

渝东南武隆向斜常压页岩气形成与演化

方志雄,何希鹏

(中国石化 华东油气分公司,江苏 南京 210000)

摘要:为了研究渝东南武隆地区常压页岩气的形成与演化,利用研究区页岩气钻井数据,综合运用岩石薄片观察、氩离子抛光扫描电镜分析、构造平衡剖面及埋藏史分析等多种实验方法与分析技术,并基于“动态保存”四要素(沉积-埋藏-生烃-抬升)对常压页岩气富集主控因素进行了分析。研究表明:武隆地区常压页岩气形成与演化受控于3个关键因素。①五峰组-龙马溪组沉积岩性组合为页岩气形成供烃供储供保,深水陆棚相形成区域上分布稳定的优质页岩,是良好的烃源基础,上部厚层页岩封盖使生成的烃类有效保存。②有机质孔为页岩气提供了储集空间,内部复杂的孔隙形态改善了页岩的渗透性,与有机质伴生的脆性矿物一定程度上减弱了压实作用对有机质孔的影响。③构造作用直接影响页岩气规模。构造作用导致页岩中气体运移散失,武隆向斜五峰-龙马溪组沉积后经历了持续深埋并达到生烃高峰,之后发生了大规模的抬升,生成的烃类部分散失,使储层压力降低,形成常压(地层压力系数0.8~1.2)页岩气。

关键词:成藏要素;常压储层;页岩气;五峰组;龙马溪组;武隆向斜;渝东南

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Formation and evolution of normal pressure shale gas reservoir in Wulong Syncline, Southeast Chongqing, China

Fang Zhixiong, He Xipeng

(SINOPEC East China, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to understand the formation and evolution of the normal pressure shale gas reservoirs in Wulong Syncline in Southwest Chongqing, China the major controlling factors of shale gas accumulation were studied through drilling data analysis, thin section observation, Ar-SEM, tectonic balanced section and burial history analyses, in combination with analysis of four dynamic preservation factors (sedimentation, burial evolution, hydrocarbon generation, and tectonic uplifting). Results show that there are 3 key elements controlling the formation and evolution of the typical normal pressure shale gas reservoirs in Wulong syncline. The first one is the favorable lithological association of the Wufeng and Longmaxi Formations. The quality shales of deep shelf facies are stable in lateral distribution and have high potential of hydrocarbon generation, while the overlying thick shale has good sealing capacity, thus is favorable for the preservation of shale gas. The second one is the favorable reservoir conditions. The organic nanopores provide high porosity for gas storage and the complex pore geometries improve the permeability of the shale reservoirs. In addition, the brittle minerals associated with the organic matters acted as skeleton and protected to some extent the organic nanopores from compaction during diagenesis. The third one is tectonic evolution which determines the reservoir scale. After the continuous deep burial and main period of hydrocarbon generation, the target reservoirs experienced reformation during tectonic uplift, which led to the partial gas migration and dispersion, and the formation of normal-pressure shale gas reservoir with a pressure coefficient in the range from 0.8 to 1.2.

Key words: accumulation factor, normal pressure reservoir, shale gas, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Wulong Syncline, Southeast Chongqing

中国页岩气具有沉积类型多,发育层位多,分布面广等特征。国内学者对海相、海陆过渡相及陆相页岩

气分别进行了大量研究^[1-6],中国石化和中国石油在南方地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组海相

页岩气勘探上取得重大突破,焦石坝、长宁、威远、富顺-永川及彭水地区多井获页岩气工业气流。

美国是最早开发利用页岩气的国家。北美页岩气盆地主要分布在阿巴拉契亚早古生代逆冲褶皱带、马拉松-沃希托晚古生代逆冲褶皱带和科迪勒拉中生代逆冲褶皱带及相邻地台之上的克拉通盆地^[7-8],页岩气成藏地质条件简单,选区评价主要考虑页岩厚度、埋深、有机碳含量(*TOC*)、含气性及脆性矿物含量^[9-10],地层压力系数不作为选区评价重要参数^[11-13]。同北美地区相比,中国南方海相页岩气具有独特性^[14-15],以四川盆地及周缘五峰组-龙马溪组为例:深水陆棚相优质页岩各项指标均十分优越,具备良好的生烃物质基础;沉积期后总体经历了缓慢持续深埋,镜质组反射率(*R_o*)均超过2.0%,有机质大量生烃;侏罗纪末经历了复杂的构造运动,特别是燕山运动、喜马拉雅运动对页岩气保存条件造成了很大影响,部分地区五峰组-龙马溪组完全剥蚀,部分地区断裂破坏储层形成气体逸散通道,部分地区储层抬升超过“页岩气富集临界深度”,均不利于页岩气形成。

勘探实践证明地层压力系数是中国南方地区海相页岩气的重要评价指标。虽然焦石坝、威远、长宁等超压(地层压力系数>1.2)页岩气井大部分获得了工业气流^[16],但更多勘探区以常压(压力系数0.8~1.2)页岩气为主,特别是四川盆地及周缘埋深3 500 m以浅的五峰组-龙马溪组常压页岩气面积超过 6.2×10^4 km²,地质资源量巨大。如何有效动用常压页岩气资源,形成适用于常压页岩气勘探开发的技术体系是中国未来页岩气勘探开发必须面对的现实问题。

1 常压页岩气特征

常压页岩气(埋深3 500 m以浅)以渝东南彭水区块桑柘坪向斜、道真向斜、武隆向斜为典型代表,华东油气分公司多年来针对该区块进行了大量研究工作。2015年在武隆向斜钻探隆页1HF井压裂后获日产气 $4.5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ m³,标志着常压页岩气勘探取得了重要进展,特别是对解放盆外广大常压页岩气区块具有重要示范意义。

页岩含气层段增压机制主要有构造增压、水热增压、生烃增压及粘土矿物脱水引起的压力增加。南方地区海相页岩理论上均经历了超压阶段,以武隆向斜为代表的常压页岩气实测地层压力系数为1.08,其现今表现是多因素耦合共同影响的结果。以往众多学者提出“保存条件”是影响南方海相页岩气压力系数的关键因素^[17-19],通过对武隆向斜详细的地质研究,认为常压页岩气较超压页岩气对页岩埋深、厚度、*TOC*、脆性矿物含

