

引用格式:刘若冰,魏祥峰,刘珠江,等. JY1井五峰组—龙马溪组钻井地质剖面分析[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 47-57.

LIU Ruobing, WEI Xiangfeng, LIU Zhujiang, et al. Geological section analysis of drilling in Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1 [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 47-57.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.004

JY1井五峰组—龙马溪组钻井地质剖面分析

刘若冰, 魏祥峰, 刘珠江, 燕继红, 袁桃, 魏富彬

(中国石化勘探分公司, 四川成都 610041)

摘要: JY1井五峰组—龙马溪组钻井地质剖面是第一口较为系统的海相页岩气参数井剖面, JY1井取得勘探突破是涪陵页岩气田发现的标志, 该井被重庆涪陵市政府命名为“页岩气开发功勋井”。以JY1井五峰组—龙马溪组钻井地质剖面为重点, 阐述了该钻井剖面对页岩气勘探开发的重要意义, 着重介绍了该剖面岩石地层、生物地层及笔石带划分及裂缝发育等特征, 分析探讨了页岩气储层“六性”特征及纵向分布规律, 得出以下认识: ①JY1井五峰组—龙马溪组地层厚度大、连续沉积、地层层序清晰、笔石门类齐全、区域可对比性好, 可作为四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组分析研究的钻井地质基本剖面; ②受沉积相带影响, 不同页岩气层段地质特征差异明显, 其中五峰组—龙马溪组一段—亚段(①—⑤号小层)为深水陆棚相沉积, 总体具有“高TOC、高孔隙度、高含气量、高硅质”的四高特征, 是五峰组—龙马溪组勘探开发的主要页岩气“甜点”层段; ③优质页岩气层中①—③号小层表现出地质、工程双“甜点”高度耦合的规律, 是水平井“靶窗”优选的最佳层位。其中高伽马值的②号小层是保证水平轨迹、优质页岩钻遇率的最佳靶心位置。深水陆棚相的优质页岩及“靶窗”层位的确定是JY1井五峰组—龙马溪组页岩气勘探取得重大突破, 实现持续稳产、高产的关键, 也为后续页岩气勘探选区、选层提供了依据。

关键词: JY1井; 页岩气; 地质剖面; 五峰组—龙马溪组; 四川盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Geological section analysis of drilling in Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1

LIU Ruobing, WEI Xiangfeng, LIU Zhujiang, YAN Jihong, YUAN Tao, WEI Fubin

(Sinopec Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The drilling geological profile of Well-JY1 Wufeng Formation and Longmaxi Formation is the first systematic marine shale gas parameter well profile. The exploration breakthrough of Well-JY1 announces the discovery of Fuling shale gas field, which is named as “Shale Gas Development merit well” by Chongqing Fuling Municipal government. With the drilling geological section in Wufeng-Longmaxi Formation of Well-JY1 as the key point, the drilling profiles of the importance of shale gas exploration and development are expounded, the profile lithostratigraphic, biostratigraphic and graptolite biozone division and fracture development characteristics are introduced, and analyzed the period of “six” shale gas reservoir characteristics and vertical distribution are analyzed. The following conclusion are obtained. Firstly, the Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1 has large thickness, continuous deposition, clear stratigraphic sequence, widest range of graptolite category and good regional comparability, which can be used as the basic drilling geological section for the analyses and researches of Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its surrounding areas. Secondly, affected by sedimentary facies belt, the geological characteristics of different shale gas strata are obviously different. For example, the first interval of the first Member of Wufeng-Longmaxi Formation (small layer ① ~ ⑤), which belongs to the deep-water shelf facies generally with four high characteristic of “high TOC, high porosity, high air content, high siliceous”, is the main “sweet spot” of the shale gas exploration and development in this area. Thirdly, the small layer ① ~ ③ in high quality shale gas reservoir, which show the high coupling law of double “sweet spot” of geological and

收稿日期: 2021-06-01。

第一作者简介: 刘若冰(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气田勘探开发研究与技术管理工作。地址: 四川省成都市高新区吉泰路688号, 邮政编码: 610041。E-mail: liurb.ktnf@sinopec.com

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金“深层页岩源—储动态演化与页岩气富集规律研究”(U19B6003-03-03)。

engineering, are the optimal layers for the best target “window” of the horizontal wells. Among them, the small layer ② with high gamma value is the best position to ensure the horizontal trajectory and drilling ratio of high quality shale. The determination of high quality shale and the target “window” in deep-water shelf facies is the key for the major breakthrough of shale gas exploration in Wufeng-Longmaxi Formation of Well-JY1 and the continuous stable and high production, and also points out the direction for the selection of the areas and layers during the subsequent shale gas exploration.

Keywords: Well-JY-1; shale gas; geological section; Wufeng-Longmaxi Formation; Sichuan Basin

JY1井是中国石化在涪陵焦石坝区块部署的第一口探井,在五峰组—龙马溪组钻遇了厚层优质页岩气层。其水平井——JY1HF井经大型水力加砂压裂后,于2012年11月28日放喷测试,试获日产 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,实现了中国页岩气勘探的重大突破。2014年,该井被重庆涪陵市政府命名为“页岩气开发功勋井”,以彰显其为页岩气大规模开发利用所作出的突出贡献。截至2021年11月28日,JY1HF井累计产气量已突破 $1.38 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计安全产出页岩气3 288 d,保持了国内最长页岩气井生产时间记录。

JY1井突破以后,受到业界广泛关注,许多专家、学者到中国石化勘探分公司和涪陵页岩气田焦石坝现场考察,观察和收集JY1井的钻井、测录井、岩心、分析化验等第一手宝贵资料,并利用这些资料开展了页岩基本特征^[1-2]、富集机理等多方面详细的研究,形成了大量的创新性认识,为中国南方海相页岩气理论与技术的突破和快速建产奠定了良好的基础^[3-7]。从建立JY1井五峰组—龙马溪组基于剖面出发,系统地论述剖面的岩性、电性、生物地层等特征,明确JY1井不同层段的“六性”关系及差异,在此基础上,进一步从机理上阐述JY1井优选五峰组—龙马溪组一段①—③号层为页岩气层靶窗位置的依据。通过对JY1井钻井地质剖面的详细分析,为四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组的研究提供典型钻井地质剖面参考,同时也为其他页岩气田的发现和页岩气富集机理等的研究提供借鉴。

