

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.084>



德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积环境控制下的优质页岩岩相类型及分布

宁诗坦¹, 唐相路^{1,2*}, 徐亮³, 姜振学¹, 史德民¹, 郑继威¹, 钟可塑³, 李彦佑³

1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)新疆油气智能勘探与开发重点实验室, 新疆克拉玛依 834000
3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川成都 610051

摘要: 四川盆地筇竹寺组页岩的沉积受德阳-安岳裂陷槽构造-沉积分异控制, 其岩相类型及分布与沉积环境密切相关. 在前人对筇竹寺组研究的基础上, 综合运用岩心观察、薄片鉴定和地球化学测试分析对裂陷槽中段筇竹寺组页岩进行岩相类型划分, 并讨论了沉积环境控制下的优质页岩岩相类型及分布. 结果表明: (1) 裂陷槽内沉积环境具显著分异特征, 槽内中心以生物成因高硅质沉积为主导, 形成强还原环境双阈值边界, 古生产力与水体滞留程度达峰值; 槽缘则以陆源碎屑输入为主. 平面上呈现“槽缘氧化-槽内缺氧”的递变模式, 纵向上表现为“底部缺氧-中部贫氧-上部氧化”的沉积环境变化; (2) 建立了“TOC-矿物组成-粒度特征”耦合岩相分类体系, 划分出 36 种岩相类型, 明确裂陷槽中段发育富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS)等 16 种岩相类型, 系统揭示了页岩非均质性特征, 为深层页岩气甜点预测提供新思路; (3) 优质岩相主要为富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩(H-A-SS)和富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS), 集中分布于筇竹寺组 1、3、5、7 小层深水陆棚相, 深水贫氧-缺氧环境促进有机质富集与保存, 高含量长英质矿物提供了优质储集空间. 研究成果可为四川盆地深层页岩气资源评价与开发提供关键地质依据.

关键词: 四川盆地; 德阳-安岳裂陷槽; 岩相类型; 沉积环境; 有机质富集; 页岩气; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2025)09-3631-20

收稿日期: 2025-03-26

Lithofacies Types and Distribution of High-Quality Shale Driven by Sedimentary Environments: A Case Study of the Qiongzhusi Formation Shale

Ning Shitan¹, Tang Xianglu^{1,2*}, Xu Liang³, Jiang Zhenxue¹, Shi Deming¹,
Zheng Jiwei¹, Zhong Kesu³, Li Yanyou³

1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Exploration and Development of Oil and Gas, China University of Petroleum (Beijing), Karamay 834000, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42372144).

作者简介: 宁诗坦(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事非常规油气储层预测与评价方面的研究. ORCID: 0009-0007-8839-6028. E-mail: 2023311213@student.cup.edu.cn

* **通讯作者:** 唐相路, E-mail: tangxl@cup.edu.cn

引用格式: 宁诗坦, 唐相路, 徐亮, 姜振学, 史德民, 郑继威, 钟可塑, 李彦佑. 2025. 德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积环境控制下的优质页岩岩相类型及分布. 地球科学, 50(9): 3631-3650.

Citation: Ning Shitan, Tang Xianglu, Xu Liang, Jiang Zhenxue, Shi Deming, Zheng Jiwei, Zhong Kesu, Li Yanyou. 2025. Lithofacies Types and Distribution of High-Quality Shale Driven by Sedimentary Environments: A Case Study of the Qiongzhusi Formation Shale. *Earth Science*, 50(9): 3631-3650.

3. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610051, China

Abstract: The sedimentation of the Qiongzhusi Formation shale in the Sichuan Basin is controlled by the tectonic-sedimentary differentiation of the Deyang-Anyue Rift Trough. Its lithofacies types and distribution are closely related to sedimentary environments. Based on previous studies of the Qiongzhusi Formation, this research comprehensively uses core observation, thin-section identification, and geochemical testing and analysis to classify the lithofacies types of the Qiongzhusi Formation shale in the middle segment of the rift trough, and discusses the high quality shale lithofacies types and their distribution controlled by sedimentary environments. The results show that: (1) The sedimentary environment within the rift depression exhibits distinct differentiation characteristics. The central part of the depression is dominated by biogenic high-silica deposits, forming a strong reducing environment with a dual-threshold boundary, where ancient productivity and water retention reach their peak; the trough margin is dominated by terrigenous clastic input. Horizontally, it shows a gradational pattern of “oxidizing margin-anoxic trough,” while vertically, it exhibits a cyclic evolution of “anoxic at the bottom-dysoxic in the middle-oxidizing at the top.” (2) “TOC-mineral-grain size” coupling lithofacies classification system is established, with 36 lithofacies types divided. It is clarified that 16 lithofacies types develop in the middle segment of the rift trough, such as organic-rich felsic shale (H-F-S) and organic-rich mixed silty shale (H-M-SS), systematically revealing the heterogeneity characteristics of shale and providing new ideas for predicting deep shale gas sweet spots. (3) The high-quality lithofacies are mainly organic-rich felsic shale (H-F-S), organic-rich mixed shale (H-M-S), organic-rich felsic silty shale (H-F-SS), organic-rich argillaceous silty shale (H-A-SS), and organic-rich mixed silty shale (H-M-SS), which are concentrated in the deep-water shelf facies of the 1st, 3rd, 5th, and 7th sub-layers of the Qiongzhusi Formation. The deep-water dysoxic-anoxic environments promote organic matter enrichment and preservation, and high felsic mineral content provides high-quality reservoir spaces. The research results provide key geological bases for the evaluation and development of deep shale gas resources in the Sichuan Basin.

Key words: Sichuan basin; Deyang-Anyue rift trough; lithofacies type; sedimentary environment; organic matter enrichment; shale gas; petroleum geology.

0 引言

四川盆地页岩气资源丰富,筇竹寺组和五峰组-龙马溪组是最早开展勘探研究的层系,其中五峰组-龙马溪组页岩气勘探开发已取得战略性突破并实现规模化商业开采(Yang *et al.*, 2022; 吴建发等, 2023; Zou *et al.*, 2023; 吴永辉等, 2024).而在新一轮的油气勘探突破中,中国石油和中国石化相继在德阳-安岳裂陷槽及边缘部署了WY1井、Z201井、ZY1井和JS103HF井并且获得了重大突破,中国石油部署的WY1井和Z201井日产量分别为 $41.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3$,中石化部署的ZY1井和JS103HF井日产量分别达 $125.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $25.86 \times 10^4 \text{ m}^3$,这些勘探部署井获得的高产工业气流证实了古老地层寒武系筇竹寺组存在着连续、大面积的页岩气储量资源(杨学锋等, 2025).

四川盆地德阳-安岳裂陷槽控制着沉积相和地层分布,槽内中心为低能、还原-弱氧化环境的深水陆棚相,有利于有机质保存和优质烃源岩发育,地层沉积厚度也最大,向裂陷槽两侧逐渐过渡为浅水

陆棚相沉积环境(何骁等, 2024b; 郑马嘉等, 2024).在构造-沉积分异的控制下,裂陷槽不同部位岩性组合类型变化大,发育泥页岩、粉砂质页岩及砂岩等不同岩相组合类型(Li *et al.*, 2023; 刘瑞奎等, 2023).按照主要岩性、古生物、测井和沉积旋回特征可将筇竹寺组划分为8个小层,其中1、3、5和7小层为黑色页岩段,2、4、6和8小层为粉砂质页岩或粉-细砂岩段,第一₁亚段包括1至4小层,第一₂亚段包括5小层和6小层,第二段包括7小层和8小层(何骁等, 2024b; 雍锐等, 2024a).此外,裂陷槽及其边缘发育着一套完整的筇竹寺组页岩地层,埋深4 000~5 500 m、厚度220~400 m、烃源岩厚度普遍大于50 m,热演化程度较高 $R_o=3.0\% \sim 3.5\%$,该地区具备大规模气藏富集的条件(梁霄等, 2022; 谢国梁等, 2024; 雍锐等, 2024b).尽管前期研究在四川盆地页岩气勘探方面取得了诸多进展,并且不同学者根据筇竹寺组页岩的不同特征,采用了不同的划分方法对其进行岩相类型划分.袁钰轩等(2023)通过沉积构造、层理特征和矿物组分参数将川西南地区筇竹寺页岩岩相划分为11类;谢国梁等

(2024)通过矿物组分将四川盆地筇竹寺岩相划分为12类;张明何等(2024)综合TOC、沉积构造和力学性质将川北筇竹寺组页岩岩相划分成16类.但目前的筇竹寺岩相划分方案未能充分考虑到当前勘探开发过程中,粉砂质页岩和黑色页岩交替发育的现象,这些岩层不仅具有明显的矿物颗粒特征,还表现出富气特征,是岩相划分中的一个重要考虑因素.

因此,合理的岩相类型划分对页岩气勘探评价和有利区优选具有重要的指导意义,对于筇竹寺组页岩粉砂型页岩段和泥页岩段存在的富气现象,需要建立合理的岩相划分方案对筇竹寺组不同层段进行划分,进而了解筇竹寺组页岩不同岩相类型富气机理.基于此,笔者在总结前人对W207井的相关研究基础上,结合槽缘斜坡WY1井和槽内中心Z201井相关实验资料,对德阳-安岳裂陷槽中段的筇竹寺组页岩进行岩相类型划分,对裂陷槽及斜坡边缘部位的筇竹寺沉积环境、沉积相差异进行对比研究,并分析了岩相与沉积环境、沉积相、有机质富集之间的分布关系,以期对筇竹寺组页岩勘探开发提供一定的借鉴思路.

1 区域地质概况

四川盆地位于上扬子板块西北缘,是一套经过多期旋回构造运动叠加的大型构造-沉积叠合盆地,先后经历了震旦系-中三叠统的海相沉积和下三叠统的陆相沉积演化阶段(刘树根等,2009;杨梅华等,2023).在南华纪,罗迪尼亚超大陆的裂解启动了原特提斯洋的演化进程.此时,上扬子地块西北边缘的四川盆地经历了伸展构造,震旦纪至早寒武世的桐湾运动使灯影组遭遇抬升和剥蚀.长宁-内江-德阳一线形成了近南北向的裂陷槽(德阳-安岳裂陷槽,又称绵阳-长宁拉张槽),具有“北深南浅,东陡西缓”的特征(图1a)(邱玉超等,2019;杨雨等,2022).威远-资阳研究区主体处于裂陷槽内部,部分位于裂陷槽边界处(图1b).裂陷内发育了北西向的张性断层,寒武系底界的断距为300~400 m,多数断层在龙王庙组中消失.裂陷构造和沉积分异使得下寒武统的沉积厚度和沉积相在裂陷中心与边缘间存在明显差异(邹才能等,2014).在裂陷区,麦地坪组发育斜坡-盆地相,厚度在100~200 m,而在裂陷外则为碳酸盐台地相,厚度通常小于50 m.筇竹寺组的沉积相呈带状分布,裂陷中心以碳泥质深水陆棚为主,厚度在400~

800 m,而向外缘逐渐过渡为砂泥质和泥质浅水陆棚,厚度为100~300 m(杨学锋等,2025).

2 样品和方法

本次研究样品主要收集自德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组,包括槽缘斜坡的W207井(44件)、WY1井(60件)及槽内中心的Z201井(51件),共获取筇竹寺组页岩样品155件.样品覆盖筇竹寺组1~8小层,岩性涵盖黑色页岩、粉砂质页岩及粉-细砂岩,详细采样位置见图1c.

研究方法以宏观到微观、岩性表征到地球化学分析方式进行,具体方法如下:通过岩心观察与描述系统记录筇竹寺组页岩颜色、沉积构造等特征,初步明确筇竹寺组不同岩性宏观特征;采用偏光显微镜对岩石薄片进行鉴定,同步开展矿物成分观察、结构特征分析及碎屑颗粒粒径统计,完成碎屑颗粒粒级划分及微观岩性识别;通过全岩X射线衍射分析获取矿物组成成分含量,基于长英质矿物、碳酸盐岩矿物和黏土矿物含量进行三端元矿物岩相划分,明确筇竹寺页岩主要岩相类型.同时利用主微量测试仪器Agilent 7900 ICP-MS进行主微量元素测试,结合CS230碳硫分析仪开展总有机碳(total organic carbon, TOC)含量测定,以揭示筇竹寺组页岩沉积环境特征及有机质富集情况,研究整合以往学者对筇竹寺组W207井区前期沉积环境研究分析测试成果(梁霄等,2022;刘瑞崑等,2023;梁峰等,2024;张天怡等,2024),探究沉积环境控制下的筇竹寺组优质页岩岩相类型及分布关系.

