

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7_3 亚段页岩纹层发育特征及类型划分

安成^{1,2}, 柳广弟^{1,2*}, 孙明亮^{1,2}, 游富粮^{1,2}, 王子昕^{1,2}, 曹玉顺^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, lgd@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-05-20

中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-02)资助

摘要 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7_3 亚段沉积的富有机质泥页岩中, 频繁发育的纹层导致页岩层系非均质性强, 进而对泥页岩的储集特征及含油性造成影响。本文基于典型的纹层页岩样品, 利用游标卡尺对岩心上的纹层进行定量测量, 结合显微镜下薄片鉴定、总有机碳测定、X射线衍射矿物分析及岩石热解实验, 对长 7_3 亚段页岩纹层的发育特征、纹层类型划分及纹层在单井上的纵向展布规律进行了研究。研究表明, 宏观岩心上发育的纹层单层厚度一般分布在0.4~5.0 mm, 纹地比(纹层总厚度/统计段岩心长度)介于5.7%~16.8%, 纹层发育频率非均质性强。显微镜下依据纹层沉积构造的形态划分为6类, 分别为3种具有连续形态沉积特征的平直型纹层、波纹型纹层、粒序型纹层及3种非连续形态沉积特征的透镜状纹层、斑状纹层、弱纹层, 不同形态纹层页岩的矿物组成及有机质丰度差异明显。依据纹层内部的微观物质组成将其类型主要划分为有机质纹层、长英质纹层及凝灰质纹层; 按照不同纹层垂向的叠置规律, 将纹层组合划分为均质泥岩、长英质纹层型页岩与凝灰质纹层型页岩。单井上, 纹层分布具有非均质性, 不同纹层的发育频率与黏土矿物含量、TOC及OSI的变化呈一定的规律性变化。

关键词 纹层; 纹层组合; 泥页岩; 长 7_3 亚段; 纹层演化

Development characteristics and classification of shale laminae in the Chang 7_3 sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin

AN Cheng^{1,2}, LIU Guangdi^{1,2}, SUN Mingliang^{1,2}, YOU Fuliang^{1,2}, WANG Zixi^{1,2}, CAO Yushun^{1,2}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract In the organic-rich shale deposited in the Chang 7_3 sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, the frequent laminae lead to strong heterogeneity of shale series, which in turn affects the reservoir characteristics and oil-bearing property of the shale. Based on typical laminated shale samples, this paper quantitatively measured the laminae in

引用格式: 安成, 柳广弟, 孙明亮, 游富粮, 王子昕, 曹玉顺. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7_3 亚段页岩纹层发育特征及类型划分. 石油科学通报, 2023, 02: 125-140

AN Cheng, LIU Guangdi, SUN Mingliang, YOU Fuliang, WANG Zixi, CAO Yushun. Development characteristics and classification of shale laminae in the Chang 7_3 sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 125-140. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.009

the core with vernier calipers, and studied the development characteristics, laminae types and vertical distribution of laminae in the Chang 73 sub-member shale by combining microscopic thin section identification, total organic carbon determination, X-ray diffraction mineral analysis and rock pyrolysis experiments. The results show that the thickness of single layers of the laminae developed on the macro core is generally between 0.4 and 5.0 mm, and the ratio of the laminae to the core (the total thickness of the laminae/the core length of the statistical section) is between 5.7% and 16.8%, and the development frequency of the laminae is highly heterogeneous. Microscopically, it is divided into six types according to the morphology of laminae sedimentary structures, which are three kinds of straight laminae, corrugated laminae, granular laminae with continuous clay morphological sedimentary characteristics and three kinds of lenticular laminae, mottled laminae and weak laminae with discontinuous morphological sedimentary characteristics. The mineral composition and organic matter abundance of shale with different morphologies are obviously different. According to the microscopic material composition inside the laminae, they are mainly divided into organic laminae, felsic laminae and tuffaceous laminae, and according to the vertical superposition of different laminae, the laminated combinations are divided into homogeneous mudstone, felsic laminated shale and tuffaceous laminated shale. In a single well, the distribution of laminae is heterogeneous, and the development frequency of different laminae changes regularly with the changes of clay mineral content, total organic carbon(TOC) and oil saturation index(OSI).

Keywords laminae; laminae combination; mud and shale; Chang 7₃ sub-member; laminae evolution

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.009

0 引言

中国陆相页岩油具有巨大的资源潜力, 可以成为未来油气储量、产量大规模增长的主要研究领域^[1-2]。页岩油的勘探和开发实践表明, 富含有机质的页岩并非“均质”, 而是包含复杂的沉积结构和矿物成分^[3], 其中纹层结构在页岩层系中普遍发育^[4-5]。纹层是沉积物或沉积岩中可分辨的最小或最薄的原始沉积层, 是组成层理的最小单元^[6-7]。页岩油井的产油数据证明, 纹层发育的页岩裂缝发育, 油井产量高^[8]。对此, 前人从多个角度对纹层进行了研究。主要包括以下几个方面: 1) 纹层的成因: 刘国恒等认为在宏观背景下纹层包括湖泊沉积纹层、海相沉积纹层及冰水湖纹层^[9]; 王冠民等研究了在生物作用、化学作用及机械作用下纹层的沉积过程^[10]; O'Brien等通过沉积水槽模拟实验结合薄片观察认为纹层是在底流沉积作用、悬浮沉降作用及低密度浊流作用下形成的^[11]。2) 纹层类型: 多数学者通过纹层的矿物组成差异对纹层进行划分, 一般包括有机质纹层^[12-13]、富含石英及长石等矿物的砂质纹层^[4,6]、黏土纹层^[14-16]、碳酸盐纹层^[7,17-19]等, 同时火山喷发及热液活动会沉积形成凝灰质纹层^[20-22]; 还有部分学者利用纹层厚度、密度等发育程度对纹层进行分类^[23-25]; 而Lazar OR及赵珂等则依据纹层的沉积构造形态对纹层类型进行划分^[26-27]。3) 有机质特征: 柳波等提出纹层页岩在藻类勃发作用下造成有机质的高度富集^[7]; 胡月等研究发现在单井上有机质纹层的发育频次同TOC具有正相关性^[4]; 华甘霖等认为四川盆地龙马溪组纹层页岩TOC普遍高于块状泥岩^[5]。4) 储集差异: 俞雨溪等研究发现在长7段页岩

中砂质纹层的物性优于相邻黏土层^[28-29]; 林长木等对川南地区龙马溪组页岩纹层研究后发现硅质-黏土质纹层组合的孔隙度与渗透率比钙质-黏土质纹层组合好^[15]; 李婷婷等利用氮气吸附实验发现纹层页岩的孔隙体积随孔径的减小而增加, 但不同纹层的孔径分布差异较大^[12]。由此可见, 对页岩纹层的深入研究具有重要的科学意义。

对于鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段泥页岩中纹层, 前人的研究主要集中于其中的砂质纹层的形态、矿物组成及孔隙结构^[30-32], 而在页岩纹层的整体发育、类型划分、纵向展布规律及含油性特征上缺少一定的研究。因此, 本文针对长7₃亚段, 选择典型纹层页岩样品, 综合利用光学显微镜、全岩X射线衍射矿物分析、TOC测定、岩石热解等实验对长7₃亚段页岩纹层的发育特征、类型划分及含油性进行了分析。具体工作包括: 1) 选取盆地西南方向的岩心样品, 利用游标卡尺对连续取心样品的长7₃亚段进行纹层的定量测量, 统计纹层发育频率、厚度等特征。2) 对页岩样品进行不同处理。将样品制作为7×5 cm规格的大薄片和6×2.5 cm规格的小薄片进行微观观察, 其中大薄片在显微镜下观察的同时进行全尺度照相, 利用CorelDRAW软件进行无缝拼接, 统计纹层及纹层组合发育频次、厚度占比及形态特征; 有机质光片使用规格为3×2×0.6 cm的块状样品进行有机质特征的分析。3) 利用线切割将纹层发育部分从岩样中切割分离, 碎成粉末后进行有机碳测定、热解及X射线衍射实验。本文所进行的实验均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室进行。

1 长₇亚段基本地质特征

鄂尔多斯盆地油气资源潜力巨大，是我国油气储量最大的盆地之一^[9]。在区域构造上，盆地属于华北大型拗陷区的组成部分之一，主要由6个一级构造单元构成，包括晋西挠褶带、西缘冲断带、渭北隆起、北部伊盟隆起以及天环拗陷和伊陕斜坡^[14,28](图1a)。地层根据沉积特征自下而上，可划分为5段10个油层组，其中长₇油层组沉积时期为湖盆演化的鼎盛时期，湖盆水体深，湖面广，水体深度最大可以达到150 m，沉积了一套生烃能力巨大的泥页岩^[33]。长₇段底部的长₇亚段为湖盆鼎盛时期，湖盆中央沉积了一套平均厚度为33.54 m，以富有机质泥页岩夹薄层粉细砂岩和凝灰岩为主的地层，测井上具有高自然伽马和高声波时差的特征，是鄂尔多斯盆地主力烃源岩层^[20](图1b)。本文研究区主要位于盆地的西南部，观察与取样的长₇亚段岩心样品主要分布在环县-庆城-正宁地区。

2 页岩纹层发育特征

研究区鄂尔多斯盆地延长组长₇亚段发育一套厚度在20~40 m左右的灰-黑色泥页岩。根据前人定义，在岩心尺度上，将单层厚度在0~1 cm范围内的薄层定义为纹层，大于1 cm的薄层定义为夹层^[34-35]。岩心上观察，长₇亚段夹层发育较少，而纹层占比可达到70%。多数纹层在岩心新鲜面上表现为黄色、褐色及白色，少数为红色、紫红色，粒度相对于泥页岩更大。在纹层与泥页岩的交界处，多形成微裂缝、交错层理等沉积构造。基于此，通过11口钻井岩心的观察和测量，结合100余块薄片和光片镜下观察，从宏观岩心定量描述到微观薄片鉴定两种尺度，对长₇亚段泥页岩中纹层的发育进行分析。

