

doi: 10.13745/j.esf.2016.01.001

川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素

金之钧^{1,2,3}, 胡宗全^{1,2,3}, 高波^{1,2,3}, 赵建华⁴

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083
2. 中国石化页岩油气重点实验室, 北京 100083
3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

JIN Zhijun^{1,2,3}, HU Zongquan^{1,2,3}, GAO Bo^{1,2,3}, ZHAO Jianhua⁴

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China
3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China
4. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

JIN Zhijun, HU Zongquan, GAO Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng – Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 001-010

Abstract: Based on a comparison of geological and surface conditions for shale gas in China and America, we conclude that marine strata in South China having similar properties to those of America are targets for shale gas exploration, and the Sichuan Basin and its surroundings are favorable exploration areas. After six years of research and exploration, the Fuling shale gas field, which is the first major commercial shale gas play in China, was finally found in the Sichuan Basin in 2012 and then successfully developed. The shale gas enrichment and high productivity in the Wufeng – Longmaxi Formations is mainly controlled by the original depositional environment which determines organic matter content and post-depositional conditions that promote shale preservation and gas retention within the shale after thermal maturation. Deposition and distribution of the shales are controlled by the platform depression environment. Thickness and TOC content are the evaluation parameters for play. The late preservation conditions control the enrichment of shale gas. There are favorable preservation conditions and high degree of shale gas enrichment in the internal of Sichuan Basin, which are characterized by widely distributed Triassic gypsolyte layers and high pressure coefficient. The areas where both original depositional environment and preservation conditions are favorable should be given priority in play evaluation. Comprehensive analysis of the shale gas reservoir indicates that organic matter content is the principal control on shale gas enrichment, the organic micro-pores are the main reservoir space, horizontal bedding fractures ensure horizontal seepage, and that the high siliceous mineral content ensures good fracturing effect, high pressure coefficient indicates high degree of shale gas enrichment. These five properties have genetic relationships and statistical correlation and are characterized by “five properties in one position” distribution features in vertical. The high quality shales with “five properties in one position” feature is conducive to the enrichment of shale gas and benefit for its development, which is the main development of shale gas layer and key objectives of horizontal well trajectory.

Key words: Sichuan Basin; evaluation parameters; enrichment of shale gas; five properties in one position

收稿日期: 2015-09-13; 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 中国石化科技攻关项目“页岩气源—储相互关系及含气性研究”(G5800-13-ZS-KJB005)

作者简介: 金之钧(1957—), 男, 中国科学院院士, 研究方向为盆地分析与油气资源评价、油气成藏机理与分布规律。E-mail: jinzhj.syky@sinopec.com

摘要:中美页岩气地质和地表条件的对比分析表明,中国南方海相页岩与北美典型页岩的主要评价指标相近,是页岩气勘探的主攻层系。其中,四川盆地及周缘地区是有利勘探地区。中国石油化工股份有限公司2006年以来,经历6年的研究与勘探探索,2012年在四川盆地涪陵焦石坝地区龙马溪组页岩气获得重大突破,发现了涪陵页岩气田,取得了中国页岩气的首个商业发现。五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产的地质因素包括原始沉积条件和后期保存条件,台内拗陷控制优质页岩的形成分布,页岩厚度大、有机质含量高是页岩气选区的首要评价指标。保存条件影响页岩气的富集程度,四川盆地内部总体保存条件较好,有三叠系膏盐岩分布的地区保存条件好,页岩气层段压力系数高,页岩气富集程度高。在选区评价中,原始沉积条件和后期保存条件均有利的地区是页岩气勘探的有利区。通过对典型探井五峰组-龙马溪组页岩气富集条件的分析表明,有机质提供了页岩气富集的物质基础,有机质孔是页岩气富集的主要储集空间,层理(缝)是页岩气水平渗流的高效通道,高硅质含量具有良好的可压性,高压系数指示页岩气富集程度高。有机质、有机质孔、层理(缝)、硅质含量和压力系数等表征页岩气富集与高产的5种关键参数具有成因联系和统计相关的特征,纵向上又具有“五性一体”的分布特征,从而决定了五峰组-龙马溪组下部富含有机质的优质页岩层段既可以富集页岩气,又有利于页岩气的开发,是开发页岩气的主要层段和水平井轨迹的关键目标层。

关键词:四川盆地;评价指标;页岩气富集;五性一体

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)01-0001-10

1 涪陵页岩气田的发现过程

美国页岩气革命的成功在世界范围内掀起了页岩气勘探开发的高潮。2003年以来,笔者积极跟踪美国页岩气勘探开发进展,并于2004年在《天然气工业》上发表了“页岩气成藏机理与分布”论文,对页岩气成藏机理进行了探讨,指出我国四川盆地、鄂尔多斯盆地等多个含油气盆地均具有页岩气成藏的地质条件^[1]。2006年,中国石油化工股份有限公司开展了“中国页岩气早期资源潜力分析”研究,在对美国沃森堡盆地 Barnett、阿巴拉契亚盆地 Ohio 等5套传统页岩的页岩气形成富集条件进行解剖分析的基础上,初步建立了页岩气选区评价方法,优选了南方海相为页岩气勘探的重点领域。2009年,中国石化开展了南方海相页岩气选区评价研究,优选了一批页岩气勘探有利区,并于2010年针对下寒武统和下志留统页岩部署实施了宣页1井、黄页1井和河页1井,发现了优质页岩和少量页岩气,认识到保存条件是控制南方构造复杂区页岩气富集的重要因素,提出南方海相页岩气勘探向发育有三叠系膏盐岩层、保存条件好的四川盆地及其周缘聚焦。与此同时,中国石化积极加强与国外公司的技术交流。2011年,中国石化开展了四川盆地及其周缘页岩气选区评价研究,认识到川东南地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组为页岩气勘探开发的重点领域,优选了彭水桑柘坪、涪陵焦石坝等一批页岩气勘探目标,并部署实施了彭页1井和焦页1井。2012年5月,彭页HF-1井在下志留统龙马溪组压裂测试获得日产页岩