1 JY1井剖面地质概况

JY1井位于四川盆地川东南地区川东高陡褶皱带包鸾—焦石坝背斜带焦石坝构造高部位,行政隶属重庆市涪陵区,距涪陵城区约35 km(图1)^[8]。该井于2012年5月18日完钻,开口层位为下三叠统嘉陵江组,在井深2 164 m处钻遇龙马溪组,2 411 m处钻遇五峰组上段(观音桥段),2 415.5 m处钻遇临湘组,

完钻井深2 450 m,完钻层位中奥陶统十字铺组(未穿),全井对页岩气目的层开展系统取心,共完成取心11回次,岩心长84.77 m,取心收获率97.3%。研究的主要页岩气层段为上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段,基于JY1井钻井剖面,开展了钻井、测井、实验分析和测试大量的实物工作,特别是在实验分析研究方面,开展了包含岩石学参数、地化参数、物性参数、孔隙结构、岩石力学、含气性、开发试验、流体分析等共计1 353项分析测试和研究工作(图2)。在测井方面,除开展了标准测井外,还针对页岩气层实施了电成像FMI、元素俘获谱ECS、核磁共振CMR测井服务,为后续基础研究和勘探评价奠定了坚实的基础。

1.1 岩石地层特征

1.1.1 五峰组

该地层深度介于2 411.0~2 415.5 m,厚度为4.5 m,与下伏临湘组瘤状灰岩、上覆龙马溪组页岩整合接触。

五峰组上下岩性组合差异大。其中,五峰组下段厚度为4.39 m,岩性主要为灰黑色含放射虫碳质笔石页岩,局部层段夹黄铁矿薄层、条带或条纹以及数十层(约26层)厚0.2~3 cm不等的钾质斑脱岩薄层或条带,水平纹层发育,岩石中富含笔石化石,另有少量腕足类及介形类等化石,局部见较多硅质放射虫,整体为深水陆棚相沉积(图3a—3d)。五峰组上段(观音桥段),厚度为0.11 m,岩性为灰黑—黑灰色含生屑含碳灰质泥岩,所含生屑以腕足类碎片为主,次为海百合茎碎屑,该层岩性区域上分布稳定,是中上扬子地区奥陶系与志留系划分的区域性标志层(图3e)。

1.1.2 龙马溪组一段

依据沉积环境、岩性组合等差异,可将龙马溪组一段分为3个亚段。

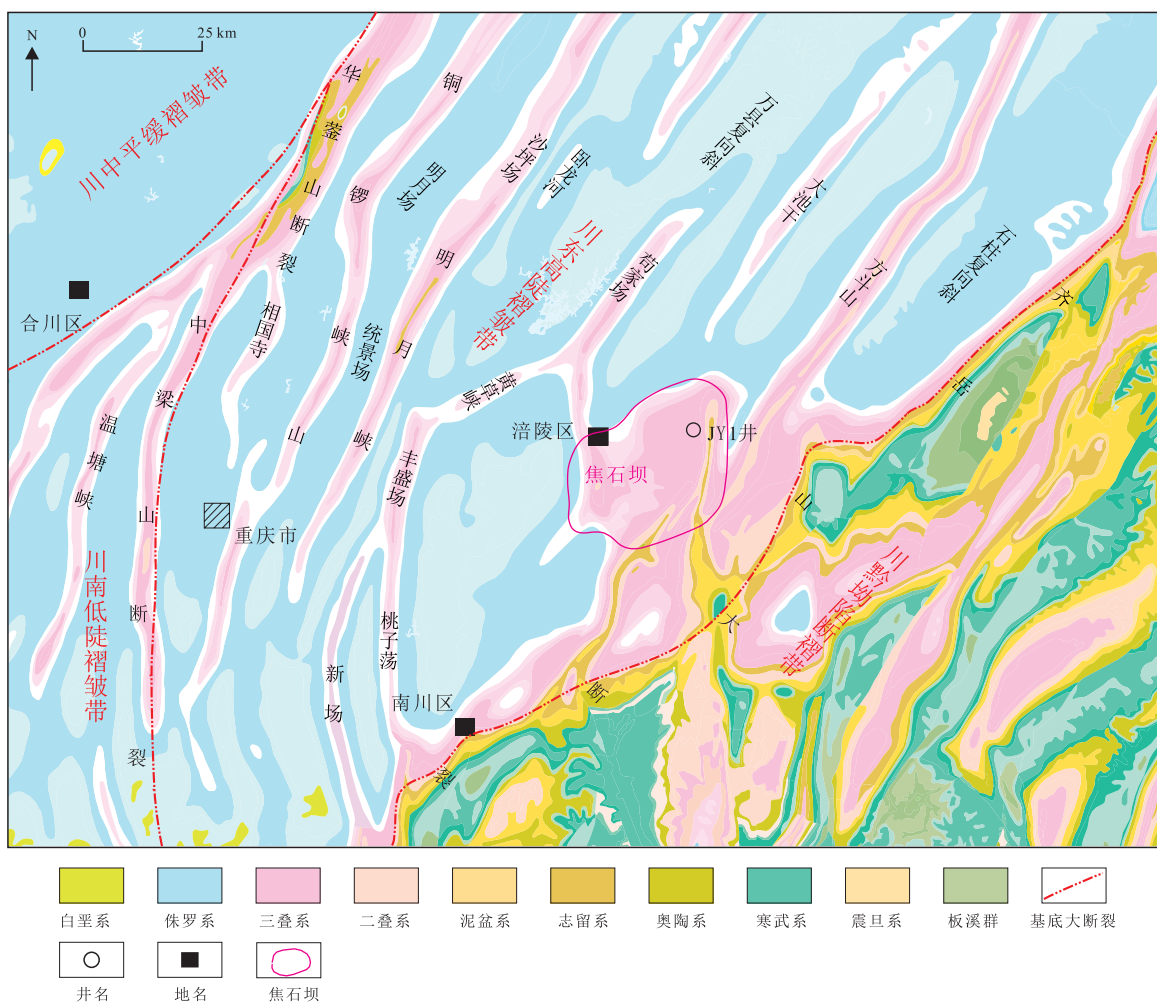


图1 四川盆地涪陵焦石坝区块及邻区构造区划图^[4]

