# 德阳—安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积环境控制下的优质页 岩岩相类型及分布研究

宁诗坦<sup>1</sup>,唐相路<sup>1,2</sup>,徐亮<sup>3</sup>,姜振学<sup>1</sup>,史德民<sup>1</sup>,郑继威<sup>1</sup>,钟可塑<sup>3</sup>,李彦佑<sup>3</sup> [1.油气资源与工程全国重点实验室,中国石油大学(北京),北京,102249;2.新疆油气智能勘探与开发重点实验室,中国石油大学(北京)克拉玛依校区,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 36 种岩相类型,明确裂陷槽中段发育富有机质长荚质页岩(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荚质页 岩(H-F-S)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、富有机质长荚质粉砂质页岩(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,高长荚质矿物提供优质储集空间。研究成果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

中图分类号: P618

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 ShiTan<sup>1</sup>, TANG XiangLu<sup>1,2</sup>, XU Liang<sup>3</sup>, JIANG ZhenXue<sup>1</sup>, SHI DeMing<sup>1</sup>, ZHENG JiWei<sup>1</sup>, ZHONG KeSu<sup>3</sup>,

LI YanYou<sup>3</sup>

[1.National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, China. 102249; 2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Exploration and Development of Oil and Gas, Karamay Campus, China University of Petroleum (Beijing), Karamay, Xinjiang, China. 834000; 3.Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan

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。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42372144)资助.

通信作者: 唐相路 (1989-), E-mail: tangxl@cup.edu.cn

Provincial Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu, Sichuan 610051. China]

Abstract: The sedimentation of the Oiongzhusi 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, dividing 36 lithofacies types. 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 dysoxicanoxic 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. Keywords: Sichuan Basin; Deyang-Anyue rift trough; lithofacies type; sedimentary environment; organic matter enrichment; Shale gas

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(吴建发等., 2023; 吴永辉等., 2024; 邹才能等., 2023)。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 并且获得了重大的突破,中国石油部署的 WY1 井和 Z201 井日产量分别为 41.13×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 和 73.88×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,中石化部署的 ZY1 和JS103HF 日产量分别 125.7×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 为 25.86×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,这些勘探部署的井获得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., 2024; 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(Lietal.,2023;刘 瑞崟等., 2023)。按照主要岩性、古生物、测井和沉积旋回特征将筇竹寺组地层划分为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,筇一1亚 段包括1至4小层, 筇一2亚段包括5小层和6小层, 筇二段包括7小层和8小层(何骁等., 2024; 雍锐等.,2024)。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 4000~5500 m、 厚度 220~400m、烃源岩厚度普遍大于 50m,热演化程度较高 R。3%~3.5%,该地区具备着大规 模气藏富集的条件(梁霄等.,2022; 谢国梁等.,2024; 雍锐等.,2024)。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对川西南地 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对川北筇竹寺组页岩进行岩相划分成 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的存在富气现象,需要建立合理的岩相划分类型对筇竹寺组不 同层段进行划分,进而了解筇竹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 井的相关研究的基础上,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划分岩相类型,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,以期为筇 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)。



图1四川盆地沉积相平面分布及连井剖面(沉积相底图修改自文献(何骁等., 2024; 雍锐等., 2024))

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

# 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地层,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(梁峰等.,2024;梁霄等.,2022;刘瑞 崟等.,2023;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。

# 2 实验结果分析

#### 2.1 矿物组成特征

筇竹寺组页岩的矿物组分主要以石英、长石和黏土矿物含量为主。基于3口井的全岩矿物 X-衍射定量分析结果,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 三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-c)。

纵向分布上, 第一1亚段长英质矿物 Z201 井最高(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 井黏土矿物含量最高(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 井碳 酸盐矿物最低(9.2%)。黏土矿物 W207 井黏土矿物显著偏高(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。