量及顶底板岩性等评价参数更为敏感,应细化“常压页岩气影响关键因素”分类,开展沉积-埋藏-生烃-抬升等因素时空演化差异性研究,明确各因素对页岩气的影响,形成“动态保存”的研究思路与方法。

2 武隆地区常压页岩气控制因素

2.1 五峰组-龙马溪组沉积岩性组合供烃供储保供

武隆向斜位于四川盆地东部盆缘。五峰组沉积早期全球处于凯迪间冰期^[20],四川盆地及周缘大部分为陆棚相,沉积了五峰组暗色页岩。隆页1井元素地球化学剖面显示,该期Al/Ti比值高、P元素富集(图1),说明表层水体营养物质丰富,利于藻类、放射虫、笔石等生物繁殖;深水区处于缺氧环境,有利于生物碎屑的保存。隆页1井五峰组优质页岩厚度大于5 m,岩心实测*TOC*平均为4.65%,表明五峰组页岩具有良好的生烃潜力。五峰组晚期进入赫南特冰期,全球范围内海平面大幅降低,在四川盆地及周缘沉积了一套平面上不连续分布的观音桥段介壳灰岩(钙质含量大于20%,*TOC*小于1%),在武隆向斜厚度约为0.5 m,其存在会影响水平井压裂对五峰组页岩的改造效果^[21]。

受赫南特冰期剧烈气候变化影响,大量生物灭绝,为低等生物繁殖提供了有利的条件。龙马溪组沉积早期海平面上升,水域面积扩大,形成同五峰组沉积早期范围大致相当的陆棚相沉积。加里东运动使本区形成宽缓的褶皱,隆升造成深水陆棚区面积相对减小,沿泸州-永川-重庆-万县呈北东向狭长展布,周缘被川中古陆-黔中隆起-雪峰山隆起夹持,形成相对闭塞的海湾环境,半封闭环境导致陆棚水域黑海式水体分层^[14],表层水P元素丰富(图1),生产力高,藻类大量繁殖,笔石数量急剧增加,深水区长期处于缺氧环境,为有机质保存提供了良好的条件。武隆向斜临近深水陆棚沉积中心,沉积了厚层的暗色页岩,*TOC*大于2%的优质页岩厚度约27 m。龙马溪组沉积中晚期,整个上扬子地区发生缓慢的海退,页岩砂质成分增加,由盆内向盆缘(焦石坝-武隆-桑柘坪)页岩含碳量逐渐减少,厚度逐渐减薄。

武隆向斜优质页岩主要分布在五峰组及龙马溪组下部,根据测井响应特征将隆页1井优质页岩段划分为①—⑤共5个小层,与焦石坝地区焦页1井及桑柘坪向斜彭页1井对比良好。海相页岩沉积微相或岩石相划分国内外目前没有统一的标准,但不同区块勘探表明,深水陆棚相优质页岩沉积微相差异是影响页岩含气性、脆性、*TOC*等参数的关键。笔者结合测井曲线、硅质含量、*TOC*及笔石丰度等对优质页岩主要的岩相类型进行了划分,标准如表1。

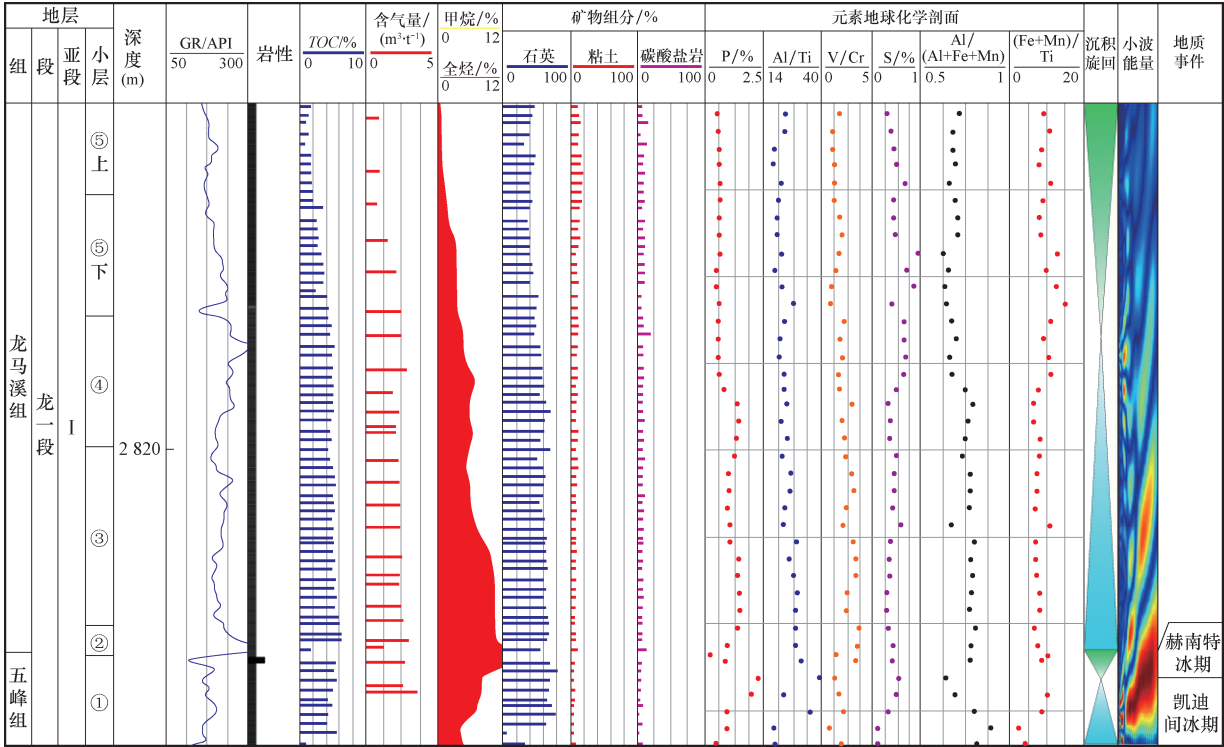


图 1 渝东南武隆向斜隆页 1 井五峰组 – 龙马溪组优质页岩地球化学剖面

Fig. 1 Geochemical profile of the organic-rich shale in the Wufeng-Longmaxi Formations in Wulong Syncline Well LY1 ,Southeast Chongqing