气2.5万方,揭示了四川盆地周缘构造复杂区保存条件相对较好的向斜区具有较好的页岩气勘探潜力。2012年11月,焦页1HF井在龙马溪组压裂测试获得日产气20.3万方,2013年启动了开发先导试验井组,并甩开部署了焦页2HF、焦页3HF、焦页4HF。2014年7月,国土资源部油气储量评审办公室组织专家经过评审认定,涪陵焦石坝区块焦页1—焦页3井区五峰组-龙马溪组,新增页岩气探明地质储量1067.5亿方,标志着涪陵页岩气田的诞生。

2 五峰组-龙马溪组页岩气形成的地质背景

笔者针对中国叠合盆地的特殊性,提出“源-盖控烃”的油气勘探思路并建立了相应的评价方法^[2],中国南方五峰组-龙马溪组页岩气同样受控于“烃源和保存”两大要素,即原始的沉积条件和后期的保存条件,勘探实践也表明页岩气与盖层的关系十分密切。

早奥陶世晚期—志留纪,由于华夏与扬子地块之间的板块汇聚作用,四川盆地处于挤压应力环境,盆地性质为克拉通内继承性挤压拗陷盆地,克拉通边缘普遍挤压隆升,整体为受隆起分割围限的盆地格局。上扬子地台奥陶纪发育碳酸盐岩台地,在晚奥陶世时期,边缘古隆起已形成,特别是雪峰隆起、川中隆起和黔中隆起出露海平面,使早中奥陶世时期具有广海特征的海域转变为被隆起所围限的局限浅海域,形成大面积低能、欠补偿、缺氧的沉积环境^[3]。受构造运动及海侵影响,晚奥陶世五峰组沉积时期沉积了一套稳定的笔石相薄层黑色页岩^[4],

主要为硅质页岩、硅质岩,分布范围广泛,厚度仅几米、个别地区达几十米;受冈瓦纳古陆冰期的影响,五峰组顶部通常为是一套富含介壳泥灰岩、灰质泥岩,厚度几十厘米,称为观音桥段。早志留世龙马溪组沉积期,在扬子克拉通上,构造-古地理表现为形成古隆起的高峰阶段,隆起边缘主要发育滨岸-浅水陆棚、中陆棚和深水陆棚环境(图 1),岩性以灰黑色泥页岩占绝对优势,局部夹粉细砂岩;厚度分布介于 55~516 m^[3]。

3 五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素

3.1 有机质提供了页岩气富集的物质基础

涪陵气田产层为五峰组-龙马溪组下部的富有机质页岩,含气页岩层段厚 83.5~102 m,其中 TOC 含量大于 2% 的优质页岩厚度 38~44 m。富有机质页岩横向分布稳定,可对比性好。焦页 1 井

五峰组-龙马溪组下部 38 m 优质页岩段平均孔隙度 4.5%,现场含气量平均值达 2.99 m³/t(图 2)。

焦页 1 井岩心样品测试结果表明,五峰组-龙马溪组下段页岩 TOC 含量介于 0.55%~5.89%,平均 2.5%。针对五峰组-龙马溪组下段页岩不同的岩石类型,分别统计了 TOC 含量,其中硅质页岩 TOC 含量介于 2.56%~4.97%,平均 3.89%;含硅质页岩 TOC 含量介于 2.01%~3.77%,平均 2.84%;灰质页岩 TOC 含量介于 1.29%~2.99%,平均 2.10%;粉砂质页岩 TOC 含量介于 1.32%~2.68%,平均 1.70%;黏土质页岩 TOC 含量介于 0.60%~2.53%,平均 1.59%(图 3)。硅质页岩 TOC 含量最高,主要分布在五峰组和龙马溪组底部,与产气层段具有良好的对应性。

焦石坝地区五峰组-龙马溪组下段页岩有机碳含量与总含气量之间呈现较好的正相关关系(图 4),这与 Jarvie^[5]对 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩和 Strapoc 等^[6]对 Illinois 盆地 New Albany 页岩的

