

文章编号: 1000-0747(2018)02-0339-10 DOI: 10.11698/PED.2018.02.18

四川盆地巫溪2井龙马溪组含气页岩 细粒沉积纹层特征

施振生^{1,2}, 邱振^{1,2}, 董大忠^{1,2}, 卢斌^{1,2}, 梁萍萍^{1,2}, 张梦琪¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 河北廊坊 065007; 2. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007)

基金项目: 国家自然科学基金“扬子地区奥陶纪—志留纪转折期火山灰沉积与有机质富集关系探讨”(41602119);

国家自然科学基金“晚三叠世四川盆地不同类型三角洲内部构型及成因模式”(41572079)

摘要: 基于多种分析测试资料, 以四川盆地巫溪2井志留系龙马溪组为例, 确定其含气页岩纹层组成、结构、构造及纹层类型。巫溪2井志留系龙马溪组共发育富有机质、含有机质、黏土质和粉砂质4类纹层, 形成2类纹层组和5类层。随深度变浅, 4类纹层 TOC 值依次降低, 黏土矿物含量增加, 脆性矿物含量轻微降低, 这与沉积时期陆源碎屑供给逐渐增加、古水动力增强、水体含氧量增加有关。志留系龙马溪组一段 1—3 小层以富有机质纹层、富有机质+含有机质纹层组及富有机质层为主, 沉积期水体缺氧, 古水动力弱, 龙马溪组一段 4 小层富有机质纹层、含有机质纹层和黏土质纹层均发育, 水体含氧量增加, 古水动力增强, 龙马溪组一段 1—3 小层为目前页岩气勘探开发“甜点”井段及最佳钻井目标层位。图 5 表 3 参 43

关键词: 四川盆地; 龙马溪组; 细粒沉积; 含气页岩; 纹层; 巫溪2井

中图分类号: TE122 文献标识码: A

Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China

SHI Zhensheng^{1,2}, QIU Zhen^{1,2}, DONG Dazhong^{1,2}, LU Bin^{1,2}, LIANG Pingping^{1,2}, ZHANG Mengqi¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China;

2. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang 065007, China)

Abstract: Based on various test data, the composition, texture, structure and lamina types of gas-bearing shale were determined based on Well Wuxi 2 of the Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin. Four types of laminae, namely organic-rich laminae, organic-bearing laminae, clay laminae and silty laminae, are developed in the Longmaxi Formation of Well Wuxi 2, and they form 2 kinds of lamina set and 5 kinds of beds. Because of increasing supply of terrigenous clastics and enhancing hydrodynamics and associated oxygen levels, the TOC content and brittle mineral reduces and clay mineral content increases gradually as the depth becomes shallow. Organic-rich laminae, organic-rich + organic-bearing lamina set and organic-rich bed dominate the beds 1-3 of Member 1 of the Longmaxi Formation, suggesting anoxic and weak water hydraulic depositional setting. Bed 4 is dominated by organic-rich laminae, organic-bearing laminae and silty laminae, suggesting increased oxygen-bearing and hydraulic level. Beds 1-3 are the best interval and drilling target of shale gas exploration and development.

Key words: Sichuan Basin; Longmaxi Formation; fine-grained sediment; shale gas; lamina; Well Wuxi 2

引用: 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.

0 引言

细粒沉积纹层不仅反映页岩储集层微观结构与储

集性能, 而且直接影响水平井体积压裂裂缝扩展规律及压裂效果^[1-3]。在细粒沉积纹层研究中, 国外学者提取了纹层形态、连续性与几何关系等关键属性^[4]; 国内

学者更强调纹层矿物组成、粒度变化、界面接触关系与纹层组合等属性^[5-10]；研究方法方面，目前认为应以露头、岩心和薄片描述为基础，通过各种实验手段和方法，开展综合分析^[4]；在成因机制方面，主要有藻类季节性勃发^[8,11]、碳酸盐纹层与化学作用、生物化学作用^[12-13]以及陆源季节性输入等^[5-10]。

通过四川盆地东北缘巫溪 2 井志留系龙马溪组 130 余米岩心描述及 483 块样品 X 衍射全岩、X 衍射黏土矿物、常规电子扫描电镜、场发射电子扫描电镜等综合分析，确定含气页岩纹层组成、结构和构造，以期为提炼纹层关键属性、创建相应研究方法提供素材，并明确其地质意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

巫溪 2 井位于四川盆地东北缘，其奥陶系五峰组—志留系龙马溪组发育大套黑色页岩（见图 1）。五峰组与下伏宝塔组或临湘组呈不整合接触；龙马溪组与下伏五峰组整合接触，与上覆石牛栏组、小河坝组或梁山组角度不整合接触，由下至上分为龙一段和龙二段，龙一段分为龙一₁亚段和龙一₂亚段，龙一₁亚段细分出 4 个小层^[14]。龙马溪组龙一段为黑色、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。

