

文章编号:1673-8217(2016)05-0001-05

## 中国页岩气勘探新思路

杨堃<sup>1</sup>,王茜<sup>1</sup>,秦树蓬<sup>2</sup>,杨帆<sup>2</sup>,李新<sup>3</sup>

(1. 中国华电清洁能源有限公司华北分公司,天津 300010;2. 中国华电科工集团有限公司;3. 湖南省页岩气开发有限公司)

**摘要:**页岩气具有自生自储、低孔低渗的特点,它的成藏机理与常规气藏相似,对产量贡献最大的是游离气。高产页岩气藏需要具备以下四个基本条件:具有持续生气能力的页岩,网状微裂缝发育,气藏发育在构造封闭的宽缓背斜中顶底板岩层致密,形成岩性圈闭。盆地内构造运动影响较小、成藏诸要素具备,是国内重点页岩气勘探区域,尤其是四川盆地下志留统龙马溪组及下寒武统牛蹄塘组黑色页岩,应作为我国页岩气勘探的重点目标。

**关键词:**中国页岩气;四川盆地;成藏机理;富集高产条件

**中图分类号:**TE112.115

**文献标识码:**A

自1821年第一口页岩气井启动,美国页岩气技术研究及开采手段极速发展,为全球页岩气的发展树立了标杆。我国页岩气具有资源总量大、层系多、分布广的特点,探明储量超过 $5\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 。近年来我国对页岩气的研究取得了丰硕成果,中国石化的涪陵页岩气田探明储量 $3\,805.98\times 10^8\text{ m}^3$ ,中国石油的长宁页岩气田上罗区块宁201井区-YS108井区和威远页岩气田威202井区共提交探明储量 $1\,635.3\times 10^8\text{ m}^3$ 。我国与北美页岩气藏地质条件存在较大差异,已发现并进行勘探开发的页岩气藏均为热解成因的页岩气藏。本文以国内四川盆地及国外获得成功的页岩气田为分析研究对象,通过详细讨论高产页岩气藏的四个基本条件,提出不同于以往页岩气的勘探理念,为未来我国页岩气勘探提供一种新的思路。

### 1 页岩气成藏机理新认识

#### 1.1 页岩气成藏要素与常规气藏类似

在以往的页岩气评价研究中,学者通常筛选出有机质丰度、热成熟度、含气性等八大地质因素,这些因素毋庸置疑是分析页岩生烃的关键地质参数,但对于页岩气藏评价来说显然不够全面,也导致了页岩气藏经常被误认为是“连续成藏”的聚集模式<sup>[1-2]</sup>。笔者认为,生物成因的浅层页岩气与煤层气藏相类似,主要以吸附气为主,开采方法是缓慢的排水降压解吸附模式;而热解成因的页岩气藏与常规油气勘探开发相似,属于小规模的不连续的岩性气藏。我国不少地区已在页岩地层中发现了丰富的油气资源,如松辽盆地的古龙坳陷,渤海湾盆地的辽

河凹陷,柴达木盆地的茫崖坳陷,江汉盆地的潜江凹陷,四川盆地的川西南及酒泉盆地的花海坳陷等等<sup>[2]</sup>。这些页岩油气常常与常规油气藏伴生或者空间分布上存在一定联系。实际上,页岩气与常规油气藏评价方面同样遵从“生储盖、圈运保”<sup>[3-12]</sup>的思路,两者并无本质区别。

#### 1.2 游离态页岩气更具有商业开采价值

页岩气以吸附态、游离态为主要赋存方式,溶解气极少,可忽略不计。吸附气存在于干酪根、黏土颗粒及孔隙表面;游离气存在于微裂缝、孔隙内。由于水分子的极性比甲烷分子强,泥岩中矿物颗粒优先吸附水,而甲烷在水中的溶解度极低,因此,泥岩中甲烷的吸附量很小<sup>[13]</sup>。随着地层埋深增加,吸附气含量无明显变化而游离气含量逐步增加,在1 150 m处,页岩气主要以游离气为主,在2 800 m时,游离气约为吸附气的2倍<sup>[14]</sup>,页岩气藏的合理埋藏深度为2 000~4 000 m。根据陈更生<sup>[15]</sup>的研究结果,从北美主要页岩气藏的游离气、吸附气含量统计数据来看,高产气田的游离气含量所占比例较高(图1)。仅有少量浅层生物成因的页岩气田主要是吸附气,如美国密歇根盆地中上二叠统Antrim页岩<sup>[16-17]</sup>、伊利诺伊州盆地的New Albany页岩<sup>[16,18]</sup>,生产动态与煤层气类似,我国这种情况较少。

