

四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征

杜伟¹, 胡宗全¹, 刘光祥¹, 朱彤¹, 聂海宽¹, 颜彩娜², 王冠平²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要: 上奥陶统五峰组分为页岩段和观音桥段。对比分析四川盆地及周缘五峰组页岩气钻井岩心以及测试数据, 根据岩心和全岩矿物组分特征, 以硅质矿物(石英)、黏土矿物和碳酸盐矿物为三端元, 进行岩相划分。页岩段可识别出 4 种岩相类型: 硅质页岩、含黏土硅质页岩、含灰硅质页岩以及含灰黏土质页岩; 观音桥段发育含介壳泥质灰岩。页岩气钻井实测数据表明, 页岩段 4 类页岩岩相品质(有机碳含量、脆性矿物含量以及含气量)差异较大, 硅质页岩品质最优, 含灰黏土质页岩品质最差。页岩段岩相类型以及观音桥段分布特征受控于沉积环境。川南永川地区等相对浅水的区域页岩厚度较大, 但是硅质页岩厚度较小, 页岩段整体品质较差, 不建议作为水平井靶窗; 川南威远地区受古陆和古地形影响, 硅质页岩厚度较小, 也不建议作为水平井靶窗; 川东南焦石坝、武隆、丁山以及南川地区硅质页岩厚度超过 4 m, 可作为水平井靶窗。

关键词: 页岩气; 水平井靶窗; 硅质页岩; 观音桥段; 五峰组; 四川盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery

DU Wei¹, HU Zongquan¹, LIU Guangxiang¹, ZHU Tong¹, NIE Haikuan¹, YAN Caina², WANG Guanping²

(1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Upper Ordovician Wufeng Formation was divided into the shale and Guanyinqiao sections. Based on the comparative analysis of shale gas drilling cores and the whole rock mineral composition of the Wufeng Formation in the Sichuan Basin and its periphery, three end members including siliceous minerals (quartz), clay minerals and carbonate minerals were chosen for lithofacies classification. Four lithofacies types were identified in the shale section including siliceous shale, clayey siliceous shale, gray siliceous shale and gray clayey shale, while in the Guanyinqiao section, shell marl developed. The shale gas drilling showed that the four lithofacies types vary in TOC, brittle mineral and gas contents. The quality of siliceous shale is the best, and the quality of gray clayey shale is the worst. The lithofacies types of the shale section and the distribution characteristics of the Guanyinqiao section were controlled by the sedimentary environment. The shale thickness in Yongchuan area and other relatively shallow water areas in the southern Sichuan Basin is relatively large, but the thickness of siliceous shale is small, and the overall quality of the shale section is poor, so it is not recommended as the target window of horizontal wells. The thickness of siliceous shale in Weiyuan area in the southern Sichuan is small due to the influence of ancient land and topography, and it also is not recommended as the target window of horizontal wells. The thickness of siliceous shale in Jiaoshiaba, Wulong, Dingshan and Nanchuan areas in the southeastern Sichuan Basin is more than 4 m, which can be regarded as a target window of horizontal wells.

Key words: shale gas; target window of horizontal well; siliceous shale; Ganyinqiao section; Wufeng Formation; Sichuan Basin

页岩气是指主要以吸附态、游离态赋存于富有机质页岩层中的具有“自生自储”特点的天然气资源^[1-3]。我国四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气勘探开发已取得一系列突破, 发现了涪陵、长宁、威远、昭通和富顺—

永川等页岩气田^[4]。近几年来, 针对这套页岩的岩性组合、储层特征、富集主控因素和保存条件等方面开展了深入研究, 在页岩气田产能建设过程中, 页岩储层“甜点”评价是水平井靶窗优选的核心要素^[5-6]。目前川东南地区涪陵页岩气田水平