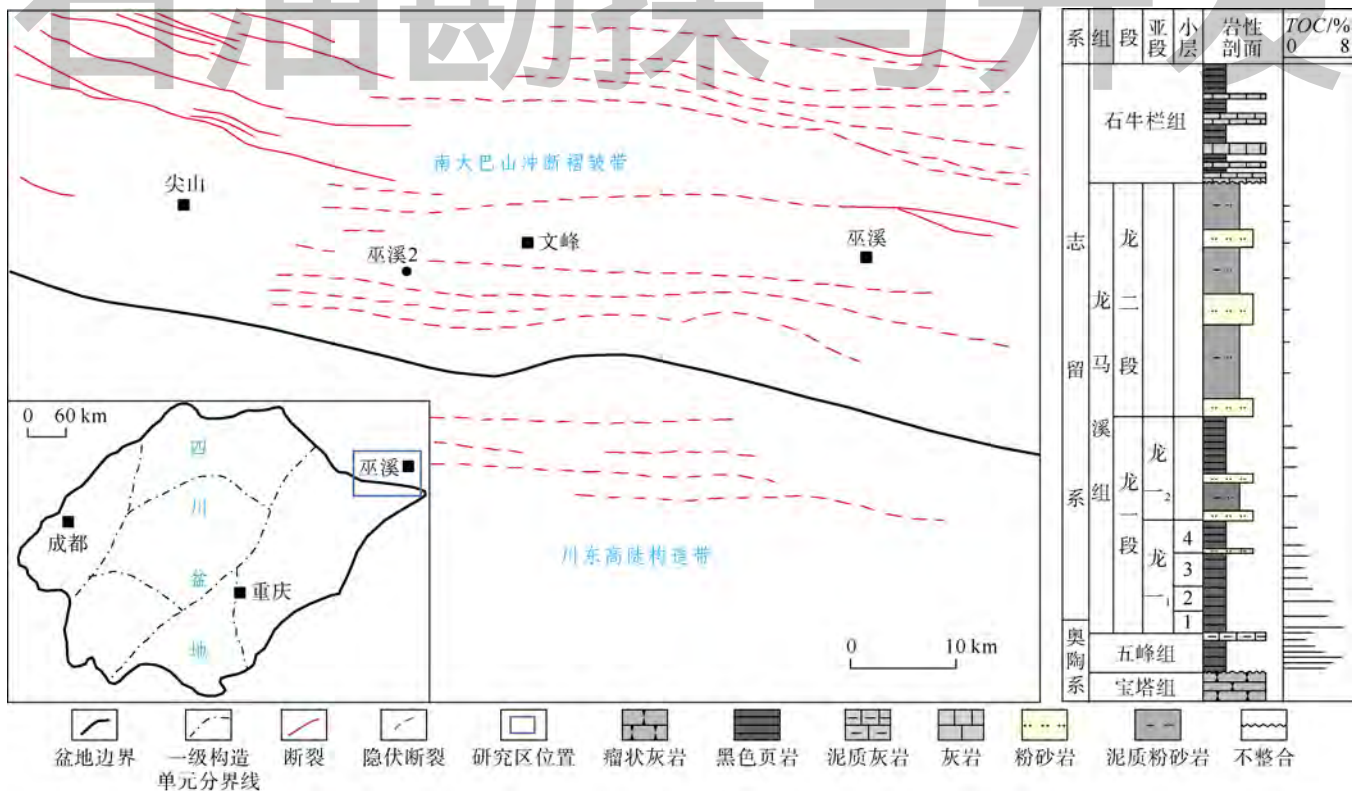


图 1 研究区构造位置及地层综合柱状图（据文献[15]修改和补充）

四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组形成于华南盆地消亡和南华造山带形成阶段，该时期扬子板块进入前陆盆地构造演化阶段，为半闭塞滞流海盆，盆地基底东南高北低，海域自东南向北逐渐变深^[14]。

1.2 实验方法

研究样品来自巫溪 2 井龙马溪组岩心，取样井深为 1 500.9~1 630.5 m，分析样品 483 块次，通过提取关键属性，识别纹层、纹层组和层，开展系统研究，分析地质意义。纹层结构和构造通过岩心描述和岩石薄片观察确定。通过 X 衍射全岩、X 衍射黏土矿物、

常规电子扫描电镜等确定矿物组成。有机质类型通过光片分析确定，并通过感应炉或岩石热解分析获得有机碳含量（TOC 值）。在感应炉分析之前，用酸去除样品中的碳酸盐。

不同分析项目对样品规格的要求有所差异。制作大薄片样品要求直径不小于 8 cm。X 衍射全岩和 X 衍射黏土矿物分析样品要求为粉末，样品质量分别不低于 20 g 和 50 g。场发射电子扫描电镜分析样品直径不小于 20 mm，垂直和平行层面切制，制成薄片（20~25 μm），并进行氩离子抛光。有机质光片分析用于确

定有机质类型，样品直径要求不小于8 cm；有机碳分析样品为粉末，质量不低于100 g。

1.3 纹层研究方法

层序地层学中地层单元等级从小到大可划分为纹层、纹层组、层、层组、准层序、准层序组、层序7个级别。纹层研究首先要识别纹层、纹层组和层，然后提取纹层组成、结构和构造等关键属性，最后明确纹层组和层的组成、结构和构造。单个纹层研究包括组成、结构和构造3个方面（见表1）。纹层组成关键属性是无机矿物、有机质、孔隙和颗粒类型。无机矿物研究关键是确定各无机矿物类型及相对含量，并探

讨其成因^[16-17]。有机质可分为陆源有机质和内源有机质，研究重点是确定有机质类型、丰度与成熟度。细粒沉积以纳米孔隙为主，研究关键是确定孔隙类型、孔隙结构与孔隙度。颗粒类型分为简单颗粒和复合颗粒，复合颗粒包括絮凝颗粒^[18]、泥质内碎屑^[19]、岩屑^[20]、有机质-黏土矿物集合体及浮游动物粪球粒等^[11,21-37]。露头 and 岩心观察阶段，可通过肉眼观察法（颜色、断口、光泽度、硬度）和盐酸法初步判断碎屑矿物组成。室内分析要借助场发射电子扫描电镜、常规电子扫描电镜、能谱、阴极发光等手段来确定碎屑矿物组成、有机质、孔隙和颗粒类型。

表1 细粒沉积纹层关键属性

组成单元	研究项目	关键属性	研究内容	研究方法
纹层	组成	无机矿物 有机质 孔隙 颗粒类型	矿物类型、相对含量 有机质类型、丰度和成熟度 孔隙类型、孔隙结构和孔隙度 简单颗粒、复合颗粒	野外阶段：盐酸法、肉眼观察法 室内阶段：常规扫描电镜、能谱、阴极发光、场发射电子扫描电镜、感应炉、岩石热解
	结构	颗粒粒径	细、中、粗	野外阶段：刻痕法 室内阶段：场发射电子扫描电镜
	构造	纹层形态 连续性 叠置关系	板状、弯曲状、波状 连续型、断续型 平行、非平行	野外阶段：肉眼观察 室内阶段：大薄片观察
纹层组	组成	纹层组成	各纹层相对含量与变化	室内阶段：X衍射全岩、X衍射黏土矿物、大薄片
	结构	颗粒粒径	细、中、粗	野外阶段：刻痕法 室内阶段：场发射电子扫描电镜
	构造	界面形态 连续性 叠置关系 粒序	板状、弯曲状、波状 连续型、断续型 平行、非平行 正递变、反递变、均质状	野外阶段：肉眼观察 室内阶段：大薄片观察
层	组成	纹层或纹层组组成	各纹层或纹层组相对含量与变化	室内阶段：X衍射全岩、X衍射黏土矿物、大薄片
	结构	颗粒粒径	细、中、粗	野外阶段：刻痕法 室内阶段：场发射电子扫描电镜
	构造	纹层组耦合 界面形态 界面清晰性	相似耦合、相关耦合 板状、弯曲状、波状 清晰、欠清晰	野外阶段：肉眼观察 室内阶段：大薄片观察

纹层结构关键属性是颗粒粒径（见表1）。根据Lazar的划分标准^[4]，细泥岩粒径小于8 μm，黏土矿物含量相对较高；中泥岩粒径8~32 μm，碎屑矿物含量增加；粗泥岩粒径32.0~62.5 μm，以粉砂级碎屑颗粒为主。露头和岩心分析阶段主要通过刻痕法^[4]确定粒径。室内分析阶段，要借助于场发射电子扫描电镜，观察颗粒外部形态和内部构成，判断颗粒类型。

