

海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义

——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例

施振生¹,赵圣贤²,周天琪¹,孙莎莎¹,袁渊³,张成林²,李博²,祁灵¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院,四川成都 610051;

3. 中国石油浙江油田分公司,浙江杭州 310023)

摘要:页岩发育多种成因类型水平层理,不同类型水平层理渗透性存在差异。综合岩心观察、大薄片全直径成像和氩离子抛光片扫描电镜分析发现,川南地区古生界五峰组-龙马溪组含气页岩发育递变型、砂-泥递变型、砂-泥互层型和书页型4种水平层理。递变型水平层理由多个粉砂层水平叠置而成,粉砂和泥混杂堆积,粒序发育。砂-泥递变型水平层理中粉砂纹层和泥纹层水平互层,粉砂纹层呈颗粒支撑结构,整体正递变,其底部为突变界面,顶部与上覆泥纹层渐变接触。砂-泥互层型水平层理由粉砂纹层和泥纹层水平互层构成,层和纹层界面均突变接触,粒序不发育。书页型水平层理由极薄层状泥纹层构成,发育微弱的正粒序。4种水平层理具有不同的成因机制。递变型和砂-泥递变型水平层理均为相对低能的泥质浊流成因,递变型水平层理形成的水动力更弱;砂-泥互层型水平层理为陆棚相等深流成因;书页型水平层理为远洋悬浮沉降成因。水平层理类型直接影响页岩渗透性。书页型水平层理页岩富含有机质和有机孔,页岩渗透性最好;砂-泥互层型水平层理页岩颗粒分选性较好,页岩渗透性次之;递变型和砂-泥递变型水平层理页岩颗粒分选性差、有机质含量低,渗透性最差。

关键词:浊流沉积;远洋沉积;等深流沉积;水平层理;五峰组-龙马溪组;古生界;川南地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China

SHI Zhensheng¹, ZHAO Shengxian², ZHOU Tianqi¹, SUN Shasha¹, YUAN Yuan³, ZHANG Chenglin², LI Bo², QI Ling¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Shale Gas Research Institute, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Shale has horizontal bedding of diverse origins in differential permeability. An integrated analysis of core data, full-diameter images of enlarged thin section and scanning electron microscope (SEM) images of argon-ion-milled samples, shows that the gas-bearing Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin develops four types of horizontal bedding, that is, grading type composed of claystone, grading type composed of siltstone and claystone, alternating siltstone and claystone type, and page type. The grading type of claystone constitutes the multi-layer superimposed siltstones in parallel, with siltstone and claystone depositing in graded bedding. The grading type composed of siltstone and claystone is composed of parallelly alternating silty and clayey beds, where the silty beds mainly in clast-supported texture, has abrupt boundary at the bottom and gradual contact with the clayey bed on top, featuring normal grading as a whole. The alternating siltstone and claystone type features abrupt contact between both beds and lamina with no grading. The page type constitutes parallel bedding of very thin clayey lamina with weakly normal grading. The four types of horizontal bedding are of different genesis. The grading type of claystone and grading type of siltstone and

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-06-30。

第一作者简介:施振生(1976—),男,博士、高级工程师,细粒储层地质学。E-mail:shizs69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技管理部“十四五”科技重大专项(2021DJ1901)。

claystone are of relatively low-energy turbidite origin, with the former derived from even weaker hydrodynamic conditions; the alternating siltstone and claystone is of contourite origin such as shelf facies; and the page type is of pelagic origin from suspended sediment deposition. The horizontal bedding serves to directly affect shale permeability. The page type is characterized by the abundance of organic matter and organic pores, ranking top in permeability; the alternating siltstone and claystone type takes the second place in permeability with better sorting; while the two grading types come at last in permeability with poor sorting and low organic matter content.

Key words: turbidites, pelagic sediments, contourites, horizontal bedding, Wufeng-Longmaxi Formations, Paleozoic, southern Sichuan Basin

引用格式:施振生,赵圣贤,周天琪,等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1499-1514. DOI: 10. 11743/ogg20230613.

SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1499-1514. DOI: 10. 11743/ogg20230613.

黑色页岩发育多种类型层理,包括块状层理、小型交错层理、透镜状层理、韵律层理和年纹层、递变层理、水平层理等^[1],其中,水平层理分布最为广泛。水平层理是指构成层理的层和纹层呈直线状互相平行,纹层界面平行于层面的一种层理类型^[2]。水平层理多在细粒的粉砂和泥质沉积物中出现,层理的显现是由于进入沉积物中的物质发生变化所致,如粒度变化、不透明矿物的分布、云母片和炭质碎片的顺层排列等。

水平层理可形成于多种沉积环境。在闭塞海湾^[2]、潟湖、陆棚^[3]、斜坡和深水盆地等^[4-6]等水动力条件比较稳定的环境中,细粒物质可从悬浮物或溶液中沉淀下来,从而形成水平层理(如年纹层)^[6-8]。浊流沉积中,水平层理也广泛分布,如鲍马序列的 T_0 段和 T_{E-1} 段^[9](或Stow和Shanmugam序列的 T_3 和 T_4 段^[10])。 T_0 段厚度约几厘米^[11-12]或缺失^[13],由泥质粉砂和粉砂质泥组成^[14],常发育断续状平行纹层; T_{E-1} 段通常厚10~25 cm,由薄层的粉砂纹层和泥纹层组成,粉砂纹层发育正粒序^[15-16]。水平层理也可能为等深流成因^[17-21],在海盆中的外陆棚、斜坡和深水盆地中,由于底流作用的改造,从而形成大量粉砂纹层和泥纹层交互的水平层理^[22-24]。然而,关于不同成因水平层理的特征差异性,前人研究相对较少。

川南地区古生界五峰组-龙马溪组黑色页岩大面积分布,页岩中水平层理广泛发育。水平层理的特征极大影响着页岩的储层品质^[25-27]及含气性^[28-29]。然而,关于水平层理的类型、成因机制及其对页岩渗透性的影响,前人研究相对较少。本文以川南地区古生界五峰组-龙马溪组黑色页岩为例,重点探讨页岩水平层理的类型及成因机制,并明确其对页岩渗透性的影响。

1 研究资料与方法

1.1 样品制备

川南地区五峰组-龙马溪组发育大套黑色页岩(图1)。五峰组与下伏宝塔组为平行不整合接触,与上覆龙马溪组为整合接触;龙马溪组与上覆石牛栏组呈角度不整合接触。龙马溪组由下至上分为龙马溪组一段(龙一段)和龙马溪组二段(龙二段),龙一段分为一段1亚段(龙一₁亚段)和一段2亚段(龙一₂亚段),龙一₁亚段细分出4个小层(龙一₁¹—龙一₁⁴)。五峰组除顶部观音桥层发育薄层生物碎屑灰岩外,其他部分均为黑色富含笔石页岩;龙一段为黑色、灰黑色薄层状页岩或块状页岩夹薄层状粉砂岩;龙二段为泥质粉砂岩,有时夹粉砂岩^[30]。

本文研究样品取自川南地区自201井、威202井、阳101H3-8井、大安2井、宁211井、宁212井和YS106井及长宁双河剖面,取样层位为五峰组和龙马溪组。自201井和威202井制作大薄片各5块,阳101H3-8井制作大薄片28块、物性分析28样次,大安2井制作大薄片46块,宁211井制作大薄片11块,宁212井制作大薄片2块,YS106井制作大薄片30块。长宁双河剖面共制作大薄片203块,物性分析13块次,氩离子抛光大片7块次。大薄片尺寸为5 cm × 7 cm × 30 μm,物性分析样品尺寸为25 mm × 10 mm。大薄片制作和成像由北京天和信矿业技术开发有限公司完成,物性分析测试在国家能源页岩气研发(实验)中心完成,氩离子抛光大片分析由中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心完成。

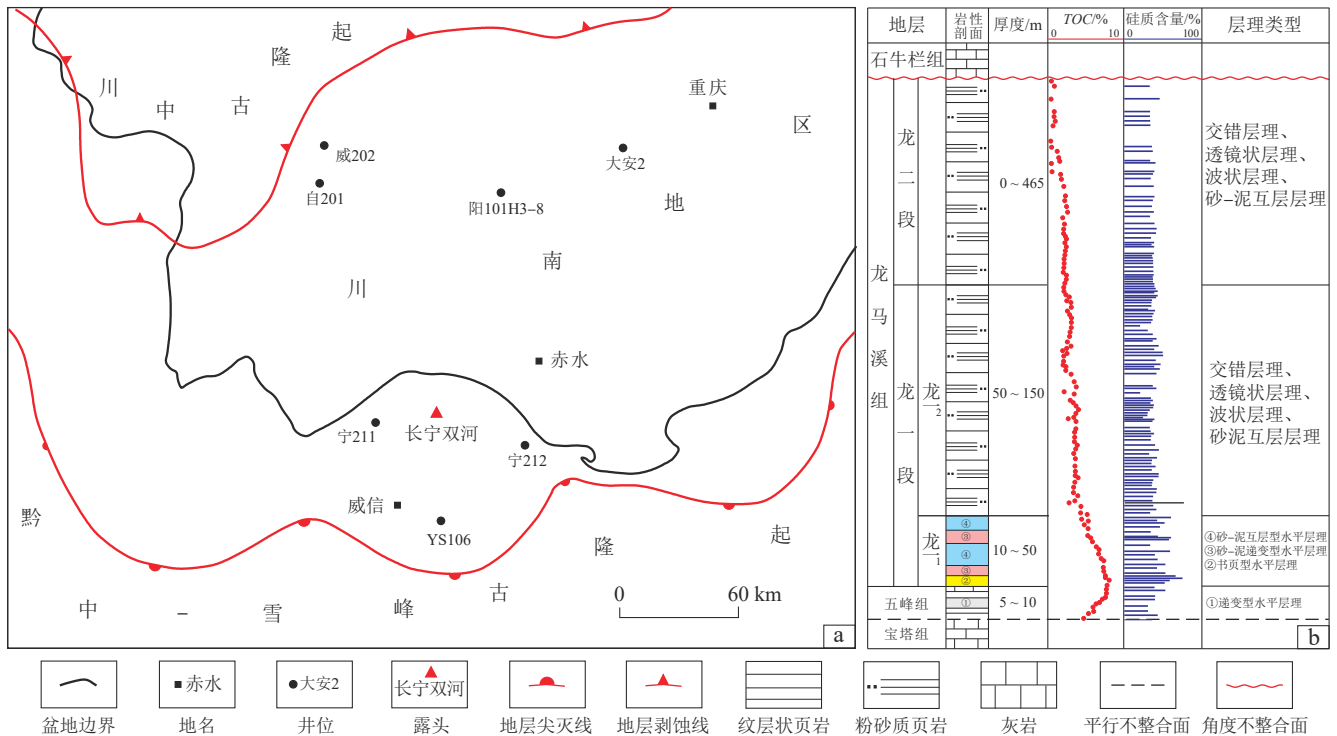


图1 川南地区五峰组-龙马溪组取样点位置(a)及地层组成(b)