在有效工业开采阶段,主要生产游离气,一旦游离气开采接近尾声,单井经济效益接近盈亏平衡点时,一般还要进行重复压裂,以重新获得游离气产

收稿日期:2016-04-18

作者简介:杨堃,高级工程师,1965年生,1988年毕业于中国地质大学(武汉)石油地质专业,现从事油气地质研究工作。

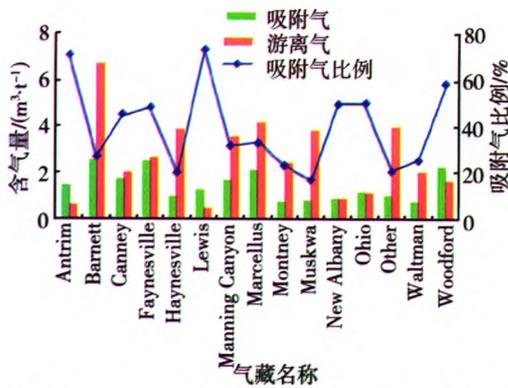


图1 吸附气与游离气在不同页岩气藏中的含气量<sup>[15]</sup>

量。可见游离态页岩气才真正具有工业开采价值。

### 1.3 页岩气与煤层气的区别

页岩气与煤层气均为非常规天然气,赋存方式却截然不同。热解成因的页岩气主要为游离气,煤层气主要为吸附气。主要原因是:①甲烷分子倾向被吸附于有机质干酪根,泥页岩中有机质含量相对较少(2%左右),因而吸附甲烷分子数量较少。而煤层的有机质含量是泥页岩的40倍(80%左右),甲烷吸附量也近乎为泥页岩的40倍<sup>[19]</sup>;②煤层气一般埋藏较浅,地表构造运动极易破坏煤层的上覆岩层,使得其盖层封存能力差,游离气逃逸散失而无法聚集。而页岩气埋藏较深,上覆岩层厚,泥岩或致密灰岩都是其良好顶板。鉴于此,页岩气勘探方法应主要借鉴常规油气勘探方法,而不能一味地沿用煤层气的研究方法。以地质钻孔和绳索取心方式来了解吸附气含量,尤其是估算残余气含量和解析气含量往往偏高,容易造成高含气量指标的假象。钻井现场页岩快速解吸获得的总含气量主要为吸附气量,游离气量占比较小,不能代表真实的地层游离气量比重<sup>[20]</sup>,据此得到的页岩气部署开发方案欠妥。实际上,利用测井解释结果,结合现场钻井泥浆性能变化、气测显示可以很好地进行这类页岩气含气量评价。当然,如果研究浅层生物成因页岩气,可以沿用煤层气的研究方法。

## 2 页岩气富集高产的必要条件

页岩获得高产,主要取决于三个必要条件:页岩生气能力强、微裂缝发育和保存条件良好。烃源岩的生烃能力是基础,构造、保存条件是关键,三者缺一不可。

### 2.1 烃源岩生烃能力

美国页岩气藏广泛发育于海相沉积盆地的上古生界及侏罗系,加拿大的页岩气重点勘探区为西部

沉积盆地的上白垩统、侏罗系、三叠系和泥盆系<sup>[4]</sup>。斯伦贝谢公司根据北美页岩气含气盆地统计,提出了源岩的有机碳含量(TOC)原则上应当高于2.0%,富有机质页岩厚度一般在30 m以上,最有利页岩气富集的R<sub>o</sub>值为1.1%~2.0%<sup>[3-5]</sup>。