Fig. 1 Tectonic zoning map of Jiaoshiba block and its adjacent areas in Fuling, Sichuan Basin^[4]

1) 龙马溪组一段一亚段

地层深度介于2 411 ~ 2 378 m,厚33 m,岩性以灰黑色含骨针放射虫碳质笔石页岩为主,页岩颜色暗,呈灰黑色,富含笔石化石,与之共生的还见大量保存完整的硅质放射虫及少量硅质海绵骨针化石(图3f—3g)。页岩质地较纯,水平纹层发育,见黄铁矿薄层、条带或条纹以及分散状黄铁矿晶粒,与含放射虫笔石页岩相似。该段属于深水陆棚亚相,沉积水体安静、贫氧,有利于富有机质的形成。

2) 龙马溪组一段二亚段

地层深度介于2 353 ~ 2 378 m,厚25 m,岩性以黑灰色含碳含粉砂泥岩为主,少量层段为黑灰色含碳含粉砂泥岩与深灰色含笔石碳泥质粉砂岩呈条纹状频繁韵律互层。岩石中生物化石单调,仅见少量笔石化石及其碎片(图3h—3i),见少量硅质放射虫,

黄铁矿薄层、条带或条纹,相对于含骨针放射虫笔石页岩明显减少。少量层段见顺层集中分布的粉砂质条纹分布,与泥质条纹呈频繁韵律互层。该段主要为浅水陆棚低密度浊流环境沉积的岩石组合类型。

3) 龙马溪组一段三亚段

地层深度介于2 326 ~ 2 353 m,厚33 m,岩性以灰黑色含碳质笔石页岩为主,局部夹灰黑色含粉砂碳质泥岩,见少量的黄铁矿薄层、条带或条纹。页岩中见少量保存完整的硅质放射虫(图3j—3k),局部笔石富集成层,与含放射虫笔石页岩相似。该岩石沉积水体安静、贫氧,但相对含放射虫笔石页岩略浅,贫氧性略差,总体有利于富有机质的生成。

1.2 生物地层与笔石带划分

在奥陶系和志留系的生物地层研究中,笔石是

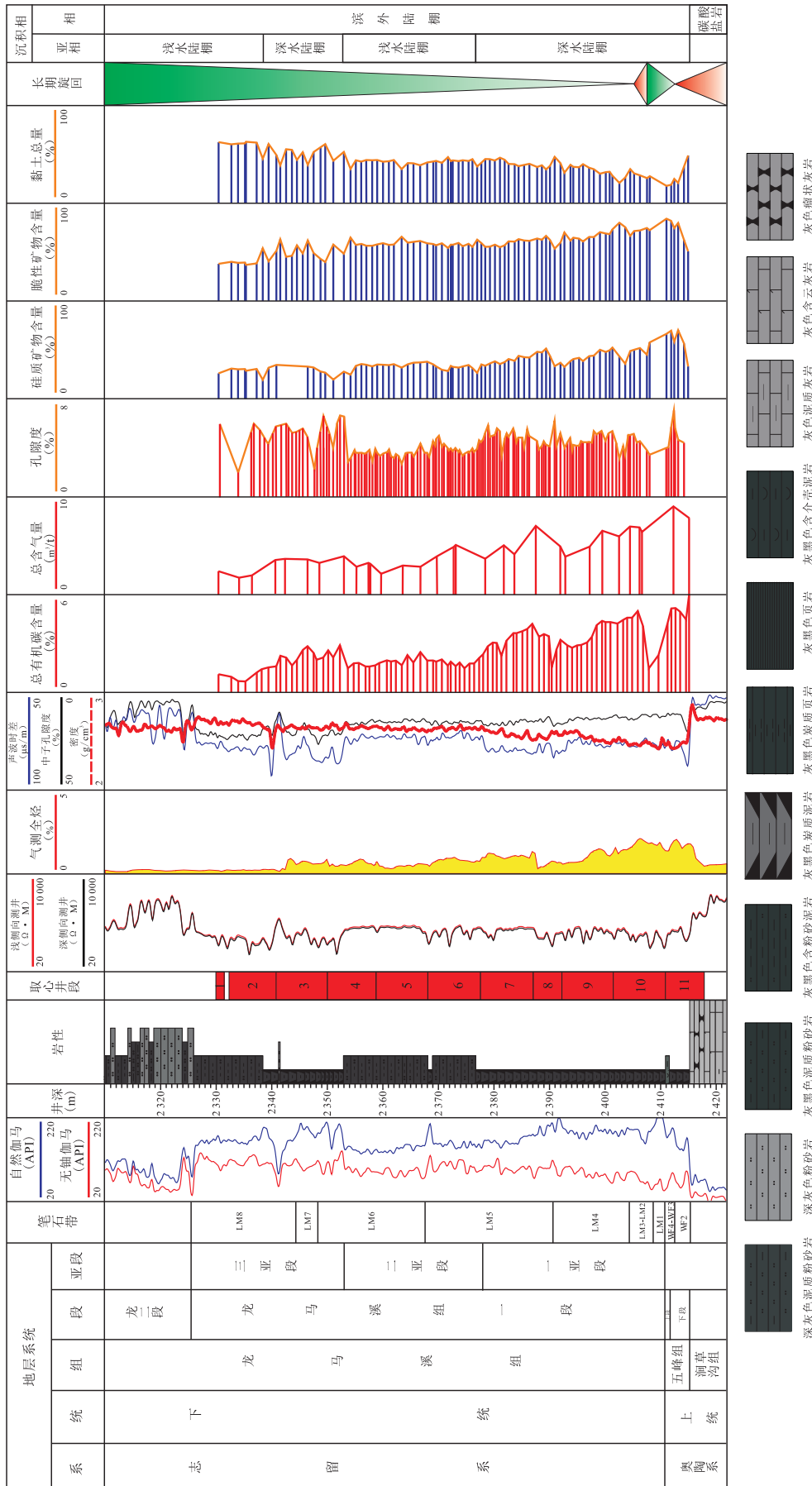


图2 JY1井五峰组—龙马溪组一段页岩气综合柱状图
Fig. 2 Comprehensive histogram of shale gas in the first member of Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1