2.1 宏观发育特征

为了量化泥页岩中纹层的宏观发育情况，首先对研究区所选的11口井的长₇段岩心进行随机取样与观

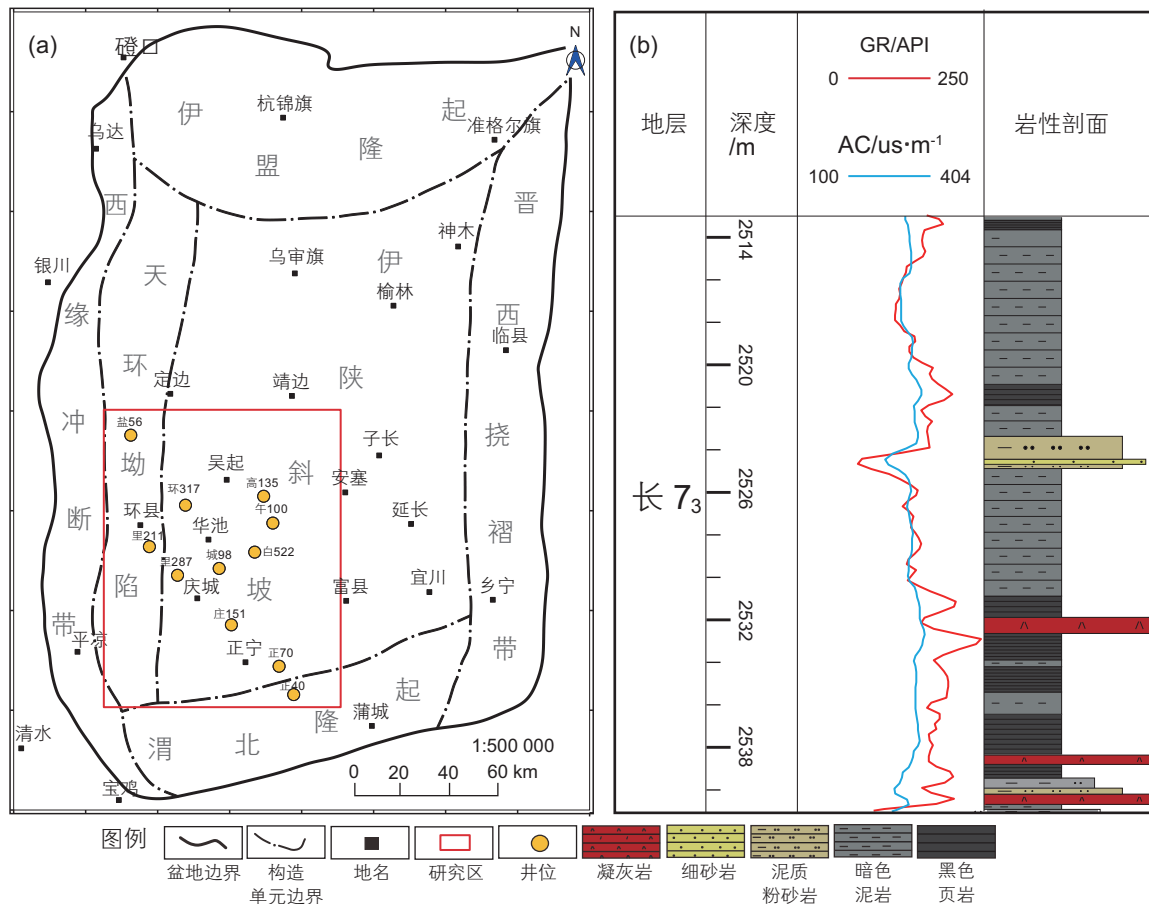


图1 鄂尔多斯盆地(a)构造单元划分^[33]及(b)长₇亚段地层发育特征

Fig. 1 (a) Division of tectonic units in Ordos Basin and (b) stratigraphic development characteristics of Chang 7₃ sub-member

察,发现页岩纹层在平面上分布具有普遍性,而在纵向上纹层发育频率呈现不均匀分布的特点。长 7_3 底部纹层出现频率高、厚度较大,颜色以红色与白色为主;而顶部纹层出现频率相对较低,多见褐色纹层,粒度更大(图2)。由于发育的纹层厚度多处于毫米级尺度,颗粒细小,单纯依靠肉眼鉴定成分难度大,因此为系统地精细刻画纹层的发育特征,工作中选取游标卡尺(精度为0.02 mm),利用不同颜色为标准,对连续取心长度达1 m的岩心新鲜面进行测量与统计,确定纹层发育累计层数、厚度、纹地比(纹层总厚度/岩心长度)及纹层密度(纹层总层数/岩心长度)等特征。本文以详细描述测量的午100井为例,分析纹层宏观发育特征。

午100井位于庆城地区,处于曲流河-三角洲沉积环境^[20]。本次定量描述长 7_3 亚段中1980.8~1983.4 m段,总计56块岩心的纹层发育特征。该段整体上部岩性为黑色页岩夹少量凝灰岩与泥质粉砂岩,下部主要发育具灰白色交错层理的细砂岩及暗色泥岩。由图3可知,午100井定量统计的2600 mm长的岩心中,共发育薄层46条,其中夹层发育3条,纹层发育43条,多是褐色纹层,少数为白色与红色纹层,纹层累计厚度为134.16 mm,纹地比达5.16%,其中纹层单层厚度介于0.48~9.16 mm之间,平均厚度为3.36 mm(图

3a)。以100 mm为基本统计单元,把该段划分为26个统计区间,分别统计了每100 mm岩心中纹层的发育密度、累计厚度占比。结果表明,该段岩心纹层的单层厚度及分布具有较强的非均一性。每100 mm岩心中纹层累计厚度多数在0~5 mm之间变化,少数处于6~10 mm间(图3b)。纹层密度主要为0~3层/100 mm之间,平均密度为2层/100 mm(图3c)。从统计的岩心上看,黑色油页岩段发育纹层较少,颜色为褐色且厚度薄,厚度多小于3 mm,而在砂质页岩与凝灰质页岩段,在发育大量褐色纹层的同时,还发育少量厚度较大的红色纹层与白色纹层。

综合岩心的随机取样观察及午100、正40等四口井的定量计算(表1),长 7_3 段泥页岩中纹层单层厚度一般分布在0.4~5.0 mm之间,纹地比在5.16%~16.80%之间,发育频率非均一性强。一般来说,随着距离页岩沉积中心的距离增加,褐色纹层的出现频率和厚度增加,相应的,靠近湖盆中心,红色与白色纹层发育频率与厚度增加。Yu等认为纹层在宏观上的展布同岩性与沉积环境的变化具有一定的相关性^[36]。

2.2 微观发育特征

上述对纹层发育的研究,仅是通过在岩心上肉眼



(a)正40, 1456.8~1459.7 m, 页岩中褐色纹层与白色纹层交互发育; (b)高135, 1753.5 m, 黑色页岩内发育多条平直状与微波状白色纹层, 底部见生物介壳; (c)庄151, 1852 m, 发育厚度较大的褐色与黑色弯曲状纹层; (d)正7, 1659.35 m, 顶部白色纹层发育, 中间夹红色平直纹层, 底部白色方解石成纤维状堆积; (e)盐56, 3068 m, 发育白色及褐色透镜体形态纹层

图2 长 7_3 亚段纹层型页岩岩心照片

Fig. 2 Pictures of laminated shale cores in Chang 7_3 sub-member

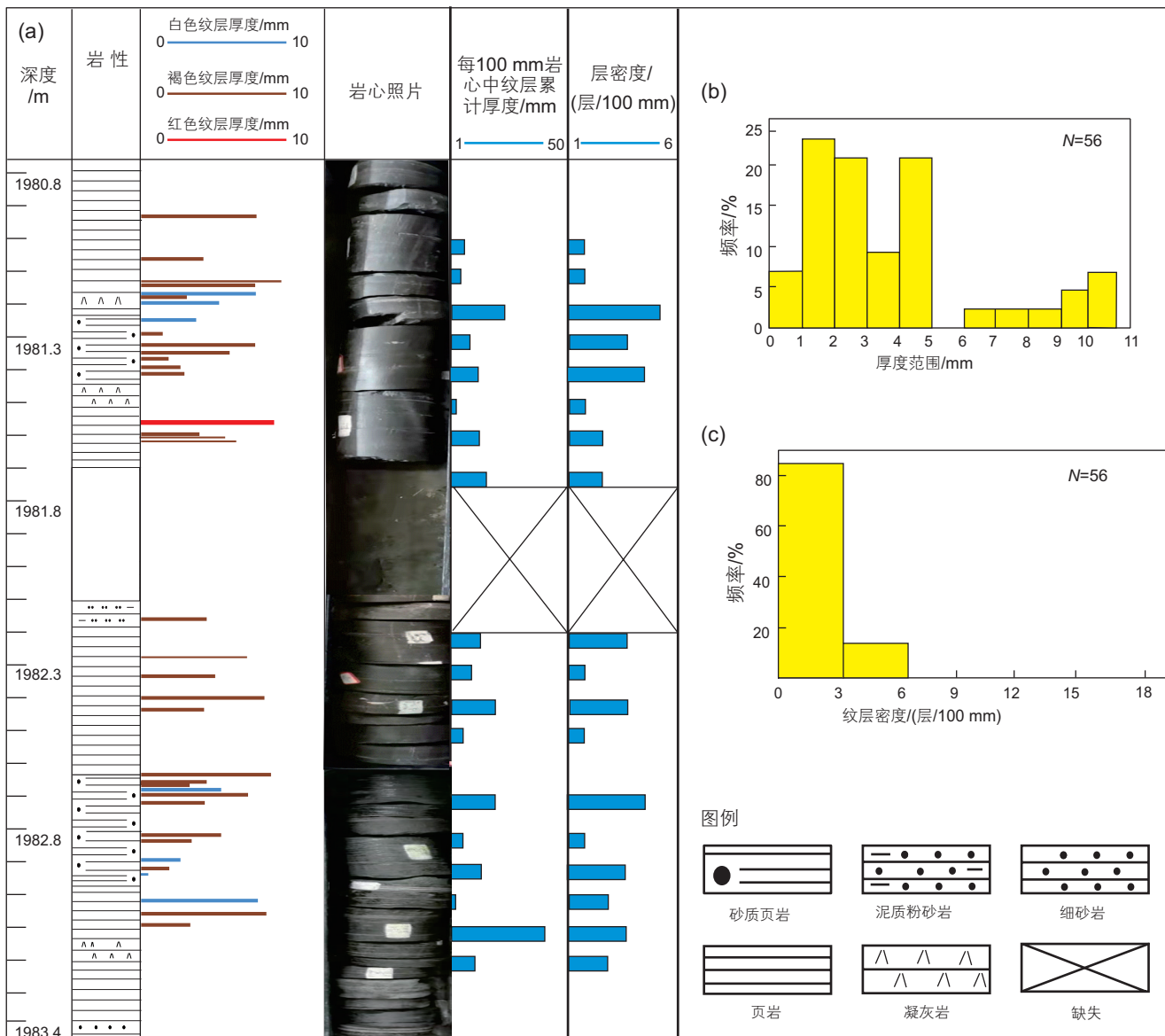


图3 午100井纹层(a)纵向分布、(b)厚度频率与(c)纹层密度频率

Fig. 3 (a) Vertical distribution, (b) thickness frequency and (c) density frequency of laminae in Wu 100 well