# 2.2 总有机碳含量特征

筇竹寺组页岩总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量分布在 0.11%~7.13%,均值在 1.72%。 其中,W207 井筇一1亚段 TOC 含量分布在 0.18%~3.41%,均值在 1.53%, 筇一2亚段 TOC 含量 分布在 0.30%~2.94%,均值在 0.99%, 筇二段 TOC 含量分布在 0.39%~1.28%,均值在 0.75%;WY1 井筇一1 亚段 TOC 含量分布在 0.11%~4.06%,均值在 1.81%, 筇一2 亚段 TOC 含量分布在 0.39%~3.02%,均值在 1.28%, 筇二段 TOC 含量分布在 0.62%~1.48%,均值在 0.96%; Z201 井筇 一1 亚段 TOC 含量分布在 0.40%~7.13%,均值在 2.84%, 筇一2 亚段 TOC 含量分布在 1.00%~4.69%, 均值在 1.84%, 筇二段 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, 筇竹寺组底部筇一1亚段 TOC 含量为最高值, W201 井、WY1 井和 Z201 井的筇一1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)。

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

#### 2.3 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 分类方案:对矿物颗粒范围在 62.5~2500 µm (含量在 25%~50%) 定义为砂质, 颗粒粒度在 8~62.5 µm (含量在 25%~50%) 定义为粉砂质, 而 颗粒粒度在小于 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,进而更好地反映页岩的储层和气藏特征。并且粒度分布可以帮助区分不同的岩相单元,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 岩粒度分析特征作为岩相划分的重要依据。在光学镜下薄片观察和 Image J 提取矿物碎屑粒度粒径 分析可知, 筇竹寺组碎屑矿物颗粒主要以粉砂质和泥质为主, 同时还含有的砂质 (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。



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, 3051.03 m, 第一2亚段 6 小层, 砂质页岩, 砂质 (25%<62.5~2500 µm<50%), TOC=0.3%; b. W207 井, 3117.98 m, 第一2亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 µm>50%), TOC=3.31%; c. WY1 井, 4291.59 m, 第一2亚段 6 小层, 粉砂质页岩, 粉砂质 (25%<8~62.5µm<50%), TOC=1.24%; d. WY1 井, 4321.37 m, 第一2亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 µm>50%), TOC=2.14%; e. Z201 井, 4502.89 m, 第一2亚段 6 小层, 粉砂质页 岩, 粉砂质 (25%<8~62.5µm<50%), TOC=1.29%; f. Z201 井, 4607.27 m, 第一2亚段 5 小层, 页岩, 泥质 (8 µm>50%), TOC=1.89%

### 2.4 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 含量在筇一 2 亚 段最高, 筇一1 亚段次高, 筇二段含量较低 (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 口井的筇一 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, Ba、V和 Zn 微量元素含量的表现最高 (表 1)。