注:a.含放射虫碳质笔石页岩,富含笔石,五峰组;b.含放射虫碳质笔石页岩,放射虫含量26%,五峰组;c.钾质斑脱岩,褐色斑晶与似流纹状结构,五峰组;d.含放射虫笔石页岩夹斑脱岩条带,五峰组;e.含生屑灰质泥岩,见含棘屑、腕足碎屑,五峰组上段(观音桥段);f.含骨针、放射虫碳质笔石页岩,富含笔石,龙马溪组;g.含骨针、放射虫碳质笔石页岩,放射虫含量30%,龙马溪组;h.含碳含粉砂泥页岩,见笔石化石,龙马溪组;i.含碳含粉砂泥页岩,水平纹层发育,龙马溪组;j.含粉砂泥页岩,JY1井,2 335.3 m;k.含碳质笔石页岩,富含笔石,龙马溪组。

图3 JY1井五峰组—龙马溪组一段不同层段典型岩心镜下照片

Fig. 3 Microscopic photos of typical cores in different layers of the first member of Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1

全球公认的第一门类。2014年6月,陈旭院士团队绘制和拍摄了JY1井五峰组和龙马溪组黑色页岩中重要的笔石属种图像,获得了将黑色页岩的生物地层划分到笔石带的基础资料,编写了咨询报告,为五峰组—龙马溪组地层划分以及页岩气层精细评价提供了可靠的依据。根据陈旭院士建立的扬子区五峰组—龙马溪组笔石带序列^[9-10],JY1井五峰组—龙马溪组在国际地层中对应上奥陶统凯迪阶到下志留统

兰多维列统埃隆阶,可划分为12个笔石生物地层单元,其中五峰组包含WF1—WF4笔石带、龙马溪组包含LM1—LM8笔石带(图4)。

1) 凯迪阶

JY1井五峰组中下部(2 411.5 ~ 2 415.5 m)对应上奥陶统凯迪阶,由老到新包括 *Dicellograptus complanatus* 带(WF1带)、*Dicellograptus complexus* 带(WF2带)、*Persculptograptus extraordinarius* 带—

*Paraorthograptus pacificus*带(WF3—WF4带),对应笔石带厚度分别为0.16 m、2.68 m、1.42 m。其中在2 411.10~2 412.52 m出现了WF3的带化石*Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann),此外*Dicellograptus turgidus* Mu更是*P. pacificus*带中部*Tangyagraptus typicus*亚带中的标准分子。

2) 赫南特阶

五峰组上段(观音桥段)(2 411.00~2 411.50 m)主要对应赫南特阶中下部,在岩心中见到腕足动物碎片,笔石带厚度仅0.1 m,未能识别出王家湾剖面WF4的*Normalograptus extraordinarius*带,但不排除在五峰组顶部仍存在WF4的层位的可能。而赫南特阶中上部主要为龙马溪组底部LM1笔石带,在JY1井2 407.76~2 411.00 m发现了*Persculptograptus persculptus*带(LM1带),笔石厚度为3.24 m,与王家湾*Normalograptus wangjiawanensis*带是相当层位的笔石带。

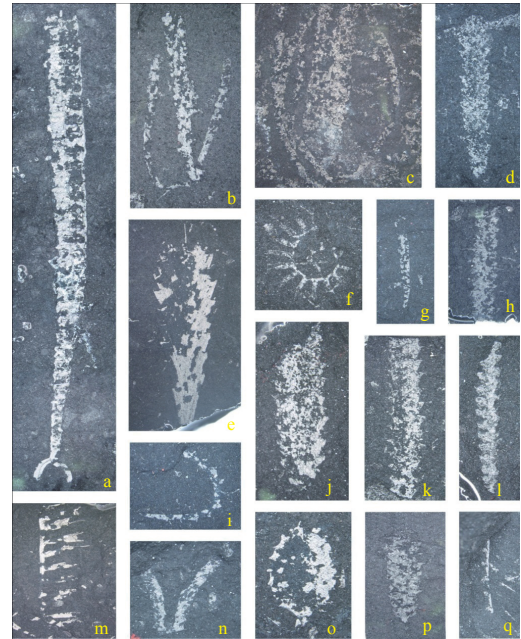
3) 鲁丹阶

JY1井2 367.43~2 407.76 m发现LM2—LM5笔石带(包括4个笔石带)的特征属种,岩石地层主要对应龙马溪组龙一段—亚段。其中,以2 407.76 m的*Akidograptus* sp.出现为鲁丹阶(LM2带)的底界,在底部见LM2的带化石*Akidograptus ascensus* Davies,在2 504.27 m出现*Cystograptus vesiculosus*带(LM4带),限定了LM3带的顶界,笔石带厚度为3.49 m,但LM2带和LM3带的界线难以确认。LM4带主要为*Cystograptus vesiculosus*带(轴囊囊笔石带),与之伴生的*Atavograptus gracilis* Hutt在欧洲也从本带开始出现,笔石带厚度为13.69 m。LM5带主要为*Coronograptus cyphus*带(曲背冠笔石带),该带内近似种普遍出现,并开始出现两形笔石和耙笔石的分子,其中*Cystograptus penna* (Hopkison),*Atavograptus atavus* (Jones),“*Monograptus*”*tenellus* (Chen and Lin)可能是之下地层上延而来的属种。

4) 埃隆阶

华南埃隆阶包括3个笔石带,*Demirastrites triangulatus*带(LM6带)、*Lituigraptus convolutus*带(LM7带)和*Stimulograptus sedgwickii*带(LM8带)。在JY1井2 367.43 m首先发现了三角半耙笔石*Demirastrites triangulatus* (Harkness) (LM6带),笔石带厚度为19.21 m,该带内笔石多样性很高,以半耙笔石属、耙笔石属的多个种出现为特征,上部常见