3 实验结果分析

3.1 矿物组成特征

筇竹寺组页岩的矿物组分主要以石英、长石和黏土矿物为主.基于3口井的全岩矿物X衍射定量分析结果(质量分数),分别以长英质矿物(长石+石英)、碳酸盐矿物(白云石+方解石)和黏土矿物3种为主要矿物类型进行比较:长英质矿物在3口井中含量最高,W207井长英质矿物含量在21.10%~70.50%,均值在57.84%.WY1井长英质矿物含量在27.58%~63.88%,均值在52.10%.Z201井长英质矿物含量在52.70%~91.30%,均值在71.11%;黏土矿物含量次之,W207井黏土矿物含量在5.70%~39.70%,均值在25.00%.WY1井黏土矿物含量在

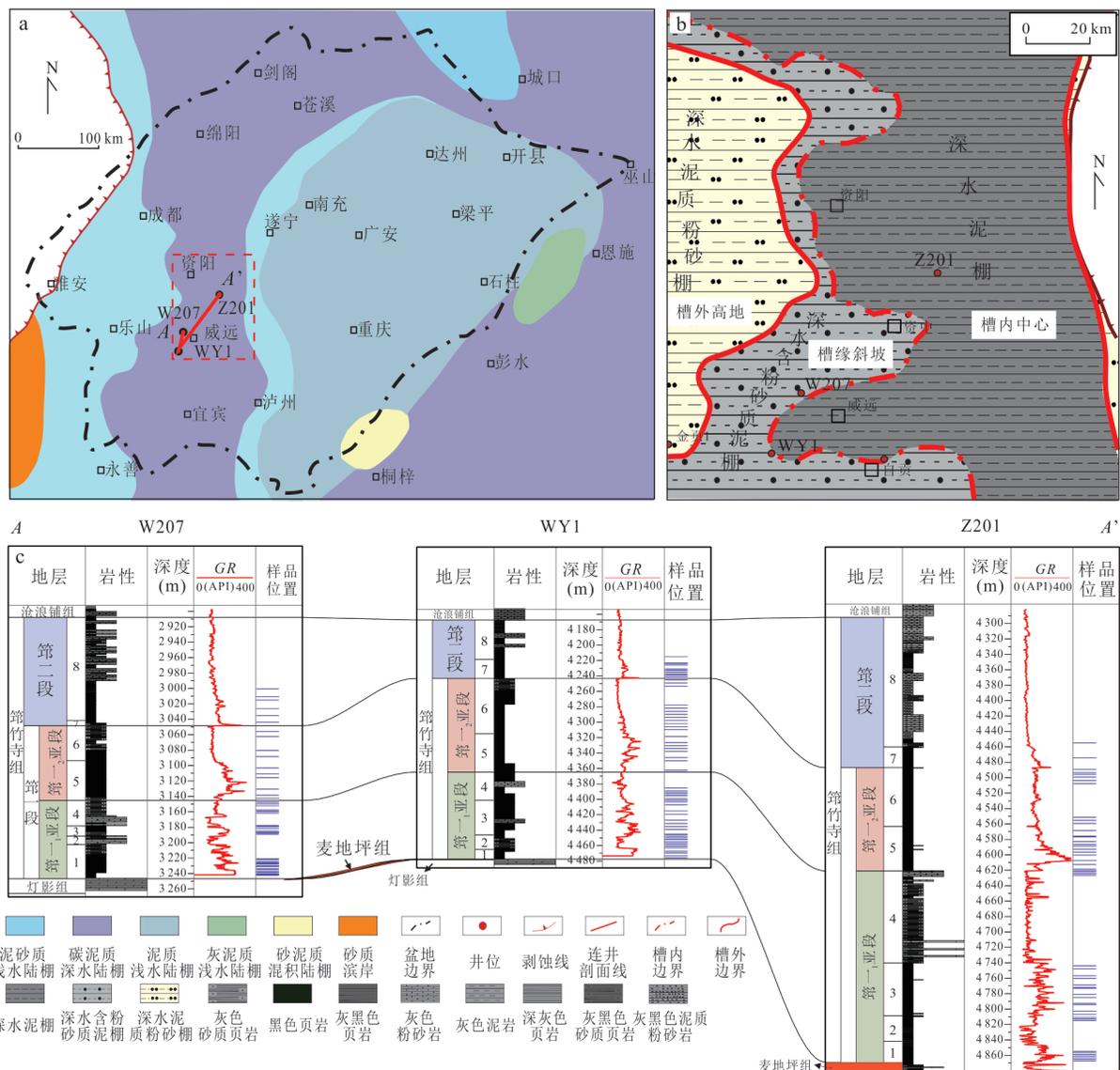


图 1 四川盆地沉积相平面分布及连井剖面

Fig.1 Plane distribution of sedimentary facies and connecting well section in Sichuan basin

沉积相底图修改自文献何晓等(2024a)、雍锐等(2024b)

16.47%~49.54%，均值在 38.27%。Z201 井黏土矿物含量在 3.40%~26.90%，均值在 16.34%；碳酸盐矿物在 3 口井中含量均较低，W207 井碳酸盐矿物含量在 2.60%~71.10%，均值在 11.50%。WY1 井碳酸盐矿物含量在 0.82%~49.71%，均值在 7.08%。Z201 井碳酸盐矿物含量在 2.60%~41.20%，均值在 8.05% (图 2a~2c)。

纵向分布上，第一₁亚段长英质矿物 Z201 井均值最高(67.4%)，W207 井最低(48.7%)；碳酸盐矿物含量 W207 井较高(均值 10.2%)；黏土矿物 WY1 井均值最高(37.5%)。第一₂亚段长英质矿物 Z201 井均值最高(71.6%)，且波动小，反映稳定高能环

境；碳酸盐矿物 W207 井均值最高(9.8%)，WY1 井最低(6.3%)；黏土矿物 WY1 井含量最高(37.1%)。第二段长英质矿物 Z201 井均值最高(67.4%)，W207 井最低(48.7%)；碳酸盐矿物 WY1 井均值最高(16.8%)，Z201 井最低(9.2%)。黏土矿物 W207 井显著偏高(34.2%)，Z201 井最低(21.5%)。不同井位纵向上矿物组成差异显著，初步分析表明 Z201 井受高能环境影响长英质矿物含量高，自身成岩富集程度高，W207、WY1 井受陆源物质和自身成岩作用共同影响，黏土矿物和长英质矿物均有较高富集。

3.2 总有机碳含量特征

筇竹寺组页岩总有机碳 TOC 含量分布在

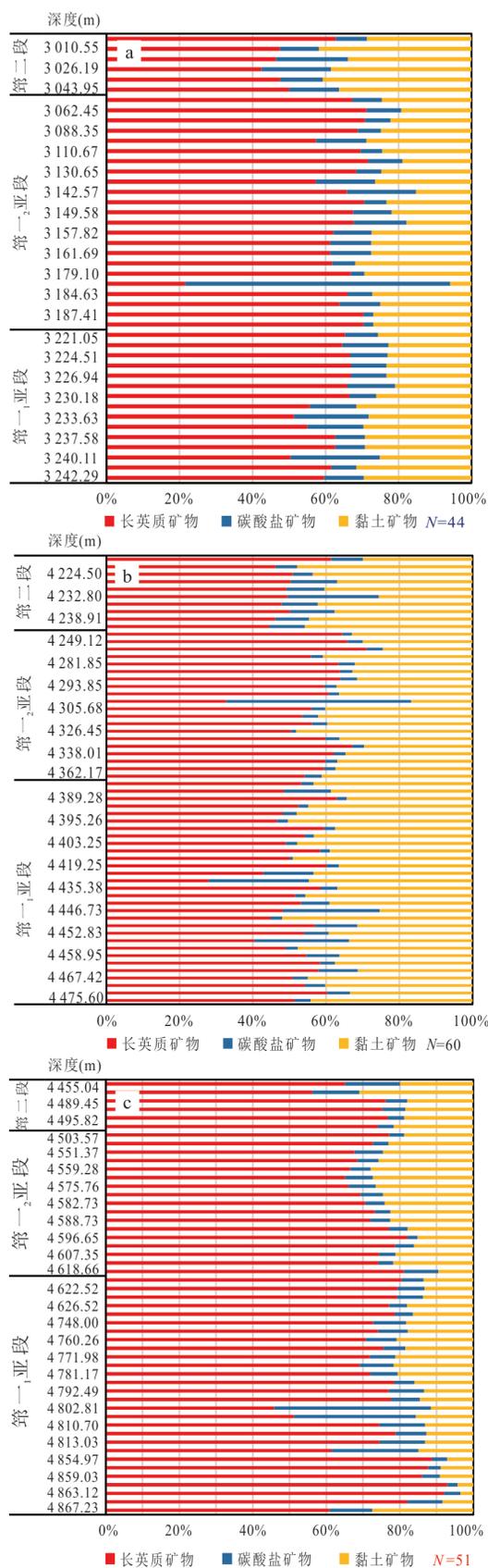


图 2 筇竹寺组三段元矿物组分分布条形图

Fig.2 Three end-member mineral composition distribution bar chart of Qiongzhusi Formation

a. W207 井; b. WY1 井; c. Z201 井

0.11%~7.13%, 均值在 1.72%。其中, W207 井第一₁亚段 TOC 含量分布在 0.18%~3.41%, 均值在 1.53%, 第一₂亚段 TOC 含量分布在 0.30%~2.94%, 均值在 0.99%, 第二段 TOC 含量分布在 0.39%~1.28%, 均值在 0.75%; WY1 井第一₁亚段 TOC 含量分布在 0.11%~4.06%, 均值在 1.81%, 第一₂亚段 TOC 含量分布在 0.39%~3.02%, 均值在 1.28%, 第二段 TOC 含量分布在 0.62%~1.48%, 均值在 0.96%; Z201 井第一₁亚段 TOC 含量分布在 0.40%~7.13%, 均值在 2.84%, 第一₂亚段 TOC 含量分布在 1.00%~4.69%, 均值在 1.84%, 第二段 TOC 含量分布在 1.09%~1.55%, 均值在 1.31%。

在地层纵向上, TOC 含量变化幅度大, 筇竹寺组底部第一₁亚段 TOC 含量最高, W201 井、WY1 井和 Z201 井的第一₁亚段 TOC 含量均值分别为 2.84%、1.81% 和 1.53%, 向上部 TOC 含量逐渐变小。在地层横向上, 位于槽内的 Z201 井 TOC 含量最高, 槽缘 WY1 井次之, 槽外 W207 井最低, 表现出 TOC 含量从裂陷槽中心向外至槽缘斜坡递减的趋势(图 3)。

3.3 粒度特征

泥页岩属于细粒沉积岩的一类, 通常将细粒沉积岩按照矿物粒度细分为泥页岩(页岩)、粉砂质页岩和砂质页岩(李一凡等, 2021)。笔者根据 Lazar (2007) 的分类方案: 对矿物颗粒范围在 62.5~2 500 μm (含量在 25%~50%) 的定义为砂质, 颗粒粒度在 8~62.5 μm (含量在 25%~50%) 的定义为粉砂质, 而颗粒粒度在 8 μm (含量大于 50%) 以下的定义为泥质(Lazar, 2007; 袁钰轩等, 2023)。粒度能够反映页岩的沉积环境和成因过程, 对页岩进行粒度分析有助于精细划分岩相, 提供更准确的岩相方案, 进而更好地揭示页岩的储层和气藏特征。并且粒度分布研究可以帮助区分不同的岩相单元, 以识别不同的沉积层理和地层演化, 有助于评估不同类型页岩的储集能力及其可采性, 因此本研究将页岩粒度分布特征作为岩相划分的重要依据。光学镜下的薄片观察和通过 Image J 提取矿物碎屑颗粒粒径可知, 筇竹寺组碎屑矿物颗粒主要以粉砂质和泥质为主, 同时还含有砂质(图 4)。表明筇竹寺组沉积环境变化较大, 均发育泥页岩、粉砂质页岩和砂质页岩三种类型岩性, 岩性特征变化明显。

