

# 鄂尔多斯盆地延长组长 $7_2$ 油层组陆相页岩纹层及裂缝分布特征的量化表征

何宗杭<sup>1</sup>, 陆子杰<sup>1</sup>, 李玉<sup>1</sup>, 段永婷<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819

<sup>2</sup> 东北大学深部工程与智能技术研究院, 沈阳 110819

\* 通信作者, duanyongting@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-18

国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202210145062)、国家自然科学基金项目(42102309)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(N2101032)、中央高校基本科研业务专项资金(N2224001)联合资助

**摘要** 为明确鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩纹层及裂缝分布特征, 运用高清摄像、超景深显微镜、IPP软件、分形几何学、蒙特卡罗模拟等多种手段对长 $7_2$ 油层组陆相页岩试样纹层及裂缝进行了观测和表征。划分了亮色和暗色纹层两种类型, 并通过XRD实验对亮色和暗色纹层矿物组分进行了比较。分别统计了亮色和暗色纹层在宏观、放大20倍和50倍三种观测尺度下的纹层厚度分布规律, 分析了不同厚度级(1 mm以下、1~10 mm和10 mm以上)纹层平均厚度的分布规律。表征了裂缝宽度、间距和倾角的分布特征, 并结合不同类型纹层分布规律, 建立了陆相页岩二维细观结构模型。研究结果表明: (1)亮色纹层中矿物类型以石英、长石等脆性矿物(80%)为主, 暗色纹层主要由40%的脆性矿物和40%的黏土矿物组成。(2)陆相页岩总纹层厚度与数量拟合满足指数函数关系, 亮色纹层厚度与数量拟合满足幂函数关系, 暗色纹层厚度与数量拟合满足对数函数关系。(3)随着观测尺度增大, 薄纹层(1 mm以下)出现频率增高, 中等纹层(1~10 mm)和厚纹层(10 mm以上)出现频率均降低, 且不同类型纹层厚度级与相应纹层平均厚度的对数值间呈现出线性关系, 纹层厚度分布具有分形特征。(4)裂缝宽度分布在细观尺度范围内, 宽度均值和标准差分别为0.271 mm和0.114 mm, 分布较集中, 裂缝间距的均值和标准差为8.115 mm和8.448 mm, 分布较均匀, 裂缝倾角的绝对值与数量拟合满足对数函数。相关研究成果可为纹层状陆相页岩的地质结构模型建立提供基础数据和方法参考。

**关键词** 陆相页岩; 纹层类型; 多尺度; 分形维数; 细观裂缝

## Quantitative characterization of the distribution characteristics of continental shale laminas and cracks in the Chang $7_2$ Oil Group of Yanchang Formation, Ordos Basin

HE Zonghang<sup>1</sup>, LU Zijie<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, DUAN Yongting<sup>1,2</sup>

引用格式: 何宗杭, 陆子杰, 李玉, 段永婷. 鄂尔多斯盆地延长组长 $7_2$ 油层组陆相页岩纹层及裂缝分布特征的量化表征. 石油科学通报, 2024, 01: 21-34

HE Zonghang, LU Zijie, LI Yu, DUAN Yongting. Quantitative characterization of the distribution characteristics of continental shale laminas and cracks in the Chang  $7_2$  Oil Group of Yanchang Formation, Ordos Basin. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 21-34. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.01.002

1 School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

2 Key Laboratory of Liaoning Province on Deep Engineering and Intelligent Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China

**Abstract** To clarify the distribution characteristics of laminas and cracks in continental shale in the Yanchang Formation of the Ordos Basin, a high-definition camera, super depth of field microscope, IPP software, fractal geometry, Monte Carlo simulation and other means were used to observe and characterize the laminas and cracks of continental shale samples in the Chang 7<sub>2</sub> oil group. Bright and dark laminas were classified, and the mineral components of bright and dark laminas were compared by X-ray diffraction. The thickness distribution of bright and dark laminas at macro, 20 times and 50 times magnification were respectively analyzed, and the distribution rules of average laminar thickness of different thickness classes (below 1 mm, 1~10 mm and above 10 mm) were analyzed. The distribution characteristics of crack width, spacing and dip angle were characterized, and a two-dimensional mesoscopic structure model of continental shale was established based on the distribution rules of different types of laminas. The results show that: (1) The minerals in the bright lamina are mainly brittle minerals (80%), such as quartz and feldspar, while the dark lamina is mainly composed of 40% brittle minerals and 40% clay minerals. (2) The fitting result between total laminas thickness and quantity of continental shale laminas follows an exponential function, the fitting between bright laminas thickness and quantity of bright laminas follows a power function, and the fitting between dark laminas thickness and quantity of dark laminas follows a logarithmic function. (3) With increasing observation scale, the frequency of thin laminas (below 1 mm) increases, and the frequency of medium laminas (1~10 mm) and thick laminas (above 10 mm) decrease. There is a linear relationship between the logarithm of different kinds of laminar thickness classes and corresponding average laminar thickness. The distribution of laminar thickness has a fractal feature. (4) The crack width is distributed in the mesoscopic range, with a mean and standard deviation of 0.271 mm and 0.114 mm, respectively, which is relatively concentrated. The mean and standard deviation of crack spacing are 8.115 mm and 8.448 mm, which is relatively uniform. The fitting result between the absolute value of the crack dip angle and the quantity of cracks follows a logarithmic function.

**Keywords** continental shale; lamination type; multi-scale; fractal dimension; mesoscopic cracks

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.01.002

## 0 引言

伴随着近年来油气勘探开发的发展,页岩气、页岩油等非常规油气资源展现出其巨大的发展潜力,全球油气资源迎来一场新的革命<sup>[1]</sup>。以美国、澳大利亚为首的国家已对此类非常规油气资源进行了商业性开发,非常规油气成为其能源组成结构的一大重要部分<sup>[2]</sup>。虽然我国的非常规油气资源富足,但我国对于页岩油气资源的开发利用起步较晚,目前仍处于探索阶段<sup>[3]</sup>。我国页岩油主要分布在松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地以及准格尔盆地,区别于美国页岩油赋存情况,我国页岩油主要赋存于纹层发育、非均质性强的陆相页岩储层中。陆相页岩纹层及裂缝分布特征对储层油气赋存情况及油气开发效果有着直接影响<sup>[4-6]</sup>。因此,开展陆相页岩纹层及裂缝分布特征研究,对纹层状陆相页岩的储层表征及页岩油开采压裂方案优化设计具有重要的科学价值和应用前景。

前人聚焦陆相页岩的纹层类型划分以及纹层厚度统计等方面开展了大量研究。针对纹层类型划分方面,部分学者依据纹层厚度差异划分,McKee等<sup>[7]</sup>将纹层划分为普通纹层(2 mm~1 cm)和薄纹层(小于2 mm)。

Ingram<sup>[8]</sup>在McKee的分类基础上,将纹层进一步划分为极薄纹层(小于3 mm)、特薄纹层(3 mm~1 cm)、非常薄纹层(1~3 cm)和薄纹层(3~10 cm)。Wang等<sup>[9]</sup>结合纹层频率将四川盆地焦石坝地区志留系下龙马溪组页岩纹层划分为低频率小厚度纹层、低频率大厚度纹层以及高频率大厚度纹层。部分学者依据纹层形态差异划分,Campbell<sup>[10]</sup>将纹层划分为平稳纹层、波浪纹层和弯曲纹层。Shi等<sup>[11]</sup>将渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩纹层划分为薄平行纹层、厚平行纹层、波浪状纹层、透镜状纹层、砂质纹层和弱纹层。安成等<sup>[12]</sup>将鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7<sub>3</sub>亚段页岩纹层划分为平直型纹层、波纹型纹层、粒序型纹层、透镜状纹层、斑状纹层和弱纹层。还有部分学者依据纹层矿物组分差异划分,Xi等<sup>[13]</sup>将鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>油层组纹层划分为富凝灰岩纹层、富有机质纹层、粉质级长石-石英纹层和黏土纹层4类。Chough等<sup>[14]</sup>将韩国西南部白垩纪乌汉格里组页岩纹层分为亮色纹层和暗色纹层。针对纹层厚度统计方面,Lei等<sup>[15]</sup>统计了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组张家滩页岩粉砂质纹层,发现了单个纹层厚度大多处于0.2~4 mm的范围内。刘国恒等<sup>[16]</sup>统计了鄂尔多斯盆地延长组桥镇—甘泉—张家湾—太

