



移动阅读

冯冰, 沈家宁, 李龙, 等, 2024. 黔北正安地区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物成因及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 399–410. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05001

FENG B, SHEN J N, LI L, et al., 2024. Origins and significance of siliceous minerals in the shale reservoirs of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Zheng'an area, northern Guizhou[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 399–410. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05001

黔北正安地区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物成因及意义

冯冰¹, 沈家宁^{2*}, 李龙¹, 王胜¹, 何新兵¹, 秦仁月¹, 李刚权¹

(1. 贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 贵阳 563400; 2. 贵州乌江能源投资有限公司, 贵州 贵阳 563400)

摘要: 我国南方地区早古生代海相富有机质页岩硅质矿物含量较高, 其成因和来源对页岩储层物性和压裂改造效果至关重要。本文以黔北正安地区五峰组—龙马溪组页岩为研究对象, 通过岩心和薄片观察、X衍射分析、场发射扫描电镜及主微量元素分析等技术方法, 精细识别不同类型硅质矿物的结构, 定量计算不同来源硅质矿物的含量, 探讨不同成因硅质矿物对页岩孔隙和压裂改造的影响。结果表明: 研究区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物含量较高(约为71.5%), 主要为石英, 多呈棱角状和椭圆状等形态, 颗粒大小和结晶程度存在明显差异, 反映陆源和生源两种成因, 其中生物成因硅含量约为41.4%, 陆源碎屑硅含量约为30.1%。相比于焦石坝地区, 研究区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物含量较高, 主要表现在碎屑硅含量的增加, 生物成因硅含量相差不大。生物成因硅在沉积和成岩过程中, 可以形成刚性颗粒支撑结构, 有利于页岩储层的保存和压裂改造, 而陆源碎屑硅对页岩脆性和压裂改造不利。因此, 尽管研究区页岩硅质矿物含量总体较高, 但在页岩储层物性和压裂改造效果方面不及焦石坝等地区。

关键词: 五峰组—龙马溪组; 页岩储层; 硅质矿物成因; 压裂改造; 黔北地区

中图分类号: P571

文献标识码: A

Origins and significance of siliceous minerals in the shale reservoirs of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Zheng'an area, northern Guizhou

FENG Bing¹, SHEN Jianing^{2*}, LI Long¹, WANG Sheng¹, HE Xinbing¹, QIN Renyue¹, LI Gangquan¹

(1. Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Guiyang 563400, China; 2. Guizhou Wujinag Energy Group Co., Ltd., Guiyang 563400, China)

Abstract: Siliceous minerals, highly enriched in the organic shales of the early Paleozoic in South China, play a significant role in the development of shale reservoirs and volume fracturing. This study takes the shales of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Zheng'an area of northern Guizhou as the research subject, utilizing a variety of methods and technologies, including rock and thin section observation, x-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy (SEM) analysis as well as major and trace element analysis. Therethrough, we have identified the structure of different types of siliceous minerals, quantitatively measured their content,

收稿日期: 2024-01-19; 改回日期: 2024-03-31; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 冯冰(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事非常规天然气勘探开发领域项目管理工作。E-mail: ctnyktkf@163.com

通讯作者: 沈家宁(1989—), 硕士, 主要从事非常规天然气勘探开发规划研究及项目管理工作。E-mail: 63584842@qq.com

资助项目: 贵州省科技重大专项“贵州省页岩气效益开发关键技术及工程技术试验”(黔科合战略找矿[2022]ZD005)

and deeply explored their influence on the development of porosity in the shales and fracturing reconstruction. Results show that siliceous minerals, enriched in shale reservoirs of the research area, are mostly composed of quartz of elliptical and irregular shape. The minerals vary in grain size and degree of crystallization, revealing their origins from two sources of terrigenous and biogenic respectively, in which terrigenous silica accounts for 30.1%, while biogenic silica accounts for 41.4%. Comparatively, siliceous minerals content in the shales of the Wufeng-Longmaxi Formation in the research area is higher than that in the Jiaoshiba of central Chongqing. The increase is predominantly due to a high amount of terrigenous, while the content of biological quartz varies scarcely. Biogenic silica forms a rigid structure during sedimentation and diagenesis, which facilitates the preservation and later fracturing reconstruction of the shale reservoirs. In contrast, the presence of terrigenous silica has the opposite effect. Thus, although the overall content of siliceous minerals in the shale of the research area is high, the conditions for forming optimal reservoir physical properties and subsequent fracturing reconstruction are less favorable than those in the Jiaoshiba area of central Chongqing.

Key words: Wufeng-Longmaxi Formation; shale reservoir; origins of siliceous minerals; fracturing reconstruction; northern Guizhou

0 前言

硅质矿物作为海相富有机质页岩的重要组分,在页岩储层的相关研究中起到了至关重要的作用,不仅与有机质富集与保存密切相关(李桃等, 2021),还对后期页岩储层的压裂改造有着深远的影响(朱杰等, 2007; 杨文强等, 2010; 马文辛等, 2011; Xi et al., 2019)。通常情况下,海相富有机质页岩中硅质矿物与总有机碳含量(TOC)、孔隙度存在明显的正相关关系(蔡全升等, 2020; 文虎, 2021),而且硅质矿物的增加可以极大地提高页岩的脆性,有利于后期对页岩储层的压裂改造(Dong et al., 2017)。然而海相富有机质页岩的硅质矿物来源和成因十分复杂,前人针对页岩中硅质矿物的成因做了大量的研究,如在四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩的硅质矿物通常以生物成因为主(文虎, 2021; Dong et al., 2017; Dong et al., 2019);鄂西地区五峰组—龙马溪组页岩中硅质矿物存在陆源碎屑和生物混合成因(蔡全升等, 2020; 张号等, 2019);扬子地块北部五峰组—龙马溪组页岩及贵州寒武系底部硅质页岩中可见热液成因硅(张位华等, 2003; 张岩等, 2017);下扬子地区二叠系孤峰组页岩中还可可见交代成因硅(朱嗣昭, 1999)。这些不同成因的硅质矿物使得页岩在岩石学、矿物学和元素地球化学等方面存在差异,导致其指示的沉积环境和页岩储层特征也明显不同。因此,明确海相富有机质页岩中硅质成因及其来源对于明确页岩沉积环境和指导页岩气勘探开发具有重要的意义。

黔北地区近年来已成为南方海相页岩气勘探

开发的热点地区,目前该地区下古生界多套富有机质页岩已经取得了良好的勘探成效,然而针对该地区五峰组—龙马溪组的硅质矿物成因尚未深入研究,不同成因硅质矿物对储层的影响尚不明确。因此,本文以黔北正安地区五峰组—龙马溪组页岩为研究对象,在岩心和薄片观察的基础上,通过X衍射分析、场发射扫描电镜及主微量元素分析等技术方法,对不同类型硅质矿物的结构进行精细识别,定量计算不同来源硅质矿物的含量,以探讨不同成因硅质矿物对页岩储集物性和压裂改造的影响,以期更好支撑服务于黔北地区五峰组—龙马溪组页岩的勘探开发。