Campograptus communis (Lapworth),且花瓣笔石的种也在本带出现,如*Petalolithus folium* (Hisinger)。LM7笔石带主要以盘旋喇叭笔石*Lituigraptus convolutus* (Hisinger)首次出现为底界(2 348.22 m),笔石带厚度为4.03 m,*Petalolithus minor* Elles则常见于本带,但多样性开始降低,除带化石外,其他2种花瓣笔石*Petalolithus folium* (Hisinger)是由下伏地层上延而来。在JY1井2 344.19 m发现了带化石*Stimulograptus sedgwickii* (Portlock),为LM8带的底界,笔石带厚度大于10.56 m,*Stimulograptus halli* (Barrande)是本带常见的种。



注: a. *Appendispinograptus longispinus*, WF2带 (*Dicellograptus complexus*带); b. *Dicellograptus ornatus*, WF2带 (*Dicellograptus complexus*带); c. *Dicellograptus complexus*, WF2带 (*Dicellograptus complexus*带); d. *Korenograptus lacinosus*, LM1带 (*Persculptograptus persculptus*带); e. *Cephalograptus cometa*, LM7带 (*Lituigraptus convolutus*带); f. *Rastrites guizhouensis*, LM6带 (*Demirastrites triangulatus*带); g. *Akidograptus ascensus*, LM2—LM3带 (*Parakidograptus acuminatus*—*Akidograptus ascensus*带); h. *Paraorthograptus* sp., WF3—WF4带 (*Paraorthograptus pacificus*—*Persculptograptus extraordinarius*带); i. *Coronograptus* cf. *cyphus*, LM5带 (*Coronograptus cyphus*带); j. *Cystograptus vesiculosus*, LM4带 (*Cystograptus vesiculosus*带); k. *Pseudorthograptus* sp., LM4带 (*Cystograptus vesiculosus*带); l. *Glyptograptus* cf. *tamaricus*, LM6带 (*Demirastrites triangulatus*带); m. *Lituigraptus convolutus*, LM7带 (*Lituigraptus convolutus*带); n. *Dicellograptus turgidus*, WF3—WF4带 (*Persculptograptus extraordinarius*—*Paraorthograptus pacificus*带); o. *Petalolithus minor*, LM7带 (*Lituigraptus convolutus*带); p. *Amplexograptus latus*, WF2带 (*Dicellograptus complexus*带); q. *Monograptus* sp., LM5带 (*Coronograptus cyphus*带)。

图4 五峰组—龙马溪组典型笔石特征
Fig. 4 Feaswres of typical graptolite plate of Wufeng—Longmaxi Formation

通过JY1井岩石地层与生物地层对比分析表明,两者具有较好的对应关系。五峰组—龙马溪组一段一亚段高伽马、高TOC的优质页岩层段,岩性为一套黑色富有机质页岩,大致对应WF2带(*Dicellograptus complexus*带)—LM5带的下部,笔石顺层分布,含量约50%,局部富集可达80%。其中五峰组黑色页岩主要对应WF2带—LM1带(*Persculptusgraptus persculptus*带),且以LM2带(*Akidograptus ascensus* Davies)的首现位置为顶界,而以赫南特贝为典型代表的赫南特动物群,对应五峰组上段(观音桥段)的灰黑—黑灰色含生屑含碳灰质泥岩。龙马溪组一段二亚段发育的黑灰色含碳含粉砂泥岩,主要对应LM5带的上部及LM6带的中下部,笔石和硅质放射虫含量明显较少,而LM6带上部—LM8带(*Stimulograptus sedgwickii*带),可见少量保存较完整的硅质放射虫化石,主要对应龙马溪组一段三亚段的灰黑色含笔石碳质页岩。由此可以看出:五峰组—龙马溪组黑色页岩中笔石动物群的多样性和丰富度的高低与黑色页岩中有机质含量的高低有着密切的关系,认为JY1井五峰组WF2—WF3的层位,以及龙马溪组LM2—LM6的层位代表了两次笔石动物群多样性和丰富度的高峰期,且五峰组—龙马溪组为连续沉积,厚度大,是页岩气勘探开发的有利层段。

1.3 裂缝发育特征

裂缝发育程度是影响页岩气富集、高产的重要评价指标之一^[11-12]。其中,微纳米级裂缝主要为一些与黏土矿物相关的层间缝、收缩缝为主,是页岩气储集的场所之一;宏观天然裂缝主要是与沉积、构造成因相关的页理缝、层间滑动缝及高角度缝,利于后期人工体积压裂改造裂缝纵横向的扩展延伸,形成复杂裂缝网络。

基于岩心观察、成像测井分析及微纳米尺度氩离子扫描电镜分析,发现JY1井泥岩中宏观天然裂缝、微观裂缝均有发育,因此,研究主要从岩心认识、宏观天然裂缝发育特征方面进行分析。

JY1井五峰组—龙马溪组一段岩心中主要发育高角度缝(斜交缝和垂直缝)和水平缝(页理缝、滑动缝)2种类型的裂缝(图5、图6)。其中,高角度缝分布较局限,仅发育在五峰组—龙马溪组一段一亚段的底部,以垂直缝为主,缝宽1.0 mm左右,缝长20~150 mm,缝内方解石全充填(图6a、图6b);水平缝中

的页理缝纵向上分布较广,多贯穿岩心,尤其在深水陆棚相页岩内发育程度相对更高(图6c)。除页理缝之外,还可观察到较发育的层间滑动缝,该类裂缝在缝面可见到明显的镜面及擦痕现象,缝宽一般为0.5~1.0 mm,最宽可达6 mm,在五峰组—龙马溪组一段底部裂缝密度较大,可达到20~30条/m,裂缝多被方解石充填,另外还可见到少量沥青、泥质、黄铁矿等充填物半充填或完全充填(图6d、图6e)。两类裂缝在五峰组—龙马溪组一段底部同时发育,从而形成相对发育的裂缝网络(图6b)。

