

引用格式:王红岩,董大忠,施振生,等.川南海相页岩岩石相类型及“甜点”分布——以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):68-81.

WANG Hongyan, DONG Dazhong, SHI Zhensheng, et al. Lithfacies and “sweet spot” interval of marine shale in southern Sichuan: A case study of Shuanghe Outcrop in Wufeng-Longmaxi Formation, Changning[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 68-81.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.006

川南海相页岩岩石相类型及“甜点”分布

——以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例

王红岩^{1,2},董大忠^{1,2},施振生^{1,2},邱振^{1,2},卢斌^{1,2},邵男³,孙莎莎^{1,2},张素荣^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 国家能源页岩气研发(实验)中心,北京 100083;

3. 中国石油天然气股份有限公司科技管理部,北京 100007)

摘要:综合应用笔石带标定、全薄片照相、常规薄片光学显微镜观察、TOC(总有机碳含量)测试、X-衍射全岩组分测试及场发射扫描电镜观察等手段,系统研究了长宁页岩气示范区长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩的物质组成及分布、层理特征、物性及岩石相。研究表明,川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩主要为硅质页岩、钙质页岩和混合页岩,石英、碳酸钙和黏土矿物平均值分别为42.5%、37.4%和14.9%,含有少量斜长石(平均2.5%)、黄铁矿(平均2.7%)和有机质(平均值5.6%)。黑色页岩发育泥纹层和粉砂纹层,2类纹层可构成递变型水平层理、均质层理、条带状粉砂型水平层理、砂泥递变型水平层理和砂泥薄互层型水平层理5类层理类型。五峰组发育递变层水平层理和均质层理,龙马溪组发育条带状粉砂型水平层理、砂泥递变型水平层理和砂泥薄互层型水平层理。综合页岩矿物组成和层理类型,共划分出11类岩石相类型。长宁双河剖面“甜点”段分布于LM1段,发育条带状粉砂型水平层理页岩岩石相。“甜点”段具有高TOC含量和高硅质含量、高孔隙度、高渗透率及高水平渗透率/垂直渗透率比值、高有机质孔含量等特征。

关键词:层理;岩石相;黑色页岩;龙马溪组;五峰组;四川盆地

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Lithfacies and “sweet spot” interval of marine shale in southern Sichuan: A case study of Shuanghe Outcrop in Wufeng-Longmaxi Formation, Changning

WANG Hongyan^{1,2}, DONG Dazhong^{1,2}, SHI Zhensheng^{1,2}, QIU Zhen^{1,2}, LU Bin^{1,2}, SHAO Nan³, SUN Shasha^{1,2}, ZHANG Surong^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. National Energy Shale Gas R&D(Experiment) Center, Beijing 100083, China;

3. Technology Administration Department, PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China)

Abstract: With the comprehensive application of the photography of full thin section, the optical microscope observation of small thin sections, TOC test, whole rocks X-ray composition test, physical property analysis and the observation of field emission scanning electron microscope, Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop in Changning area are analyzed systematically. The results show that the black shale of Wufeng-Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop of Changning area in southern Sichuan Basin is mainly siliceous shale, calcareous shale and mixed shale, and the average values of quartz, calcium carbonate and clay minerals are 42.5%, 37.4% and 14.9%, respectively, containing a small amount of plagioclase (average 2.5%), pyrite (average 2.7%) and organic matter (average 5.6%). The black shale develops mud laminae and silty laminae, and these two types of laminae are composed of five bedding types: graded horizontal bedding, homogeneous bedding,

收稿日期:2021-06-30。

第一作者简介:王红岩(1971—),男,博士、教授级高级工程师,非常规油气地质。地址:北京市海淀区学院路20号北厂区1号楼,邮政编码:100083。E-mail:wanghongyan69@petrochina.com.cn

基金项目:中国石油科技部重大专项“海相页岩气勘探开发技术研究”(2021DJ1901)。

banded silty sand horizontal bedding, sand mud graded horizontal bedding and sand mud thin interbedded horizontal bedding. Progressive horizontal bedding and homogeneity bedding are developed in Wufeng Formation, while strip silty sand horizontal bedding, sand-mud progressive horizontal bedding and sand-mud thin interbedded horizontal bedding are developed in Longmaxi Formation. On the basis of mineral composition and bedding types, eleven types of lithofacies are divided. LM1 member, which is the “sweet spot” interval in Shuanghe Outcrop in Changning area, is characterized by high TOC content, high siliceous content, high porosity, high permeability, high horizontal/vertical permeability ratio and high organic pore content. The strip silty sand horizontal bedding develops here.

Keywords: bedding; lithofacies; black shale; Longmaxi Formation; Wufeng Formation; Sichuan Basin

岩石相确定是建立页岩标型剖面、确定页岩气勘探开发地质“甜点”段的关键。岩石相是解译黑色页岩沉积环境和沉积水动力的一把钥匙^[1-5],同时控制着页岩储层储集空间结构、储集性能、基质渗透率和微裂缝发育特征等^[6]。目前,学术界对黑色页岩岩石相的分类方法^[7-9]进行了系统研究,确定矿物组成、有机质含量、古生物类型^[10]、特殊矿物^[11]、结构^[12]、层理类型^[13]、生物扰动^[2]、颜色、物性与力学性质等^[14]是岩石相分类的关键属性,并认为不同岩石相形成受藻类季节性勃发^[15-17]、碳酸盐纹层与化学作用、生物化学作用^[18]以及陆源季节性输入等影响^[19]。中上扬子地区五峰组—龙马溪组黑色页岩是中国页岩气勘探开发关键层系,针对该套页岩,目前在储层微观结构^[20]、页岩气富集规律与机理^[21-22]等方面研究取得诸多成果。这些研究成果大大丰富了细粒沉积学理论,有效指导了页岩气勘探开发。但在岩石相划分方面,目前均以矿物组分为主^[23-24],沉积构造描述只简单的用“纹层状”来描述,并没有充分考虑页岩层理类型的复杂性和多样性;同时,不同岩石相对页岩气储层的控制等研究也稍显薄弱^[25-26]。该文以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组富有机质页岩段为重点,分析了川南地区五峰组—龙马溪组层序地层格架、物质组成、岩石相类型,从而建立了长宁地区五峰组—龙马溪组黑色富有机质页岩储层特征“铁柱子”,并确定了页岩气勘探的地质“甜点”段。

1 地质背景

中国南方五峰组和龙马溪组黑色页岩广泛发育(图1),时代归属为晚奥陶世凯迪阶、赫南特阶,早志留世鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶。五峰组与下伏临湘组或宝塔组平行不整合接触,龙马溪组与上覆石

牛栏组、小河坝组或梁山组角度不整合接触,五峰组与龙马溪组整合接触^[27]。五峰组下部为大套黑色页岩,夹多层薄层火山灰沉积层;上部为灰岩或泥灰岩,赫南特贝动物群化石丰富。龙马溪组下部为黑色、灰黑色薄层状页岩或块状页岩;上部为灰绿色、黄绿色页岩及砂质页岩,有时夹有粉砂岩或泥质灰岩。龙马溪组可划分为龙一段和龙二段。龙一段以黑色、灰黑色薄层状页岩或块状页岩为主,纹层结构和裂缝发育。龙二段为灰绿色、黄绿色页岩及砂质页岩,有时夹粉砂岩或泥质灰岩,由下至上砂质含量增高,构成向上变粗沉积序列。根据岩性和电性特征,龙一段可划分为龙一₁亚段和龙一₂亚段,龙一₁亚段进一步细分为龙一₁¹⁻⁴4个小层(图2)。

中国南方五峰组—龙马溪组形成于华南盆地消亡和南华造山带形成阶段。中奥陶世之后,除扬子北缘的边缘海仍保持被动大陆边缘性质之外,其他地区明显表现出挤压收缩的构造背景,该时期扬子板块进入前陆盆地演化阶段,中国南方为扬子前陆盆地之隆后盆地一部分。志留纪兰多维列统,南东方向挤压作用增强,中国南方不断抬升,乐山—龙女寺古隆起逐渐扩大,海域缩小海水变浅,沉积分异作用加剧。该时期上扬子地区夹持在川中隆起和黔中—雪峰2大隆起之间(图1),形成半闭塞滞流海盆。盆地基底东南高北低,海域自东南向北逐渐变深^[28]。