纹层构造关键属性包括纹层形态、连续性和叠置关系（见表1）。纹层形态有板状、弯曲状和波状^[4]。纹层形态与流体性质、水动力条件及沉降方式等有关：板状常形成于较强的单向水流条件或静水悬浮沉降条件；弯曲状常与单向水流底载荷搬运或波浪振荡有关，水体能量较高；波状常与波浪振荡流有关，水流能量相

对中等至较低。纹层连续性分为连续型和断续型2类，其形成可能与沉积作用空间稳定性有关。多个纹层发育平行和非平行2种叠置关系，平行叠置纹层顶、底界面平行、不相交，非平行叠置纹层顶、底界面相交。叠置关系反映水流流向和能量在时间和空间上的变化。

纹层组组成关键属性是纹层组成，结构关键属性是粒径，构造关键属性是界面形态、连续性、叠置关系和粒序（见表1）。界面形态有板状、弯曲状和波状，连续性有连续型和断续型，叠置关系有平行和非平行，粒序有正递变、反递变和均质状3种类型^[5,21]。正递变形成多与浊流、等深流及底流搬运有关；反递变形成多与气候周期性变化有关；均质纹层分原生均质纹层和次生均质纹层，原生均质纹层形成与悬浮沉降及快

速沉降有关,次生均质纹层形成多与生物扰动及成岩作用有关。

层组成关键属性是纹层或纹层组组成,结构关键属性是颗粒粒径,构造关键属性有纹层组耦合、界面形态和界面清晰性(见表1)。纹层组耦合分相似耦合和相关耦合,相似耦合表现为各纹层或纹层组组成、结构和构造特征基本一致,相关耦合表现为各纹层或纹层组性质差异,但其间具备成因联系。层界面形态分为板状、弯曲状和波状,界面清晰性分为清晰和欠清晰2种,上下层之间形成条件差异较大时常发育清晰界面,上下层形成条件相近时发育欠清晰界面,生物扰动也可造成界面清晰性变差。

2 巫溪2井龙马溪组纹层

2.1 沉积组成

细粒沉积有碎屑矿物、生物碎屑、有机质,这些矿物构成多种颗粒类型,碎屑矿物含量93%,生物碎屑含量3%,有机质含量为4%(见表2)。碎屑矿物主要有石英、黏土矿物、碳酸盐矿物、长石和硫化物,

局部见硬石膏、萤石及磷灰岩。硫化物主要为黄铁矿,其中,草莓状黄铁矿发育,直径为1~10 μm。生物碎屑有笔石、放射虫(见图2a)和硅质海绵骨针(见图2b)等。笔石沿层面分布,龙马溪组发育9个笔石带^[38-43]。放射虫多被硅质充填(见图2c),硅质可见被碳酸盐矿物交代,少数被黄铁矿(见图2d)和有机质充填。海绵骨针扫描电镜下形状平直,内部常发育大量自生钽长石(见图2e)。有机质有分散有机质和有形有机质。有形有机质显微组分为镜质体(见图2f)和丝质体。有机质以“海洋雪”、粪球粒和层状产出,局部富集成层。

颗粒类型有简单颗粒(见图3a)和复合颗粒(见表2)。复合颗粒分粪球粒、有机质-黏土矿物集合体(见图3b)、内碎屑(见图3c)、泥岩岩屑(见图3d)和絮凝颗粒(见图3e、图3f)。有机质-黏土矿物集合体含水量与絮凝颗粒相似^[21],内碎屑成岩作用过程中常脱水形成压平状,并沿着其他颗粒发生弯曲^[24-26],泥岩岩屑与基质性质差异明显,呈现明显的支撑性质或造成周围泥质发生弯曲。