Fig. 1 Sampling sites (a) and stratigraphic column (b) of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

1.2 大薄片成像和显微镜观察

层理描述主要借助于大薄片全尺度成像和偏光显微镜观察。选用德国Leica4500P显微高精度数字平台开展全薄片成像,每张大薄片一共采集图像3 200张。图像采集完成后,利用Adobe Photoshop CS5及以上版本图形处理软件在高配制工作站上对采集的3 200张图像开展无缝拼接,从而完成全薄片成像。完成全薄片成像后,开展层理特征描述,并选用配备有Leica DFC450照相系统的Leica DMIP偏光显微镜开展标准薄片岩石学特征研究。

1.3 氩离子抛光片扫描电镜分析

为了明确黑色页岩的纹层组成及结构,采用氩离子抛光片制作、图像采集和拼接、纹层识别及矿物组成分析、纹层结构分析等研究步骤和方法。氩离子抛光片尺寸为10 mm×10 mm×5 mm,图像采集选用携带冷排放的Hitachi场发射扫描电镜,并配备二次电子探针和X射线能谱仪(EDS)。扫描电镜放大倍数为30 000倍(单张照片最大分辨率为9 nm),图像采集区域垂直于层理面。水平方向采集图像7张,垂直方向采集图像80张,单张图像尺寸为8.172 μm×11.829 μm,累积采集面积82.80 μm×653.76 μm。图像采集完成

后,选用Adobe Photoshop图形处理软件拼接图像。

图像拼接完成后,根据SEM图像颗粒组成区分泥纹层和粉砂纹层,并测量纹层厚度。泥纹层SEM图像相对较暗,以泥质颗粒为主;粉砂纹层SEM图像相对较亮,以粉砂颗粒为主。确定泥纹层和粉砂纹层后,进一步描述各纹层的矿物组成、形态、分选性、磨圆性及粒序特征等,从而明确其成因机制。

2 结果

2.1 层理组成单元

黑色页岩基本地层单元有纹层、纹层组和层,多个纹层构成纹层组,单个或多个纹层组构成层^[25, 28, 31](表1)。黑色页岩发育泥纹层和粉砂纹层,二者可构成泥纹层组、粉砂纹层组以及递变层、均质层和砂-泥交互层。其中,递变层包括正递变层、反递变层、复合递变层和交互递变层,均质层包括粉砂层和泥质层。正递变层发育分布式、粗尾式、底部式和顶部式4种样式^[32](图2a);反递变层发育分布式、粗尾式、底部式和顶部式4种样式(图2b),复合递变层发育对称式、不对称式、振荡式和复杂式4种样式(图2c)。交互递变层中,粉砂纹层组可以呈正递变或反递变结构(图2d)。

表1 川南地区五峰组-龙马溪组海相黑色页岩沉积纹层、纹层组及层类型

Table 1 Types of lamina, lamina set, and bed of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

基本地层单元		组成	粒度
纹层	泥纹层	粒径<3.9 μm的颗粒含量>50 %	
	粉砂纹层	粒径>3.9 μm的颗粒含量>50 %	
纹层组	泥纹层组	泥纹层	均质状/正粒序/反粒序
	粉砂纹层组	粉砂纹层	均质状/正粒序/反粒序
层	递变层	正递变层	粉砂纹层组/泥纹层组
		反递变层	粉砂纹层组/泥纹层组
		复合递变层	粉砂纹层组/泥纹层组
		交互递变层	粉砂纹层组和泥纹层组
	均质层	粉砂层	粉砂纹层/粉砂纹层组
		泥质层	泥纹层/泥纹层组
	砂-泥交互层		泥纹层和粉砂纹层

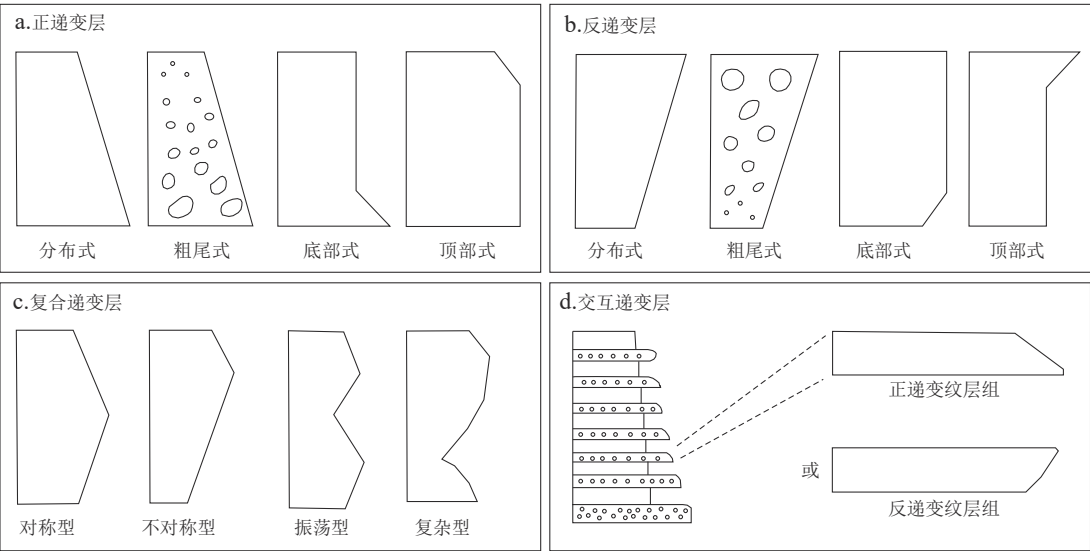


图2 川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩层类型及其细分

Fig. 2 Types and subdivision of the beds in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩泥纹层主要由黏土级自生石英组成,含有少量方解石、黏土矿物和黄铁矿,有机质呈弥散状,构成各种矿物颗粒的周缘(图3a,b)。泥纹层中,有机质中发育大量有机孔,矿物颗粒内部或周缘发育少量溶蚀孔隙。

川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩粉砂纹层中粉砂级颗粒主要由方解石、白云石、陆源碎屑石英、黏土矿物和黄铁矿组成,黏土级颗粒主要为自生石英,整体呈颗粒支撑结构(图3c-e),有机质呈分散状分布于粉砂级和黏土级颗粒之间。粉砂纹层中,粉砂级颗粒内部和周缘发育大量溶蚀孔,有机质发育大量有机孔。

2.2 水平层理类型及特征

川南地区五峰组-龙马溪组水平层理按照纹层、纹层组和层的类型及叠置方式,可划分出4种类型,即

递变型水平层理、砂-泥递变型水平层理、砂-泥互层型水平层理和书页型水平层理^[1, 25](表2)。

2.2.1 递变型水平层理

递变型水平层理页岩岩心为灰黑色-黑色,薄层状,有轻微的明暗相间。光学显微镜下,页岩由粉砂纹层组成,多个粉砂纹层构成正递变层、反递变层或复合递变层,不同类型层多呈连续、板状和平行分布(图4)。正递变层底界面多呈突变接触,发育冲刷面,界面上下颗粒、粒径及颜色明显差异。正递变层厚1.5~15.0 mm,一般厚度4.5 mm,由下至上颜色逐渐变深,粒径逐渐变细(图4a,b);反递变层厚2.5~5.5 mm,一般厚度4.0 mm,由下至上颜色逐渐变浅,粒度逐渐变粗;复合递变层厚度3.5~11.0 mm,一般厚度5.0 mm,常发育正递变纹层组+反递变纹层组组合方