白一带的页岩,发现了纹层厚度分布差异大,最小厚度小于0.5 mm,而最大厚度大于5 mm。Li等<sup>[17-18]</sup>统计了鄂尔多斯盆地南部延长组长 $7_2$ 油层组页岩纹层厚度,发现了在米、分米、厘米、毫米和微米观测尺度下,纹层平均厚度分别为2.26 m、2.09 dm、1.70 cm、1.48 mm和11.70  $\mu\text{m}$ ,五级纹层厚度分布均符合指数函数关系,纹层厚度呈现分形特性。曹尚等<sup>[19]</sup>统计了鄂尔多斯盆地东南部长7油层组粉砂质纹层,发现了纹层厚度多小于1 mm,少部分可达1 cm。Shi等<sup>[11]</sup>统计了渤海湾盆地东营凹陷古近系6类页岩纹层,发现了纹层厚度一般分布在50~300  $\mu\text{m}$ 之间,其中波浪状纹层偏厚,厚度可达500  $\mu\text{m}$ ,透镜状纹层和砂质纹层厚度一般在200~300  $\mu\text{m}$ 之间,而弱纹层厚度大,单个纹层厚度可达3 mm。Liu等<sup>[20]</sup>统计了松辽盆地北部青山口组页岩粉质纹层厚度,发现了纹层厚度多集中分布在1~6 mm的范围内,厚度大于等于某一特定纹层厚度的纹层数量( $N$ )与该纹层厚度( $h$ )呈线性相关,纹层厚度分布具有分形特征。

前人对于陆相页岩储层结构特征的研究,除了关注纹层类型和厚度分布规律,还开展了陆相页岩裂缝分布特征及裂缝网络模型方面研究。针对裂缝参数统计方面,张晋等<sup>[21]</sup>根据统计所得天然裂缝的裂缝半长、空间位置、产状、裂缝密度(条数)等数据,计算了各参数服从的概率分布参数。曾凡辉等<sup>[22]</sup>通过CT扫描人工造缝岩心,确定了裂缝条数、裂缝位置、裂缝几何参数(倾角、宽度等),对缝网裂缝进行了二值化处理并计算了分形维数。针对裂缝网络模型方面,刘海军<sup>[23]</sup>和李丽慧等<sup>[24]</sup>根据裂缝迹长、产状、间距、体积密度等参数,通过蒙特卡洛随机模拟裂缝分布,分别建立了宏观尺度下的岩体裂隙网络模型和鄂尔多斯盆地长 $7_2$ 油层组岩石的裂缝网络模型。位云生等<sup>[25]</sup>基于分形理论并结合裂缝中心点、开度、长度、走向、分布等参数,建立了宏观尺度下的离散性天然裂缝表征模型。周彤等<sup>[26]</sup>基于有限元和离散元混合方法,建立了考虑倾斜层理影响的三维复杂裂缝扩展模型。冯金德等<sup>[27]</sup>运用等值渗流阻力法处理了天然裂缝,建立了裂缝性低渗透油藏稳态渗流的理论模型。

综上,已有研究明确了陆相页岩的主要纹层类型和纹层厚度分布规律,建立了宏观尺度下的裂缝网络模型,可为陆相页岩储层岩石的结构表征提供基础数据。但目前有关鄂尔多斯盆地纹层状陆相页岩的纹层及裂缝分布特征研究,尤其是针对不同类型纹层的厚度分布规律及考虑细观尺度(介于宏观和微观尺度之间的研究尺度)<sup>[28-31]</sup>下纹层和裂缝结构的模型研究仍有

不足。鉴于此,本文开展鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 $7_2$ 油层组陆相页岩在不同观测尺度下纹层及裂缝分布特征研究,揭示不同类型纹层厚度分布规律,建立纹层厚度与观测尺度之间的量化关系,表征细观尺度下的裂缝分布特征,建立考虑细观纹层和裂缝特征的结构模型。相关研究结果可为纹层状陆相页岩的地质结构模型建立提供基础数据和方法参考。

## 1 试样说明

### 1.1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于我国华北板块西部,构造形态简单,是一个多旋回的克拉通盆地,为我国第二大陆相页岩油沉积盆地,面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,包括伊盟隆起、渭北隆起、伊陕斜坡等6个二级构造单元(图1a)<sup>[32-33]</sup>。鄂尔多斯盆地集煤炭、页岩油、天然气及铀等多种能源矿产于一地,是我国油气储量和产量增长空间最大的盆地之一<sup>[34]</sup>。其中,三叠系延长组沉积期鄂尔多斯盆地为大型克拉通拗陷湖盆,整体具有盆大、坡缓、水浅、构造稳定的特征,为页岩油气资源的储存提供了良好的地质条件<sup>[35]</sup>。三叠系延长组内页岩油气资源储量丰富,油页岩储量占鄂尔多斯盆地油页岩资源总量的90%以上,是目前重点攻关的储层<sup>[36]</sup>。晚三叠纪延长组沉积期,沉积了一套近千米的河流-三角洲-湖泊沉积地层,自下而上共10油层组,即长1~长10油层组。根据沉积旋回,长7油层组又可细分为长 $7_1$ 、长 $7_2$ 和长 $7_3$ 三个亚油层组(砂层组)(图1b)<sup>[37]</sup>。长7油层组沉积期鄂尔多斯盆地古气候温暖湿润,形成了面积达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的半深湖-深湖区,是鄂尔多斯盆地内陆拗陷湖盆的发育鼎盛期,发育有良好的油页岩、黑色页岩和碳质页岩等优质烃源岩<sup>[15, 32]</sup>。长 $7_1$ 油层组富含砂岩,而长 $7_2$ 油层组含有较高的有机质,油页岩在此处发育,相较于长 $7_3$ 油层组,长 $7_2$ 油层组的油页岩更厚<sup>[24]</sup>。

### 1.2 试样情况

本文所研究的陆相页岩取自鄂尔多斯盆地南部边缘陕西铜川地区,现场总进尺深度为122 m,钻取岩芯直径为100 mm。研究层位是三叠系延长组长 $7_2$ 油层组岩芯,钻井回次为32次,取自地下111.60~115.57 m深度。室内采用无水线切割方法,在圆柱状岩芯上加工得到 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 长方体试样2块, $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 长方体试样2块,依次编号为试样1、试样2、试样3和试样4(图2)。制备



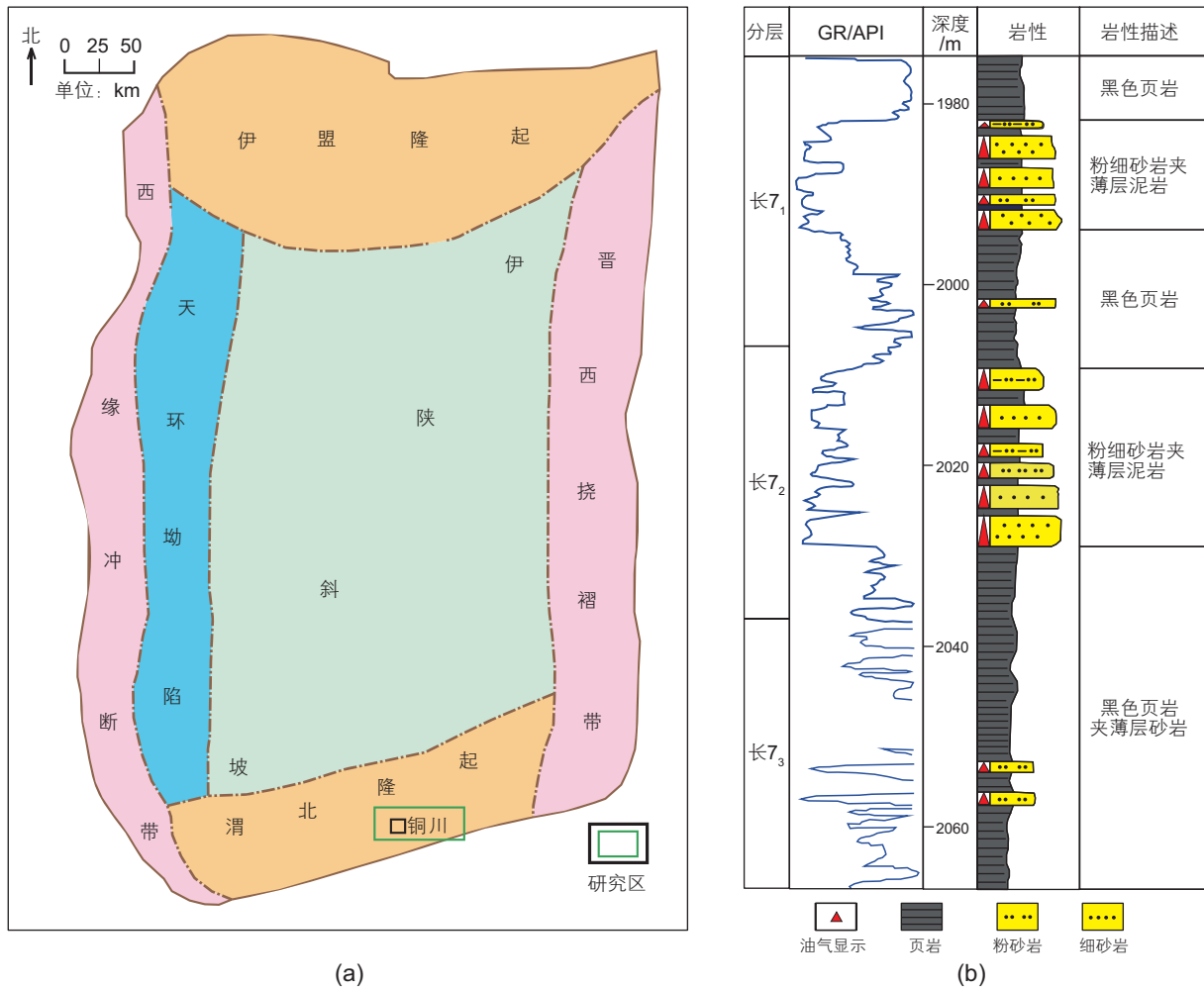


图 1 鄂尔多斯盆地构造地质图(a)及长7油层组地层柱状简图(b)(修编自李世祥等(2020)<sup>[37]</sup>)