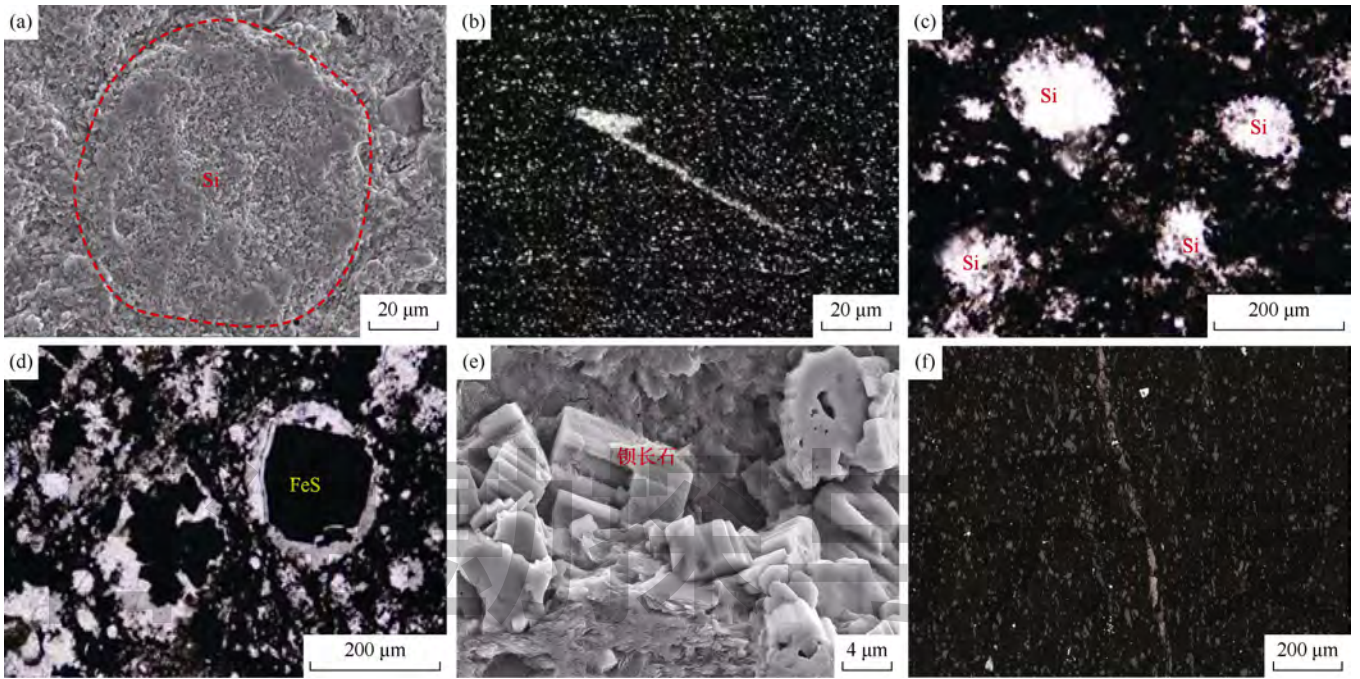
表2 巫溪2井龙马溪组细粒沉积组成

纹层组成关键属性	特征及分布
碎屑矿物(93%)	石英:含量为碎屑矿物的51%,周边常发生蚀变黏土化 黏土矿物:含量为碎屑矿物的31%,主要为伊利石(80%)、绿泥石(6%)、伊/蒙混层(12%)和高岭石(2%) 碳酸盐矿物:含量为碎屑矿物的7.8%,主要为方解石(铁方解石)(2.5%)、白云石(铁白云石)(5%)等 长石:含量为碎屑矿物的7.2%,以钾长石为主(约占6.3%),斜长石少量(0.9%) 硫化物:含量为碎屑矿物的3%,主要为黄铁矿,多为他形一半自形立方体,也可见自形立方体状
生物碎屑(3%)	笔石:含量为生物碎屑的97% 放射虫:含量为生物碎屑的2%,薄片下多为圆形,直径0.003~0.300 mm 硅质海绵骨针:含量为生物碎屑的1%,大小为几十微米至几毫米,形态多样,纵切面多平直,横切面形状不规则
有机质(4%)	分散有机质:无定形有机质,含沥青。沥青含量约占岩石成分的1%~2%,一般为黄灰色、蓝灰色,显多色性,强非均质性,偏光色(灰白色—蓝灰—黑),反射率低,单偏光为低—中突起,无固定外形 有形有机质:显微组分为镜质体、丝质体。镜质体含量约占岩石成分的1%~2%,一般为灰—浅灰色,反射率中,单偏光为低—中突起,长条形、团状或不规则形,表面光滑,具较明显的半棱角状边界。丝质体含量约1%~2%,一般为白—黄白色,单偏光下突起高,长条形、弓形、团状或不规则形,具较明显的棱角状边界
颗粒类型	简单颗粒:由石英、长石或方解石等单矿物颗粒组成,局部发育丰富的磷灰石 复合颗粒: ①粪球粒,椭圆状,由分散的无定形有机质、黏土级颗粒和黄铁矿等组成,粒径大于10 μm。多个粪球粒可形成团块状集合体,直径可达200 μm,顺层分布 ②有机质-黏土矿物集合体,由有机质、石英、长石、黄铁矿等组成,呈团块状或层状分布,粒径大小不一,外形不规则 ③内碎屑,常具锥形边缘,直径大于25 μm ④泥岩岩屑,呈片状,内部可见清晰纹层 ⑤絮凝颗粒,呈絮状构成单颗粒或其他复合颗粒的基质,呈无定形状分布

2.2 纹层组成、结构和构造

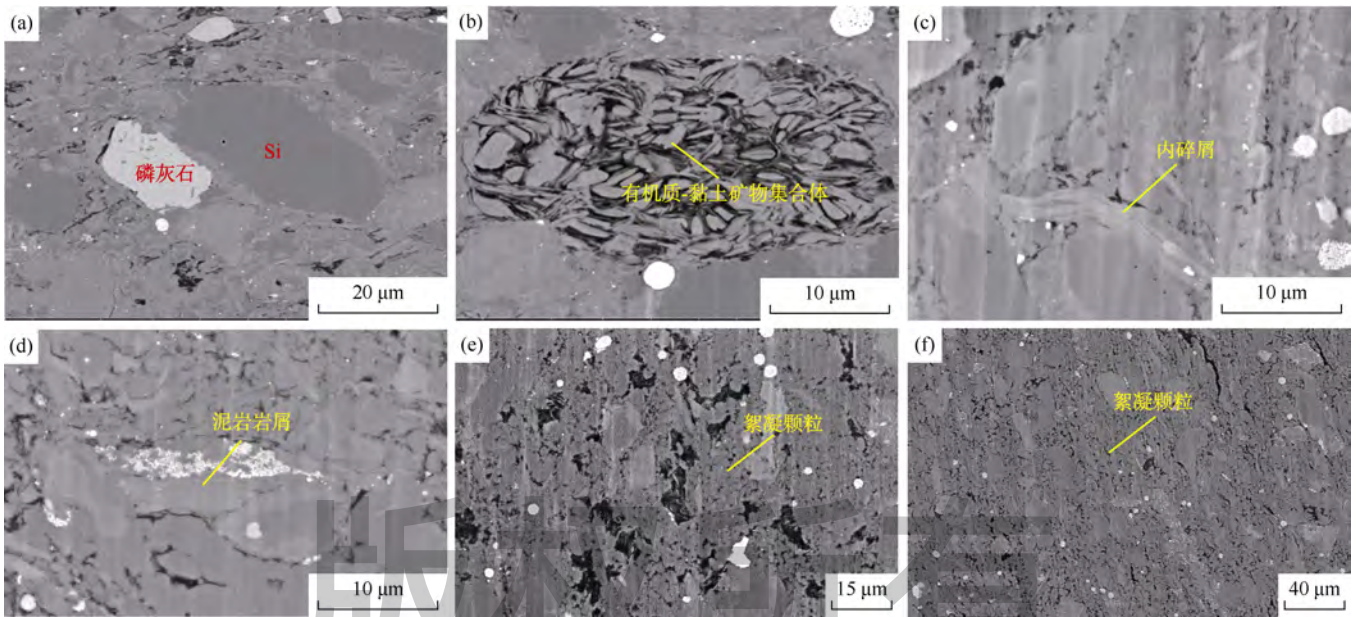
纹层类型有富有机质纹层、含有机质纹层、黏土质纹层和粉砂质纹层(见表3)。富有机质纹层单层厚度为0.1~0.6 mm,多纹层相互叠置,形成界面不清晰的富有机质层(见图4a),也可与含有机质纹层叠置,构成反递变层(见图4b)。含有机质纹层单层厚度0.1~1.0 mm,

个别达1 mm,其中有机质呈块状或絮状分布,多个纹层相互叠置,形成界面不清晰的含有机质层(见图4c),也可与粉砂质纹层(见图4d)互层,形成界面清晰的含有机质+粉砂质纹层组(见图4e)。粉砂质纹层厚度0.02~0.10 mm,一般为0.05 mm,常与含有机质纹层互层,形成界面清晰的砂泥薄互层纹层组或层(见图4e)。



(a) 1 620 m, 疑似放射虫切面, 圆形轮廓, 被硅质 (Si) 充填, 常规扫描电镜照片; (b) 1 571 m, 硅质海绵骨针, 正交偏光; (c) 1 625 m, 放射虫被硅质 (Si) 充填, 单偏光; (d) 1 630 m, 放射虫被黄铁矿 (FeS) 充填, 单偏光; (e) 1 571 m, 自生钡长石发育, 常规扫描电镜照片; (f) 1 622 m, 浅灰色长条形镜质体, 光片