我国发育的海相页岩主要分布于扬子地台及塔里木盆地,目的层为古生界寒武系和志留系,普遍具有时代老、盆地内部埋深大、热演化程度高的特点<sup>[21]</sup>。比如贵州岑巩区块的岑页1井,目的层牛蹄塘组页岩的成熟度过高(2.5%~2.9%),有机质已经炭化,失去了生气能力<sup>[22]</sup>。页岩气的缓慢扩散作用以及区块内断裂发育,使得游离气散失殆尽,只剩下吸附气,压裂试气结果显示,地层压力系数仅为0.55。因此,要寻找仍有生气能力的页岩层,并且有较好的保存条件,干酪根不断向裂缝中充填气体,才能保证异常高压系统恒定,并且维持动态平衡状态。

### 2.2 微裂缝发育

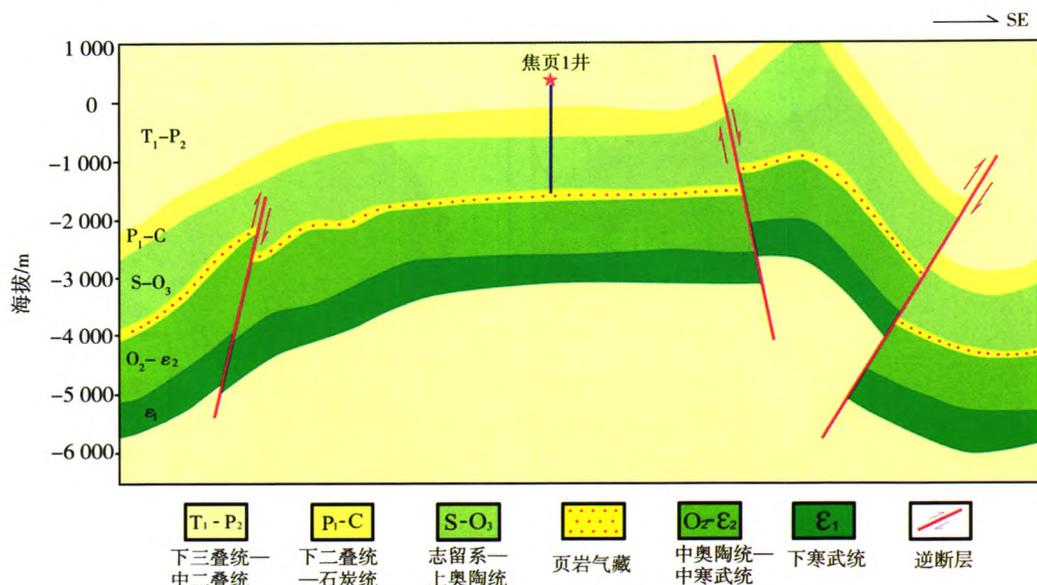
页岩气的成藏机理为岩性圈闭气藏,其可采储量取决于微裂缝的数量、大小及连通情况。由于页岩致密,渗透率极低,岩层中的微裂缝不仅是页岩气的储集空间,也是其流入井孔的通道。后期进行人工改造也是要将一系列的孔隙连通形成网状裂缝,以增大储集和流通空间。

因此对于泥页岩储层,地层应力绝对值较小,且水平主应力差较小(小于4%),天然微裂缝发育(每米2条以上),有效孔隙度大于4%,为有效的页岩储层。如北美Michigan盆地北部Antrim组页岩层中发育北西向、北东向两条天然微裂缝系统,近乎垂直<sup>[5]</sup>,为典型的裂缝发育的页岩。

### 2.3 保存条件

背斜为正向构造,有利于页岩气的汇聚。国内外成功页岩气藏绝大多数发育于宽缓的背斜构造或单斜构造中。以四川盆地涪陵地区的海相页岩气田为例,焦石坝地区位于深水陆棚的沉积中心,构造主体表现为“似箱状断背斜”的形态(图2),即顶部宽缓、地层倾角小、断层较少,页岩地层产状小于10°,两翼发育隔挡断层<sup>[23]</sup>,使得页岩气聚集而得以保存。除此之外,美国Texas州Bend背斜带的Barnett页岩及许多大型气田也有类似的构造特征<sup>[24]</sup>。