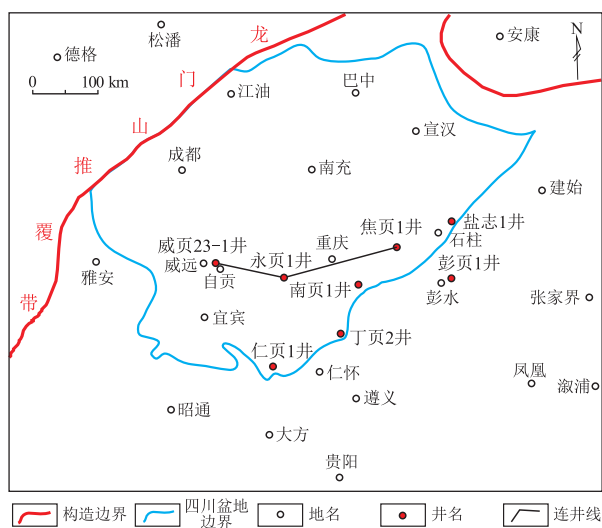


图1 四川盆地及周缘区域构造及井位

Fig.1 Regional structure and well location of Sichuan Basin and its periphery

井靶窗范围主要集中在龙马溪组底部,同时一期产建区一些钻井水平段在五峰组页岩段中穿行,也获得了较高的产量,但是川南地区的威荣和永川页岩气田则存在差异(图1)^[7-8]。五峰组岩性岩相分布特征已经是制约四川盆地及周缘页岩气田产能建设的重要科学问题。

选取四川盆地及周缘不同地区典型页岩气井岩心样品,进行系统观察描述,结合X-衍射、有机地球化学等实验测试数据,对五峰组岩相类型进行分类,研究五峰组页岩段和观音桥段分布特征及其纵向演化规律,以期为该地区页岩气勘探和开发过程中储层评价以及水平井靶窗优选提供理论依据。

1 区域地质背景

前人多将五峰组—龙马溪组页岩作为一个统一的整体进行评价研究,提出了相应的评价标准和评价体系^[9-15]。早奥陶世晚期—志留纪,华夏板块与扬子板块的会聚使得四川盆地处于挤压应力环境,盆地性质为克拉通背景下的继承性挤压拗陷盆地,克拉通边缘持续挤压隆升,形成“三隆夹一坳”(川中古隆起、黔中古隆起和雪峰古隆起夹持的陆内坳陷)的沉积格局^[16-18],发育低能、欠补偿、缺氧的深水陆棚沉积,为有机质的生成和保存提供了有利的沉积环境^[19-24]。

随着五峰组—龙马溪组页岩基础地质特征研究的逐渐深入,借鉴古生物学家对奥陶系—志留系深水笔石带和浅水壳相的研究成果,多数学者认识到奥陶系—志留系之间沉积环境的变迁^[25-26]。

上奥陶统和下志留统之间存在沉积间断,影响了该时期笔石的发育特征^[9,24]。通过对生物地层的对比分析,提出奥陶纪—志留纪的交替期与湘鄂西的宜昌上升运动有紧密联系^[25]。笔石种属在奥陶纪—志留纪交替过程中发生剧变,五峰组发育高分异度笔石动物群,其年代跨度为447.62~443.83 Ma^[9,27-28]。四川盆地及周缘五峰组页岩段与下伏涧草沟组瘤状灰岩为整合接触关系,顶部发育观音桥段,与上覆龙马溪组整合接触。多数学者将五峰组和龙马溪组进行层序地层划分和对比,提出上奥陶统五峰组可以作为一个三级层序单元,将其页岩段作为海侵体系域,将观音桥段作为高位体系域。

2 岩相划分及类型

以硅质矿物(石英)、黏土矿物和碳酸盐矿物为三端元,进行岩相矿物组分划分。将五峰组页岩段划分为4种岩相类型:硅质页岩、含灰黏土质页岩、含黏土硅质页岩和含灰硅质页岩;五峰组观音桥段发育含介壳泥质灰岩。五峰组页岩段4种岩相页岩品质差异较大,硅质页岩有机碳含量和含气量最高,含灰黏土质页岩有机碳含量、脆性矿物含量以及含气量均较差(表1)。

2.1 硅质页岩

硅质页岩是五峰组页岩段的主要岩相类型,石英含量较高,一般大于50%;黏土矿物含量小于30%(图2a-d)。硅质常常呈隐晶质、不定形结构,表现出似球粒结构;可见海绵骨针、放射虫、硅藻等骨架物质残片,局部富集成层(图2b,c)。陆源碎屑石英和长石粉砂在硅质页岩中含量相对较少,与粉砂质页岩具有明显区别。硅质页岩中微晶石英主要为生物成因,在阴极光照射下表现为蓝紫光,与碎屑石英易于区分(图2e,f)。硅质页岩有机质含量较高,一般介于2%~4%。

表1 四川盆地及周缘五峰组页岩岩相参数统计

Table 1 Lithofacies parameters of Wufeng shale in Sichuan Basin and its periphery

岩相类型	样品个数	石英含量/%	有机碳含量/%	脆性矿物含量/%	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)
硅质页岩	12	67.6	4.6	72.1	5.2
含灰硅质页岩	4	42.0	3.5	68.3	3.6
含黏土硅质页岩	3	45.9	3.6	65.4	3.6
含灰黏土质页岩	4	33.4	1.2	52.1	1.1