1 区域地质概况

正安地区位于贵州省北部,构造位置属上扬子陆块东南缘(图1)。自震旦纪以来经历了多期构造运动(翟刚毅等, 2017; 吴小力等, 2018; 梅廉夫等, 2008; 雷子慧等, 2016; 张浩然等, 2020; 苗凤彬等, 2020; 赵圣贤等, 2016)。早—中加里东期,由于黔中隆起的影响,上扬子克拉通沉降范围减小,沉积了一套以碳酸盐岩与碎屑岩为主的海相地层。晚加里东时期,强烈的广西造陆运动使黔中隆起进一步扩大,除黔北少数地区外,大部分地区隆升、剥蚀,导致晚古生代的泥盆系—石炭系地层大面积缺失。海西期—印支期以来,又存在多次构造隆升作用影响。在多期构造作用影响下,区域内发育了多套富有机质页岩,主要包括早寒武世牛蹄塘组和上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组海相页岩,以及二叠系龙潭组海相页岩(翟刚毅等, 2017; 苗凤彬等, 2020; 冯伟明等, 2020)。其中,上奥陶统五峰组—

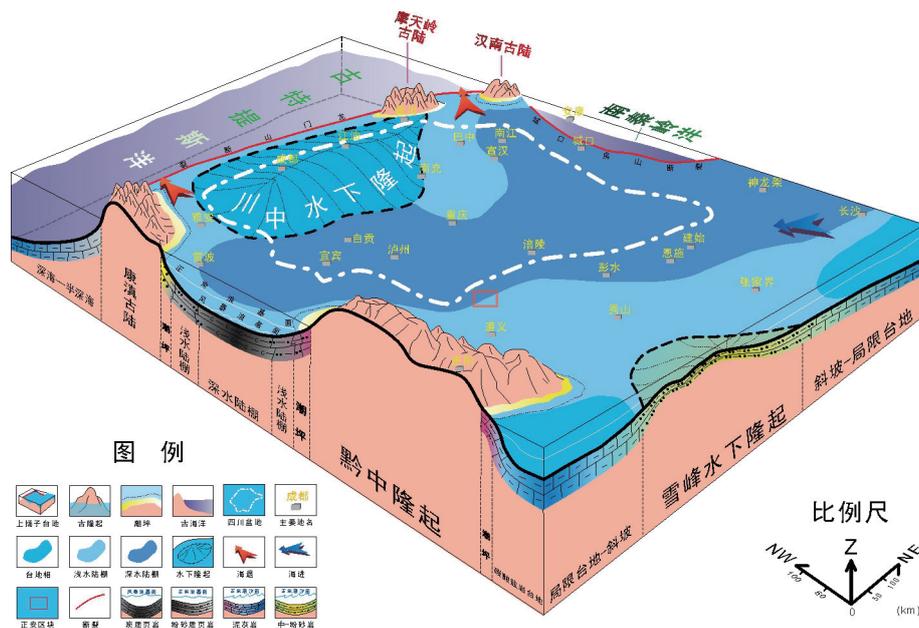


图1 中上扬子地区五峰组—龙马溪组沉积模式及研究区位置图 (据赵圣贤, 2016)

Fig. 1 Sedimentary model of the Wufeng-Longmaxi Formation in the middle-upper Yangtze Block and location map of the study area (modified from Zhao, 2016)

下志留统龙马溪组为一套黑色碳质页岩、含粉砂质碳质页岩夹少量黑色薄层硅质岩,水平纹层极为发育,含大量笔石化石,主要为非补偿性的浅水陆棚—深水陆棚相沉积,是黔北地区页岩气勘探开发的重点层位。

2 页岩地质特征

2.1 沉积厚度与层序格架

前人研究表明,黔北地区五峰组—龙马溪组富有机质页岩自南向北沉积水体逐渐加深,自绥阳至重庆南川三汇地区,沉积相带从浅水陆棚逐渐过渡

至深水陆棚。同时,页岩的沉积厚度由北向南也存在逐渐变薄的趋势,重庆南川三汇页岩厚度为75 m,道真附近厚度约为56.4 m,至绥阳仅有7.7 m,而在湄潭附近则无五峰组—龙马溪组富有机质页岩发育(图2)。平面上页岩厚度由东南向西北厚度也是逐渐增大,习水道真一带五峰组—龙马溪组页岩最厚,约为60~80 m,桐梓—正安一带厚度中等,约40~60 m;凤冈—松桃一带较薄,仅发育数米至十数米(图2,周业鑫等,2021)。

基于测井曲线与岩性特征,建立层序地层格架,识别出三个三级层序—层序组界面,包括五峰组底

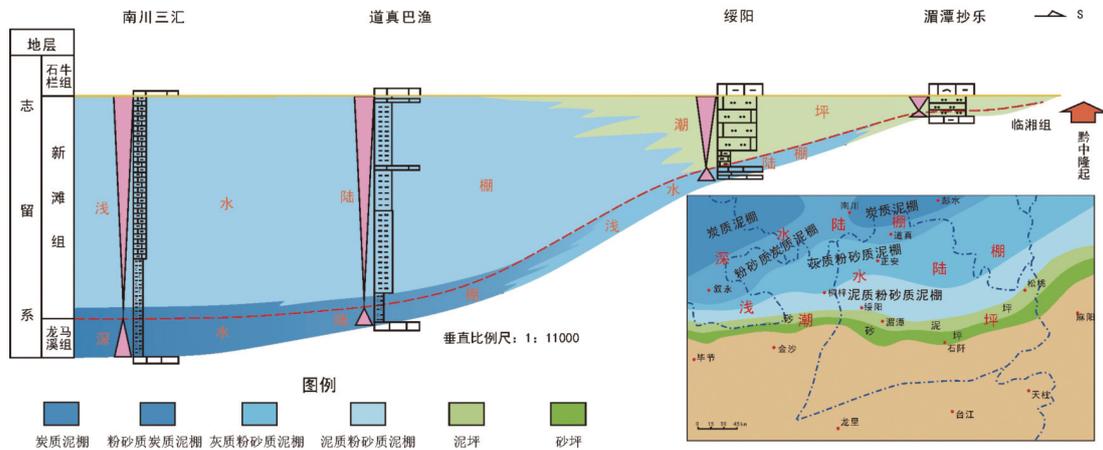


图2 黔北地区志留系地层对比及沉积相图

Fig. 2 Stratigraphic correlation and sedimentary facies distribution map of Silurian strata in northern Guizhou

界(SB₁)、龙马溪组底界(SB₂)和龙马溪组顶界(SB₃)。划分了五峰组和龙马溪组两个三级层序以及对应的五个四级层序,即五峰组海进(TST)体系域与高位(HST)体系域,龙马溪组海进(TST)、早期高位(EHST)和晚期高位(LHST)三个体系域,合计9个准层序组(图3)。

五峰组底界 SB₁ 为五峰组和宝塔组的分界,在测井上,该界面处 GR 曲线发生突变,界面之上五峰组的 GR 值呈现为一个高值区域。岩相上主要表现为岩性的变化,该界面之下为宝塔组灰岩,界面之上为五峰组下部的黑色页岩。龙马溪组底界 SB₂ 为龙马溪组与观音桥段的分界,在测井曲线上,该界面以上 GR 值陡然增高。岩相上主要表现为岩性变化,该界面之下为观音桥段的灰岩,界面之上为龙马溪组的黑色页岩。龙马溪组顶界 SB₃ 发育于龙马溪组顶部,测井曲线上,该界面处 GR 值由高值骤变为低值。

