建华, 邓虎成, 徐浩. 2024. 川西南井研—犍为地区筇竹寺组沉积古环境与有机质富集机制. *天然气地球科学*, 35(12): 2091-2105. [Xiong L, Dong X X, Wei L M, Wang T, Shen J, He J H, Deng H C, Xu H. 2024. Sedimentary paleoenvironment and organic matter enrichment mechanism of the Qiongzhusi Formation in Jingyan-Qianwei area, Southwest Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 35(12): 2091-2105]
- 熊敏, 陈雷, 陈鑫, 计玉冰, 吴佩津, 胡月, 王高翔, 彭浩. 2022. 海相页岩纹层特征、成因机理及其页岩气意义. *中南大学学报(自然科学版)*, 53(9): 3490-3508. [Xiong M, Chen L, Chen X, Ji Y B, Wu P J, Hu Y, Wang G X, Peng H. 2022. Characteristics, genetic mechanism of marine shale laminae and its significance of shale gas accumulation. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(9): 3490-3508]
- 杨学锋, 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 罗超, 陈玉龙, 施振生, 谢圣阳, 任春昱, 陈鑫, 周天琪, 谢睿. 2025. 川南地区筇竹寺组页岩气藏特征及勘探启示. *天然气地球科学*, 36(1): 13-24. [Yang X F, Zhang C L, Zhao S X, Zhang J, Luo C, Chen Y L, Shi Z S, Xie S Y, Ren C Y, Chen X, Zhou T Q, Xie R. 2025. Characteristics of shale gas reservoir and enlightenment of exploration in Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 13-24]
- 杨一茗, 石学文, 刘文平, 吴伟, 何一凡, 李彦佑, 张亦弛, 杨雨然, 朱逸青, 刘佳, 吴喆. 2024. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选. *天然气地球科学*, 35(12): 2106-2120. [Yang Y M, Shi X W, Liu W P, Wu W, He Y F, Li Y Y, Zhang Y C, Yang Y R, Zhu Y Q, Liu J, Wu Z. 2024. Sedimentary evolution model and favorable facies belt selection of the Qiongzhusi Formation in the middle section of the Deyang-Anyue rift in the Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(12): 2106-2120]
- 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]
- 张斌, 毛治国, 张忠义, 袁懿琳, 陈小亮, 石雨昕, 刘广林, 邵晓州. 2021. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段黑色页岩形成环境及其对页岩油富集段的控制作用. *石油勘探与开发*, 48(6): 1127-1136. [Zhang B, Mao Z G, Zhang Z Y, Yuan Y L, Chen X L, Shi Y X, Liu G L, Shao X Z. 2021. Black shale formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1127-1136]
- 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]
- 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 侯连华, 吴松涛. 2020. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义. *石油勘探与开发*, 47(6): 1079-1089. [Zhao W Z, Zhu R K, Hu S Y, Hou L H, Wu S T. 2020. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1079-1089]
- 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.

- Bouma A H, Kuenen P H, Shepard F P. 1962. Sedimentology of some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation. Amsterdam, Elsevier.
- Catuneanu O, Galloway W E, Kendall C G S C, Miall A D, Posamentier H W, Strasser A, Tucker M E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44: 173–245.
- Dott R H, Bourgeois J. 1982. Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 93: 663.
- Duke W L. 1990. Geostrophic circulation or shallow marine turbidity currents? The dilemma of paleoflow patterns in storm-influenced prograding shoreline systems. *Journal of Sedimentary Research*, 60: 870–883.
- Gamero-Diaz H, Miller C, Lewis R. 2013. A mineralogy based classification scheme for organic mudstones. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. September 30–October 2, 2013. New Orleans, Louisiana, USA. Richardson: Society of Petroleum Engineers, SPE166284–MS.
- Gonthier E G, Faugères J C, Stow D A V. 1984. Contourite facies of the faro drift, gulf of Cadiz. *Geological Society, London, Special Publications*, 15: 275–292.