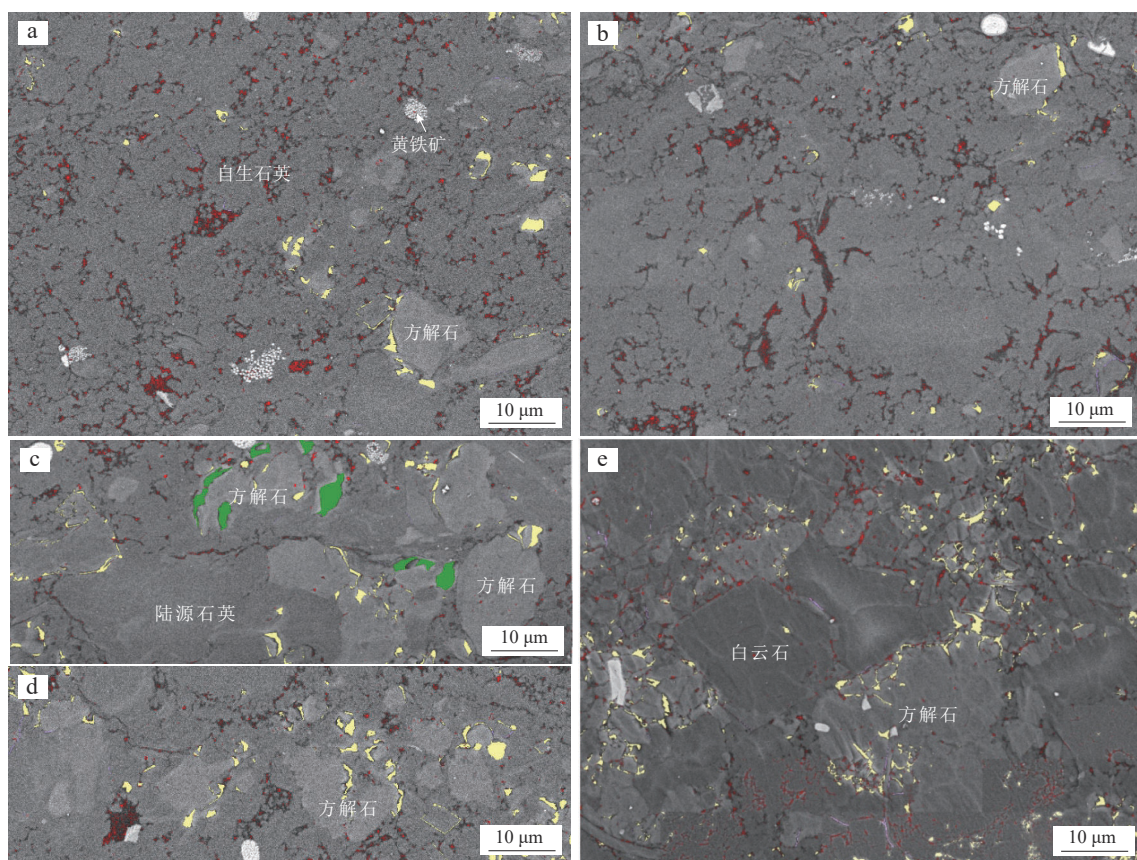


图3 川南地区五峰组-龙马溪组泥纹层和粉砂纹层扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images showing the clayey and silty lamina of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 阳101H3-8井,埋深3 787.5 m; b. 长宁双河剖面,样品4-16-1; c. 长宁双河剖面,样品9-3-1; d. 长宁双河剖面,样品11-2-1; e. 阳101H3-8井,埋深3 775.7 m

式(图4c,d)。

正递变层和反递变层主要为顺序式递变,粉砂颗粒粒度和含量向上逐渐减少或增加。正递变层主要有2种形态:①底部发育冲刷面,底界面凹凸不平,滞积层不发育,层厚较大,一般为8.0~14.0 mm(图4a);②底界面为平直板状,底界面之上发育滞积层,层厚较小,一般为3.0~9.0 mm(图4b)。复合递变层底界面上、下颜色和粒度有差异,不发育冲刷面,层厚为5.0~11.0 mm(图4c,d)。

扫描电镜下,正递变层、反递变层和复合递变层成份基本一致,主要矿物类型有方解石、白云石、微晶石英、黏土矿物和黄铁矿,分选差,杂基支撑结构(图5)。方解石呈浅灰色,次圆状,边缘呈港湾状,溶蚀孔隙发育;白云石呈深灰色,次棱角状,发育白色斑点和溶蚀孔隙;微晶石英呈自形或半自形状,构成页岩的基质;黏土矿物呈浅灰色条带状,压实作用常造成弯曲;黄铁矿呈草莓状和团块状。单个递变层内部,由下至上或由上至下,颗粒含量和粒度逐渐变小,微晶石英含量逐渐增加,构成粗尾型递变层(图2)。递变层底部方解

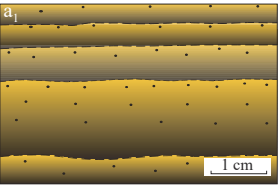
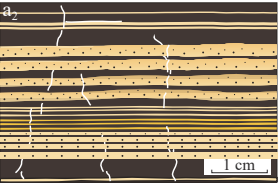
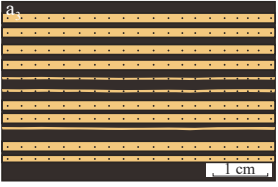
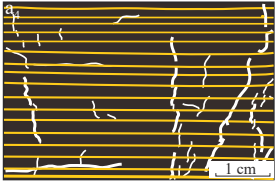
石粒径2.1~11.5 μm (平均5.4 μm)、白云石粒径5.5~32.9 μm (平均14.5 μm)、黏土矿物粒径3.1~8.1 μm (平均4.7 μm)、黄铁矿粒径4.1~6.1 μm (平均5.3 μm)(图5a);递变层顶部方解石粒径2.6~9.1 μm (平均4.8 μm)、白云石粒径5.5~6.7 μm (平均6.1 μm)、黏土矿物粒径6.1~6.4 μm (平均6.2 μm)、黄铁矿粒径1.9~2.4 μm (平均2.2 μm)(图5d)。递变层中部和上部常见较大粒径的次圆状方解石(粒径26 μm)漂浮于石英基质中(图5b—d)。

2.2.2 砂-泥递变型水平层理

砂-泥递变型水平层理页岩岩心为灰色、灰黑色,薄层状,明、暗相间较为显著。光学显微镜下,页岩由粉砂纹层和泥纹层构成,二者构成正递变层或交互递变层(图6)。正递变层根据粉砂纹层和泥纹层的占比可分出厚泥型和厚砂型。厚泥型正递变层厚度2.0~10.5 mm,一般厚度4.5 mm,其底部1/10—1/5处均为粉砂纹层,中部和上部均为厚层均质状泥纹层,泥纹层和粉砂纹层突变接触(图6a)。厚砂型正递变层厚度

表2 川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩水平层理类型及特征

Table 2 Types and characteristics of the horizontal bedding of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

类型	成层性	矿物组成	组构	成因	示意图	长宁双河剖面实例
递变型	多个粉砂纹层水平叠置,单个粉砂纹层构成正递变层、反递变层或复合递变层	方解石、白云石、微晶石英、黏土矿物及其他	砂-泥混杂堆积,杂基支撑	低能泥质浊流成因,流体流速<15 cm/s,体积浓度<0.5 %		
砂-泥递变型	粉砂纹层和泥纹层水平互层,二者构成正递变层或交互递变层	粉砂纹层主要由白云石、方解石和黏土矿物组成,泥纹层主要由微晶石英构成	粉砂纹层呈颗粒支撑结构	低能泥质浊流成因,正递变层流体流速<15 cm/s,交互递变层,流体流速15~25 cm/s		
砂-泥互层型	粉砂纹层和泥纹层水平互层,粉砂纹层无粒序变化	粉砂纹层由方解石、黏土矿物和碎屑石英等组成,泥纹层主要由微晶石英构成	粉砂纹层呈颗粒支撑结构	陆棚深水等深流成因,水流速度15~25 cm/s		
书页型	泥纹层构成,偶夹断续状或条带状粉砂纹层	泥纹层主要为微晶石英,粉砂纹层主要为方解石和白云石	整体呈书页状	远洋悬浮沉降成因,静水环境		

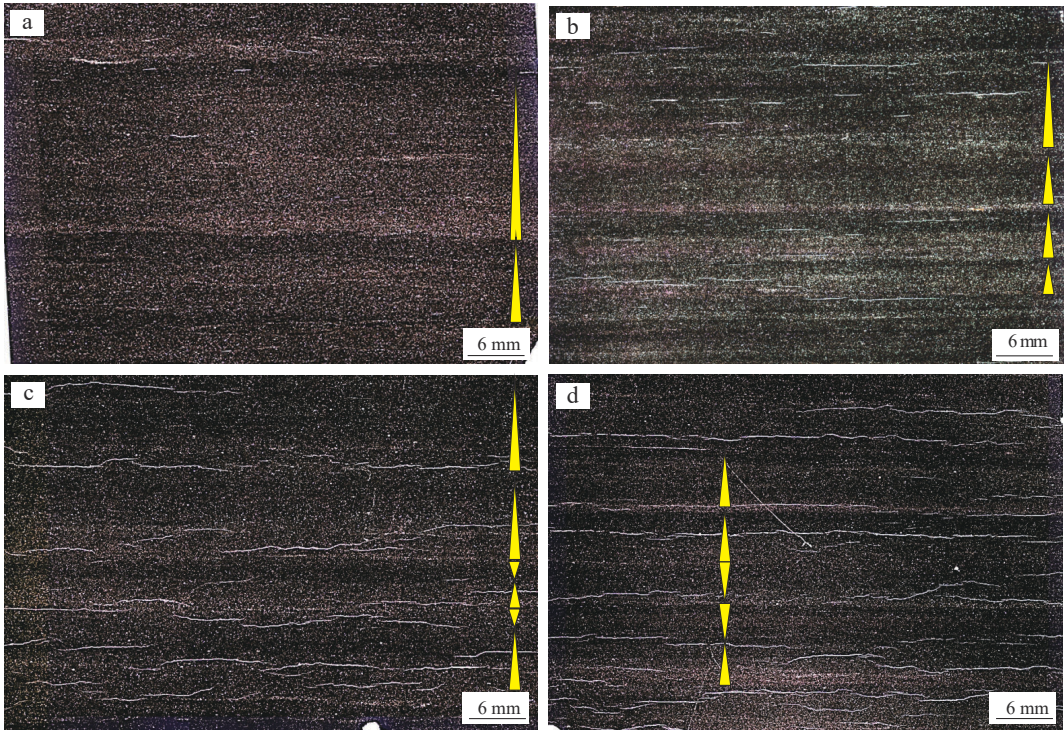


图4 川南地区五峰组递变型水平层理大薄片显微照片

Fig. 4 Microscope image large thin section showing the horizontal bedding of the grading type composed of claystone in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 厚层状正递变层,样品4-16-1,双河剖面;b. 薄层状正递变层,样品4-19-1,双河剖面;c,d. 复合递变层,样品5-2-1,双河剖面