表1 定量统计不同井中纹层发育频率

Table 1 Quantitative statistics of laminated development frequency in different wells

| 井名 | 深度/m | 测量岩心长度/mm | 纹层累计厚度/mm | 纹地比/% | 纹层密度/层/100 mm |
|------|---------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| 午100 | 1980.8~1983.4 | 2600 | 134.16 | 5.16 | 2.00 |
| 正40 | 1473.0~1476.0 | 3000 | 342.60 | 11.42 | 4.47 |
| 高135 | 1827.4~1829.8 | 2400 | 403.20 | 16.80 | 6.80 |
| 里211 | 2367.6~2371.2 | 3600 | 385.92 | 10.72 | 4.00 |

的测量, 识别厚度多是大于 0.1 mm 的纹层, 而在显微镜下可以观察到微米级的纹层, 因此选择宏观岩心上纹层特征明显的样品进行薄片分析, 从微观角度对纹层的发育特征进行研究。纹层的沉积构造是解释沉积过程的有效信息, 具有重要的地质意义^[37]。因此本文

通过薄片分析, 依据纹层沉积构造的形态, 确定页岩纹层的微观发育特征。最后将研究区泥页岩的纹层划分为六种微观形态, 即平直型、波纹型、粒序型、透镜体形状、斑状及弱纹层(图4)。前三种为连续型纹层, 具有良好的连续性, 多呈板状与波状, 纹层间平

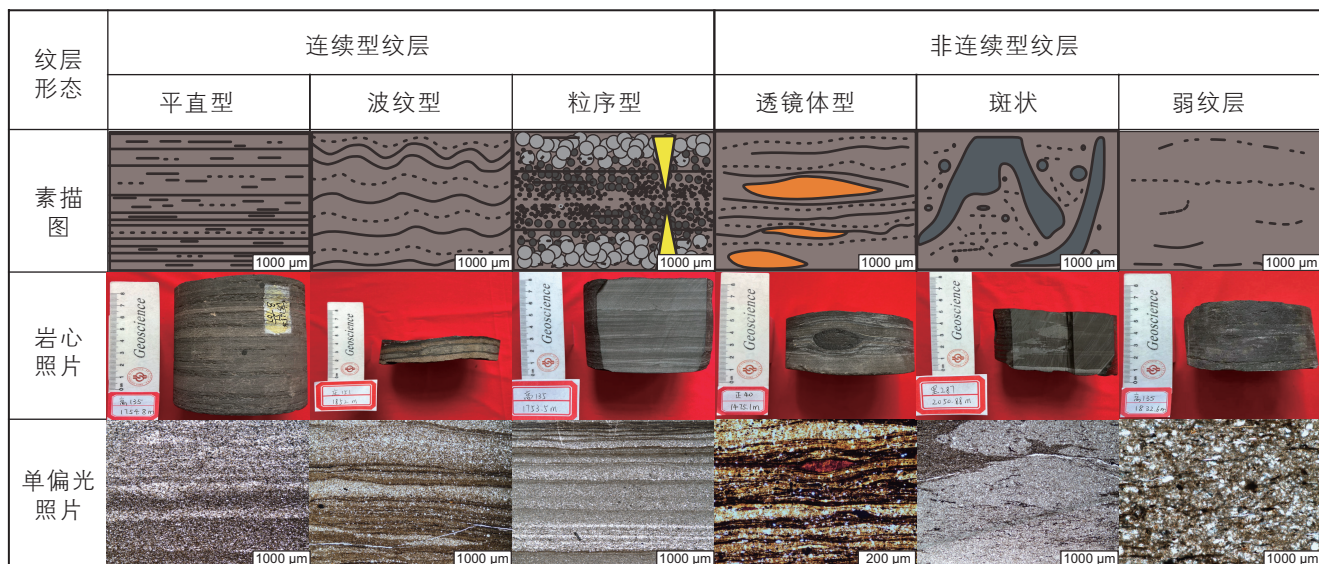


图4 纹层形态特征的素描图、岩心照片及单偏光照片

Fig. 4 Sketch maps, core photos and single polarization photos of the morphological characteristics of laminae

行且边界清晰,镜下亮暗纹层交替出现;后三种为非连续型纹层,纹层连续性较差,纹层间边界模糊、不平行,在镜下可以看到透镜状和不规则形态的矿物组合,其中透镜状与斑状纹层样品在岩心上即可清晰观察到。

2.2.1 平直型纹层

平直型纹层是长 7_3 亚段广泛发育的一种纹层类型。在岩心新鲜面即可清晰观察到明显的平直条纹连续发育,岩性多为黑色页岩或暗色泥岩。镜下观察见亮暗交替,纹层的横向连续性好,厚度变化均一,多为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,其中亮色纹层部分碎屑颗粒较大、基质含量少,碎屑颗粒以石英和长石为主,呈定向排列。暗色纹层部分碎屑颗粒较少,以黏土基质为主,星点状黄铁矿在暗色纹层中顺层展布(图5a)。全岩X射线衍射结果表明,在这六种纹层中,平直状纹层的黏土矿物平均含量最高,黄铁矿和长石的平均含量较高,而石英矿物的平均含量则是最低的(图6)。TOC平均值为 7.2% 。O'Brien等指出,半深海沉降、水柱分离的浊积层沉降和风成悬浮物远洋沉降可能是平直状纹层发育的主要作用机制^[11]。

2.2.2 波纹型纹层

波纹型纹层在长 7_3 亚段发育较少,岩性为粉砂质页岩或暗色泥岩,局部可见微断层发育。在镜下观察,纹层整体表现为连续发育的波浪状,纹层间距离变化波动大,多见波状层理、透镜状组构(图5b)。该类纹层页岩整体矿物组成同平直状纹层类似,其中石英与长石平均含量较平直状纹层页岩略有增加,而黄铁矿

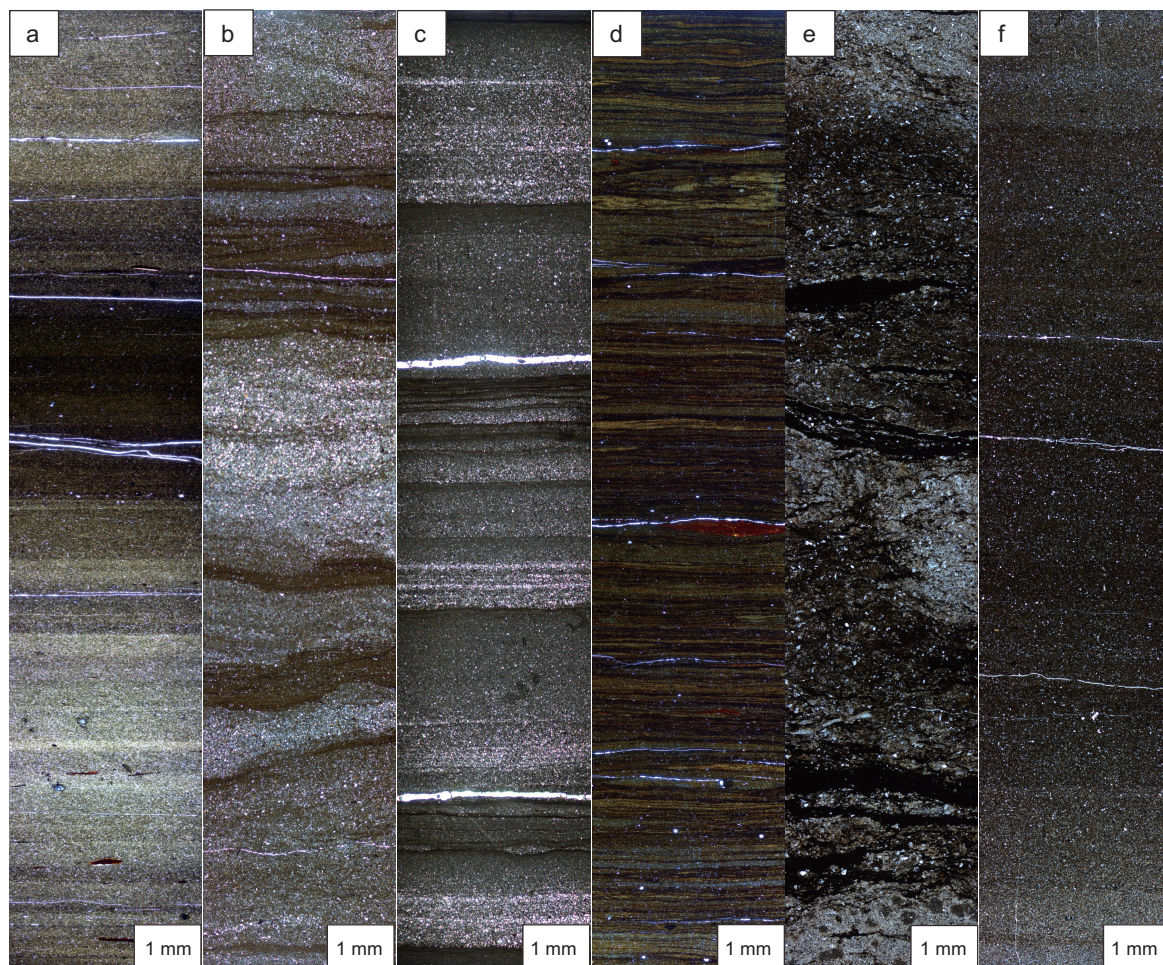
与黏土矿物平均含量则稍有降低(图6)。波状纹层的平均TOC为 6.73% 。有学者对长7段波状纹层页岩研究后认为其沉积于丰富的泥质缓坡带,沉积机理主要为再悬浮作用^[33]。