3.4 主微量元素特征

在主微量元素分析实验结果中, 筇竹寺组页岩

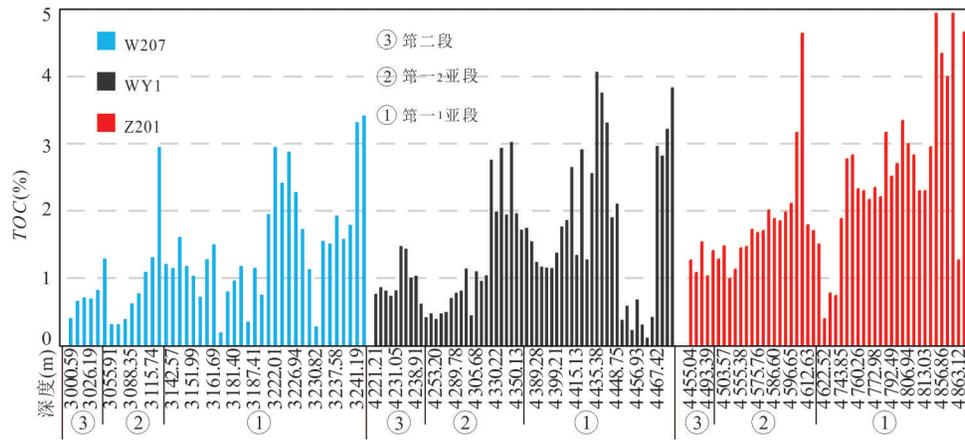


图3 筇竹寺组 TOC 含量分布柱状图

Fig.3 Column diagram of TOC content distribution in Qiongzhusi Formation



图4 筇竹寺组页岩典型岩性特征及薄片照片

Fig.4 Shale lithology characteristics and thin section photos of Qiongzhusi Formation

a. W207 井, 3 051.03 m, 第一₂亚段 6 小层, 砂质页岩, 25% < 砂质 (62.5~2 500 μm) < 50%, TOC=0.3%; b. W207 井, 3 117.98 m, 第一₂亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 μm) > 50%, TOC=3.31%; c. WY1 井, 4 291.59 m, 第一₂亚段 6 小层, 粉砂质页岩, 25% < 粉砂质 (8~62.5 μm) < 50%, TOC=1.24%; d. WY1 井, 4 321.37 m, 第一₂亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 μm) > 50%, TOC=2.14%; e. Z201 井, 4 502.89 m, 第一₂亚段 6 小层, 粉砂质页岩, 25% < 粉砂质 (8~62.5 μm) < 50%, TOC=1.29%; f. Z201 井, 4 607.27 m, 第一₂亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 μm) > 50%, TOC=1.89%

中 SiO₂ 含量最高, W207、WY1 井和 Z201 井 SiO₂ 质量分数平均值均超过 50%。在地层垂向分布中, W207 井和 WY1 井的 SiO₂ 含量在第一₂亚段最高, 第一₁亚段次高, 第二段含量较低(表 1)。此外, Al 和 Fe 元素在筇竹寺组页岩也有较高的含量显示, 其中, Al 元素含量在 3 口井的第一₂亚段中最低, 向地层上部 Al 元素含量逐渐增加。Si₂O

和 Al 含量的变化与筇竹寺组页岩中石英、长石和黏土矿物组分变化有着密切的联系, 与矿物成分含量有着明显的协同性。微量元素含量在每口井筇竹寺组各段中均有较大的差异分布, 在 3 口井中, 微量元素 Ba、V 和 Zn 含量最高(表 1)。

澳大利亚后太古代页岩(PAAS)主微量元素的含量被广泛用作地球化学研究的基准值。通过将样

表 1 裂陷槽中段 W207、WY1 和 Z201 井主量元素 (%) 和微量元素 (10⁻⁶) 分析结果

Table 1 Analysis results of major elements (%) and trace elements (10⁻⁶) in wells W207, WY1 and Z201 in the middle part of rift trough

元素	W207 井			WY1 井			Z201 井		
	第二段	第一 ₂ 亚段	第一 ₁ 亚段	第二段	第一 ₂ 亚段	第一 ₁ 亚段	第二段	第一 ₂ 亚段	第一 ₁ 亚段
SiO ₂	53.88~62.95 (58.4)	53.26~58.98 (56.2)	53.81~64.89 (59.1)	46.31~67.72 (59.8)	42.73~69.48 (58.3)	47.52~66.51 (60.7)	43.28~62.85 (57.1)	56.07~64.94 (60.5)	52.56~67.68 (61.2)
Al	6.67~8.20 (7.5)	5.50~7.92 (6.8)	6.71~7.57 (7.3)	5.21~7.53 (6.6)	4.03~7.96 (6.4)	5.42~7.54 (6.7)	4.61~8.13 (6.9)	4.03~7.76 (6.6)	2.07~8.11 (6.3)
Fe	3.12~4.39 (3.8)	2.75~4.61 (3.9)	3.23~5.84 (4.1)	1.56~4.43 (3.2)	1.86~6.66 (3.7)	2.35~5.11 (3.6)	1.45~5.13 (3.7)	1.86~5.03 (3.6)	1.00~4.47 (3.1)
P	0.09~0.14 (0.11)	0.088~0.279 (0.13)	0.076~0.103 (0.09)	0.07~0.20 (0.12)	0.078~0.279 (0.14)	0.079~0.134 (0.10)	0.06~0.13 (0.09)	0.086~0.186 (0.12)	0.034~0.138 (0.09)
Mn	0.031~0.060 (0.04)	0.049~0.181 (0.09)	0.045~0.068 (0.06)	0.029~0.213 (0.06)	0.049~0.163 (0.08)	0.037~0.094 (0.06)	0.023~0.280 (0.07)	0.038~0.163 (0.08)	0.031~0.124 (0.07)
Zn	74~237 (155)	54~502 (227)	55~180 (132)	20~299 (121)	25~610 (198)	31~3 370 (512)	27~881 (208)	54~1 680 (289)	31~6 240 (942)
V	44~304 (198)	83~448 (211)	137~230 (168)	91~455 (215)	54~448 (198)	78~218 (148)	89~895 (312)	54~443 (193)	78~2 610 (567)
Ba	859~1 945 (1 376)	865~1 565 (1 280)	1 190~1 570 (1 402)	743~1 627 (1 145)	519~1 505 (1 103)	911~4 220 (1 589)	689~2 418 (1 221)	519~3 140 (1 327)	1 190~9 123 (2 345)
Mo	2.48~15.90 (8.9)	2.89~32.00 (12.6)	3.5~37.4 (18.2)	1.16~35.50 (14.2)	2.44~85.30 (18.7)	1.34~54.40 (21.9)	1.34~60.10 (23.6)	2.44~55.30 (18.3)	1.34~88.20 (28.7)
Ni	30.3~81.5 (56.2)	24.1~137.0 (67.8)	46.5~96.6 (67.3)	14.49~154.30 (68.7)	17.0~172.5 (70.2)	14.6~197.5 (91.3)	14.6~209.5 (87.6)	17.0~172.5 (72.8)	14.6~238.0 (95.2)
Cu	21.3~69.6 (43.7)	15.8~90.8 (46.2)	29.2~54.7 (41.2)	10.89~59.40 (35.1)	10.3~66.1 (34.5)	12.5~464.0 (58.4)	10.3~59.4 (38.7)	10.3~66.1 (35.1)	12.5~475.0 (78.3)
Cr	69~120 (95)	80~180 (123)	120~150 (133)	31.9~112.0 (72)	80~180 (130)	110~1 180 (286)	31.9~119.0 (76)	80~200 (135)	110~650 (245)
Co	10.0~20.5 (15.8)	8.1~23.9 (16.2)	12.6~20.5 (15.0)	5.31~21.30 (13.5)	6.2~19.1 (14.3)	5.2~22.0 (13.8)	5.2~21.3 (14.2)	6.2~21.3 (14.5)	3.3~22.0 (12.6)
Th	7.31~12.90 (10.5)	7.70~14.35 (11.1)	10.15~13.20 (11.8)	4.93~12.90 (9.9)	6.90~14.45 (10.9)	6.50~15.35 (10.6)	4.93~12.90 (10.1)	6.90~14.45 (10.8)	6.50~15.35 (10.5)
U	4.54~23.80 (12.3)	2.43~24.70 (9.8)	4.4~21.8 (12.7)	2.37~30.00 (12.4)	2.43~33.10 (11.6)	2.0~60.6 (18.4)	2.37~30.00 (15.8)	2.43~33.10 (12.4)	2~54 (19.2)

注:表中数据 53.88~62.95 (58.4) 为最小值~最大值(平均值).

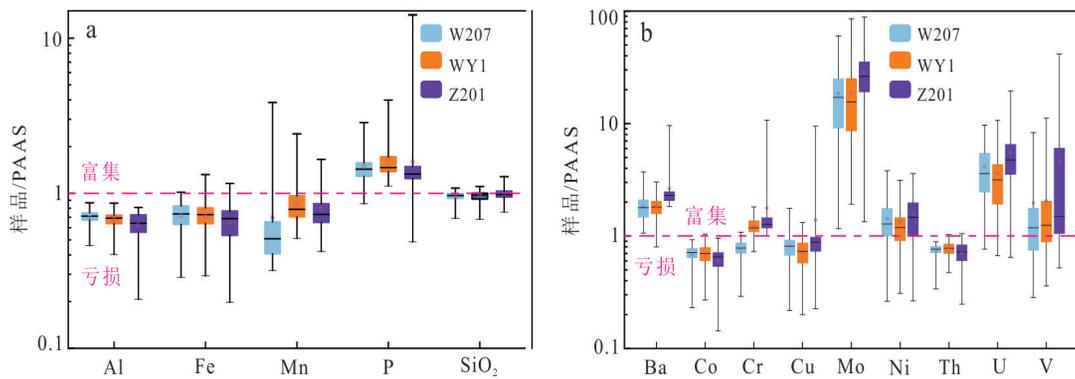


图 5 筇竹寺组页岩主微量元素 PAAS 标准化特征

Fig.5 PAAS standardization characteristics of major and trace elements in shale of Qiongzhusi Formation

a. 主量元素; b. 微量元素

品的元素含量与 PAAS 元素含量标准化(即样品元素含量除以 PAAS 对应元素的含量,以标准化平均值 1 为界限),可以直观判断元素的亏损或富集状态.若标准化后元素为富集,可能暗示有热液活动或成岩作用的影响,而亏损可能指示某种特定的沉积环境或物源区特征(Taylor and McLennan, 1985).因此,本文拟利用 PAAS 标准化值揭示筲竹寺组主微量元素特征.

通过对所获得的筲竹寺组主微量元素与 PAAS 的主微量元素比值进行标准化,结果如图 5 所示.3 口井主量元素除 P 整体富集外,Al、Fe、Mn、SiO₂ 整体亏损(图 5a).P 的普遍富集表明生物活动主导的磷循环强烈,其他主量元素的亏损可能与筲竹寺组沉积期的陆源输入相关.微量元素 Ba、Mo、Ni、U、V 在 3 口井中普遍富集;Cr 除 W207 井表现亏损外,另外 2 口井均表现为富集;Cu、Co、Th 整体亏损(图 5b).微量元素 Mo、U 的普遍富集揭示筲竹寺组沉积期水体强还原特征,有利于有机质保存.Th、Co 的亏损表明物源以基性岩或快速沉积碎屑为主.

4 讨论

4.1 页岩沉积环境分析

4.1.1 陆源物质输入 Fe/Al 值可反映 Fe 相对于陆源碎屑的富集程度.高比值表明 Fe 的额外富集

(非陆源主导),低比值则表明以陆源输入为主.以 PAAS 中 Fe/Al 值在 0.5 为参考标准界限,低于 0.5 说明以陆源碎屑输入为主,高于 0.5 表示以自身成岩富集或热液成岩为主(闫斌等, 2014).W207 井第二段和第一₂亚段部分样品低于 0.5,第一₁亚段大部分样品高于 0.5,反映高陆源碎屑影响特征;WY1 第二段大部分样品高于 0.5,第一₂亚段大部分样品低于 0.5,少部分高于 0.5,第一₁亚段大部分样品高于 0.5,少部分低于 0.5,反映非陆源和陆源碎屑共同作用;Z201 井第二段、第一₂亚段和第一₁亚段大部分样品均高于 0.5,少部分低于 0.5,反映以非陆源碎屑影响为主(图 6a).