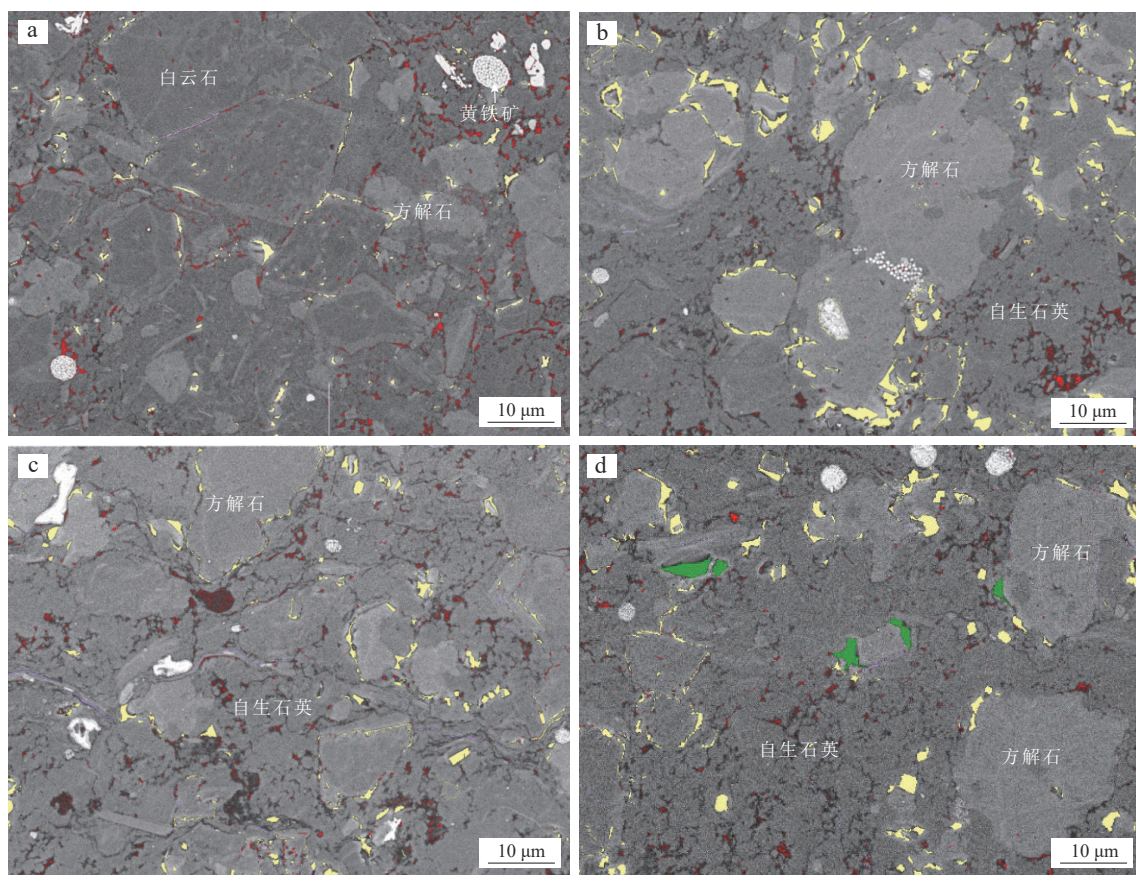


图5 川南地区五峰组-龙马溪组递变型水平层理粉砂纹层扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images showing the silty lamina of the horizontal bedding of the grading type composed of claystone in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 递变层最底部,样品4-16-1,双河剖面;b. 递变层底部,样品4-16-1,双河剖面;c. 递变层中部,样品4-16-1,双河剖面;d. 递变层上部,样品4-16-1,双河剖面

1.5 ~ 2.5 mm,一般厚度2.0 mm,其底部3/4处均为薄层状粉砂纹层,上部1/4处为泥纹层组,粉砂纹层由下至上粒度逐渐变细,泥纹层呈均质状,粉砂纹层和泥纹层突变接触(图6b)。正递变层中,粉砂纹层底界面均为连续板状,突变接触,显微镜下表现为界面上、下颗粒粒径及颜色的截然差异,顶、底界面多数呈连续的平直状,少数粒度较粗的粉砂纹层顶界面呈凹凸状(图6c,d)。交互递变层由泥纹层和粉砂纹层交互构成,层厚3.0 ~ 6.0 mm,粉砂纹层和泥纹层突变接触,由下至上,粉砂纹层厚度变薄、粒度变细(图6c,d)。交互递变层的底界面多为连续板状,层内部粉砂纹层顶、底界面均为连续、板状、平行分布。

扫描电镜下,砂-泥递变型水平层理页岩中递变层矿物成分基本一致,主要由白云石、方解石、黏土矿物、碎屑石英和微晶石英等组成,粉砂纹层呈颗粒支撑结构(图7)。白云石呈深灰色,菱形,次棱角状,溶蚀孔隙发育;方解石呈浅灰色不规则状,次圆状,边缘呈港湾状,溶蚀孔隙发育;黏土矿物呈浅灰色长条带状;

碎屑石英多呈深灰色不规则粒状;微晶石英多为泥级杂基,自形或半自形;黄铁矿呈团块状。单个递变层中,粉砂纹层由下至上颗粒含量和粒度逐渐变小,构成顺序式递变(图2),底部白云石粒径3.5 ~ 15.3 μm (平均6.4 μm)、方解石粒径4.1 ~ 14.4 μm (平均8.9 μm)、黏土矿物粒径5.5 ~ 13.3 μm (平均7.7 μm)、碎屑石英粒径4.1 ~ 7.6 μm (平均5.2 μm),由下至上各颗粒粒径逐渐变细(图7a)。泥纹层呈现粒度双众数特征,其中,微晶石英颗粒粒径2.0 ~ 3.0 μm ,白云石粒径6.1 ~ 14.2 μm (平均9.4 μm)、方解石粒径2.5 ~ 11.7 μm (平均5.6 μm)、黏土矿物粒径3.6 ~ 10.2 μm (平均6.1 μm)、碎屑石英粒径6.4 ~ 8.6 μm (平均7.5 μm)(图7b)。泥纹层中常见较大粒径的次棱角状方解石(粒径达17.7 μm)漂浮于微晶石英基质中(图7b)。

2.2.3 砂-泥互层型水平层理

砂-泥互层型水平层理页岩岩心为灰色和灰黑色,薄层状,发育多条白色粉砂条带。光学显微镜下,

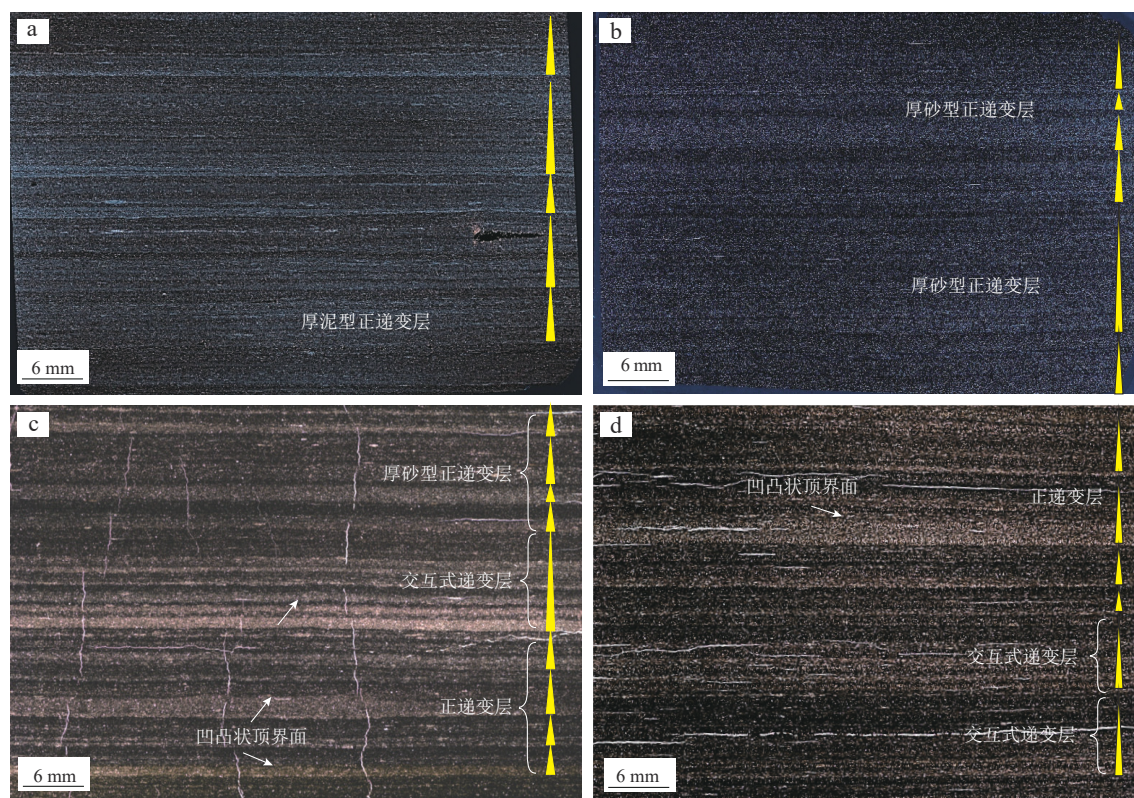


图6 川南地区五峰组-龙马溪组砂-泥递变型水平层理大薄片显微照片

Fig. 6 Microscope image large thin section showing the horizontal bedding of the grading type composed of siltstone and claystone in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 大安2井,埋深4 054.2 m; b. 大安2井,埋深4 057.5 m; c. 阳101H3-8井,埋深3 068.4 m; d. 双河剖面,样品9-3-1

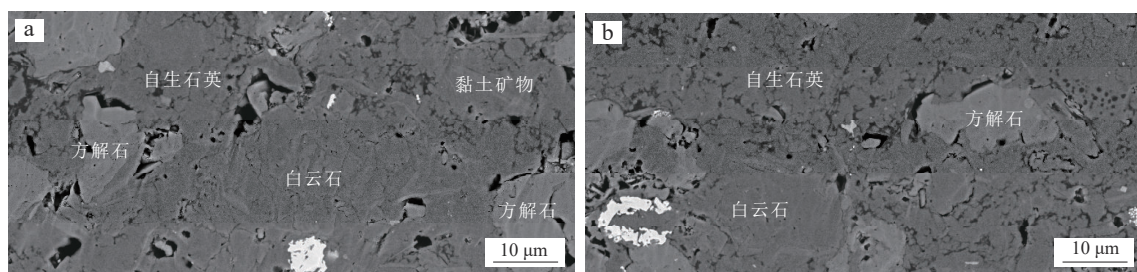


图7 川南地区阳101H3-8井五峰组-龙马溪组砂-泥递变型水平层理粉砂纹层和泥纹层扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images showing the silty and clayey lamina of the horizontal bedding of the grading type composed of siltstone and claystone in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 粉砂纹层,阳101H3-8井,埋深3 068.4 m; b. 泥纹层,长宁双河剖面,样品9-3-1