五峰组三级层序包括五峰组海进(TST)体系域与高位(HST)体系域两个四级层序。五峰组海进(TST)体系域主要由五峰组下部的黑色碳质页岩构成,厚度为 3~5 m;五峰组高位(HST)体系域对应于五峰组顶部的观音桥段,厚度较薄,小于 0.5 m,岩性以泥质灰岩为主。龙马溪组三级层序包括龙马溪组海进(TST)体系域,早期高位(EHST)体系

域与晚期高位(LHST)体系域三个四级层序,该层序厚度约为 35 m。龙马溪组海进(TST)体系域对应龙马溪组一、二小层,主要发育一套富有机质的钙质页岩;龙马溪组早期高位(EHST)体系域主要为深水—浅水陆棚沉积,该时期岩性组合从碳质页岩与钙质页岩逐渐过渡到灰质泥岩;龙马溪组晚期高位(LHST)体系域沉积环境转变为浅水陆棚,岩性以浅灰色灰质泥岩为主。

2.2 岩矿特征

正安地区现有钻井岩心显示,五峰组地层厚度普遍小于 10 m,岩性主要为暗色碳质页岩,偶见斑脱岩薄夹层,顶部观音桥段发育薄层含生物碎屑灰质泥岩、泥灰岩,部分地区厚度较薄甚至缺失。龙马溪组厚度在 20~30 m 之间,下部主要为钙质页岩与黑色碳质页岩夹薄层斑脱岩,页理发育,上部岩性逐渐转变为灰色泥灰岩(图3)。

岩心全岩 X 衍射结果显示,五峰组—龙马溪组页岩主要发育硅质岩相,矿物组分以石英和长石为主,质量分数约为 45%~75%,其次为黏土矿物组分,主要为伊蒙混层和伊利石,质量分数约为 15%~45%,碳酸盐矿物含量较少,一般小于 15%。样品中普遍发育黄铁矿,质量分数平均为 3.6%。同时,本地区不同典型井矿物组成和岩相相似,但正安地区页岩在矿物含量与分布上与焦石坝地区

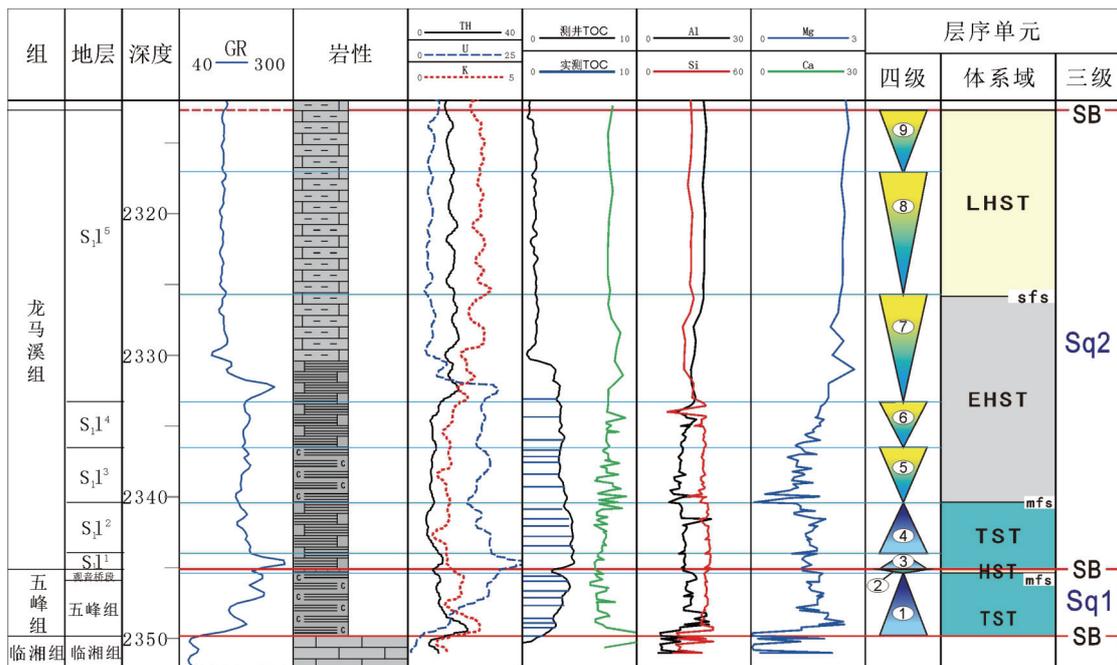


图3 黔北正安地区五峰组—龙马溪组目的层层序地层划分图

Fig. 3 Sequence stratigraphy of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Zheng'an area, northern Guizhou

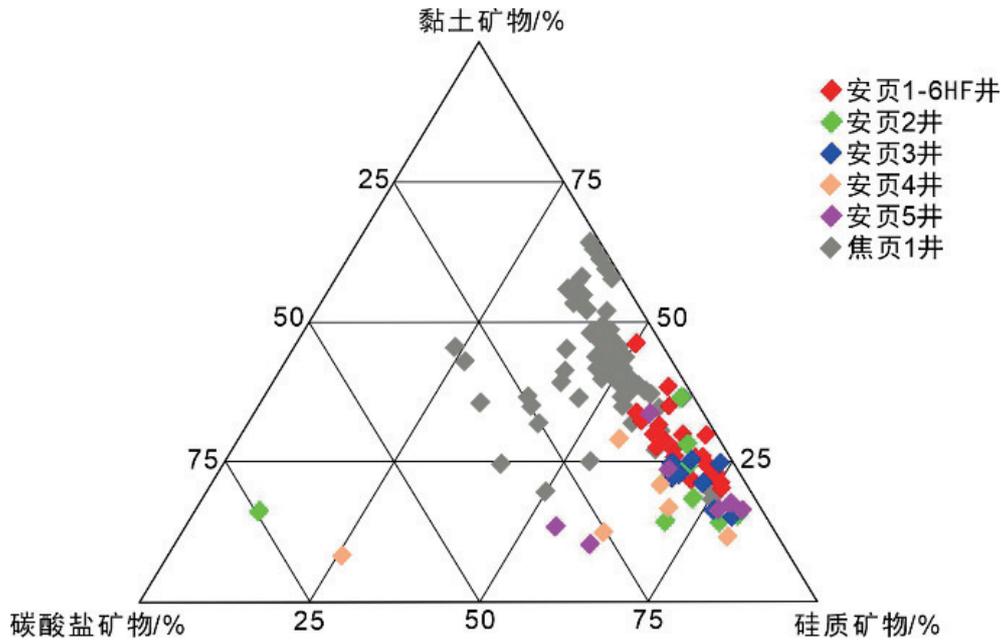


图4 研究区及焦石坝地区主要钻井五峰组—龙马溪组页岩矿物组成及岩相划分

Fig. 4 Mineralogical composition and petrographic diagram of shale samples from different wells in the Wufeng-Longmaxi Formation

页岩(焦页1井)的差异明显,后者的黏土矿物更加发育(图4)。

2.3 页岩有机质特征

有机质显微组分分析表明,五峰组—龙马溪组干酪根以腐泥组为主,镜下可观察到大量腐泥组无定形体、少量壳质组底栖藻无定形体与镜质组正常镜质体,干酪根类型指数较高(大于90),主要为I型干酪根。较低的镜质体含量导致难以对镜质体反射率(R_o)进行有效的测定,但镜质体反射率(R_o)与沥青反射率(R_b)存在一定的相关关系,可大体等价(Ferreiro Mähmann et al., 2019)。经测定,本区沥青反射率(R_b)介于1.82%~2.41%,因此认为本区五峰组—龙马溪组页岩处于高一过成熟阶段。根据钻井岩心实测,五峰组—龙马溪组TOC含量主要分布在3%~6%,平均为4.7%,其中五峰组TOC含量的变化范围在2.42%~5.51%,平均值为3.42%,龙马溪组TOC含量的变化范围在3.7%~5.2%,平均值为4.4%。TOC在五峰组、龙马溪组一小层、龙马溪组二小层等不同层段变化较小,均表现出较高值的特征(图3)。