图2 巫溪2井龙马溪组生物碎屑、有机质组分照片



(a) 1 570 m, 石英颗粒 (Si) 和磷灰石; (b) 1 570 m, 有机质-黏土矿物集合体; (c) 1 577 m, 内碎屑; (d) 1 618.5 m, 泥岩岩屑; (e) 1 622.3 m, 絮凝颗粒; (f) 1 623.5 m, 絮凝颗粒

图3 巫溪2井龙马溪组场发射扫描电镜照片显示颗粒类型

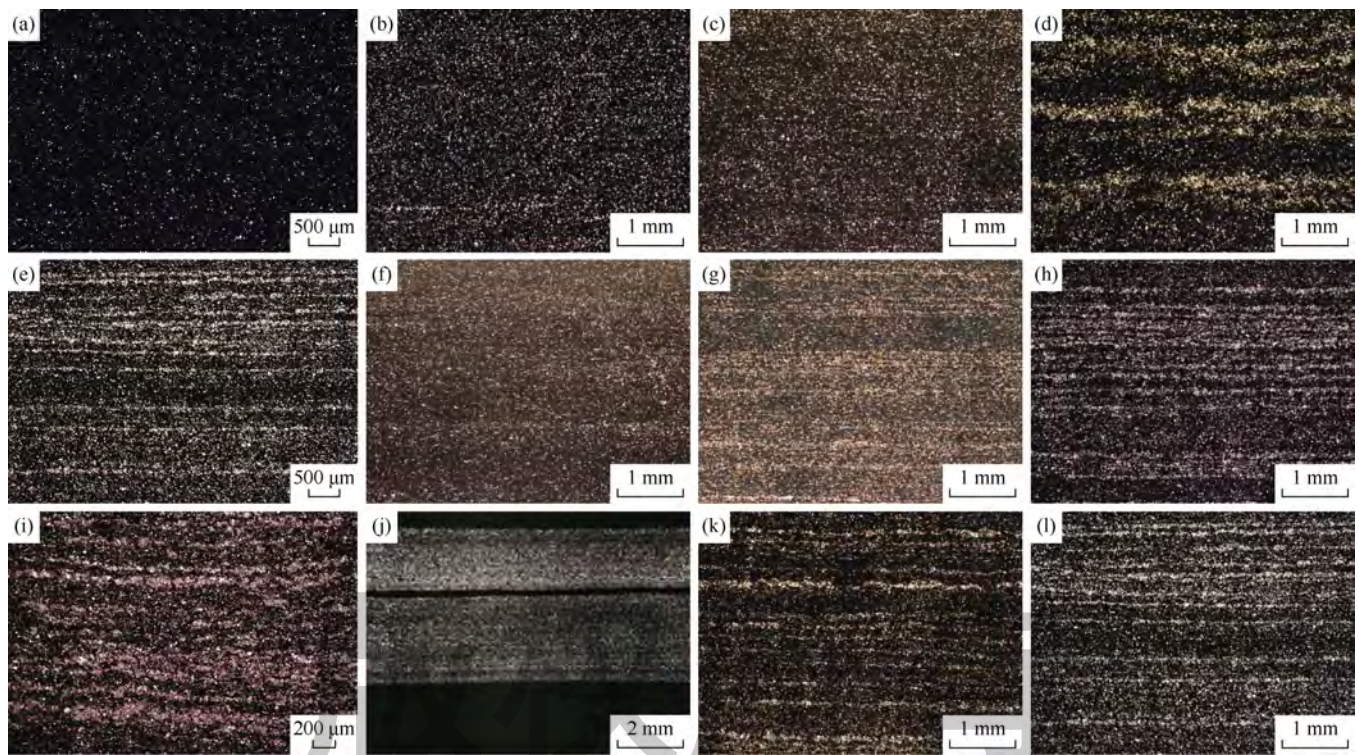
2.3 纹层组和层组成、结构和构造

纹层组有2类(见表3), 富有有机质+含有有机质纹层组(见图4f)和含有有机质+粉砂质纹层组(见图4g—图4i)。富有有机质+含有有机质纹层组层厚1~2 mm, 含

有机质+粉砂质纹层组在显微镜下呈现亮暗纹层相间, 可细分为稀疏型和密集型。稀疏型中含有有机质纹层厚度为0.1~1.0 mm, 一般为0.8 mm, 粉砂质含量较高, 分选性较差, 大小混杂, 而粉砂质纹层厚度为0.1~

表3 巫溪2井龙马溪组细粒沉积纹层关键属性

地层单元	类型	特征	
纹层	富有机质	组成:黏土矿物(20%~30%)、其他碎屑矿物(70%~80%)、有机质(4%~8%)和生物碎屑(3%)等 结构:细粒为主;构造:连续或断续板状、平行	
	含有机质	组成:黏土矿物(30%~40%)、其他碎屑矿物(60%~70%)、有机质(2%~4%)和生物碎屑(3%~5%)等 结构:细粒为主,中泥增加;构造:连续或断续板状、平行	
	黏土质	组成:黏土矿物(40%~60%)、其他碎屑矿物(40%~60%)、有机质(小于2%)和生物碎屑(1%~3%)等 结构:中粒为主;构造:连续或断续板状、平行	
	粉砂质	组成:粉砂级石英(30%~40%)、长石(30%~40%)和碳酸盐矿物(20%~40%) 结构:粗粒;构造:单纹层呈透镜状或线状,局部发育波状,连续或断续,纹层平行或非平行叠置	
纹层组	富有机质+含有机质	组成:富有机质纹层与含有机质纹层互层 界面形态:板状平直,界面上下颜色和组成差异小;界面连续性:界面连续;叠置关系:单纹层组内富有机质纹层位于下部,含有机质纹层位于上部,有机质多呈脉状或透镜状分布;粒度变化:反递变,下部有机质含量高,上部粉砂质含量高	
	含有机质+粉砂质	稀疏型	组成:含有机质纹层和粉砂质纹层互层,由下至上,粉砂质纹层数增加,含有机质纹层数减少 界面形态:弯曲状;界面连续性:断续状;叠置关系:平行或非平行,含有机质纹层与粉砂质纹层厚度比8~10;粒度变化:由下至上,含有机质纹层厚度减薄,含有机质纹层与粉砂质纹层厚度比减小
		密集型	界面形态:板状、平行,连续或断续;界面连续性:连续或断续;叠置关系:平行或非平行;粒度变化:由下至上,含有机质纹层厚度减薄,含有机质纹层与粉砂质纹层厚度比减小
层	富有机质层	多个富有机质纹层叠合,细粒为主,相似耦合,层界面呈板状、平行、连续,层界面不清晰	
	含有机质层	多个含有机质纹层叠合,中粒和细粒为主,相似耦合,层界面呈板状、平行、连续,层界面清晰	
	砂泥薄互层	2类纹层组组成,中泥岩和粗泥岩,相关耦合,层界面平直、板状、连续、平行或非平行,层界面清晰	
	生物碎屑层	生物碎屑(40%~80%)和黏土矿物(20%~60%)组成,相似耦合,层界面平直、板状、平行,层界面清晰	
	黄铁矿层	黏土矿物(80%~90%)和黄铁矿(5%),相似耦合,层界面平直板状、连续、平行,层界面清晰	