表 1 渝东南地区五峰组 – 龙马溪组优质页岩岩相划分标准
Table 1 Standards of lithofacies classification for the organic-rich shale in the Wufeng-Longmaxi Formation in Southeast Chongqing

	TOC/%		石英/%		笔石/个
富碳	>4	富硅	>50	富笔石	>25
高碳	3~4	高硅	40~50	高含笔石	15~25
中碳	2~3	中硅	30~40	中含笔石	5~15
低碳	1~2	低硅	20~30	含笔石	0~5
贫碳	<1	贫硅	<20	无笔石	0

根据划分标准,武隆向斜隆页 1 井五峰组 – 龙马溪组优质页岩①—⑤小层可划分为 6 种岩相类型。①小层为富碳富硅富笔石硅质页岩,薄片观察显示该小层含有放射虫化石;②小层为富碳富硅富笔石高伽马硅质页岩,高伽马尖在焦石坝地区、南川地区及彭水地区钻井中均出现,是区域地层对比典型的标志;③小层为富碳富硅富笔石硅质页岩;④小层为富碳富硅富笔石高伽马硅质页岩,高伽马尖是区域上典型的标志;⑤小层下部 7 m 为高碳中硅含笔石硅质页岩,上部 5 m 为中碳中硅含笔石硅质页岩。

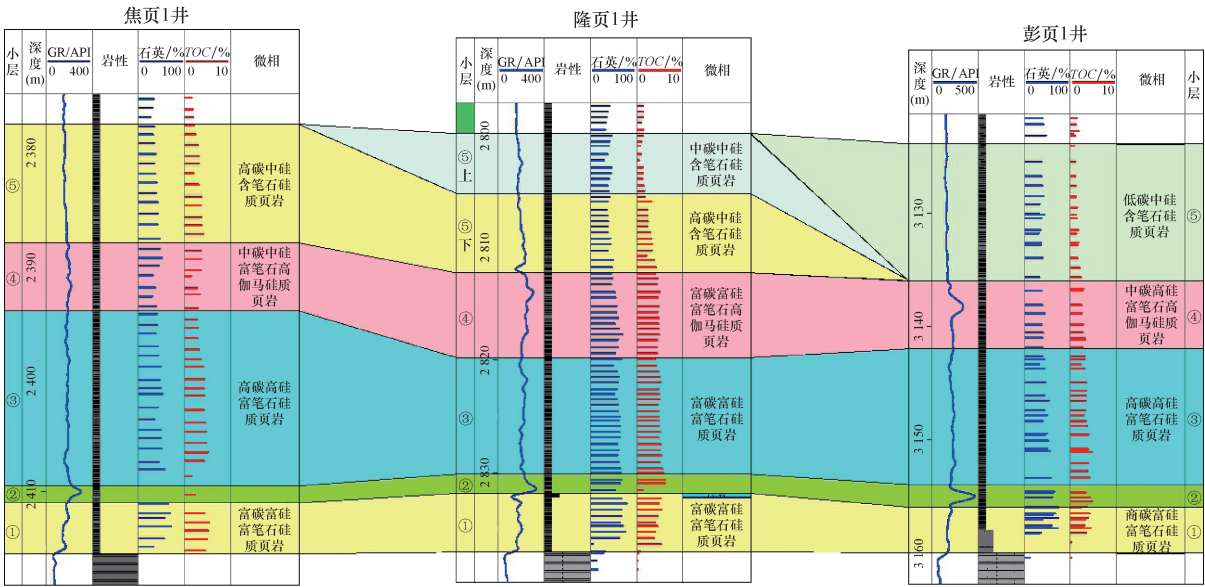


图 2 渝东南武隆向斜焦页 1 井 – 隆页 1 井 – 彭页 1 井优质页岩岩相对比

Fig. 2 Lithofacies correlation among the organic-rich shales in Wells JY1,LY1 and PY1 in Wulong Syncline,Southeast Chongqing

依文中标准对焦页1井、彭页1井优质页岩岩相进行了划分,并对比了3口井优质页岩厚度及岩相分布的差异性。对比结果显示(图2):焦页1井优质页岩38 m,彭页1井优质页岩24 m,隆页1井介于两者之间,优质页岩32 m。5个小层横向展布具有差异性,①小层焦石坝地区与武隆向斜无明显差异,桑柘坪向斜含碳量较前两者低;②小层区域上分布比较稳定,表明了赫南特冰期结束后区域上沉积环境一致;③小层及④小层武隆向斜含碳量较焦石坝及桑柘坪高,分析认为③和④小层沉积时武隆向斜水体较深,有机质保存条件较为优越;⑤小层区域上变化最明显,焦石坝地区及武隆向斜下部7 m为高碳中硅含笔石硅质页岩,武隆向斜上部5 m硅、碳含量均降低,桑柘坪向斜⑤小层自然伽马特征区域上可对比,但碳、硅含量已达优质页岩下限。优质页岩岩相特征表明虽然沉积期均处于深水陆棚环境,但由于水体深度、生物丰度、沉积速率等差异性,岩相区域上具有一定的变化。

超压页岩气页岩含气饱和度高、地层能量强,单井产量高,对页岩沉积微相变化关注度低。常压页岩气地层能量低,对优质页岩沉积微相的变化反应极为敏感,应特别重视沉积微相分布规律研究,寻找有利于页岩气富集的优势岩相。根据渝东南地区页岩气钻井资料,对优质页岩①—⑤小层沉积微相平面分布特征进行了研究:①和②小层全区无明显差异,总体为深水陆棚环境沉积的一套富碳富硅富笔石硅质页岩,其中①小层顶部发育观音桥段,主要岩性为泥质灰岩,局部发育介壳灰岩;③、④和⑤小层沉积中心位于焦石坝—武隆,炭质含量较周边地区高,沉积中心具有逐渐西移的趋势。优质页岩段富碳富硅是形成规模化页岩气的重要条件,武隆向斜优质页岩段沉积微相具备形成页岩气富集的条件,水平井钻探主要穿行③小层底—②小