向斜为负向构造不利于页岩气的汇聚。典型范例如彭水地区的彭页1井,位于恩施-务川北东向大型背斜中部的桑柘坪向斜一翼,没有反向断层形成侧向遮挡,龙马溪组直接以单斜形式出露地表;再如位于黔南坳陷黄平向斜的黄页1井,也是目的层

图2 焦石坝地区页岩气藏剖面图<sup>[23]</sup>

以单斜形式出露,页岩气顺层侧向逃逸,表现为单井低产。

实际上,若是页岩目的层位于向斜构造中,且两侧发育反向断层隔挡(例如四川盆地内部的长宁地区,向斜两翼均有泥岩逆断层<sup>[25]</sup>)依然可保证页岩气不至扩散。因此,封闭的构造条件对于页岩气的保存十分关键。

除了构造因素外,页岩顶底板岩性越致密,厚度越大,保存条件越好。譬如焦页1井目的层之上的灰黑色页岩厚51 m。页岩、粉砂质泥岩、致密灰岩均为很好的封隔层,且与邻层应力存在一定的差异(大于15 MPa)。同时,上覆地层最好也发育烃源岩。据统计,每100 Ma气体扩散约10 m,而上覆烃源岩层的存在,起到了对目的层页岩气扩散的抑制作用,即“烃浓度封闭作用”<sup>[26]</sup>。

### 3 中国页岩气勘探开发前景

页岩气勘探主要是确定储层“甜点”区和有利的构造分布<sup>[27]</sup>。其有利富集相带为前陆盆地和克拉通盆地,最有利区主要集中于盆地中心偏斜坡处,是各类裂缝和溶蚀作用继承性叠加发育的部位,譬如涪陵地区大安寨段黑色页岩<sup>[28]</sup>。

前陆盆地由于构造活动强烈,且页岩埋藏深,吸附气含量较低,通常处于超压状态,天然裂缝限定在顶底板之内,有利于形成页岩气藏。针对构造相对活跃的前陆盆地,提出页岩气的保存条件在页岩气成藏评价中权重最高,即页岩品质30%,经济性30%,保存条件40%。克拉通盆地的页岩气埋藏较

浅,如鄂尔多斯盆地,保存条件要求不高,页岩厚度、高角度天然微裂缝发育有利于开采。

#### 3.1 国内页岩气勘探进展及效果

自2009年至2014年底,国内相关单位均在扬子地台、华北地台、环渤海湾盆地及柴达木盆地等做了大量页岩气勘探工作(图3)。但从勘探成效看,只有位于盆地内部及边缘的探井成功率较高,单井日产突破 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的探井比例很高,盆地外目前还没有工业突破。

#### 3.2 盆地仍将是重点勘探区域

国内页岩气勘探最活跃的区域集中在南方海相页岩,主要层系为下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组,以四川盆地的勘探开发进展最为显著。

四川盆地以齐岳山断裂为界,盆地内相对完整,保存条件较好,页岩气勘探成功率远远大于盆地外。盆地内寒武系的筇竹寺组和志留系的龙马溪组富含有机质的泥页岩层分布范围广、厚度大且普遍含气,并认为筇竹寺组和龙马溪组地层的页岩气资源储量为 $(6.8 \sim 8.4) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,相当于四川盆地的常规资源总量<sup>[29]</sup>。四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国Fort Worth盆地石炭系Barnett组页岩相似,两者均为碎屑岩和碳酸盐混合沉积,为海侵体系域的产物,是深水陆棚至盆地相的黑色富有机质页岩。两者所经历的构造成烃演化也相似,均发生早期的快速沉降,受到复杂热事件的影响。不过四川盆地的埋深更大、演化程度更高、脆性矿物含量较低<sup>[30-32]</sup>。