2 JY1井剖面页岩气层基本特征

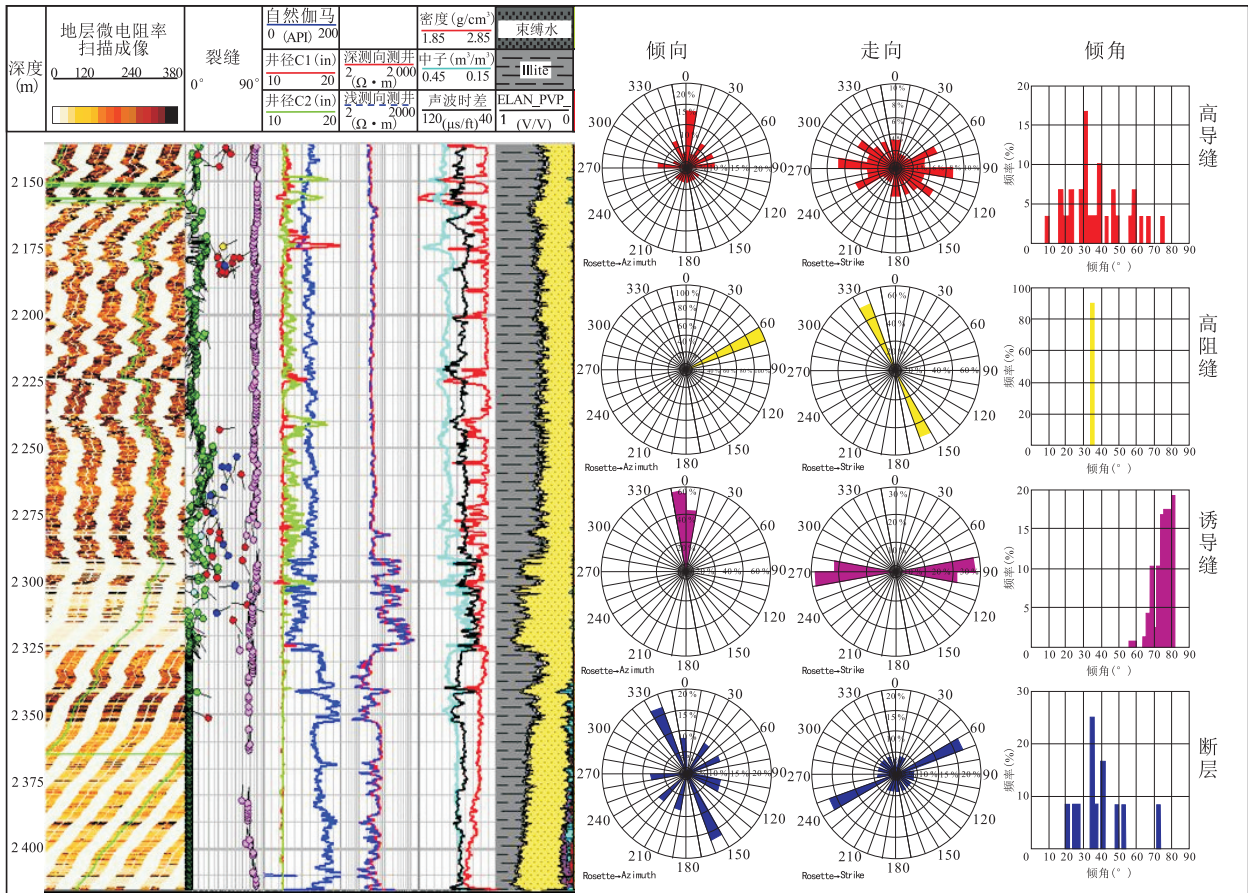
2.1 页岩气层特征

基于对JY1井纵向页岩品质分析及测井综合评价,认为JY1井五峰组—龙马溪组一段页岩气层连续厚度76.5 m,且纵向上受沉积相带影响,不同气层地质特征差异明显^[13]。其中,五峰组—龙马溪组一段一亚段处于深水陆棚亚相,是优质页岩气层段。气层总体具有“高TOC、高孔隙度、高含气量、高硅质”四高特征。TOC含量介于2.0%~5.9%,平均3.6%;孔隙度介于2.80%~7.10%,平均4.65%;含气量介于3.52~8.85 m³/t,平均5.86 m³/t;硅质矿物含量介于31.0%~70.0%,平均44.8%;电测曲线具有高伽马、高声波时差、相对高电阻及低密度、低中子、低无伽马的“四高三低”特征。其中,伽马、电阻、密度变化趋势对于优质气层识别尤为关键,优质气层段伽马介于132~307 API,平均182 API,电阻介于6~166 Ω·m,平均35 Ω·m;密度介于2.422~2.483 g/cm³,平均2.532 g/cm³。气层以一、二类气层为主(表1)。

龙马溪组一段二亚段—三亚段处于浅水陆棚亚相,页岩气层各类参数相比深水陆棚亚相整体偏低。气层TOC含量介于0.55%~3.26%,平均1.67%;孔

表1 JY1井不同品质页岩气层关键参数对比
Table 1 Comparison table of key parameters of shale gas layers with different quality in Well-JY1

相带	页岩品质				电测曲线			气层类型
	TOC (%)	孔隙度 (%)	含气量 (m ³ /t)	硅质含量 (%)	伽马值 (API)	电阻率 (API)	密度 (g/cm ³)	
深水陆棚	3.60	4.65	5.86	44.80	182	35	2.532	一、二类
浅水陆棚	1.67	4.43	3.02	30.74	161	48	2.648	二、三类



注: 1 in=0.025 4 m

图5 JY1井五峰组—龙马溪组FMI测井解释裂缝发育特征

Fig. 5 FMI logging interpretation of fracture development characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1



注:a. 水平缝、斜交缝或垂直缝,方解石全充填,五峰组,2 414 m;b. 两期高角度缝被水平缝错断,方解石全充填,五峰组,2 412.1 m;c. 水平页理缝,局部方解石全充填,龙马溪组,2 390 m;d. 滑动缝,见擦痕和阶步特征,方解石全充填,龙马溪组,2 393 m;e. 滑动缝,见擦痕、镜面特征,见有沥青半充填,五峰组,2 413 m。

图6 JY1井五峰组—龙马溪组一段页岩取心段典型裂缝照片

Fig. 6 Photograph of typical fractures in coring section of the first member of Wufeng-Longmaxi Formation in Well-JY1

隙度介于1.17%~7.22%,平均4.43%;含气量介于1.52~4.42 m³/t,平均3.02 m³/t;硅质矿物含量介于18.4%~37.7%,平均30.74%;电测曲线伽马值介于86~210 API,平均161 API,电阻值介于10~80 Ω·m,平均48 Ω·m;密度值介于2.426~2.751 g/cm³,平均2.648 g/cm³。气层以二类气层为主,局部含三类气层(表1)。