长宁双河剖面位于四川省西南部的长宁县双河镇境内(图1),地理坐标为X:18 487 815.57, Y:3 142 572.33,该剖面位于长宁构造背斜顶部。该地区地势南高北低,南部为中低山,中北部为丘陵。该地区属于亚热带湿润性季风气候,温暖湿润,年均气温18.3℃,年均降雨量1 141.7 mm。近年来,由于该地区的修路和采矿活动,五峰组—龙马溪组底部17 m黑色页岩得以出露,其整体呈南北向展布,地层

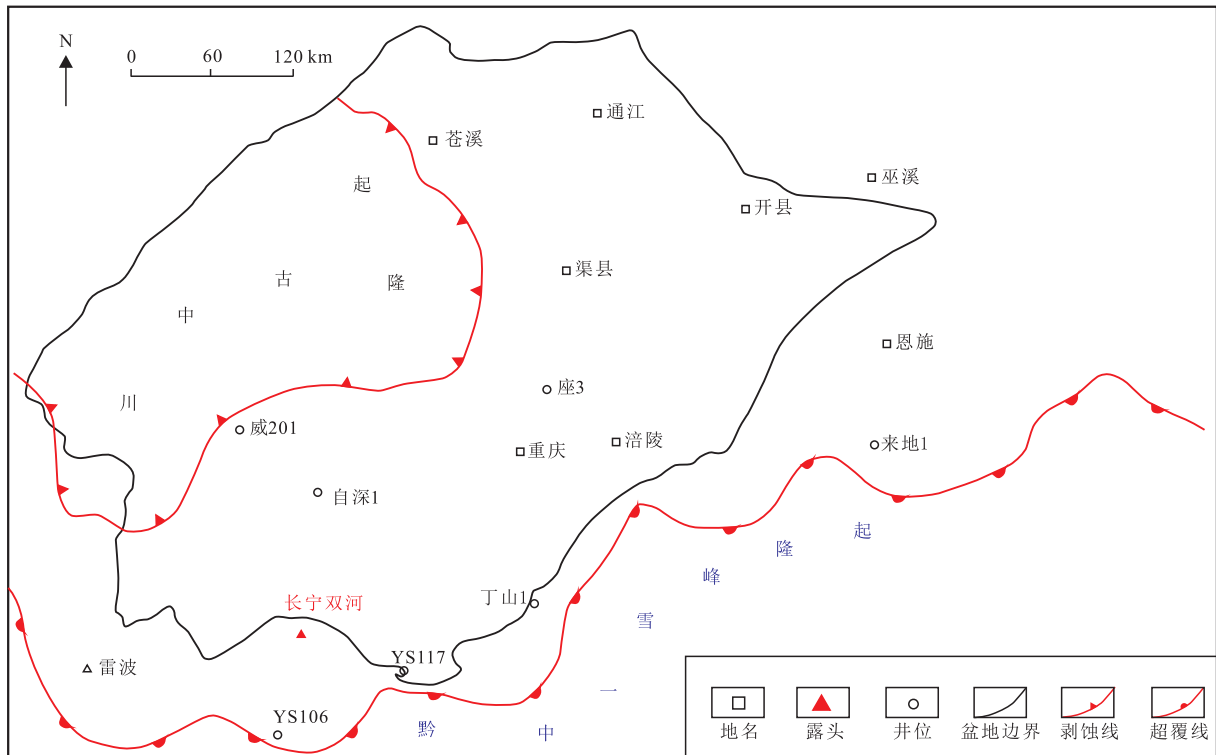


图1 研究区位置及剖面点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of outcrop

倾角约 30° 。该地区钻井资料对比显示,所揭示的17 m黑色页岩段恰是长宁地区目前页岩气勘探开发的目的层段,具有高TOC、高孔隙度、高脆性矿物含量、高含气量等特点。该段奥陶系五峰组出露完整,五峰组底界之上为黑色页岩,底界之下为宝塔组瘤状灰岩,界面为平行不整合接触,志留系龙马溪组只出露下部地层,龙马溪组底界之上为黑色页岩,底界之下为观音桥层介壳灰岩,界面为整合接触(图2)。长宁双河剖面位置双河镇的一条公路附近,交通方便,是研究川南地区五峰组—龙马溪组黑色页岩特征的首选剖面。该次重点研究了奥陶系顶部的五峰组和志留系底部的龙马溪组,该剖面的精细研究可以直接指明长宁地区五峰组—龙马溪组页岩气勘探开发的“甜点段”,并对探讨“甜点段”的成因具有重要意义。

2 露头描述方法与流程

露头描述方法和流程:

1) 由下至上,反复观察、调查和拍照整个剖面。

2) 应用层序地层学研究方法确定层序地层格架,明确储层宏观非均质性。①根据新鲜面岩性、岩相宏观突变、火山灰夹层等标志识别区域不整合面及三级层序地层界面,初步建立岩性地层划分方案;②根据地层界面特征、岩性粒序变化、岩石组成特征、古生物组成特征及旋回性变化,识别单个准层序;③根据多个准层序内部矿物组成、结构及构造特征及厚度纵向演化,分析准层序叠置样式,识别准层序、准层序组、体系域及层序,建立层序地层格架。

3) 系统、连续取样,为开展室内分析提供依据。①由下至上,垂直地层方向连续切取大样,大样样品要求切取2份,一份用于纹层和层理的描述和分析,另一份用于开展各类分析化验,样品宽度不小于8 cm;②系统采集沉积地化分析化验样品,样品分地层及沉积相、储层特征、岩石力学及应力敏感性4个方面。