同时,在筲竹寺组页岩的 SiO₂ 和 TOC 含量关系中,两者并无明显的关联性,表明筲竹寺组页岩硅质矿物受多种成因机制影响(图 6b).基于此,通过 SiO₂ 与 TOC 关系进行成因机制探究,高生物硅质成因与高 TOC 共存,而陆源碎屑的高硅质含量可能显示着低 TOC 含量的特征.因此,通过绘制 SiO₂/TOC 比值与 TOC 图版,二者呈现明显的指数相关性,指示显著的陆源碎屑影响、陆源与生物影响和生物影响三段式特征,并且与 Fe/Al 比值结果相一致.筲竹寺组页岩在沉积时期受陆源物质与生物因素的频繁交替影响(图 6c).

4.1.2 古氧化还原条件 微量元素在页岩中的分布受到氧化还原条件的显著影响,U-EF 和 Mo-EF 富集系数特征以及判别阈值的确定,有助于确定筲

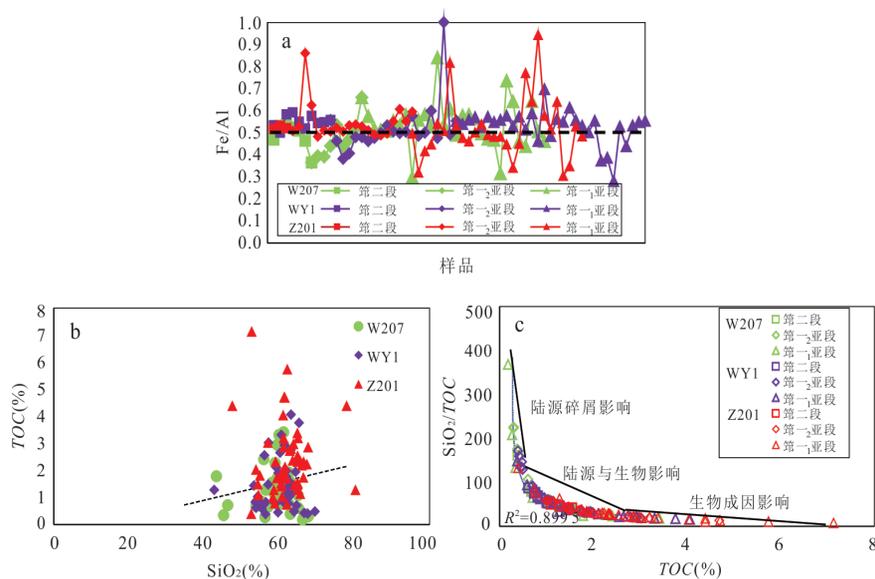


图 6 陆源碎屑富集程度与硅质成因规律及其与 TOC 的关系

Fig.6 The characteristics of terrigenous debris enrichment degree and siliceous genesis and its correlation with TOC

a. 物源碎屑 Fe/Al 比值指标; b. SiO₂ 含量与 TOC 关系; c. SiO₂/TOC 比值与 TOC 关系

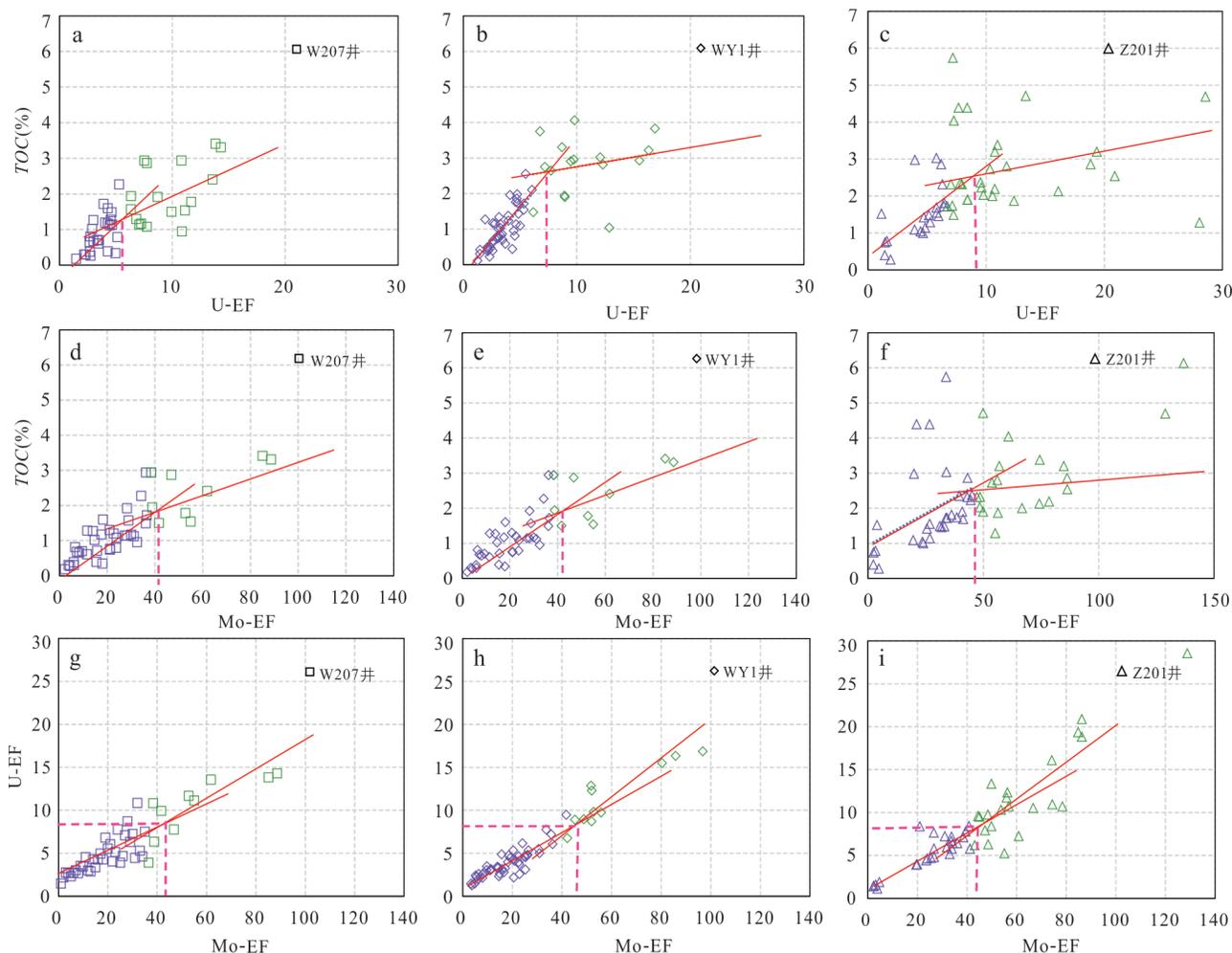


图7 筇竹寺组裂陷槽中段不同部位古氧化还原 Mo-EF 与 U-EF 指标特征

Fig.7 Characteristics of paleoredox Mo-EF and U-EF indicators in different parts of the middle part of the rift trough of the Qiongzhusi Formation

a~c. U-EF 与 TOC 关系; d~f. Mo-EF 与 TOC 关系; g~i. U-EF 与 Mo-EF 关系

竹寺组沉积时期的氧化还原环境. 3 口井中的 U-EF 与 Mo-EF 同 TOC 均表现出特殊的相关性, 随着 U-EF 和 Mo-EF 富集程度不断增加, TOC 含量从快速增加逐渐降低为缓慢增加, 从高斜率转向为低斜率, 并出现明显的拐点(图 7). 前人研究表明, Mo 和 U 元素与有机质之间的差异协变关系能够反映出沉积环境的变化情况, 出现的拐点可能是判别强还原条件的一个阈值 (Algeo and Li, 2020; Cai *et al.*, 2023; 蔡全升等, 2024).

在协变关系图中, W207、WY1 和 Z201 井的 U-EF 与 Mo-EF 拐点阈值依次递增 (U-EF 为 6~8, Mo-EF 为 40~42). 这一趋势揭示了构造-沉积分异对氧化还原条件的控制规律. W207 井位于威远背斜翼部的浅水高能环境, 强水动力扰动与高碎屑输入导致 U、Mo 富集以黏土吸附等碎屑背景

为主, 低 TOC 条件下 U-EF 和 Mo-EF 即出现拐点, 反映还原信号被碎屑干扰掩盖; 随着构造位置向斜坡 (WY1 井) 和陆棚 (Z201 井) 过渡, 水体逐渐加深、沉积能量降低, 碎屑输入减少, 硫化还原带发育增强, U 和 Mo 富集逐步转向自生机制主导, U-EF 和 Mo-EF 拐点阈值提升, 表明硫化条件对元素富集的控制逐渐强化. 尽管阈值增幅较小, 但其空间递变特征揭示了构造背景通过沉积动力-氧化还原机制对微量元素富集行为的调控. 结合上述分析, 可大致辨别 U-EF 拐点为 8、Mo-EF 拐点为 42, 其可作为筇竹寺组沉积时期强还原条件的阈值. 并且在 3 口井中第一₁亚段底部和第一₂亚段底部 U-EF 和 Mo-EF 拐点阈值均反映了强还原环境, 并且在平面上, 沉积环境槽缘向槽内逐渐过渡为缺氧环境. 在纵向上, 筇竹寺组沉积环境整

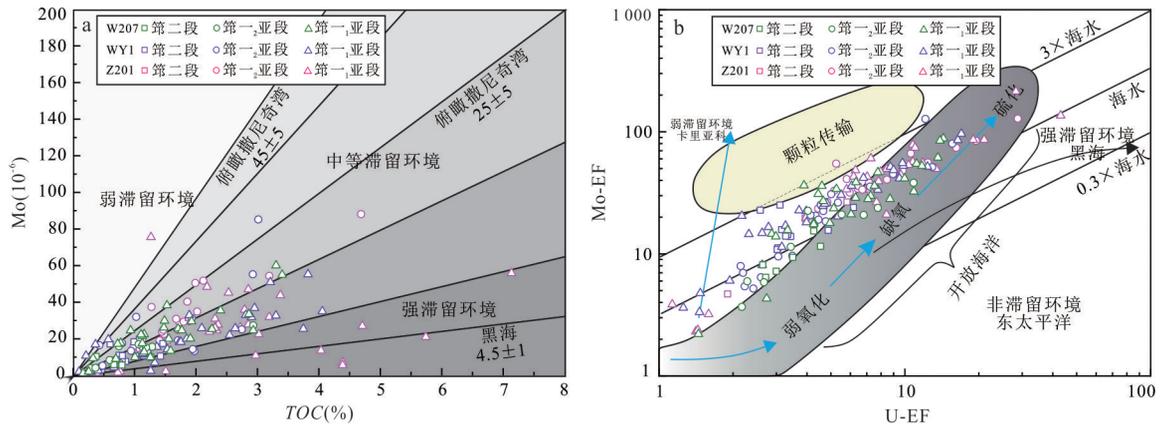


图 8 筇竹寺组裂陷槽不同部位水体滞留程度

Fig.8 The water retention degree in different parts of the rift trough of Qiongzhusi Formation

图版修改自文献 Algeo and Lyons (2006)、Tribovillard *et al.* (2012)

体呈现出“底部缺氧-中部贫氧-上部氧化”的沉积演化。

4.1.3 水体滞留程度 Mo/TOC 值能够有效指示海洋水体的滞留程度,在海水流通性差的局限厌氧盆地中,Mo/TOC 值较低.而在开放的厌氧盆地中,水体频繁地变化,Mo 元素得到不断补充,Mo/TOC 值则较高 (Tribovillard *et al.*, 2006; Miao *et al.*, 2023).此外, Mo-EF/U-EF 的协变模式能够有效指示水体滞留环境,在非滞留的贫氧环境中, U 元素富集早于 Mo 元素, Mo-EF/U-EF 值为正常海水的 0.1~0.3 倍;随着还原程度增加, Mo 元素的富集速率超过 U 元素, Mo-EF/U-EF 值升至正常海水的 1~3 倍;在厌氧弱滞留环境中, Mo 元素得到不断补充,浓度较高, Mo-EF/U-EF 值为正常海水的 3~10 倍;而在强滞留环境中, Mo 元素补给缓慢,浓度较低, Mo-EF/U-EF 值通常低于正常海水的 1 倍 (Sweere *et al.*, 2016).