泥纹层和粉砂纹层相间接触。泥纹层颜色较深,构成暗纹层;粉砂纹层颜色较浅,构成亮纹层。粉砂纹层多呈条带状,局部为小型透镜体(图8)。泥纹层和粉砂纹层的顶界面和底界面多数为连续、平行,突变接触,局部可见粉砂纹层与层界面交切。根据粉砂纹层和泥纹层的叠合方式,砂-泥互层型水平层理划分为稀疏式、紧密式和相间式3种类型(图8)。稀疏式由粉砂纹层和泥纹层互层构成,粉砂纹层占比小于25%;紧密式由多期砂-泥交互层构成,中间夹有薄层泥纹层,粉砂纹层占比大于

75%(图8b,c);相间式由厚层浅色粉砂层和泥质层互层构成,粉砂纹层含量为25%~75%(图8d)。

扫描电镜下,砂-泥互层型水平层理页岩粉砂层主要由方解石、黏土矿物、碎屑石英和微晶石英等组成,分选较好,颗粒支撑结构,递变结构不发育(图9a)。方解石呈浅灰色不规则状,次圆状,边缘呈港湾状;黏土矿物呈浅灰色长条带状;碎屑石英多呈深灰色不规则粒状;微晶石英多为泥级杂基,自形或半自形;黄铁矿呈团块状。其中,方解石粒径3.3~14.1 μm(平均

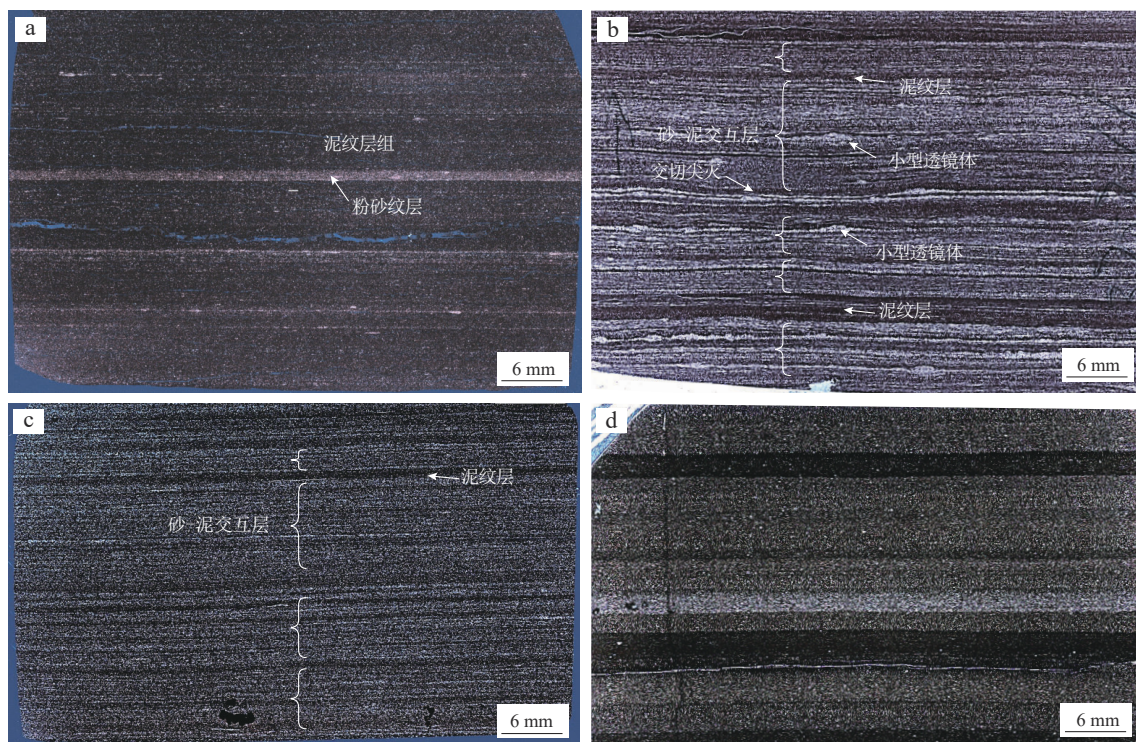


图8 川南地区五峰组-龙马溪组砂-泥互层型水平层理大薄片显微照片

Fig. 8 Microscope image large thin section showing the horizontal bedding of the alternating siltstone and claystone type in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 稀疏式, YS106井, 埋深1 421.17 m; b, c. 紧密式, 阳101H3-8井, 埋深3 757.66 m; d. 相间式, 威202井, 埋深2 570.09 m

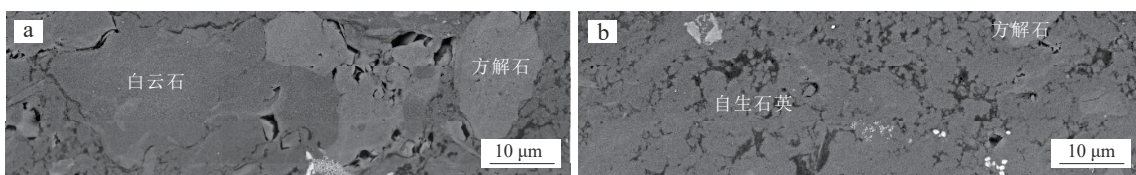


图9 川南地区五峰组-龙马溪组砂-泥互层型水平层理粉砂纹层和泥纹层扫描电镜照片

Fig. 9 SEM images showing the silty and clayey lamina of the horizontal bedding of the alternating siltstone and claystone type in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 粉砂纹层, 阳101H3-8井, 埋深3 757.66 m; b. 泥纹层, 长宁双河剖面, 样品9-2-1

7.3 μm)、黏土矿物粒径5.4~16.3 μm (平均10.2 μm)、碎屑石英平均粒径9.6 μm 。泥纹层主要由微晶石英组成, 含有极少量方解石和草莓状黄铁矿(图9b)。其中, 方解石粒径2.2~10.7 μm (平均4.9 μm), 草莓状黄铁矿粒径平均值3.1 μm 。

2.2.4 书页型水平层理

书页型水平层理页岩岩心为灰黑色, 风化后常为书页状, 页理和微裂缝发育。光学显微镜下, 书页型水平层理由泥纹层构成, 多个泥纹层构成泥质层, 中间偶夹条带状或断续状粉砂纹层或1.0~5.0 mm厚的放射虫层(图10)。泥质层呈现微弱的正递变、反递变或复合递变特征(图11), 层界面之上发育单层浅色矿物组

成的条带。层界面上、下颗粒粒径及颜色略有差异, 层界面多呈连续、板状、平行或断续、板状、平行分布。正递变层厚为1.0~4.0 mm, 一般厚度为1.1 mm, 显微镜下由下至上颜色逐渐变深; 反递变层厚为2.0~4.0 mm, 一般为3.0 mm, 显微镜下由下至上颜色逐渐变浅; 复合递变层厚度为4.0~14.5 mm, 一般为9.0 mm, 显微镜下由下至上颜色深浅逐渐变化。

书页型水平层理页岩分为正递变层构成型和复合递变层构成型2种类型。正递变层构成书页型水平层理主要由正递变层构成, 显微镜下可见浅色的条带(图11a); 复合递变层构成型的书页型水平层理页岩主要由正递变层构成, 中间夹有少量反递变层和复合递变层, 显微镜下呈现明、暗相间的特征(图11b)。

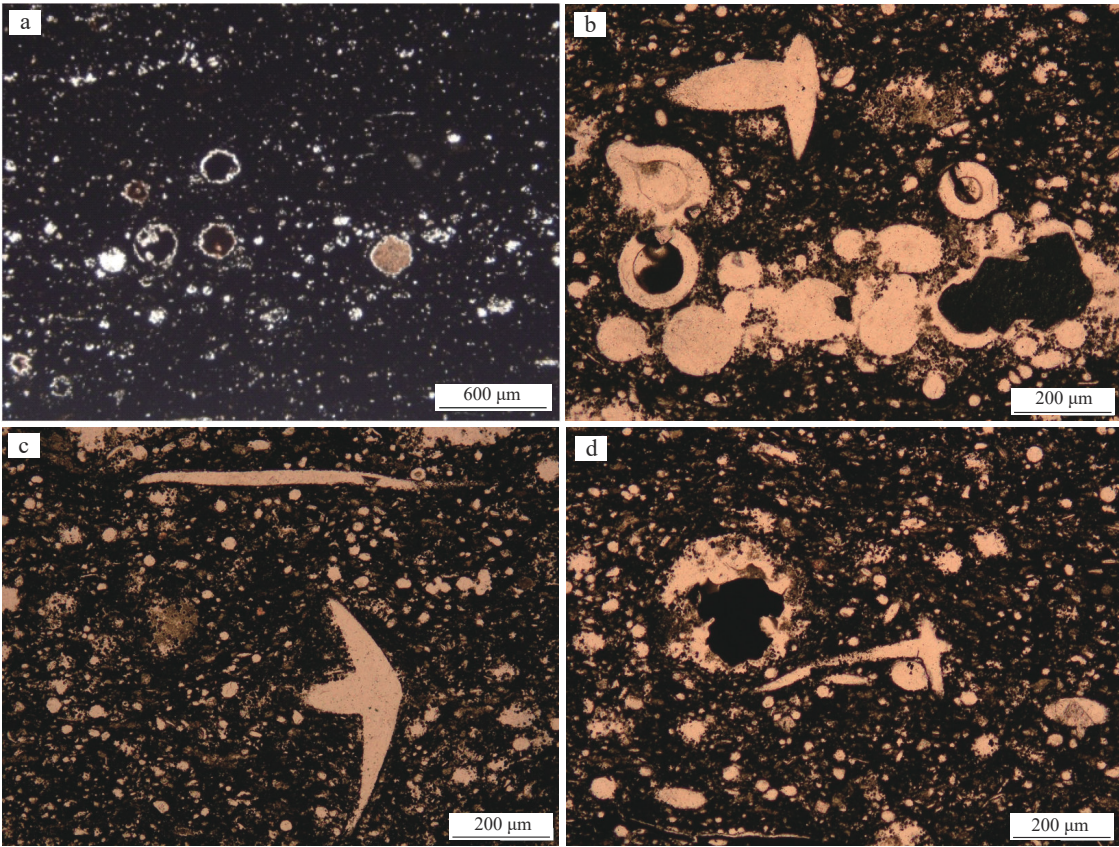


图10 川南地区五峰组-龙马溪组书页型水平层理页岩放射虫粉砂纹层偏光显微照片

Fig. 10 Polarizing microscop images showing radiolarian silty lamina of the paper-type horizontal bedding in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 大安2井,埋深4 107.6 m;b. 黄202井,埋深4 082.3 m;c. 阳101H3-8井,埋深3 183.5 m;d. 阳101H3-8井,埋深3 184.2 m