4) 描述黑色泥岩组成、结构和构造,明确储层微观非均质性。

5) 开展黑色页岩储层特征分析,明确储层储集性能。储层特征包括储层物性及孔隙结构2个方面,

物性分析可通过覆压孔渗、脉冲渗透率等确定,孔隙结构可通过高压压汞、微米CT、纳米CT等确定。该次研究连续取样2份各15.5 m,切割抛光大样15.5 m,

制作岩石大薄片203块、岩石小薄片203块,TOC测试110块次,X-衍射全岩组分测试110块,物性分析78块次,场发射扫描电镜观察样品4块次。

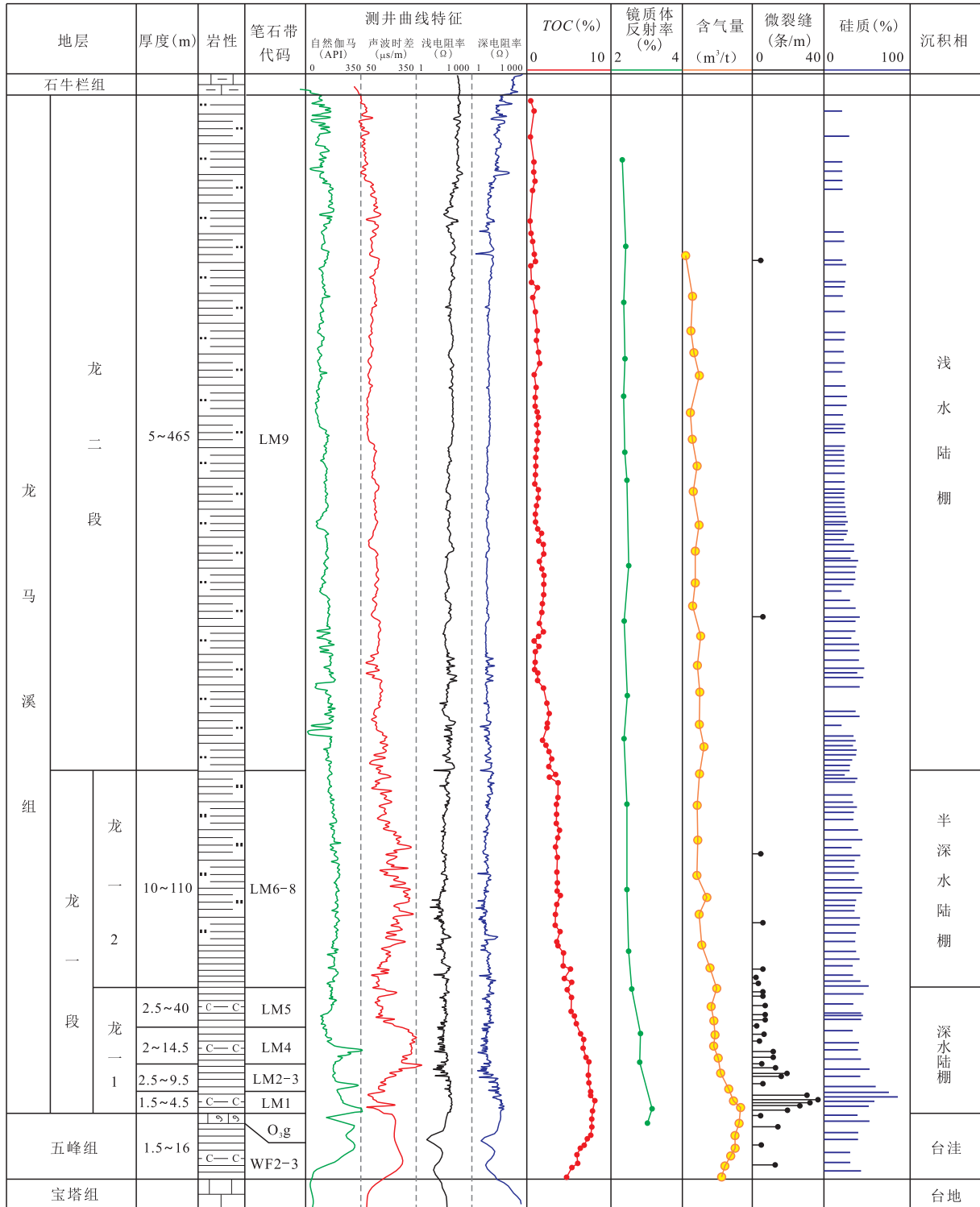


图2 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic histogram of Wufeng-Longmaxi Formations in Sichuan Basin and its periphery

3 主要认识

3.1 地层精细划分

长宁双河剖面五峰组整体为黑色富含笔石页岩,顶底发育厚0.5 m的观音桥层。观音桥层灰岩或泥灰岩沉积为主,富含赫南特贝动物群化石^[29]。五峰组底部黑色页岩段发育笔石带WF1-3,五峰组顶部和观音桥层发育笔石带WF4。五峰组与下伏宝塔组瘤状灰岩平行不整合接触,界面之上发育20 cm古土壤、9.5 m黑色笔石页岩和0.4 m观音桥层含介壳灰岩^[30],发育 *Dicellograptus complanatus* (WF1)、*Dicellograptus complexus* (WF2)、*Paraorthograptus pacificus* (WF3) 和 *Persculptograptus extraordinarius* (WF4)4个笔石带^[31];龙马溪组底界面上下岩性一岩相突变,其上发育7.14 m黑色笔石页岩,发育 *Persculptograptus persculptus* (LM1) 和 *Akidograptus ascensus* (LM2)2个笔石带,LM3及以上层段在本条剖面没有出露^[32](图2)。

笔石带 *Dicellograptus complanatus* (WF1) 主要分子有 *Dicellograptus complanatus*,该剖面化石分子

相对较少;笔石带 *Dicellograptus complexus* (WF2) 特征分子主要有 *Appendispinograptus longispinus*、*Dicellograptus ornatus*、*Dicellograptus complexus* 和 *Amplexograptus latus* 等;笔石带 *Paraorthograptus pacificus*(WF3)特征分子有 *Paraorthograptus pacificus*、*Rectograptus abbreviates*、*Dicellograptus minor* 和 *Tangyagraptus typicus* 等;笔石带 *Persculptograptus extraordinarius* (WF4)特征分子主要为 *Normalograptus extraordinarius* 等。该时期由于全球气候变凉,笔石大量死亡,富含腕足类、壳类的赫南特贝动物群大面积发育。

笔石带 *Persculptograptus persculptus*(LM1)特征分子主要有 *Avitograptus ex gr. avitus*、*Avitograptus avitus* 等;笔石带 *Akidograptus ascensus*(LM2)特征分子包括 *A. ascensus*、*P. praematurus*、*N. anjiensis*、*N. bicaudatus*、*Neodiplograptus modestus*、*Atavograptus atavus* 等。

参考前人研究方法^[33-34],对露头进行详细层序地层学研究。结果表明,该露头可划分出13个准层序组,其中五峰组8个准层序组,龙马溪组发育5个准层序组,每个准层序组内部由下至上页岩粒度由细泥岩变为粗泥岩(图3)。五峰组笔石带WF1对应于准层序组SWF1和SWF2,笔石带WF2对应于准层

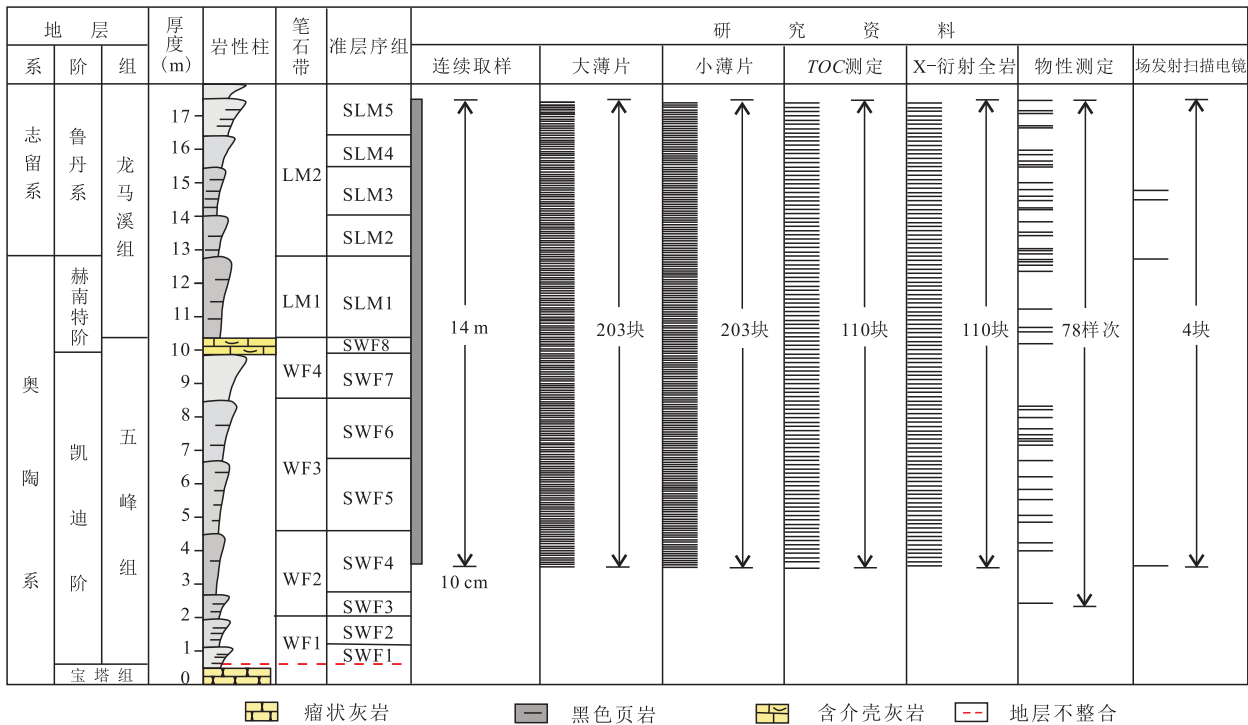


图3 长宁双河剖面五峰组—龙马溪组地层划分及取样位置

Fig. 3 Stratigraphic division and sampling location of Wufeng-Longmaxi Formations in Shuanghe Outcrop, Changning

序组 SWF3 和 SWF4, 笔石带 WF3 对应于准层序组 SWF5 和 SWF6, 笔石带 WF4 对应于准层序组 SWF7 和 SWF8。龙马溪组笔石带 LM1 对应于准层序组 SLM1, 笔石带 LM2 对应于准层序组 SLM2-5。五峰组准层序组 SWF1-4 厚 4 m, SWF5-8 厚 5.9 m, 其顶部观音桥的含介壳灰岩在全球范围内可以对比^[31]。龙马溪组 SLM1-3 厚 5.09 m, SLM4-5 厚 2.05 m, 该剖面龙马溪组上部地层没有揭露。该地区五峰组笔石带 WF1-3 对应于五峰组下部笔石页岩段, 笔石带 WF4