2.2 页岩气“甜点”层段优选及依据

JY1井深水陆棚相页岩具有生气量大、孔隙度高、易压裂的特点,地质和工程双“甜点”高度耦合,且具有“高碳、高硅”的特征,并且两者具有高度耦合关系,是页岩气勘探主要“甜点”层段^[14]。其对于页岩气的富集、高产主要表现在3个方面:①高碳页岩有机质类型好,以I型干酪根为主,有机质丰度高,TOC含量普遍大于3.0%,最高可达5.9%,生烃强度大,模拟计算强度达35×10⁸ m³/km²,总体具备良好的生气基础,再者页岩储层有效储集空间主要由有机质孔提供,页岩孔隙度与TOC含量相关性好,两者具较好的密切共生性,即高碳、孔大(图7);②深水陆棚相页岩硅质以生物成因为主,生物硅早期不稳定,随着温压变化,会向更稳定、硬度更高的石英集合体转

化,过程中会伴生大量石英粒间孔,能够为高温高压下有机孔发育、油气储集,提供有效的空间和保护,深水陆棚相页岩硅质矿物格架孔和有机孔具有共生耦合的特征;③深水陆棚相硅质页岩脆性好,硅质含量在45%以上,最高达70%,以生物成因为主,层内分布均质性强,且硅质粒间孔与有机孔共生,压裂易形成沟通有机孔—粒间孔—微裂缝的流通通道,利于页岩气高产、稳产^[15-16]。

2.3 水平井“靶窗”优选

页岩气水平井穿行“靶窗”的好坏,直接影响单井产量及效益开发,在页岩气地质评价研究中十分重要^[17-18]。尽管JY1井深水陆棚亚相优质页岩气层整体具生气量大、孔隙度高、易压裂的特点,但通过对比不同小层精细发现,在储层品质上还是存在一定差异。其中①—③号小层页岩内TOC含量大于4%,含气量大于6 m³/t,硅质含量大于50%,孔隙度大于4.7%,以一类气层为主;④—⑤号小层页岩内TOC含量大于3%,孔隙度大于4.6%,含气量大于4.5 m³/t,硅质含量大于40%,以二类气层为主。由此可见,①—③号小层无论在地质“甜点”,还是工程“甜点”等各方面的条件均优于④—⑤号小层,是水

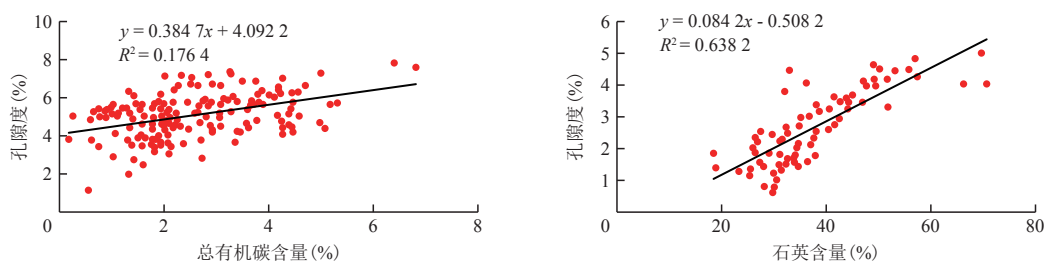


图7 JY1井五峰组—龙马溪组一段页岩孔隙度和TOC、石英含量关系

Fig. 7 Relation between shale porosity and TOC and quartz content of the first member in Wufeng-Longmaxi Formation of Well-JY1

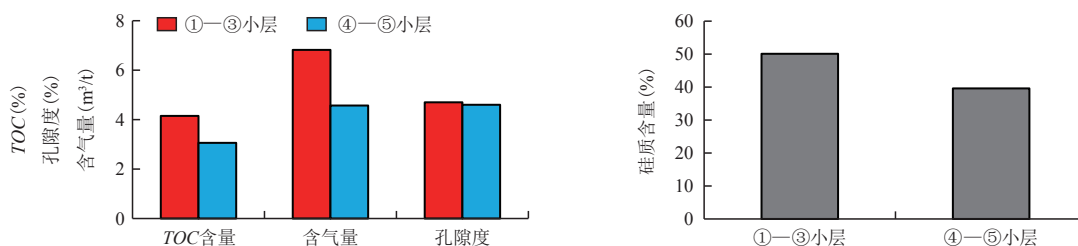


图8 JY1井优质页岩段①—③小层、④—⑤小层地质参数对比

Fig. 8 Comparison of geological parameters of high-quality shale section small layer ①—③ and small layer ④—⑤ in Well-JY1

平井“靶窗”优选的最佳层位(图8)。另外,考虑到在水平井实际钻进过程中,便于轨迹的把控,保证最佳“甜点”层段的钻遇率,因此,将伽马值最高的②号小层作为轨迹穿行的靶心位置。

3 结论与意义

1) JY1井五峰组—龙马溪组钻井地质剖面是第一口较为系统的海相页岩气参数井剖面,该井的突破是涪陵页岩气田发现的标志。五峰组—龙马溪组典型钻井剖面详实的地质资料,为水平井靶窗优选、轨迹跟踪、分段压裂提供了重要的理论基础,也明确了深水陆棚相优质页岩纵、横向变化特征和展布规律。四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组研究典型钻井地质剖面,为深入研究页岩气富集机理等理论认识以及涪陵页岩气田的发现和探明储量的提交奠定了坚实的基础,也为后续其他井的勘探开发提供了参考。

2) 根据岩性及其组合、古生物特征、页岩品质、硅质成因等,可将JY1井剖面①—⑨小层划分为4个特征明显的页岩层段:①小层(五峰组)、②—⑤小层(龙马溪组一段—亚段)、⑥—⑦小层(龙马溪组一段二亚段)和⑧—⑨小层(龙马溪组一段三亚段)。其中,①—⑤小层页岩处于深水陆棚亚相,气层总体具有生气量大、孔隙度高、易压裂的特点,地质和工程双“甜点”高度耦合,是页岩气勘探最优“甜点”层段,是JY1井五峰组—龙马溪组页岩气勘探取得重大突破,实现持续稳产和高产的基础,为后续页岩气勘探选区、选层提供了依据。