层顶,是优质页岩段地质条件极为有利的层位,并且上部厚层含气页岩及下部介壳灰岩层对页岩储气及压裂改造具有积极影响。

总的来说,渝东南地区五峰组—龙马溪组沉积期广阔的深水陆棚相在区域上形成了两套分布较为稳定的富有机质页岩,富含笔石、藻类生物化石。武隆向斜优质页岩TOC平均3.93%,有机质为I—II₁型,具有良好的生烃潜力,有机质生烃形成大量的有机质孔与原生/后生无机孔为气体提供了大量储集空间,细小的孔隙吼道具有较大的毛细管力,形成局部超压,有效的减弱了压实作用造成的孔隙减少;优质页岩上部发育厚层泥页岩,形成分布较为稳定的良好盖层(武隆向斜厚度达180 m),厚层泥页岩一定程度上减弱了燕山运动、喜马拉雅运动对页岩储层破坏造成的气体散失。这种优质页岩+厚层含气页岩的沉积岩性组合为页岩气形成供烃、供储、供保(图3),是武隆向斜乃至整个上扬子地区海相页岩气形成的最基础条件。

2.2 有机质孔发育是页岩气富集的关键

页岩储层相对致密,成岩作用导致原始无机孔隙压实,现今保存下来的孔隙主要为有机质生烃形成的有机质孔、成岩作用阶段粘土矿物转化形成的无机孔及一定量的溶蚀孔等,其中有机质孔是页岩气赋存的主要储集空间,是目前发现的与生烃演化具有直接关系的孔隙类型,孔径一般为几纳米到几十纳米,部分可达上百纳米。由于母质类型的差异,镜下观察页岩中发育的有机质孔类型较为复杂。根据华东油气分公司实验中心对武隆向斜隆页1井岩心镜下观察分析,将有机质孔分为4个亚类^[22]:沥青质孔、无定形干酪根孔、结构型干酪根孔和有机/矿物复合孔(表2)。

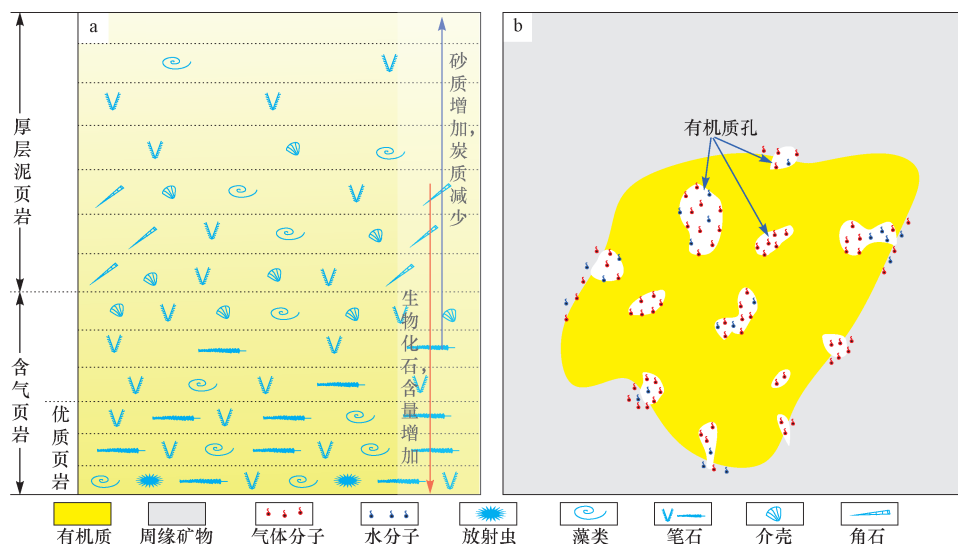


图3 渝东南武隆向斜五峰组—龙马溪组页岩供烃、供储、供保组合模式

Fig. 3 Hydrocarbon generation, storage and preservation of the Wufeng and Longmaxi Formations in Wulong Syncline, Southeast Chongqing

表2 渝东南武隆向斜五峰组-龙马溪组页岩有机质孔分类
Table 2 Classification of the organic nanopores of the Wufeng Longmaxi Formations in Wulong Syncline, Southeast Chongqing

亚类	成因	特征
沥青质孔	沥青质的生烃作用	发育单个或几个独立的大孔
无定形干酪根孔	无定形干酪根的生烃作用	发育大量微孔,连通性中等 有机质无明显结构特征
结构型干酪根孔	结构型干酪根的生烃作用	发育大量孔隙,连通性较好 有机质具有纤网状骨架结构
有机/矿物复合孔	有机粘土复合体或有机黄铁矿复合体的生烃作用	发育多个或连片且连通的大孔,部分可见环带状结构

武隆向斜五峰组-龙马溪组页岩中发育普遍的有机质孔类型为无定形干酪根孔及结构型干酪根孔,其主要区别在于干酪根内部结构:无定形干酪根无明显的结构,孔径一般小于100 nm,孔隙的连通性较好;结构型干酪根在原子力显微镜下可见清晰的纤网状结构,孔隙主要发育在纤网状骨架结构之间,骨架本身不发育孔隙,内部网络格架复杂连通,形成蚁巢状空间系统,连通性好(图4)。

此外,优质页岩还发育相当数量的有机/矿物复合

连孔,具体可划分为三类:第一类为有机/粘土集合体,发育“环带状”孔隙,对环带成分分析表明越靠近孔隙,硅质含量越高,碳含量越低,硅/铝比值(3.3~3.5)变化不大(图5),表明有机质降解、孔隙生成过程中,硅质与粘土矿物起到催化作用。第二类为有机/硅质集合体,发育“圆球状”孔隙,其特征表现为有机质包含圆形硅质颗粒,在热演化过程中,硅质颗粒与有机质同时被消耗,发生化学反应后晶形被破坏,以元素的形式与周围的有机质混合,在原有的位置上出现了“圆球状”的孔隙。第三类为有机质/黄铁矿集合体,发育有机孔、无机孔及有机-无机复合孔隙。