注:数据来自焦页1、永页1、威页23-1、丁页2、彭页1井等。

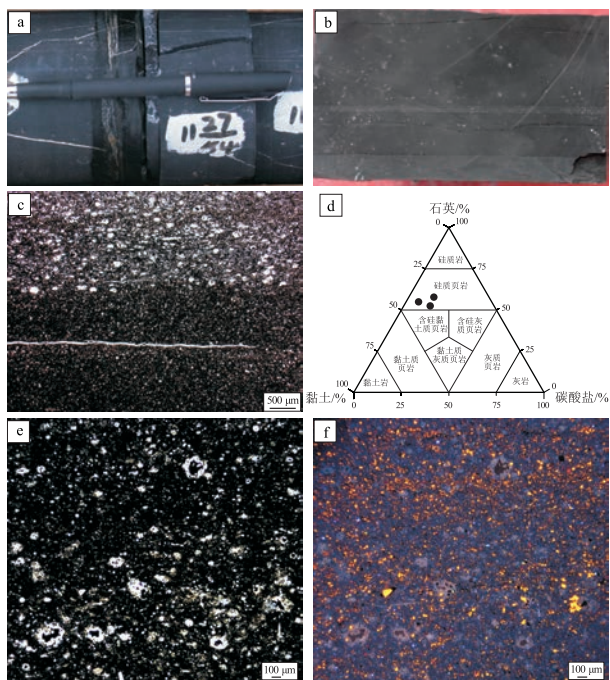


图2 四川盆地五峰组硅质页岩特征

a. 焦页1井, 2 412 m; b. 威页23-1井, 3 587.7 m; c. 永页1井, 3 865.9 m, 正交光; d. 三角图数据; e, f. 威页23-1井, 3 847.5 m, 阴极发光照射特征

Fig.2 Characteristics of siliceous shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin

2.2 含黏土硅质页岩

含黏土硅质页岩中石英含量介于40%~50%, 硅质以自生石英、生物石英为主, 发育少量陆源石英。黏土矿物含量大于30%, 碳酸盐含量较少, 不超过10%(图3a, b)。其与硅质页岩的主要区别在于石英(尤其是生物石英)与有机质含量略有降

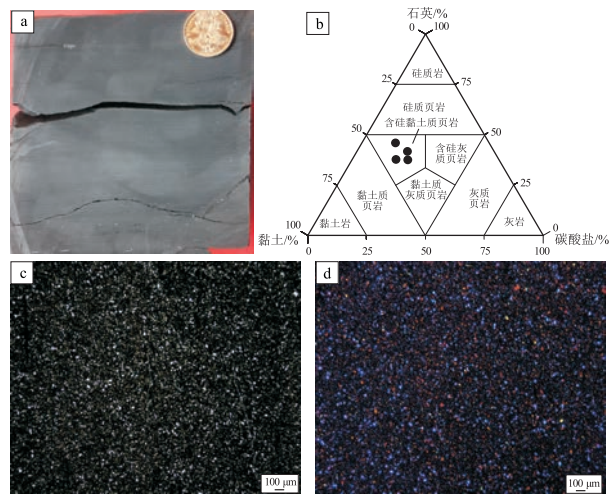


图3 四川盆地五峰组含黏土质硅质页岩特征

a. 岩心特征, 永页1井, 3 869.41 m; b. 三角图数据; c, d. 阴极发光照射特征

Fig.3 Characteristics of clayey siliceous shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin

低, 在薄片和岩心中较少见到硅质生物顺层分布(图3c, d)。

2.3 含灰硅质页岩

含灰硅质页岩石英含量介于40%~50%, 硅质以自生石英、生物石英为主, 发育少量陆源石英。黏土矿物含量介于25%~40%。碳酸盐含量有所增加, 介于10%~25%(图4a, b)。其与硅质页岩的主要区别在于石英与黏土矿物含量略有降低, 碳酸盐矿物含量相对增加, 在薄片和岩心中见明显的灰色碳酸盐矿物纹层, 厚度约1 mm, 纹层平直, 层间界线较为清晰且连续(图4c, d)。阴极发光照射下, 可见亮黄色碳酸盐岩矿物顺层分布(图4e, f)。

2.4 含灰黏土质页岩

含灰黏土质页岩主要分布在五峰组底部与临湘组灰岩接触的区域, 其黏土矿物含量40%~50%, 碳酸盐矿物含量10%~20%, 石英含量约30%~40%(图5a-c)。该岩相块状构造, 页理不发育, 断面粗糙不平整, 可见角石等生物碎屑(图5b)。