参考文献

- [1] 郭旭升.涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M].北京:科学出版社,2014.
GUO Xusheng. Enrichment mechanism and exploration technology of Jiaoshiba block in Fuling shale gas field[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 张汉荣,王强,倪楷,等.川东南五峰—龙马溪组页岩储层六性特征及主控因素分析[J].石油实验地质,2016,38(3):320-325.
ZHANG Hanrong, WANG Qiang, NI Kai, et al. Six characteristics and main controlling factors of shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 320-325.
- [3] 郭旭升.南海相页岩气“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.
- [4] 郭旭升,胡东风,文治东,等.四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素:以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J].中国地质,2014,41(3):893-901.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEN Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 893-901.
- [5] 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.
- [6] 郭旭升.四川盆地涪陵平桥页岩气田五峰组—龙马溪组页岩气富集主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(1):1-10.
GUO Xusheng. Controlling factors on shale gas accumulations of Wufeng-Longmaxi Formations in Pingqiao shale gas field in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(1): 1-10.
- [7] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J].石油勘探与开发,2017,44(4):481-491.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al. Geological factors controlling shale gas enrichment and high production in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 481-491.
- [8] 胡东风,张汉荣,倪楷,等.四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J].天然气工业,2014,34(6):17-23.
HU Dongfeng, ZHANG Hanrong, NI Kai, et al. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shales in southeastern margins of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 17-23.
- [9] 陈旭,樊隽轩,张元动,等.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].地层学杂志,2015,39(4):351-358.
CHENG Xu, FAN Junxuan, ZHANG Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351-358.
- [10] 陈旭,樊隽轩,王文卉,等.黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J].中国科学:地球科学,2017,47(6):720-732.
CHENG Xu, FAN Junxuan, WANG Wenhui, et al. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2017, 47(6): 720-732.
- [11] 郭旭升,胡东风,魏祥峰,等.四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响[J].石油与天然气地质,2016,37(6):799-808.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEI Xiangfeng, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on

- production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 799–808.
- [12] 杜悦,崔欢,袁渊,等.天然裂缝对页岩气井产能的影响评价[J].*天然气工业*,2021,41(S1):118–123.
DU YUE, CUI Huan, YUAN Yuan, et al. Influence of natural fractures on the productivity of shale gas wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(S1): 118–123.
- [13] 郭旭升.上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及演化模式[J].*地球科学*,2017,42(7):1069–1082.
GUO Xusheng. Sequence stratigraphy and evolution model of the Wufeng–Longmaxi shale in the Upper Yangtze area[J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1069–1082.
- [14] 郭旭升,胡东风,文治东,等.四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J].*中国地质*,2014,41(3):893–901.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEN Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng–Longmaxi Formation of Jiaoshiba[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 893–901.
- [15] 郭旭升,李宇平,腾格尔,等.四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J].*石油勘探与开发*,2020,47(1):193–201.
GUO Xusheng, LI Yuping, BORJIGEN Tenger, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation–Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 193–201.
- [16] 郭旭升,蔡勋育,刘金连,等.中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J].*天然气工业*,2021,41(8):12–22.
GUO Xusheng, CAI Xunyu, LIU Jinlian, et al. Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 12–22.
- [17] 高全芳.武隆向斜五峰组—龙马溪组优质页岩特征及水平井靶窗优选[J].*非常规油气*,2019,6(3):99–105.
GAO Quanfang. The high-quality shale characteristics of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Wulong syncline and the best target of horizontal well[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(3): 99–105.
- [18] 吴聿元,张培先,何希鹏,等.渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩岩石相及与页岩气富集关系[J].*海相油气地质*,2020,25(4):335–343.
WU Yuyuan, ZHANG Peixian, HE Xipeng, et al. Lithofacies and shale gas enrichment of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(4): 335–343.

(编辑 余聪)

(上接第46页)

- [45] 王新贵,王超勇,窦鲁星.川东南新元古界南华系大塘坡组页岩气勘探潜力分析[J].*科学技术与工程*,2015,15(17):113–116.
WANG Xingui, WANG Chaoyong, DOU Luxing. Shale gas condition and potential in Datangpo Formation of Nanhua System on the Southeast of Sichuan Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(17): 113–116.
- [46] 谢增业,魏国齐,张健,等.四川盆地东南缘南华系大塘坡组烃源岩特征及其油气勘探意义[J].*天然气工业*,2017,37(6):1–11.
XIE Zengye, WEI Guoqi, ZHANG Jian, et al. Characteristics of source rocks of the Datangpo Fm, Nanhua System, at the southeastern margin of Sichuan Basin and their significance to oil and gas exploration[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(6): 1–11.
- [47] ZHU G Y, LI T T, ZHAO K, et al. Excellent source rocks discovered in the Cryogenian interglacial deposits in South China: Geology, geochemistry, and hydrocarbon potential[J]. *Precambrian Research*, 2019, 333: 105455.
- [48] 方杰,刘宝泉,金凤鸣,等.华北北部中、上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J].*石油学报*,2002,23(4):18–23.
FANG Jie, LIU Baoquan, JIN Fengming, et al. Source potential for generating hydrocarbon and exploration prospects of middle–upper Proterozoic in the North China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(4): 18–23.
- [49] ZHANG S C, WANG X M, HAMMARLUND E U, et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(12): 1–13.
- [50] 张清喜.河北省宽城区中上元古界页岩气源——储特征分析[J].*煤炭与化工*,2020,43(12):105–110.
ZHANG Qingxi. Analysis of the source–reservoir characteristics of the middle–upper proterozoic shale gas in Kuancheng District [J]. *Coal and Chemical Industry*, 2020, 43(12): 105–110.
- [51] LUO Q Y, GEORGE S C, XU Y H, et al. Organic geochemical characteristics of the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation from northern China: Implications for thermal maturity and biological sources[J]. *Organic Geochemistry*, 2016, 99: 23–37.
- [52] 牛露,朱如凯,王莉森,等.华北地区北部中—上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J].*石油学报*,2015,36(6):664–672.
NIU Lu, ZHU Rukai, WANG lisen, et al. Characteristics and evaluation of the Meso–Neoproterozoic shale gas reservoir in the northern China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 664–672.

(编辑 李青)