有机质孔的存在将页岩微观储层结构与宏观页岩气分布紧密的联系在一起,国内外学者研究均认为大量存在的有机质孔是页岩气富集的重要因素^[23-26]。以武隆向斜为代表的常压页岩气区优质页岩有机质显微特征表明:①有机质孔大量存在,优质页岩段有机质经历过大规模生烃,有机质类型及镜下结构与焦石坝地区无明显差异,表明两区气源基础条件基本一致;②有机质孔形态复杂,连通性好,孔隙内表面为不规则曲面,提供了巨大的吸附表面积和游离空间,同时孔隙

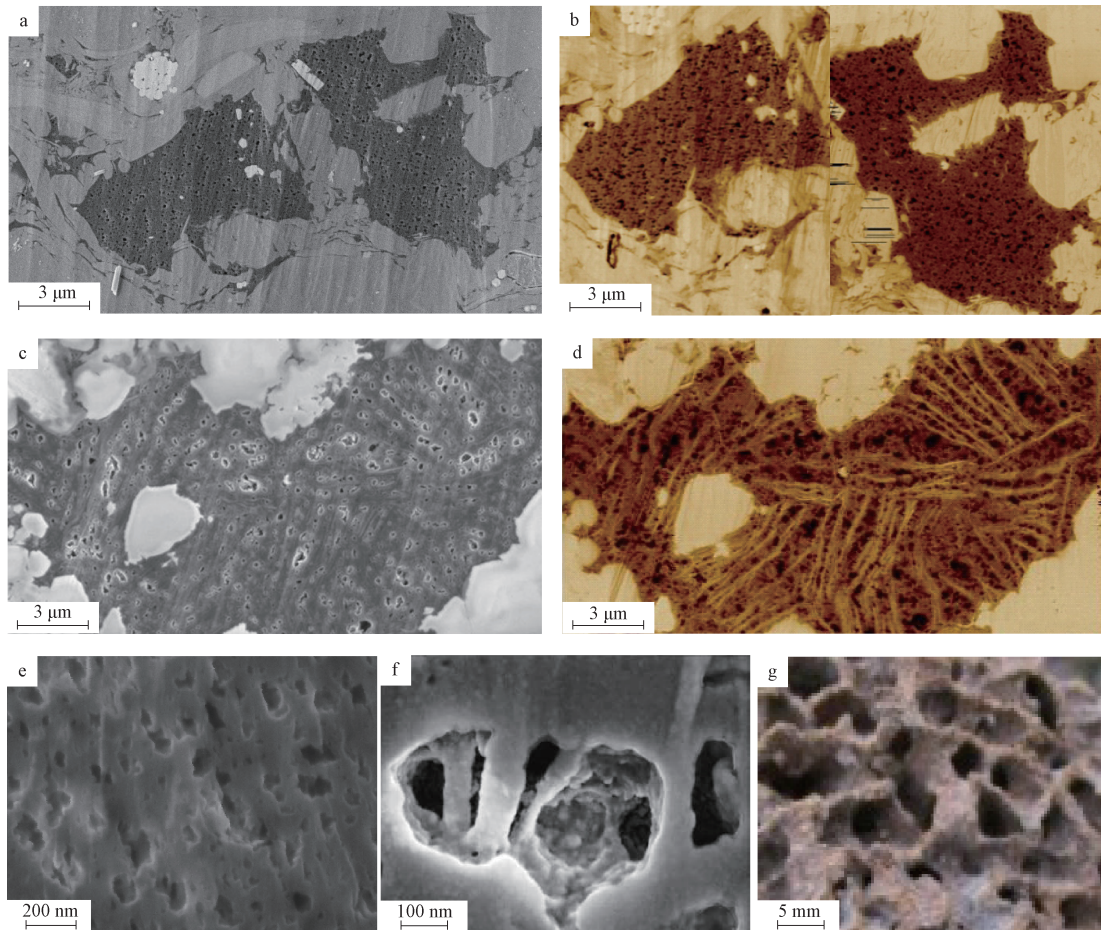


图4 渝东南武隆向斜无定形干酪根、结构型干酪根扫描电镜、原子力显微镜照片及孔隙内部结构

Fig. 4 SEM and AFM pictures of amorphous /structural kerogens and internal structures of pores in Wulong Syncline, Southeast Chongqing
a, b. 无定形干酪根 SEM-AMF 图; c, d. 结构型干酪根 SEM-AMF 图; e. 有机质孔; f. Barnett 页岩有机质孔; g. 天然蚁巢

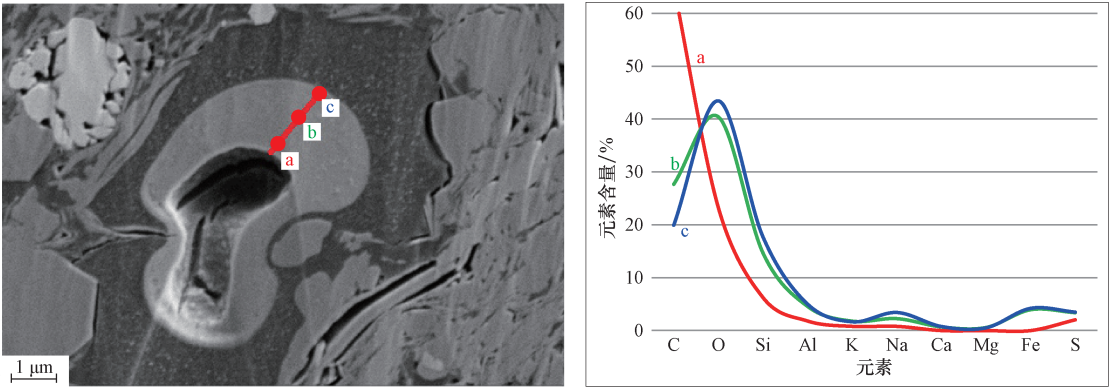


图 5 渝东南武隆向斜龙马溪组页岩有机/粘土集合体孔隙能谱分布图

Fig. 5 Energy spectrum of the organic pores and clay mineral aggregate pores in the shales of the Wufeng Longmaxi Formations in Wulong Syncline, Southeast Chongqing

表 3 国内外主要含气页岩盆地页岩气地质参数统计

Table 3 Statistics of shale gas geological parameters of the main gas-shale basins in China and abroad