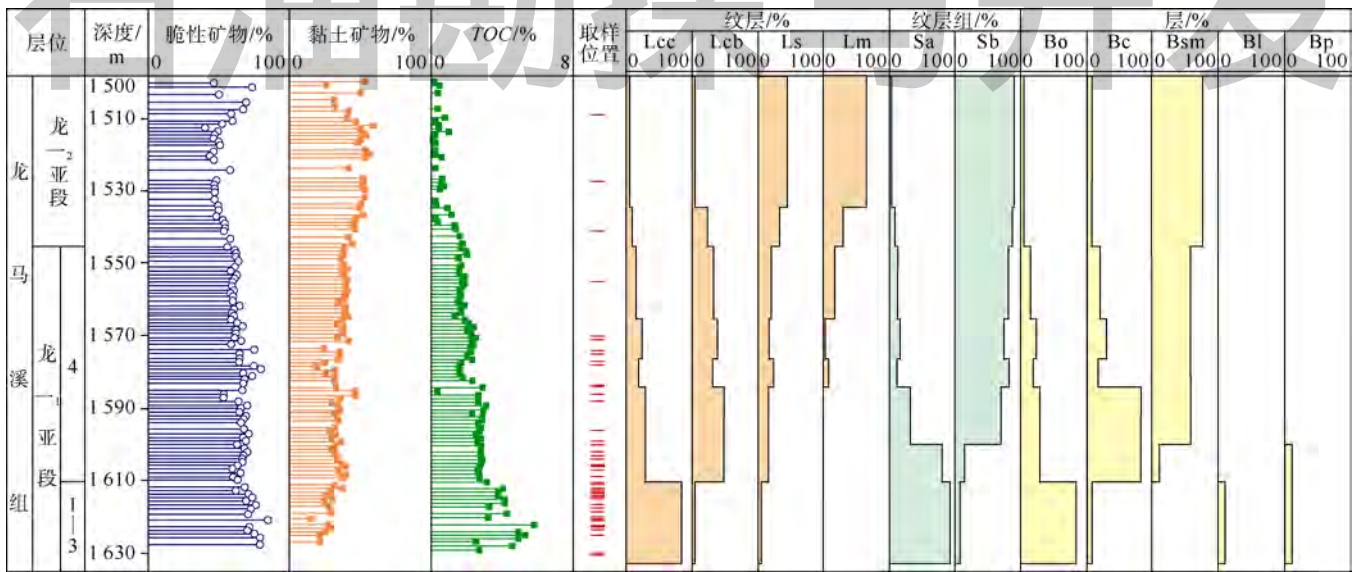
(a) 1 623.5 m,富有机质纹层,多个纹层叠置成富有机质层,单偏光;(b) 1 617.5m,含有机质纹层,富有机质纹层与含有机质纹层叠置,单偏光;(c) 1 613 m,含有机质纹层,界面欠清晰,多个纹层叠置成含有机质层,单偏光;(d) 1 600 m,粉砂质纹层,呈不连续平行板状,单偏光;(e) 1 577 m,含有机质+粉砂质纹层组,呈不连续平行板状,界面不平整,单偏光;(f) 1 630.5 m,富有机质+含有机质纹层组,单偏光;(g) 1 574 m,含有机质+粉砂质纹层组,多个纹层组叠置形成砂泥互层,单偏光;(h) 1 575 m,含有机质+粉砂质纹层组,多个纹层组叠置形成砂泥互层,单偏光;(i) 1 630 m,含有机质+粉砂质纹层组,多个纹层组叠置形成砂泥互层,单偏光;(j) 1 570 m,生物碎屑层,单偏光;(k) 1 578 m,含有机质+粉砂质纹层组,多个纹层组叠置形成砂泥薄互层,界面清晰,单偏光;(l) 1 577 m,含有机质+粉砂质纹层组,多个纹层组叠置形成砂泥薄互层,层界面清晰,单偏光

图4 巫溪2井龙马溪组显微镜下纹层、纹层组和层

0.3 mm，呈脉状、透镜状或线状分布，含有机质纹层与粉砂质纹层厚度比为8~10。密集型中含有机质纹层厚度0.06~0.30 mm，粉砂质纹层厚0.03~0.10 mm，含有机质纹层与粉砂质纹层厚度比为2~3。龙马溪组发育5类层（见表3），即富有机质层（见图4a）、含有机质层（见图4c）、生物碎屑层（见图4j）、砂泥薄互层（见图4k、图4l）和黄铁矿层。砂泥薄互层界面上下常发育上超、下超和削截等现象（见图4k、图4l）。生物碎屑层单层厚度6~9 mm，生物碎屑有放射虫，椭圆状，呈粒度双众数分布。黄铁矿层厚0.5~1.5 cm，一般为1.0 cm，黄铁矿富集，呈斑点状、层状分布。

2.4 纹层纵向演化

巫溪2井龙马溪组由深至浅，脆性矿物含量轻微降低，黏土矿物含量逐渐增加，TOC值逐渐降低（见图5）。龙一₁亚段脆性矿物含量为60%~80%，黏土矿物含量为20%~40%，TOC值为2%~7%。龙一₂亚段脆性矿物含量为40%~60%，黏土矿物含量为40%~60%，TOC值小于2%。龙一₁亚段内部，脆性矿物含量、黏土矿物和TOC值也呈现规律性变化，其中，龙一₁亚段1—3小层脆性矿物含量70%~80%，黏土矿物含量为20%~40%，TOC值为4%~7%，龙一₁亚段4小层脆性矿物含量为60%~70%，黏土矿物含量为30%~40%，TOC值为2%~4%。



Lcc—富有机质纹层；Lcb—含有机质纹层；Lm—黏土质纹层；Ls—粉砂质纹层；Sa—富有机质+含有机质纹层组；Sb—含有机质+粉砂质纹层组；Bo—富有机质层；Bc—含有机质层；Bsm—砂泥薄互层；Bl—生物碎屑层；Bp—黄铁矿层

