

湖相细粒沉积岩颗粒微观力学特征及类型划分

——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段页岩为例

解馨慧^{1,2},邓虎成³,胡蓝霄³,李勇¹,毛金昕³,刘佳杰¹,张鑫¹,李柏洋¹

(1. 成都理工大学 地球物理学院,四川 成都 610059;2. 成都理工大学 地球物理博士后流动站,四川 成都 610059;

3. 成都理工大学 能源学院,四川 成都 610059)

摘要: 细粒沉积岩蕴藏着丰富的油气资源,为了研究细粒沉积岩颗粒微观结构及力学特征,以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段细粒沉积岩为例,开展了扫描电镜观察和纳米压痕实验分析,据此研究细粒沉积颗粒的几何特征和微观力学性质。研究认为:用粒径、扁平度、棱角性、硬度和弹性模量5个特征参数,可将细粒沉积岩划分为粒度+棱角型、扁平度+棱角型、扁平度+棱角+弹性模量+硬度型、弹性模量+硬度型、棱角+弹性模量+硬度型和粒度+棱角+弹性模量型6种主要颗粒类型;接着,根据颗粒类型的相对含量,进一步将颗粒类型划分为5种组合类型;最后,分析了细粒沉积颗粒类型与矿物类型之间的耦合关系。细粒沉积岩颗粒微观分类方案的建立,有助于理解细粒沉积岩微观结构特征,预测地质“甜点”空间分布,对细粒沉积岩的油气资源评价和效益开发具有重要的理论和科学意义。

关键词: 扫描电镜;纳米压痕;分类方案;细粒沉积岩颗粒;页岩;延长组7段;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Micromechanical characteristics and classification of the grains of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: A case study of shales in the 7th member of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

Xie Xinhui^{1,2}, Deng Hucheng³, Hu Lanxiao³, Li Yong¹, Mao Jinxin³, Liu Jiajie¹, Zhang Xin¹, Li Boyang¹

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Postdoctoral Mobile Station,

College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. College of Energy,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Fine-grained sedimentary rocks contain abundant hydrocarbon resources. To examine the microscopic structural and micromechanical characteristics of their grains, we explore such rocks in the 7th member of the Upper Triassic Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7 Member) in the Ordos Basin. Using scanning electron microscopy (SEM) and nanoindentation experiments, we delve into the geometric characteristics and micromechanical properties of the grains of these rocks. The results indicate that based on five characterization parameters, namely grain size, flatness, angularity, hardness, and modulus of elasticity, the fine-grained sedimentary rocks in the Chang 7 Member can be categorized into six major grain types: grain size and angularity predominating; flatness and angularity predominating; flatness, angularity, modulus of elasticity, and hardness predominating; modulus of elasticity and hardness predominating; angularity, modulus of elasticity, and hardness predominating, and grain size, angularity, and modulus of elasticity predominating. Five types of grain assemblages can be further identified based on the relative contents of the six types of grains. Additionally, the coupling relationships between the grain types and mineral types of the fine-grained sedimentary rocks are determined. The proposed scheme for microscopic grain classification of fine-grained sedimentary rocks assists in understanding the microscopic structural characteristics of fine-grained sedimentary

收稿日期:2023-12-01;修回日期:2024-08-01。

第一作者简介:解馨慧(1993—),女,博士、讲师,非常规油气地质。E-mail: xxh0622@cdut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42072182)。

rocks and predicting the spatial distributions of geological sweet spots, thus holding great theoretical and scientific significance for the hydrocarbon resource assessment and efficient hydrocarbon exploitation of fine-grained sedimentary rocks.

Key words: scanning electron microscopy (SEM), nanoindentation, classification scheme, grain of fine-grained sedimentary rock, shale, the 7th Member of Yanchang Formation (Chang 7 Member), Ordos Basin

引用格式:解馨慧,邓虎成,胡蓝霄,等.湖相细粒沉积岩颗粒微观力学特征及类型划分——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段页岩为例[J].石油与天然气地质,2024,45(4):1079–1088. DOI:10.11743/ogg20240413.

Xie Xinhui, Deng Hucheng, Hu Lanxiao, et al. Micromechanical characteristics and classification of the grains of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: A case study of shales in the 7th member of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4):1079–1088. DOI:10.11743/ogg20240413.

细粒沉积岩在全球范围内广泛分布,约占沉积岩的2/3^[1–2]。中国细粒沉积岩十分发育,蕴含巨大油气资源量,具有广阔的开发前景^[3]。随着非常规油气勘探技术的不断进步,细粒沉积岩已被认为是构成致密油气和页岩油气的烃源岩和储集层,与油气资源关系密切^[4–7]。细粒沉积岩指粒径小于62.5 μm且颗粒含量大于50%的沉积岩^[8],与常规储层相比,细粒沉积岩粒度小、排列结构复杂且“源-储-盖”三位一体。细粒沉积岩的类型多种多样,主要包括页岩、泥页岩、粉砂质泥(页)岩、泥质粉砂岩和粉砂岩等^[9–10],其蕴含丰富的地层信息,对于古环境、古生态和古海洋的重建起着重要作用,也是了解深时气候演变和全球碳/硫循环的重要窗口^[11]。

细粒沉积岩颗粒(细颗粒)是构成细粒沉积岩的基本矿物颗粒,不仅源于母岩风化,还来源于湖盆自生、热液、火山和其他的混合来源,主要成分包括黏土矿物、粉砂、碳酸盐和有机质等^[12–13]。细粒沉积物结构是岩石的基本“构件”。细颗粒的结构特征决定了岩石在静态和动态应力下的力学和地质声学特性^[14–15]。自20世纪30年代“细粒沉积”概念提出以来一直备受关注。然而,由于粒度小、成分复杂以及受限于超微观实验条件,细粒沉积岩的微观结构、成岩演化过程和类型划分等问题一直是地质学界薄弱研究领域^[16–18]。