典型页岩	时代	优质页岩厚度/m	TOC/%	R _o /%	石英/%	含气量/(m ³ ·t)	游离气占比/%	产量/(10 ⁴ m ³)
Marcellus	泥盆纪	15~61	2.0~13.0	0.9~5.0	40	1.6~8.2	64	9.0
Haynesville	侏罗纪	60~91	0.5~4.0	2.2~3.0	30	3.0~9.4	75	27.6~54.5
Barnett	石炭纪	30~182	4.5	1.0~2.0	45	4.2~9.8	50	5.4~6.2
Eagle Ford	白垩纪	46	2.0~8.5	0.8~1.6	15	3.0~6.0	75	14.2~18.7
Fayetteville	石炭纪	6~60	4.0~9.8	2.0~4.5	35	1.4~6.0	40	5.0
Woodford	石炭纪	37~67	4.9~7.8	0.4~4.9	37	5.0~8.2	40	6.0
焦石坝	奥陶纪—志留纪	38~44	0.5~7.1	2.4~2.8	51~80	3.8~9.8	75	11.6~54.7
长宁	奥陶纪—志留纪	28~60	3.5	2.8	51	4.1	32~71	0.5~27.4
威远	奥陶纪—志留纪	37~46	2.4	1.8~2.7	45	2.9	65	1.3~28.0
武隆	奥陶纪—志留纪	32~40	1.6~6.2	2.5	56~70	1.0~3.2	74	5.0
彭水	奥陶纪—志留纪	24~35	2.1~4.7	2.4~3.0	45	1.4~2.6	62	2.5

备注:统计包括最小值~最大值或平均值两种结果类型。

吼道的毛细管力一定程度上阻碍了气体的运移,既封闭了气体,形成的局部超压又减弱了压实作用的影响;③隆页 1 井优质页岩段镜质组反射率大于 2.0%,有机质大量生烃,且处于中晚成岩作用阶段,水热增压、粘土矿物脱水增压及有机质生烃增压共同作用形成超压系统,对储层的改造、有机质孔的保存具有积极影响。

2.3 构造作用直接影响页岩气藏规模

通过对比北美地区及国内主要页岩气勘探区各项指标显示,游离气含量高的井页岩气初产气量较高,如 Eagle Ford 和 Haynesville。中国南方地区海相页岩游离气占比较大,但仅焦石坝地区及长宁—威远部分井获得较高的产气量。对比还发现作为页岩气选区评价重要的静态参数指标(页岩厚度、TOC、脆性矿物含量、R_o、孔隙度)“宏观”统计上除含气性及孔隙度有一定差异外,其他参数均无显著差异^[27],因此在确定 TOC、R_o 和脆性矿物含量等参数下限值得基础上,对于常压页岩气勘探区应进一步深化页岩含气性影响因素研究。

页岩含气性的影响因素是多方面的,渝东南地区“宏观”沉积条件差异不明显,有机质普遍大量生烃,TOC 和 R_o 等参数统计特征均体现这一认识。造成武隆向斜与焦石坝、长宁、威远等地区页岩含气性差异的核心因素为构造作用。对隆页 1 井进行了埋藏史—生烃史分析(图 6),武隆向斜五峰组—龙马溪组沉积后经历了短暂沉降,上部沉积了小河坝组、韩家店组等地层,志留纪末期进入生烃门限,海西期经历了缓慢、持续、幅度很小的抬升,有机质未大规模生烃,对气藏破坏作用小;海西期末—印支期—燕山期,武隆向斜经历了持续深埋阶段,有机质热演化程度持续升高,三叠纪进入干气、裂解气阶段,白垩纪达到最大埋深,镜质组反射率最高达 2.7%。

决定武隆向斜乃至整个中上扬子地区页岩气保存条件优劣的主要构造运动为燕山运动和喜马拉雅运动。白垩纪末东南—西北向的挤压作用造成上扬子地区隆坳相间的构造格局,从四川盆地外部到盆内变形具有递变特征(图 7),焦页 1 井埋藏史分析表明其抬升期为 85 Ma^[28],隆页 1 井抬升期约为 90 Ma。