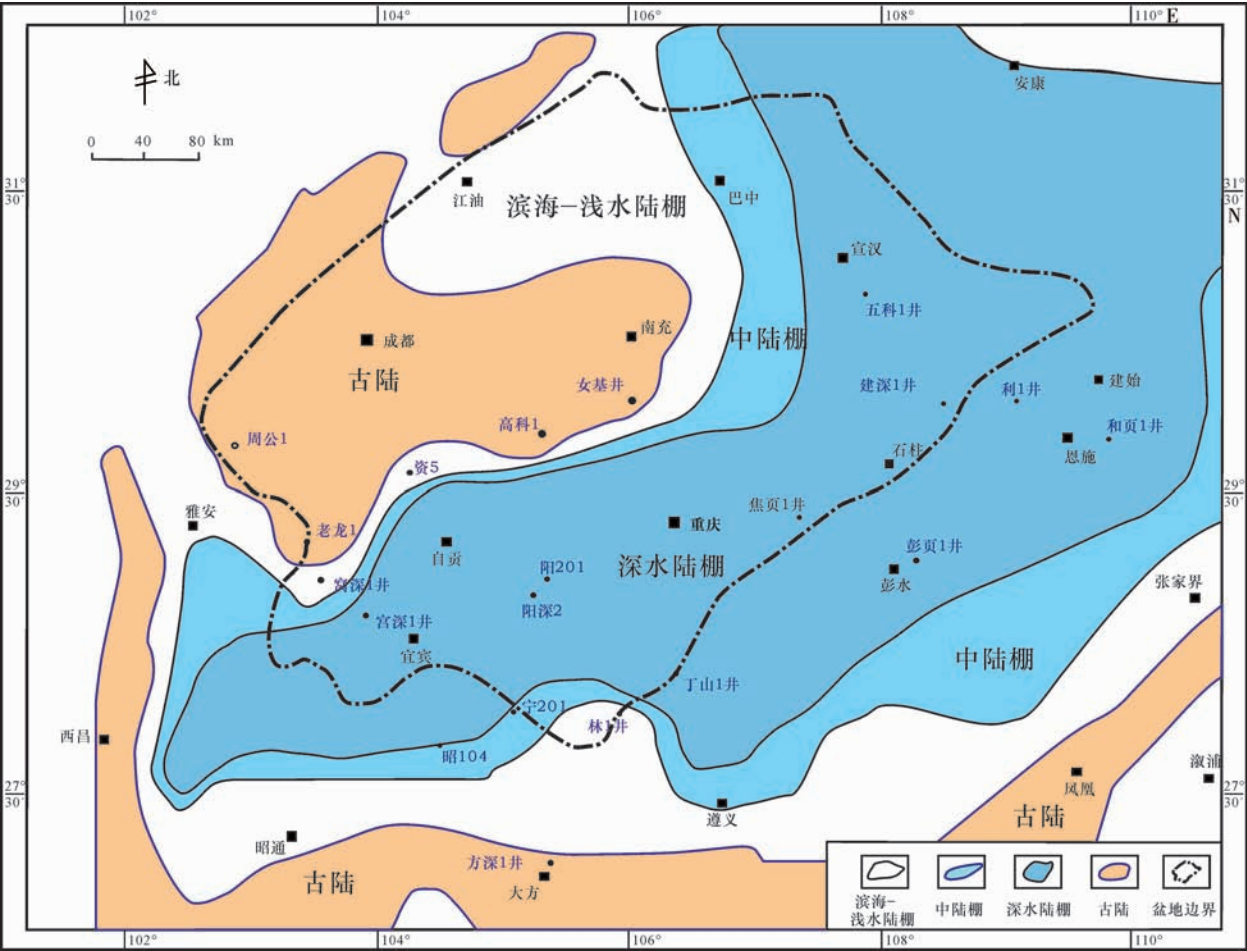


图 1 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组下部沉积相图
Fig. 1 Sedimentary facies of Wufeng Fm. - lower part of Longmaxi Fm. in the Sichuan Basin and adjacent areas

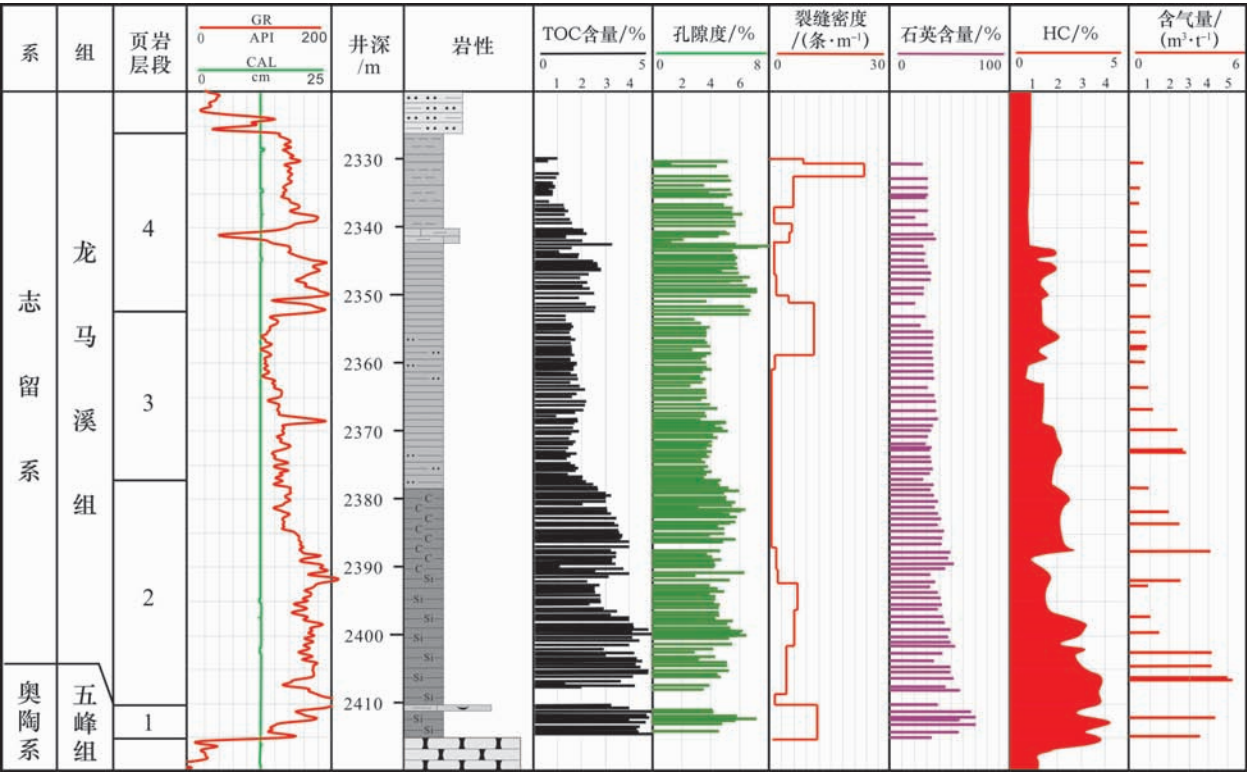


图 2 焦页 1 井五峰组-龙马溪组下段页岩气综合评价图
Fig. 2 Comprehensive evaluation histogram of Wufeng - Lower Longmaxi Fms. shale gas in the JY1 well

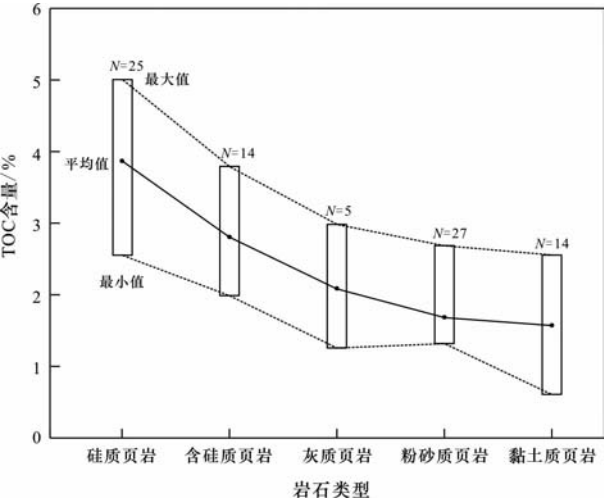


图 3 焦页 1 井五峰组-龙马溪组下段不同岩性的 TOC 含量直方图
Fig. 3 TOC distribution of different lithologies of Wufeng - Lower Longmaxi Fms. shales in the JY1 well

研究结果相一致,进一步揭示页岩的有机质丰度不仅影响到生烃潜力的大小,还对页岩的储集性能产生影响,从而控制页岩的含气量。

3.2 有机质孔是页岩气富集的主要储集空间
依据孔隙发育的主要载体(有机质、无机矿物)