3 页岩硅质矿物成因及意义

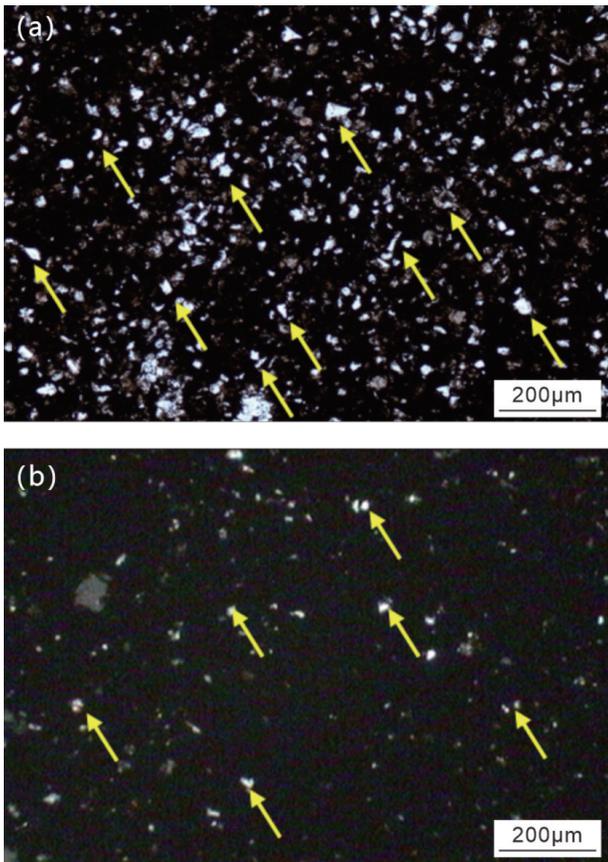
3.1 页岩中典型矿物特征

前人研究表明,海相富有机质页岩的硅质矿物

来源十分广泛,不同来源的硅质矿物往往在岩石学、矿物学和地球化学等方面存在独特的识别特征,可以成为硅质矿物成因的判别标志(Dong et al., 2017; Dong et al., 2019; 王淑芳等, 2014; 刘江涛等, 2017)。

陆源碎屑硅来源于大陆母岩风化作用产生的硅酸盐及铝硅酸盐(如长石、石英等),由于抗风化能力有所差异,经过长距离搬运后进入海洋沉积的陆源碎屑中主要为石英等抗风化能力较强的硅质矿物,因而在海相沉积物中陆源碎屑硅的含量往往与陆源物质输入量存在明显的正相关关系(Dong et al., 2017; 林良彪等, 2010; 邱振等, 2018)。除去陆源碎屑硅,海相沉积物中还有其他来源的硅质矿物,前人采用过量硅(高于正常环境下碎屑沉积的 SiO_2 含量)来对其进行表征。一般来说,过量硅由热液成因硅、交代成因硅及生物成因硅等多部分组成,但正安地区热液作用、交代作用及火山作用均不明显,因此可认为正安地区过量硅近似等同于生物成因硅(翟刚毅等, 2017; 吴小力等, 2018; 梅廉夫等, 2008; 王淑芳等, 2014; Dong et al., 2019)。

对正安地区五峰组—龙马溪组页岩的薄片进行显微分析,发现五峰组—龙马溪组页岩中生物成因硅(SiO_{2-bio})与陆源碎屑硅($SiO_{2-detrital}$)均有发育,其中陆源碎屑硅($SiO_{2-detrital}$)以长石、石英为主,石英直径介于10~20 μm ,形态不规则,多为棱角状



a. 正安地区, 安页 2 井, 龙马溪组; b. 焦石坝地区, 焦页 1 井, 龙马溪组

图 5 研究区及焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩薄片观察及典型矿物特征

Fig. 5 Thin-section observations and typical mineral characterization of the Wufeng-Longmaxi Formation shales in the study area and the Jiaoshiba Block

(图 5a)。生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)以石英为主,直径相对较小(5~10 μm),形态以圆状—椭圆状为主,含量一般大于 40%。与焦石坝地区相比,正安地区五峰组—龙马溪组页岩薄片着陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)含量明显较多(图 5a, 5b),表明本区在五峰组—龙马溪组沉积期受到显著的陆源碎屑输入影响,这可能是由于研究区靠近黔中隆起物源区,使得陆源碎屑物质能够源源不断地输入所致。

前人研究表明,扫描电镜下生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)与陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)形态上具有明显差异,陆源碎屑石英颗粒较大,表现为不规则的棱角状,并伴有次生加大现象,而生物成因的石英颗粒明显较小,为圆状—椭圆状,镜下一般由多个石英颗粒聚集成葡萄状,并且颗粒间常有胶结物或有机质充填(图 6, Dong et al., 2017)。

3.2 页岩硅质矿物来源定量分析

页岩中硅质矿物是决定页岩脆性的重要矿物,一方面,脆性矿物含量较高有利于压裂改造;另一方面,陆源碎屑石英对页岩孔隙的保存也存在一定的影响。研究区目的层段五峰组—龙马溪组页岩的硅质矿物含量较高, SiO_2 含量在 57.6%~76.9%之间,平均为 71.5%,总体高于焦石坝地区(SiO_2 含量介于 54.7%~77.3%,平均为 64.2%)。

为明确不同来源硅质矿物的相对百分含量,使用公式(1)计算页岩中生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)的含量(Turgeon and Brumsack, 2006; Ross and Bustin, 2009)。

$$\text{SiO}_{2\text{-bio}} = \text{SiO}_{2\text{sample}} - \text{Al}_2\text{O}_{3\text{sample}}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{PAAS}} \quad (1)$$

式中 $\text{SiO}_{2\text{sample}}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{sample}}$ 为样品中的 SiO_2 与 Al_2O_3 含量, $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{PAAS}}$ 为澳大利亚太古界沉积岩中的 SiO_2 与 Al_2O_3 比值。

结果表明,相比四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩(生物成因硅平均为 42.1%,陆源碎屑硅平均为 22%)(图 7a),正安地区硅质矿物含量较高,主要表现在陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)含量的增加,生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)的含量基本持平(生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)的含量介于 2.1%~53.7%,平均为 41.4%,陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)在 22.3%~56.9%之间,平均为 30.1%)(图 7b),这与薄片显微特征观察的结果一致,表明了五峰组—龙马溪组页岩沉积时受到明显陆源碎屑输入的影响。

3.3 页岩硅质矿物成因及其对储层改造的影响

前人通过大量研究指出,富有机质页岩中硅质矿物与陆源输入指标的相关关系可以作为页岩硅质矿物成因的判别依据。生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)与陆源输入指标通常表现为负相关或弱相关关系,而陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)与陆源输入指标一般表现为较强的正相关关系(Dong et al., 2017)。