2.2.3 粒序型纹层

粒序型纹层岩心上可见多条砂泥条带互层分布。镜下观察,形态同平直型纹层类似,但亮暗间厚度变化大,一般亮色条带厚度大于暗色条带,粒度变化突出(图5c)。全岩X射线衍射分析结果表明,对比其他形态纹层页岩,该类页岩中石英与长石矿物的平均含量均为最高,而黄铁矿与黏土矿物平均含量则相对较低(图6)。粒序型纹层页岩的平均TOC是 6% 。王超等认为粒序纹层主要由悬浮搬运的沉积物在搬运和沉积过程中,因水动力条件减弱,造成流水携带能力下降,使得沉积物按粒度大小依次沉积形成,反映水动力条件的渐变^[38]。

2.2.4 透镜体型纹层

透镜体型纹层在长 7_3 亚段发育较多,岩心易污手,宏观上可观察到亮色透镜体被暗色物质包围。在显微镜下观察发现,透镜体在纹层内部轮廓清晰,多定向排列,主要由有机质同黏土结合压实后,表现为扁平状黏土透镜体,同时也可见少量凝灰质成分叠置形成透镜体状。透镜体的纵向宽度不超过 $0.5\ \text{mm}$,水平延伸长度为 $0.001\sim 4\ \text{mm}$ 。黏土透镜体在垂向上相互叠加,形成更大的透镜体形态(图5d)。全岩X射线衍射结果表明,该纹层中黄铁矿平均含量远高于其余5种形态页岩,石英与长石的平均含量相对较低,



(a)高 135, 1843.35 m, 平直型纹层, 亮暗交替变化, 纹层间发育微裂缝; (b)里 287, 2047.6 m, 波纹型纹层, 亮色纹层部位发生错断; (c)城 98, 2087.22 m, 粒序型纹层, 纹层间亮暗交替, 形成正粒序变化; (d)午 100, 1987.6 m, 透镜体型纹层, 黏土透镜体纵向叠置, 底部黄铁矿发育; (e)高 135, 1833.75 m, 斑状纹层, 矿物呈纤维状交叉分布; (f)盐 56, 3057.4 m, 弱纹层, 成层性差, 均质性好

图 5 纹层微观发育特征(大薄片拼接)

Fig. 5 Microscopic development characteristics of laminae(big thin sections joined together)

黏土矿物平均含量则较高(图 6)。TOC 最高可以达到 26.7%, 平均值为 14.62%。刘群等研究后认为, 透镜体型纹层页岩是因火山灰的注入引起了湖盆藻类的勃发, 提高湖泊古生产力, 所以有机质丰度最高^[33]。

2.2.5 斑状纹层

斑状纹层在岩心上见不规则灰白色矿物聚集。在显微镜下观察发现, 纹层之间界限模糊, 成层性差, 形状不规则, 似云朵漂浮在其中, 有的更是一团模糊物嵌入黏土基质中, 整体上看似多块“斑状物”镶嵌(图 5e)。因此将此类纹层页岩命名为斑状纹层。有分析认为斑状物可能是白云石或方解石喷流岩, 是海/湖底喷出的热液同接触的冰冷的湖水或海水发生反应, 直接沉淀而形成的化学结晶的热液沉积岩^[39]。斑状纹层的 TOC 平均值为 2.4%, 相比前四种形态纹层页岩,

其有机质丰度非常低。在矿物组成上, 同其他形态纹层页岩对比, 碳酸盐岩矿物平均含量大幅度增加, 黄铁矿、长石及黏土矿物的平均含量极低, 石英矿物平均含量较高(图 6)。由于多见生物扰动的沉积现象, 认为斑状纹层的沉积环境水动力较强, 还原性较好。

2.2.6 弱纹层

弱纹层页岩主要发育块状构造, 基本不可见明显的沉积特征。在镜下观察, 纹层特征不明显, 纹层横向连续性极差, 延伸长度多小于 1 μm, 纹层间界限模糊(图 5f)。矿物组成上, 在六类页岩中黄铁矿含量最低, 包括辉石等在内的其他矿物含量相对较高, 反映该类岩样的矿物组成更为复杂, 石英、长石及黏土矿物的平均含量同斑状纹层页岩相近, 但均略微增加(图 6)。弱纹层页岩的 TOC 平均值同斑状纹层页岩接