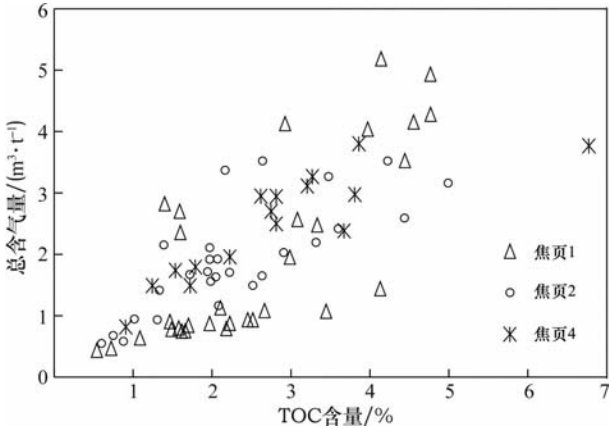
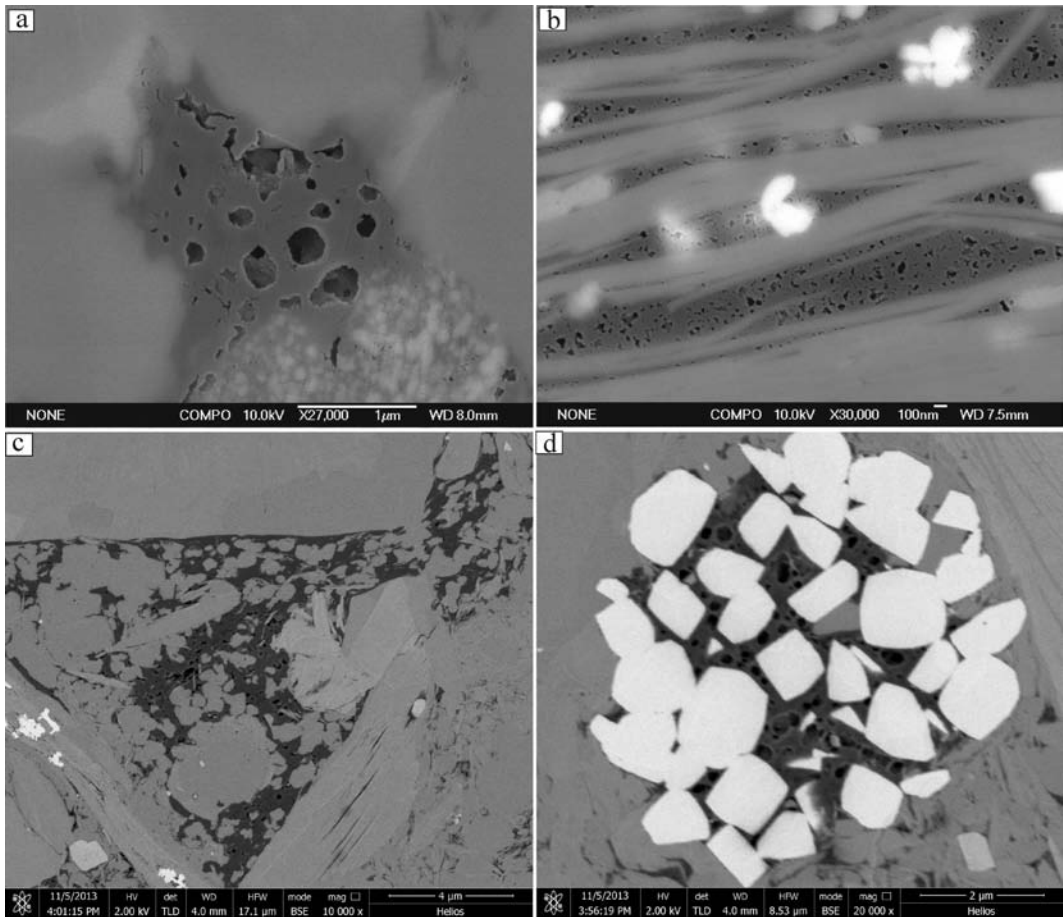


图 4 焦石坝地区五峰组-龙马溪组下段页岩 TOC 含量与总含气量关系图
Fig. 4 Correlation between TOC and total gas content of the Wufeng - Lower Longmaxi Fms. shales in the Jiaoshiba area

的不同,五峰组-龙马溪组下段页岩储集空间类型可以分为:有机孔隙、无机孔隙(颗粒相关孔隙、黄铁矿孔隙、黏土矿物孔隙)和微裂缝。

有机质孔存在于有机质内部,在平面上通常呈孤立的、不规则的气泡状的轮廓,但是在三维空间可以相互连通形成有效的孔隙网络,有机质颗粒的孔隙度可达到 40%^[7-8]。在五峰组-龙马溪组页岩中



a—颗粒间充填有机质,有机质孔发育, S_{1ln} ,2 406.16 m;b—黏土矿物间充填有机质,有机质孔较发育, S_{1ln} ,2 381.91 m;c—有机质、黏土矿物及黏土级颗粒呈絮状充填于颗粒间,有机质孔发育, S_{1ln} ,2 415.36 m;d—有机质充填于黄铁矿晶粒间,有机质孔发育, O_{3w} ,2 415.36 m。

图5 焦页1井五峰组-龙马溪组下段页岩的有机质孔隙

Fig. 5 Organic matter pore of the Wufeng - Lower Longmaxi Fms. shales in the JY1 Well

最常见的有机质是经过迁移的有机质,目前以高成熟沥青存在,其特点是无确定的形态、大小不定、颜色均匀、固态部分没有明显结构差异性和非均质性、内部发育纳米级孔隙,单体体积不大,孔径最小到几nm,最大的可达300~500 nm(图5)。

有机质孔是五峰组-龙马溪组下段中分布范围最广泛、数量最多、总体积最大、含气性最好的孔隙类型,是页岩气最主要的储集空间。研究表明,页岩孔隙度与有机质含量呈正相关关系(图6)。在下部的主力产气层段,有机质孔占页岩总孔隙度的50%~60%,向上随着有机质含量的降低,有机质孔所占的比例也相应降低,相应地总含气量、游离气与吸附气的数值均明显降低^[9]。