2.5 含介壳泥质灰岩

含介壳泥质灰岩/灰质泥岩主要分布在五峰组顶部观音桥段, 厚度一般介于20~40 cm, 主要以介壳类生物化石为主, 包括腕足类、瓣鳃类、棘皮动

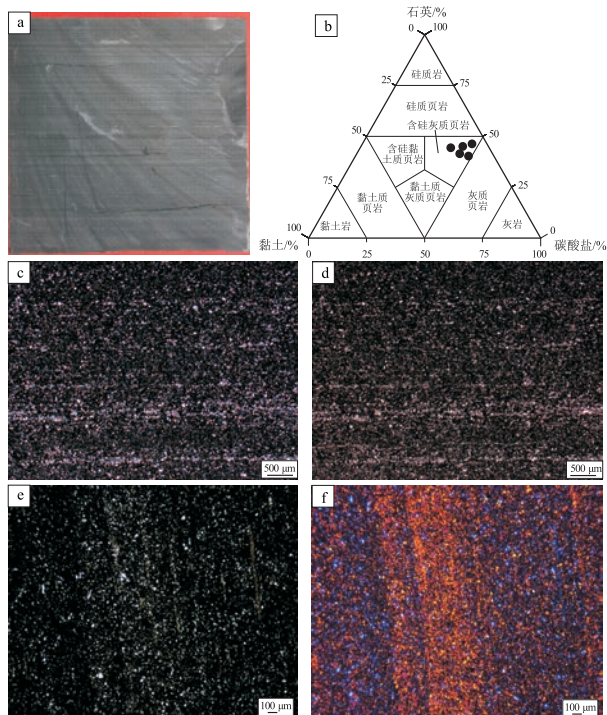


图4 四川盆地五峰组含灰硅质页岩特征

a. 岩心特征, 威页23-1井, 3 849.63 m; b. 三角图数据; c. 正交光镜下特征; d. 单偏光镜下特征; e, f. 阴极发光照射特征

Fig.4 Characteristics of gray siliceous shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin



图5 四川盆地五峰组含灰黏土质页岩特征

a.岩心特征,永页1井,3 849.63 m;b.岩心断面角石;c.三角图数据

Fig.5 Characteristics of gray clayey shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin

物。部分介壳保存相对完好,破碎的介壳多平行层面排列,多数凹面向上,少数凸面向上。岩心上含介壳泥质灰岩顶底通常为突变接触关系,介壳碎片与泥岩裂屑共生(图6a-d)。岩性为深灰色含介壳泥灰岩,生物碎屑较为破碎,可见少量壳类生物碎屑(图6e,f)。

3 岩相组合特征

3.1 川东南地区

川东南焦石坝地区焦页1井五峰组发育深度

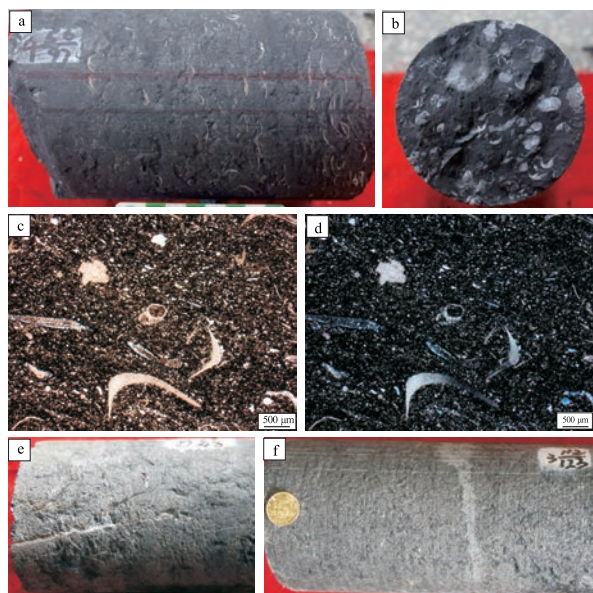


图6 四川盆地五峰组观音桥段含介壳泥质灰岩特征

a,b.岩心特征,仁页1井,4 050.5 m;c,d.薄片特征,威页23-1井,3 849.04 m;e,f.岩心特征,焦石坝地区

Fig.6 Characteristics of marl with shell in Guanyinqiao Section, Wufeng Formation, Sichuan Basin