前人对细粒沉积岩的分类开展了研究,提出了基于矿物成分、总有机碳含量(TOC)、岩石结构特征和成因-成分分类等多种分类方法^[19]。不同的研究者采用的分类基础、分类原则和分类方法不尽相同,分类方案也有很大的差异^[20]。然而,目前针对细颗粒的分类方案十分有限,造成细颗粒分类困难的原因较多,主要包括:①颗粒与晶体的尺寸非常小,直接观测比较困难;②碎屑颗粒组合的成分变化大大超过了其他类别沉积物所具有的非均质性;③成岩作用对细颗粒的改造识别有难度^[21–23]。目前,对细颗粒的研究只限于其矿物

成分和元素组成,尚缺少基于物理-化学性质对其类型进行划分的方法。细颗粒类型精细分类有益于进一步评价储层,从而可对此类“源-储-盖”型致密储层进行更细致地勘探。

本文针对细颗粒在分类上遇到的困难,基于岩石微观颗粒的物理-化学性质,以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段(长7段)细粒沉积岩为例,从颗粒的几何特征和力学性质出发,借助场发射扫描电镜观察和纳米压痕实验,提出细颗粒的类型划分方案。希望本文的研究结果能为深入理解细粒沉积岩的微观结构提供新视角,同时也对细粒沉积岩的基础物理、化学和沉积学的认识提供重要的补充。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,在长期的构造演化作用后,盆地形成了东翼宽缓、西翼陡窄、不对称大向斜的南北向的构造格局^[24–25]。晚三叠世,秦祁地槽逐渐闭合,秦岭隆起逐渐发育,此时物源补给充足,盆地进入大型内陆湖泊沉积期^[26–27](图1)。

长7段沉积初期,因构造作用湖盆迅速下降,致使湖水迅速上涨,水体变深,覆盖面积大于1 000 km²。鄂尔多斯盆地长7段主要发育辫状河河流、辫状河及曲流河三角洲和湖泊等沉积体系,其中,湖泊沉积体系主要为浅湖和深湖-半深湖亚相^[28–30]。在金锁关和宜君地区发育厚度70~120 m以欠补偿为主的灰黑色和深灰色页岩。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组具备较为完整的生-储-盖系统,是盆地的主要生油层系^[31–32]。延长组平均厚度约1 300 m,平行不整合接触于下伏纸坊组 and 上覆富县组,由石英砂岩、细砾岩、细砂岩和泥岩等岩性组成。依据沉积旋回、测井曲线和岩性特征,将延长组自下而上划分为长1段—长10段^[9]。长7段以湖泊沉积

体系为主,是最主要的生油岩系。长7段底部大面积发育灰黑色的页岩,由泥岩、泥质粉砂岩、深灰黑色页岩和油页岩组成,为“张家滩”页岩,并呈现较好的生油潜力(厚8~24 m)^[32](图1)。

2 陆相页岩矿物学特征

2.1 矿物成分和有机地球化学特征

细粒沉积岩具有颗粒细小、物源多样、组分复杂(黏土矿物、碳酸盐、长英质和有机质等矿物)、岩相变化快和非均质性强的特征。本次研究在鄂尔多斯盆地长7段选取48块典型的海相样品,借助X射线衍射(XRD)分析测试仪表征细粒沉积岩的颗粒和有机质成分。结果显示,样品中的石英含量介于18.0%~52.0%,平均值为24.3%;钾长石和斜长石含量分别介于0~17.0%和0~35.0%,平均值分别为7.0%和19.0%;方解石和白云石含量分别介于0~15.0%和0~18.0%,平均值分别为2.3%和4.3%;菱铁矿和黄铁矿分别分布在0~20.0%和0~7.0%,平均含量分别为5.6%和0.8%;云母含量较少,零星分布,为0~2.0%;黏土矿物含量为21.0%~56.0%,平均含量为36.9%(图2)。

2.2 矿物颗粒几何特征

石英颗粒既有陆源碎屑成因,也包括化学和生

物-化学成因,不同成因的石英颗粒在外形轮廓方面也存在差异。扫描电镜下,碎屑成因的石英颗粒呈漂浮状,磨圆性和分选性较好,多伴有溶蚀现象,溶蚀严重的则完全被交代,发育微晶间孔和溶蚀孔(图3a, b)。化学和生物-化学成因的石英颗粒多为单晶结构,呈六方柱状,并常与有机质体结合共生,与后生菌藻体伴生(图3c)。长石颗粒呈自形晶或半自形晶状,可见完全溶蚀交代现象(图3d)。岩屑呈离散分布状,分选好,具有边缘支撑的特点。云母颗粒呈片状平行排列,缝隙发育(图3e)。黄铁矿常与有机质互动共生,黄铁矿之间夹杂着有机质,或被有机质包裹(图3f, g)。方解石晶面平整,其集合体呈团块状和薄膜状等(图3h, i)。白云石可由方解石转化形成,具有菱形的清晰特征,富集时形成薄膜状和条带状等(图3j)。高岭石矿物单体呈假六方片状,集合体呈叠层状和蠕虫状(图3k);伊利石单体为片状、丝缕状和卷曲片状等;蒙脱石为低演化阶段的矿物,呈棉絮状或波状薄片(图3l)。有机质赋存状态可分为条带状、分散状、充填状和包裹状,将自然断面上的有机质分为条带状、薄膜状和交互状。有机质条带宽度多为几微米至几十微米,弯曲分布;分散状有机质局部富集,形状不规则,均质性较强;充填状有机质发育在片状矿物的层间、顺层缝隙和晶间孔隙内,与矿物颗粒界面模糊,不清晰;包裹状有机质的赋存常与黄铁矿矿物相关,有机质包裹黄铁矿颗粒,呈圆形状、三角状和不规则形状等(图3m—o)^[33]。