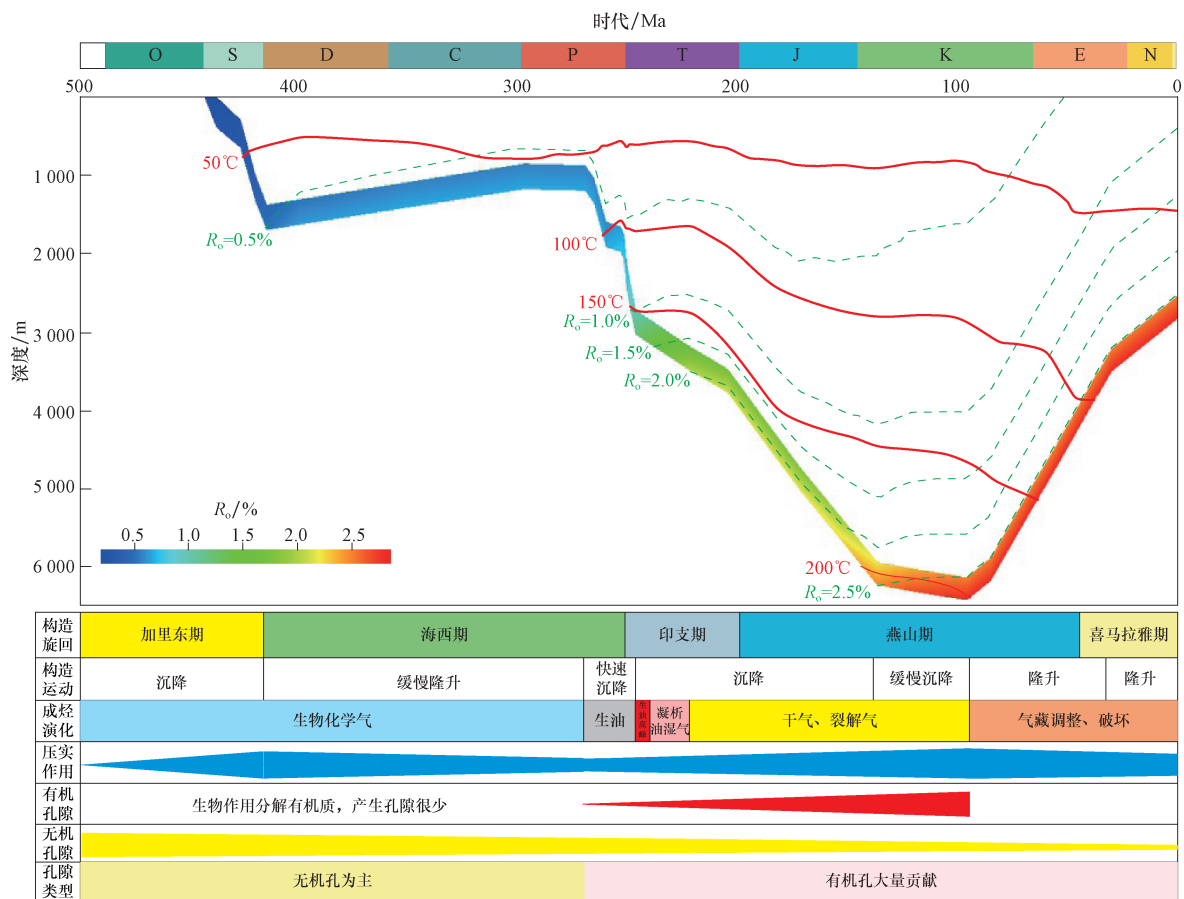


图6 渝东南武隆向斜隆页1井埋藏史及热演化史

Fig. 6 Burial history and thermal evolution history of Well LY1 in Wulong Syncline, Southeast Chongqing

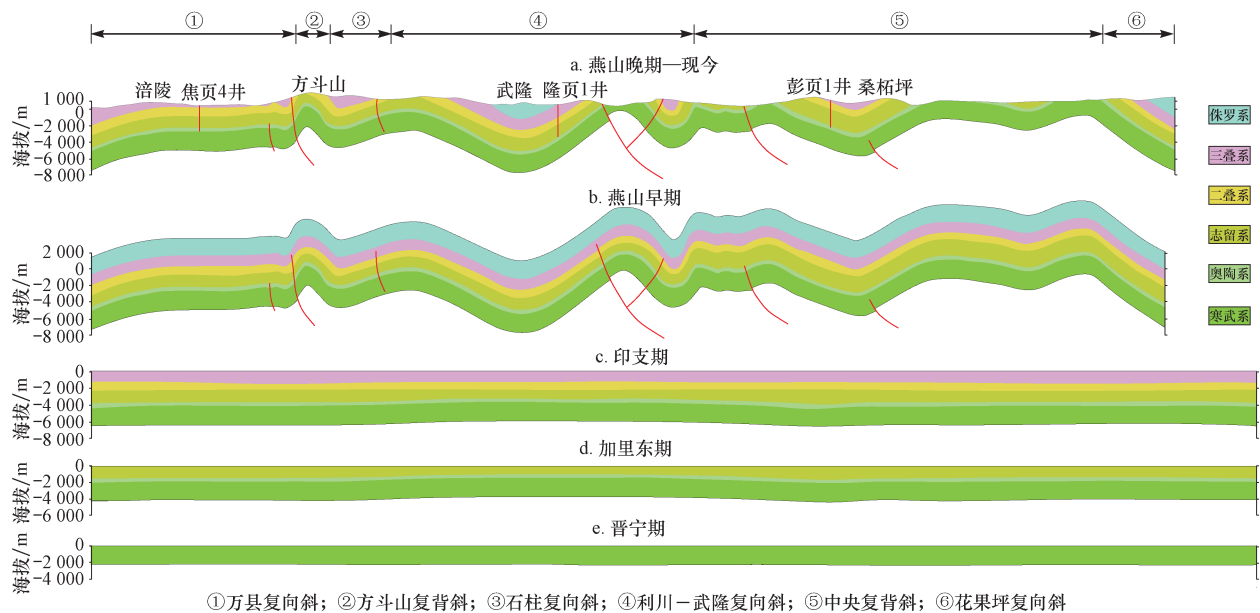


图7 渝东南桑柘坪-武隆-涪陵地区构造平衡剖面

Fig. 7 Tectonic balanced section of Sangzheping-Wulong-Fuling area, Southeast Chongqing

“常压”是储层现今的一种状态,对于武隆向斜及整个上扬子地区而言,多口井(隆页1井、焦页1井、焦页8井、彭页1井等)证实五峰组-龙马溪组优质页岩段沉积环境差异性不大,有机质含量基本一致,后期经历了同样的埋藏生烃过程,热演化程度大致相当,影响

页岩气富集的关键在于“气藏调整阶段”,该阶段直接导致了储层现今的“常压”状态。构造抬升使地层遭受剥蚀,储层破裂压力降低^[29],对彭水地区页岩岩心进行了三轴应力卸载物理模拟实验结果表明,实验室模拟条件下页岩埋深由5 600 m抬升至1 500 m,岩石

发生剪切破裂,渗透率成倍增加,表明构造抬升对储层条件影响明显。

对于盆外大部分常压页岩气来讲,构造抬升的破坏作用非常明显,其形式可概括为3类。

1) 抬升超过储层破裂压力“平衡点”,在储层内部及上部盖层集中出现大量裂缝,构造作用未必形成区域规模的大断裂,应力松弛区(背斜)改变了岩石物性,渗透率增加,应力集中区(向斜)水平应力差异形成滑脱面均会导致气体重新调整分布,发生近距离的运移,“储层”体积增大,又未发生二次生烃,导致原始储层压力降低。

2) 抬升导致储层出露地表,储层泄压回弹,渗透率增加,加之原始储层中局部超压急剧释放,气体大规模散失,形成常压页岩气。

3) 抬升的同时产生大规模的断裂,断裂面附近压力急剧降低,储层内部压力失衡使得气体发生大规模运移散失。

常压页岩气勘探的关键是确定“平衡点”,平衡点之下属于超压页岩气;平衡点附近储层虽然表现为常压,但由于气体仅发生“微异地”运移,相较生烃高峰仅使“储层”体积增大,而未发生大规模散失;平衡点之上气体发生了大规模的运移散失,虽然表现为常压,但基本无开采价值。进一步分析,认为“平衡点”的确定需要考虑优质页岩-大套泥页岩的岩石力学特征,页岩成岩作用对物性的影响、生烃增压及脆性矿物含量、产状等多种因素,其对各因素的反应极为敏感。