对应于观音桥层。龙马溪组笔石带 LM1 对应于龙一₁¹小层, 笔石带 LM2 对应于龙一₁²小层下部。

3.2 物质组成及分布

110 块样品全岩 X-衍射测试结果表明, 黑色页岩主要碎屑矿物有石英(平均 42.5%)、碳酸盐岩(平均 37.4%)和黏土矿物(平均 14.9%), 次要矿物为斜长石(平均 2.5%)和黄铁矿(平均 2.7%)(图 4)。五峰组内部, 石英含量准层序组 SWF5 最高(平均值

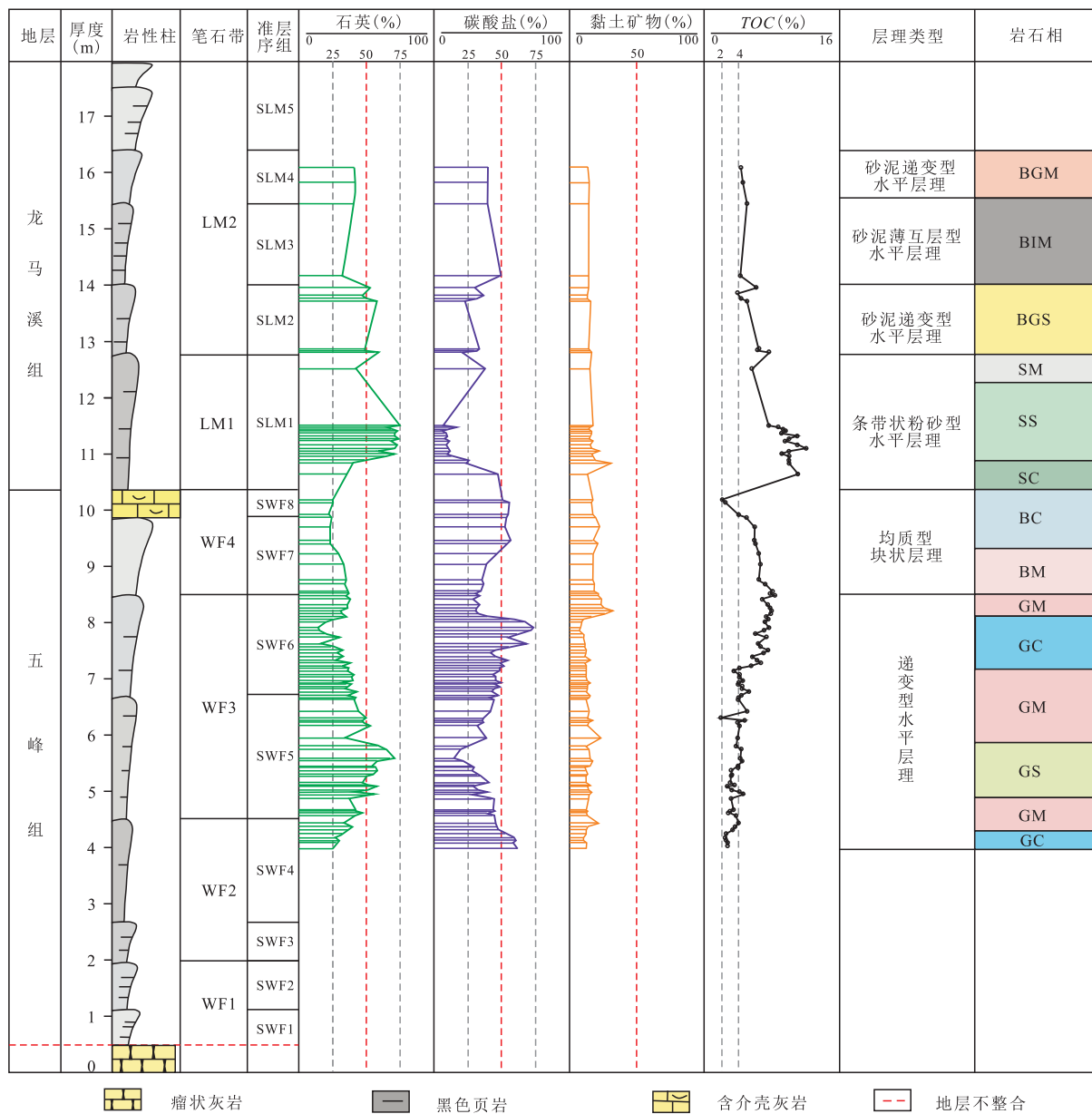


图4 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组物质组成、层理类型及岩石相类型纵向分布(代码含义见正文)

Fig. 4 Longitudinal distribution of material composition, bedding types and lithofacies types of Wufeng–Longmaxi Formations in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

51.13%),SWF8准层序组最低(平均值24%);碳酸盐含量准层序组SWF4(平均值53.63%)和SWF6(平均值52%)最高,准层序组SWF5最低(平均值32.33%);黏土矿物含量平均值为12.75%~18.67%。龙马溪组内部,石英含量准层序组SLM1(平均值63.18%)和SLM2(52.29%)最高,准层序组SLM3最低(平均值32%),碳酸盐含量准层序组SLM3最高(平均值49%),准层序组SLM1最低(平均值13.06%),黏土矿物含量平均值为13.67%~17.19%。

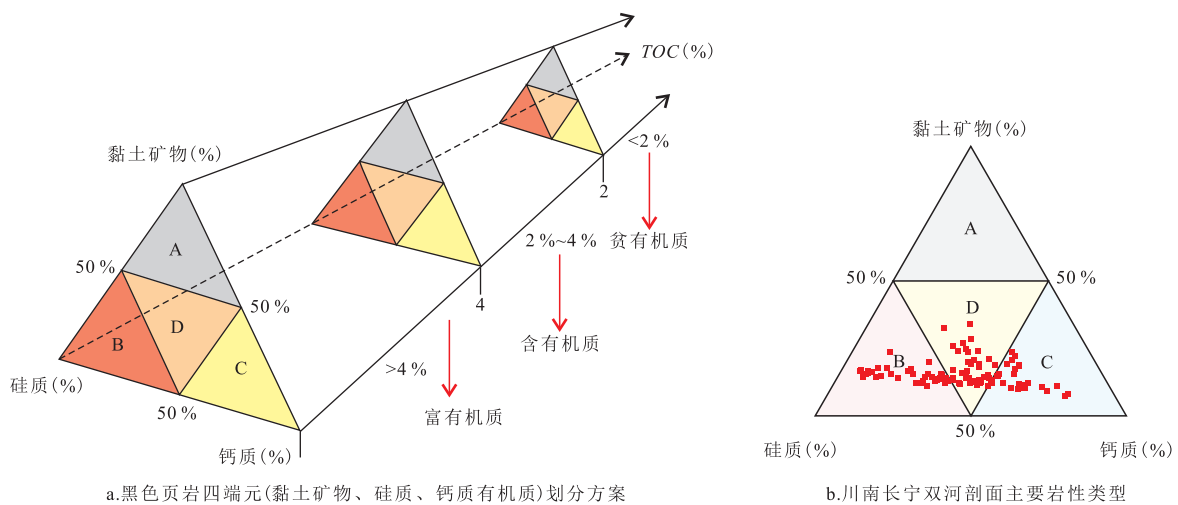
110块样品TOC测试(图4)表明,黑色页岩TOC值1.5%~12%,平均值5.6%。五峰组内部,准层序组SWF6和SWF7的TOC最高,平均值分别为6.1%和6.69%,准层序组SWF4最低,平均值2.17%。龙马溪组内部,准层序组SLM1和SLM2最高,平均值9.54%和5.64%,准层序组SLM3最低,平均值4.2%。

以碎屑矿物碳酸盐、黏土矿物和石英为端元对黑色页岩进行类型划分(图5a)。当某种矿物成分质量大于50%,即以该矿物成分名作为岩性名,若3种主要矿物成分质量均不足50%,即称为混合岩^[9]。钙质页岩中碳酸盐质量大于50%,黏土质页岩中黏土矿物质量大于50%,硅质页岩中石英质量大于50%,混合页岩中3类矿物质量均不足50%。然后参照TOC^[8],进一步将黑色页岩划分为富有机质页岩、含有机质页岩和贫有机质页岩。富有机质页岩TOC>4%,含有机质页岩TOC为2%~4%,贫有机质页岩