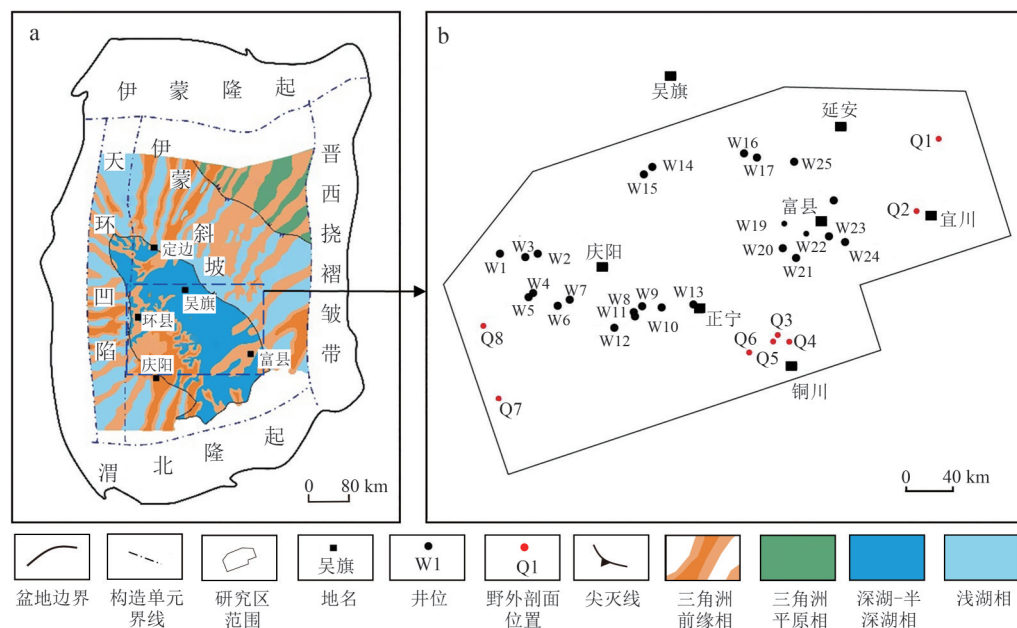


图1 鄂尔多斯盆地长7段沉积相(a)和取心位置(b)(据[33]修改)

Fig. 1 Sedimentary facies (a) and cored well locations (b) of the Chang 7 Member, Ordos Basin (modified after reference [33])

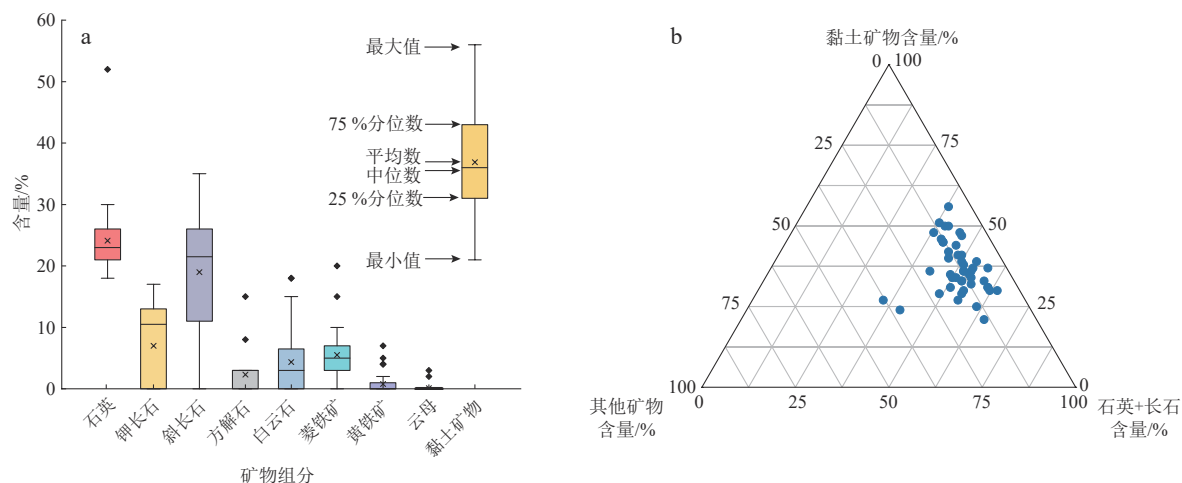


图2 鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩矿物分布箱状图(a)和矿物组成三角图(b)

Fig. 2 Box plot (a) and ternary diagram (b) showing the mineral composition of fine-grained sedimentary rocks in the Chang 7 Member, Ordos Basin