为2 409.7~2 415.4 m(图7)。五峰组底部含灰黏土质页岩(30 cm)与下伏涧草沟组瘤状灰岩整合接触,向上快速过渡为灰黑色硅质页岩。五峰组顶部观音桥段发育一套厚20 cm的含介壳泥质灰岩,与底部硅质页岩突变接触,介壳破碎,表现为再搬运特征,为深水浊流成因(图7a-e)。焦石坝地区观音桥段发育不稳定,在最南部焦页8井不发育,其他井段发育厚度20~35 cm不等。

川东南其他地区(彭水、武隆、南川、丁山以及盐井地区)五峰组岩性组合特征与焦石坝地区具有较强的一致性,自下而上3种岩性分别为薄层含灰黏土质页岩、厚层硅质页岩以及含介壳泥质灰岩。

3.2 川南永川地区

川南永川地区永页1井五峰组发育深度为3 865.2~3 872.7 m,底部发育厚层含灰黏土质页岩,与下伏涧草沟组瘤状灰岩整合接触,向上过渡为含黏土硅质页岩和硅质页岩(图8)。其中,含黏土硅质页岩和硅质页岩层理发育,断面平整可见笔石生物碎屑。五峰组底部的厚层含灰黏土质页岩块状构造,断面粗糙不平整,可见角石等生物碎屑(图5b),反映相对浅水的沉积环境。五峰组顶部

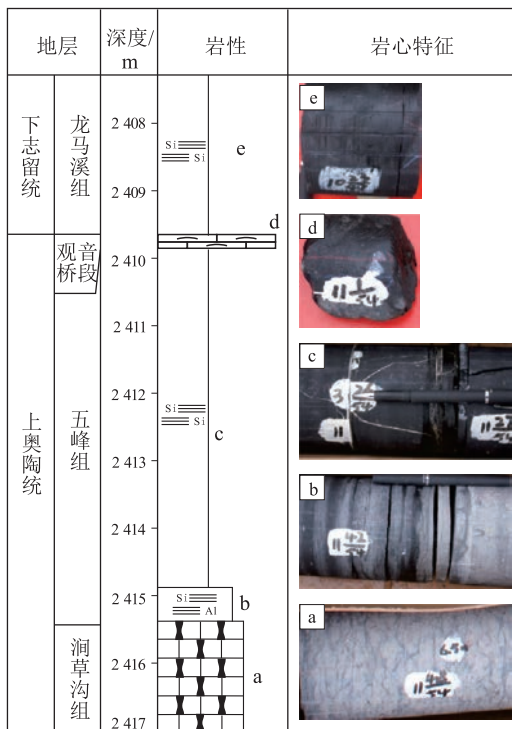


图7 四川盆地焦页1井五峰组及其上、下地层岩性组合特征

a.瘤状灰岩;b.含灰黏土质页岩;c.硅质页岩;d.含介壳泥质灰岩;e.硅质页岩

Fig.7 Lithologic combination of Wufeng and neighbouring formations in well Jiaoye 1, Sichuan Basin

发育 20 cm 厚的观音桥段含介壳泥质灰岩,断面可见赫南特贝。观音桥段上覆为龙马溪组硅质页岩。

3.3 川南威远地区

川南威远地区五峰组发育深度为 3 849 ~ 3 852.4 m,底部发育厚层含灰黏土质页岩与下伏涧草沟组瘤状灰岩整合接触,向上快速过渡为含灰硅质页岩,顶部发育观音桥段含介壳泥质灰岩,与上覆龙马溪组硅质页岩突变接触(图 8)。

4 五峰组分布特征

4.1 区域对比特征

通过四川盆地及周缘多口页岩气钻井岩心观察,五峰组岩性组合特征在区域内差异较大。整体而言,五峰组与下伏涧草沟组瘤状灰岩整合接触。这套含灰黏土质页岩在四川盆地不同区域内发育厚度不同,川东南仁怀、南川、焦石坝和川东北盐井地区厚度 20~30 cm 不等,永川地区厚度较大。

伴随着海平面的快速上升,五峰组底部浅水沉积物快速过渡为硅质和含硅页岩。在靠近川中古陆的威远地区只发育含灰硅质页岩,永川地区发育含黏土硅质页岩和硅质页岩。

五峰组沉积时期水体环境的差异也控制了顶部观音桥段的发育特征。在相对浅水的仁怀和昭通地区,观音桥段表现为原地沉积的含介壳灰岩特征。仁页 1 井观音桥段厚度 1.2 m,底部与含硅页岩渐变接触,岩心截面可见完整的介壳生物化石。在丁山、南川、焦石坝和彭水地区观音桥段发育厚度较小,均小于 50 cm,与下伏硅质页岩突变接触,局部可见冲刷面,表现为再搬运特征,为深水浊流成因。