Fig. 1 Structural geological map of the Ordos Basin (a) and stratigraphic columns of Chang 7 oil group; (b) (Modified from Li et al (2020)<sup>[37]</sup>)

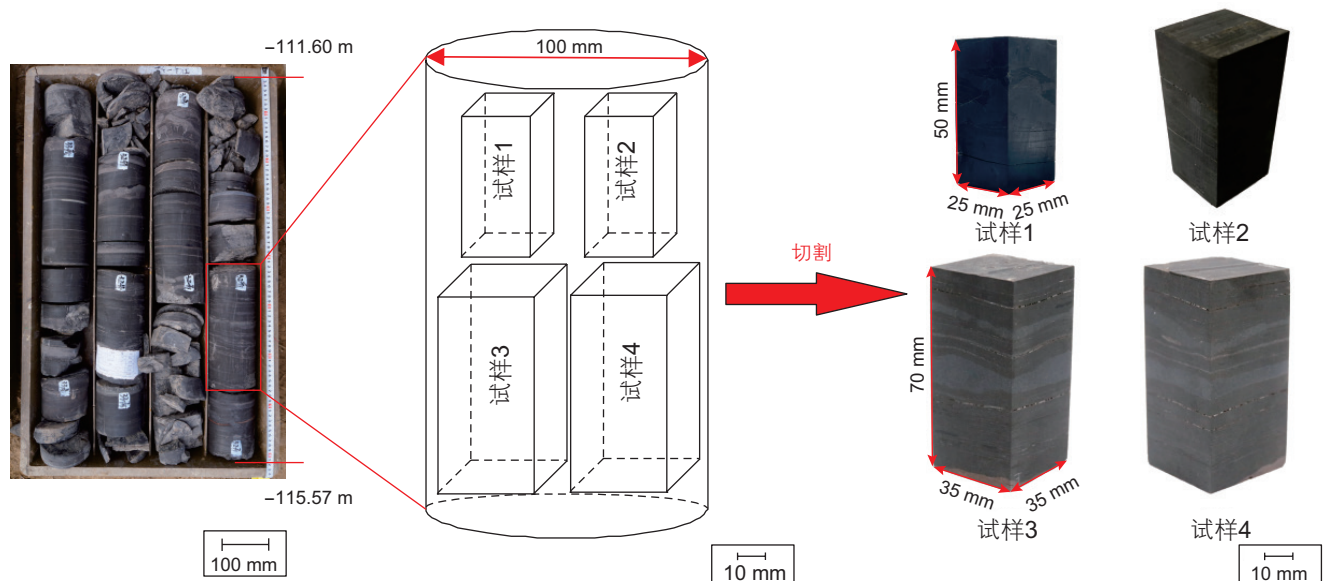


图 2 鄂尔多斯盆地南缘地区三叠系延长组长7<sub>2</sub>油层组页岩试样照片

Fig. 2 Photos of shale samples of Chang 7<sub>2</sub> oil group of Triassic Yanchang Formation in the southern margin of Ordos Basin

所得的长方体页岩试样纵轴方向垂直于纹层延伸方向，试样内纹层、微裂缝极其发育，非匀质性较强。

## 2 多尺度纹层及裂缝分布特征量化表征

### 2.1 结构观测

为获取陆相页岩纹层及裂缝分布特征，本文利用高清摄像以及超景深显微镜得到了4块试样各自的4个侧面在宏观尺度、显微镜放大20倍和50倍尺度下的RGB图像(图3a、b)。并利用Image-Pro Plus(IPP)软件观测和表征了纹层厚度及裂缝分布特征。根据试样表面的图像特征，发现纹层分为亮白色和暗灰色两种，裂缝处呈白色和黑色。以此为依据，将纹层分为亮色纹层和暗色纹层，将裂缝分为完全填充、半填充和未填充三种。

为了探究亮色纹层和暗色纹层的矿物组分差异，本文采用X射线衍射仪(型号为Smartlab-3 kw)，对亮色纹层和暗色纹层的粉末样品分别进行了XRD全岩矿物分析。对于两类纹层XRD粉末样品的获取，直接按照宏观照片观测划分的纹层位置进行取样。图4为

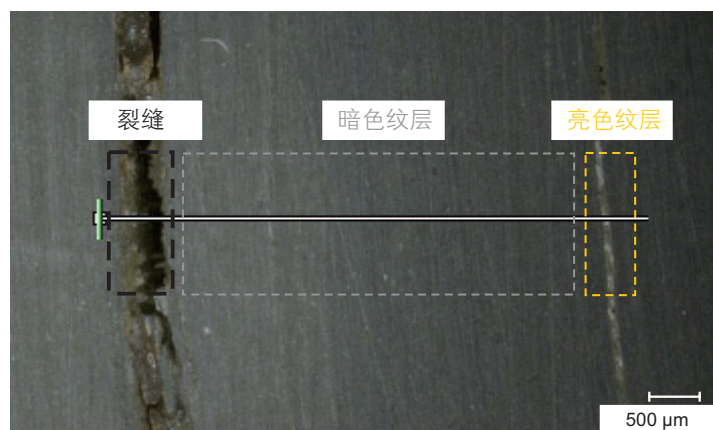
亮色纹层和暗色纹层的矿物组分及含量(质量含量)对比结果。由图可知，亮色纹层和暗色纹层在矿物组成类型上并无明显差异，但各类矿物成分的含量差异较大：亮色纹层主要由石英类、长石类(钾长石和斜长石)及铁白云石等脆性矿物(80%)组成，暗色纹层主要由40%的脆性矿物和40%的黏土矿物组成。此外，亮色纹层含有少量菱铁矿，暗色纹层含有较多的黄铁矿和石膏。

### 2.2 纹层厚度及裂缝参数量化表征

在根据IPP软件三原色曲线形态划分纹层类型及裂缝的基础上，进一步统计了不同类型纹层厚度及裂缝参数(宽度、间距)在测量曲线上的分布特征。以测量宏观尺度下的图像为例(图5)，具体统计方法为：(1)调整测量工具位置，使其位于纹层(裂缝)中心，方向在纵向上垂直纹层(裂缝)方向；(2)选择一种光强度曲线进行统计，计算测量线上所有像素的平均光强度数值，沿测量线绘制光强度平均值线段；(3)通过图像分析可知：亮色纹层的平均光强度最大，暗色纹层次之，未填充的黑色裂缝最小，三者分别对应三原色曲



(a) 相机拍摄



(b) 显微镜放大20倍拍摄

图3 多尺度纹层(裂缝)分布照片

Fig. 3 Photos of multi-scale lamina (crack) distribution

线中的峰值段、平稳段和谷底段。根据该原色曲线与平均值线的交点，精确定位纹层及裂缝边界，即找到亮色(暗色)纹层及裂缝对应曲线段的起点和终点。统计出构成纹层厚度、裂缝宽度及裂缝间距所用的像素

点个数；(4)计算像素点尺寸(单个像素点所代表的实际长度)，换算得到纹层厚度及裂缝参数。需要说明的是，相机图像中像素点尺寸的获取，采用实际试样高度除以试样上、下端面上像素点总个数，20和50放