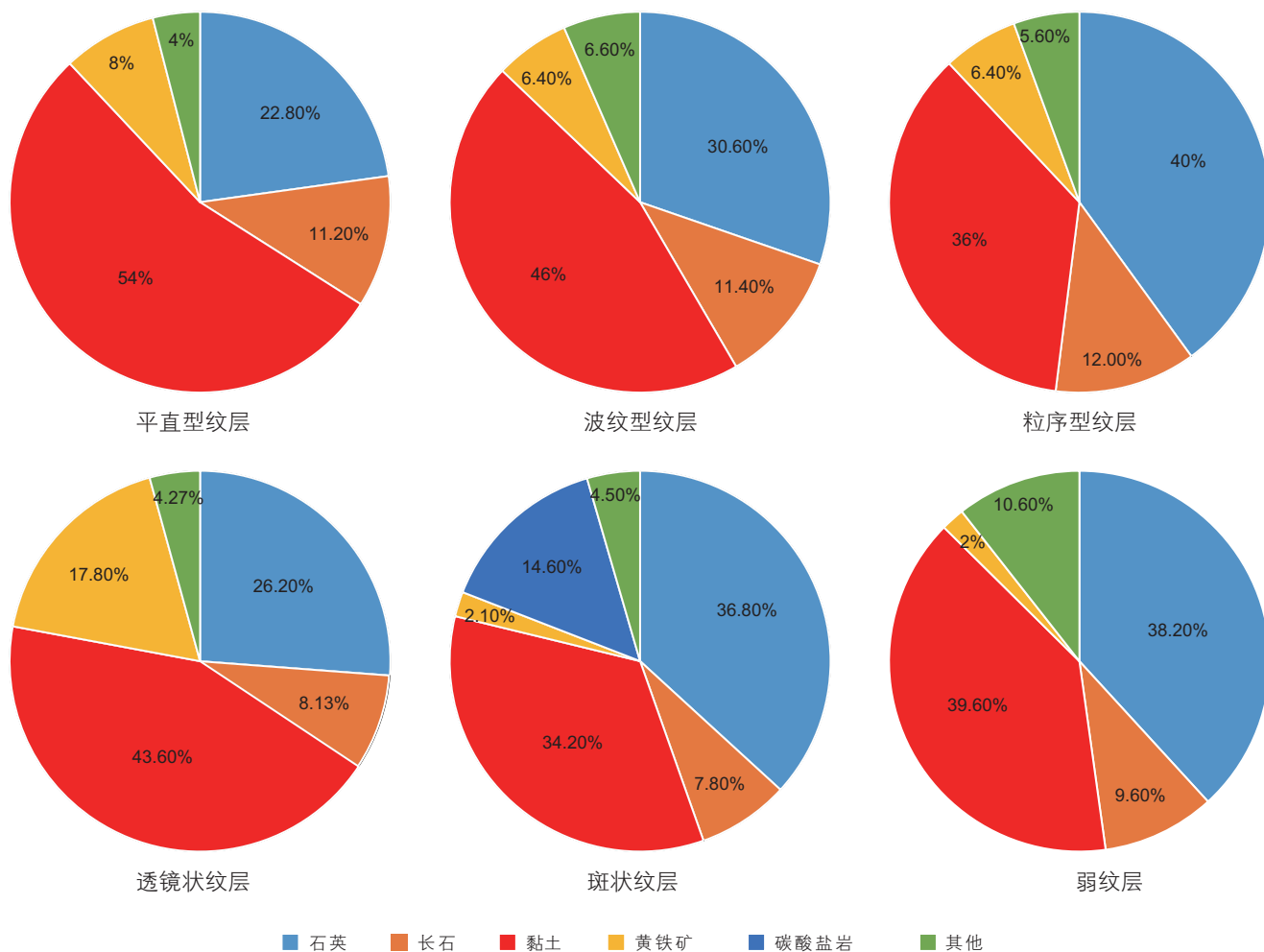


图6 不同形态纹层矿物组成分布

Fig. 6 Mineral composition distribution of different morphologies of laminae

近, 约为 2%。弱纹状页岩表现出沉积环境相对稳定, 沉积间断少见, 多位于浅水区, 有机质处于氧化环境之下, 易遭到稀释作用, 所以有机质最低^[33]。

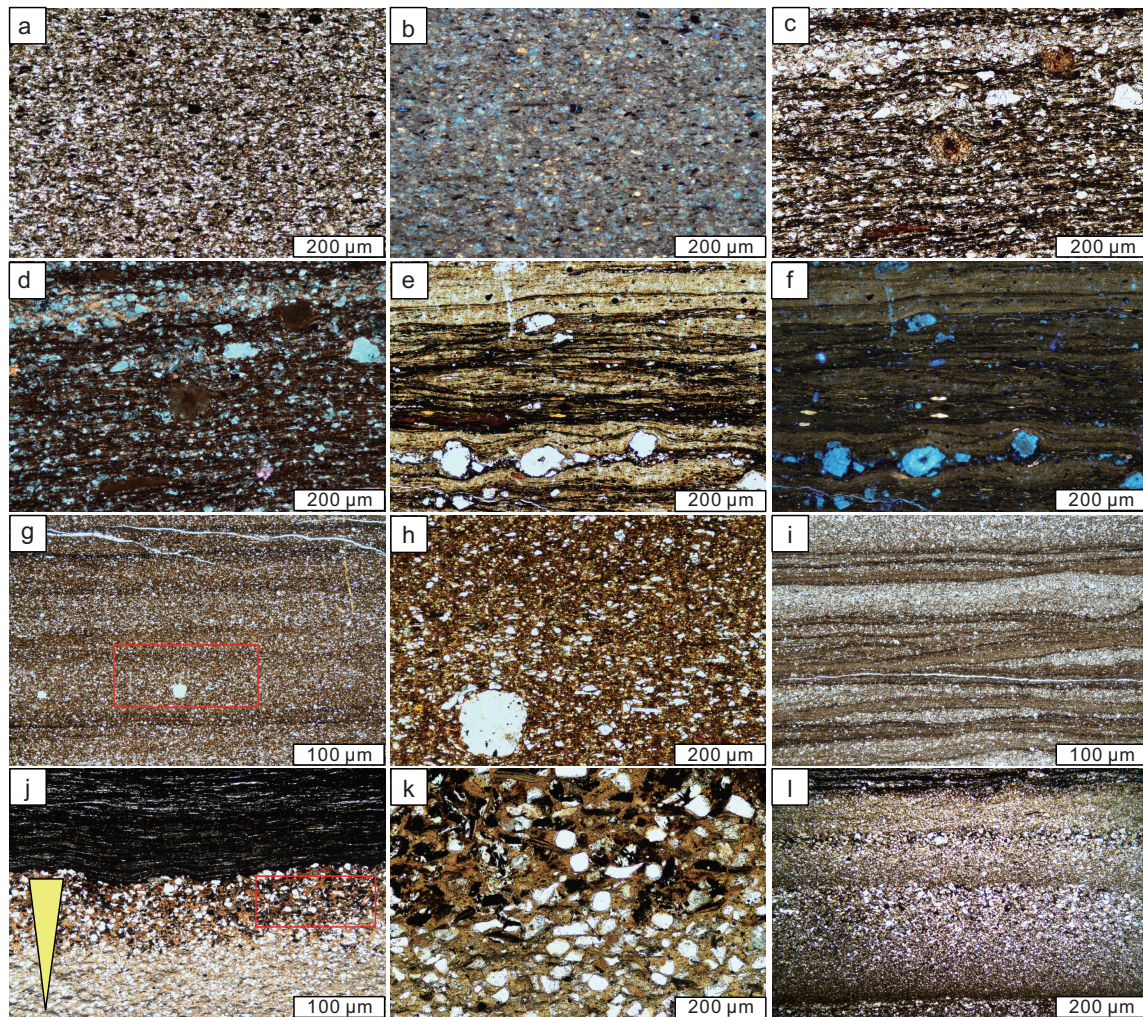
3 纹层及纹层组合类型划分

3.1 纹层类型划分

在前人对纹层类型划分的基础上, 本文主要通过岩心、薄片及光片的观察, 依据纹层内部的微观组成对纹层类型进行划分。其中普通薄片可以区分不同矿物基质的成分差异, 而光片是识别有机质在泥页岩中赋存状态的关键技术, 具有肉眼可见、直观明了的特点^[37]。本文将长₇₃亚段纹层划分为有机质纹层、长英质纹层与凝灰质纹层。

有机质纹层在长₇₃亚段广泛发育, 在岩心上不易观察, 主要呈深黑色。普通薄片镜下观察, 单偏光下主要为深褐色, 正交光下颜色最暗, 形态上则以平直

型和波纹型为主, 也可与黏土基质或凝灰质混合形成透镜体形态。纹层间边界清晰, 连续性较好, 常与亮色的长英质纹层互层分布, 呈现一定的粒序变化。单纹层厚度主要在 100~1000 μm 之间变化, 可见大量的黏土矿物颗粒、黄铁矿及少量碳屑分布其中。纹层内部, 见少量微裂缝发育(图 7a-f)。光片镜下观察发现, 有机质纹层主要由有机物质的丝状体同黏土基质混合形成, 是一种好的生油母质^[7]。依据有机质的赋存方式, 可将有机质纹层划分为分散型有机质纹层、断续型有机质纹层和连续型有机质纹层 3 种。分散型有机质纹层主要是由分散状的藻屑、固体沥青同黏土基质组成。单偏光下藻屑呈絮状零星分布, 蓝色激发光下发黄色荧光, 而固体沥青发褐色荧光, 少量黄铁矿发育。有机质基本不显示纹理(图 7a-b)。断续型有机质纹层主要是分散状和团块状的藻屑混合固体沥青、黏土基质形成, 单偏光下黄铁矿含量增加, 藻屑与黏土质矿物的混合物出现成层的趋势, 但也有零星分布



(a) 里 211, 2370.72 m, 分散型有机质纹层, 有机质与石英颗粒呈絮状零星分布; (b) 图 a 同一视域下的紫外荧光, 藻屑呈黄色荧光零星分布; (c) 里 287, 2050.88 m, 断续型有机质纹层, 见火山晶屑与泥质撕裂屑; (d) 图 c 同一视域下的紫外荧光, 藻屑呈团块状富集; (e) 正 40, 1472.6 m, 连续型有机质纹层, 水平分布的黏土透镜体相互叠置, 有机质纹层夹于黏土基质中呈条带状, 发育火山晶屑; (f) 图 e 同一视域下的紫外荧光, 藻屑呈蓝色层状分布; (g) 高 135, 1814.3 m, 亮色长英质纹层, 石英、长石碎屑颗粒发育, 纹层界面处见微裂缝, 微弱的逆粒序变化; (h) 高 135, 1814.3 m, g 中红框处放大, 发育石英颗粒与分散状有机质; (i) 里 287, 2047.37 m, 灰色长英质纹层发生错断, 与褐色有机质纹层交叉分布; (j) 庄 151, 1852 m, 混合屑凝灰质纹层, 同顶部有机质纹层互层分布, 底部凝灰质纹层的波屑与晶屑混合形成逆粒序; (k) 庄 151, 1852 m, j 中红框处放大, 发育大量石英晶屑与少量弓状波屑; (l) 正 40, 1475.3 m, 凝灰质纹层, 平直状纹层页岩发育两期凝灰质层, 上层以波屑为主, 下层以晶屑为主, 其中 b、d、f 为荧光, 其余为单偏光

图 7 纹层类型划分

Fig. 7 Classification of laminae

的藻屑(图 7c-d)。连续型有机质纹层主要以连续层状藻和固体沥青为主, 藻屑相对较少。层状藻在单偏光下同黏土基质界限明显, 呈黑色条带状连续分布, 条带中混杂少量石英、长石及大量黄铁矿。在蓝色激发光下呈黄褐色、蓝色荧光。有机质与黏土质矿物成层性好, 形成明显的纹层特征(图 7e-f)。统计三类有机质纹层的微量元素、总硫含量和 TOC 分析显示, 发育分散型-断续型-连续型三类有机质纹层的沉积环境还原性与有机质丰度依次增大(图 8)。据此, 有学者

分析认为有机质纹层是在高生物生产力、强还原环境下, 由藻类的大量死亡缓慢沉积形成的^[7,40]。

长英质纹层在长₇段发育相对较少, 岩性主要为粉砂质泥页岩, 从微米级到毫米级均有发育, 而发育厘米级厚度的长英质层状物多形成粉砂岩夹层。岩心上观察长英质纹层与泥岩交互形成亮暗条带, 常见负荷、火焰状等构造。在显微镜下观察长英质纹层, 粉砂质条带富集, 单偏光下呈浅灰色, 正交光下颜色变深, 亮暗分明, 当插入石膏试板, 反射色级别提高。

单纹层厚度多介于 500~1000 μm 之间, 多数处于微米级, 可见微弱的粒序变化。纹层分布连续, 形态上以连续的平直型为主, 少数为断续的波纹状。纹层边界模糊, 边界处易出现变形、错断, 产生顺层微裂缝(图 7g, i), 且裂缝内部见沥青质充填。纹层内部为粉砂级碎屑结构, 粒径较大, 分选为中等-好, 磨圆差, 在压实作用下颗粒紧密接触, 以石英、长石、黏土等陆源碎屑同碳酸盐岩矿物混合形成, 但前者含量明显大于后者, 同时伴有少量分散有机质零星分布(图 7h)。碎屑矿物颗粒边缘溶蚀, 孔隙多分布在碎屑颗粒边缘, 孔隙少, 但连通性好。邓宏文等分析认为陆相湖盆沉积形成的长英质纹层是在供给物充分的情况下, 在温暖湿润的气候中经悬浮物快速沉积形成的^[43]。

凝灰质纹层在长 7₃ 亚段频繁发育。岩心上凝灰质纹层多呈白色、浅黄色及紫红色, 厚度介于 0.5~1 cm, 以条带状连续分布。凝灰质纹层镜下观察, 形态上多为平直型, 横向连续性较差, 少数形成粒序变化或发育透镜体, 可见尖棱角状或鸡骨状火山碎屑不均匀的分布于纹层中。在单偏光下为浅褐色或白色, 单个纹层厚度主要介于 60~500 μm , 少数可以达到毫米级(图 7j-l)。依据凝灰岩的组成, 可将凝灰质纹层依据成分划分为晶屑凝灰质纹层、波屑凝灰岩纹层及混合屑凝灰质纹层三类。晶屑凝灰质纹层指的是晶屑含量

大于 50%, 一般是不同期次的岩浆侵入, 形成石英晶屑与钾钠长石晶屑^[44]。波屑凝灰质纹层指波屑含量大于 50%, 晶屑与岩屑较少。玻屑成分对比晶屑, 形态不规整, 多呈鸡骨状、弓状分布, 在正交光下全消光, 这是同晶屑最主要的区别^[39]。长 7₃ 亚段发育的波屑凝灰质纹层在粒度上更细, 多发育在晶屑凝灰质纹层的上部。混合屑凝灰质纹层指晶屑与波屑含量相近且均小于 50%, 这种类型的凝灰质纹层发育少, 厚度薄, 很少单独存在。三种凝灰质纹层可以单独成层, 但多数是三种相互组成形成凝灰质纹层, 呈现粒度差异, 张文正等认为这反映了同期火山喷发连续沉积的特征^[22]。

3.2 纹层组合划分

纹层组合指的是沉积背景、形态等特征相近的两个或两个以上纹层的集合^[4,15], 其研究的关键属性包含纹层的组成、结构(颗粒粒径)和构造(粒序、连续性等)^[37]。一般认为纹层组合的形成同水流、波浪、气候变化等因素相关^[26]。在对纹层类型划分的基础上, 依据三类纹层在垂向上发育的连续组合规律, 将长 7₃ 亚段泥页岩层系划分为均质泥岩、长英质纹层型页岩与凝灰质纹层型页岩三类纹层组合(图 9)。