表1 裂陷槽中段 W207、WY1 和 Z201 井主量元素(wt%)和微量元素(×10<sup>-6</sup>)分析结果

YUA		W207 井			WY1 井			Z201 井		
NS	筇二段	筇一 <sub>2</sub> 亚段	筑一1亚段	筇二段	筇一 <sub>2</sub> 亚段	筇一 <sub>1</sub> 亚段	筇二段	<sup>第一2</sup> 亚段	第一1亚段	
SiO	53.88~62.9	53.26~58.9	53.81~64.8	46.31~67.7	42.73~69.4	47.52~66.5	43.28~62.8	56.07~64.94	52.56~67.6	
2	5 (58.4)	8 (56.2)	9 (59.1)	2 (59.8)	8 (58.3)	1 (60.7)	5 (57.1)	(60.5%)	8 (61.2)	
	6.67~8.20	5.50~7.92	6.71~7.57	5.21~7.53	4.03~7.96	5.42~7.54	4.61~8.13	4.03~7.76	2.07~8.11	
Al	(7.5)	(6.8)	(7.3)	(6.6)	(6.4)	(6.7)	(6.9)	(6.6)	(6.3)	
F	3.12~4.39	2.75~4.61	3.23~5.84	1.56~4.43	1.86~6.66	2.35~5.11	段         第二段         第           段         第二段         第 $5.5$ 43.28~62.8         56. $5$ 5 (57.1)         (           4         4.61~8.13         4.           (6.9)         1         1.45~5.13         1.           (3.7)         13         0.06~0.13         0.0 $0$ 0.023~0.28         0.0         0 $0$ 0.023~0.28         0.0         0 $0$ 0.007)         0         27~881         5           (208)         3         89~895         5         5           (312)         20         689~2418         5         5           (1221)         .4         1.34~60.1         2.         2. $(23.6)$ 1         .4         1.34~60.1         2. $(23.6)$ 1         .4         1.34~60.1         2. $(23.6)$ 1         .5         .6 $(.5, 2.~21.3)$ 6         .5         .2 $(.6, 38.7)$ 30         31.9~119         8 $(.6, 5.2~21.3)$ 6         .1	1.86~5.03	1.00~4.47	
Fe	(3.8)	(3.9)	(4.1)	(3.2)	WY1 井           第一2亚段 第           42.73~69.4         4           8 (58.3)         4.03~7.96         5           (6.4)         1.86~6.66         2           (3.7)         0.078~0.27         0           9 (0.14)         0.049~0.16         0           3 (0.08)         25~610         5           (198)         54~448         198)           519~1505         5         1           (1103)         2.44~85.3         1           (18.7)         17~172.5         1           (70.2)         10.3~66.1         5           80~180         1         1           (130)         6.2~19.1         1           (14.3)         6.9~14.45         6           (10.9)         2.43~33.1         (11.6)	(3.6)	(3.7)	(3.6)	(3.1)	
P	0.09~0.14	0.088~0.27	0.076~0.10	0.07~0.20	0.078~0.27	0.079~0.13	0.06~0.13	0.086~0.186	0.034~0.13	
YUA NS SiO 2 Al Fe P Mn Zn Zn V Ba Mo Ni Cu Cr	(0.11)	9 (0.13)	3 (0.09)	(0.12)	9 (0.14)	4 (0.10)	(0.09)	(0.12)	8 (0.09)	
	0.031~0.06	0.049~0.18	0.045~0.06	0.029~0.21	0.049~0.16	0.037~0.09	0.023~0.28	0.038~0.163	0.031~0.12	
Mn Zn	0 (0.04)	1 (0.09)	8 (0.06)	3 (0.06)	3 (0.08)	4 (0.06)	0 (0.07)	(0.08)	4 (0.07)	
Zn	74~237	54~502	55~180	20~299	25~610	31~3370	27~881	54~1680	31~6240	
	(155)	(227)	(132)	(121)	(198)	(512)	(208)	(289)	(942)	
	44~304	83~448	137~230	91~455	54~448	78~218	89~895	54~443	78~2610	
v	(198)	(211)	(168)	(215)	(198)	(148)	(312)	(193)	(567)	
P	859~1945	865~1565	1190~1570	743~1627	519~1505	911~4220	689~2418	519~3140	1190~9123	
ва	(1376)	(1280)	(1402)	(1145)	(1103)	(1589)	(1221)	(1327)	(2345)	
м	2.48~15.9	2.89~32	3.5~37.4	1.16~35.5	2.44~85.3	1.34~54.4	次 三段 第二段 第一   5 43.28~62.8 56.07   5 5 (57.1) (60)   4 4.61~8.13 4.03   (6.9) (6)   4 4.61~8.13 4.03   (6.9) (6)   1.45~5.13 1.86   (3.7) (3)   0.06~0.13 0.086   (0.09) (0)   9 0.023~0.28 0.038   0 (0.07) (0)   27~881 54~   (208) (2)   89~895 54   (312) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1221) (1)   (1) (1)   (38.7) (3)   (38.7) (3)   (38.7) (3)   (38.7) (3)   (14.2) (1)   (14.2) (1)   (14.2) (1)   (15.8) (1)	2.44~55.3	1.34~88.2	
Мо	(8.9)	(12.6)	(18.2)	(14.2)	(18.7)	(21.9)		(18.3)	(28.7)	
NI:	30.3~81.5	24.1~137	46.5~96.6	14.49~154.	17~172.5	14.6~197.5	14.6~209.5	17~172.5	14.6~238	
IN1	(56.2)	(67.8)	(67.3)	3 (68.7)	(70.2)	(91.3)	(87.6)	(72.8)	(95.2)	
Cu	21.3~69.6	15.8~90.8	29.2~54.7	10.89~59.4	10.3~66.1	12.5~464	度	10.3~66.1	12.5~475	
Cu	(43.7)	(46.2)	(41.2)	(35.1)	(34.5)	(58.4)		(35.1)	(78.3)	
Cr	69~120	80~180	120~150	31.9~112	80~180	110~1180	31.9~119	80~200	110~650	
	(95)	(123)	(133)	(72)	(130)	(286)	(76)	(135)	(245)	
Ca	10~20.5	8.1~23.9	12.6~20.5	5.31~21.3	6.2~19.1	5.2~22	5.2~21.3	6.2~21.3	3.3~22	
Co	(15.8)	(16.2)	(15.0)	(13.5)	(14.3)	(13.8)	(14.2)	(14.5)	(12.6)	
ጥከ	7.31~12.9	7.7~14.35	10.15~13.2	4.93~12.9	6.9~14.45	6.5~15.35	4.93~12.9	6.9~14.45	6.5~15.35	
Th	(10.5)	(11.1)	(11.8)	(9.9)	(10.9)	(10.6)	(10.1)	(10.8)	(10.5)	
I	4.54~23.8	2.43~24.7	4.4~21.8	2.37~30	2.43~33.1	2~60.6	2.37~30	2.43~33.1	2.54(10.2)	
U	(12.3)	(9.8)	(12.7)	(12.4)	(11.6)	(18.4)	(15.8)	(12.4)	2~34 (19.2)	