- Hage S, Galy V V, Cartigny M J B, Heerema C, Heijnen M S, Acikalin S, Clare M A, Giesbrecht I, Gröcke D R, Hendry A, Hilton R G, Hubbard S M, Hunt J E, Lintern D G, McGhee C, Parsons D R, Pope E L, Stacey C D, Sumner E J, Tank S, Talling P J. 2022. Turbidity currents can dictate organic carbon fluxes across river-fed fjords: an example from bute inlet (BC, Canada). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127: e2022JG006824.
- Jelby M E, Grundvåg S A, Helland-Hansen W, Olaussen S, Stemmerik L. 2020. Tempestite facies variability and storm-depositional processes across a wide ramp: towards a polygenetic model for hummocky cross-stratification. *Sedimentology*, 67: 742–781.
- Khan M Z, Feng Q L, Zhang K, Guo W. 2019. Biogenic silica and organic carbon fluxes provide evidence of enhanced marine productivity in the Upper Ordovician – Lower Silurian of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534: 109278.
- Knapp L J, Ardakani O H, Uchida S, Nanjo T, Otomo C, Hattori T. 2020. The influence of rigid matrix minerals on organic porosity and pore size in shale reservoirs: Upper Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 227: 103525.
- Lazar O R, Bohacs K M, MacQuaker J H S, Schieber J, Demko T M. 2015. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: nomenclature and description guidelines. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 230–246.
- Li Y F, Zhang T W, Ellis G S, Shao D Y. 2017. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician–Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 466: 252–264.
- Lowe D R. 1982. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 52: 279–297.
- MacQuaker J H S, Bohacs K M. 2007. On the accumulation of mud. *Science*, 318: 1734–1735.
- 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, Olson T. 2017. Silica diagenesis, porosity evolution, and mechanical behavior in siliceous mudstones, Mowry Shale (cretaceous), Rocky Mountains, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 87: 366–387.
- Molina, Alfaro, Moretti, Soria. 1998. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain). *Terra Nova*, 10: 145–150.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48: 269–299.
- Myrow P M, Southard J B. 1996. Tempestite deposition. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 875–887.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society, London, Special Publications*, 29: 11–24.
- Owen G. 2003. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface, in *Subsurface Sediment Mobilization*. Geological Society of London, 216: 21–34.
- Owen G, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology*, 235: 141–147.
- Pedersen T F, Calvert S E. 1990. *Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks?* AAPG Bulletin, 74: 454–466.
- Pickering K, Stow D, Watson M, Hiscott R. 1986. Deep-water facies, processes and models: a review and classification scheme for modern and ancient sediments. *Earth-Science Reviews*, 23: 75–174.
- Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, Wählin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations. *Marine Geology*, 352: 111–154.
- Schieber J. 2016. Mud re-distribution in epicontinental basins-Exploring likely processes. *Marine and Petroleum Geology*, 71: 119–133.
- Schieber J, Southard J B, Schimmelmann A. 2010. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds: interpreting the rock record in the light of recent flume experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 119–128.
- Shanmugam G. 2020. Gravity flows: Types, definitions, origins, identification markers, and problems: gravity lows. *Journal of the Indian Association of Sedimentologists*, 37: 61–90.
- Stow D A V, Faugères J C. 2008. Chapter 13 contourite facies and the facies model. *Contourites*. Amsterdam: Elsevier: 223–256.
- Talling P J, Masson D G, Sumner E J, Malgesini G. 2012. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59: 1937–2003.
- Tyson R V. 2001. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modelling study. *Organic Geochemistry*, 32: 333–339.
- Woo J, Lee H S, Ozyer C, Rhee C W. 2021. Effect of lamination on shale reservoir properties: case study of the montney formation, Canada. *Geofluids*, 2021: 8853639.

(责任编辑 王绍华)