均质泥岩岩性多为灰色泥岩或粉砂质泥岩。在单

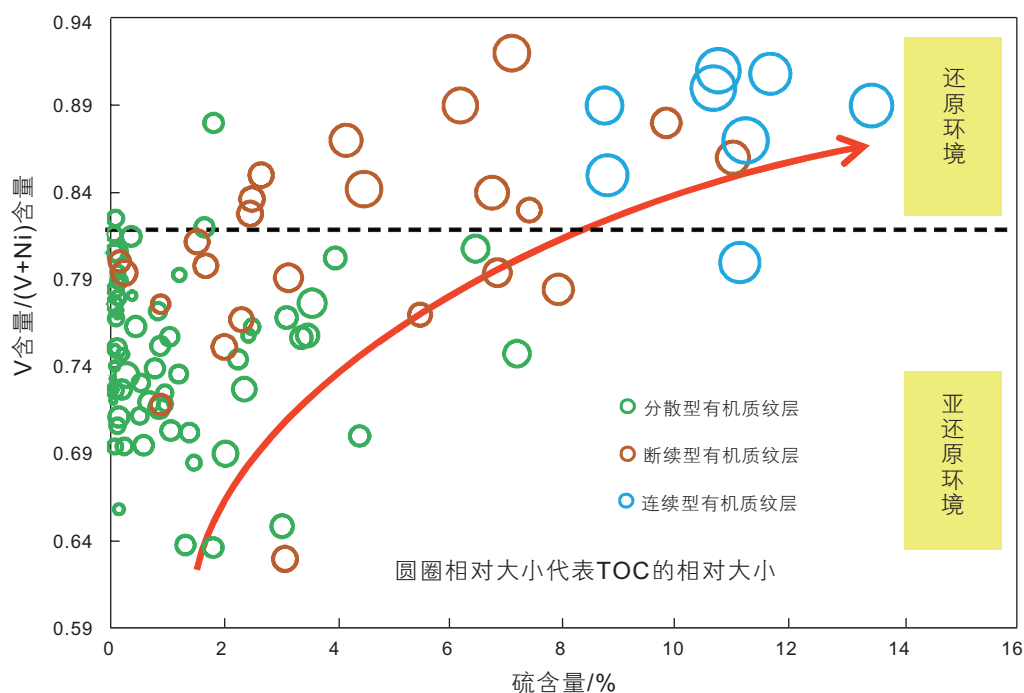
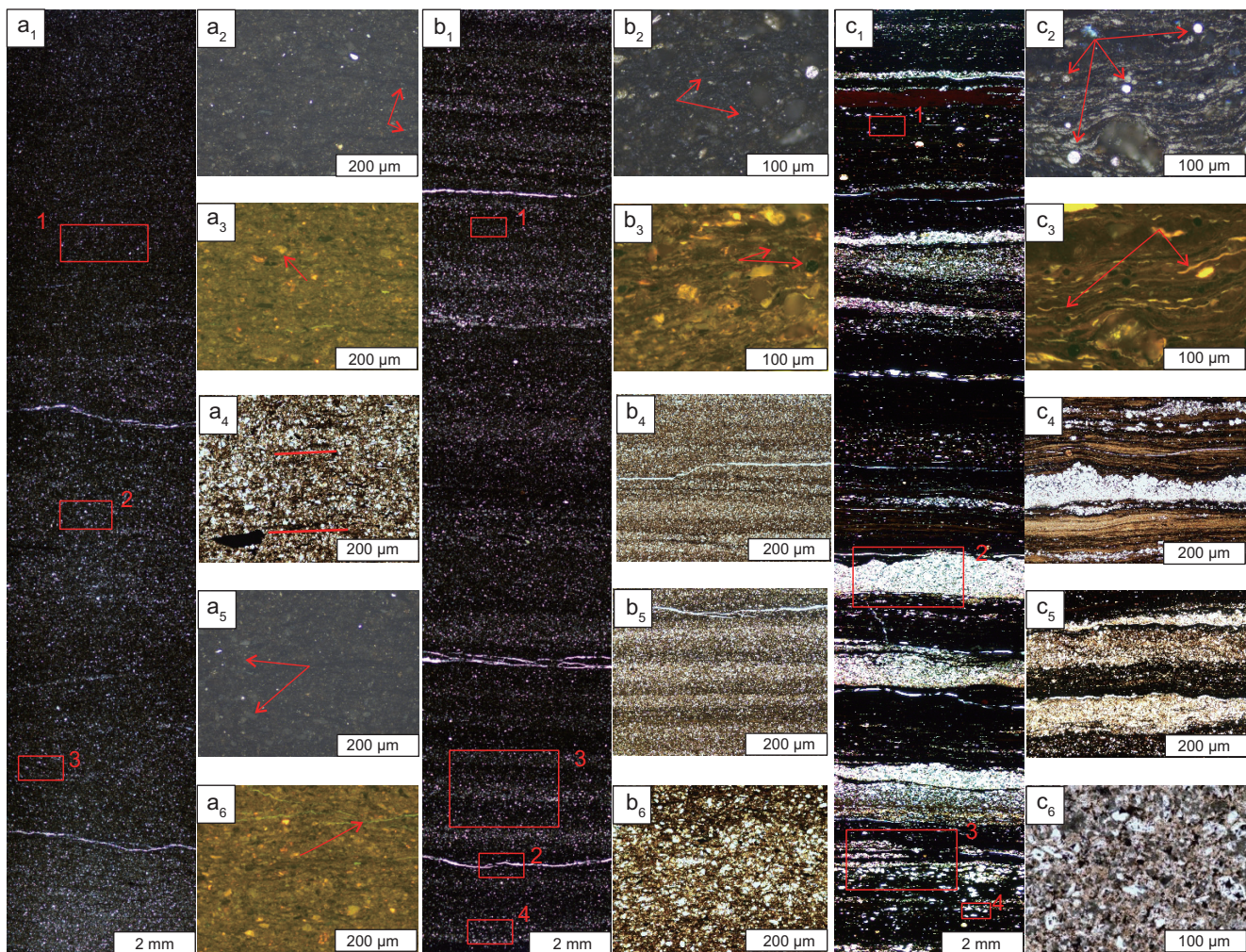


图 8 不同有机质纹层微量元素关系(图中部分数据引自 Yuan, 2020^[41]; Zhang, 2017^[42])

Fig. 8 Relationship between trace elements in different organic matter laminae(part date cited from Yuan, 2020^[41]; Zhang, 2017^[42])



(a) 环 317, 2459.45 m, 均质泥岩。其中 a_1 为单偏光下的大薄片拼接, a_2 为 a_1 中 1 号红框的反射光, 箭头指向丝质体, a_3 为 a_2 对应荧光, 箭头指向分散状藻屑, a_4 为 a_1 中 2 号红框的单偏光, 见石英颗粒与泥质撕裂屑, a_5 为 a_1 中 3 号红框的反射光, 箭头指向固体沥青, a_6 为 a_5 对应荧光, 箭头指向微裂缝中充填的黄色沥青质。(b) 盐 56, 3034.2 m, 平直状长英质纹层型页岩。其中 b_1 为单偏光下的大薄片拼接, 纹层亮暗交替分布, 呈粒序变化, b_2 为 b_1 中 1 号红框的反射光, 箭头指向固体沥青, b_3 为 b_2 对应荧光, 箭头指向发褐色荧光的轻质油, b_4 为 b_1 中 2 号红框的单偏光, 见微裂缝发育, 长英质纹层发生错断, b_5 为 b_1 中 3 号红框的单偏光, 纹层间界面清晰连续, b_6 为 b_1 中 4 号红框的单偏光, 长英质纹层为粉砂级碎屑结构, 分散状有机质与石英颗粒零星分布。(c) 正 40, 1472.6 m, 波状凝灰质纹层型页岩。其中 c_1 为单偏光下的大薄片拼接, 见红色胶凝矿发育, c_2 为 c_1 中 1 号红框的反射光, 箭头指向黄铁矿, c_3 为 c_2 对应荧光, 箭头指向层状藻, c_4 为 c_1 中 2 号红框的单偏光, 黏土透镜体叠置, 火山灰呈透镜状与层状发; c_5 为 c_1 中 3 号红框的单偏光, 纹层间界面清晰连续, c_6 为 c_1 中 4 号红框的单偏光, 凝灰质纹层内部见鸡骨状晶屑与少量波屑

图 9 纹层组合类型划分

Fig. 9 Types of laminate combinations

偏光下为灰黑色, 基本不可见层状构造, 整体为泥质碎屑结构, 分选差, 但压实较强, 主要由黏土矿物基质混合少量粉细砂岩组成, 多见石英颗粒散乱分布(图 9a₁、a₄)。在正交光下颜色加深, 反射光下多零星分布的黄铁矿与固体沥青(图 9a₂、a₅)。有机质以分散状和断续状赋存, 基本不含连续状有机质, 在荧光下表现为分散与团块状藻屑(图 9a₃、a₆)。

长英质纹层型页岩是有机质纹层与长英质纹层组

合形成, 岩性为黑色页岩或暗色泥岩。在单偏光下表现为亮色长英质纹层与暗色有机质纹层频繁互层分布, 组合的厚度约为 0.05~3.00 mm, 纹层间界限清晰, 微裂缝发育, 且连续性较好, 形成粒序变化(图 9b₁、b₅)。长英质纹层厚度一般介于 0.1~3.0 mm 之间, 纹层内部石英颗粒发育, 分选较好, 易发生错断、变形, 荧光下内部含油性较好(图 9b₄、b₆)。有机质纹层厚度一般为 0.01~1.00 mm, 长英质纹层与有机质纹层的厚

度比为3~10,有机质以分散状和断续状为主,反射光下见黄铁矿与固体沥青,荧光下见轻质油(图9b₂、b₃)。

凝灰质纹层型页岩是有机质纹层与凝灰质纹层组合形成,岩性主要为黑色页岩或凝灰质页岩。在单偏光下观察,亮暗变化较长英质纹层型页岩更明显,黑色富有机质纹层与灰白色或灰褐色凝灰质纹层规律性的交替沉积,纹层组合厚度较大,介于0.3~5.0 mm之间,纹层间界面多波状起伏,但连续性较好(图9c₁、c₄、c₅)。凝灰质纹层厚度为0.02~2.00 mm,纹层内部发育晶屑与波屑火山灰成分,黏土基质与凝灰质团块多以透镜状形式赋存,是在长7₃火山强烈活动时期形成的^[45](图9c₆)。有机质纹层以连续型为主,厚度较大,一般为1~4 mm,凝灰质纹层与有机质纹层的厚度比为4~16。在反射光下见大量黄铁矿发育,荧光下多层状藻分布(图9c₂、c₃)。