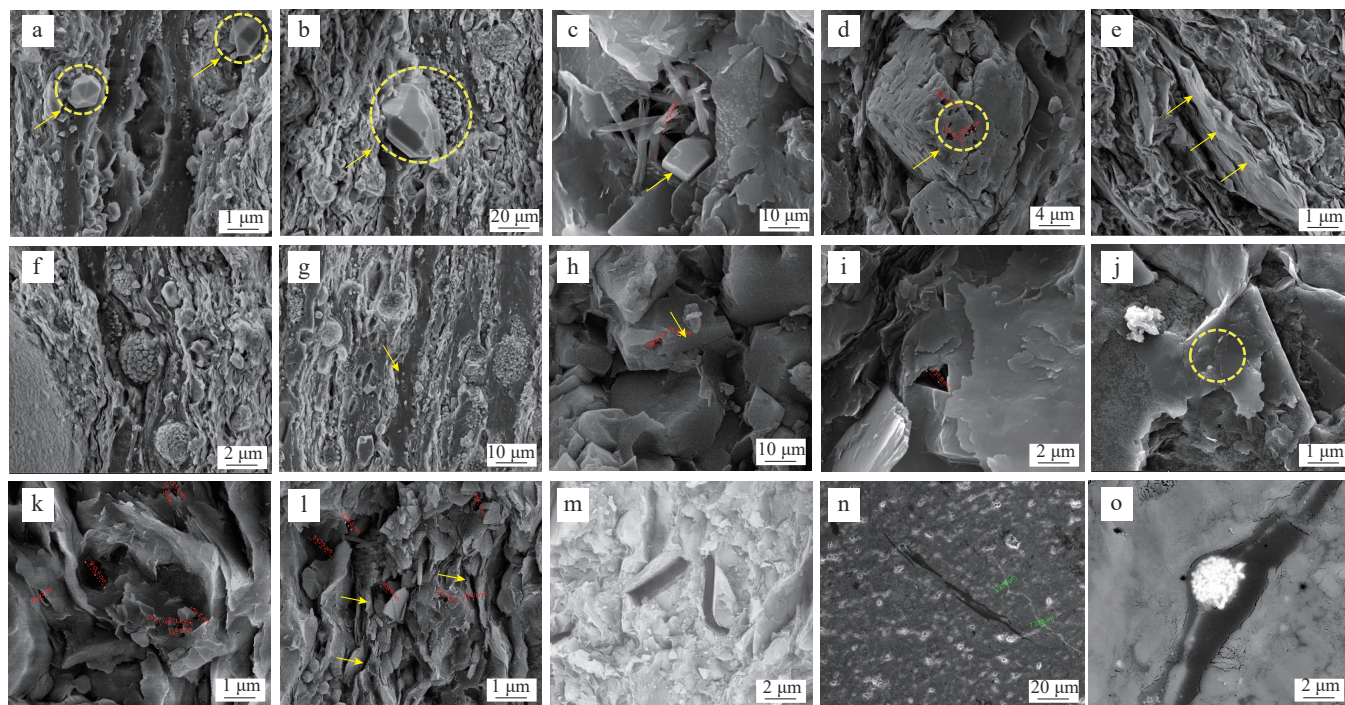


图3 鄂尔多斯盆地长7段陆源碎屑和自生矿物颗粒微观形态特征扫描电镜照片(据文献[30]修改)

Fig. 3 SEM images showing the microscopic morphology of the grains of terrigenous clastics and authigenic minerals in the Chang 7 Member, Ordos Basin (modified after reference [30])

- a. 单晶结构的石英颗粒群, W19井, 埋深1 241.1 m; b. 石英内发育粒内溶孔, W19井, 埋深1 241.1 m; c. 部分长石被溶蚀, 见粒内溶孔, W19井, 埋深1 241.1 m; d. 长石沿解理溶蚀, 见次生溶蚀孔, W19井, 埋深1 241.1 m; e. 片状云母, 发育片间孔隙, W22井, 埋深1 004.2 m; f. 霉球状黄铁矿, W22井, 埋深1 004.2 m; g. 有机质-黄铁矿结构体, 黄铁矿被有机质包裹, W22井, 埋深1 004.2 m; h. 方解石, 有轻度溶蚀现象, W8井, 埋深998.5 m; i. 方解石表面发育溶蚀孔, W8井, 埋深998.5 m; j. 白云石及其晶间孔隙发育, W24井, 埋深1 021.8 m; k. 叠层状高岭石, W13井, 埋深904.5 m; l. 片状蒙脱石, 微孔发育, 顺层排列, W13井, 埋深904.5 m; m. 薄膜状有机质发育, W23井, 埋深893.1 m; n. 自然剖面上条带状有机质, W23井, 埋深893.1 m; o. 条带状有机质, 弯曲分布, W23井, 埋深893.1 m

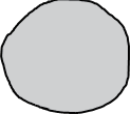
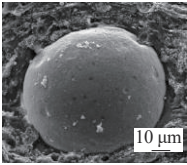
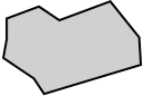
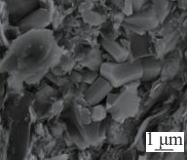
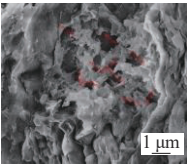
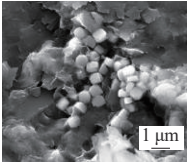
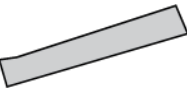
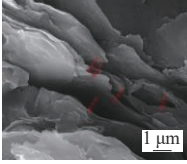
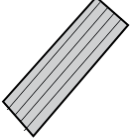
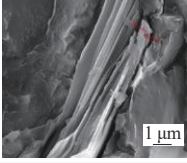
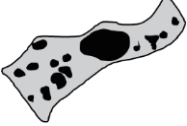
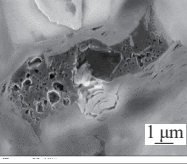
2.3 颗粒形状定量表征

细粒沉积岩矿物成分复杂多样, 综合考虑形状结构特征, 将其概括为以下7大类: 似圆形、多角

形、不规则状、粒状体、片状、纤维状和多孔状。本次研究利用数学模型定量表征颗粒形状, 借助扁平度 (flat) 和针度 (elongated) 定性表征颗粒形状 (表1)。

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 段细粒沉积岩颗粒粒形状定义 (据[15]修改)

Table 1 Morphology definition of the fine-grained sedimentary grains in the Chang 7 Member, Ordos Basin (modified after reference [15])

形状名称	定义	沉积颗粒类别	颗粒形状示意图	扫描电镜照片
似圆形	表面光滑,近似椭圆形	石英、菱铁矿		
多角形	多面体形	方解石、石英、白云石等		
不规则状	形状不对称的形体	絮凝颗粒、黏土矿物、有机质-矿物颗粒结合体		
粒状体	具有相同等级量纲的不规则体	黄铁矿		
片状	板片形状	云母、蒙脱石、伊/蒙混层、绿/蒙混层等		
纤维状	规则或不规则的线状体	伊利石、云母等		
多孔状	表面或体内发育孔隙	生烃有机质、溶蚀的脆性矿物颗粒等		

3 细颗粒微观力学特征

颗粒微观力学性质是在外力作用下显示出的变形和破坏方面的性能,包括如强度、塑性、弹性和韧性等。细颗粒的尺寸(粒径<62.5 μm)远小于常规的宏观物质,由于量子尺寸效应、小尺寸效应和表面效应等影响,其微观力学性能也表现出区别于宏观物质的力学性能。细颗粒的力学性能测试不能采用传统的力学测试手段。因此,本次研究借助纳米压痕实验测量细颗粒的硬度和弹性模量等力学性能。

3.1 纳米压痕试验原理和方案

图 4 为试验过程中压痕剖面变化的示意图。实验过程中对试样施加连续荷载,压头压入试样过程中,首先产生弹性变形,随着荷载的增加,试样上出现与压头匹配的压痕,并且开始产生塑性变形。在卸载过程中,弹性变形恢复,塑性变形则为压痕裂缝。XRD 测试显示页岩主要由碎屑矿物(石英和长石)、碳酸盐矿物(方解石、白云石和黄铁矿)、黏土矿物和有机质组成。因此,本次研究重点测试了石英、长石、方解石、白云石、黏土矿物和有机质矿物颗粒的微观力学参数,包括硬