TOC<2%。岩性三角图显示,长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩只发育硅质页岩、钙质页岩和混合页岩(图5b)。其中,硅质页岩主要发育于准层序组SWF5和SLM1-2,钙质页岩主要发育于准层序组SWF4和SWF8,其它准层序组主要发育混合页岩。

3.3 层理特征

层理特征是黑色页岩的重要特征,影响着“甜点段”的组成和分布,是“铁柱子”建立的关键^[35]。黑色页岩层理主要由纹层、纹层组、层三级单元组成,多个具有成因联系的纹层构成纹层组,多个具有成因联系的纹层组构成层,层与层之间的组合关系构成层理^[26]。203块全大薄片照相和203块常规薄片正光偏光显微观察表明,长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩发育泥纹层和粉砂纹层(表1、图6)。泥纹层颗粒粒径相对较细,同一层内黏土矿物含量相对较高;粉砂纹层颗粒粒径相对较粗,同一层内硅质和碳酸盐含量相对较高。以4 μm为界,将黑色页岩划分为泥质页岩和粉砂质页岩。泥质页岩粒径小于4 μm颗粒大于50%,粉砂质页岩粒径大于4 μm颗粒大于50%^[9,36]。长宁双河剖面泥纹层粒径小于4 μm颗粒含量大于50%,偏光显微镜下颜色较暗,单层厚度0.03~0.3 mm,主体0.1 mm;粉砂纹层中粒径大于4 μm颗粒含量大于50%,偏光显微镜下颜色较亮,单层厚度约0.05~1 mm,个别达到4 mm。



注: A为黏土质页岩; B为硅质页岩; C为钙质页岩; D为混合质页岩。

图5 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩岩性划分

Fig. 5 Lithologic division of Wufeng-Longmaxi Black shale in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

长宁双河剖面泥纹层可叠置成正递变层、反递变层和均质层3类层^[36-37](表1);粉砂纹层与泥纹层互层叠置成砂泥递变层(分为砂泥正递变层或砂泥反递变层)。单—层厚度2~22 mm,界面多呈连续、板状、平行或连续、波状、平行。正递变层底部碳酸盐或硅质颗粒含量相对较多,上部碳酸盐或硅质含量降低、有机质含量和黏土矿物含量增加(图6a),颜色变深;反递变层底部黏土矿物和有机质含量相对较高,上部碳酸盐或硅质含量增加(图6b),颜色变浅;均质层颗粒粒径和成份均一,颜色一致(图6c)。砂泥正递变层底部碳酸盐或硅质颗粒含量较多,上部碳酸盐或硅质含量降低,颜色变深,有机质含量和黏土矿物含量增加(图6d、图6e);砂泥反递变层与之相反。

纹层和层构成5类层理:递变型水平层理、均质层理、条带状粉砂型水平层理、砂泥递变型水平层理和砂泥薄互层型水平层理(表1)。递变型水平层理由正递变层、反递变层或二者共同构成(图6a、图6b),层厚1~8 mm,层界面不清晰,多呈连续、波状、平行。均质层理由均质层构成,无粒序变化,常含有大量介壳类生物碎屑(图6c)。条带状粉砂型水平层理中粉砂纹层和泥纹层互层,粉砂纹层呈条带

状,厚约0.05 mm,泥纹层多构成均质层,泥纹层与粉砂纹层厚度比值一般大于10(图6d),层界面多为连续、板状、平行,偶见断续、板状、平行。砂泥递变型水平层理厚度2~6 mm(图6e),粉砂纹层和泥纹层构成正递变或反递变,正递变内部,由下至上,亮色颗粒含量降低,反递变内部,由下至上,亮色颗粒含量增加,粉砂纹层与泥纹层界面呈渐变特征(图6d、图6e),界面多呈连续、板状、平行。在砂泥递变型水平层理中,泥纹层与粉砂纹层厚度比值为5~10。砂泥薄互层型水平层理厚度3~5 mm,粉砂纹层和泥纹层互层,泥纹层/粉砂纹层1—5(图6f、图6g)。砂泥递变型水平层理的层界面有连续、板状、平行(图6h),断续、板状、平行(图6i),断续、波状、平行(图6j)3种。

五峰组主要发育泥纹层,龙马溪组泥纹层和粉砂纹层均发育(图6)。显微镜观察结果表明,五峰组,准层序组SWF4发育含有机质碳酸盐泥纹层和含有机质混合泥纹层,准层序组SWF5发育含有机质硅质泥纹层,SWF6发育富有机质碳酸盐泥纹层,SWF7发育富有机质混合泥纹层,SWF8发育含有机质碳酸盐泥纹层。龙马溪组准层序组SLM1—SLM2发育富有机质混合泥纹层和富有机质硅质泥纹层,SLM3—SWF5发育富有机质混合泥纹层。五峰组发育正递

表1 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组层理特征

Table 1 Bedding features of Wufeng-Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

层理类型	类型	组成	粒序	界面特征	分布
纹层	泥纹层	黏土级颗粒大于50%		连续、板状、平行	五峰组—龙马溪组
	粉砂纹层	粉砂级颗粒大于50%		连续、板状、平行 断续、板状、平行 断续、波状、平行	龙马溪组
层	砂泥递变型	泥纹层和粉砂纹层互层	正递变、反递变	连续、板状、平行	龙马溪组
	正递变	泥纹层	正递变	连续、板状、平行 连续、波状、平行	五峰组—龙马溪组
	反递变	泥纹层	反递变		
	均质层	泥纹层	均质		
层理	砂泥薄互层型水平层理	由泥纹层和粉砂纹层薄互层构成,泥纹层与粉砂纹层突变接触,泥纹层/粉砂纹层为1—5	砂泥交互	连续、板状、平行 断续、板状、平行 断续、波状、平行	SLM2—SLM4
	砂泥递变型水平层理	由砂泥递变型水平层理构成,泥纹层/粉砂纹层为5—10	正递变、反递变	连续、板状、平行	SLM1-2, SLM4-5
	条带状粉砂型水平层理	由泥纹层构成,偶夹薄层粉砂纹层,泥纹层/粉砂纹层大于10	均质	连续、板状、平行 断续、板状、平行	SLM1, SLM5
	均质层理	由泥纹层构成	均质		SWF7—SWF8
	递变型水平层理	由正递变或反递变层构成	正递变、反递变	连续、波状、平行	SWF4—SWF7

变、反递变和均质3类层,正递变和反递变层发育于准层序组SWF4-6,均质层发育于SWF7-SWF8。龙马溪组发育砂泥递变层,正递变和反递变层主要发育于准层序组SLM1,砂泥递变层主要发育于SLM2和SLM4。

五峰组—龙马溪组2类纹层5类层构成5种层理类型(表1),即砂泥薄互层型水平层理、砂泥递变型水平层理、条带状粉砂型水平层理、递变型水平层理和均质层理^[36-37]。五峰组发育递变型水平层理和均质层理,龙马溪组发育砂泥递变型水平层理、条带状粉砂型水平层理和砂泥薄互层型水平层理(图7)。五峰组,准层序组SWF4-SWF6主要发育递变型水平层理,SWF7-SWF8主要发育均质层理。龙马溪组,准层序组SLM1主要发育条带状粉砂型水平层理,SLM2和SLM4主要发育砂泥递变型水平层理,SLM3发育砂泥薄互层型水平层理。