Table 1 Analysis results of major elements ( wt % ) and trace elements (  $\times 10^{-6}$  ) in Wells W207, WY1 and Z201 in the middle part of rift trough.

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

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 将样品的元素含量与 PAAS 标准化(即样品含量除以 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,利用 PAAS 标准化值揭示筇竹寺组主微量元素特征。

通过对所获得的筇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,主量元素 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筇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 表现为富集。Cu、Co、Th 整体亏损(图 5b)。微量元素 Mo、U 的普遍富集揭示筇竹寺组沉积期 水体强还原,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。



图 5 筇竹寺组页岩主微量元素 PAAS 标准化特征 (a)主量元素 (PAAS 标准化); (b)微量元素 (PAAS 标准化)

Fig.5 PAAS standardization characteristics of major and trace elements in shale of Qiongzhusi Formation (a) Major elements (PAAS standardization); (b) Trace elements (PAAS standardized).

# 3 讨论

#### 3.1 页岩沉积环境分析

# 3.1.1 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 表示自身成岩富集或热液成岩为主(闫斌等.,2014)。W207 井筇二段和筇 一2 亚段部分样品低于 0.5, 筇一1 亚段大部分样品高于 0.5,反映高陆源碎屑影响特征;WY1 筇 二段大部分样品高于 0.5, 筇一2 亚段大部分样品低于 0.5,少部分高于 0.5, 筇一1 亚段大部分样 品高于 0.5,少部分低于 0.5,非陆源和陆源碎屑共同作用;Z201 井筇二段、筇一2 亚段和筇一1 亚 段大部分样品均高于 0.5, 少部分低于 0.5, 以非陆源碎屑影响为主 (图 6a)。

同时,在筇竹寺组页岩的 SiO<sub>2</sub>和 TOC 含量的关系中,这两者并无明显的关系性,表明筇竹寺 组页岩硅质矿物受多种成因机制影响(图 6b)。基于此,通过 SiO<sub>2</sub>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 SiO<sub>2</sub>/TOC 比值与 TOC 图版,明显呈现指数相关性,表现明显为陆源碎屑影响、陆源与 生物影响和生物影响三段反映特征,并且与 Fe/Al 比值有着相应的一致性。总体来看,筇竹寺组页 岩沉积时期受陆源与生物影响频繁交替作用(图 6c)。