3.3 层理(缝)是页岩气水平渗流的高效通道

天然裂缝系统发育程度直接影响泥页岩油气产量^[10-12]。裂缝可以扩大页岩气的有效储集空间和运

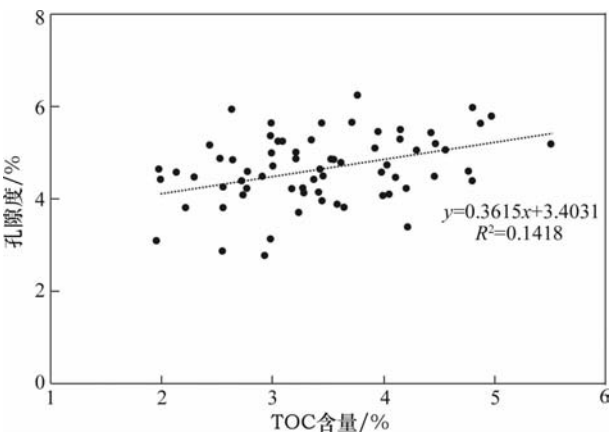


图6 五峰组-龙马溪组下段页岩孔隙度与TOC含量相关关系

Fig. 6 Correlation between porosity and TOC content of the Wufeng - Lower Longmaxi Fms. shales

移通道,有助于增加页岩层中游离态天然气体积和改善页岩的渗流能力^[13]。焦页1井五峰组-龙马溪

组页岩岩心上可见水平缝、垂直缝和高角度斜裂缝,部分被方解石充填,部分未充填;岩心断面上明显可见层间滑脱形成的擦痕(图 7b—e)。成像测井资料显示五峰组和龙马溪组下部页岩页理非常发育,由一系列薄层页岩组成。页理面为力学性质薄弱的界面,极易剥离,形成层理缝和水平纹层缝(图 7a)。另外,薄片观察发现微裂缝的存在(图 7f, g),这些裂缝为页岩气提供了良好的储集空间和渗流通道。

沿层理面发育的层理缝和纹层缝使页岩的水平渗透率增大。相关分析表明,五峰组—龙马溪组页岩的水平渗透率一般是垂直渗透率的 100~1 000 倍。由于垂直渗透率极低,页岩气很难通过垂向运移而迅速逸散,有利于页岩气的保存;水平渗透率高,在水平井多段压裂改造之后易形成裂缝网络,从而获得较高的产能。

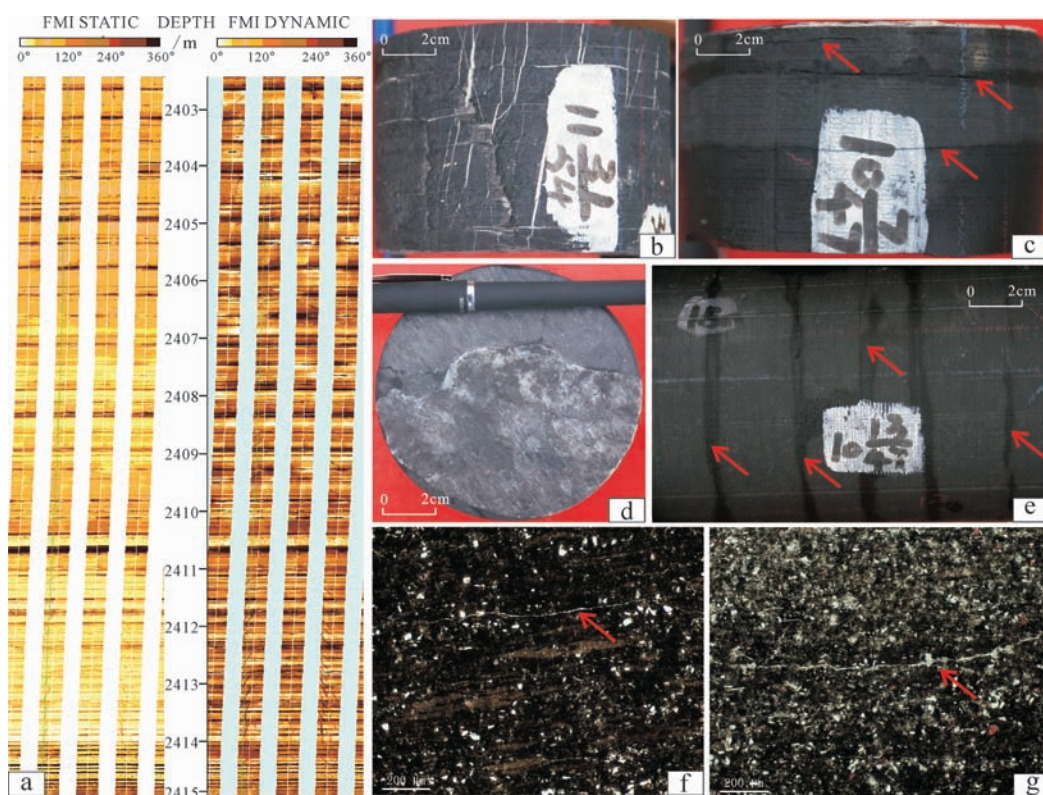
3.4 优质页岩硅质含量高而具有良好的可压性

涪陵地区焦页 1 井五峰组—龙马溪组下部优质页岩硅质矿物含量与 TOC 含量具有较好的正相关性,硅质矿物含量越高,有机碳含量越高(图 8),而

龙马溪组非优质页岩段硅质矿物含量与 TOC 含量相关性较差,揭示了优质页岩段与非优质页岩段硅质矿物成因的不同。硅质页岩是五峰组—龙马溪组产气层段的主要岩石类型,石英含量高,一般大于 45%。石英常常呈隐晶质、不定形结构,表现出似球粒结构(图 9a, b);可见海绵骨针、放射虫等骨架物质残片(图 9d, e)。椭球状的石英可能为成岩早期硅质充填藻类的囊泡,后期经压实形成椭球体^[14-15]。与粉砂质页岩不同,碎屑石英和长石在硅质页岩中含量相对较少。与 Barnett 页岩类似,硅质页岩中微晶石英主要为成岩过程中形成^[16-17]。硅质页岩有机质含量较高,一般介于 2%~4%,有机质主要呈团絮状赋存在硅质球粒间或石英颗粒间。