4 单井纹层纵向演化

基于纹层及纹层组合的划分,为了明确页岩纹层纵向发育特征及其对页岩储层和含油性的影响,本次研究对高135井长7₃亚段进行了连续取样,采样间距为1~2 m,对其中的部分纹层样品进行了薄片及光片分析、总有机碳测定及全岩XRD矿物分析实验。最后结合薄片全尺度拼接,统计样品中不同纹层的厚度占比,对纹层及纹层组合的纵向展布规律进行精细分析(图10)。

高135井长7₃亚段长40 m,整段脆性矿物含量为12.00%~57.35%,平均值为30.78%;黏土矿物含量变化幅度较大,介于5.84%~60.00%之间,平均值为27.23%;TOC分布在0.94%~17.21%之间,平均值为6.64%;热解参数S₁代表岩石中残留烃的含量,一般用来表征含油性^[46]。统计发现,S₁分布范围为1.28~7.00 mg/g,平均值为3.22 mg/g;对于可动性的评价,目前多采用含油饱和度指数,即为“S₁/TOC×100”,简称为OSI,单位为mg/g。可依据OSI值大小对页岩含油级别进行划分^[3]。统计发现,OSI分布在24.68~148.17 mg/g,分布范围广,平均值为53.59 mg/g。对于纹层的纵向展布,三种纹层都发育,其中有机质纹层整段分布稳定,平均厚度占比可以达到50%,长英质纹层由浅至深发育频率先增后减,而凝灰质纹层发育较少,仅在长7₃顶部和底部发育。三类纹层的厚度占比不同,造成页岩层系具有明显的非均质性。对此依据纹层的发育频率的不同,将长7₃亚

段分为四段分别分析。其中1813~1822 m段,纹层发育频率低,形态以弱纹层及平直型为主,主要发育有机质纹层与长英质纹层,基本不发育凝灰质纹层,有机质纹层占比达到75%,长英质纹层为25%,对应的纹层组合为70%的均质泥岩与30%的长英质纹层型页岩。这一段的平均TOC为6.56%,脆性矿物平均含量为30%,黏土矿物平均含量为29.54%,OSI主要介于28.92~65.30 mg/g之间,多数处于中含油-高含油级别。但其中的两块样品由于极低的TOC,使得OSI值可以达到100 mg/g。在1822~1833 m段,纹层发育频率较低,形态以平直型与波纹型为主,主要发育有机质纹层与长英质纹层,分别占55%和35%,同时发育约10%的凝灰质纹层,对应的纹层组合为占60%的均质泥岩、30%长英质纹层型页岩及10%的凝灰质纹层型页岩。本段TOC的平均值可以达到7.34%,脆性矿物平均含量为31.93%,黏土矿物平均含量为27.1%,OSI平均值为53.83 mg/g,整体处于高含油级别。在1833~1843 m段,纹层发育频率较高,主要为透镜体型,其中有机质纹层占50%,长英质纹层占30%,凝灰质纹层占20%,对应包括占45%的长英质纹层型页岩、30%的凝灰质纹层型页岩及25%的均质泥岩。本段TOC的平均值高达10.27%,脆性矿物平均含量为31.76%,黏土矿物平均含量为23.42%,OSI值为29.19~78.76 mg/g,平均值为41.1 mg/g,含油级别多数显示为低含油-中含油。在1843~1853 m段,纹层发育频率较高,以弱纹层和粒序型为主,其中有机质纹层占40%,长英质纹层占30%,凝灰质纹层占30%,其中长英质、凝灰质及均质三类页(泥)岩均有发育,占比分别为45%、40%和15%。本段因有机质纹层发育较少,TOC极低,平均值仅为2.7%,但OSI平均值可以达到90 mg/g,多数样品含油级别接近页岩油开发潜力。脆性矿物平均值为28.96%,黏土矿物平均值为26.47%。

综合长7₃整段来看,脆性矿物含量同纹层发育频率和纹层厚度占比之间的变化规律不明显,不同纹层发育段的平均值均接近30%,但黏土矿物含量与不同纹层厚度占比呈规律性变化。当长英质纹层与凝灰质纹层发育较好,而有机质纹层发育较差时,黏土矿物含量相对较低;同样,当页岩的纹层组合主要为均质泥岩和凝灰质纹层型页岩时,黏土矿物含量相对较高。TOC与OSI的变化同纹层发育也有一定的关联,其中透镜状纹层的TOC高,平直与波纹型TOC较高,而弱纹层的TOC很少大于3%,符合前文的研究结果;有机质纹层发育层段平均TOC高于长英质纹层与凝灰质

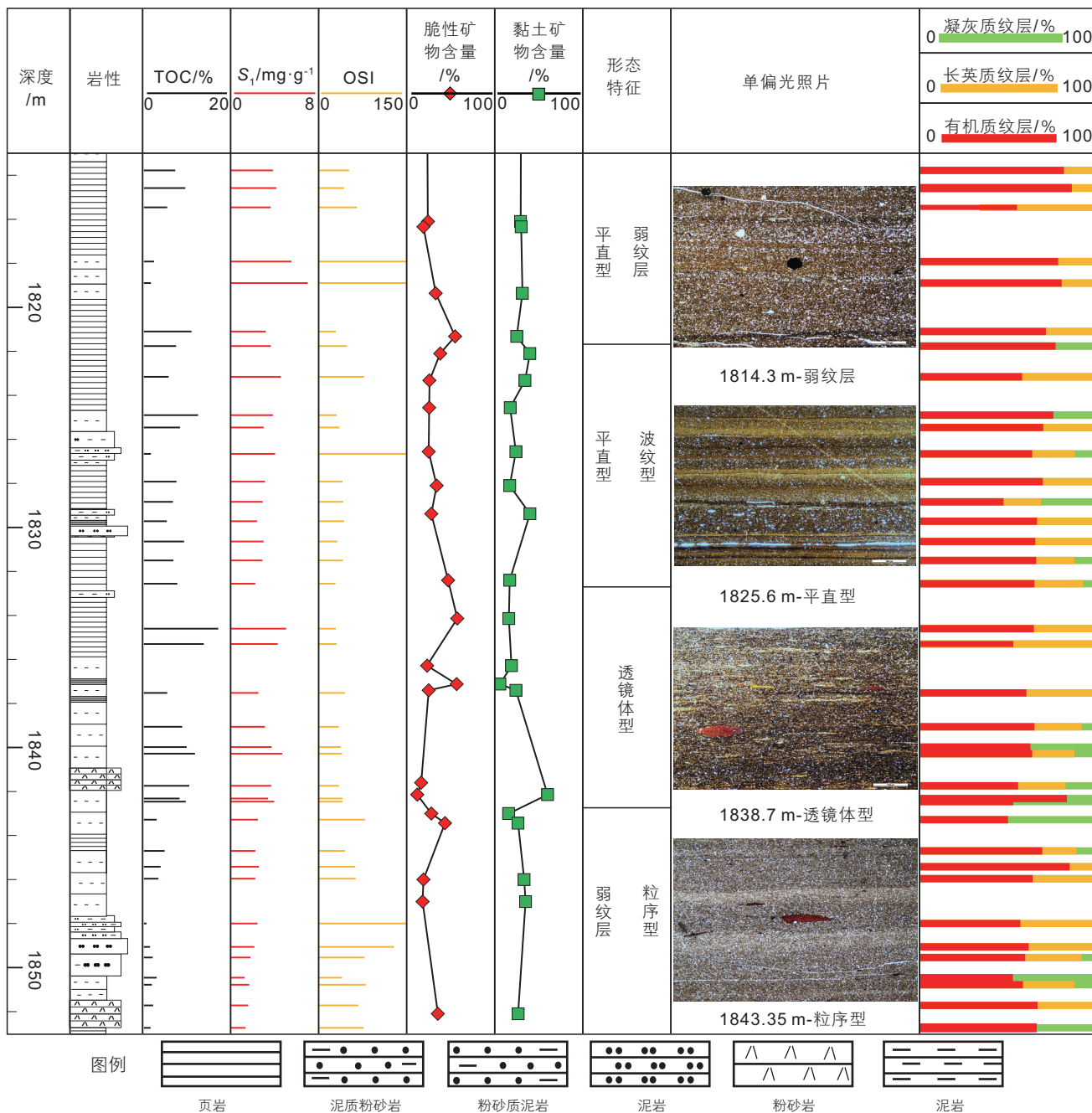


图 10 高 135 井长₇亚段纹层纵向演化

Fig. 10 Longitudinal evolution of laminae in the Chang₇₃ sub-member of Gao 135 well

纹层发育层段。长英质纹层发育频率高的层段，OSI 的平均值相对较高，甚至少数样品大于 100 mg/g，可以达到页岩油的潜力，而有机质纹层与凝灰质纹层发育段，OSI 多数小于 75 mg/g，一般属于中含油-高含油级别。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地三叠系延长组长₇亚段发育

不同颜色的细粒沉积纹层，在岩心上宏观观察纹层单层厚度一般分布在 0.4~5.0 mm 之间，纹地比在 5.16%~16.8% 之间，发育频率非均一性强，在宏观上的展布同岩性与沉积环境具有一定的相关性。

(2)微观上纹层发育平直型、波纹型、粒序型三种连续性好的沉积构造及透镜体型、斑状、弱纹层三类连续性差的沉积构造。不同形态纹层具有不同的有机质特征、矿物组成与沉积环境。其中透镜体型纹层的有机质丰度最高，平均为 14.62%，具有极高的黄铁矿

含量。

(3)依据纹层的矿物组成,将纹层划分为有机质纹层、长英质纹层及凝灰质纹层。其中按照有机质的不同赋存状态,可以形成分散状、断续状与连续状三类有机质纹层;依据纹层之间的组合规律,划分为均质泥岩、长英质纹层型页岩与凝灰质纹层型页岩三类纹

层组合。

(4)利用连续取样,分析高135井单井纹层纵向演化特征。发现单井上纹层分布具有非均质性,当有机质纹层发育厚度占比较大时,黏土矿物含量与TOC平均值较大,而长英质纹层厚度占比较大时,OSI的平均值较大。