经国内外大量规律印证,无论哪个层系,页岩气与常规油气藏一样,有利区均在盆地内部<sup>[33-34]</sup>,盆

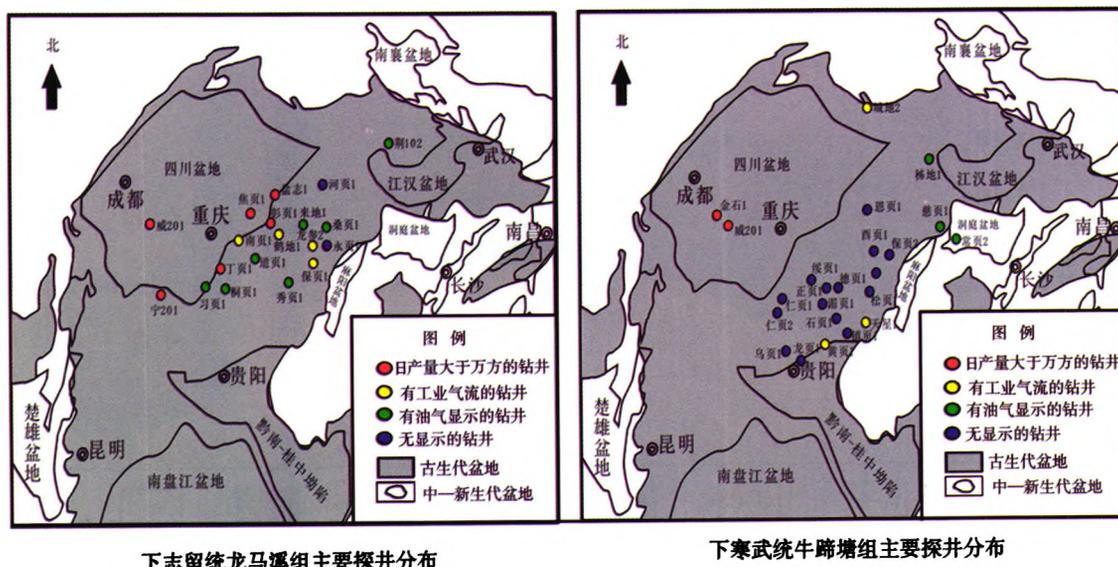


图3 四川盆地周缘探井部署图(据国土资源部2014年公布数据)

地外部的构造运动强烈,普遍具有地层破碎、埋藏浅、倾角大、黑色页岩层薄等缺点,寻找高产页岩气藏难度很大。且页岩气藏距离常规天然气藏不会太远,在大型常规气藏附近开展页岩气勘探较为有利。

### 3.3 重点勘探目的层系

(1)下志留统龙马溪组:长宁威远示范区、筠连示范区有望近两年进行工业化生产,永川富顺也有望成为较大的产能区块。2015年仅四川盆地就可实现  $65 \times 10^8 \text{ m}^3$  页岩气产能。

(2)下寒武统牛蹄塘组:中国石油在南方海相下寒武统牛蹄塘组直井初产气量已经达到  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,中国石化在四川盆地西南坳陷威远构造南西斜坡金页 HF-1 井,目的层是下寒武统筇竹寺组,目前产气量  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(3)石炭系、二叠系:鄂尔多斯盆地石炭系和二叠系埋深合适,延长油田在伊陕斜坡南缘东段实施云页平1井,对山西组分段压裂获得页岩气  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在鄂尔多斯盆地北部实施鄂页1井,在太原组获得  $1.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的稳定产量。在贵州六盘水地区水城实施水页1井,石炭系页岩也获得间歇高产,折算  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(4)侏罗系、三叠系:在川东建南区块和涪陵区块北部、川东北元坝区块的下侏罗统自流井组、川西地区三叠系须家河均组取得重要进展。延长石油在鄂尔多斯三叠系陆相钻井也获得页岩气流。

## 4 结论

(1)热解成因的页岩气与常规油气具有共性。

以游离态为主的页岩气与常规气气藏评价方面同样遵从“生储盖,圈运保”综合研究思路,差异表现为赋存的孔隙或微裂缝是否互相连通,以及两者的运移距离不同,但总体成藏机理本质相同,因此,应按照常规气藏的勘探开发思路研究页岩气成藏因素。

(2)测试手段不当易对页岩气储量评估造成误差。热解成因的页岩气主要以游离态赋存,这类页岩层中吸附气对开采贡献率较小,与煤层气和浅层生物成因的页岩气截然不同。因此用研究煤层气的技术手段应用于热解成因的页岩气会造成较大的误差。