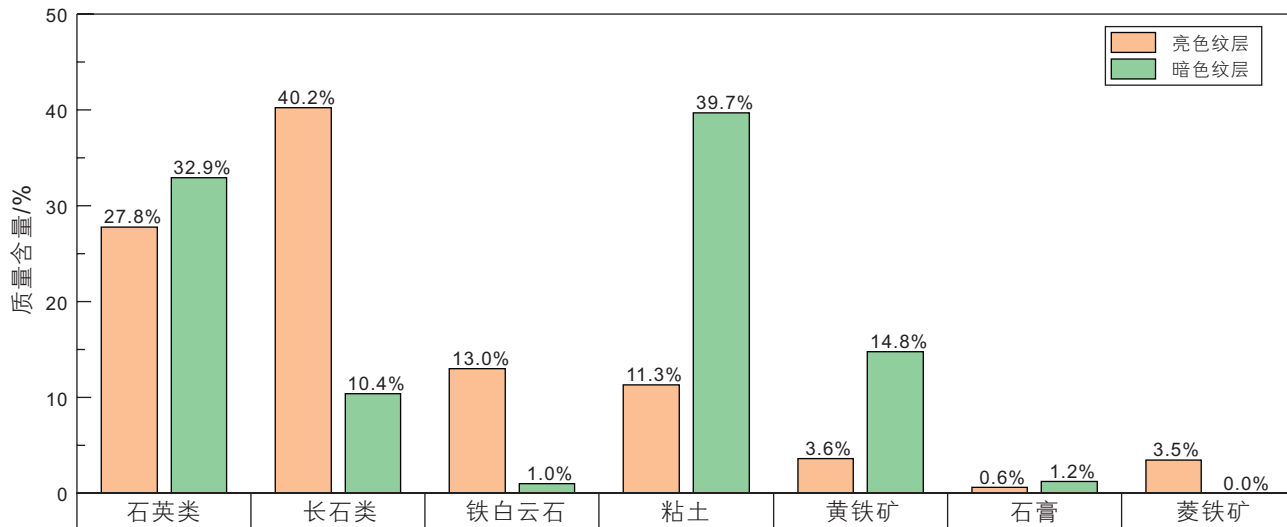


图4 亮色和暗色纹层矿物组分对比图

Fig. 4 Comparison figure of mineral composition of bright and dark laminas

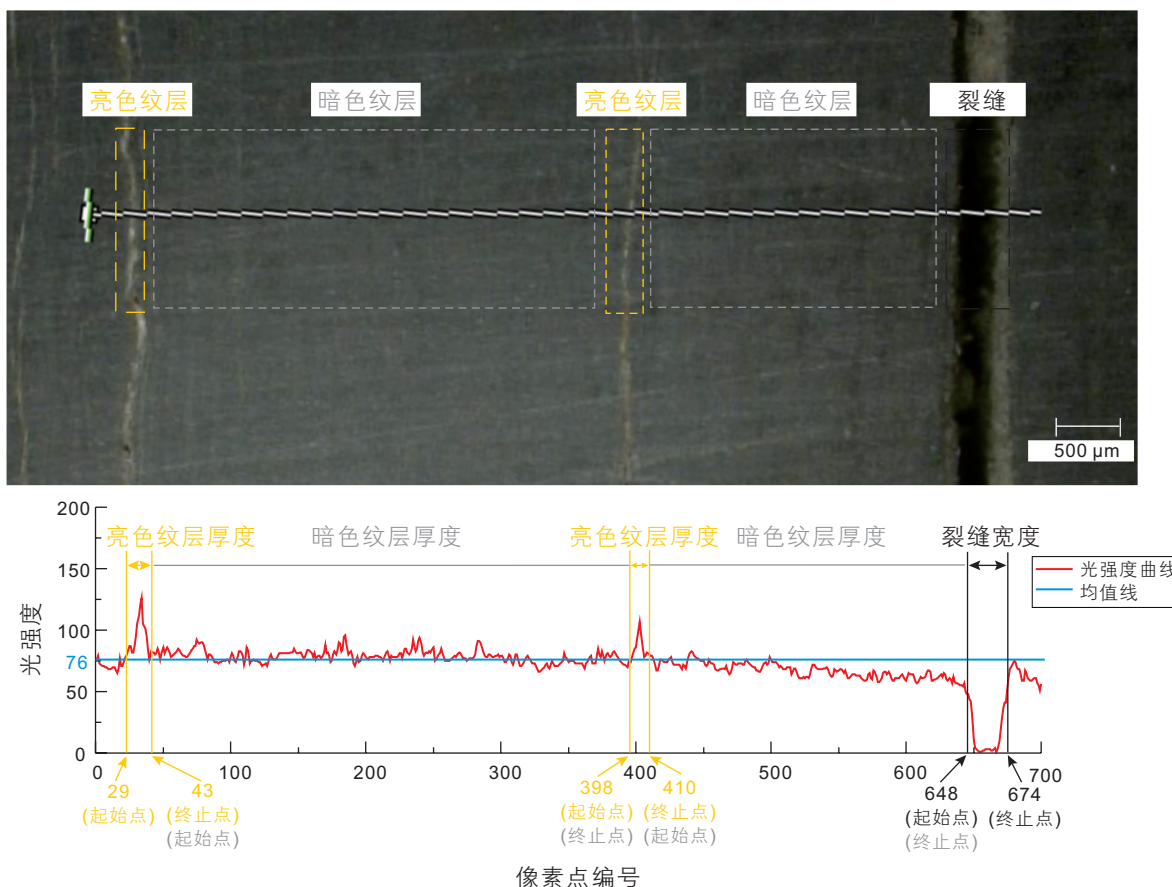


图5 宏观尺度下亮色和暗色纹层厚度测量

Fig. 5 Measurement of the thickness of bright and dark laminas at macro scale



大倍数下图像中像素点尺寸的获取,采用图像图例除以实际占用的总像素点个数。对于裂缝倾角的获取,利用CorelDRAW(CDR)软件进行测量,得到裂缝与水平面的夹角(逆时针为正)。

对于纹层厚度的统计,随着观测尺度的增大,在20和50放大倍数下的图像中,发现了许多在相机观测尺度下无法被观测到的细小纹层(以亮色纹层为主,多位于相机观测尺度下的大厚度暗色纹层内)。因此,对于显微镜观测图像中纹层的统计,本文采用在大厚度暗色纹层中寻找相机观测尺度下未能发现的细小亮色纹层,将相机观测尺度下的大厚度暗色纹层分为细小亮色纹层以及两块厚度更小的暗色纹层,统计新发现的亮色和暗色纹层厚度,替换相机观测尺度下的大厚度暗色纹层厚度数据。因此,本文通过整合3个观测尺度下的纹层厚度数据,总结宏-细观纹层厚度分布规律,以最大程度上接近客观存在的岩芯尺度纹层分布规律。对于裂缝参数的统计,经观察发现,显微镜观测图像中的裂缝在相机照片中均可统计。因此,仅统计相机照片中裂缝的宽度、间距及倾角参数。其中,所统计的裂缝倾角为裂缝中心点和裂缝边缘点连线与水平线之间的夹角(逆时针为正)。

### 3 纹层厚度及裂缝参数的分布规律

#### 3.1 纹层厚度分布规律

统计分析获取的纹层厚度参数可为陆相页岩的地质结构模型建立提供数据支撑。前人主要针对总纹层厚度分布规律开展了大量研究<sup>[15-17]</sup>,对于不同类型纹层各自的厚度分布规律的研究相对较少。为了建立更加精细的纹层状陆相页岩地质结构模型,亟需分别统计不同类型纹层的厚度分布规律,且统计纹层厚度分布规律的观测尺度仍需完善。因此,本节结合上述观测的亮色和暗色两类纹层在宏-细观尺度的厚度分布参数,探究两类纹层的厚度分布拟合函数,为更加精确地获取纹层厚度分布规律和建立细观结构模型提供理论参考。

基于统计的纹层厚度数据,将每个试样的纹层厚度数据按照纹层类型分类,获取总纹层、亮色纹层和暗色纹层的厚度参数,再分别按纹层厚度大小降序排列,导入Origin中进行非线性函数拟合分析,选取拟合相关系数最优的函数表达形式。图6为4个统计试样中不同类型的纹层厚度分布规律拟合函数。结果表明,不同类型的纹层厚度分布可分别采用不同的函数形式进行拟合。总纹层厚度分布采用指数函数拟合较

好(图6a、d、g、j),亮色纹层厚度分布采用幂函数拟合较好(图6b、e、h、k),暗色纹层厚度分布采用对数函数拟合较好(图6c、f、i、l),且三类函数的曲线拟合相关系数多数在0.9以上。

需要说明的是:(1)由于纹层倾角的存在,本文测量得到的纹层厚度为“视厚度”。统计纹层的平均厚度较小,且倾角一般小于7°,视厚度与真实厚度相差不大,且其对于最优函数拟合函数类型的选择没有影响(表1)。因此,统计时直接采用“视厚度”进行参数拟合,所得到的纹层厚度函数分布规律,可直接用于模型建立;(2)陆相页岩纹层厚度并非均匀分布,而是呈现出薄厚变化,文中所统计的纹层厚度为纹层中心的厚度;(3)超薄纹层(纹层厚度小于3个像素点尺寸)的起点和终点很难精准定位,文中所获取的超薄纹层厚度按照3个像素点尺寸进行统计。本文统计的4个试样中,不同类型纹层厚度的拟合函数相关系数基本大于0.90,偏低的相关系数也能达到0.88以上。鉴于此,可认为各试样中不同类型纹层的函数拟合度均较好,表明研究区页岩总纹层厚度与数量拟合满足指数函数关系,亮色纹层厚度与数量拟合满足幂函数关系,暗色纹层厚度与数量拟合满足对数函数关系。

为进一步研究纹层厚度分布与观测尺度的关系,将统计得到的纹层厚度按照1 mm以下(薄纹层)、1~10 mm(中等纹层)和10 mm以上(厚纹层)3个厚度级进行分类,并计算得到三种观测尺度下总纹层的数量及相应厚度级纹层的数量占比(图7)。由图7可知:(1)纹层厚度普遍较薄,多集中在毫米级别上,极少能够达到厘米级别;(2)随着放大倍数( $M$ )增大,纹层数量( $N$ )线性增多,且薄纹层(1 mm以下)出现频率增高,中等纹层(1~10 mm)和厚纹层(10 mm以上)出现频率均降低。