参考文献

- [1] 杜金虎,胡素云,庞正炼,等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(05): 560-568. [DU J H, HU S Y, PANG Z L, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration in China, 2019, 24(05): 560-568.]
- [2] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(01): 1-10. [ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Oil Exploration and Development, 2020, 47(01): 1-10.]
- [3] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—Shale-oil resource systems[J]. AAPG Bulletin 2012, 10: 1332-1447.
- [4] 胡月,陈雷,周昊,等. 海相页岩纹层特征及其对页岩储层发育的影响——以川南长宁地区龙马溪组为例[J]. 断块油气田, 2021, 28(02): 145-150. [HU Y, CHEN L, ZHOU H, et al. Lamina characteristics of marine shale and its influence on shale reservoir development: A case study of Longmaxi formation, Changning area, south Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(02): 145-150.]
- [5] 华柑霖,吴松涛,邱振,等. 页岩纹层结构分类与储集性能差异——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(02): 281-296. [HUA G L, WU S T, QIU Z, et al. Classification of shale lamina structure and difference of reservoir performance—Take the shale of Longmaxi formation in Sichuan Basin as an example [J]. Journal of Sedimentation, 2021, 39(02): 281-296.]
- [6] YANG B W, XIONG M, CHEN L, et al. Laminae growth characteristic within the lower silurian Longmaxi marineshale in the southeast Sichuan Basin[J]. Advances in Geosciences, 2020, 10(07): 555-562.
- [7] 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(05): 598-607. [LIU B, LYU Y F, MENG Y L, 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]. Oil Exploration and Development, 2015, 42(05): 598-607.]
- [8] 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, 22(31): 49-76.
- [9] 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(03): 408-417. [LIU G H, HUANG Z L, JIANG Z X, et al. The characteristics and reservoir significance of lamina in shale form Yanchang formation of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geosciences, 2015, 26(03): 408-417.]
- [10] 王冠民,钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(01): 43-48. [WANG G M, ZHONG J H. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23(01): 43-48.]
- [11] O'BRIEN N R, KEMP A E S. Shale lamination and sedimentary processes[J]. Geological Society Special Publications, 1996, 116(1): 23-36.
- [12] 李婷婷,朱如凯,白斌,等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(01): 38-47. [LI T T, ZHU R G, BAI B, et al. Characteristics and research significance of fine lacustrine sedimentary rock laminations of Xiagou formation in Qingxi depression of Jiuquan Basin [J]. Petroleum Exploration in China, 2015, 20(01): 38-47.]
- [13] 王冠民. 济阳拗陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(03): 666-671. [WANG G M. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang depression [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(03): 666-671.]
- [14] 陈昀霏. 鄂尔多斯盆地长7细粒沉积微环境研究[D]. 武汉: 长江大学, 2018. [CHEN Y F. Research on fine-grained sedimentary microenvironment of Chang 7 in Ordos Basin [D]. Wuhan: Yangtze University, 2018]
- [15] 林长木,王红岩,梁萍萍,等. 川南地区五峰组—龙马溪组黑色页岩纹层特征及其储集意义[J]. 地层学杂志, 2019, 43(02): 133-140. [LIN C M, WANG H Y, LIANG P P, et al. Characteristics of laminae in black shale and its reservoir significance: A case study of

- Wufeng Longmaxi formation in Changning-Shuanghe section [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(02): 133–140.]
- [16] 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(04): 661–687.
- [17] 勇朋林. 不同构造背景下细粒纹层多尺度划分与细粒岩相成因模式[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018. [YONG P L. Multi-scale fine-grained lithosphere division and patterns of fine-grained facies in different tectonic setting [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.]
- [18] LI M Y, WU S T, HU S Y, et al. Lamination texture and its effects on reservoir and geochemical properties of the palaeogene Kongdian formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Minerals*, 2021, 11(12): 1360–1374.
- [19] CHEN K F, LIU X P, LIU J, et al. Lithofacies and pore characterization of continental shale in the second member of the Kongdian formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 154–166.
- [20] XI K L, LI K, CAO Y C, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1342–1353.
- [21] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. *沉积学报*, 2020, 38(01): 1–29. [QIU Z, ZOU C N. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. *Journal of Sedimentation*: 2020, 38(01): 1–29.]
- [22] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. *地球化学*, 2008, 37(01): 59–64. [ZHANG W Z, YANG H, YANG Y H, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yangchang formation Chang7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2008, 37(01): 59–64.]
- [23] WANG C, ZHANG B Q, HU Q H, et al. Laminae characteristics and influence on shale gas reservoir quality of lower Silurian Longmaxi formation in the Jiaoshiba area of the Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 839–851.
- [24] INGRAM B R L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1964, 86: 937–938
- [25] 李维, 朱筱敏, 段宏亮, 等. 苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组细粒沉积岩纹层特征与成因[J]. *古地理学报*, 2020, 22(03): 469–482. [LI W, ZHU X M, DUAN H L, et al. Characteristics and forming mechanism of laminae fine-grained sedimentary rock of the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu sags, Subei Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(03): 469–482.]
- [26] LAZAR O R, BOHACS K M, MACQUAKER J H S, et al. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: Nomenclature and description guidelines[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(3): 230–246.
- [27] ZHAO K, DU X B, LU Y C, et al. Are light-dark coupled laminae in lacustrine shale seasonally controlled? A case study using astronomical tuning from 42.2 to 45.4 Ma in the Dongying depression, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 528: 35–49.
- [28] 俞雨溪. 鄂尔多斯盆地延长组页岩内粉砂质纹层孔隙结构和物性特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. [YU Y X. Pore-structure and petrophysical properties of silt laminae in lacustrine gas shale: Example from the Yanchang Group, Ordos Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum(Hua Dong), 2013.]
- [29] 俞雨溪, 罗晓容, 雷裕红, 等. 陆相页岩孔隙结构特征研究——以鄂尔多斯盆地延长组页岩为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(04): 716–726. [YU Y X, LUO X R, LEI Y H, et al. Characterization of lacustrine shale pores structure: Take Yanchang formation of Upper Triassic in Ordos Basin as an example [J]. *Natural Gas Geosciences*, 2016, 27(04): 716–726.]
- [30] 王香增, 张丽霞, 高潮. 鄂尔多斯盆地寺湾地区延长组页岩气储层非均质性特征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(01): 134–145. [WANG X Z, ZHANG L X, GAO C, et al. The heterogeneity of shale gas reservoir in the Yangchang formation, Xiasiwan area, Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(01): 134–145.]
- [31] 师良, 王香增, 范柏江, 等. 鄂尔多斯盆地延长组砂质纹层发育特征与油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(03): 522–530. [SHI L, WANG X Z, FAN B J, et al. Characteristics of sandy lamination and its hydrocarbon accumulation, Yanchang formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology* 2018, 39(03): 522–530.]
- [32] 杨潇, 姜呈霞, 孙兵华, 等. 砂质纹层的发育特征及对页岩储层物性的影响——以鄂尔多斯盆地南部中生界延长组为例[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(02): 18–23. [YANG X, JIANG C F, SUN B H, et al. The sandy laminar characteristics and its effect on reservoir property of shale: A case study from the Upper Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. *Journal of Yanan University(Natural Science Edition)*, 2015, 34(02): 18–23.]
- [33] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨[J]. *沉积学报*, 2014, 32(06): 1016–1025. [LIU Q, YUAN X J, LIN S H, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its' depositional environment [J]. *Journal of Sedimentation*, 2014, 32(06): 1016–1025.]
- [34] 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(05): 845–854. [CEHGN M, LUO X R, LEI Y H, et al. The distribution, fractal characteristic and thickness estimation of silty laminae and beds in Zhangjiatan shale, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geosciences*, 2015, 26(05): 845–854.]
- [35] 程涌, 聂琪, 刘聪, 等. 昆明地区筇竹寺页岩粉砂质夹层/纹层特征[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2019, 35(04): 29–35.

- [CHENG Y, NIE Q, LIU C, et al. Silty interlayer / laminae characteristic of Qiongzhusi Formation shale in Kunming area [J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2019, 35(04): 29–35.]
- [36] YU Y X, LUO X R, LEI Y H, et al. Characterization of lacustrine shale pore structure: The Upper-Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2016, 1(4): 299–308.
- [37] 施振生, 邱振, 董大忠, 等. 四川盆地巫溪 2 井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(02): 339–348. [SHI Z S, QIU Z, DONG D Z, et al. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin[J]. Oil Exploration and Development, 2018, 45(02): 339–348.]
- [38] 王超. 焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩纹层发育特征及其储集意义[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 972–982. [WANG C. Shale lamination and its influence on shale reservoir quality of Wufeng formation-Longmaxi formation in Jiaoshiba area [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 972–982.]
- [39] 尤继元. 鄂尔多斯盆地南缘三叠系延长组长 7 喷积岩特征及其与烃源岩关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2020. [YOU J Y. Study On The characteristics of hydrothermal-exhalative sedimentary rocks (HESR) and its relationship with source rocks from Chang 7 Section of Triassic Yanchang Formation in the southern margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.]
- [40] 孙善勇. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段细粒沉积岩岩相及其发育特征[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017. [SUN S Y. The lithofacies and its development characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Es3x– Es4s sub member of Dongying Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum(Hua Dong), 2017.]
- [41] YUAN W, LIU G D, ZHOU X X, et al. Palaeoproductivity and organic matter accumulation during the deposition of the Chang 7 organic - rich shale of the Upper Triassic Yanchang formation, Ordos Basin, China[J]. Geological Journal, 2020, 55(4): 3139–3156.
- [42] ZHANG W Z, YANG W W, XIE L Q. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, central China[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 183: 38–51.
- [43] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(03): 1–21. [DENG H W, QIAN K. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. Journal of Sedimentation: 1990, 8(03): 1–21.]
- [44] LI Q, LU H, LI J S, et al. Characteristics and formation mechanism of the tight tuff reservoirs of the Upper Triassic Chang 7 member in the southern Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 139: 105625.
- [45] 高璞, 高纬, 姚志刚. 鄂尔多斯盆地延长组钾质斑脱岩地球化学特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(01): 8–13. [GAO P, GAO W, YAO Z G, et al. Geochemical characteristics of K-bentonite in Yanchang formation of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2017, 32(01): 8–13.]
- [46] 慕尚超. 马朗凹陷芦草沟组泥页岩孔隙结构表征及其含油性评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2021. [MU S C. Characterization of the pore structure of mud shales of the Luchaogou Formation in the Malang Depression and evaluation of their oil content [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.]

(编辑 付娟娟)