4.2 平面分布特征

五峰组硅质页岩代表深水的沉积,沉积中心的

硅质页岩厚度可达 7 m 以上,位于川东建始由北向南呈带状分布,大部分在现今的四川盆地边界以东,在焦石坝—宜宾有一厚度大于 5 m 的分支沉积中心,指示川中隆起与黔北隆起所夹持的川南地区存在一个次级坳陷(图 9)。受控于古地貌以及沉积环境,五峰组硅质页岩具有明显的分区性特征。川东南焦石坝、武隆、丁山、南川以及川南部分地区发育厚度大于 4 m 的硅质页岩,与上覆龙马溪组硅质页岩具有一致的页岩品质,有机碳含量、含气量以及脆性矿物含量较高,可作为水平井靶窗。川南永川地区五峰组页岩品质较差,不建议作为水平井靶窗;川南威远地区五峰组厚度较小,也不建议作为水平井靶窗。

五峰组上部的观音桥段泥质灰岩代表浅水的沉积^[9]。在靠近川中隆起、黔北隆起的地区,观音

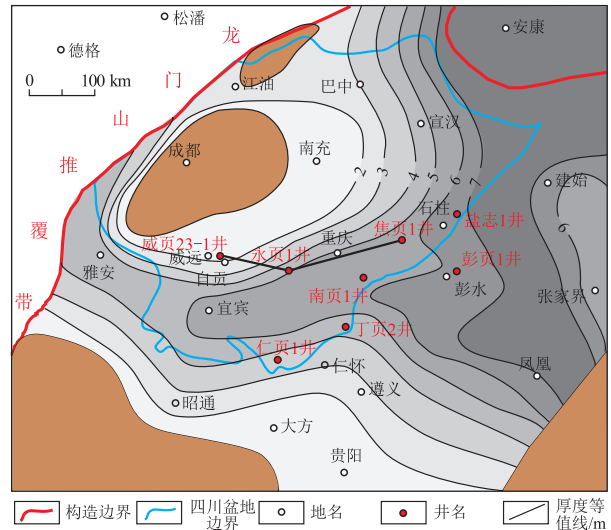


图 9 四川盆地及周缘五峰组硅质页岩厚度等值线
Fig.9 Thickness contours of siliceous shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin and its periphery