从 Mo 与 TOC 关系图可以看出筇竹寺组页岩沉积时期主要处于中等滞留-强滞留的环境中,并且明显表现出从槽缘高地 W207 井至槽内中心 Z201 井,水体滞留程度从中等滞留逐渐转变为强滞留环境,并且以筇竹寺组底部第一₁亚段的水体沉积滞留环境最强,部分数据点落于黑海区域,为强滞留海盆,体现出裂陷槽整体对水体滞留环境起控制作用(图 8a). Mo-EF/U-EF 的协变模式表明部分样品落于颗粒传输区,远离弱滞留环境区域,处于弱-中局限滞留环境中,大部分样品点位于 1 倍海水至 3 倍海水区域内,处于中-强滞留的环境中,同样表现出槽缘高地至槽内中心 3 口井从中等滞留至强滞留环境的过渡中(图 8b),这一推论与 Mo 与 TOC 关系所推测的模式较为一致。

并且 Mo-EF/U-EF 的协变模式指示筇竹寺组的古氧化还原环境为:底部为缺氧-硫化的还原环境,向上还原性降低并逐渐转变为缺氧-贫氧环境。

4.1.4 古生产力 筇竹寺组主微量元素 PAAS 标准化中, Ba 和 P 呈现高度富集的特征,因此本研究采用去除陆源影响的 P/Al 值和生物钡含量 (Ba_{bio}) 作为指标来指示古生产力特征.高钡含量通常与古代海洋的高生产力有关.钡主要存在于海洋沉积物的黏土和硅酸盐矿物中,特别是与浮游生物的骨骼(如硅藻的硅质骨架)有关联 (Paytan and Griffith, 2007; Schoepfer *et al.*, 2015).本研究采用考虑去除陆源钡的因素公式: $Ba_{bio} = Ba_{sample} - Al_{sample} \times (Ba/Al)_{PAAS}$ 进行生物钡含量计算,其中 Ba_{sample} 和 Al_{sample} 分别为实测样品的 Ba 含量和 Al 含量; $(Ba/Al)_{PAAS}$ 为后太古宙澳大利亚页岩中 Ba 和 Al 含量的比值 (Rimmer *et al.*, 2004; 王剑等, 2023).当 Ba_{bio} 大于 100×10^{-6} 时,其对应的初级生产力关系为极高生产力,筇竹寺组 Ba_{bio} 值均高于 100×10^{-6} ,其中以槽内中心 Z201 井的 Ba_{bio} 值最高,均值可达到 1724.47×10^{-6} ,至槽缘斜坡 WY1 井 (Ba_{bio} 均值 1194.27×10^{-6}) 槽缘斜坡 W207 井 (Ba_{bio} 均值 1199.41×10^{-6}) Ba_{bio} 值降低,并且 3 口井以第二段和第一₁亚段表现出更高的初级古生产力特征(图 9a).

P/Al 值与 Ba_{bio} 值在各井和各亚段的分布特征存在差异,主要体现在 WY1 井 P/Al 值最高, Z201 井其次, W207 井最低. WY1 井的第二段 P/Al 值最高,高于第一段中两个亚段的 P/Al 值(图 9b).在整体的裂陷槽沉积背景下,筇竹寺组早期(第一₁亚段)开始海侵,槽内中心海平面上升幅度最大,水体深度大,初级古生产力高,营养元素 P 富集程度

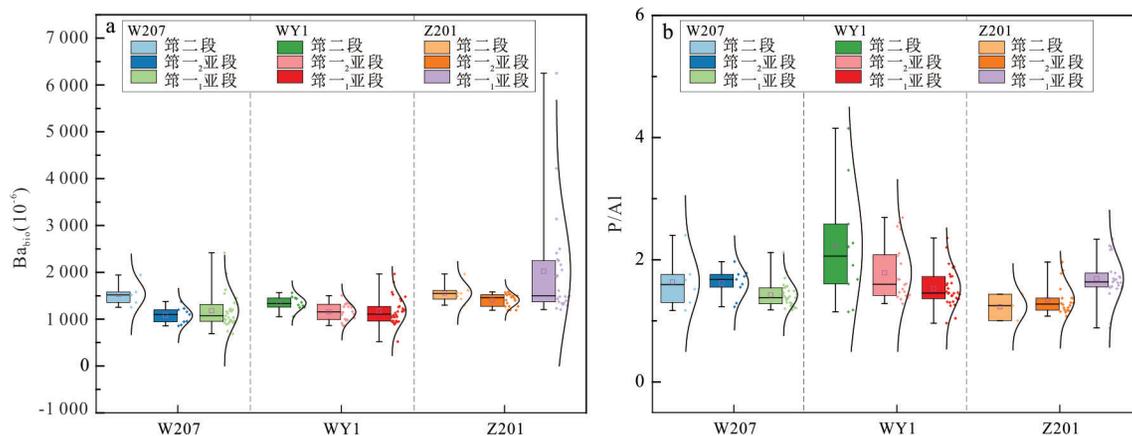


图9 筇竹寺组裂陷槽中段不同部位古生产力水平

Fig.9 The paleoproductivity levels in different parts of the middle part of the rift trough of Qiongzhusi Formation

高, 利于生物大量繁殖, 因此生物钡含量也对应升高; 筇竹寺组中期(第一₂亚段)开始海退, W207井水体深度最浅, 营养元素P富集程度下降, 生物繁殖活动程度减弱, 其生物钡含量也相对较低, 而槽缘斜坡与开放海洋仍具有较好的连接关系, 其营养元素得到不断的补充, 生物繁殖活动频繁, 生物钡含量也相对较高; 筇竹寺组晚期(第二段)再次遭受海侵, 伴随着一定程度的海水上涌和从深层海水中涌入的丰富营养物质, 槽缘斜坡的营养元素P更多地富集, 提高了初级古生产力, 导致第二段生物钡含量出现高值. 综合而言, 3口井均反映出很高的古生产力水平, 槽内中心生物钡含量最高, 直接指示该区域古生产力水平达到峰值, 槽缘斜坡营养元素富集程度最高(P/Al值最大), 反映营养元素输入强度最大. 然而, 槽缘斜坡的高营养元素富集并未同步转化为生物生产力(生物钡增幅偏低), 导致两种指标所指示的古生产力水平不同.

4.2 岩相类型划分

4.2.1 岩相划分依据

页岩岩相划分能反映页岩的非均质特征, 涵盖岩性、沉积构造、矿物成分、有机质丰度和岩石力学性质等方面(金之钧等, 2021). 目前的页岩岩相划分方法有以下三种: 一是依据矿物组成来进行划分(李卓等, 2017); 二是根据岩石的结构和沉积构造来进行划分(李丹龙等, 2023); 三是综合多种参数进行划分(付秀丽等, 2022).

本研究在所获取的筇竹寺组页岩矿物组成定量分析基础上, 采用长英质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物(方解石+白云石)和黏土矿物的传统三端元图解法, 按照海相页岩岩相类型划分方案(图10a, 表2), 以单端元矿物含量大于50%或两个端元矿物含

量在25%~50%范围为界, 将页岩岩相划分为长英质页岩、钙质页岩、黏土质页岩和混合质页岩4种类型(图10b; 王玉满等, 2016; 宁诗坦等, 2021).

在粒度特征分析中, 筇竹寺组页岩以砂质、粉砂质和泥质碎屑颗粒为主, 颗粒粒度分选明显. 因此, 在矿物组分三端元岩相类型划分的基础上, 针对特定的沉积环境所反映的颗粒粒径对岩相进一步划分(图10a). 根据光学镜下薄片观察到的碎屑颗粒粒径特征, 将砂质或粉砂质在25%~50%为主的页岩作为主名前缀, 若泥质大于50%, 则沿用岩相组分类名称. 例如: 页岩样品中长英质含量在25%~50%, 碳酸盐矿物小于25%, 黏土矿物含量在25%~50%, 粒度小于8 μm的矿物含量达50%以上, 按照本研究岩相划分原则, 属于混合质页岩. 若碎屑颗粒粒度在8.0~62.5 μm(含量在25%~50%), 则命名为混合质粉砂质页岩(表2, 图10b).

TOC含量对页岩生烃能力、储集条件的评价有着重要意义, 按照TOC含量高低将筇竹寺组页岩岩相进一步划分为: 贫有机质($TOC < 1\%$)岩相、含有机质($1\% \leq TOC < 2\%$)岩相、富有机质($TOC \geq 2\%$)岩相(李卓等, 2017). 因此, “TOC-矿物组成-粒径特征”岩相分类体系通过多参数耦合, 有效反映了有机质富集、沉积环境变化与储集性能的关系, 为建立研究区特有的岩相划分方案提供了依据.(图10a).

4.2.2 岩相类型及发育特征

根据筇竹寺组页岩的矿物组成数据, 将其投点至三端元图中, 结果显示, 筇竹寺组页岩主要包括长英质页岩、混合质页岩、黏土质页岩, 并伴有少量的钙质页岩. 笔者在研究区筇竹寺组页岩的光学镜下薄片观察和碎屑颗粒粒度分析的基础上, 根据粒度对其进行了分级.

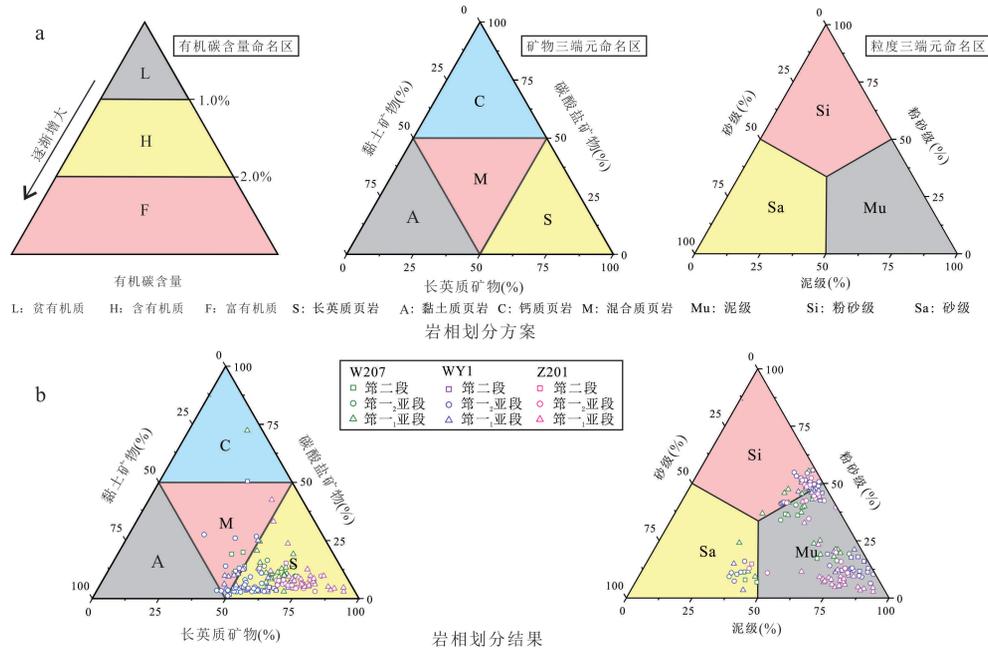


图 10 筇竹寺组页岩岩相划分方案及划分结果 (a)岩相划分方案;(b)岩相划分结果

Fig.10 Qiongzhusi Formation shale lithofacies division scheme and division result (a) lithofacies division scheme; (b) Lithofacies division results

表 2 海相页岩筇竹寺组页岩岩相划分方案

Table 2 Marine shale Qiongzhusi Formation shale lithofacies division scheme

岩相	岩相亚类	长英质矿物(%)	碳酸盐矿物(%)	黏土矿物(%)	粒径(μm)
长英质页岩(F-S)	长英质页岩	>50	<25	<25	<8 (>50%, 泥级)
	长英质粉砂质页岩	>50	<25	<25	8~62.5 (25%~50%, 粉砂级)
	长英质砂质页岩	>50	<25	<25	>62.5 (25%~50%, 砂级)
钙质页岩(C-S)	钙质页岩	<25	>50	<25	<8 (>50%, 泥级)
	钙质粉砂质页岩	<25	>50	<25	8~62.5 (25%~50%, 粉砂级)
	钙质砂质页岩	<25	>50	<25	>62.5 (25%~50%, 砂级)
黏土质页岩(A-S)	黏土质页岩	<25	<25	>50	<8 (>50%, 泥级)
	黏土质粉砂质页岩	<25	<25	>50	8~62.5 (25%~50%, 粉砂级)
	黏土质砂质页岩	<25	<25	>50	>62.5 (25%~50%, 砂级)
混合页岩(M-S)	混合页岩	25~50	25~50	25~50	<8 (>50%, 泥级)
	混合质粉砂质页岩	25~50	25~50	25~50	8~62.5(25%~50%, 粉砂级)
	混合质砂质页岩	25~50	25~50	25~50	>62.5(25%~50%, 砂级)

分析结果表明,筇竹寺组发育了8种岩相亚类:长英质砂质页岩、混合质砂质页岩、长英质粉砂质页岩、混合质粉砂质页岩、钙质粉砂质页岩、长英质页岩、混合质页岩和黏土质页岩.在此基础上,结合 TOC 含量对这8种岩相亚类进行了进一步划分,得到了16种不同的“TOC-矿物组成-粒径特征”岩相类型.具体包括:贫有机质长英质页岩(L-F-S)、贫有机质长英质粉砂质页岩(L-F-SS)、贫有机质混合质粉砂质页岩(L-M-SS)、贫有机质钙质粉砂质页岩(L-C-SS)、贫有机质长英质砂质页岩(L-F-SdS)、贫有机

质混合质砂质页岩(L-M-SdS)、含有机质长英质页岩(M-F-S)、含有机质混合质页岩(M-M-S)、含有机质长英质粉砂质页岩(M-F-SS)、含有机质黏土质粉砂质页岩(M-A-SS)、含有机质混合质粉砂质页岩(M-M-SS)、富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩(H-A-SS)和富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS).