(3)多项页岩气藏评估条件必须综合考虑。热解成因的页岩气为岩性圈闭气藏,除了常规的八大成藏地质要素研究十分重要之外,不断生气的烃源岩、大量发育的微裂缝、两侧封闭的宽缓背斜、顶底板岩性圈闭,是页岩气富集高产的重要因素。

(4)不建议将过多精力和资金用在构造运动强烈、保存条件较差的盆地外区域进行页岩气勘探。以盆地为重点对象,以主要目的层为研究对象,才能推动页岩气工业化生产,才是中国页岩气发展的正确方向。

### 参考文献

- [1] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
- [2] 张小龙,张同伟,李艳芳,等.页岩气勘探和开发进展综述[J].岩性油气藏,2013,25(2):116-122.
- [3] 页岩气地质与勘探开发实践丛书编委会.中国页岩气

- 地质研究进展[M]. 北京:石油工业出版社,2011:93-101.
- [4] 肖钢,唐颖. 页岩气及其勘探开发[M]. 北京:高等教育出版社,2012:105-120.
- [5] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
- [6] 范昌育,王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素与过程[J]. 石油实验地质,2010,32(5):465-469.
- [7] 李庆辉,陈勉,金衍,等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
- [8] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报,2013,29(9):3 300-3 306.
- [9] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale [C]. SPE 1 15258, 2008.
- [10] 赵群,王红岩,刘大锰,等. 中上燕子地区龙马溪组页岩气成藏特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013,32(7):896-900.
- [11] 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.
- [12] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业,2014,34(6):9-16.
- [13] 李传亮,朱苏阳. 页岩气其实是自由气[J]. 岩性油气藏,2013,25(1):1-15.
- [14] 李玉喜,乔德武,姜文利,等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报,2011,30(2-3):308-317.
- [15] 陈更生,董大忠,王世谦,等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业,2009,29(5):17-21.
- [16] 朱炎铭,周友,司庆红,等. 生物成因非常规天然气研究进展及展望[J]. 石油学报,2013,34(2):405-411.
- [17] 陶明信,王万春,解光新,等. 中国部分煤田发现的次生物成因煤层气[J]. 科学通报,2005,50(增刊):14-18.
- [18] Brown A. Identification of source carbon for microbial methane in unconventional gas reservoirs[J]. AAPG Bulletin,2011,(8):1 321-1 338.
- [19] 李传亮,彭朝阳,朱苏阳. 煤层气其实是吸附气[J]. 岩性油气藏,2013,25(2):112-122.
- [20] 石文睿,郭美瑜,张占松,等. 页岩吸附与解吸气量实验测量实例研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(7):167-172.
- [21] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,37(6):641-653.
- [22] 杨堃,车建炜,初军,等. 岑页1井试气影响因素探讨[J]. 石油地质与工程,2015,29(3):104-109.
- [23] 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.
- [24] Richard M Pollastro, Daniel M Jarvie, Ronald J Hill, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett - Paleozoic total petroleum system, Bend arch - Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):405-436.
- [25] 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.
- [26] 谢舟,卢双舫,于玲,等. 泥质气源岩层内天然气扩散损失量评价——以黔南坳陷黄页1井九门冲组页岩为例[J]. 矿物学报,2014,34(1):137-143.
- [27] 王拓,朱如凯,白斌,等. 非常规油气勘探、评价和开发新方法[J]. 岩性油气藏,2013,25(6):35-39.
- [28] 顾忠安,郑荣才,王亮,等. 渝东涪陵地区大安寨段页岩储层特征研究[J]. 岩性油气藏,2014,26(2):67-72.
- [29] 罗健,戴鸿鸣,邵隆坎,等. 四川盆地地下古生界页岩气资源前景预测[J]. 岩性油气藏,2012,24(4):70-74.
- [30] 曾祥亮,刘树根,黄文明,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. 地质通报,2011,30(2-3):372-384.
- [31] 聂海宽,张金川,张培先,等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J]. 地质科技情报,2009,28(2):87-93.
- [32] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [33] 聂海宽,张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(2):700-708.
- [34] 董大忠,程克明,王世谦,等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. 天然气工业,2009,29(5):33-39.

编辑:赵川喜