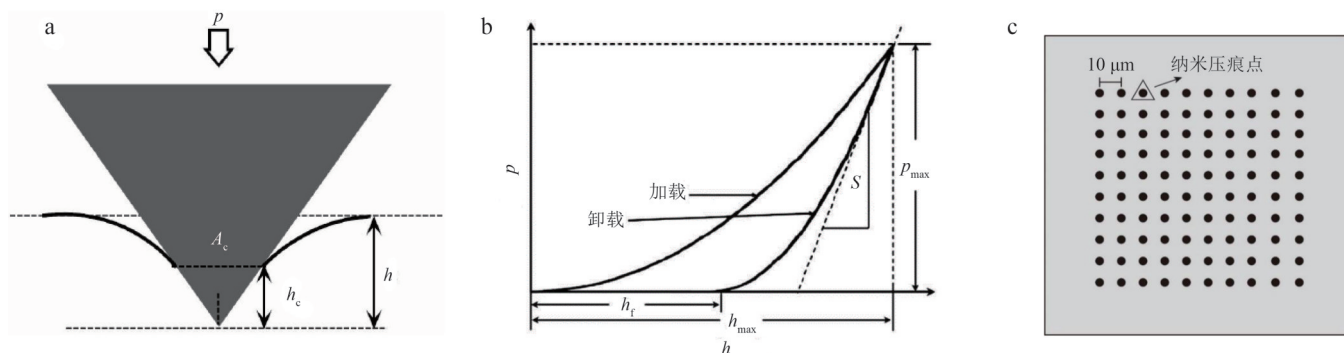


图4 鄂尔多斯盆地长7段页岩纳米压痕实验力学模拟(a),压痕实验参数计算(b)及压痕点分布示意图(c)

Fig. 4 Schematic diagram showing the dynamics simulation (a), parameter calculation (b) and indentation point distribution (c) of shale nanoindentation experiments in the Chang 7 Member, Ordos Basin

p . 载荷, mN; A_c . 被测试样与压头接触的半径, μm ; h . 深度, μm ; h_c . 压头压入试样时的接触深度, μm ; S . 弹性接触刚度, GPa; h_i . 完全卸载后残留位移量, nm; $h_{\max}$. 最大位移, nm; $p_{\max}$. 最大载荷, nN

(每个压痕点之间的间距为 $10\ \mu\text{m}$, 选取 10×10 的排布方式, 一共 100 个测量点。)

度和弹性模量等,并分析了力学参数之间的联系。纳米压痕实验采用了点阵式的测量方式(10×10),以更加精细、准确地表征不同细颗粒在平面上的微观力学参数分布情况(图4c)。

3.2 实验结果

在峰值荷载 200 mN 的条件下测得了矿物颗粒的微观力学性质,实验测试数据显示矿物颗粒微观力学性质与矿物颗粒的种类关系密切,黄铁矿颗粒的弹性模量最大,其次为石英、长石、白云石和方解石等脆性矿物,黏土矿物和有机质的弹性模量最小。硬度值的分布规律与弹性模量相似,黄铁矿颗粒的硬度最大,其次为石英、长石、方解石和白云石等脆性矿物,黏土矿物和有机质的硬度最小(表2)。

4 细颗粒类型及其组合类型划分

4.1 细颗粒类型特征

通过大量的扫描电镜观察,结果发现细颗粒的结

合形状在粒度、扁平度和棱角性等方面呈现较大的差异,而力学性质在硬度和弹性模量上差异较大。因此,本次研究将粒度、扁平度、棱角性、硬度和弹性模量 5 个参数视为基本的划分单元。细颗粒类型的划分依据颗粒“五单元”基本性质的原则,然而 5 个参数的单位和分布区间各异。因此,采用了归一化的原则对每个参数进行无量纲处理,实现数据的等比例缩放,致使数据变成相对值的关系[公式(1)]。

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X_{norm} 为归一化的数据, X 为原始数据, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为原始数据的最大值和最小值,均无量纲。

根据细颗粒“五单元”归一化参数,鄂尔多斯盆地长7段细颗粒的类型可以划分为6类(图5a—f)。

- 1) 类型一:粒度+棱角型;
- 2) 类型二:扁平度+棱角型;
- 3) 类型三:扁平度+棱角+弹性模量+硬度型;
- 4) 类型四:弹性模量+硬度型;
- 5) 类型五:棱角+弹性模量+硬度型;
- 6) 类型六:粒度+棱角+弹性模量型。

表2 鄂尔多斯盆地长7段矿物颗粒的微观力学参数值

Table 2 Micromechanical parameters of mineral grains in the Chang 7 Member, Ordos Basin

矿物颗粒	弹性模量分布区间/GPa	弹性模量平均值/GPa	硬度分布区间/GPa	硬度平均值/GPa
石英	22.84 ~ 125.43	69.62	3.10 ~ 38.80	12.10
长石	42.00 ~ 102.11	67.82	1.50 ~ 12.52	6.18
黏土矿物	7.30 ~ 99.34	50.38	1.37 ~ 11.17	4.85
方解石	11.17 ~ 113.70	55.73	1.44 ~ 7.09	4.03
白云石	25.13 ~ 77.57	49.76	0.82 ~ 12.93	4.32
黄铁矿	253.90 ~ 293.20	273.90	30.12 ~ 39.80	34.79
有机质	0.40 ~ 4.70	2.50	0.20 ~ 1.10	0.53