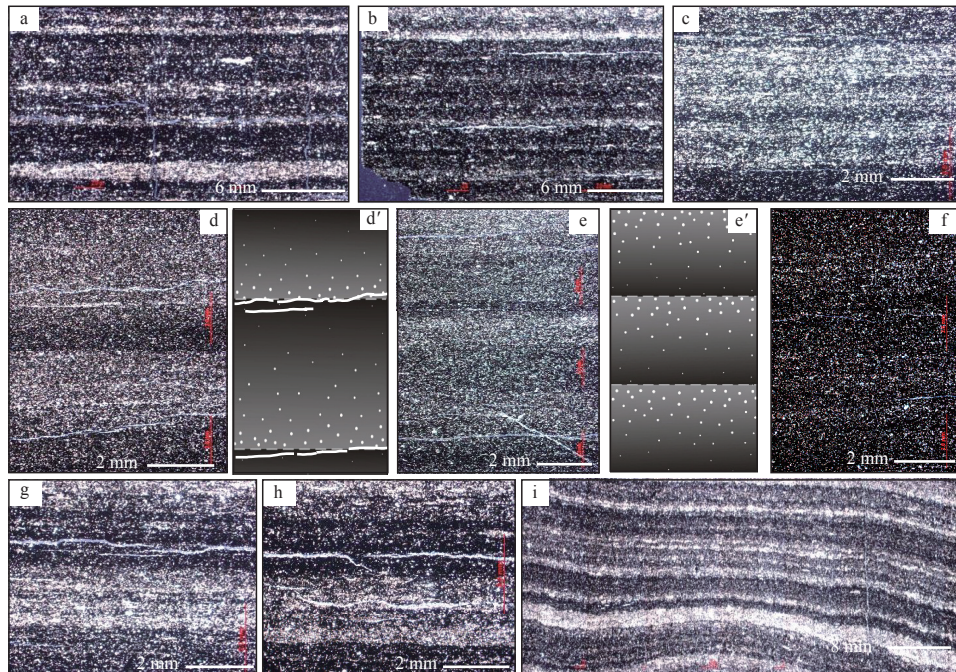
3.4 不同层理页岩孔隙度和渗透率

长宁双河剖面五峰组—龙马溪组条带状粉砂型水平层理页岩和砂泥递变型水平层理页岩孔隙度最

高,砂泥薄互层型水平层理页岩次之(表2)。样品测试结果表明,递变型水平层理页岩水平孔隙度为0.6%~1.47%,垂直孔隙度为0.88%~1.27%,块状层理页岩水平孔隙度为1.16%~4.16%,垂直孔隙度为1.11%~3.17%。条带状粉砂型水平层理页岩水平孔隙度为6.85%~7.26%,垂直孔隙度为6.31%~6.4%,孔隙度值为递变型水平层理页岩的7~8倍,为块状层理页岩的6~7倍。砂泥递变型水平层理页岩水平孔隙度为4.90%~9.35%,垂直孔隙度为4.13%~9.04%,为递变型水平层理页岩的4~5倍,为块状层理页岩的3~4倍。

长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩水平孔隙度稍大于垂直孔隙度,但不同层理稍有差异。除少数外,多数样品水平孔隙度/垂直孔隙度为1.04%~1.68%。整体上,均质型块状层理页岩水平孔隙度/垂直孔隙度最高,为1.05~1.68,递变型水平层理页岩次之,为1.16,条带状粉砂型水平层理页岩、砂泥递变型水平层理页岩和砂泥薄互层型水平层理页岩依次降低,平均值分别为1.11,1.18和0.99。

长宁双河剖面五峰组—龙马溪组条带状粉砂型



注:a.泥纹层构成正递变层;b.泥纹层构成反递变层;c.泥纹层构成均质层;d,d'.泥纹层与粉砂纹层构成砂泥正递变层;e,e'.泥纹层与粉砂纹层构成砂泥反递变层;f.泥纹层与粉砂纹层构成砂泥递变型层;g.泥纹层与粉砂纹层构成砂泥递变型层;h.层界面连续、板状、平行;i.层界面断续、板状、平行。

图6 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组纹层、层和层理的类型

Fig. 6 Types of laminae, stratigraphy and bedding of Wufeng-Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

水平层理页岩水平渗透率/垂直渗透率最大,其次砂泥递变型水平层理页岩和砂泥薄互层型水平层理页岩,递变型水平层理页岩和均质型块状层理页岩水平渗透率/垂直渗透率基本相近(表2)。样品8-31-1

测试结果表明,条带状粉砂型水平层理页岩水平渗透率和垂直渗透率分别为 $0.184\ 285 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.000\ 655 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,两者相差281.35倍,样品9-11-1测试结果表明,条带状粉砂型水平层理页岩水平渗

表2 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组不同岩石相类型孔隙度和渗透率
Table 2 Porosity and permeability of different lithofacies types of Wufeng–Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

岩石相	样品号	孔隙度(%)			渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		
		水平	垂直	水平/垂直	水平	垂直	水平/垂直
条带状粉砂型水平层理	8-31-1	6.85	6.4	1.07	0.184 285	0.000 655	281.35
	9-11-1	7.26	6.31	1.15	0.047 955	0.002 761	17.39
砂泥递变型水平层理	8-10-1	9.35	9.04	1.04	0.223 54	0.025 925	8.62
	8-31-2	5.43	4.13	1.31	0.002 291	0.000 351	6.53
	9-19-2	4.90	5.98	0.82	0.010 954	0.002 876	3.81
砂泥薄互层型水平层理	SLM4-1	4.17	4.21	0.99	0.005 743	0.000 714	8.04
递变型水平层理	4-2-1	1.47	1.27	1.16	0.001 49	0.000 124	12.02
	M001	0.60	0.88	0.68	0.000 931	0.000 575	1.62
均质型块状层理	5-26-2	1.93	1.18	1.68	0.000 313	0.000 364	0.86
	5-29-2	4.16	3.17	1.32	0.000 342	0.000 419	0.82
	SWF6-1-2	2.08	1.73	1.22	0.000 316 9	0.000 316	1.00
	5-34-3	1.16	1.11	1.05	0.000 028	0.000 083	0.34

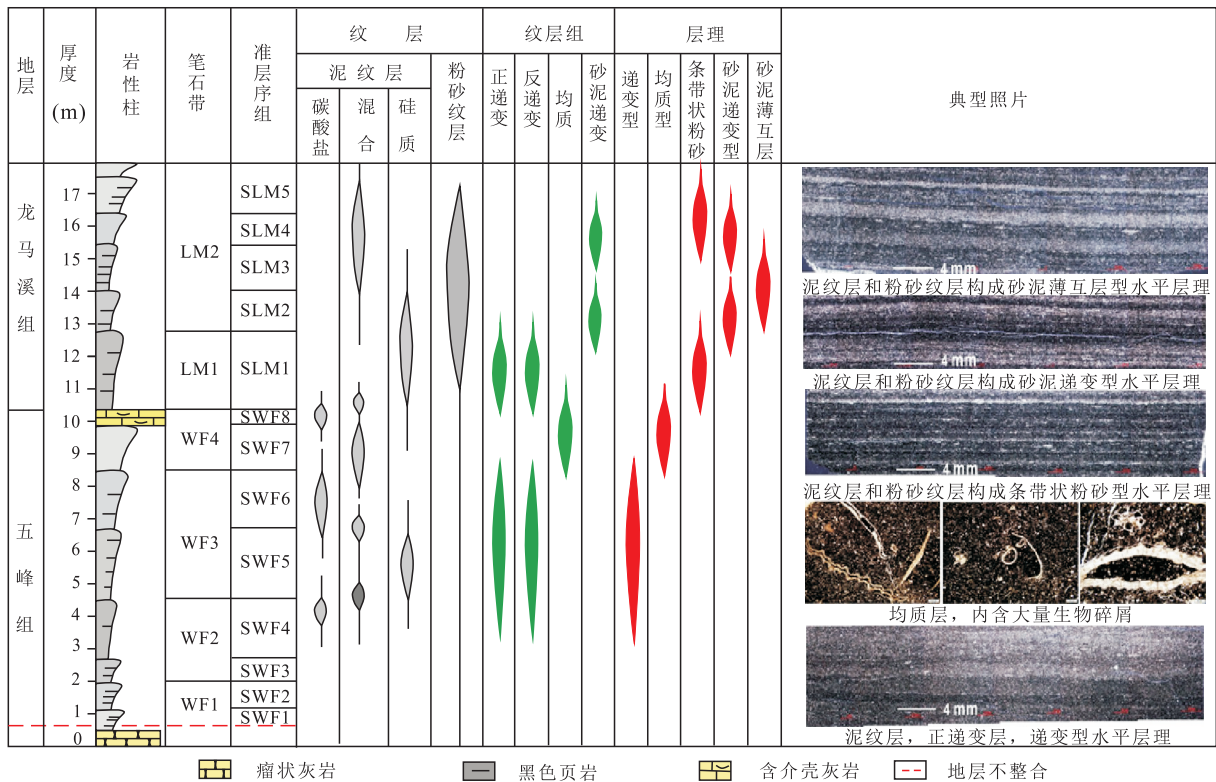


图7 川南长宁双河剖面五峰组—龙马溪组纹层和层理纵向分布

Fig. 7 Longitudinal distribution of laminae and bedding of Wufeng–Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, Changning, southern Sichuan