分形几何学是用来研究自然界中缺少特征尺度但具有自相似的图形和特征的一种方法<sup>[38]</sup>,该方法在纹层厚度分布的估算中有着广泛的应用<sup>[39]</sup>。本文在纹层厚度分布规律的研究中,关注纹层厚度与观测尺度等参数。因此,本文采用 $T-S$ (Thickness-Scale)模型研究纹层厚度与观测尺度之间的关系。在该模型中,用纹层厚度级来表征对应观测尺度,纹层厚度 $T$ 与观测尺度对应厚度级区间中位数 $S$ 应当符合以下关系式:

$$\ln T = D \times \ln S + C \quad (1)$$

式中, $T$ 为纹层厚度,mm; $S$ 为观测尺度对应厚度级区间中位数,mm; $D$ 为分形维数; $C$ 为常数。

本文所划分的3个纹层厚度级的具体区间

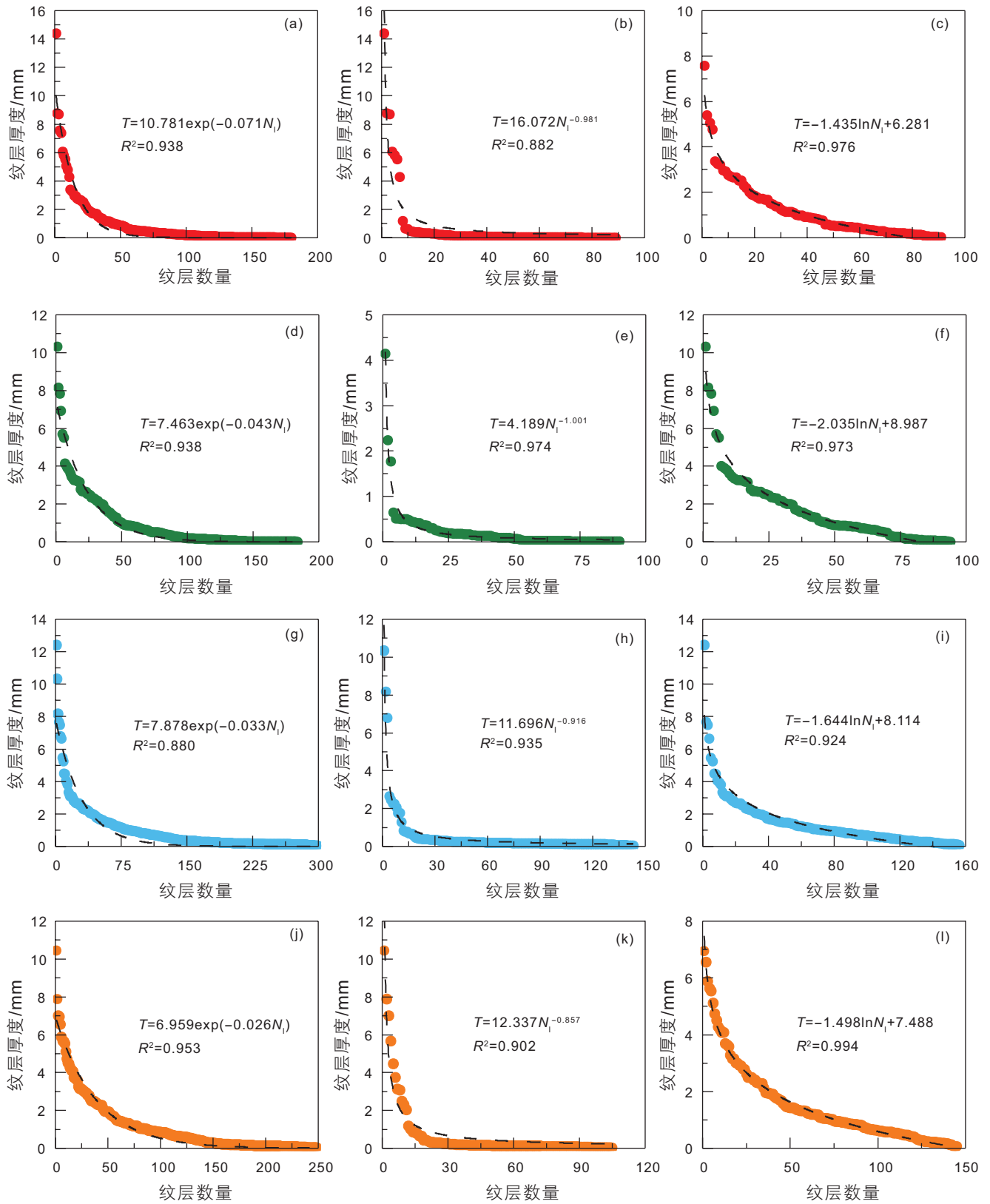


图6 不同类型纹层的厚度分布规律。(a)、(d)、(g)和(j)为4个试样的总纹层；(b)、(e)、(h)和(k)为4个试样的亮色纹层；(c)、(f)、(i)和(l)为4个试样的暗色纹层

Fig. 6 Thickness distribution law of different types of laminae (a), (d), (g) and (j) are the total lamina of the four samples; (b), (e), (h) and (k) are the bright lamina of the four samples; (c), (f), (i) and (l) are the dark lamina of the four samples



表1 试样1纹层“视厚度”与真实厚度拟合函数及相关度对比

Table 1 Comparison of the fitting function and correlation between the “apparent thickness” and the real thickness of sample 1

数据类型		拟合函数	$R^2$
视厚度	总纹层	$T = 10.78e^{-0.071N_1}$	0.938
	亮色纹层	$T = 10.072N_1^{-0.981}$	0.882
	暗色纹层	$T = -1.435 \ln N_1 + 6.281$	0.976
真实厚度	总纹层	$T = 10.720e^{-0.071N_1}$	0.938
	亮色纹层	$T = 16.040N_1^{-0.981}$	0.882
	暗色纹层	$T = -1.433 \ln N_1 + 6.270$	0.976

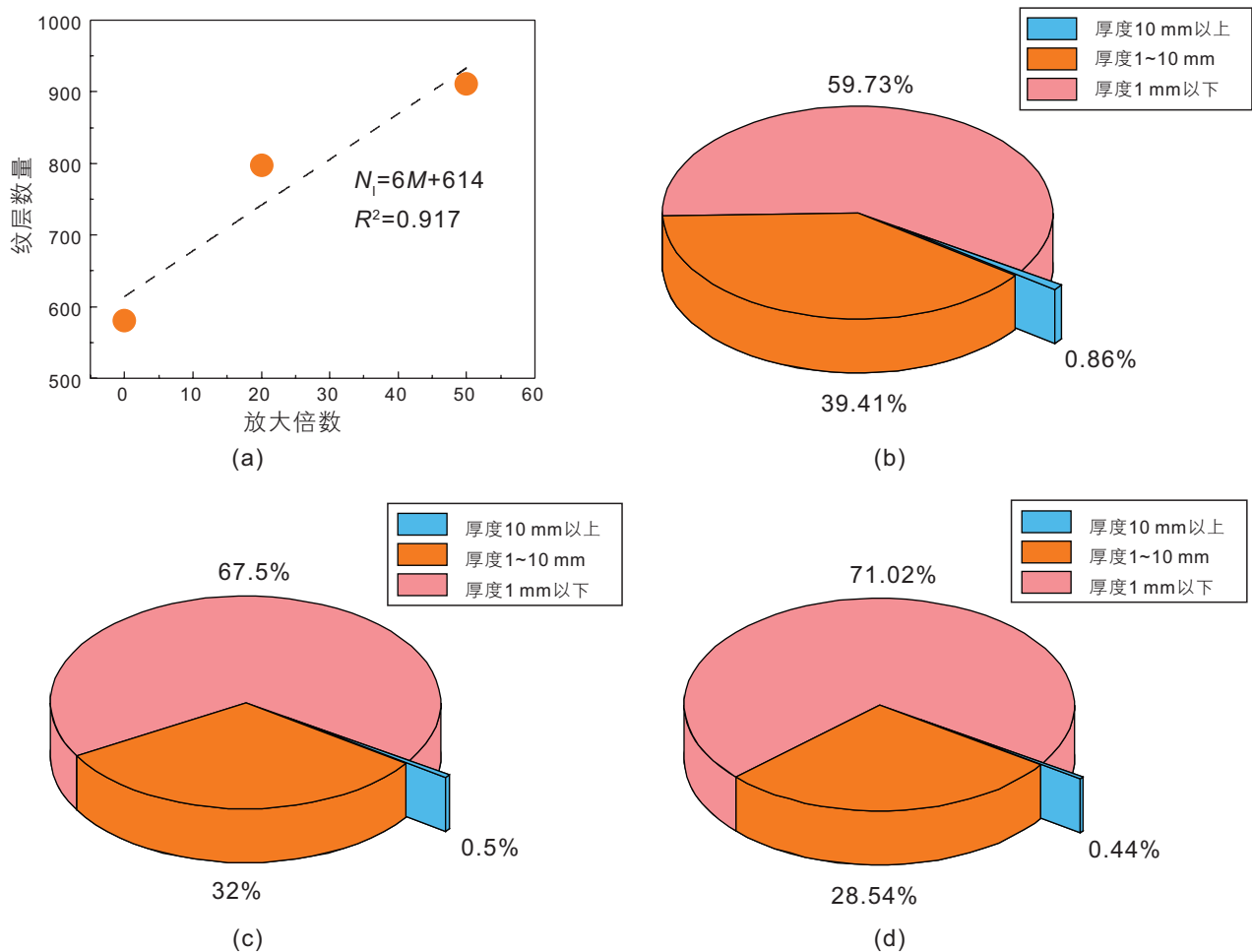


图7 多尺度纹层数量变化图(a)及不同厚度纹层数量占比饼状图((b)宏观、(c)放大20倍和(d)放大50倍)