3 结论与认识

武隆地区五峰组-龙马溪组沉积期主要为深水陆棚环境,沉积岩性组合以下部优质页岩+上部大套泥页岩为主,形成区域上良好的烃源岩,同时分布稳定的厚层泥岩一定程度上减弱了大规模构造运动对页岩气储层的破坏,是页岩气形成的基本条件。优质页岩发育大量纳米级有机质孔,为页岩气富集提供了有效的储集空间,镜质组反射率均大于2.0%,处于中晚成岩作用阶段,水热增压、粘土矿物脱水增压及有机质生烃增压共同作用在优质页岩段形成超压系统,对储层的改造、有机质孔的保存具有积极影响。五峰组-龙马溪组页岩在志留纪末期进入生烃门限,白垩纪达到最大埋深,镜质组反射率最高达2.7%,之后经历的构造运动对页岩气形成具有重要影响,一方面构造运动使地层抬升形成现今可开发的页岩气田,一方面由于抬升幅度过大、断裂发育等因素破坏了部分地区页岩气的保存,武隆地区构造抬升破坏程度较小,气体发生“微异地”运移或小规模散失,从而表现为常压。

总的来说,常压与超压页岩气在构造抬升之前的形成条件及过程是一致的,但构造运动对保存条件的破坏程度不一致使得常压页岩气对岩性组合、岩石力学特征等反应更为敏感,勘探评价要求更高,如何在常压页岩气区找到经济有效的开发井,关键是强化保存条件分析,确定“平衡点”,再基于沉积微相认识、页岩物性特征等确定合适的水平井穿层。

参考文献

- [1] 胡明毅,邓庆杰,胡忠贵.上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件[J].石油与天然气地质,2014,35(2):272-279.
Hu Mingyi, Deng Qingjie, Hu Zhonggui. Shale gas accumulation conditions of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 272-279.
- [2] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J].石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.
- [3] 刘光祥,金之钧,邓模,等.川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J].石油与天然气地质,2015,36(3):481-487.
Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, et al. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 481-487.
- [4] 王香增,范柏江,张丽霞,等.陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段为例[J].石油与天然气地质,2015,36(4):651-658.
Wang Xiangzeng, Fan Bojiang, Zhang Lixia, et al. Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas—a case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Erdos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 651-658.
- [5] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等.黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J].石油与天然气地质,2016,37(1):45-55.
Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 45-55.
- [6] 朱彤,王烽,俞俊杰,等.四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J].石油与天然气地质,2016,37(2):399-407.
Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 399-407.
- [7] Jenden P D, Drazen D J, Kaplan I R. Mixing of thermogenic natural gases in Northern Appalachian Basin[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(6): 980-998.
- [8] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [9] Martineau D F. History of the Newark East Field and the Barnett Shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399-403.
- [10] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern

- British Columbia, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1): 223–239.
- [11] Hickey J J, Bo H. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437–443.
- [12] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603–622.
- [13] Zhao H, Givens N B, Curtis B. Thermal maturity of the Barnett Shale determined from well-log analysis[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 535–549.
- [14] 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 & Development, 2015, 42(6): 689–701.
- [15] Hu D, Zhang H, Kai N, et al. Preservation conditions for marine shale gas at the southeastern margin of the Sichuan Basin and their controlling factors[J]. Natural Gas Industry, 2014, 1(2): 178–184.
- [16] 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 Jiaoshiha shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(1): 28–36.
- [17] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考: 以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 18–28.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 18–28.
- [18] 蔡周荣, 夏斌, 黄强大, 等. 上、下扬子区古生界页岩气形成和保存的构造背景对比分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1446–1454.
- Cai Zhourong, Xia Bin, Huang Qiangtai, et al. Comparative study of the tectonic setting on the formation and preservation of Paleozoic shale gas between the Upper Yangtze and the Lower Yangtze Platforms[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1446–1454.
- [19] 李昌伟, 陶士振, 董大忠, 等. 国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 986–1000.
- Li Changwei, Tao Shizhen, Dong Dazhong, et al. Comparison of the formation condition of shale gas between domestic and abroad and favorable areas evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 986–1000.
- [20] 陈旭, Bergström S M, 张元动, 等. 中国三大块体晚奥陶世凯迪早期区域构造事件[J]. 科学通报, 2014, 59(1): 59–65.
- Chen Xu, Bergström S M, Zhang Yuandong, et al. A regional tectonic event of Katian (Late Ordovician) age across three major blocks of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(1): 59–65.
- [21] 王玉满, 董大忠, 黄金亮, 等. 四川盆地及周边上奥陶统五峰组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 42–50.
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Huang Jinliang, et al. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2016, 43(1): 42–50.
- [22] 蔡潇, 王亮, 靳雅夕, 等. 渝东南地区页岩有机孔隙类型及特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 513–519.
- Cai Xiao, Wang Liang, Jin Yaxi, et al. Types and characteristics of organic pore in shale gas reservoir of southeastern Chongqing area[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 513–519.
- [23] 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(12): 848–861.
- [24] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(4): 665–677.
- [25] Zhang T, Yang R, Milliken K L, et al. Chemical and isotopic composition of gases released by crush methods from organic rich mudrocks[J]. Organic Geochemistry, 2014, 73(3): 16–28.
- [26] Jiao K, Yao S, Liu C, et al. The characterization and quantitative analysis of nanopores in unconventional gas reservoirs utilizing FESEM-FIB and image processing: An example from the lower Silurian Longmaxi Shale, upper Yangtze region, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 128(3): 1–11.
- [27] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1–15.
- Dong Dazhong, Gao Shikui, Huang Jinliang, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1–15.
- [28] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组–志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 8–17.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Zang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 8–17.
- [29] Chen Z, Liao X, Zhao X, et al. A new analytical method based on pressure transient analysis to estimate carbon storage capacity of depleted shales: A case study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 42: 46–58.

(编辑 张亚雄)