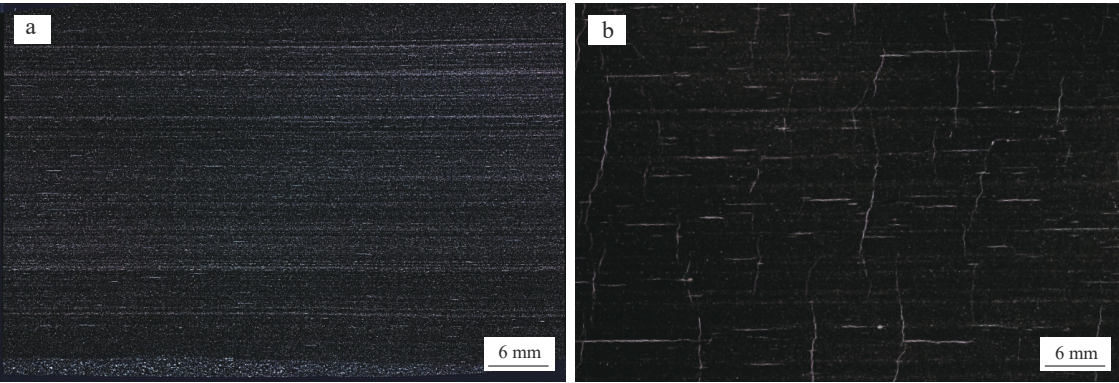


图11 川南地区五峰组-龙马溪组书页型水平层理大薄片显微照片

Fig. 11 Microscope image large thin section showing the paper-type horizontal bedding in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 正递变层型,大安2井,埋深4 107.46 m;b. 复合递变层型,长宁双河剖面,龙马溪组,样品6-22-1

扫描电镜下,书页型水平层理页岩的泥质层主要由直径 $2.0\sim 3.0\mu\text{m}$ 的微晶石英组成,含有少量的方解石和碎屑石英(图12)。方解石粒径 $3.0\sim 5.0\mu\text{m}$,碎屑石英粒径 $6.5\sim 14.3\mu\text{m}$ 。条带状或断续状粉砂纹层主要由单层方解石和白云石组成,方解石粒径 $3.7\sim 9.2\mu\text{m}$ (平均 $8.9\mu\text{m}$),白云石平均粒径 $4.3\mu\text{m}$ 。

3 讨论

3.1 黏性流体基本特征

泥和粉砂颗粒在搬运和沉降过程中,由于存在表

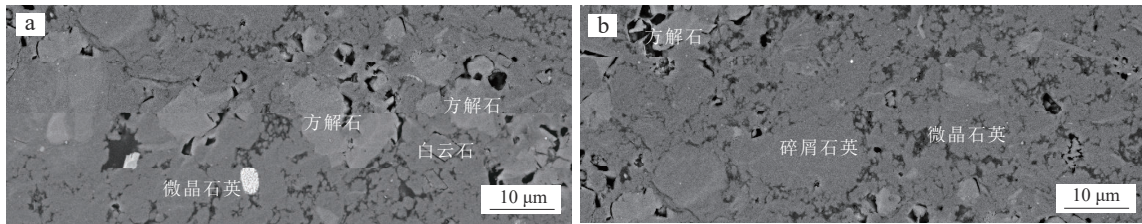


图12 川南地区五峰组-龙马溪组书页型水平层理粉砂纹层和泥纹层扫描电镜照片

Fig. 12 SEM images showing the silty and clayey lamina of the paper-type horizontal bedding in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

a. 粉砂纹层, 大安2井, 埋深4 107.46 m; b. 泥纹层, 长宁双河剖面, 样品8-1-1

面电荷、体积力(如范德华力)^[33]、生物聚合物等原因而结合成絮凝颗粒^[34]。絮凝颗粒大小与水体浓度、黏土矿物类型及水体化学性质密切相关。搬运过程中, 粒径较大的絮凝颗粒(粒径在100~1 000 μm)沉降速率与同时期搬运的粉砂或细砂颗粒相近^[35]。当流体流速小于15 cm/s时, 絮凝颗粒多以悬浮载荷形式搬运和沉降^[22-24]。沉降过程中, 由于重力分异作用, 直径较大的絮凝颗粒、大颗粒粉砂、包裹较小粒径粉砂的絮凝颗粒优先沉降, 从而形成砂泥混杂的正递变层^[14]。当流体流速为15~25 cm/s时, 絮凝颗粒多以床沙载荷形式搬运和沉降。沉降过程中, 携带粉砂颗粒的较大絮凝颗粒会发生破裂并抛出粉砂颗粒, 并在底床上形成分别由粉砂颗粒和泥质絮凝颗粒构成的移动砂波^[24]。移动砂波在迁移过程中相互叠置, 从而形成粉砂纹层和泥纹层互层。当流体流速大于25 cm/s时, 泥质絮凝颗粒破碎, 该时期底床上只发育由粉砂颗粒组成的移动砂波, 从而只发育分选好的粉砂纹层^[24]。

当流体富含黏性泥时, 随着黏性泥浓度升高(临界点体积浓度为0.5%~2.0%), 泥质颗粒会结合成连续或近连续的三维网络, 从而形成胶体溶液^[36]。胶体溶液影响着流体的流变学、流体结构和流体流动方式。黏土矿物颗粒组成的黏性键会增加流体黏度, 流体流速增加会降低流体黏度, 从而造成流体流速分岔^[36-37]。流体流动过程中, 随着流体流速降低, 黏性键会进一步抑制湍流活动, 从而造成流体由湍流转变为层流^[38-39]。黏性键的形成需要时间。在流体流速降低过程中, 由于更多黏性键形成, 从而流体黏度进一步增大, 所能支撑的颗粒粒度变大^[40]。同时, 随着湍流活动强度和泥质浓度的变化, 絮凝颗粒大小也发生相应变化^[41]。

3.2 不同类型水平层理的成因

3.2.1 递变型水平层理

递变型水平层理页岩递变层的底界面多为突变接

触或发育冲刷面, 递变层矿物颗粒分选差、杂基支撑, 顺序式递变发育, 表明其为能量逐渐减弱的低密度浊流^[42]或波浪影响的浊流成因^[43]。其中, 突变面或冲刷面为浊流流动过程中的侵蚀作用形成, 浊流沉积时期, 由于能量较低, 泥质发生悬浮沉降而形成递变层。递变层中部和上部常发现较大粒径的漂浮颗粒, 其可能来源于冰川坠石^[44]、水面漂浮物、风力搬运^[45]或浊流搬运^[46]。考虑到漂浮颗粒多呈簇状分布、粒径和形态多变、漂浮颗粒下伏纹层没有发生变形、递变层未发现任何冰川作用标志等因素, 认为漂浮颗粒为冰川搬运成因可能性非常小。结合递变层基底为突变接触、颗粒分选性差、粒序发育等特征, 认为漂浮颗粒应为高浓度黏性浊流成因^[14, 47]。

五峰组-龙马溪组递变型水平层理页岩正递变层中含有大量泥质颗粒, 其可能为絮凝颗粒成因; 而粉砂颗粒与泥质颗粒混杂, 粉砂纹层和泥纹层分层不明显, 表明沉积时期流体浓度相对较高^[48], 流体流速很低(<15 cm/s), 沉积物来源于悬浮沉降作用^[42]。粒序发育表明沉积期浊流浓度不是足够高(体积浓度低于0.5%~7.0%)^[14], 从而不能支撑相对较粗的颗粒。递变型水平层理页岩中递变层厚度与浊流流速相关: 流速越低, 流体黏性越大, 形成的递变层厚度越大; 流速越高, 流体黏性越小, 形成的递变层厚度越薄, 并易在底部形成薄层粉砂质滞积层。流体流动过程中, 由于流速降低, 流体黏性增大^[37], 从而形成递变型水平层理。

3.2.2 砂-泥递变型水平层理

砂-泥递变型水平层理页岩递变层的底界面多为突变接触或发育冲刷面, 砂-泥递变层发育递变结构, 表明其为浊流成因^[42, 49-50]。砂-泥递变层的形成与浊流底部的边界层剪切分选有关。浊流活动过程中, 粉砂颗粒和絮凝颗粒以相似的速率沉降。当它们进入边界层内时, 絮凝颗粒发生边界层剪切破裂, 而粉砂颗粒

正常沉降形成粉砂纹层。随着边界层泥质浓度逐渐升高,泥质颗粒重新絮凝沉降而形成泥纹层^[15]。上述过程循环往复,从而形成多个砂-泥递变层叠置^[15, 51]。随着浊流流速降低和浓度升高,其靠近底床的粉砂颗粒浓度梯度大幅度上升,从而形成流体分层。流体分层有效抑制了湍流活动,并造成高浓度流体整体发生凝固^[47]。五峰组-龙马溪组砂-泥递变层中粉砂纹层不含泥质颗粒,表明其经历了明显的分选作用;粉砂纹层向上存在着粒度变化,表明其仍为悬浮沉降成因。少数较粗的粉砂纹层顶界面呈凹凸状,表明其经历了牵引搬运作用。综合分析认为,砂-泥递变层为浊流底部边界层的分选作用形成,少数经历了牵引搬运作用,相对于递变型水平层理,其沉积时期流速增大,但仍低于 15 cm/s。