3.5 保存条件影响页岩气的富集程度

我国南方海相页岩气保存条件的影响因素主要有晚期构造活动引起的抬升剥蚀、断裂和裂缝的发育程度、区域性盖层的分布、顶底板条件及水文地质条件等。前人研究认为,对于四川盆地内部常规油气藏而言,大气田气源岩生气高峰的时代以古近纪



a—五峰组—龙马溪组下部成像测井图像,页理非常发育;b—水平缝和高角度缝被方解石充填, $S_1ln, 2 414.52$ m;c—未完全闭合的层理缝, $S_1ln, 2 402.43$ m;d—层间滑脱形成的擦痕, $S_1ln, 2 407.9$ m;e—未完全闭合的层理缝(箭头), $S_1ln, 2 403.23$ m;f—微裂缝被方解石充填,普通薄片,单偏光, $S_1ln, 2 335.08$ m;g—微裂缝被方解石充填,普通薄片,单偏光, $S_1ln, 2 342.59$ m。

图 7 焦页 1 井五峰组—龙马溪组页岩的裂缝特征

Fig. 7 Fracture characteristics of Wufeng-Longmaxi Fms. shales in the JY1 Well

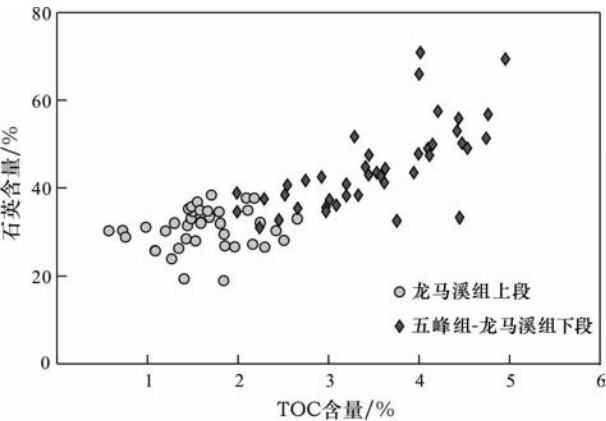


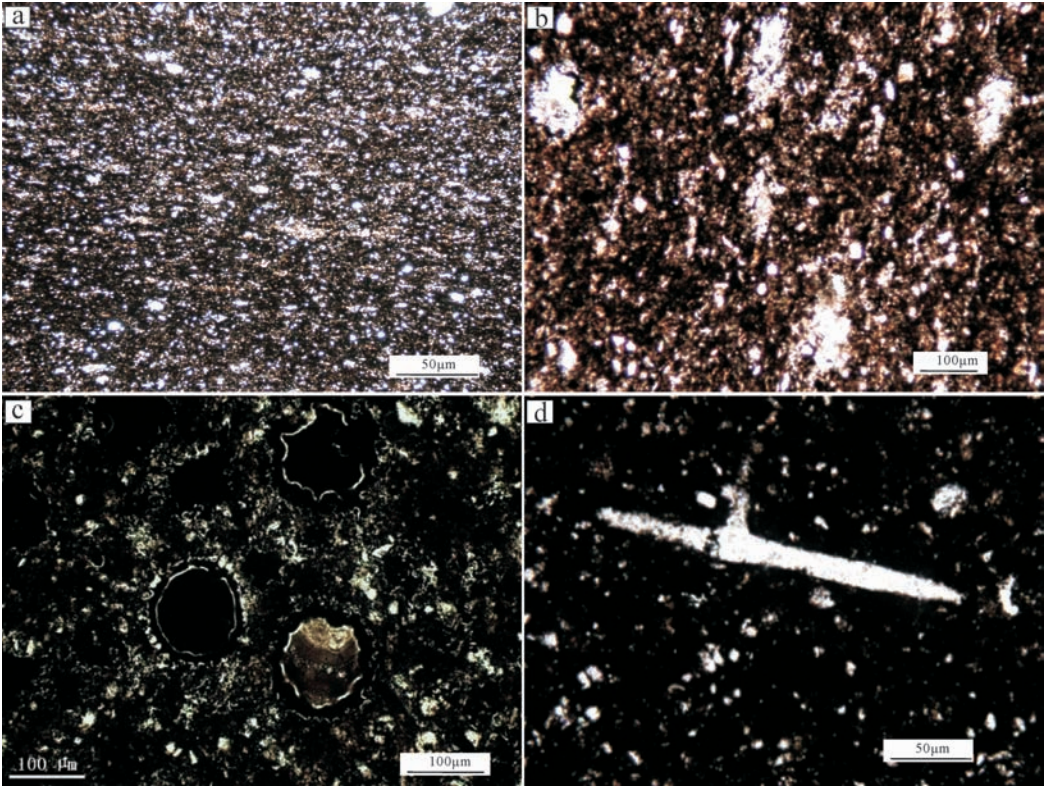
图 8 焦页 1 井五峰组-龙马溪组页岩 TOC 含量与石英含量相关关系

Fig. 8 Correlation between TOC and quartz content of Wufeng - Longmaxi Fms. shales in the JY1 well

为主,白垩纪、新近纪次之,并且气源岩生气高峰的时代越老,形成大气田所占比重越小^[18]。笔者认为页岩气也不例外,根据美国页岩气勘探开发经验判断,生气高峰、抬升时间越晚越好。焦页 1 井的热演化史分析表明,五峰组-龙马溪组页岩在早、中白垩

世达到最大埋深,超过 6 000 m, R_o 超过 2.5%,进入过成熟演化阶段,生成大量天然气并赋存在页岩孔隙中;晚白垩世快速抬升,生烃作用停止。抬升时间晚有利于页岩气的保存,四川盆地内部的焦页 1 井在晚白垩世开始抬升,而盆外的彭页 1 井在早白垩世就已开始抬升,这可能是导致盆地内部和外部保存条件差异的原因之一。