图 6 陆源碎屑富集程度与硅质成因规律及其与 TOC 相关性的特征 (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

Fig.6 The characteristics of terrigenous debris enrichment degree and siliceous genesis and its correlation with *TOC* (a) Fe / Al ratio index of provenance debris; (b) The relationship between SiO<sub>2</sub> content and

*TOC*; (c) The relationship between SiO<sub>2</sub> / *TOC* ratio and *TOC*.

# 3.1.2 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,通过 U-EF 和 Mo-EF 富集系数特征 以及判别阈值的确定,有助于确定筇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 均表现了特殊的相关性,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,出现明显的拐点(图 7)。根据与前人研究表明, 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≈6~8, Mo-EF≈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=8和Mo-EF=42 可作为筇竹寺组沉积时期强还原条件的阈值。并且在3口井中筇一1亚段底部和筇一2亚段底部 U-EF和Mo-EF 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体体现出"底部缺氧——中部贫氧——上部氧化"的沉积演化。



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 (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

Fig. 7 Characteristics of paleo-redox Mo-EF and U-EF indicators in different parts of the middle part of the rift trough of the Qiongzhusi Formation (a)~(c) The relationship between U-EF and *TOC*; (d)~(f)

The relationship between Mo-EF and TOC; (g~i) The relationship between U-EF and Mo-EF.

#### 3.1.3 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 值降低。而在开放的厌氧盆地中,水体频繁的变化,给 Mo 元素得到不断的补充,Mo/TOC 值反映 较高(Miao et al., 2023; Tribovillard et al., 2006)。此外,U-EF/Mo-EF 的协变模式能够有效补充水体 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筇一1 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)。从 U-EF/Mo-EF 的协变模 式看出部分样品落于颗粒传输区,远离弱滞留环境区域范围内,处于弱-中局限滞留环境中,大部 分样品点位于 1×海水~3×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-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 U-EF/Mo-EF 的协变模式所指示的古氧化还原表现为筇竹寺组底部为缺氧-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。



图 8 筇竹寺组裂陷槽不同部位水体滞留程度(图版修改自文献(Algeo and Lyons, 2006; Tribovillard et al., 2012)

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

#### 3.1.4 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/AI 值和生物钡含量(Babio)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中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: Babio=Ba sample-Al sample×(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 Babio 大于 100×10<sup>-6</sup>时,其对应的初级生产力关系为极高生产力,筇竹寺组 Babio 值均高于 100×10<sup>-6</sup>,其中以槽内中心 Z201 井的 Babio 值最高,均值可达到 1724.47×10<sup>-6</sup>,至槽缘斜坡 WY1 井(Babio 均值 1194.27×10<sup>-6</sup>)槽缘斜坡 W207井(Babio 均值 1199.41×10<sup>-6</sup>) Babio 值降低,并且 3 口井以筇二段和筇一1 亚段表现出更高的初级古生产力特征(图 9a)。

P/AI 值与 Babio 值分布特征较有差异, 主要体现在 WY1 井 P/AI 值最高, Z201 井其次, W207 井最低。WY1 井的筇二段 P/AI 值最高, 高于筇一段中两个亚段的 P/AI 值(图 9b)。在整体的裂 陷槽沉积背景下, 筇竹寺组早期(筇一1 亚段) 开始海侵, 槽内中心海平面上升幅度最高, 水体深 度大, 初级古生产力高, 营养元素 P 富集程度高, 利于生物大量繁殖, 因此生物钡含量也对应升 高; 在筇竹寺组中期(筇一2 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, 其生物钡含量也表现相对较低, 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,生物钡含量也表现出相对较高现象; 在筇竹寺组晚期(筇二段)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 富的营养物质,槽缘斜坡的营养元素 P 受到更多的富集,提高初级古生产力,导致筇二段生物钡 含量出现高值。综合而言,3 口井的古生产力均反映了很高的古生产力水平,槽内中心生物钡含量 最高,而处于裂陷槽缘斜坡的营养元素富集程度最高,反映出营养元素 P/AI 值和生物钡之间不同 古生产力水平的关系。



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.