3口井发育的岩相类型及特征具有明显的差异性.W207井共发育12种岩相类型,岩相分布从多到

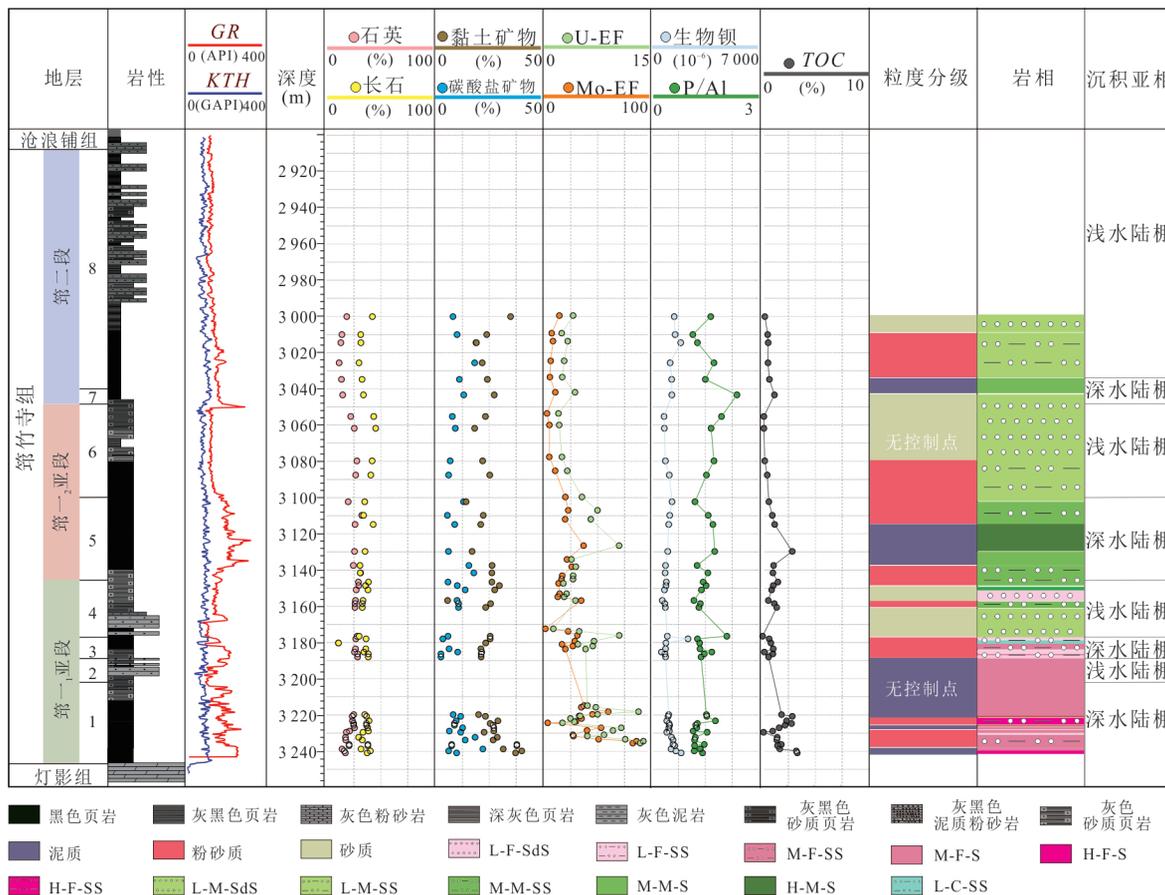


图 11 筇竹寺组 W207 岩相组合类型与各项沉积指标垂向关系

Fig.11 The vertical relationship between the lithofacies combination type of W207 in Qiongzhusi Formation and various sedimentary indicators

少依次为: 含有机质长英质粉砂质页岩 (M-F-SS)、含有机质混合质粉砂质页岩 (M-M-SS)、贫有机质混合质砂质页岩 (L-M-SdS)、贫有机质混合质粉砂质页岩 (L-M-SS)、贫有机质长英质粉砂质页岩 (L-F-SS)、含有机质长英质页岩 (M-F-S)、含有机质混合质页岩 (M-M-S)、富有机质长英质页岩 (H-F-S)、富有机质长英质粉砂质页岩 (H-F-SS)、富有机质混合质页岩 (H-M-S)、贫有机质长英质砂质页岩 (L-F-SdS)、贫有机质钙质粉砂质页岩 (L-C-SS) (图 11)。

WY1 井共发育 15 种岩相类型, 岩相分布从多到少依次为: 贫有机质长英质粉砂质页岩 (L-F-SS)、富有机质长英质页岩 (H-F-S)、含有机质长英质页岩 (M-F-S)、含有机质长英质粉砂质页岩 (M-F-SS)、含有机质混合质粉砂质页岩 (M-M-SS)、贫有机质长英质砂质页岩 (L-F-SdS)、贫有机质混合质砂质页岩 (L-M-SdS)、富有机质长英质粉砂质页岩 (H-F-SS)、含有机质混合质页岩 (M-M-S)、贫有机质混合质粉砂质页岩 (L-M-

SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩 (H-A-SS)、富有机质混合质粉砂质页岩 (H-M-SS)、含有机质黏土质粉砂质页岩 (M-A-SS)、贫有机质钙质粉砂质页岩 (L-C-SS)、贫有机质长英质页岩 (L-F-S) (图 12)。

Z201 井相较于 W207 和 WY1 井岩相类型少, 共发育 8 种岩相, 分布从多到少依次为: 富有机质长英质页岩 (H-F-S)、含有机质长英质粉砂质页岩 (M-F-SS)、富有机质长英质粉砂质页岩 (H-F-SS)、含有机质长英质页岩 (M-F-S)、贫有机质长英质砂质页岩 (L-F-SdS)、富有机质混合质页岩 (H-M-S)、富有机质混合质粉砂质页岩 (H-M-SS)、贫有机质长英质粉砂质页岩 (L-F-SS) (图 13)。

3 口井岩相类型发育特征均在第一₁亚段、第一₂亚段和第二段底部表现出较高有机质含量 (>1%) 和矿物粒径较小 (泥级和粉砂级为主) 的特征, 并且在浅水陆棚相中出现粗粒径的砂页岩岩相类型。W207 井以贫-含有机质的粉砂质岩相和贫有机质砂质岩相为主, 体现出水体频繁动荡、水体较浅, 以

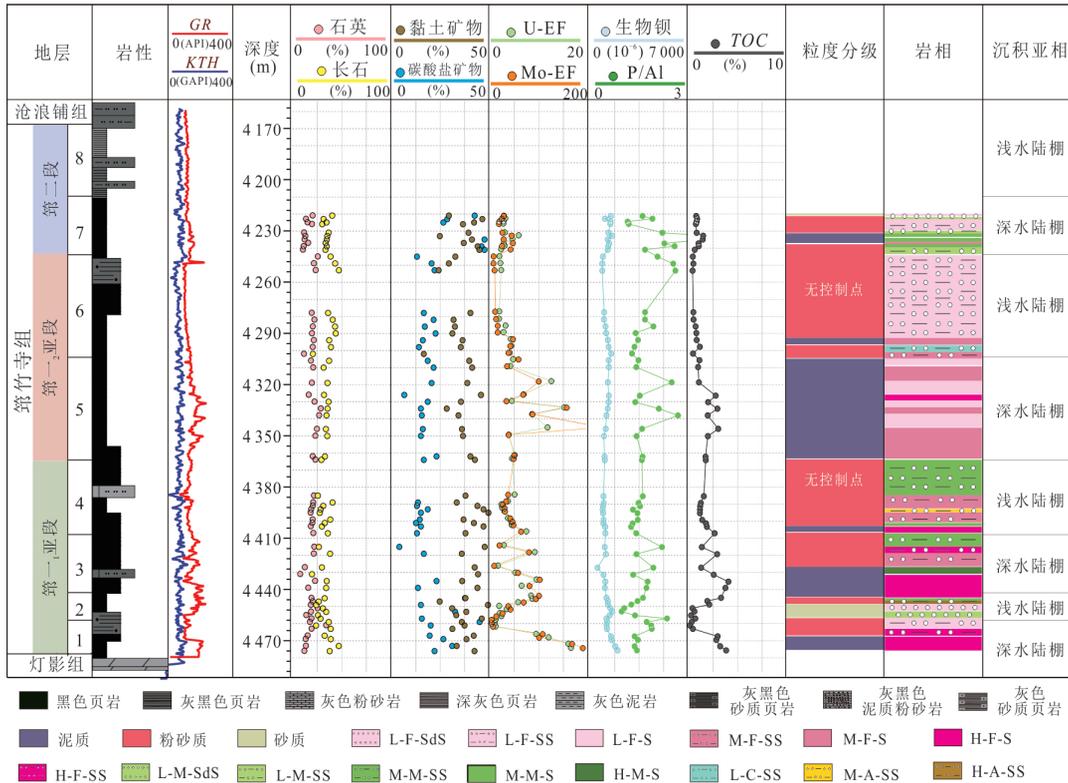


图 12 筇竹寺组 WY1 岩相组合类型与各项沉积指标垂向关系

Fig.12 The vertical relationship between the lithofacies combination type of WY1 in Qiongzhusi Formation and various sedimentary indicators

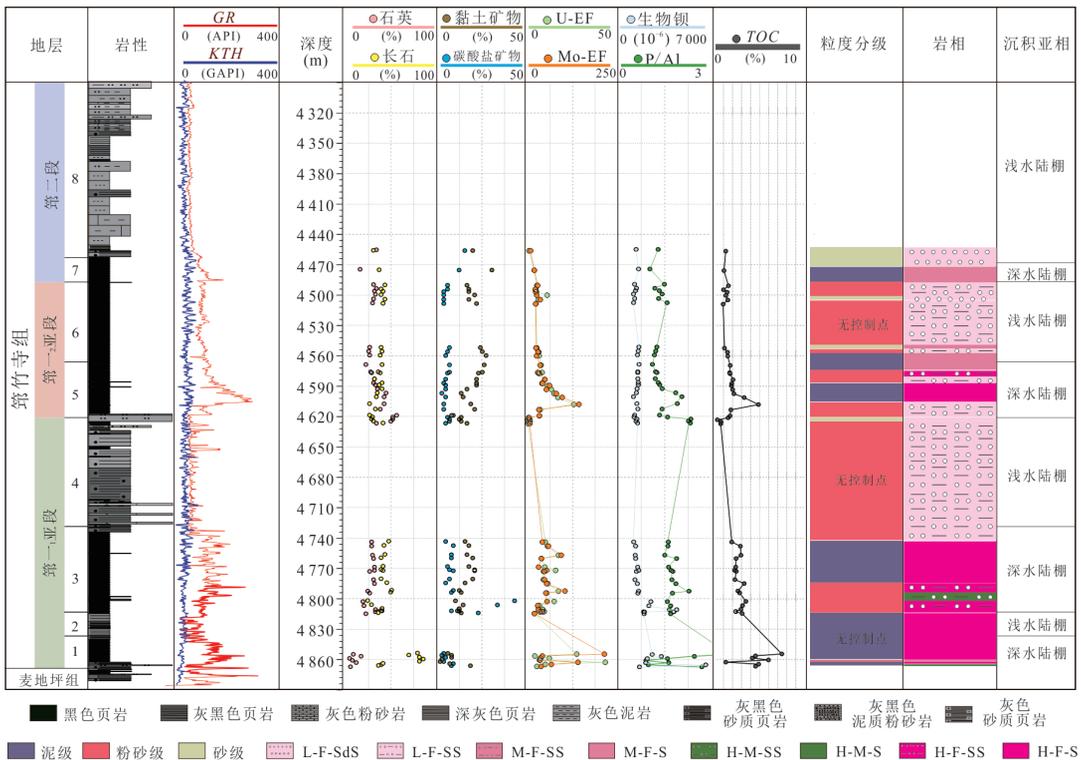


图 13 筇竹寺组 Z201 岩相组合类型与各项沉积指标垂向关系

Fig.13 The vertical relationship between the lithofacies combination type of Z201 in Qiongzhusi Formation and various sedimentary indicators