五峰组-龙马溪组黑色页岩中,砂-泥递变层发育正递变层和交互递变层 2 种类型。正递变层中,厚泥型正递变层发育薄层粉砂纹层和厚层泥纹层、单层厚度较大,表明沉积时期水流速度更低、流体黏性更大;厚砂型正递变层发育厚层粉砂纹层和薄层泥纹层、单层厚度较小,表明沉积时期水流速度增大、流体黏性变弱。交互式递变层中,粉砂纹层与泥纹层交互出现,粉砂纹层整体向上变细,表示其由同一期流体事件形成,而非多期事件^[14-15]。且单个粉砂纹层内部无粒序变化,表明其为牵引沉降,而非悬浮沉降成因。综上所述,认为交互递变层形成于流体流速相对较高(15~25 cm/s)时期,随着浊流能量逐渐减弱,形成向上变细序列。

3.2.3 砂-泥互层型水平层理

砂-泥互层型水平层理页岩粉砂纹层和泥纹层顶、底界面均为突变界面,粉砂纹层不发育递变结构,表明其为非浊流成因。粉砂纹层为颗粒支撑结构,基质含量低,发育小型透镜体和交切接触关系,表明其经

历了明显的分选作用^[22-23, 45]。综合分析认为,砂-泥互层型水平层理页岩可能为底流改造作用相对强烈^[21]的陆棚深水等深流沉积^[17-20, 52-54]。陆棚深水环境中,风力搬运、火山喷发、河流注入、表层生物光合作用等来源的粉砂和泥质颗粒均呈絮凝状颗粒的形式沉降^[45]。絮凝颗粒沉降到底层之后,由于受到底流(如风化驱动底流、温盐底流等)作用的影响^[45, 53, 55],包裹粉砂颗粒的絮凝颗粒发生破裂,粉砂颗粒脱离和聚集,并以砂纹的形式在底面上迁移^[24]。该时期,沉积底面上发育由粉砂颗粒组成砂波和由黏土颗粒组成的砂波,砂波在移动过程中均留下薄层细尾,细尾相互叠置形成砂-泥互层型水平层理。五峰组-龙马溪组黑色页岩中,泥质颗粒和粉砂颗粒均呈底载荷形式搬运,表明沉积时期水流速度为 15~25 cm/s。

砂-泥互层型水平层理发育稀疏式、紧密式、交互式和相间式 4 种样式,4 种不同样式的形成与沉积时期水体流速和沉积物供给速率密切相关^[24]。随着水体流速和沉积物供给速率逐渐增大,依次出现稀疏式、紧密式、交互式和相间式 4 种样式的砂-泥互层型水平层理(图 13)。其中,水体流速 25 cm/s 为一临界点^[22-23],当水流速度大于 25 cm/s 时,只会沉积粉砂纹层;当水流速度低于 25 cm/s 时,才会出现粉砂纹层与泥纹层互层。

3.2.4 书页型水平层理

书页型水平层理页岩整体由生物成因微晶石英组成^[56-59],陆源碎屑物质含量较低^[25],页岩中放射虫形态完整,局部可堆积成 1~5 mm 的放射虫纹层,表明沉积物主要来源于表层水体初级生产力。页岩中夹杂有极少量方解石、白云石和黏土矿物颗粒,局部形成粉砂纹层,表明存在着少量的陆源碎屑供给。页岩发育极薄层的水平纹层,缺乏水流改造标志,表明沉积物为悬浮沉降成因,侧向平流活动微弱或不发育^[17]。综合以上

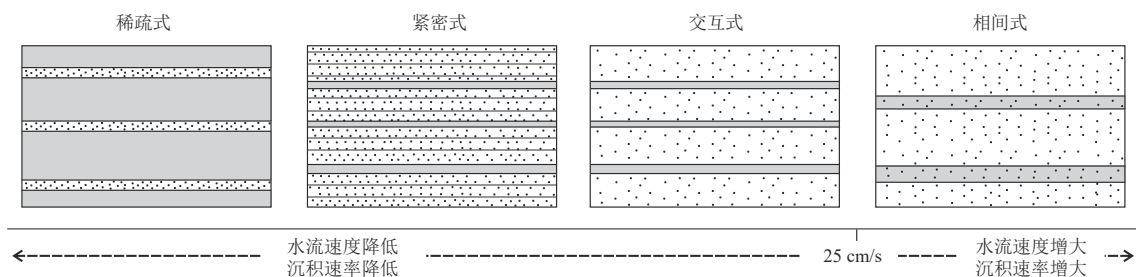


图 13 不同类型砂-泥互层型水平层理与水体流速和沉积速率的关系

Fig. 13 Impact of current velocity and sedimentation rate on the formation of various types of horizontal bedding with alternating siltstone and claystone

分析,认为书页型水平层理为深水陆棚环境的远洋悬浮沉降成因^[4, 17],沉积物主要来源于生物成因物质的悬浮沉降作用,受陆源碎屑供给或火山碎屑供给等侧向平流作用的影响较小^[55]。远洋沉积的沉降速率非常低($<1\text{ cm/kyr}$)^[60],主要受控于絮凝颗粒和粪球粒的形成速率。在初级生产力较高的边缘海地区,生物作用表现为明显的周期性或季节性勃发^[61]。

五峰组-龙马溪组黑色页岩中,书页型水平层理发育微弱的正递变,其形成可能与季节性气候变化有关。季节性气候变化造成表层水体中硅质生物周期性勃发^[61],从而形成放射虫富集层。页岩中夹杂的极薄层细粒粉砂纹层,其形成可能与风力或异重流搬运有关^[45]。黑色页岩中发育的少量反递变层和复合递变层,其形成可能与局部的浊流沉积有关。

3.3 不同类型水平层理页岩渗透率差异

不同类型水平层理页岩渗透性明显差异。其中,书页型水平层理页岩渗透率及水平渗透率与垂直渗透率之比最大,其次是砂-泥互层型水平层理,砂-泥递变型水平层理和递变型水平层理最小^[25](表3)。以长宁双河剖面 and 阳101H3-8井样品为例,书页型水平层理页岩渗透率最高,水平渗透率与垂直渗透率比值为6.53~59.74,砂-泥互层型水平层理页岩的比值为1.86~3.46,砂-泥递变型水平层理页岩的比值为0.20~12.20,而递变型水平层理页岩的比值为0.01~0.75。

不同类型水平层理页岩渗透性差异可能与其成因有关。书页型水平层理页岩为半远洋悬浮沉降成因,沉积时期表层水体初级生产力高^[25]、水体还原性强^[62]、陆源影响小^[63],故有机质和有机孔发育,渗透性

好。砂-泥互层型水平层理由于为等深流成因,受底流改造强,颗粒分选性好,故渗透率较好。递变型水平层理和砂-泥递变型水平层理由于为浊流成因,沉积时期水体为氧化环境^[64]、颗粒分选性差,有机质和有机孔不发育,故渗透性不好。

4 结论

1) 黑色页岩发育递变型、砂-泥递变型、砂-泥互层型和书页型4种类型水平层理。递变型水平层理由多个粉砂层叠置而成,层界面平行,粉砂层呈杂基支撑结构、粒序发育。砂-泥递变型水平层理中粉砂纹层和泥纹层互层构成正递变层,粉砂纹层呈颗粒支撑结构,纹层界面突变接触,层界面平行。砂-泥互层型水平层理由粉砂纹层和泥纹层薄构成,层和纹层界面均突变接触,粒序不发育。书页型水平层理由极薄层状泥纹层构成,发育微弱的正粒序。

2) 黑色页岩4种水平层理具有不同的成因。递变型水平层理为相对低能的浊流成因;砂-泥递变型水平层理为相对高能的浊流成因;砂-泥互层型水平层理为陆棚相的等深流成因;书页型水平层理为陆棚相的半远洋悬浮沉降成因。

3) 黑色页岩水平层理类型直接影响页岩渗透性。书页型水平层理页岩富含有机质和有机孔,渗透率及水平渗透率与垂直渗透率之比最大;砂-泥互层型水平层理颗粒分选性较好,渗透率及水平渗透率与垂直渗透率之比较大;砂-泥递变型水平层理和递变型水平层理颗粒分选性差、有机质含量低,渗透率及水平渗透率与垂直渗透率最低。

表3 川南地区五峰组-龙马溪组不同类型水平层理页岩渗透率特征

Table 3 Shale permeability of the horizontal bedding of diverse types in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

层理类型	剖面或井号	层位或深度/m	样品号	水平渗透率/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	垂直渗透率/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	水平渗透率/ 垂直渗透率
递变型水平层理	长宁双河	五峰组	4-2-1	0.001 490	0.000 124	12.02
	长宁双河	五峰组	5-34-2	0.000 210	0.000 117	1.79
	长宁双河	五峰组	4-16-1	0.000 313	0.001 548	0.20
砂-泥递变型水平层理	长宁双河	龙马溪组	8-33	0.000 584	0.000 777	0.75
	长宁双河	龙马溪组	8-29	0.000 402	0.032 293	0.01
砂-泥互层型水平层理	阳101H3-8	3 774.50	Y-1	0.003 510	0.001 890	1.86
	阳101H3-8	3 775.37	Y-2	0.005 600	0.002 660	2.11
	阳101H3-8	3 776.20	Y-3	0.004 570	0.001 320	3.46
书页型水平层理	阳101H3-8	3 782.48	Y-4	0.004 570	0.000 077	59.74
	阳101H3-8	3 783.52	Y-5	0.005 850	0.000 555	10.54
	长宁双河	龙马溪组	8-31-2	0.002 291	0.000 351	6.53
	长宁双河	龙马溪组	8-10-1	0.223 540	0.025 925	8.62