Fig. 7 Quantitative changes of laminae at multi-scale. (a) Pie chart of proportion of different laminae; (b) macro scale; (c) 20 times magnification; (d) 50 times magnification

为0.0125(纹层最小厚度)~1 mm、1~10 mm和10~14.3948(纹层最大厚度) mm, 三个厚度级的中位数分别是0.506 mm、5.5 mm和12.197 mm。因此, 基于上述模型, 以 $L_n(0.506)$ 、 $L_n(5.5)$ 和 $L_n(12.197)$ (对应3个观测尺度 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ )为横坐标, 以相应观测尺度的纹层平均厚度取 $L_n$ 值(对应3个厚度级内纹层平均厚度 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ )为纵坐标, 绘制不同厚度级纹层平均厚度分布规律图(图8), 结果发现纹层平均厚度与观测尺

度之间呈现明显的线性关系, 相关系数为0.971。研究表明, 纹层厚度分布具有分形特征, 分形维数为1.111。

### 3.2 裂缝参数分布规律

陆相页岩的纹层特征(矿物组成和厚度分布规律)及裂缝发育情况共同影响其结构非均质性。此外, 陆相页岩纹层和裂缝在结构分布上存在一定的关联性。

根据所观测到的裂缝构造特征,发现裂缝发育包括不同类型纹层之间的层间裂缝和暗色纹层内的层内裂

缝<sup>[40-41]</sup>。同时发现,两类裂缝大多顺着纹层方向发育,这是因为当纹层发育至一定程度时,裂缝容易因岩石结构非均质发生偏转而被纹层捕获<sup>[42]</sup>。由此可见,陆相页岩纹层和裂缝分布存在关联性。同时,有研究表明,纹层类型(岩性)和厚度对天然裂缝的发育有显著影响<sup>[41]</sup>,即二者之间存在关联且相互影响。因此,为更精确地建立陆相页岩细观结构模型,除了统计不同类型的纹层厚度分布规律外,我们还需对裂缝参数的分布规律开展相关统计。

根据IPP和CDR软件测量所得的裂缝参数数据,可进一步分析室内研究试样的裂缝分布特征。图9为统计的裂缝宽度、裂缝间距及裂缝倾角参数的分布数据。由图可知,裂缝宽度(裂缝中心处)的数值分布在细观尺度范围内,均值和标准差分别为0.271 mm和0.114 mm(图9a);裂缝间距的均值和标准差为8.115 mm和8.468 mm(图9b);裂缝倾角的变化范围主要在-10~10°范围内(图9c)。为探究裂缝倾角分布规

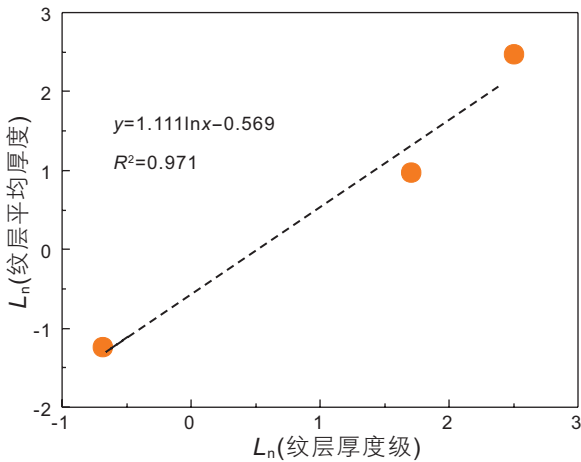


图8 不同厚度级纹层平均厚度分布规律图  
Fig. 8 Distribution law figures of average thickness of lamina with different thickness levels

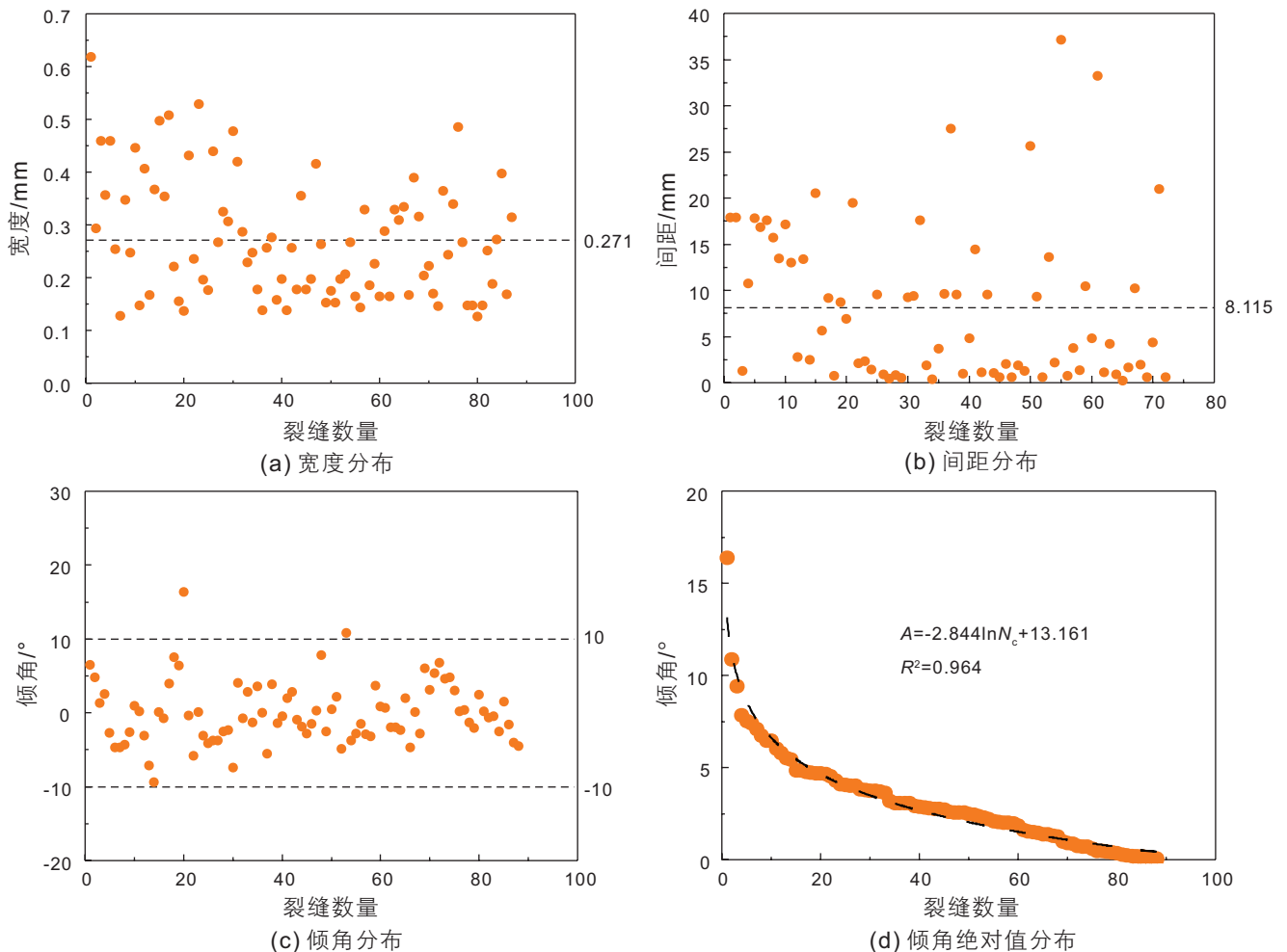


图9 裂缝参数分布规律图  
Fig. 9 Distribution law of crack's parameters

律,忽略裂缝倾角的正负,将裂缝倾角的绝对值按降序排列,导入Origin中进行非线性函数拟合分析。图9(d)为4个统计试样中裂缝倾角绝对值分布规律拟合函数。结果表明,裂缝倾角绝对值分布规律符合对数函数,相关系数为0.964。

#### 4 陆相页岩二维细观结构模型

基于所得纹层和裂缝参数分布规律,按照如下步骤,建立陆相页岩二维细观结构模型:

(1)确定模型尺寸。本文所统计的纹层和裂缝来源于室内岩石力学测试样品,故以观测试样尺寸(宽25 mm×高50 mm、宽35 mm×高70 mm)及标准尺寸试样中心截面大小(宽50 mm×高100 mm)作为陆相页岩二维细观结构模型尺寸。

(2)确定纹层和裂缝参数分布特征。在二维平面上,本文将细观尺度上的纹层和裂缝简化为矩形,故纹层和裂缝在平面中的分布可由中心点位置、长度、倾角、个数及厚度(宽度)来确定。具体步骤如下:

(a)中心点位置:根据室内试样的纹层和裂缝分布

特征,认为纹层和裂缝的中心点在试样中轴线上均匀分布;