图5 巫溪2井龙马溪组矿物组成与纹层分布

巫溪2井龙马溪组纹层类型纵向上呈规律性变化（见图5）。龙一₁亚段1—3小层富有机质纹层约占90%，含有机质纹层和粉砂质纹层各占5%；龙一₁亚段4小层含有机质纹层约占55%，富有机质纹层和粉砂质纹层分别占20%，黏土质纹层占5%；龙一₂亚段黏土质纹层占60%，粉砂质纹层占30%，富有机质纹层和含有机质纹层各占5%。纹层组类型中，龙一₁亚段1—3小层富有机质+含有机质纹层组占90%，含有机质+粉砂质纹层组占10%；龙一₁亚段4小层富有机质+含有机质纹层组约占15%，含有机质+粉砂质纹层组约占85%；龙一₂亚段富有机质+含有机质纹层组约占5%，含有机质+粉砂质纹层组占95%。层类型中，龙一₁亚段1—3小层富有机质层占75%，含有机质层

占5%，生物碎屑层和黄铁矿层分别占10%；龙一₁亚段4小层下部含有机质层占70%，富有机质层占20%，砂泥薄互层占10%；龙一₁亚段4小层上部砂泥薄互层占60%；龙一₂亚段砂泥薄互层占约80%，富有机质层和含有机质层分别占10%。

3 地质意义

3.1 古物源与古环境

前人通过大量地球化学分析认为，龙马溪组底部水体处于缺氧状态，向上由于海平面下降，水体含氧量有所增加^[38]。纹层特征进一步表明，巫溪2井龙一₁亚段1—3小层沉积期水体缺氧，古水动力弱，但由下至上古水动力逐渐增强，水体含氧量增加，证据

有：①有机质含量高，有机质-黏土矿物以集体或粪球粒的形式富集，表明沉积期水动力弱，水体含氧量低，沉积物以悬浮沉降为主；②富有机质纹层界面不清晰，粉砂质纹层含量低，表明古水动力弱、陆源碎屑供给少；③黄铁矿层的出现及生物扰动缺失，表明水体处于缺氧还原状态；④局部出现顺层状杂乱堆积生物碎屑层，可能反映周期性风暴作用。龙一₁亚段4小层沉积期水体含氧量进一步增加，古水动力进一步增强，证据有：①草莓状黄铁矿大量发育及生物扰动缺失，表明水体仍处于周期性分层、缺氧状态；②粉砂级颗粒和粉砂质纹层增加（见图4k、图4l），表明陆源碎屑供给增加，古水动力增强；③含有机质纹层、富有机质纹层和粉砂质纹层互层，表明古水动力条件周期性变化；④粉砂质纹层多呈透镜状、波状甚至交叉，表明水体流速较大，水动力较强。龙一₂亚段沉积期水体含氧量明显增加，古水动力和物源供给进一步增强，证据有：①粉砂质纹层和黏土质纹层互层，表现古水动力条件周期性变化；②粉砂质纹层呈连续或断续的线状，甚至出现交错纹层（见图4k、图4l），表明水体流速较高，碎屑颗粒以底载荷形式搬运堆积；③有机质含量进一步降低（见图5），粉砂质含量进一步增高，表明沉积速率增大，陆源碎屑供给进一步增加。整体上，巫溪2井在龙马溪组沉积期处于深水陆棚沉积环境，底部水体的还原环境有利于有机质产生与保存。

3.2 储集层特征与“甜点”井段

纹层组成和结构研究中，页岩有机质含量、含气性、孔隙度等分析可为“甜点”井段储集层评价提供定量指标。同时，微观非均质性影响油气渗流能力和渗流路径，也影响页岩储集层“甜点”井段的选择^[39-43]。纹层构造研究通过分析纹层、纹层组和层纵向叠置和空间匹配关系，明确各纹层界面展布和匹配关系，从而明确储集层微观非均质性。

综合研究，确定巫溪2井龙一₁亚段1—3小层为“甜点”井段。原因有2：①龙一₁亚段1—3小层储集层高有机质含量、高含气性、高孔隙度，其TOC值为4%~7%、含气量为5%~8%、孔隙度为6%，而龙一₁亚段4小层和龙一₂亚段TOC值小于4%、含气量为5%~8%、孔隙度为6%。②龙一₁亚段1—3小层纹层纵向叠置和空间匹配关系简单、非均质性弱，而龙一₁亚段4小层和龙一₂亚段纹层纵向叠置和空间匹配关系复杂、非均质性强。

3.3 储集层可压裂性与最佳钻井目标

可压裂性是确定页岩储集层最佳钻井目标的关键

因素，其受脆性矿物含量、硅质含量和纹层构造控制。脆性矿物含量越高，页岩储集层可压裂性越好；硅质含量越高，顺层缝和非顺层缝越发育。纹层构造中，界面连续性、形态和几何关系影响页岩压裂过程中裂缝扩展规律。平直、连续和清晰的界面，压裂过程中易造成应力集中，从而形成单一缝网。非平直、断续、不清晰的纹层界面，压裂过程应力不易集中，有利于形成复杂缝网体系。同时，纹层界面的角度也影响页岩的岩石力学性质，在岩样单轴受压直到破坏的过程中，随页岩层理倾角的增大，其单轴抗压强度线性增大。

综合研究，确定巫溪2井龙一₁亚段1—3小层为最佳钻井目标。原因有2：①龙一₁亚段1—3小层脆性矿物含量高（70%~80%），可压裂性强；②龙一₁亚段1—3小层纹层构造复杂，纹层界面多为断续、波状不清晰界面，压裂过程中易形成复杂缝网，可压性强，易于形成复杂缝网体系。

4 结论

巫溪2井志留系龙马溪组纹层组成包括碎屑矿物、生物碎屑、有机质等组分，纹层结构有细粒、中粒和粗粒，纹层构造有连续和断续，板状、透镜状、线状或波状，平行或非平行。发育4类纹层、2类纹层组和5类层，随深度的变浅纹层TOC值逐渐降低、黏土矿物含量逐渐增加、脆性矿物含量轻微降低，沉积时期陆源碎屑供给逐渐增加，古水动力增强，水体含氧量增加。龙一₁亚段1—3小层以富有机质纹层、富有机质+含有机质纹层组及富有机质层为主，沉积期水体缺氧，古水动力弱；龙一₁亚段4小层富有机质纹层、含有机质纹层和黏土质纹层均发育，水体含氧量增加，古水动力增强。龙一₁亚段1—3小层为目前页岩气勘探开发“甜点”井段及最佳钻井目标。

参考文献：

- [1] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 90-96.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, WANG Haitao, et al. Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 90-96.
- [2] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228-237.
HENG Shuai, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228-237.