盖层及其微观性质、天然气组分和压力条件等是评价页岩气保存条件的重要指标^[19]。中国海相层系通常经历了多期油气成藏过程,而多期成藏对大气田形成和保存常具有负面作用^[20],优质盖层,特别是膏盐岩盖层是海相层系形成大中型油气田的关键。勘探实践表明,大型天然气田盖层多以膏盐岩为主,若盖层条件优越,即使烃源岩时代老,油气也能得以保存^[2]。对研究区龙马溪组页岩来说,中下三叠统膏盐岩发育的区域能形成一定范围内的压力封闭,有利于页岩气成藏和保存。川南长宁地区保存了部分三叠系膏盐岩,宁 201 井龙马溪组页岩气藏压力系数达到 2.0。渝东彭水地区不发育三叠系膏盐岩层,彭页 1 井龙马溪组页岩气藏的压力系



a—似球粒结构,包含生物化石,经压实形成椭球体,焦页 2 井, O_3w , 2 570.9 m; b—椭球状的石英,可能为成岩早期硅质充填藻类的囊孢,可见藻的囊壁,焦页 2 井, O_3w , 2 570.9 m; c—放射虫,焦页 1 井, S_1ln , 2 389.3 m; d—海绵骨针,焦页 2 井, S_1ln , 2 545.2 m。

图 9 焦石坝地区五峰组-龙马溪组页岩中的生物硅

Fig. 9 Biogenic silica in Wufeng - Longmaxi Fms. shales in the Jiaoshiba area

数仅为 1.0 左右。压力系数是保存条件的综合反映,美国页岩气的勘探开发表明,压力系数较高的页岩气藏一般具有较好的产能。类比我国南方海相页岩气地质条件,区域范围内的压力封闭区是页岩气勘探的有利地区。四川盆地内部总体保存条件好,压力系数高,多在 1.2 以上,其中焦页 1 井为 1.55 左右,压裂后页岩气产量较高;四川盆地外部总体保存条件较盆地内部变差,如彭水地区的彭页 1 井压力系数在 1.0 左右,页岩气产量较低(图 10);压力系数较低的河页 1 井和黄页 1 井等压裂后效果不佳。

3.6 “五性一体”的页岩气富集机理

基于岩性及地球化学特征,将五峰组-龙马溪组下段进一步划分出 4 个页岩层段:页岩层段 1 对应五峰组,岩性均以硅质页岩为主;页岩层段 2 对应龙马溪组底部,岩性以含硅质页岩为主;页岩层段 3 对应龙马溪组下段中部,岩性以粉砂质页岩为主;页岩层段 4 对应龙马溪组下段顶部,岩性以黏土质页岩为主。根据各页岩层段 TOC 含量、孔隙度、裂缝密度、硅质含量及含气量数据(表 1),绘

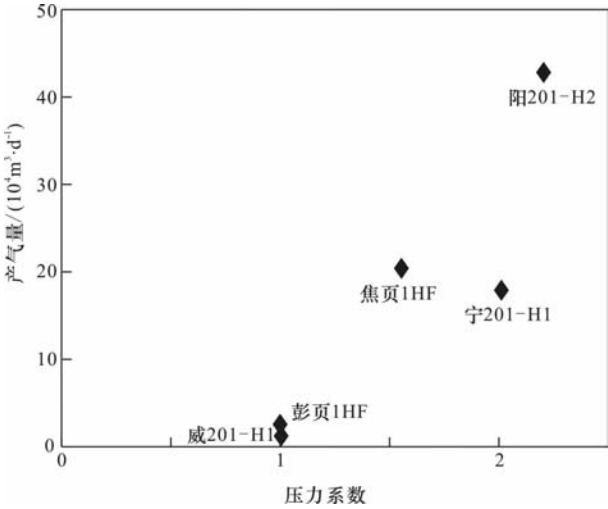


图 10 四川盆地及其周围页岩气压力系数和产气量关系图
Fig. 10 Relationship between pressure coefficient and gas productivity of key wells in the Sichuan Basin and adjacent areas

制了各页岩层段的蛛网图。页岩层段 1 蛛网图面积最大,页岩层段 3 蛛网图面积最小,页岩层段 2 和 4 介于两者之间。蛛网图面积的大小与页岩的各项参数相关,并且各个参数之间具有明显的正相关关系(图 11)。

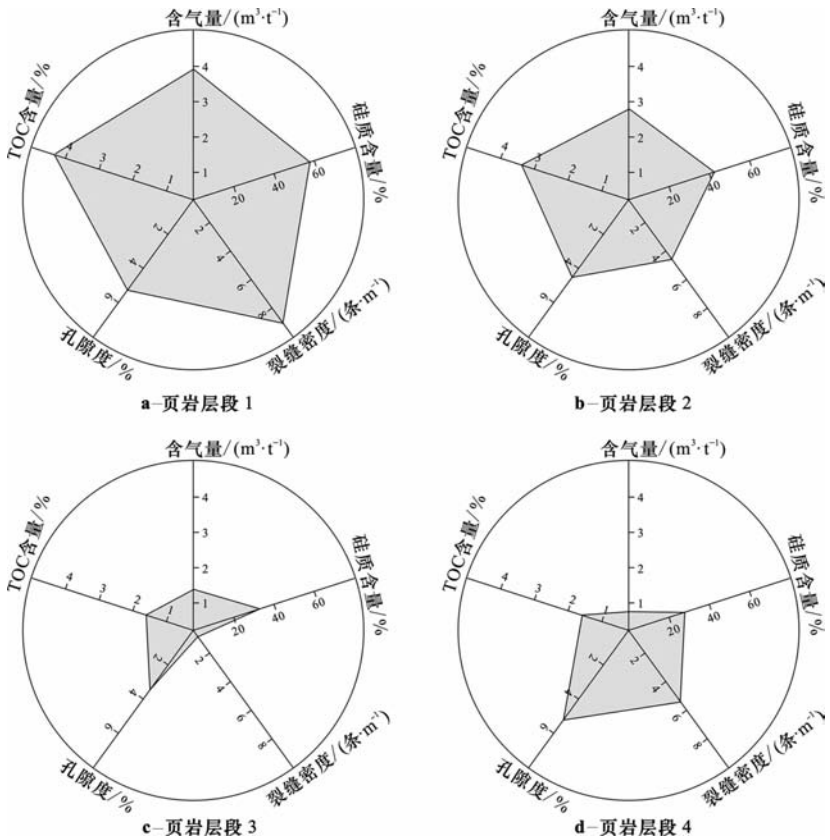


图 11 焦页 1 井五峰组-龙马溪组不同页岩层段特征参数蛛网图

Fig. 11 Spider diagram of different shale sections parameters characteristics of Wufeng Fm. - Longmaxi Fm. in the JY1 well