(b)长度:考虑到纹层和裂缝大多在水平方向上贯穿试样,故纹层和裂缝的长度设定为相应模型的宽度;

(c)倾角:由于纹层厚度的统计仅在中心位置,故简化纹层的倾角为0°(即水平)。裂缝倾角绝对值大小设定为符合3.2节统计所得的对数函数,且倾角正负采用随机的分布规律;

(d)个数:由如下计算公式(2),得出模型内的纹层和裂缝个数;

(e)纹层厚度(裂缝)宽度:亮色纹层厚度分布规律符合3.1节统计所得的幂函数。裂缝宽度数据经Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验后发现无明显规律,故裂缝宽度设定为统计所得裂缝宽度的均值(裂缝宽度分布较集中)。

$$N = \frac{S_m}{d \times l} \quad (2)$$

式中, $N$ 为纹层(裂缝)个数,个; $S_m$ 为模型尺寸, $\text{mm}^2$ ; $d$ 为纹层(裂缝)间距的均值, $\text{mm}$ ; $l$ 为纹层(裂缝)长度, $\text{mm}$ 。

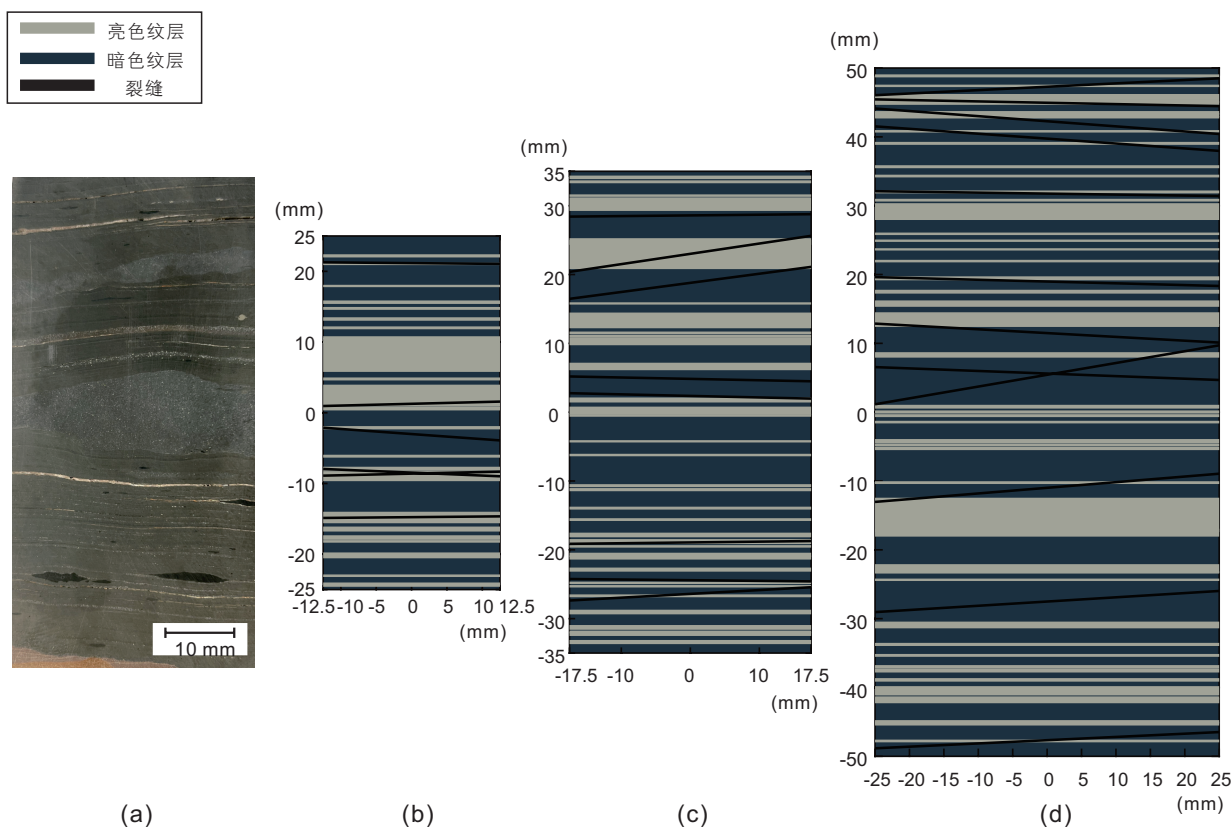


图10 试样4纹层分布照片(a)和不同尺寸陆相页岩二维细观结构模型((b) 25 mm×50 mm、(c) 35 mm×70 mm和(d) 50 mm×100 mm)

Fig. 10 Photo of distribution of laminas in sample 4 and (a) the two-dimensional mesoscopic structure model of continental shale of different sizes ((b) 25 mm×50 mm, (c) 35 mm×70 mm and (d) 50 mm×100 mm)

(3)模型建立。根据纹层和裂缝参数服从的概率分布函数,利用蒙特卡罗模拟生成服从各参数分布的随机数,并由此建立三种尺寸的陆相页岩二维细观结构模型,结果如图10b、c和d所示。

(4)模型验证。将模拟所得的二维细观结构模型与实际陆相页岩试样结构特征相比(图10),发现模型中亮色、暗色纹层和裂缝的分布特征与试样照片基本一致。然而,模型中能观察到的亮色纹层数量更多,与相机照片获取的结构特征存在一定差异。这是由于模型建立时采用的参数分布规律是综合了宏观尺度(相机拍摄)和细观尺度(显微镜观测)下的纹层数据,模拟所得的二维细观结构模型包含了细观尺度上的纹层,进而导致了模型试样内观察到的亮色纹层数量相比照片试样更多。

基于上述数据与方法建立的陆相页岩二维细观结构模型,量化表征了鄂尔多斯盆地延长组长 $7_2$ 油层组陆相页岩细观尺度下的纹层及裂缝分布规律,可为室内模型试样和数值试样中纹层和裂缝分布的建立提供基础数据。需要说明的是:本文建立的页岩二维细观结构模型是在观测室内试样的基础上进行了一定简化。例如,(1)前人研究<sup>[23-24]</sup>发现裂缝中心点在平面内均匀分布,而本文受限于所制试样尺寸,无法准确判断纹层和裂缝中心点位置,故在建模时认为纹层和裂缝中心点均落在试样中轴线上;(2)考虑到纹层厚度统计位置在试样中心,故将纹层简化为水平分布;(3)本文根据裂缝光强度曲线形态来精确测量裂缝宽度,由于未填充裂缝处呈现为波谷,全填充裂缝处呈现出波峰(同亮色纹层),因此在处理裂缝数据时,仅考虑光强度曲线波谷处未填充裂缝的宽度,即模型中生成的裂缝是基于未填充裂缝数据规律得到的,模型未考虑裂缝充填程度。综上,本文所表征的纹层和裂缝分布规律及建立的二维细观结构模型是对陆相页岩结构特征的初

步探索结果,相关内容可为纹层状陆相页岩的地质结构模型建立提供基础数据和方法参考。相关学者可基于本文所提出的陆相页岩二维细观结构模型开展页岩力学试验及数值模拟试验,最终服务于页岩油开采。

## 5 结论

本文以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 $7_2$ 油层组陆相页岩为例,量化表征了陆相页岩的纹层类型及不同类型纹层、裂缝的分布特征,并建立了细观尺度下的陆相页岩二维细观结构模型,主要获得了以下研究结论:

(1)划分了亮色纹层和暗色纹层两种纹层类型,明确了亮色纹层的矿物成分(含量)主要包括石英类(28%)和长石类(40%)等脆性矿物,暗色纹层矿物成分(含量)主要包括石英类(33%)等脆性矿物和黏土矿物(40%)。

(2)表征了宏观、放大20倍及50倍观测尺度下陆相页岩不同类型纹层的厚度分布特征,揭示了总纹层厚度与数量拟合满足指数函数关系,亮色纹层厚度与数量拟合满足幂函数关系,暗色纹层厚度与数量拟合满足对数函数关系。

(3)发现了随着观测尺度的增大,薄纹层(1 mm以下)出现频率增高,中等纹层(1~10 mm)和厚纹层(10 mm以上)出现频率均降低,且纹层厚度与观测尺度呈现明显的线性关系,纹层分布具有分形特征,厚度分形维数为1.111。

(4)表征了裂缝宽度、间距和倾角参数的分布规律,发现了裂缝宽度分布在细观尺度且较集中,裂缝间距分布较均匀,裂缝倾角绝对值与数量拟合满足对数函数关系。结合纹层参数分布规律,建立了岩芯尺度陆相页岩的二维细观结构模型。

## 参考文献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.[JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.]
- [2] 贾承造,姜林,赵文.页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J].石油科学通报,2023,8(6):695-706.[JIA C Z, JIANG L, ZHAO W. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(6): 695-706.]
- [3] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.[YANG H, LI S X, LIU X Y. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.]
- [4] 李阳,赵清民,吕琦,等.中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J].石油勘探与开发,2022,49(5):1-10.[LI Y, ZHAO Q M, LYU Q, et al. Development evaluation technology and practice of continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development,