Zr 与 Al 两种元素在沉积和变质作用过程中表现出较强的抗迁移性,即使被转移到沉积物中,也仍能反映母岩的地球化学特征,所以这些元素和它们的比值特征可以反映陆源输入信息(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; 赵志强等, 2019)。相关性分析中,正安地区硅质矿物含量与 Zr、Al 两种元素的含量均表现出了明显的负相关关系,表明本区硅质矿物与陆源输入无明显关系,主要为生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)。分析结果与显微特征观察情况存在较大差异,这可能是由于研究区硅质矿物中生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)占主导作用,使得

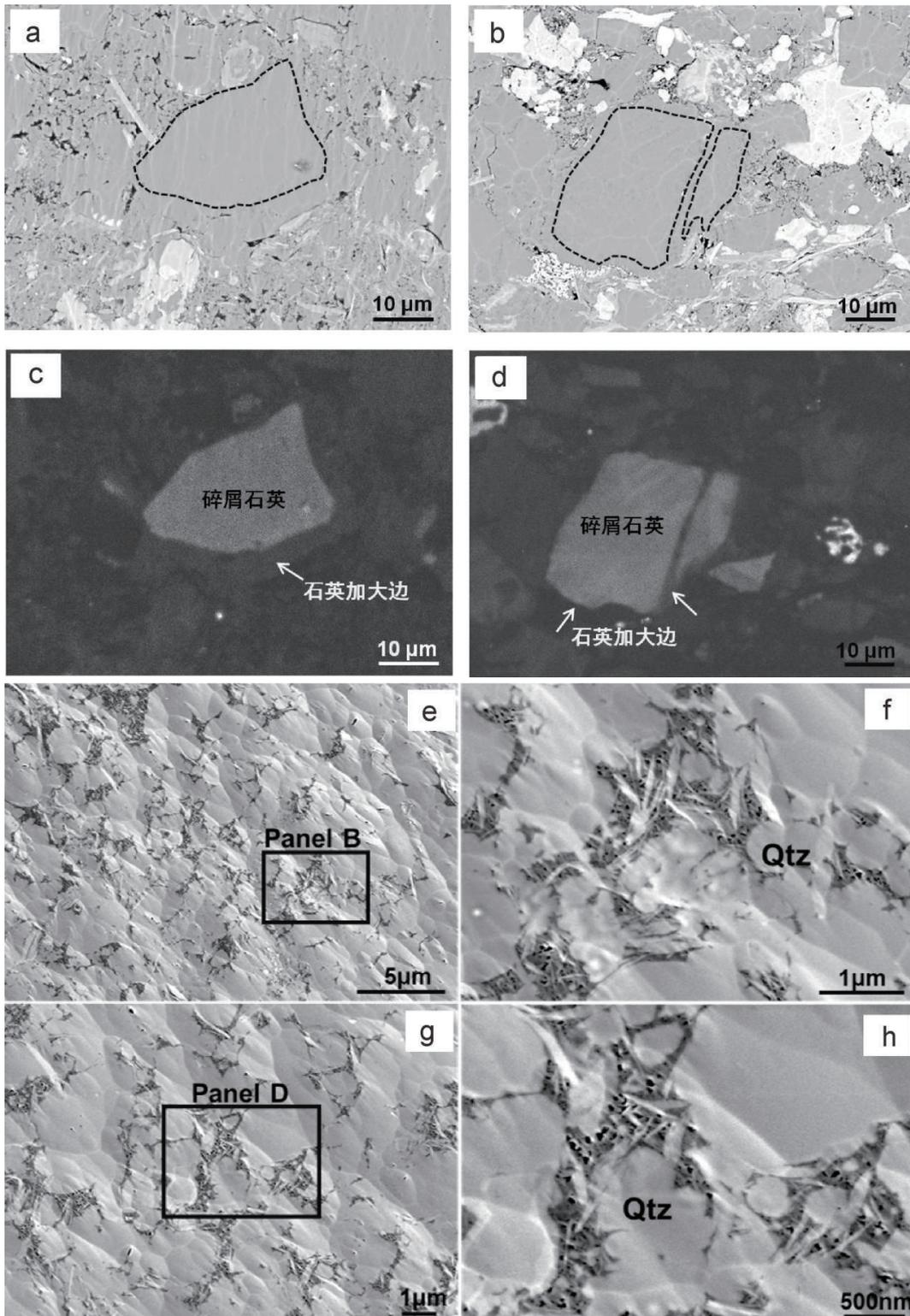


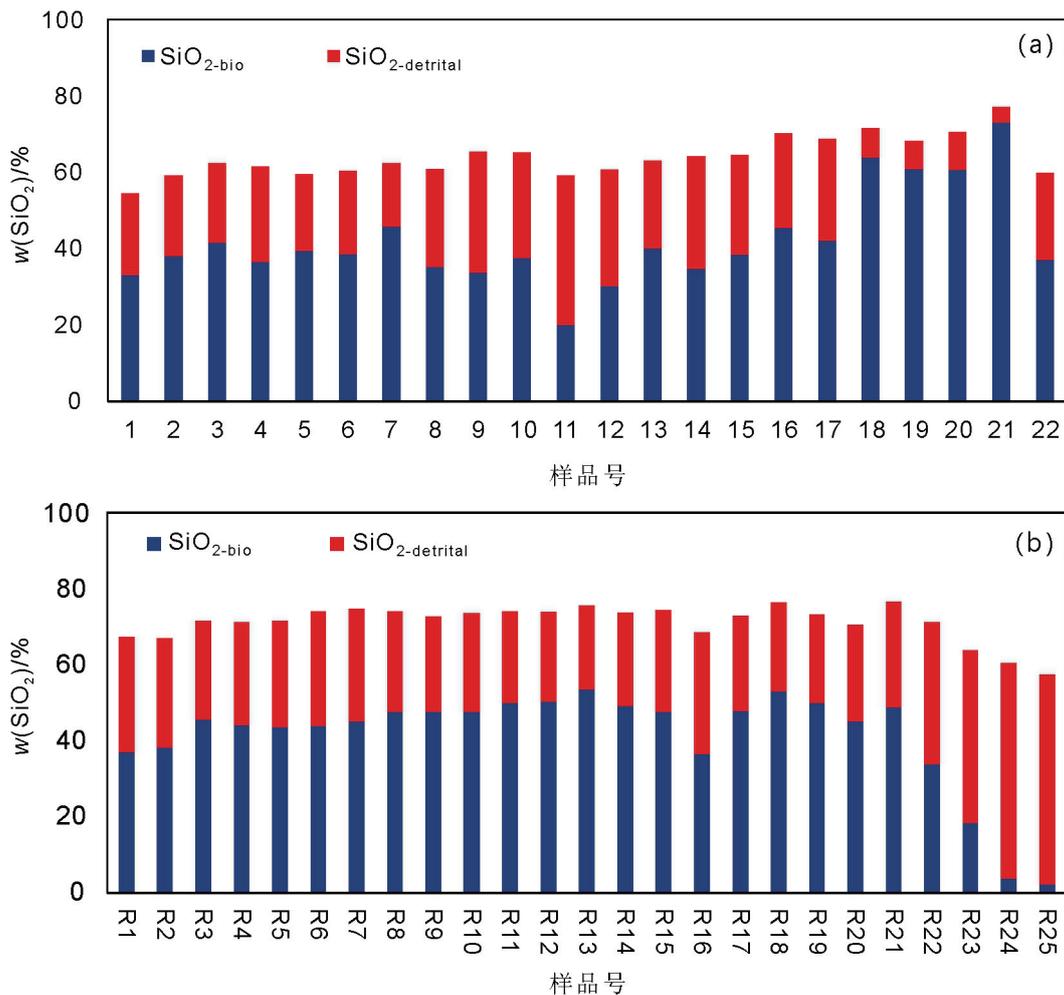
图 6 陆源石英与生源石英典型特征对比 (据 Dong et al., 2017)