透率和垂直渗透率分别为 $0.047\ 955 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.002\ 761 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 两者相差 17.39 倍。样品 SLM4-1 测试结果表明, 砂泥薄互层型水平层理页岩水平渗透率和垂直渗透率分别为 $0.005\ 743 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.000\ 714 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 两者相差 8.04 倍。递变型水平层理页岩相和均质型块状层理页岩水平和垂直渗透率相近, 样品 M001 测试结果表明, 递变型水平层理页岩水平和垂直渗透率分别为 $0.000\ 931 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.000\ 575 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 两者相差 1.62 倍, 样品 SWF6-1-2 测试结果表明, 均质型块状层理页岩水平和垂直渗透率分别为 $0.000\ 316\ 9 \times 10^{-3}$, $0.000\ 316 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 二者基本接近。

3.5 岩石相分类

岩石相是特定沉积环境和沉积水动力条件下的产物, 要尽可能利用组成、结构和构造等能反映成因的属性来分类。基于这个原则, 该文划分标准有两种: ①矿物组成: 是造成岩石相类型多样性的最关键因素, 并可反映黑色页岩成因与成岩演化^[38]; ②层理类型: 直接反映沉积过程、物源供给情况和水动力强弱, 并可揭示古气候、古水体性质和事件沉积等微环境^[39]。由于页岩岩石相与页岩气勘探开发息息相

关, 因此, 在岩石相类别确定后, 可用有机碳含量揭示烃类富集程度, 从而便于页岩气储集层分类和评价。依此原则, 建立岩石相柜式划分(图 8)。柜式划分图的 X 坐标表示层理类型, 分为砂泥薄互层型水平层理、砂泥递变型水平层理、条带状粉砂型水平层理、均质层理和递变型水平层理 5 种, Y 坐标表示岩性, 分为硅质页岩、黏土质页岩、钙质页岩和混合页岩 4 种。X 和 Y 坐标确定好岩石相类型之后, 用 Z 坐标表示 TOC(%), 分为贫有机质($TOC < 2\%$)、含有机质($2\% < TOC < 4\%$)和富有机质($TOC > 4\%$)3 种, 从而反映该岩石相的有机质富集程度。

综合分析表明, 长宁双河剖面五峰组—龙马溪组发育 11 类岩石相: 递变型水平层理混合页岩相(GM)、递变型水平层理钙质页岩相(GC)、递变型水平层理硅质页岩相(GS)、均质层理钙质页岩相(BC)、均质层理混合页岩相(BM)、条带状粉砂型水平层理硅质页岩相(SS)、条带状粉砂型水平层理混合页岩相(SM)、条带状粉砂型水平层理钙质页岩相(SC)、砂泥递变型水平层理硅质页岩相(BGS)、砂泥递变型水平层理混合页岩相(BGM)、砂泥薄互层型水平层理混合页岩相(BIM)。长宁双河剖面五峰组—龙马溪组各类岩石相有机质含量均较高, 以富有

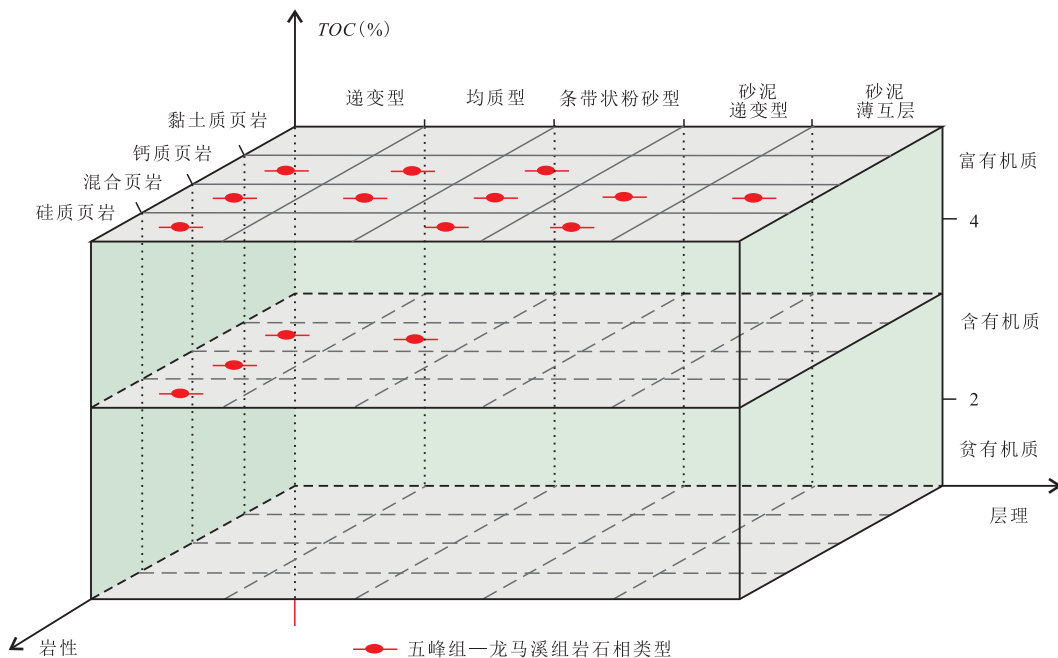


图 8 长宁双河剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩岩石相分类柜式划分

Fig. 8 Cabinet division of black shale lithofacies of Wufeng-Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, Changning

机质为主,少量为含有机质。

长宁双河剖面五峰组—龙马溪组11类岩石相纵向分布规律性变化(图4)。五峰组,SWF4段发育递变型水平层理钙质页岩相(GC),SWF5段和SWF6段则依次发育递变型水平层理混合页岩相(GM)、递变型水平层理硅质页岩相(GS)、递变型水平层理混合页岩相(GM)、递变型水平层理硅质页岩相(GC)和递变型水平层理混合页岩相(GM),SWF7—SWF8段发育均质层理混合页岩相(BM)、均质层理钙质页岩相(BC)。龙马溪组SLM1段底部少量条带状粉砂型水平层理钙质页岩相(SC),上部则以条带状粉砂型水平层理硅质页岩相(SS)为主,SLM2段发育砂泥递变型水平层理硅质页岩相(BGS),SLM3发育砂泥薄互层型水平层理混合页岩相(BIM),SLM4段发育砂泥递变型水平层理混合页岩相(BGM)。

4 地质意义

前人研究表明^[21,40-41]，“甜点”具备高TOC、高硅质含量、页理发育等特征。长宁双河剖面精细研究表明,川南长宁地区黑色页岩“甜点”段集中分布于笔石带LM1段。该段具有高硅质含量和高TOC的特征。其硅质含量均超过60%,TOC均大于5%,平均值达9.54%。非“甜点”段中,页岩的硅质含量普遍为42%~53%,均值小于50%,TOC也远低于“甜点”段。此剖面表明,“甜点”段中浮游藻类、疑源类、细菌和固体沥青等非动物碎屑有机质占总显微组分的70%~80%,动物碎屑占20%~30%,非“甜点”段中动物碎屑类(笔石、几丁虫等)有机质显微组分占总显微组分的47%~76%,非动物碎屑有机质占24%~53%^[22]。

“甜点”段页岩具有条带状粉砂型水平层理发育的特征。长宁双河剖面“甜点”段以条带状粉砂型水平层理页理为主,由于该类层理中粉砂纹层含量低,泥纹层含量高,有机质含量高。高有机质含量易形成高有机质孔,而造成“甜点”段孔隙度普遍较高。实验分析表明,“甜点”段页岩孔隙度和渗透率值是其它页岩的几倍甚至几十倍,且水平渗透率/垂直渗透率比值达到几倍甚至几百,远高于其他纹理页岩。川东涪陵地区五峰组—龙马溪组黑色页岩水平渗透率普遍高于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均值为 $1.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),远远高于对应深度的垂直渗透率(普遍低于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平

均值为 $0.0032 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),二者相差超过3个数量级^[42]。