# 3.2 岩相类型划分

# 3.2.1 岩相划分依据

页岩岩相分类反映了页岩的非均质特征,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)。

本研究基于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),单端元矿物含量大于 50%为界或两个端元矿物含量在 25%~50%范围,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(宁诗坦等.,2021; 王玉满等., 2016) (图 10b)。



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	岩框	划分	方案

岩相	粒径-岩相	长荚质矿物/%	碳酸盐矿物/%	黏土矿物/%	粒径/µm
化廿氏五山	长英质页岩	>50	<25	<25	<8 (>50%)
★央质贝石	长英质粉砂质页岩	>50	<25	<25	8~62.5 (25%~50%)
(3)	长英质砂质页岩	>50	<25	<25	>62.5 (25%~50%)
	钙质页岩	<25	>50	<25	<8 (>50%)
钙质页岩(C)	钙质粉砂质页岩	<25	>50	<25	8~62.5 (25%~50%)
	钙质砂质页岩	<25	>50	<25	>62.5 (25%~50%)
秋上乐页出	黏土质页岩	<25	<25	>50	<8 (>50%)
%上 贝 石	黏土质粉砂质页岩	<25	<25	>50	8~62.5 (25%~50%)
(CM)	黏土质砂质页岩	<25	<25	>50	>62.5 (25%~50%)
	混合页岩	25~50	25~50	25~50	<8 (>50%)
混合页岩 (M)	混合质粉砂质页岩	25~50	25~50	25~50	8~62.5(25%~50%)
	混合质砂质页岩	25~50	25~50	25~50	>62.5(25%~50%)

Table 2 Marine shale Qiongzhusi Formation shale lithofacies division scheme

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粒度为主, 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)。将光学镜下薄片观察到的碎屑颗粒粒径特征, 以砂质或粉砂质在 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%, 矿物粒度小于 8 μm 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 8~62.5 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%≤TOC<2%)-岩相、富有机 质(TOC≥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 耦合反应了有机质富集、沉积环境变化和储集性能的关系,建立研究区特有的岩相划分方案(图 10a)。

#### 3.2.2 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。通过对研究区筇竹寺组页 岩的光学镜下薄片观察和碎屑颗粒粒度分析,根据粒度对其进行了分级。分析结果表明,筇竹寺 组发育了 8 种"粒径-岩相"类型: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,TOC 含量 对这 8 种岩相进行了进一步划分,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)、含有机质粘土质粉砂质页岩 (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 从多到少其次为:含有机质长荚质粉砂质页岩(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)、贫有机质长荚质 粉砂质页岩(L-F-SS)、含有机质长荚质页岩(M-F-S)、含有机质混合质页岩(M-M-S)、富有机 质长荚质页岩(H-F-S)、富有机质长荚质粉砂质页岩(H-F-SS)、富有机质混合质页岩(H-M-S)、



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

WY1 井共发育 15 种岩相类型: 贫有机质长荚质粉砂质页岩 (L-F-SS)、富有机质长荚质页岩 (H-F-S)、含有机质长荚质页岩 (M-F-S)、含有机质长荚质砂质页岩 (M-F-SS)、含有机质混合 质粉砂质页岩 (M-M-SS)、贫有机质长荚质砂质页岩 (L-F-SdS)、贫有机质混合质砂质页岩 (L-M-SdS)、富有机质长荚质粉砂质页岩 (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)、富有机质黏土质粉砂质页岩 (H-A-SS)、富有机质黏土质粉砂质页岩 (H-A-SS)、贫有机质钙质粉砂质页岩 (L-C-SS)、贫有机质 长荚质页岩 (L-F-S) (图 12)。



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

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 机质长荚质页岩 (H-F-S)、含有机质长荚质粉砂质页岩 (M-F-SS)、富有机质长荚质粉砂质页岩 (H-F-SS)、含有机质长荚质页岩 (M-F-S)、贫有机质长荚质砂质页岩 (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)、贫有机质长荚质粉砂质页岩 (L-F-SS)(图 13)。



Fig.13 Vertical relationship diagram of Z201 lithofacies assemblage type and various sedimentary indexes of Qiongzhusi Formation.