Fig. 6 Comparison of typical characteristics of terrigenous and biogenic silica (modified from Dong et al., 2017)

陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)与陆源输入指标相关性不明显(图 8a, 8b)。

页岩气储层主要以微纳米级孔隙作为有效储

集空间,页岩气高效开发的关键在于后期的压裂改造中能否形成网状连通的储集空间,页岩的脆性是制约压裂改造的重要因素之一。一般来说,页岩脆



A. 焦石坝地区，焦页 11-4 井；B. 正安地区，安页 1-6HF

图 7 研究区及焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物来源定量分析

Fig. 7 Quantitative analysis of the sources of siliceous minerals in the Wufeng-Longmaxi Formation shales of the study area and the Jiaoshiba Block

性越高, 压裂效果越好(王淑芳等, 2014; Dong et al., 2019; 何建华等 2015; 陈桂华等, 2016; 张晨晨等, 2016)。脆性指数作为表征页岩脆性的重要指标, 其大小与页岩储层中硅质矿物含量的高低息息相关, 目前脆性指数的计算公式主要采用 Jarvie 等人在 2007 年提出的公式, 即: 脆性指数=石英含量/(石英含量+碳酸盐矿物含量+黏土矿物含量)(Jarvie et al., 2007)。

计算结果显示, 五峰组—龙马溪组页岩脆性指数介于 43.6%~74.6%, 平均为 63.02%。脆性指数在与总硅(SiO_2)含量以及生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)含量的相关性图中表现出了较明显的正相关关系(图 8c, 8d), 而与陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)含量存在明显的负相关关系(图 8e)。压裂改造是颗粒间脆性胶结物的破裂, 脆性颗粒本身不会破碎, 一般情况下生物

成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)以石英微晶存在于杂基和生物体腔中, 颗粒数量较多, 直径较小, 有利于压裂改造, 而陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)主要以较大直径的硅质矿物颗粒存在于页岩中, 压裂改造过程难以断穿此类刚性颗粒, 从而不利于复杂缝网的形成。正安地区五峰组—龙马溪组页岩虽然具有较高的生物成因硅($\text{SiO}_{2\text{-bio}}$)含量, 能够形成较强的颗粒支撑结构, 对页岩储层的保存和压裂改造有利, 但同时陆源碎屑硅($\text{SiO}_{2\text{-detrital}}$)含量也相对较高, 该类颗粒较大、数量较少的硅质矿物往往难以形成颗粒支撑结构, 并且在压裂改造中阻碍复杂缝网的形成, 不利于页岩孔隙保存和压裂改造。因此, 尽管研究区页岩硅质矿物含量总体较高, 但在页岩储层物性和压裂改造条件方面不及焦石坝等地区。

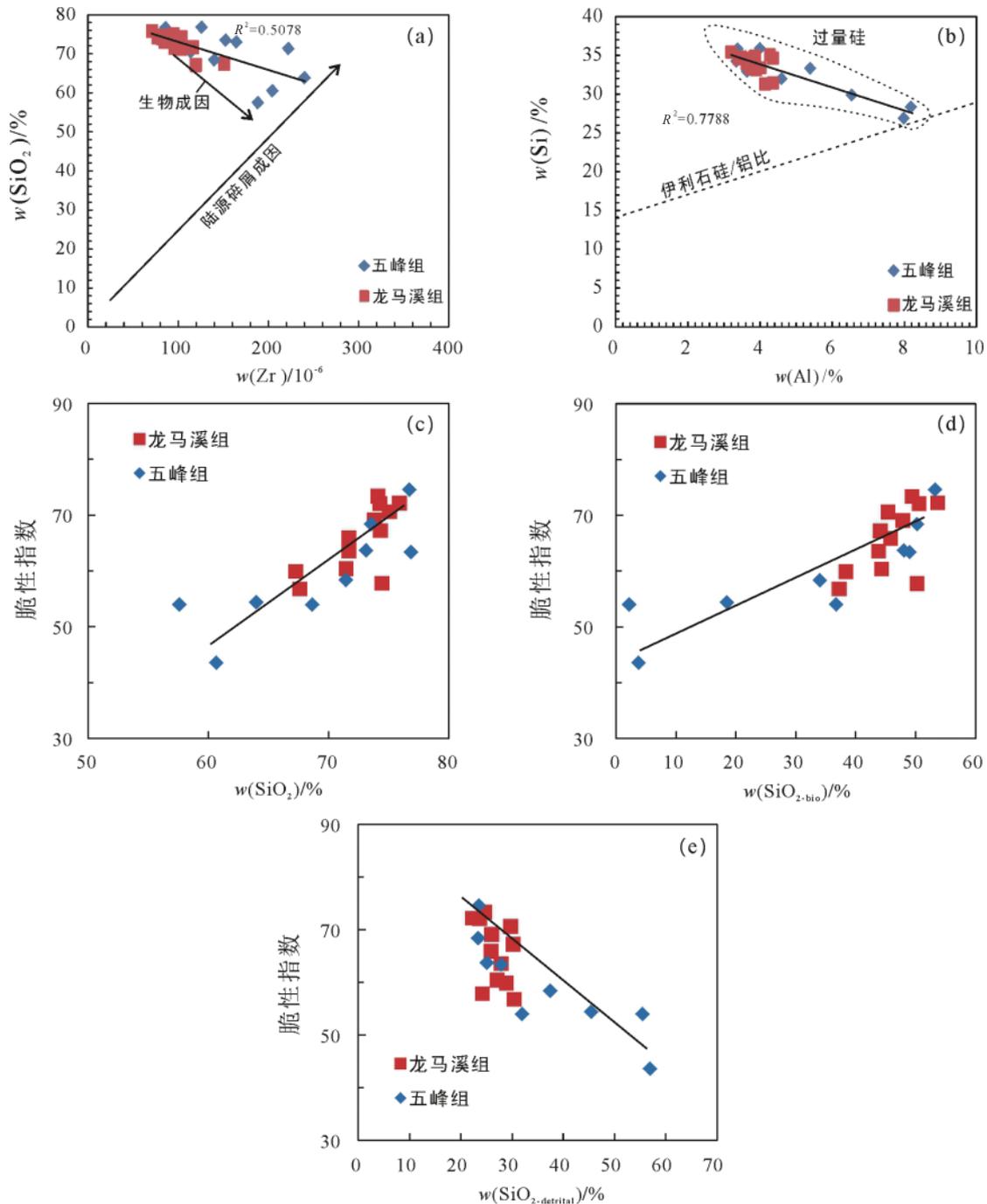


图 8 研究区五峰组—龙马溪组页岩硅质矿物成因及其对压裂改造的影响

Fig. 8 Origins of the siliceous minerals of the Wufeng-Longmaxi Formation shales in the study area and their impact on fracture modification