表 1 焦页 1 井五峰组-龙马溪组不同页
岩层段特征参数统计

Table 1 Parameters of different section in Wufeng
Formation - Longmaxi Formation of the JY1 Well

页岩 层段	岩性	TOC 含 量/%	孔隙 度/%	裂缝密度 /(条·m ⁻¹)	硅质含 量/%	含气量 /(m ³ ·t ⁻¹)
4	黏土质页岩	1.7	5.2	5.4	28.3	0.7
3	粉砂质页岩	1.6	3.7	0.4	32.5	1.4
2	含硅质页岩	3.4	4.6	4.5	42.1	2.8
1	硅质页岩	4.3	5.2	9.0	58.4	3.9

五峰组-龙马溪组页岩在纵向上具有“五性一体”的特征,即生气能力、储集能力、天然渗流能力、可压裂性和压力系数具有内在成因联系和空间分布关系。在下部优质页岩段,有机质含量高,有机孔发育,有机质含量与储层孔隙度之间呈正相关关系。岩心的水平层理缝和微裂缝发育,导致水平渗透率明显升高而垂直渗透率没有明显变化,从而保证具有良好的页岩气保存条件的同时,在水平方向上具有一定的渗流能力。有机碳含量与硅质矿物含量具有良好的相关性,指示有机质与硅质具有沉积成因的相关性。压力系数高(反映保存条件好),指示页岩气富集程度高,也指示高的 TOC 含量和孔隙度。“五性一体”决定了川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气的双甜点特征,既具有高含气性,又具有良好的可压性。

4 结论

涪陵页岩气田的发现经历了多个阶段,最早通过学习北美经验,选出南方海相为页岩气勘探的重点领域;逐步认识到保存条件是复杂构造区海相页岩气富集的关键因素,页岩气勘探向四川盆地及其周缘聚焦;通过选区评价,优选出焦石坝龙马溪组为页岩气勘探的有利目标;通过精细勘探和有效管理,最终发现了涪陵页岩气田并实现了有效开发。

五峰组-龙马溪组页岩气主要受控于原始的沉积条件和后期的保存条件。原始的沉积条件控制着页岩气形成的基础地质条件,五峰组-龙马溪组沉积时的构造-沉积背景为台内坳陷,台内坳陷的中心部位为深水陆棚相,沉积富含有机质页岩。后期的保存条件控制着页岩气的富集程度,四川盆地内部发育有三叠系膏盐岩优质盖层,且具有生气高峰晚、抬升时间晚、压力系数高的特点,总

体保存条件好。

在烃源条件和保存条件优越的涪陵地区,五峰组-龙马溪组页岩在纵向上具有“五性一体”的特征,即生气能力、储集能力、天然渗流能力、可压裂性和压力系数具有内在成因联系和空间分布关系。在下部优质页岩段,有机质含量高,有机孔发育,有机质含量与储层孔隙度之间呈正相关关系。优质页岩段岩心的水平层理缝和微裂缝发育,导致水平渗透率明显升高而垂直渗透率没有明显变化,从而保证具有良好的页岩气保存条件的同时,在水平方向上具有一定的渗流能力。有机碳含量与硅质矿物含量具有良好的相关性,指示有机质与硅质具有沉积成因的相关性。压力系数高(反映保存条件好),指示页岩气富集程度高,也指示高的 TOC 含量和孔隙度。“五性一体”决定了川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气的双甜点特征,既具有高含气性,又具有良好的可压性。

本论文编写过程中,部分原始数据引用了中石化勘探分公司和江汉油田分公司的成果,在此表示衷心感谢!

参考文献

[1] 张金川,金之钧,袁明生,等. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.

[2] Jin Z J. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate sequences in Chinese sedimentary basins[J]. Science in China: Series D, 2012, 55(3): 368-385.

[3] 牟传龙,周恩恩,梁薇,等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532.

[4] Chen X, Rong J Y, Charles E M, et al. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation [J]. Geological Magazine, 2000, 137(6): 623-650.

[5] Jarvie D. Evaluation of Hydrocarbon Generation and Storage in the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[R]. Humble Geochemical Services, 2004.

[6] Strapoc D, Mastalerz M, Schimmelmann A, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian Mississippian), eastern Illinois Basin [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1713-1740.

[7] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(11/12): 848-861.

[8] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classifica-

tion for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.

[9] 李军,路菁,李争,等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 266-271.

[10] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.

[11] Bowker A K. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.

[12] Gale J F W, Holder J. Natural fractures in some U. S. shales and their importance for gas production[C]//Petroleum Geology Conference Series 7. London: Geological Society of London, 2010, 7: 1131-1140.

[13] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.

[14] Schieber J, Krinsley D, Riciputi L. Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling[J]. Nature, 2000, 406: 981-985.

[15] 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: 579-601.

[16] Bowker K A. Recent developments of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin[J]. West Texas Geological Society Bulletin, 2003, 42: 4-11.

[17] Papazis P K. Petrographic Characterization of the Barnett Shale, Fort Worth Basin[D]. Master's Thesis. Austin: University of Texas at Austin, 2005: 142.

[18] 张义纲. 天然气动态平衡成藏的四个基本条件[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3): 210-221.

[19] 聂海宽,包书景,高波,等. 四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 280-294.

[20] 金之钧,蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 722-728.

《地学前缘》荣获
2014 年中国百种杰出学术期刊
2015 中国最具国际影响力学术期刊

据中国科学技术信息研究所 2015 年最新统计资料,《地学前缘》荣获“2014 年中国百种杰出学术期刊”;《地学前缘》在地球科学综合类期刊中期刊综合评价总分 84.5 分和核心影响因子 1.721 均居第 1 位,核心总被引频次 4155 次居第 2 位。

《地学前缘》被中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国学术文献国际评价研究中心、清华大学图书馆遴选为“2015 中国最具国际影响力学术期刊”,是少数非 SCI 收录的中文期刊之一。据 2015 年《中国学术期刊影响因子年报》,《地学前缘》影响力指数 CI 值在 104 种地质学类期刊中居第 5 位。