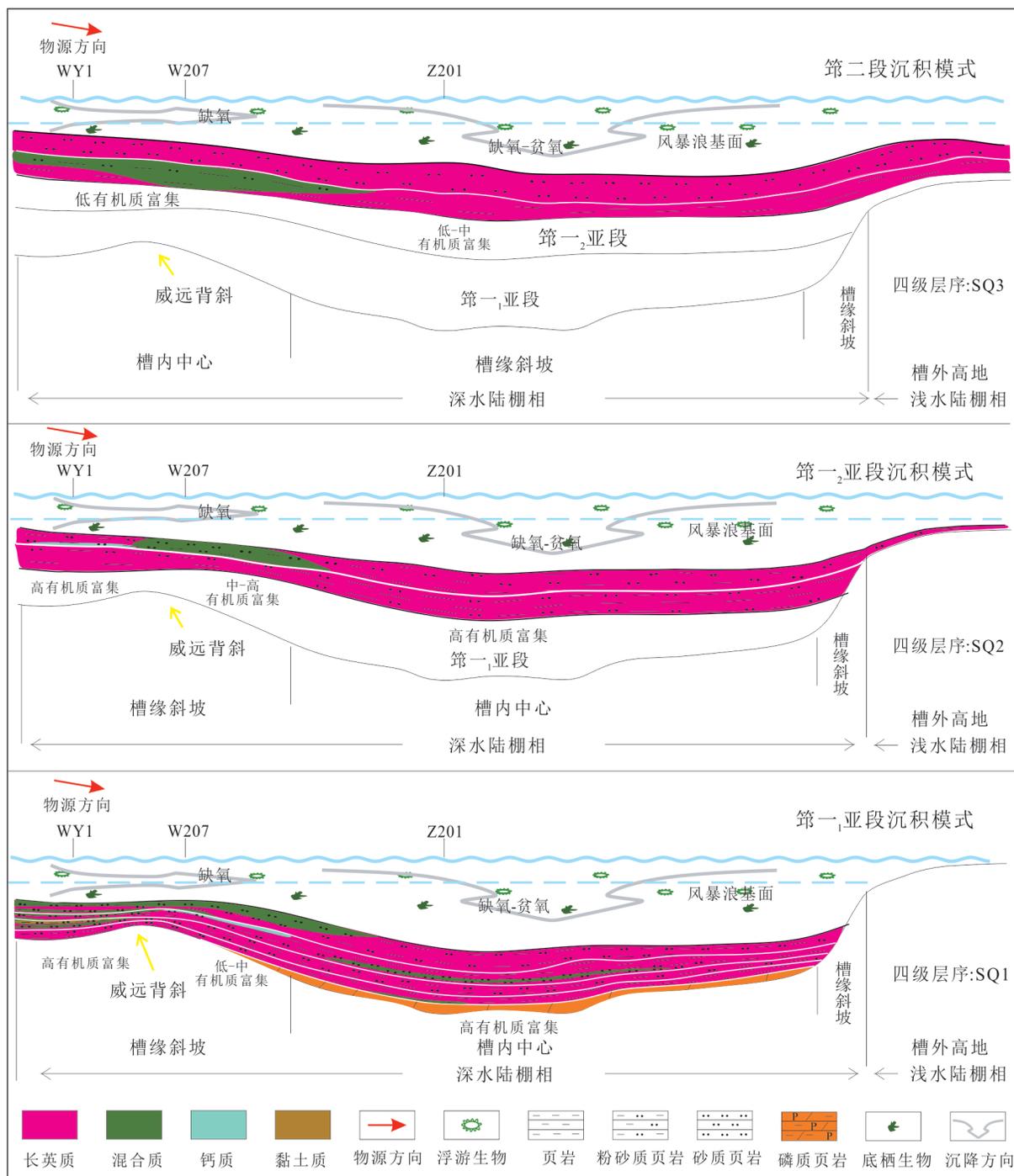


图 14 裂陷槽中段筇竹寺组页岩沉积演化模式

Fig.14 Sedimentary evolution model of Qiongzhusi Formation shale in the middle of rift trough

粉砂质沉积为主的沉积环境特征;WY1井以贫-含有机质的粉砂质岩相和富有机质页岩岩相为主,整体岩相分布特征反映出槽缘斜坡筇竹寺组底部和上部水体沉积环境动荡、频繁的海侵和海退过程,中部为低能、安静的水体沉积环境的特征.Z201井泥质含量增高,以富有机质页岩岩相和含有机质粉砂质岩相为主,岩相整体以泥级-粉砂级碎

屑颗粒和长英质矿物为主要类型,反映出槽内中心远离物源和以安静、低能的深水沉积环境为主的特点.平面上,从槽缘斜坡水体较为动荡的沉积环境向槽内中心水体稳定的沉积环境转变.

4.3 沉积环境控制下优质岩相分布

W207井、WY1井和Z201井主要位于德阳-安岳裂陷槽中段,属于浅水陆棚相-深水陆棚相

(范海经等, 2021; 吴冬等, 2023), 离物源区较远, 因此长英质矿物含量相对较高, 黏土矿物含量相对较低, 仅位于槽缘斜坡的 WY1 井个别样品黏土矿物含量超过 50%, 体现出以长英质和混合质为主要矿物组合特征的岩相类型(图 14)。

前人综合岩性、电性以及海平面变化特征, 将筇竹寺组划分为 1 个三级层序和 3 个四级层序(杨雨然等, 2024)。三级层序底界为筇竹寺组和麦地坪组不整合面, 顶界为筇竹寺组与沧浪铺组界面, 可进一步细分为 SQ1、SQ2、SQ3 四级层序, 对应第一、二亚段、第一、二亚段和第三段。四级层序的岩相特征与海平面变化密切相关: 海侵期以泥级岩相为主, 海退期逐渐过渡为粉砂级、砂级岩相, 对应各亚段的分界。值得注意的是, 四级层序中普遍存在快速海侵和缓慢海退现象, 导致垂向上粒度从泥级向砂级逐渐粗化。基于此, 筇竹寺组整体呈现四个沉积旋回, 纵向发育 4 套页岩层段和 4 套粉砂质-砂质岩层段, 共划分出 8 个小层(图 14)。

空间分布上, 构造-沉积分异对筇竹寺组沉积环境及有机质富集具有显著控制作用。位于槽缘斜坡且处于背斜翼部的 W207 井, 沉积水体较浅且处于中等滞留环境, 氧化条件占主导, 不利于有机质保存, 故粒度以粉砂级-砂级为主, TOC 含量低; 槽缘斜坡处 WY1 井水体深度加深, 转为氧化-贫氧环境, 岩性组合为泥级、粉砂级和砂级, TOC 含量有所提升; 而槽内中心 Z201 井水体最深, 形成持续缺氧-厌氧的环境, 伴随海侵-海退旋回发育泥级-粉砂级-砂级的完整粒度序列, 有机质富集程度最高(图 14)。综合分析表明, 深水陆棚相的缺氧-贫氧环境中, 以泥级岩相(1、3、5、7 小层)有机质富集程度最优, 兼具高生烃潜力与长英质矿物提供的储集空间; 而深水-浅水陆棚过渡带的粉砂质岩相虽有机质含量次之, 但仍具备有效富集能力(雍锐等, 2024a; 杨学锋等, 2025)。

综上所述, 研究区筇竹寺组优质岩相可划分为: 富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩(H-A-SS)及富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS)。从空间分布看, 不同构造位置钻井发育的优势岩相存在显著差异, W207 井优质岩相为富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质混合质页岩(H-M-S); WY1 井优质岩相为富有机质长

英质页岩(H-F-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩(H-A-SS)、富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS); Z201 井优质岩相为富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS)。

5 结论

(1) 德阳-安岳裂陷槽控制下的沉积环境具有显著空间分异性, 在槽内中心, 由生物成因的高硅质沉积主导, 形成了强还原环境; 而在槽缘, 则由陆源碎屑输入主导, 呈现出不同的成岩机制。建立“双阈值”地球化学指标(U-EF 拐点阈值=8, Mo-EF 拐点阈值=42), 定量表征强还原环境边界, 明确了平面上由槽缘向槽内呈现“氧化-贫氧-缺氧”的递变模式; 纵向上表现为“底部缺氧-中部贫氧-上部氧化”的旋回特征。槽内中心古生产力和水体滞留程度达到峰值, 是优质页岩发育的核心区。

(2) 建立了“TOC-矿物组成-粒度特征”耦合的岩相分类体系, 共划分出 36 种岩相类型, 德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组共发育富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS)、含有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS)等 16 种岩相类型, 系统揭示了研究区页岩非均质性特征, 为古老深层页岩气甜点预测提供了思路。

(3) 筇竹寺组页岩优质岩相主要为富有机质长英质页岩(H-F-S)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质长英质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩(H-A-SS)和富有机质混合质粉砂质页岩(H-M-SS), 主要分布在筇竹寺组 1、3、5 和 7 小层深水陆棚相中, 优质岩相受沉积环境控制, 深水贫氧-缺氧环境有利于有机质富集和保存, 并具备生烃条件, 同时高含量长英质矿物可提供大量连通孔隙空间。

References

- Algeo, T. J., Li, C., 2020. Redox Classification and Calibration of Redox Thresholds in Sedimentary Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 8–26. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.055>
- Algeo, T. J., Lyons, T. W., 2006. Mo-Total Organic Carbon Covariation in Modern Anoxic Marine Environments: Implications for Analysis of Paleoredox and Paleohydrographic Conditions. *Paleoceanography*, 21(1):

- PA1016. <https://doi.org/10.1029/2004PA001112>
- Cai, Q. S., Hu, M. Y., Kane, O. I., et al., 2023. Petrological and Geochemical Characteristics of the Ordovician-Silurian Black Shale in Eastern Sichuan and Western Hubei, South China: Differential Sedimentary Responses to Tectonism and Glaciation. *Journal of Paleogeography*, 12(1): 129–152. <https://doi.org/10.1016/j.jop.2022.09.003>
- Cai, Q. S., Hu, M. Y., Yang, Z., et al., 2024. Sedimentary Environment and Organic Matter Accumulation of Black Rock Series of Wufeng-Longmaxi Formations in Foreland Depression, Western Hunan Province: An Example from Well TD2 in Changde Area. *Earth Science*, 49(7): 2330–2345 (in Chinese with English abstract).
- Fan, H. J., Deng, H. C., Fu, M. Y., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. L., Meng, Q. A., Zheng, Q., et al., 2022. Cyclicity of Organic Matter Abundance and Lithofacies Paleogeography of Gulong Shale in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 41(3): 38–52 (in Chinese with English abstract).
- He, X., Liang, F., Li, H., et al., 2024a. 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 (in Chinese with English abstract).
- He, X., Zheng, M. J., Liu, Y., et al., 2024b. Characteristics and Differential Origin of Qiongzhusi Formation Shale Reservoirs under the “Aulacogen-Uplift” Tectonic Setting, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 420–439 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhu, R. K., Liang, X. P., et al., 2021. Several Issues Worthy of Attention in Current Lacustrine Shale Oil Exploration and Development. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1276–1287 (in Chinese with English abstract).
- Lazar, O. R., 2007. Redefinition of the New Albany Shale of the Illinois Basin: An Integrated, Stratigraphic, Sedimentologic, and Geochemical Study (Dissertation). Indiana University, Bloomington.
- Li, D. L., Fu, M. Y., Deng, H. C., et al., 2023. Analysis of Lithofacies and Sedimentary Environment of Shale Deposited Shelf Facies: A Case Study of the Wenshuicun Section in Guizhou Province, South China. *Natural Gas Geoscience*, 34(3): 445–459 (in Chinese with English abstract).
- Li, R., Wang, Y. X., Wang, Z. C., et al., 2023. Geological Characteristics of the Southern Segment of the Late Sinian - Early Cambrian Deyang - Anyue Rift Trough in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(2): 321–333. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(23\)60390-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(23)60390-8)
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Jiang, Z. X., Tang, X. L., et al., 2017. Lithofacies Characteristics and Its Effect on Pore Structure of the Marine Shale in the Low Silurian Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing. *Earth Science*, 42(7): 1116–1123 (in Chinese with English abstract).
- Liang, F., Wu, W., Zhang, Q., et al., 2024. Shale Pore Structure Characteristics and Shale Gas Occurrence Pattern of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 44(3): 131–142 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X., Ma, S. G., Li, G. Q., et al., 2022. Sedimentary Environment and Shale Gas Exploration Potential of Qiongzhusi Formation in the Upslope Area: A Case Study on Well W-207, Weiyuan Area, Sichuan Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(5): 68–82 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. Y., Zhou, W., Xu, H., et al., 2023. Control of the Pattern of Tectonic - Depositional Differentiation on Shale Gas Reservoir Characteristics Within a Sequence Stratigraphic Framework: A Case Study from the Qiongzhusi Formation in the Southwestern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1478–1494 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Zeng, X. L., Huang, W. M., et al., 2009. Basic Characteristics of Shale and Continuous-Discontinuous Transition Gas Reservoirs in Sichuan Basin China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 578–592 (in Chinese with English abstract).
- Miao, H., Jiang, Z. X., Tang, X. L., et al., 2023. Hydrocarbon Generation Potential and Organic Matter Accumulation Patterns in Organic-Rich Shale during the Mesoproterozoic Oxygenation Event: Evidence from the Xiamaling Formation Shale. *Geomechanics and Geophysics for Geo - Energy and Geo - Resources*, 9(1): 134. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00668-3>
- Ning, S. T., Xia, P., Hao, F., et al., 2021. Shale Facies