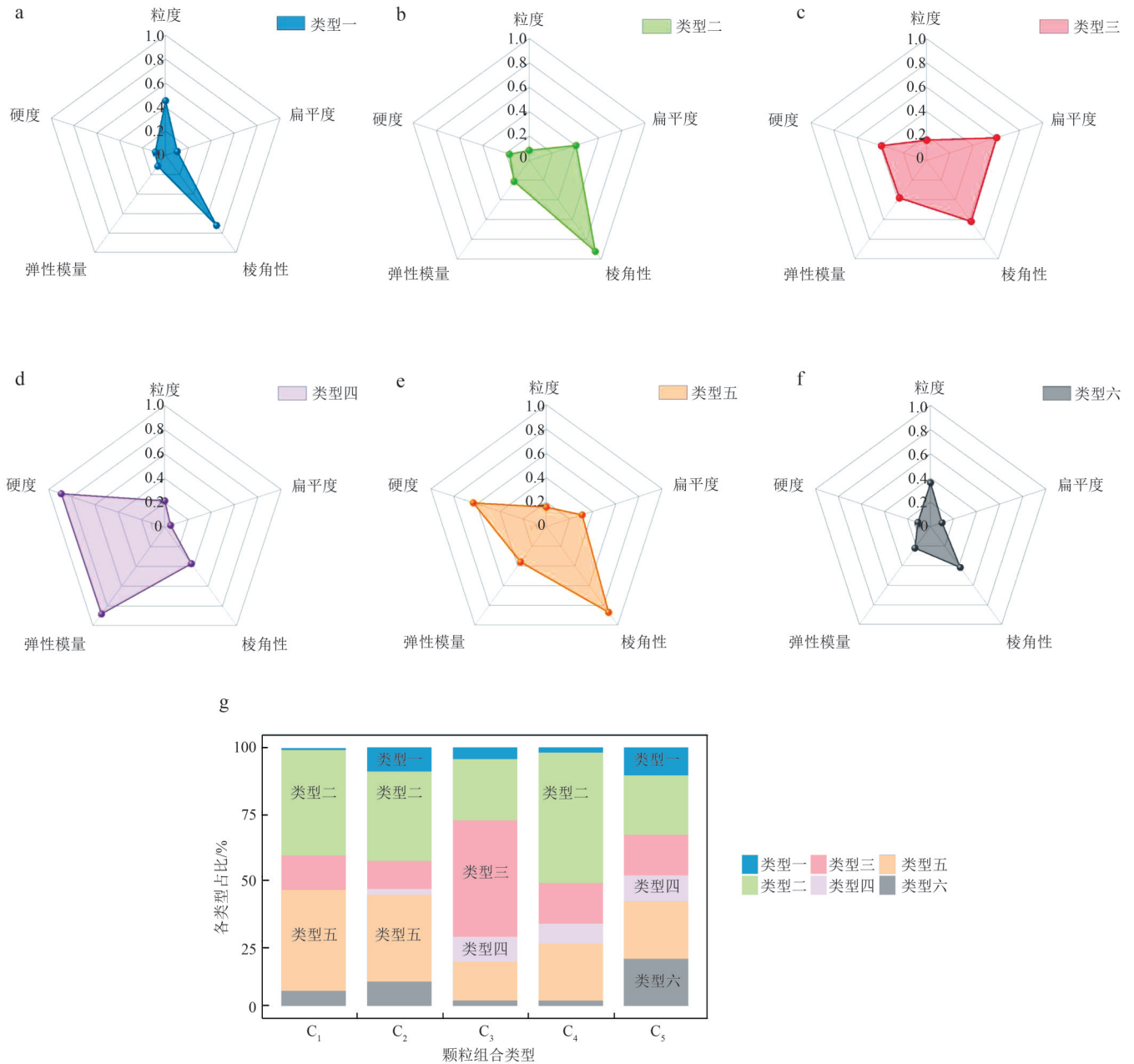


图5 鄂尔多斯盆地长7段页岩“五单元”颗粒类型划分(a—f)及颗粒组合类型示意图(g)

Fig. 5 Schematic diagrams showing the classification of grain types based on five parameters (a—f) and grain assemblage types (g) of shale in the Chang 7 Member, Ordos Basin
(a—f数值为公式计算的归一化参数)

4.2 细颗粒组合类型划分

根据颗粒类型的相对含量,研究区内的细颗粒可划分为5种组合类型(C₁—C₅):C₁为颗粒类型二+类型五组合;C₂为颗粒类型二+类型三+类型五组合;C₃为颗粒类型三+类型四组合;C₄为颗粒类型二;C₅为颗粒类型一+类型四+类型六组合。C₁以类型二和类型五颗粒为显著特征,类型二颗粒的占比约为30%,类型

五颗粒约占35%以上。C₂以类型二、类型三和类型五颗粒为显著特征,类型二和类型五颗粒均约占30%,类型三颗粒的含量在20%~30%。C₃中类型三颗粒占有很大的比例,约为40%以上,与其他组合类型相比,类型四颗粒的占比较大,可达到10%以上。C₄以富含类型二颗粒为显著特征,占比高达40%以上。C₅相比其他组合类型,类型一、类型四和类型六颗粒占比较大,均可达10%以上(图5g)。

5 细颗粒类型与矿物成分耦合关系

为了进一步探究单颗粒类型与矿物成分的关系,分别计算了颗粒类型占比与主要矿物含量的拟合关系(表3)。结果显示:类型一颗粒占比与细粒沉积岩中TOC呈现正相关关系(相关系数 $R^2=0.644$);类型二颗粒占比与细粒沉积岩中长石和黏土矿物的含量具有相关性($R^2=0.656$; $R^2=0.509$);类型三颗粒占比随着细粒沉积岩中TOC和黏土矿物含量总和的增加而增加($R^2=0.872$);类型四颗粒占比与细粒沉积岩中黄铁矿含量的相关性较高($R^2=0.659$);类型五颗粒占比与细粒沉积岩中石英含量呈现正相关关系($R^2=0.871$);类型六颗粒占比与细粒沉积岩中方解石+白云石+长石含量总和呈现正相关关系($R^2=0.453$)。颗粒类型是矿物颗粒综合特征的反映,可以代表一种或多种矿物颗粒。

因此,认为类型一颗粒可以代表细粒岩中有机质颗粒的特征,类型二颗粒可以代表长石和黏土矿物颗粒的特征,类型三颗粒可以代表有机质和黏土矿物颗粒的特征,类型四颗粒则反映了黄铁矿颗粒的特征,类型五颗粒反映了石英颗粒的特征,类型六颗粒则反映了方解石、白云石和长石颗粒的特征(图6)。