- [3] 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 Dan, HU Ruiling, GAO Wei, et al. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 523-528.
- [4] 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: 230-246.
- [5] 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(3): 666-671.
WANG Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang Depression[J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666-671.
- [6] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [7] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 198-208.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, WANG Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 198-208.
- [8] 刘传联, 徐金鲤, 汪品先. 藻类勃发: 湖相油源岩形成的一种重要机制[J]. 地质论评, 2001, 47(2): 207-210.
LIU Chuanlian, XU Jinli, WANG Pinxian. Algal blooms: The primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks[J]. Geological Review, 2001, 47(2): 207-210.
- [9] 王慧中, 梅洪明. 东营凹陷沙三下亚段油页岩中古湖泊学信息[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 315-319.
WANG Huizhong, MEI Hongming. Paleolimnological information from the oil shale in the Lower part of Sha 3 Formation, in Dongying Depression[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(3): 315-319.
- [10] 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(1): 38-47.
LI Tingting, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. Characteristics and research significance of fine lacustrine sedimentary rock laminations of Xigou Formation in Qingxi Depression of Jiuquan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 38-47.
- [11] MACQUAKER J H, 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: 934-942.
- [12] ANDERSON R Y, DEAN W E. Lacustrine varve formation through time[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1988, 62(1): 215-235.
- [13] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset[J]. Sedimentology, 1967, 8: 7-26.
- [14] 赵圣贤, 杨跃明, 张鉴, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩小层划分与储层精细对比[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 470-487.
ZHANG Shengxian, YANG Yueming, ZHANG Jian, et al. Micro-layers division and fine reservoirs contrast of Lower Silurian Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin, SW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 470-487.
- [15] 周名魁, 王汝植, 李志明, 等. 中国南方奥陶—志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-111.
ZHOU Mingkui, WANG Ruzhi, LI Zhiming, et al. Lithofacies paleogeography and mineralization of Ordovician and Silurian in South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-111.
- [16] 梁峰, 拜文华, 邹才能, 等. 渝东北地区巫溪2井页岩气富集模式及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 350-358.
LIANG Feng, BAI Wenhua, ZOU Caineng, et al. Shale enrichment pattern and exploration significance of Well Wuxi-2 in northeast Chongqing, NE Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 350-358.
- [17] APLIN A C, MACQUAKER J H. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [18] MILLIKEN K L. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(12): 1185-1199.
- [19] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples[J]. Science, 2007, 318(5857): 1760-1763.
- [20] SCHIEBER J, SOUTHARD J B, SCHIMMELMANN A. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds: Interpreting the rock record in the light of recent flume experiments[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80(1): 119-128.
- [21] SCHIEBER J. Experimental testing of the transport-durability of shale lithics and its implications for interpreting the rock record[J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 162-169.
- [22] MACQUAKER J H, GAWTHORPE R L, TAYLOR K G, et al. Heterogeneity, stacking patterns and sequence stratigraphic interpretation in distal mudstone successions: Examples from the Kimmeridge Clay Formation, UK[J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(1): 163-186.
- [23] SCHIEBER J. Mud re-distribution in epicontinental basins: Exploring likely processes[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71: 119-133.
- [24] 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.
- [25] SCHIEBER J, YAWAR Z. A new twist on mud deposition: Mud ripples in experiment and rock record[J]. *The Sedimentary Record*, 2009, 7(2): 4-8.
- [26] CAMP W K, EGENHOFF S, SCHIEBER J, et al. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks: Discussion[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(1): 1-5.
- [27] MACQUAKER J H, ADAMS A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73: 735-744.
- [28] EMEIS K C, WEISSERT H. Tethyan-Mediterranean organic carbon-rich sediments from Mesozoic black shales to sapropels[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 247-266.
- [29] SCHIEBER J. Reverse engineering mother nature: Shale sedimentology from an experimental perspective[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 238(1/2): 1-22.
- [30] MACQUAKER J H, BOHACS K M. On the accumulation of mud[J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1734-1735.
- [31] SCHIEBER J, SOUTHARD J B, KISSLING P, et al. Experimental deposition of carbonate mud from moving suspensions: Importance of flocculation and implications for modern and ancient carbonate mud deposition[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(1): 1026-1032.
- [32] WIGNALL P B, MACQUAKER J H, GAWTHORPE R L. Mudstone lithofacies in the Kimmeridge Clay Formation, Wessex Basin, southern England: Implications for the origin and controls of the distribution of mudstones: Discussion and reply[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 927-932.
- [33] HAMMES U. Sequence stratigraphy and core facies of the Haynesville mudstone, East Texas[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 38(12): 1125-1129.
- [34] FIGUEIREDO J J, HODGSON D M, FLINT S S, et al. Depositional environments and sequence stratigraphy of an exhumed Permian mudstone-dominated submarine slope succession, Karoo Basin, South Africa[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(1): 97-118.
- [35] BOHACS K M, LAZAR O R, DEMKO T M. Parasequence types in shelfal mudstone strata: Quantitative observations of lithofacies and stacking patterns, and conceptual link to modern depositional regimes[J]. *Geology*, 2014, 42(2): 131-134.
- [36] TERWINDT J H, BREUSERS H N C. Experiments on the origin of flaser, lenticular and sand-clay alternating bedding[J]. *Sedimentology*, 1972, 19(1/2): 85-98.
- [37] PLINT A G, MACQUAKER J H. Bedload transport of mud across a wide, storm-influenced ramp: Cenomanian-Turonian Kaskapau Formation, western Canada Foreland Basin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(12): 801-822.
- [38] 邱振, 江增光, 董大忠, 等. 巫溪地区五峰组—龙马溪组页岩有机质沉积模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1134-1143.
- QIU Zhen, JIANG Zengguang, DONG Dazhong, et al. Organic matter enrichment model of the shale in Wufeng-Longmachi Formation of Wuxi area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 1134-1143.
- [39] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641-653.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-653.
- [40] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 689-701.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I)[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 689-701.
- [41] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 689-694.
- CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Research status and trends of shale gas in China[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(4): 689-694.
- [42] 刘树根, 马文辛, JANSAN L, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- LIU Shugen, MA Wenxin, JANSAN L, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, east Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [43] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 238-246.
- QIU Zhen, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 238-246.

第一作者简介: 施振生(1976-), 男, 安徽枞阳人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事细粒沉积学地质理论技术研究。地址: 河北省廊坊市万庄镇44号信箱, 中国石油勘探开发研究院非常规研究所, 邮政编码: 065007。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn

联系作者简介: 邱振(1984-), 男, 安徽亳州人, 博士, 中国石油勘探开发研究院工程师, 主要从事沉积地质及非常规油气方面的研究工作。地址: 河北省廊坊市万庄44号信箱, 中国石油勘探开发研究院非常规研究所, 邮政编码: 065007。E-mail: qiuzhen316@163.com; Qiuzhen@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-10-25 修回日期: 2018-01-03

(编辑 高日丽 王大锐)