“甜点”段页岩高TOC和高硅质含量的形成与局限海盆沉积环境及富硅水体有关。前人研究表明^[43-44],晚奥陶世赫南特阶晚期—早志留世鲁丹阶,全球气候变暖,全球海平面快速上升。该时期四川盆地为半封闭的陆表海,发育缺氧的半局限海盆环境。“甜点”段页岩形成,同样表明沉积时期水动力弱,陆源碎屑供给不足^[45]。且水体中大量溶解态硅造成放射虫、硅质海绵及浮游藻类大量繁盛,并以“海洋雪”方式缓慢沉积。现代海洋调查结果也显示,水体中硅元素含量高低直接决定初级生产力的高低^[46],硅质生物大量发育时藻类也一同繁盛,从而造成TOC和硅质富集。非“甜点”段页岩发育的赫南特阶早期,由于全球气候变凉,两极冰川广泛发育,海平面下降,大洋循环条件变好,陆源碎屑供给增加,海水处于充氧的凉水状态^[47],故硅质含量和TOC降低。非“甜点”段发育的鲁丹阶晚期—埃隆期,陆源碎屑供给增大,硅质生物生长受到抑制,沉积速率增大,TOC和硅质含量降低^[4]。

“甜点”段页岩高TOC和高硅质含量有利于孔隙度和渗透率的增大。条带状粉砂型水平层理页岩和砂泥递变型水平层理页岩有机质孔均超过50%,多数有机质孔在三维空间构成有效的连通网络,从而提供了大量储集空间,也极大的提高了储层连通性。前人研究表明,页岩孔隙度与渗透率与TOC正相关。生物成因硅中的放射虫、硅质海绵等生物体内发育小孔和空腔,其在成岩过程中会残余大量孔隙,且硅质颗粒抗压实能力较强,有利于各类孔隙保存。“甜点”段页岩微裂缝密度高,且顺层缝和非顺层缝相互交切,在空间构成三维裂缝网络体系,从而大大提高了“甜点”段页岩渗透率^[48]。

“甜点”段页岩粉砂纹层与泥纹层交互造成水平渗透率与垂直渗透率差异。条带状粉砂型水平层理页岩和砂泥递变型水平层理页岩中粉砂纹层与泥纹层交互,造成储层垂向非均质性增强,故垂直渗透率降低。而在水平方向上,页岩储层的矿物组成和结构相对均一,且水平微裂缝大量发育,故水平渗透率增大。含气页岩垂向上致密,具有偏低垂直渗透率,阻碍了页岩气垂向迅速逸散而有利于保存,而水平层理(缝)发育大大改善页岩储层的水平渗透能力。同时,水平渗透率与垂直渗透率的差异能够在水平

井水力压裂改造后形成复杂裂缝网络,从而提高页岩气产量。

5 结论

1) 长宁双河剖面底部发育五峰组—龙马溪组17 m 黑色页岩,该段是川南页岩气勘探开发的重点层段,其中五峰组发育笔石带WF1-4,龙马溪组发育笔石带LM1-2。龙马溪组底部的笔石带LM1为页岩气勘探开发的“甜点”段,具有高TOC和高硅质含量、高孔隙度、高渗透率及高水平渗透率/垂直渗透率比值、高有机质孔含量的特征。

2) 长宁双河剖面黑色页岩主要为硅质页岩、钙质页岩和混合页岩,石英、碳酸盐和黏土矿物平均值分别为42.5%,37.4%和14.9%，“甜点”段页岩主要为硅质页岩。

3) 长宁双河剖面黑色页岩发育泥纹层和粉砂纹层,泥纹层和粉砂纹层构成正递变、反递变、均质,砂泥正递变4类层及均质型块状层理、递变型水平层理、条带状粉砂型水平层理、砂泥递变型水平层理和砂泥薄互层型水平层理5种层理类型,其中,“甜点”段页岩主要为条带状粉砂型水平层理页岩。

4) 长宁双河剖面黑色页岩发育11类岩石相类型,其中,条带状粉砂型水平层理硅质页岩相具有高TOC、高孔隙度、高渗透率等特征,构成页岩气勘探开发的“甜点”段。

参考文献

- [1] SCHIEBER J. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: Examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, USA[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 120(1-4): 105-124.
- [2] SCHIEBER J. Distribution and deposition of mudstone facies in the Upper Devonian Sonyea Group of New York[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(4): 909-925.
- [3] STOW D, HUC A, BERTRAND P. Depositional processes of black shales in deep water[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 491-498.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] HICKEY J J, HENK B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett shale, mitchell 2 TP Sims well, Wise county, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 437-443.
- [7] MACQUAKER J, 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[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(6): 1129-1143.
- [8] 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.
- [9] LAZAR O R, BOHACS K M, MACQUAKER J, 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.
- [10] 梁超,姜在兴,杨婷婷,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 691-698.
LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 691-698.
- [11] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(1): 1-22.
- [12] WANG G, CARR T R. Organic-rich marcellus shale lithofacies modeling and distribution pattern analysis in the Appalachian Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(12): 2173-2205.
- [13] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579-601.
- [14] 张顺,刘惠民,陈世悦,等.中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨—以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1108-1119.
ZHANG Shun, LIU Huimin, CHEN Shiyue, et al. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: Insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleocene, southern Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1108-1119.
- [15] 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.
- [16] MACQUAKER J H, 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.
- [17] 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(11): 934-942.
- [18] ANDERSON R Y, DEAN W E. Lacustrine varve formation through time[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1988, 62(1-4): 215-235.
- [19] 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:自然科学版*, 1998, 26(3): 315-319.
WANG Huizhong, MEI Hongming. Paleolimnological information from the oil shale in the Lower part of Sha3 Formation, in Dongying Depression [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 1998, 26(3): 315-319.
- [20] 郭旭升.南方海相页岩气“二元富集”规律—四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1209-1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [21] 郭彤楼,张汉荣.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.
GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36.
- [22] 腾格尔,申宝剑,俞凌杰,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 69-78.
BORJIGIN Tenger, SHEN Baojian, YU Lingjie, et al. Mechanisms of shale gas generation and accumulation in the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 69-78.
- [23] 王玉满,李新景,董大忠,等.海相页岩裂缝孔隙发育机制及地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(9): 1602-1610.
WANG Yuman, LI Xinjing, DONG Dazhong, et al. Development mechanism of fracture pores in marine shale and its geological significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1602-1610.
- [24] 冉波,刘树根,孙玮,等.四川盆地及周缘下古生界五峰组龙马溪组页岩岩相分类[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 96.
RAN Bo, LIU Shugen, SUN Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 96.
- [25] 王超,张柏桥,舒志国,等.四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 485-497.
WANG Chao, ZHANG Boqiao, SHU Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 485-497.
- [26] 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. Laminar 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.
- [27] 王同,杨克明,熊亮,等.川南地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及其对储层的控制[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 915-925.
WANG Tong, YANG Keliang, XIONG Liang, et al. Shale sequence stratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan and their control on reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 915-925.
- [28] 郭英海,李壮福,李大华,等.四川地区早志留世岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 20-29.
GUO Yinghai, LI Zhuangfu, LI Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 20-29.
- [29] 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.
ZHAO 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.
- [30] 周业鑫,丁俊,余谦,等.渝东北地区观音桥段沉积与有机碳同位素特征及其区域对比[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1097-1107.
ZHOU Yexin, DING Jun, YU Qian, et al. Sedimentary and organic carbon isotopic characteristics of the Kuanyinchiao Member in Northeastern Chongqing and its regional correlation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1097-1107.
- [31] 樊隽轩, MELCHIN M J, 陈旭,等.华南奥陶—志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(1): 130-139.
FAN Junxuan, MELCHIN M J, CHEN Xu, et al. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2012, 42(1): 130-139.
- [32] WANG H Y, SHI Z S, ZHAO Q, et al. Stratigraphic framework of the Wufeng-Longmaxi shale in and around the Sichuan Basin, China: Implications for targeting shale gas[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3-4): 124-133.
- [33] MACQUAKER J, TAYLOR K G. A sequence-stratigraphic interpretation of a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, UK[J]. *Journal of the Geological Society*, 1996, 153(5): 759-770.
- [34] JOHNSON M E. Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events[J]. *GFF*, 2006, 128(2): 115-121.
- [35] 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