6 结论

1) 测试数据显示矿物颗粒微观力学性质与矿物颗粒的种类关系密切,黄铁矿颗粒的弹性模量和硬度最大,其次为石英、长石、白云石和方解石等脆性矿物,黏土矿物和有机质的弹性模量和硬度最小。在相同的峰值载荷下,细颗粒的弹性模量和硬度由大到小排序为:黄铁矿>石英>长石>白云石>方解石>黏土矿物>有机质。

表3 鄂尔多斯盆地长7段矿物颗粒类型与矿物成分相关关系

Table 3 Relationships between mineral grain types and mineral components in the Chang 7 Member, Ordos Basin

矿物组分含量	相关系数 R^2					
	类型一占比	类型二占比	类型三占比	类型四占比	类型五占比	类型六占比
石英含量	0.214(+)	0.554(-)	0.526(-)	0.269(+)	0.871(+)	0.009(+)
长石含量	0.013(-)	0.656(+)	0.710(-)	0.157(-)	0.120(+)	0.287(+)
黄铁矿含量	0.342(+)	0.467(-)	0.243(-)	0.659(+)	0.230(-)	0.260(-)
黏土矿物含量	0.361(-)	0.509(+)	0.252(+)	0.293(-)	0.548(-)	0.197(-)
TOC	0.644(+)	0.553(-)	0.241(-)	0.285(+)	0.200(+)	0.289(-)
黏土矿物含量+TOC	0.010(-)	0.204(-)	0.872(+)	0.030(+)	0.444(-)	0.345(-)
方解石+白云石+长石含量	0.070(-)	0.285(+)	0.730(-)	0.207(-)	0.100(+)	0.453(+)

注:“+”“-”分别代表两组数据呈现正相关和负相关,并无实际含义。

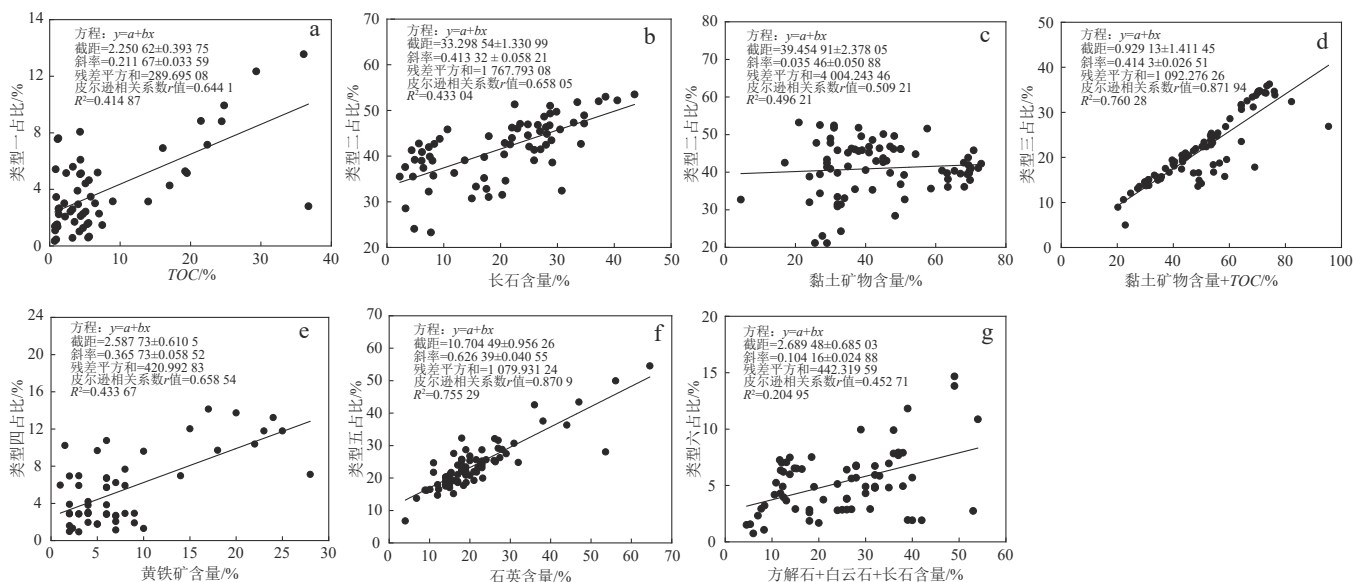


图6 鄂尔多斯盆地长7段颗粒类型占比与矿物组分含量交汇图

Fig. 6 Cross plots showing relationships between proportion of grain type and mineral component content of the Chang 7 Member, Ordos Basin

2) 将细颗粒的粒度、扁平度、棱角性、硬度和弹性模量5个参数视为基本的划分单元,对鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩进行类型划分,可以划分为6种类型,分别为:粒度+棱角型、扁平度+棱角型、扁平度+棱角+弹性模量+硬度型、弹性模量+硬度型、棱角+弹性模量+硬度型和粒度+棱角+弹性模量型。

3) 根据颗粒类型的相对含量,鄂尔多斯盆地长7段细颗粒可划分为5种组合类型(C_1 — C_5)。 C_1 :颗粒类型二+类型五组合; C_2 :颗粒类型二+类型三+类型五组合; C_3 :颗粒类型三+类型四组合; C_4 :颗粒类型二; C_5 :颗粒类型一+类型四+类型六组合。

4) 细颗粒的组合类型与矿物成分密切相关,颗粒的类型是矿物颗粒综合特征的反映,可以代表一种或多种矿物颗粒。相关性分析结果显示,类型一到类型六的颗粒可以分别代表细粒岩中的有机质、长石+黏土矿物、有机质+黏土矿物、黄铁矿、石英和方解石+白云石+长石颗粒的特征。