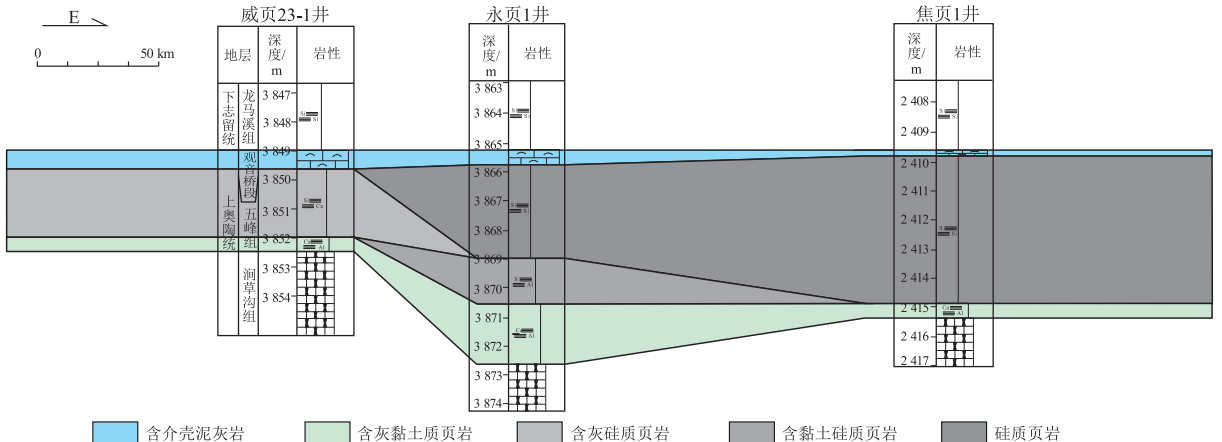


图 8 四川盆地五峰组地层对比剖面

Fig.8 Stratigraphic correlation of Wufeng Formation, Sichuan Basin

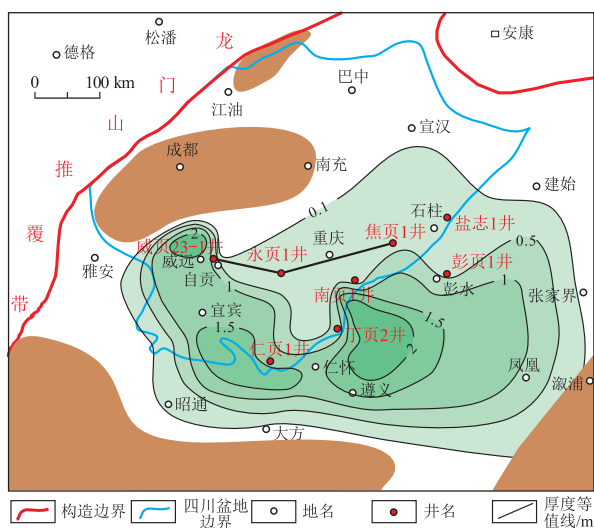


图10 四川盆地及周缘观音桥段厚度等值线

Fig.10 Thickness contours of Guanyinqiao section, Sichuan Basin and its periphery

桥段含介壳灰岩厚度较大,灰岩质地较纯,表现为原地沉积特征,而在川东南地区向东、向北的地区,观音桥段表现为异地再搬运特征,岩性为灰黑色含介壳泥质灰岩。观音桥灰岩段厚度较大的地区形成一个三面合围、向北散开的格局,向北的开口在重庆—宣汉一线,指示水深加大的方向,表明由川西南向川东北方向水深加大(图10)。

5 结论

通过对四川盆地及周缘上奥陶统五峰组进行岩相划分和区域对比,得到以下结论:

(1)五峰组分为页岩段和观音桥段,其中页岩段可划分为4种岩相类型:硅质页岩、含黏土硅质页岩、含灰硅质页岩以及含灰黏土质页岩,观音桥段发育含介壳泥质灰岩。

(2)观音桥段厚度变化较大,相对浅水且靠近古陆的仁怀地区和威远地区厚度较大,表现为原地沉积特征,其他地区为异地搬运沉积特征,厚度较小。

(3)四川盆地及周缘五峰组页岩段厚度受控于沉积环境,川南永川地区等相对浅水的区域厚度较大,但是页岩品质较差,有机碳含量、含气量相对较低,不建议作为水平井靶窗;川南威远地区受到古陆和古地形影响,页岩厚度较小,不建议作为水平井靶窗;川东南焦石坝、武隆、丁山和南川地区页岩厚度相对较大,页岩品质最好,可作为水平井靶窗。

致谢:本次研究使用了中国石化西南油气分公司、江汉油田分公司以及勘探分公司的相关数据和

资料,在此致以衷心感谢!

参考文献:

- [1] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [2] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [3] 易积正,王超.四川盆地焦石坝地区龙马溪组海相页岩储层非均质性特征[J].石油实验地质,2018,40(1):13-19.
YI Jizheng, WANG Chao. Differential pore development characteristics in various shale lithofacies of Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(1): 13-19.
- [4] 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 Baiqiao, 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.
- [5] 熊亮.川南威荣页岩气田五峰组—龙马溪组页岩沉积相特征及其意义[J].石油实验地质,2019,41(3):326-332.
XIONG Liang. Characteristics and significance of sedimentary facies of Wufeng-Longmaxi formation shale in Weirong Shale Gas Field, southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(3): 326-332.
- [6] 葛忠伟,樊莉,钟文俊,等.威远龙马溪组黑色页岩非均质性及其对开发的影响[J].非常规油气,2019,6(4):33-39.
GE Zhongwei, FAN Li, ZHONG Wenjun, et al. Heterogeneity of black shale of Longmaxi Formation in Weiyuan and its impact on development [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 33-39.
- [7] 洪亚飞,王建忠,孙强.焦石坝页岩气储层产能影响因素分析[J].非常规油气,2016,3(5):73-78.
HONG Yafei, WANG Jianzhong, SUN Qiang. Analysis of the influence factors for shale gas reservoir in Jiaoshiba area [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(5): 73-78.
- [8] 杨敬之,穆恩之.鄂西长阳宜都一带奥陶纪地层[J].古生物学报,1954,2(1):59-82.
YANG Jingzhi, MU Enzhi. The Ordovician stratigraphy of the Changyang-Yidu area, western Hubei [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1954, 2(1): 59-82.
- [9] 陈旭,戎嘉余.从生物地层学到大地构造学:以华南奥陶系和志留系为例[J].现代地质,1999,13(4):385-389.
CHEN Xu, RONG Jiayu. From biostratigraphy to tectonics: with Ordovician and Silurian of South China as an example [J]. Geoscience, 1999, 13(4): 385-389.
- [10] 周雁,陈洪德,王成善,等.中扬子区海相地层层序样式及其油气地质意义[J].成都理工大学学报,2002,29(1):26-30.