致谢:中国石油西南油气田分公司岩心库提供了观察和描述岩心的机会,大薄片照片均由北京天和信公司佟明江总经理拍摄,中国石油国家卓越工程师学院王红岩教授教授提供了技术指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 181-196.
SHI Zhensheng, QIU Zhen. Main bedding types of marine fine-grained sediments and their significance for oil and gas exploration and development [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 181-196.
- [2] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1994: 286-298.
FENG Zengzhao. Sedimentary petrology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 286-298.
- [3] 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式——以川南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 51-64.
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 51-64.
- [4] STOW D A V, TABREZ A R. Hemipelagites: processes, facies and model[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 129(1): 317-337.
- [5] 李志扬. 陆棚海泥岩的岩相特征及沉积过程——以晚白垩世北美西部内陆海道为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 168-180.
LI Zhiyang. Facies characteristics and depositional processes of shelf mudstones: Examples from the Late Cretaceous western interior seaway of North America [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 168-180.
- [6] SCHIMMELMANN A, LANGE C B, SCHIEBER J, et al. Varves in marine sediments: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 215-246.
- [7] ANDERSON R Y, DEAN W E. Lacustrine varve formation through time[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1988, 62(1/4): 215-235.
- [8] ZOLITSCHKA B, FRANCUS P, OJALA A E K, et al. Varves in lake sediments—a review[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 117: 1-41.
- [9] BOUMA A H, KUENEN P H, SHEPARD F P. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- [10] STOW D A V, SHANMUGAM G. Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments [J]. Sedimentary Geology, 1980, 25(1/2): 23-42.
- [11] PIPER D J W. Turbidite muds and silts on deep sea fans and abyssal plains [M]//STANLEY D J, KELLING G. Sedimentation in Submarine Canyons, Fans and Trenches. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross, 1978: 163-176.
- [12] KOMAR P D. The hydraulic interpretation of turbidites from their grain sizes and sedimentary structures [M]//STOW D A V. Deep-Water Turbidite Systems. Gent: The International Association of Sedimentologists, 1991: 41-53.
- [13] SUMNER E J, TALLING P J, AMY L A, et al. Facies architecture of individual basin-plain turbidites: Comparison with existing models and implications for flow processes [J]. Sedimentology, 2012, 59(6): 1850-1887.
- [14] TALLING P J, MASSON D G, SUMNER E J, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. Sedimentology, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [15] STOW D A V, BOWEN A J. Origin of lamination in deep sea, fine-grained sediments [J]. Nature, 1978, 274(5669): 324-328.
- [16] JONES K P N, MCCAVE I N, WEAVER P P E. Textural and dispersal patterns of thick mud turbidites from the Madeira Abyssal plain [J]. Marine Geology, 1992, 107(3): 149-173.
- [17] STOW D, SMILLIE Z. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites [J]. Geosciences, 2020, 10(2): 68.
- [18] SANSOM P. Hybrid turbidite-contourite systems of the Tanzanian margin [J]. Petroleum Geoscience, 2018, 24(3): 258-276.
- [19] REBESCO M, HERNÁNDEZ-MOLINA F J, VAN ROOIJ D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. Marine Geology, 2014, 352: 111-154.
- [20] STOW D A V, FAUGÈRES J C, HOWE J A, et al. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: Current state-of-the-art [J]. Geological Society, London, Memoirs, 2002, 22(1): 7-20.
- [21] FAUGÈRES J C, STOW D A V. Bottom-current-controlled sedimentation: A synthesis of the contourite problem [J]. Sedimentary Geology, 1993, 82(1/4): 287-297.
- [22] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples [J]. Science, 2007, 318(5857): 1760-1763.
- [23] SCHIEBER J, SOUTHARD J B. Bedload transport of mud by floccule ripples—direct observation of ripple migration processes and their implications [J]. Geology, 2009, 37(6): 483-486.
- [24] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales [J]. Sedimentary Geology, 2017, 360: 22-34.
- [25] SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, WANG Hongyan, et al. Depositional structures and their reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Energies, 2022, 15(5): 1618.
- [26] 董大忠, 施振生, 孙莎莎, 等. 黑色页岩微裂缝发育控制因素——以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 763-774.
DONG Dazhong, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Factors controlling microfractures in black shale: A case study of

- Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe Profile, Changning area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 763-774.
- [27] 施振生, 赵圣贤, 赵群, 等. 川南地区下古生界五峰组-龙马溪组含气页岩岩心裂缝特征及其页岩气意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1087-1101.
- SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHAO Qun, et al. Fractures in cores from the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin and their implications for shale gas exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1087-1101.
- [28] 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(2): 339-348.
- SHI Zhensheng, QIU Zhen, DONG Dazhong, et al. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 339-348.
- [29] 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等. 四川盆地及周缘志留系龙马溪组一段深层页岩储层特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 66-75.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Characterization and genesis of deep shale reservoirs in the first Member of the Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 66-75.
- [30] 胡宗全, 杜伟, 朱彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1024-1038.
- HU Zongquan, DU Wei, ZHU Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and on its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1024-1038.
- [31] 施振生, 董大忠, 王红岩, 等. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因——以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 829-840.
- SHI Zhensheng, DONG Dazhong, WANG Hongyan, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: A case study of Member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 829-840.
- [32] MIDDLETON G V. Experiments on density and turbidity currents: III. Deposition of sediment [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1967, 4(3): 475-505.
- [33] MCANALLY W H, FRIEDRICHS C, HAMILTON D, et al. Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(1): 9-22.
- [34] TRAN D, STROM K. Suspended clays and silts: Are they Independent or dependent fractions when it comes to settling in a turbulent suspension? [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 138: 81-94.
- [35] STERNBERG R W, BERHANE I, OGSTON A S. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1999, 154(1/4): 43-53.
- [36] COUSSOT P. *Mudflow rheology and dynamics* [M]. London: Routledge, 1997: 272.
- [37] JEONG S W, LOCAT J, LEROUEIL S, et al. Rheological properties of fine-grained sediment: The roles of texture and mineralogy [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(10): 1085-1100.
- [38] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J, et al. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(4): 162-183.
- [39] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J E. Depositional processes, bedform development and hybrid bed formation in rapidly decelerated cohesive (mud-sand) sediment flows [J]. *Sedimentology*, 2011, 58(7): 1953-1987.
- [40] HAMPTON M. Competence of fine-grained debris flows [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1975, 45(4): 834-844.
- [41] CUTHBERTSON A J S, DONG Ping, DAVIES P A. Non-equilibrium flocculation characteristics of fine-grained sediments in grid-generated turbulent flow [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(4): 447-460.
- [42] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279-297.
- [43] MACQUAKER J H S, BENTLEY S J, BOHACS K M. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions [J]. *Geology*, 2010, 38(10): 947-950.
- [44] BENNETT M R, DOYLE P, MATHER A E. Dropstones: Their origin and significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 121(3/4): 331-339.
- [45] SCHIEBER J. Mud re-distribution in epicontinental basins-Exploring likely processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 119-133.
- [46] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models [J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460-488.
- [47] MCCAIVE I N, JONES K P N. Deposition of ungraded muds from high-density non-turbulent turbidity currents [J]. *Nature*, 1988, 333(6170): 250-252.
- [48] NORMARK W R, PIPER D J W, POSAMENTIER H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees [J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1/3): 23-58.
- [49] BOULESTEIX K, POYATOS-MORÉ M, HODGSON D M, et al. Fringe or background: Characterizing deep-water mudstones

- beyond the basin-floor fan sandstone pinchout [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(12): 1678–1705.
- [50] PIPER D J W. Turbidite origin of some laminated mudstones [J]. *Geological Magazine*, 1972, 109(2): 115–126.
- [51] STOW D A V, BOWEN A J. A physical model for the transport and sorting of fine-grained sediment by turbidity currents [J]. *Sedimentology*, 1980, 27(1): 31–46.
- [52] STOW D A V. Fine-grained sediments in deep water: An overview of processes and facies models [J]. *Geo-Marine Letters*, 1985, 5(1): 17–23.
- [53] STOW D A V, FAUGÈRES J C. Chapter 13 contourite facies and the facies model [J]. *Developments in Sedimentology*, 2008, 60: 223–256.
- [54] STOW D A V, LOVELL J P B. Contourites: Their recognition in modern and ancient sediments [J]. *Earth-Science Reviews*, 1979, 14(3): 251–291.
- [55] STOW D A V, HUC A Y, BERTRAND P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 491–498.
- [56] 管全中, 董大忠, 张华玲, 等. 富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制——以四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 700–709.
- GUAN Quanzhong, DONG Dazhong, ZHANG Hualing, et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 700–709.
- [57] 卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 等. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系 [J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 226–236.
- LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, et al. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 226–236.
- [58] 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组有机质类型与有机孔配置的放射虫硅质页岩岩石学证据 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5): 12–22.
- ZHOU Xiaofeng, GUO Wei, LI Xizhe, et al. Mutual relation between organic matter types and pores with petrological evidence of radiolarian siliceous shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(5): 12–22.
- [59] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 377–386.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 377–386.
- [60] SHI Zhensheng, WANG Hongyan, SUN Shasha, et al. Graptolite zone calibrated stratigraphy and topography of the Late Ordovician–Early Silurian Wufeng-Lungmachi shale in Upper Yangtze area, South China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(3): 213.
- [61] MACQUAKER J H S, KELLER M A, DAVIES S J. Algal blooms and “marine snow”: Mechanisms that enhance preservation of organic carbon in ancient fine-grained sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 934–942.
- [62] ZOU Caineng, QIU Zhen, POULTON S W, et al. Ocean euxinia and climate change “double whammy” drove the Late Ordovician mass extinction [J]. *Geology*, 2018, 46(6): 535–538.
- [63] SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Mineralogy and geochemistry of the Upper Ordovician and Lower Silurian Wufeng-Longmaxi shale on the Yangtze platform, south China: Implications for provenance analysis and shale gas sweet-spot interval [J]. *Minerals*, 2022, 12(10): 1190.
- [64] 王红岩, 施振生, 孙莎莎. 四川盆地及周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩生物地层及其储集层特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 879–890.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shale in the Sichuan Basin and surrounding areas, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 879–890.

(编辑 梁 慧)