参 考 文 献

- [1] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [2] 张建国,姜在兴,刘鹏,等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 234-249.
ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 234-249.
- [3] 朱如凯,李梦莹,杨静儒,等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.
- [4] HILL R J, ZHANG Etuan, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [5] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [6] 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [7] 王红岩,周尚文,赵群,等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1430-1441.
WANG Hongyan, ZHOU Shangwen, ZHAO Qun, et al. Enrichment characteristics, exploration and exploitation progress, and prospects of deep shale gas in the southern Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1430-1441.
- [8] 操应长,梁超,韩豫,等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 729-741.
CAO Yingchang, LIANG Chao, HAN Yu, et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(4): 729-741.
- [9] 何文军,吴和源,杨森,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层岩相划分与类型评价[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 217-231.
HE Wenjun, WU Heyuan, YANG Sen, et al. Lithofacies division and type evaluation of shale oil reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 217-231.
- [10] 黄军平,杨田,张艳,等. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式——以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长7油层组露头为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(4): 1227-1239.
HUANG Junping, YANG Tian, ZHANG Yan, et al. Sedimentary dynamics and deposition model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: A case study of the Chang 7 oil member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1227-1239.
- [11] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22: 499-551.
- [12] 贾承造,张永峰,赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 1-11.
JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 1-11.
- [13] 柳波,吕延防,孟元林,等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 598-607.
LIU Bo, LYU Yanfang, MENG Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598-607.
- [14] XIE Xinhui, DENG Hucheng, HU Lanxiao, et al. Assessing the effect of oriented structure characteristics of laminated shale on its mechanical behaviour with the aid of nano-indentation and FE-SEM techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 173: 105625.
- [15] 解馨慧. 细粒沉积岩颗粒定向结构特征及形成机理研究[D]. 成都理工大学, 2022.
XIE Xinhui. Research on Grain Orientation Structure Characteristics and Formation Mechanism of Fine-grained Sedimentary Rocks[D]. Chengdu University of Technology, 2022.
- [16] 李天军,黄志龙,张亦婷,等. 吐哈盆地胜北洼陷七克台组浅水湖相细粒沉积岩岩相特征、成因模式及页岩油意义[J]. 地质学报, 2021, 95(12): 3869-3884.
LI Tianjun, HUANG Zhilong, ZHANG Yiting, et al. Lithofacies

- characteristics and genetic model of shallow lacustrine fine-grained sediments and its geological significance for shale oil in the Qiketai Formation in the Shengbei subsag, Turpan-Hami Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3869–3884.
- [17] 熊亮, 邓虎成, 吴冬, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 857–871.
- XIONG Liang, DENG Hucheng, WU Dong, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 857–871.
- [18] XIE Xinhui, DENG Hucheng, LI Yong, et al. Investigation of the oriented structure characteristics of shale using fractal and structural entropy theory[J]. *Fractal and Fractional*, 2022, 6(12): 734.
- [19] 孟颖, 王剑, 马万云, 等. 基于细粒岩石类型对玛湖凹陷下二叠统风城组烃源岩分类评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(5): 1735–1746.
- MENG Ying, WANG Jian, MA Wanyun, et al. Evaluation of hydrocarbon source rock characteristics of Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag based on fine grained sedimentary rock type [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(5): 1735–1746.
- [20] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3625–3639.
- ZHOU Lihong, PU Xiugang, CHEN Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin: A case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3625–3639.
- [21] 朱毅秀, 金振奎, 金科, 等. 中国陆相湖盆细粒沉积岩岩石学特征及成岩演化表征——以四川盆地元坝地区下侏罗统大安寨段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 494–508.
- ZHU Yixiu, JIN Zhenkui, JIN Ke, et al. Petrologic features and diagenetic evolution of fine-grained sedimentary rocks in continental lacustrine basins: A case study on the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 494–508.
- [22] 宋世骏. 柴达木盆地新生代咸化湖盆细粒岩差异性发育机理及其地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- SONG Shijun. Different developing mechanism of fine-grained sediments in Cenozoic saline lakes in the Qaidam Basin and its geological implications[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [23] 肖路安. 全球含油气细粒沉积岩研究进展[J]. *西部探矿工程*, 2022, 34(3): 161–164.
- XIAO Luan. Research progress on global oil and gas fine-grained sedimentary rocks [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2022, 34(3): 161–164.
- [24] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2230–2238.
- SU Zhongtang, CHEN Hongde, XU Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2230–2238.
- [25] 宗廷博, 陈德照, 杨颀, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗西部山西组致密砂岩储层特征及物性控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(4): 608–622.
- ZONG Tingbo, CHEN Dezhaoh, YANG Di, et al. Tight sandstone reservoir characteristics and physical property control factors of Shanxi Formation in western Hangjinqi, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(4): 608–622.
- [26] 古娜, 万友利, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组岩相特征及控制因素[J]. *新疆地质*, 2012, 30(3): 335–340.
- GU Na, WAN Youli, DING Xiaoqi, et al. The lithofacies characteristics and influencing factors of Yanchang Formation in Fuxian, Ordos Basin [J]. *Xinjiang Geology*, 2012, 30(3): 335–340.
- [27] XIE Xinhui, DENG Hucheng, FU Meiyun, et al. Evaluation of pore structure characteristics of four types of continental shales with the aid of low-pressure nitrogen adsorption and an improved FE-SEM technique in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 197: 108018.
- [28] 勇子树. 鄂尔多斯盆地延长组长9油层组沉积相研究[J]. *石化技术*, 2018, 25(10): 334.
- YONG Zishu. Sedimentary facies study of Chang 9 reservoir in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2018, 25(10): 334.
- [29] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制——以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1810–1829.
- LIU Hanlin, ZOU Caineng, QIU Zhen, et al. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1810–1829.
- [30] 解馨慧. 细粒沉积岩颗粒定向结构特征及形成机理研究[D]. 成都理工大学, 2022.
- XIE Xinhui. Research on Grain Orientation Structure Characteristics and Formation Mechanism of Fine-grained Sedimentary Rocks [D]. Chengdu University of Technology, 2022.
- [31] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 737–747.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, WANG Feng, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 737–747.
- [32] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 870–883.
- FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 870–883.
- [33] DENG Hucheng, XIE Xinhui, CHEN Ke, et al. Mineralogical characteristics of continental shale: a case study in Yan-Chang Formation, Ordos Basin [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2018, 65(6): 851–862.