3 口井岩相类型发育特征均在筇一 1 亚段、筇一 2 亚段和筇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,中部以低能、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荚质矿物为主 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

#### 3.3 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 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,进一步细分为 SQ1、SQ2、SQ3 四级层序,对应筇一1亚段、筇一2亚段和筇二段。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(杨学锋等.,2025; 雍锐等., 2024)。

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,不同构造位置的钻井发育优势岩相存在 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)。



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.

# 4 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,生物成因的高硅 质沉积主导,形成了强还原环境;而在槽缘,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=8, Mo-EF=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 一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 沉积环境控制下,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,同时高长英质 矿物提供了有利的孔隙空间。

# 参考文献(References)

- Algeo, T.J., Li, C., 2020. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems. Geochim. Cosmochim. Acta 287, 8-26.
- 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).
- Cai, Q., Hu, M., Kane, O.I., Yang, Z., Wen, Y., Luo, Q., Li, M., Hu, Z., Deng, Q., 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 Palaeogeography 12 (01), 129-152.
- Lazar, O.R., 2007. Redefinition of the new albany shale of the illinois basin: an integrated, stratigraphic, sedimentologic, and geochemical study. Dissertations & Theses Gradworks.
- Li, R., Wang, Y., Wang, Z., Xie, W., Li, W., Gu, M., Liang, Z., 2023. Geological characteristics of the southern segment of the late sinian—early cambrian deyang—anyue rift trough in sichuan basin, sw china. Petroleum Explor. Dev. 50 (2), 321-333.
- Miao, H., Jiang, Z., Tang, X., Deng, Z., Zhang, C., Liang, Z., Shi, Y., 2023. Hydrocarbon generation potential and organic matter accumulation patterns in organic-rich shale during the mesoproterozoic oxygenation event: evidence from the xiamaling formation shale. Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resour. 9 (1), 134.
- 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), 687-705. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.01.007.
- Rimmer, S.M., Thompson, J.A., Goodnight, S.A., Robl, T.L., 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in devonian–mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 215 (1), 125-154.
- Schoepfer, S.D., Shen, J., Wei, H., Tyson, R.V., Ingall, E., Algeo, T.J., 2015. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity. Earth-Sci. Rev. 149, 23-52.
- Sweere, T., van den Boorn, S., Dickson, A.J., Reichart, G., 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. Chem. Geol. 441, 235-245.
- 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., Riboulleau, A., 2012. Analysis of marine environmental conditions based onmolybdenum–uranium covariation—applications to mesozoic paleoceanography. Chem. Geol. 324-325, 46-58. h
- Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T., Riboulleau, A., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. Chem. Geol. 232 (1), 12-32.

# 中文参考文献

- 蔡全升, 胡明毅, 杨智, 邱小松, 张保民, 李海, 胡忠贵, 邓庆杰, 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(07), 2330-2345.
- 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 (04),1004-1019.
- 付秀丽,蒙启安,郑强,王忠杰,金明玉,白月,崔坤宁,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 (03), 38-52.
- 何骁,梁峰,李海,郑马嘉,赵群,刘勇,刘文平,2024.四川盆地下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 (01),142-155.
- 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,2024.四川盆地"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(02),420-439.
- 金之钧,朱如凯,梁新平,沈云琦,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 (06), 1276-1287.