- 2022, 49(5): 1–10.]
- [5] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 我国常规与非常规石油资源潜力及未来重点勘探领域[J]. 海相油气地质, 2019, 24(2): 1–13. [ZHENG M, LI J Z, WU X Z, et al. The conventional and unconventional oil resource potential and key exploration fields in China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(2): 1–13.]
- [6] 许丹, 胡瑞林, 高玮, 等. 页岩纹层结构对水力裂缝扩展规律的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 523–528. [XU D, HU R L, GAO W, et al. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 523–528.]
- [7] MCKEE E D, WEIR G W. Terminology for stratification and cross-stratification in sedimentary rocks[J]. The Geological Society of America, 1953, 64(4): 381–390.
- [8] INGRAM R L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks[J]. The Geological Society of America, 1954, 86: 937–938.
- [9] WANG C, ZHANG B Q, HU Q H, et al. Laminas characteristics and influence on shale gas reservoir quality of lower Silurian Longmaxi Formation in the Jiaoshiha area of the Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 839–851.
- [10] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset[J]. Sedimentology, 1967, 8: 7–26.
- [11] SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Laminar characteristics of lacustrine organic-rich shales and their significance for shale reservoir formation: A case study of the Paleogene shales in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 223: 1–9.
- [12] 安成, 柳广弟, 孙明亮, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7<sub>3</sub> 亚段页岩纹层发育特征及类型划分[J]. 石油科学通报, 2023, 8(2): 125–140. [AN C, LIU G D, SUN M L, et al. Development characteristics and classification of shale laminae in the Chang 7<sub>3</sub> sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(2): 125–140.]
- [13] XI K L, LI K, CAO Y C, et al. Laminas combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7<sub>3</sub> sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1342–1353.
- [14] CHOUGH S K, KIM S B, CHUN S S. Sandstone/chert and laminated chert/black shale couplets, Cretaceous Uhangri Formation (southwest Korea): Depositional events in alkaline lake environments[J]. Sedimentary Geology, 1996, 104: 227–242.
- [15] LEI Y H, LUO X R, WANG X Z, et al. Characteristics of silty laminae in Zhangjiatan Shale of southeastern Ordos Basin, China: Implications for shale gas formation[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(4): 661–687.
- [16] 刘国恒, 黄志龙, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩纹层发育特征及储集意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 408–417. [LIU G H, HUANG Z L, JIANG Z X, et al. The characteristic and reservoir significance of lamina in shale from Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 408–417.]
- [17] LI L H, HUANG B X, TAN Y F, et al. Geometric heterogeneity of continental shale in the Yanchang Formation, Southern Ordos Basin, China[J]. Scientific reports, 2017, 6006.
- [18] LI L H, HUANG B X, LI Y Y, et al. Multi-scale modeling of shale laminae and fracture networks in the Yanchang formation, Southern Ordos Basin, China[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 231–240.
- [19] 曹尚, 李树同, 党海龙, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长 7 段页岩孔隙特征及其控制因素[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(1): 11–17. [CAO S, LI S T, DANG H L, et al. Pore characteristics and controlling factors of Chang 7 Shale in Southeastern Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(1): 11–17.]
- [20] LIU B, JIN L, HU C Z. Fractal characterization of silty beds/laminae and its implications for the prediction of shale oil reservoir in Qingshankou Formation of northern Songliao Basin, Northeast China[J]. Fractals, 2019, 27(1): 1–12.
- [21] 张晋, 黄世军, 程林松. 天然裂缝储层压裂定向井稳态产量的蒙特卡洛计算[J]. 计算物理, 2014, 31(5): 567–572. [ZHANG J, HUANG S J, CHENG L S. Monte Carlo calculation of stable productivity of fractured directional wells in natural fracture reservoirs[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2014, 31(5): 567–572.]
- [22] 曾凡辉, 张涛, 马磊, 等. 深层页岩体积压裂缝网动态渗透率模型及其应用[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 941–949. [ZENG F H, ZHANG T, MA L, et al. Dynamic permeability model of volume fracturing network in deep shale gas reservoir and its application[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 941–949.]
- [23] 刘海军. 基于蒙特卡罗法的岩体裂隙网络模型及渗透张量的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. [LIU H J. Studies on discrete fracture network modeling based on Monte-Carlo and permeability tensor of rock masses[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.]
- [24] 李丽慧, 黄北秀, 李严严, 等. 考虑页岩纹层与裂缝网络的延长组页岩多尺度三维地质结构模型[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 69–79. [LI L H, HUANG B X, LI Y Y, et al. Multi-scale 3-D modeling of Yanchang shale geological structure considering laminae and fracture networks[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 69–79.]
- [25] 位云生, 王军磊, 于伟, 等. 基于三维分形裂缝模型的页岩气井智能化产能评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 787–796. [WEI Y S, WANG J L, YU W, et al. A smart productivity evaluation method for shale gas wells based on 3D fractal fracture network

- model[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 787–796.]
- [26] 周彤, 张士诚, 邹雨时, 等. 四川盆地东北缘强应力大倾角页岩储层水力压裂裂缝形态[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(3): 336–341. [ZHOU T, ZHANG S C, ZOU Y S, et al. Hydraulic fracture geometry of shale gas reservoirs with strong tectonic stress and large dip angle in northeastern margin of Sichuan Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(3): 336–341.]
- [27] 冯金德, 程林松, 李春兰. 裂缝性低渗透油藏稳态渗流理论模型[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(3): 316–318. [FENG J D, CHENG L S, LI C L. A theoretical model of steady-state flow for naturally fractured low-permeability reservoir[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(3): 316–318.]
- [28] HUANG L K, LIU J J, JI Y J, et al. A review of multiscale expansion of low permeability reservoir cracks[J]. *Petroleum*, 2018, 4(2): 115–125.
- [29] 杨卫. 细观力学和细观损伤力学[J]. *力学进展*, 1992, 22(1): 1–9. [YANG W. Meso-mechanics and meso-damage mechanics[J]. *Advances in Mechanics*, 1992, 22(1): 1–9.]
- [30] WANG Y, LI X, WU Y F, et al. Experimental study on meso-damage cracking characteristics of RSA by CT test[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 5545–5558.
- [31] 段永婷. 页岩细观损伤量化表征与破坏模式分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020. [DUAN Y T. Quantitative characterization of mesoscopic damage and analysis of failure mode for shale[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.]
- [32] 秦艳, 张文正, 彭平安, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富铀铀源岩的铀赋存状态与富集机理[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2469–2476. [QIN Y, ZHANG W Z, PENG P A, et al. Occurrence and concentration of uranium in the hydrocarbon source rocks of Chang 7 member of Yanchang formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (10): 2469–2476.]
- [33] 肖铁全, 田川川, 任海蛟. 鄂尔多斯盆地延安气田延长地区石盒子组八段沉积微相及其控气性[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2017, 14(7): 20–24. [XIAO T Q, TIAN C C, REN H J. Sedimentary microfacies and their effects on gas accumulation in Shihezi 8 section of Yan'an gasfield, Ordos basin[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2017, 14(7): 20–24.]
- [34] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617–638. [LIU C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617–638.]
- [35] 李士祥, 郭芪恒, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩型页岩油储层特征及勘探方向[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1509–1519. [LI S X, GUO Q H, ZHOU X P, et al. Reservoir characteristics and exploration direction of pure shale-type shale oil in the 3rd sub-member, 7th Member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 43(11): 1509–1519.]
- [36] 卢进才, 李玉宏, 魏仙祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(6): 928–932. [LU J C, LI Y H, WEI X Y, et al. Research on the depositional environment and resources potential of the oil shale in the Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2006, 36(6): 928–932.]
- [37] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(04): 719–729. [LI S X, NIU X B, LIU G D, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(04): 719–729.]
- [38] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156: 636–638.
- [39] 程明, 罗晓容, 雷裕红, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩粉砂质夹层/纹层分布、分形特征和估算方法研究[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 845–854. [CHENG M, LUO X R, LEI Y H, et al. The distribution, fractal characteristic and thickness estimation of silty laminae and beds in the Zhangjiatan Shale, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 845–854.]
- [40] 赵圣贤, 夏自强, 李海, 等. 页岩储层天然裂缝定量评价及发育主控因素——以泸州地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例[J]. *沉积学报*, 2023, DOI: 10.14027/j. issn.1000–0550.2023.015. [ZHAO S X, XIA Z Q, LI H, et al. Quantitative Evaluation and Main Controlling Factors of Natural Fractures in a Shale Reservoir: A case study of the deep shale of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Luzhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, DOI: 10.14027/j. issn.1000–0550.2023.015.]
- [41] ZHANG X J, HE J H, DENG H C, et al. Controls of interlayers on the development and distribution of natural fractures in lacustrine shale reservoirs: A case study of the Da'anzhai member in the Fuling area in the eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 1–21.
- [42] 张文, 吴建军, 刘向君, 等. 海陆过渡相页岩力学特征及破坏模式——以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组为例[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(7): 1144–1154. [ZHANG W, WU J J, LIU X J, et al. Mechanical characteristics and failure mode of marine-continent transitional facies shale: Case study of Permian Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(7): 1144–1154.]