4 结论

(1)正安地区五峰组—龙马溪组主要发育硅质页岩相,矿物组分以石英和长石为主,质量分数约为45%~75%,其次为黏土矿物组分,主要为伊蒙混层和伊利石,质量分数约为15%~45%,碳酸盐矿物含

量较少,一般小于15%。

(2)正安地区五峰组—龙马溪组页岩薄片中生生物成因硅与陆源碎屑硅均有发育,其中陆源碎屑硅颗粒较大,直径10~20 μm,形态不规则,多为棱角状,而生物成因硅颗粒较小,直径5~10 μm,形态以圆—椭圆状为主。

(3) 正安地区五峰组—龙马溪组页岩的硅质矿物含量较高, SiO_2 含量介于 57.6%~76.9%, 平均为 71.5%, 总体高于焦石坝地区。生物成因硅含量在 2.1%~53.7% 之间, 平均为 41.4%, 陆源碎屑硅在 22.3%~56.9% 之间, 平均为 30.1%, 与四川盆地焦石坝地区相比, 虽然正安地区硅质矿物含量较高, 但主要表现在陆源碎屑硅含量的增加, 生物成因硅的含量基本持平, 表明沉积时受到明显陆源碎屑输入的影响。

(4) 正安地区五峰组—龙马溪组页岩脆性指数介于 43.6%~74.6%, 平均为 63.02%。脆性指数、总硅含量与生物成因硅含量存在良好的正相关关系, 而与陆源碎屑硅含量存在明显的负相关关系, 表明研究区较高的陆源碎屑硅含量对页岩储层的压裂改造构成了不利因素。

References

- Bhatia M R, Crook K A W, 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 92 (2) : 181 - 193.
- Cai Q S, Chen X H, Zhang B M, et al., 2020. Origin of siliceous minerals in the black shale of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Yichang area, western Hubei Province: geological significance for shale gas[J]. *Acta Geological Sinica*, 94 (03) : 931 - 946 (in Chinese with English abstract).
- Chen G H, Bai Y H, Chen X Z, et al., 2016. A new identification method for the longitudinal integrated shale oil/gas sweet spot and its quantitative evaluation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (11) : 1337 - 1360 (in Chinese with English abstract).
- Dong T, Harris N B, Ayranci K, et al., 2017. The impact of rock composition on geomechanical properties of a shale formation: Middle and Upper Devonian Horn River Group shale, Northeast British Columbia, Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 101 (02) : 177 - 204.
- Dong T, He S, Chen M F, et al., 2019. Quartz types and origins in the paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations, Eastern Sichuan Basin, China: Implications for porosity preservation in shale reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology* 106: 62 - 73.
- Feng W M, Zhao Z, Li R, et al., 2020. Geological characteristics of shale gas of the Wufeng Fm-Longmaxi Fm in DD1 well in Northeast Yunnan and their exploration significances[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (4) : 17 - 24 (in Chinese with English abstract).
- Ferreiro M R, Frey M. 2012. Standardisation, calibration and correlation of the Kübler-index and the vitrinite/bituminite reflectance: an inter-laboratory and field related study[J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 105 (2) : 153 - 170.
- He J H, Ding W L, Wang Z, et al., 2015. Main Controlling Factors of Fracture Network Formation of Volume Fracturing in Shale Reservoirs and Its Evaluation Method[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34 (04) : 108 - 118 (in Chinese with English abstract).
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al., 2007. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG bulletin*, 91 (4) : 475 - 499.
- Lei Z H, Zhao A K, Yu Q, et al., 2015. Preservation of Shale Gas in Lower Silurian Longmaxi Formation in Anchang Syncline Unit in Northern Guizhou, South China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 35 (04) : 121 - 127 (in Chinese with English abstract).
- Li T, Yang G L, He W, et al., 2021. Preservation condition for shale gas of Wufeng-Longmaxi Formations in Xichang Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (3) : 465 - 476 (in Chinese with English abstract).
- Lin L B, Chen H D, Zhu L D, et al., 2010. The Origin and Geochemical Characteristics of Maokou Formation Silicalites in the Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 84 (04) : 500 - 507 (in Chinese with English abstract).
- Liu J T, Li Y J, Zhang Y C, et al., 2020. Evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area and its geological significance[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 41 (01) : 34 - 41 (in Chinese with English abstract).
- Ma W X, 2020. Study on the Characteristics and Formation Mechanism of Upper Sinian Dengying Formation Chert in East Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Miao F B, Peng Z Q, Wang Z X, et al., 2020. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, western margin of Xuefeng Uplift[J]. *Geological Science and Technology Information*, 39 (02) : 31 - 42 (in Chinese with English abstract).
- Mei L F, Dai S W, Shen C B, et al., 2008. Temporal and Spatial Configuration of Sedimentary Systems and Sequence Stratigraphic Framework of Sangonghe Formation in Bohu Depression of Yanqi Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 27 (04) : 1 - 7, 14 (in Chinese with English abstract).
- Ross D J K, Bustin R M, 2009. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin[J]. *Chemical Geology*, 260 (1-2) : 1 - 19.
- Taylor S R, McLennan S M, 1986. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *Geological Journal*, 21 (1) : 85 - 86.
- Turgeon S, Brumsack H J, 2006. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria-Marche Basin of central Italy[J]. *Chemical Geology*, 234 (3-4) : 321 - 339.
- Wen H. 2021. Origin and paleoenvironment of Siliceous at the bottom of