- ZHOU Yan, CHEN Hongde, WANG Chengshan, et al. The sequence style of marine strata and its relationship with petroleum geology in the Mid-Yangze area [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(1): 26-30.
- [11] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 151-156.
- ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, XU Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 151-156.
- [12] 何顺, 秦启荣, 范存辉, 等. 川东南丁山地区五峰—龙马溪组页岩储层特征及影响因素[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(4): 61-67.
- HE Shun, QIN Qirong, FAN Cunhui, et al. Shale reservoir characteristics and influencing factors of Wufeng-Longmaxi formation in Dingshan area, southeast Sichuan [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(4): 61-67.
- [13] 许露露, 张焱林, 陈程, 等. 鄂西地区黄陵背斜周缘五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(5): 26-32.
- XU Lulu, ZHANG Yanlin, CHEN Cheng, et al. Shale gas reservoir and gas-bearing properties of Wufeng-Longmaxi formations in the periphery of Huangling anticline of western Hubei province [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 26-32.
- [14] 钟城, 秦启荣, 胡东风, 等. 川东南丁山地区五峰组—龙马溪组页岩气藏“六性”特征[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(2): 14-23.
- ZHONG Cheng, QIN Qirong, HU Dongfeng, et al. Experimental study on “six properties” of shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formation in Dingshan area, southeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(2): 14-23.
- [15] 杨振恒, 翟开博, 邓模, 等. 彭水及邻区五峰—龙马溪组成烃生物特征及意义[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(5): 40-44.
- YANG Zhenheng, ZHAI Changbo, DENG Mo, et al. Characteristics and significance of hydrocarbon-forming organisms of Wufeng-Longmaxi formation in Pengshui and its adjacent areas [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(5): 40-44.
- [16] 龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气成藏条件及有利区预测[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 221-233.
- LONG Pengyu, ZHANG Jinchuan, LI Yuxi, et al. Reservoir-forming conditions and strategic select favorable area of shale gas in the Lower Paleozoic of Chongqing and its adjacent areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 221-233.
- [17] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 南方海相上奥陶统一志留统优质烃源岩发育的控制因素[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 872-880.
- LI Shuangjian, XIAO Kaihua, WO Yujin, et al. Developmental controlling factors of Upper Ordovician-Lower Silurian high quality source rocks in marine sequence, South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 872-880.
- [18] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- WANG Hongzhen. Atlas of the paleogeography of China [M]. Beijing: Cartography Press, 1985.
- [19] 刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集(震旦纪—三叠纪)[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- LIU Baojun, XU Xiaosong. Lithofacies paleogeographic atlas of southern China [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [20] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. *海相油气地质*, 2008, 13(2): 1-16.
- LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (part 1): distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2008, 13(2): 1-16.
- [21] 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造—岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- ZHENG Herong, HU Zongquan. Tectonic-lithofacies paleogeographic atlas of Former Paleozoic of China [M]. Beijing: Geological Press, 2010.
- [22] 郑和荣, 高波, 彭勇民, 等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J]. *古地学报*, 2013, 15(5): 645-656.
- ZHENG Herong, GAO Bo, PENG Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 645-656.
- [23] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国南方寒武纪和奥陶纪岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- FENG Zengzhao, PENG Yongmin, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian and Ordovician in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [24] 穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 华中区上奥陶统笔石[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- MU Enzhi, LI Jijin, GE Meiyue, et al. Ordovician graptolite in central China region [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [25] 戎嘉余, 陈旭, 王恽, 等. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- RONG Jiayu, CHEN Xu, WANG Yi, et al. Northward expansion of central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: evidence and implications [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- [26] WILLIAMS S H. The Ordovician-Silurian boundary graptolite fauna of Dob's Linn, southern Scotland [J]. *Palaeontology*, 1983, 26: 605-639.
- [27] RONG Jiayu, MELCHIN M J, WILLIAMS S H, et al. Report of the restudy of the defined global stratotype of the base of the Silurian System [J]. *Episodes*, 2008, 31(3): 315-318.
- [28] CHEN Xu, MELCHIN M J, SHEETS H D, et al. Patterns and processes of latest Ordovician graptolite extinction and recovery based on data from South China [J]. *Journal of Paleontology*, 2005, 79(5): 842-861.