- 李丹龙,伏美燕,邓虎成,胥旺,刘四兵,吴冬,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 (03),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 (01), 73-87.
- 李卓, 姜振学, 唐相路, 王朋飞, 黄璞, 王国臻, 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 (07), 1116-1123.
- 梁峰, 吴伟, 张琴, 罗超, 王玉满, 刘宇, 姜巍, 卢斌, 2024. 四川盆地南部下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 (03), 131-142.
- 梁霄,马韶光,李郭琴,夏国勇,刘若林,倪根生,张梦琳,寇一龙,袁翠平,陈佳,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 (05),68-82.
- 刘瑞崟,周文,徐浩,周秋媚,曹茜,高雯璐,宋威国,蒋柯,蒲飞龙,杨国梁,尚福华,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 (05), 1478-1494.
- 刘树根,曾祥亮,黄文明,马文辛,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(06),578-592.
- 宁诗坦,夏鹏,郝芳,田金强,钟毅,邹妞妞,付勇,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 (09), 1297-1307.
- 邱玉超, 罗冰, 夏茂龙, 陈友莲, 戴鑫, 李亚丁, 周红飞, 和源, 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 (02), 22-28.
- 王剑, 肖洒, 杜秋定, 周刚, 王铜山, 李秋芬, 付修根, 韦恒叶, 和源, 沈利军, 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 (04), 76-92.
- 王玉满,王淑芳,董大忠,李新景,黄金亮,张晨晨,管全中,2016. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征. 地学前缘 23 (01),119-133.
- 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 曹凯旋, 董晓霞, 赵勇, 魏力民, 王同, 马若龙, 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 (03), 764-777.
- 吴建发,张成林,赵圣贤,张鉴,冯江荣,夏自强,方圆,李博,尹美璇,张德宽,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 (08),1385-1400.
- 吴永辉, 姜振学, 吴建发, 梁兴, 石学文, 包书景, 吴伟, 徐亮, 唐相路, 韩云浩, 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 (08), 58-71.
- 谢国梁, 焦堃, 刘瑞崟, 邓宾, 叶玥豪, 刘树根, 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 (05), 813-832.
- 闫斌,朱祥坤,张飞飞,唐索寒,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 (08),1603-1615.
- 杨梅华, 左银辉, 段新国, 李忠权, 张佳珍, 党录瑞, 杨渊宇, 曾健丞, 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 (02), 582-595.
- 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(01),13-24.
- 杨雨, 文龙, 宋泽章, 张本健, 严威, 周刚, 田兴旺, 钟原, 和源, 马奎, 李堃宇, 杨岱林, 孙奕婷, 葛冰飞, 杨振中, 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.
- 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 (06),1211-1226.
- 雍锐,吴建发,吴伟,杨雨然,徐亮,罗超,刘佳,何一凡,钟可塑,李彦佑,朱逸青,陈丽清,2024.四川盆地寒武系筇 竹寺组页岩气勘探发现及其意义.石油学报 45 (09),1309-1323.
- 袁钰轩,李一凡,樊太亮,杜伟,陈格格,张坦,匡明志,刘旺威,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 (06), 162-180.
- 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(06):67-81.

- 张明何,魏祥峰,高波,戎佳,刘珠江,燕继红,杨琪航,王佳乐,刘慧萍,游浪,刘自亮,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 (04),992-1006.
- 张天怡,黄士鹏,李贤庆,姜华,曾富英,马以勒,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 (04),688-703.
- 郑马嘉,郭兴午,伍亚,赵文韬,邓琪,谢维扬,欧志鹏,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 (03),58-68.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 张宝民, 魏国齐, 王铜山, 姚根顺, 邓胜徽, 刘静江, 周慧, 徐安娜, 杨智, 姜华, 谷志东, 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 (03), 278-293.
- 邹才能,杨智,张国生,朱如凯,陶士振,袁选俊,侯连华,董大忠,郭秋麟,宋岩,冉启全,邱振,吴松涛,马锋,白斌, 王岚,熊波,潘松圻,刘翰林,王小妮,2023. 非常规油气地质学理论技术及实践. 地球科学 48 (06),2376-2397.