- Longmaxi-Wufeng Formation, Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 44 (02): 87–92 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Z, Tan X, Lu B, et al., 2018. Geochemical Characteristics of Cherts from the Wufeng and Longmaxi Formations in the Wuxi Area, Sichuan Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37 (05): 880–887 (in Chinese with English abstract).
- Wang S F, Zou C N, Dong D Z, et al., 2014. Biogenic Silica of Organic-Rich Shale in Sichuan Basin and Its Significance for Shale Gas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50 (03): 476–486 (in Chinese with English abstract).
- Wu X L, Li R X, Li S R, et al., 2018. Accumulation Conditions and Main Factors of Marine-Continental Transitional Shale Gas in the Lower Yangtze Area of China: A Case of Permian Leping Formation in the Pingle Depression[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37 (01): 160–168 (in Chinese with English abstract).
- Xi Z D, Tang S H, Zhang S H, et al., 2019. Characterization of quartz in the Wufeng Formation in northwest Hunan Province, south China and its implications for reservoir quality[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179: 979–996.
- Yang W Q, Feng Q L, Liu G C, 2010. Radiolarian Fauna and Geochemical Characters of the Cherts from Garz-Litang Tectonic Belt and Its Tectono-Paleogeographic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (1): 78–89 (in Chinese with English abstract).
- Zhai G Y, Bao S J, Pang F, et al., 2017. Reservoir-forming pattern of "four-storey" hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 44 (01): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C C, Wang Y M, Dong D Z, et al., 2016. Evaluation of the Wufeng-Longmaxi shale brittleness and prediction of "sweet spot layers" in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36 (09): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F, Huang Y, Lan B F, et al., 2021. Characteristics and controlling factors of shale reservoir in Wufeng Formation-Longmaxi Formation of the Zheng'an area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 40 (01): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Wu X, He J, et al., 2019. Anisotropic Features of Shale in Wufeng Formation Longmaxi Formation in Xianfeng Area, Western Hubei[J]. *Coal Geology of China*, 31 (z1): 38–46, 112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H R, Jiang H, Chen Z Y, et al., 2020. A review of the research status of Caledonian movement stages in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. *Geological Science and Technology Information*, 39 (05): 118–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H, Jiang L J, Gao H, et al., 2003. Study on Sedimentary Environment and Origin of Black Siliceous Rocks of the Lower Cambrian in Guizhou Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 22 (02): 174–178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Qi F C, Chen W, et al., 2017. Origin and Paleodepositional Environment of the Early-Middle Silurian Bedded Chert on the Northern Margin of the Yangtze Block: Evidence from Geochemical Study[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (10): 2322–2350 (in Chinese with English abstract).
- Zhao S X, Yang Y M, Zhang J, et al., 2016. Micro-layers division and fine reservoirs contrast of Lower Silurian Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin, SW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27 (03): 470–478 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z Q, He T J, Sun X H, et al., Geochemistry and sedimentary environments of the siliceous rocks from the Sinian-Lower Cambrian Laobao Formation in Tiechang, Yinjiang, Guizhou: An approach[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (3): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y X, Zhao A k, Yu Q, et al., A new method for evaluating favorable shale gas exploration areas based on multi-linear regression analysis: A case study of marine shales of Wufeng-Longmaxi Formations, Upper Yangtze Region[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (3): 387–397 (in Chinese with English abstract).
- Zhu J, Du Y S, 2007. Geochemistry characteristics and palaeogeographic significance of the Ordovician siliceous rocks from Laohushan area, North Qilian orogenic belt[J]. *Journal of Palaeogeography*, 9 (1): 69–76 (in Chinese with English abstract).
- Zhu S Z, Hiromi N, Masao K, et al., 1999. Nectic Chert, a very peculiar type of siliceous rock[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5 (3): 345–350 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡全升, 陈孝红, 张保民, 等, 2020. 鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组黑色岩系硅质来源及其油气地质意义[J]. *地质学报*, 94 (03): 931–946.
- 陈桂华, 白玉湖, 陈晓智, 等, 2016. 页岩油气纵向综合甜点识别新方法及其量化评价[J]. *石油学报*, 37 (11): 1337–1360.
- 冯伟明, 赵瞻, 李嵘, 等, 2020. 滇东北 DD1 井五峰—龙马溪组页岩气地质特征及其勘探启示[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (4): 17–24.
- 何建华, 丁文龙, 王哲, 等, 2015. 页岩储层体积压裂缝网形成的主控因素及评价方法[J]. *地质科技情报*, 34 (04): 108–118.
- 雷子慧, 赵安坤, 余谦, 等, 2016. 贵州北部安场向斜下志留统龙马溪组页岩气保存条件[J]. *地质科技情报*, 35 (04): 121–127.
- 李桃, 杨贵来, 何伟, 等, 2021. 西昌盆地五峰组—龙马溪组页岩气保存条件研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (3): 465–476.
- 林良彪, 陈洪德, 朱利东, 2010. 川东茅口组硅质岩地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 84 (04): 500–507.
- 刘江涛, 李永杰, 张元春, 等, 2020. 焦石坝五峰组—龙马溪组页岩硅质生物成因的证据及其地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 41 (01): 34–41.
- 马文辛, 2020. 渝东地区震旦系灯影组硅质岩特征及成因研究[D]. 成都: 成都理工大学.

- 苗凤彬, 彭中勤, 汪宗欣, 等, 2020. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素[J]. 地质科技通报, 39(02): 31-42.
- 梅廉夫, 戴少武, 沈传波等, 2008. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J]. 地质科技情报, 27(04): 1-7, 14.
- 文虎, 2021. 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组底部硅质成因及古环境分析[J]. 天然气勘探与开发, 44(02): 87-92.
- 邱振, 谈昕, 卢斌, 等, 2018. 四川盆地巫溪地区五峰组—龙马溪组硅质岩地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(05): 880-887.
- 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等, 2014. 四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 50(03): 476-486.
- 吴小力, 李荣西, 李尚儒, 等, 2018. 下扬子地区海陆过渡相页岩气成藏条件与主控因素: 以萍乐坳陷二叠系乐平组为例[J]. 地质科技情报, 37(01): 160-168.
- 杨文强, 冯庆来, 刘桂春, 2010. 滇西北甘孜—理塘构造带放射虫地层、硅质岩地球化学及其构造古地理意义[J]. 地质学报, 84(1): 78-89.
- 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等, 2017. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 44(01): 1-12.
- 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等, 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩脆性评价与“甜点层”预测[J]. 天然气工业, 36(09): 51-60.
- 张福, 黄艺, 蓝宝锋, 等, 2021. 正安地区五峰组—龙马溪组页岩储层特征及控制因素[J]. 地质科技通报, 40(01): 49-56.
- 张号, 吴翔, 何俊, 等, 2019. 鄂西咸丰地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩非均质性特征[J]. 中国煤炭地质, 31(z1): 38-46, 112.
- 张浩然, 姜华, 陈志勇, 等, 2020. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述[J]. 地质科技通报, 39(05): 118-126.
- 张位华, 姜立君, 高慧, 等, 2003. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(02): 174-178.
- 张岩, 漆富成, 陈文, 等, 2017. 扬子板块北缘早—中志留世硅质岩成因及古沉积环境的地球化学研究[J]. 地质学报, 91(10): 2322-2350.
- 赵圣贤, 杨跃明, 张鉴, 等, 2016. 四川盆地志留统龙马溪组页岩小层划分与储层精细对比[J]. 天然气地球科学, 27(03): 470-487.
- 赵志强, 贺同军, 孙小浩, 等, 2019. 王世伟. 贵州印江县铁厂村老堡组硅质岩地球化学特征及沉积环境探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 39(3): 48-54.
- 周业鑫, 赵安坤, 余谦, 等, 2021. 基于多元线性回归分析的页岩气有利区评价新方法——以上扬子地区五峰组—龙马溪组海相页岩为例[J]. 沉积与特提斯地质, 41(3): 387-397.
- 朱杰, 杜远生, 2007. 北祁连造山带老虎山奥陶系硅质岩地球化学特征及古地理意义[J]. 古地理学报, 9(1): 69-76.
- 朱嗣昭, Hiromi N, Masao K, 等, 1999. 一种特殊类型硅质岩—浮石状燧石[J]. 高校地质学报, 5(3): 345-350.

《沉积与特提斯地质》“新特提斯洋构造演化与战略性矿产资源效应”

专辑征稿启事

新特提斯洋是位于劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间的一个大洋,其复杂的构造演化过程导致欧亚大陆南缘特提斯构造域的诞生。其间,既形成了与大洋俯冲过程相关的成矿作用,在大洋消亡后,更形成了特色鲜明的与大陆碰撞造山相关的成矿作用,实现了显著的铜等战略性矿产资源富集。因此,对新特提斯构造域形成和演化历史进行深入研究,既具有重要的科学意义,又是国家战略需求。近年来,国家有关科研部门围绕新特提斯洋构造演化与成矿作用开展了广泛而深入的研究,取得了一系列重大研究成果。为及时展现最新的研究成果,为广大科研工作者提供交流平台,《沉积与特提斯地质》特邀客座主编张志副研究员、郎兴海教授、王立强研究员拟于2024年在本刊组织“新特提斯洋构造演化与战略性矿产资源效应”专辑。我们真诚邀请您及您的课题组向本专辑投稿,详见<https://www.cjyttdz.com.cn/news/xinxigonggao/261.htm>。