- and Its Relationship with Sedimentary Environment and Organic Matter of Niutitang Black Shale, Guizhou Province. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1297–1307 (in Chinese with English abstract).
- Paytan, A., Griffith, E. M., 2007. Marine Barite: Recorder of Variations in Ocean Export Productivity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(5–7): 687–705. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.01.007>
- Qiu, Y. C., Luo, B., Xia, M. L., et al., 2019. Discovery and Geological Significance of Sinian - Cambrian Rift Trough, Changning Area, Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(2): 22–28 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer, S. M., Thompson, J. A., Goodnight, S. A., et al., 2004. Multiple Controls on the Preservation of Organic Matter in Devonian - Mississippian Marine Black Shales: Geochemical and Petrographic Evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215(1–2): 125–154. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.09.001>
- Schoepfer, S. D., Shen, J., Wei, H. Y., et al., 2015. Total Organic Carbon, Organic Phosphorus, and Biogenic Barium Fluxes as Proxies for Paleomarine Productivity. *Earth-Science Reviews*, 149: 23–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.017>
- Sweere, T., van den Boorn, S., Dickson, A. J., et al., 2016. Definition of New Trace - Metal Proxies for the Controls on Organic Matter Enrichment in Marine Sediments Based on Mn, Co, Mo and Cd Concentrations. *Chemical Geology*, 441: 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.08.028>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. *The Journal of Geology*, 94(4): 57–72.
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Baudin, F., et al., 2012. Analysis of Marine Environmental Conditions Based on molybdenum-Uranium Covariation: Applications to Mesozoic Paleooceanography. *Chemical Geology*, 324: 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.09.009>
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., et al., 2006. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- Wang, J., Xiao, S., Du, Q. D., et al., 2023. Paleomarine Environment and Organic Matter Enrichment Mechanism of Doushantuo Black Shale in the Northeastern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 43(4): 76–92 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. M., Wang, S. F., Dong, D. Z., et al., 2016. Lithofacies Characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, Southern Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 119–133 (in Chinese with English abstract).
- Wu, D., Deng, H. C., Xiong, L., et al., 2023. Sequence Filling and Evolutionary Model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi Formations in Sichuan Basin and on Its Periphery. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 764–777 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. F., Zhang, C. L., Zhao, S. X., et al., 2023. Typical Types of Shale Gas Reservoirs in Southern Sichuan Basin and Enlightenment of Exploration and Development. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1385–1400 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. H., Jiang, Z. X., Wu, J. F., et al., 2024. Characteristics, Formation Mechanism and Geological Implications of High Water-Cut Shale Gas Reservoirs in Western Chongqing Area. *Natural Gas Industry*, 44(8): 58–71 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. L., Jiao, K., Liu, R. Y., et al., 2024. Comparison of Pore Structures between Qiongzhusi Formation and Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(5): 813–832 (in Chinese with English abstract).
- Yan, B., Zhu, X. K., Zhang, F. F., et al., 2014. The Ediacaran Trace Elements and Fe Isotopes of Black Shale in the Three Gorges Area: Implications for Paleooceanography. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1603–1615 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., Zuo, Y. H., Duan, X. G., et al., 2023. Hydrocarbon Kitchen Evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and Its Enlightenment to Hydrocarbon Accumulation. *Earth Science*, 48(2): 582–595 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. F., Zhang, C. L., Zhao, S. X., et al., 2025. Characteristics of Shale Gas Reservoir and Enlightenment of Exploration in Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Wen, L., Song, Z. Z., et al., 2022. Breakthrough and Potential of Natural Gas Exploration in Multi-Layer System of Penglai Gas Area in the North of Central Sichuan Paleogeographic Uplift. *Acta Petrolei Sinica*, 43(10): 1351–1368, 1394 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. R., Shi, X. W., Li, Y. Y., et al., 2024. Paleogeographic

- morphology, Sedimentary Pattern and Exploration Orientation of Qiongzhusi Formation in Deyang-Anyue Rift Trough, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(6): 67–81 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C. N., Wu, S. T., et al., 2022. Characteristics, Types, and Prospects of Geological Sweet Sections in Giant Continental Shale Oil Provinces in China. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1260–1277. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1735-9>
- Yong, R., Shi, X. W., Luo, C., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Yong, R., Wu, J. F., Wu, W., et al., 2024. Exploration Discovery of Shale Gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation of Sichuan Basin and Its Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 45(9): 1309–1323 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y. X., Li, Y. F., Fan, T. L., et al., 2023. High-Resolution Sequence-Stratigraphic Characteristics and Filling Evolution Model of Lower Cambrian Fine-Grained Sedimentary Rocks in Southwestern Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 30(6): 162–180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. H., Wei, X. F., Gao, B., et al., 2024. Developmental Models of Organic-Rich Shales in the Cambrian Qiongzhusi Formation in the Piedmont Zone of Northern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 992–1006 (in Chinese with English abstract)
- Zhang, T. Y., Huang, S. P., Li, X. Q., et al., 2024. Sedimentary Geochemical Characteristics and Organic Matter Enrichment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(4): 688–703 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, M. J., Guo, X. W., Wu, Y., et al., 2024. Cultivation Practice and Exploration Breakthrough of Geology and Engineering Integrated High-Yield Wells of Ultra-Deep Shale Gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation in Deyang-Anyue Aulacogen, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(3): 58–68 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Du, J. H., Xu, C. C., et al., 2014. Formation, Distribution, Resource Potential and Discovery of the Sinian-Cambrian Giant Gas Field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278–293 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Zhang, G. S., et al., 2023. Theory, Technology and Practice of Unconventional Petroleum Geology. *Journal of Earth Science*, 34(4): 951–965. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2000-8>

中文参考文献

- 蔡全升, 胡明毅, 杨智, 等, 2024. 湘西前陆坳陷区五峰-龙马溪组黑色岩系沉积环境与有机质富集机制: 以 TD2 井为例. *地球科学*, 49(7): 2330–2345.
- 范海经, 邓虎成, 伏美燕, 等, 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.
- 付秀丽, 蒙启安, 郑强, 等, 2022. 松辽盆地古龙页岩有机质丰度旋回性与岩相古地理. *大庆石油地质与开发*, 41(3): 38–52.
- 何骁, 梁峰, 李海, 等, 2024a. 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.
- 何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等, 2024b. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武统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.
- 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等, 2021. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题. *石油勘探与开发*, 48(6): 1276–1287.
- 李丹龙, 伏美燕, 邓虎成, 等, 2023. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩岩相及沉积环境分析——以贵州温水村剖面为例. *天然气地球科学*, 34(3): 445–459.
- 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.
- 李卓, 姜振学, 唐相路, 等, 2017. 渝东南下志留统龙马溪组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制. *地球科学*, 42(7): 1116–1123.
- 梁峰, 吴伟, 张琴, 等, 2024. 四川盆地南部寒武统筇竹寺组页岩孔隙结构特征与页岩气赋存模式. *天然气工业*, 44(3): 131–142.
- 梁霄, 马韶光, 李郭琴, 等, 2022. 上斜坡区筇竹寺组沉积环境及其页岩气勘探潜力: 以四川盆地威远地区威 207 井为例. *地质科技通报*, 41(5): 68–82.
- 刘瑞崑, 周文, 徐浩, 等, 2023. 层序格架下构造-沉积分异对页岩气储层特征的控制——以四川盆地西南部筇竹寺组为例. *沉积学报*, 41(5): 1478–1494.
- 刘树根, 曾祥亮, 黄文明, 等, 2009. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 578–592.
- 宁诗坦, 夏鹏, 郝芳, 等, 2021. 贵州牛蹄塘组黑色页岩岩相划分及岩相-沉积环境-有机质耦合关系. *天然气地球科学*, 32(9): 1297–1307.
- 邱玉超, 罗冰, 夏茂龙, 等, 2019. 四川盆地长宁地区震旦

- 系-寒武系裂陷槽的发现及其地质意义. 天然气勘探与开发, 42(2): 22-28.
- 王剑, 肖洒, 杜秋定, 等, 2023. 四川盆地东北部地区陡山沱组黑色页岩古海洋环境与有机质富集机制. 天然气工业, 43(4): 76-92.
- 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等, 2016. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征. 地学前缘, 23(1): 119-133.
- 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 等, 2023. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式. 石油与天然气地质, 44(3): 764-777.
- 吴建发, 张成林, 赵圣贤, 等, 2023. 川南地区典型页岩气藏类型及勘探开发启示. 天然气地球科学, 34(8): 1385-1400.
- 吴永辉, 姜振学, 吴建发, 等, 2024. 渝西地区高含水页岩气藏特征、形成机理及地质意义. 天然气工业, 44(8): 58-71.
- 谢国梁, 焦堃, 刘瑞崑, 等, 2024. 四川盆地及周缘筇竹寺组与五峰组-龙马溪组页岩孔隙结构对比. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(5): 813-832.
- 闫斌, 朱祥坤, 张飞飞, 等, 2014. 峡东地区埃迪卡拉系黑色页岩的微量元素和 Fe 同位素特征及其古环境意义. 地质学报, 88(8): 1603-1615.
- 杨梅华, 左银辉, 段新国, 等, 2023. 四川盆地下寒武统筇竹寺组烃源岩灶演化及其对成藏的启示. 地球科学, 48(2): 582-595.
- 杨学锋, 张成林, 赵圣贤, 等, 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.
- 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等, 2022. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力. 石油学报, 43(10): 1351-1368, 1394.
- 杨雨然, 石学文, 李彦佑, 等, 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.
- 雍锐, 石学文, 罗超, 等, 2024a. 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.
- 雍锐, 吴建发, 吴伟, 等, 2024b. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气勘探发现及其意义. 石油学报, 45(9): 1309-1323.
- 袁钰轩, 李一凡, 樊太亮, 等, 2023. 川西南地区下寒武统细粒沉积岩高精度层序地层特征及其充填演化模式. 地学前缘, 30(6): 162-180.
- 张明何, 魏祥峰, 高波, 等, 2024. 川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩发育模式. 石油与天然气地质, 45(4): 992-1006.
- 张天怡, 黄士鹏, 李贤庆, 等, 2024. 四川盆地下寒武统筇竹寺组沉积地球化学特征与有机质富集机制. 天然气地球科学, 35(4): 688-703.
- 郑马嘉, 郭兴午, 伍亚, 等, 2024. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽寒武系筇竹寺组超深层页岩气地质工程一体化高产井培育实践与勘探突破. 中国石油勘探, 29(3): 58-68.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等, 2014. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278-293.