

页岩油气地质评价方法和流程

陈桂华 肖钢 徐强 祝彦贺 陈晓智

中海油研究总院

陈桂华等.页岩油气地质评价方法和流程.天然气工业,2012,32(12):1-5.

摘要 我国页岩油气勘探开发刚刚起步,为了有效而快速地评价页岩油气的潜力,基于国内外 10 多个页岩油气项目评价的工作实践,综合出了一套适合我国条件的页岩油气地质评价流程和方法,并通过实例说明其应用过程及效果。所提出的页岩油气地质评价流程包括页岩区域评价、页岩评价和页岩油气储量评估。其中页岩区域评价包括建立地层格架、区域构造演化及古地理演化研究、地理地貌分析,目的是确定盆地内是否存在形成富含有机质页岩的古地理环境,评价中强调含有有机质页岩沉积环境稳定分布及构造变化稳定性的确定;页岩评价的目的是确定页岩油气发育的有利区,评价中重点要确定“五度”,即页岩深度、页岩储层厚度、页岩中有机质丰度、页岩中有机质成熟度、页岩的脆性度等指标,这是快速评价页岩油气有利区的关键;页岩油气储量评估的目的是确定形成页岩油气的核心区或“甜点”区,该评估反映了页岩油气藏连续分布的特点。结论认为,所建立的页岩油气地质评价流程和方法便捷有效,为页岩油气快速评价提供了一种方法。

关键词 中国 页岩油气 地质评价 方法和流程 页岩区域评价 页岩评价 页岩油气储量评估

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.12.001

页岩气是一种现实的非常规天然气资源^[1-4]。美国 2011 年页岩气产量达 $1\ 800 \times 10^8 \text{ m}^3$,大大超过我国当年的常规天然气年产量,而现在我国页岩气年产量尚很低。美国能源部能源信息署(EIA)2010 年的评价认为:中国页岩气技术可采储量达 $36 \times 10^{12} \text{ m}^3$,我国国土资源部发布的中国页岩气技术可采储量也达 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。因此,如何借鉴页岩油气勘探开发成功项目的地质评价方法,快速发现并评价我国的有利页岩气发育区就成为一个现实的问题。为此,笔者基于国内外 10 多个页岩油气项目评价的工作实践,综合出了一套适合我国条件的页岩油气地质评价流程和方法,并以某页岩油气盆地的地质评价为例来说明其应用过程及效果。

1 页岩油气地质评价方法与流程

通过分析国内外 10 多个页岩油气评价项目、查询

相关资料、向外国公司学习以及交流培训^[5-13]等方式,综合了一套页岩油气的地质评价方法和流程,并利用该套技术评价了北美、欧洲、澳洲等地多个页岩油气项目以及国内页岩气项目。结果表明,这套方法和流程应用效果很好,对我国页岩油气勘探有一定的借鉴意义。页岩油气评价流程包括页岩区域评价、页岩评价、页岩油气储量评估(图 1),以下分述之。

1.1 页岩区域评价

页岩区域评价包括建立地层格架、区域构造演化及古地理演化研究、地理地貌分析,目的是确定盆地内是否存在形成富含有机质页岩的古地理环境^[1-2]。纵向上,弄清富含有机质页岩发育的层位,明确各页岩层段分布范围及区域沉积的稳定性,同时确定区域构造的稳定性即地层倾角变化、褶皱变化、断裂变化及地貌起伏。也就是说页岩油气尽管不像常规天然气那样对保存条件要求苛刻,但页岩油气含量要达到一定丰

基金项目:中海石油(中国)有限公司综合科研项目“中国南方页岩气资源潜力及勘探技术研究”(编号:2010-CNOOC-KT-05)部分研究成果。

作者简介:陈桂华,1963 年生,高级工程师;1989 年毕业于中国地质大学(北京),并获硕士学位;从事石油地质学、页岩气等领域的研究工作,任首席工程师。地址:(100027)北京市东城区东直门外小街 6 号海洋石油大厦 418 室。电话:(010)84525361。E-mail:chengh@cnooc.com.cn

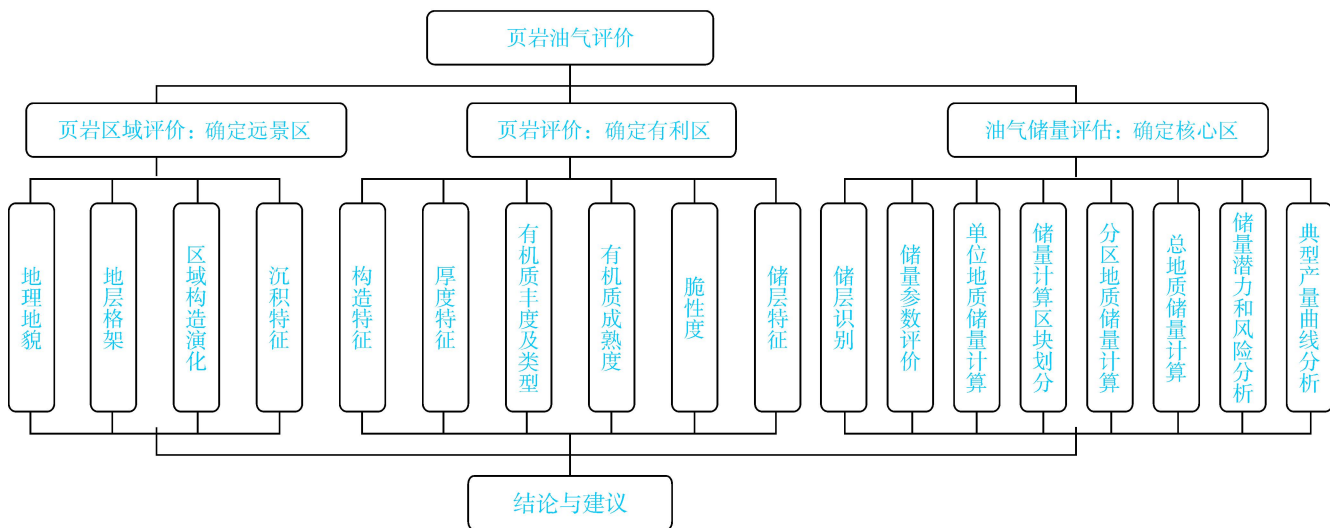


图 1 页岩油气评价流程图

度,同样也要求具有一定的保存条件。只有在相对稳定的地区,页岩油气才有可能发育、保存并被有效开发,该区被称为页岩油气发育远景区。一般认为宽缓背斜、宽缓向斜和地层连续整一分布区为相对稳定区,而新生代盆地发育区经钻井资料确认的也被认为是相对稳定区,都称为页岩油气发育远景区。而地层抬升出露且地层倾角较大、变质岩出露、火山岩覆盖的地区则被认为是无远景区。这里可以引入一个概念——稳定率,即构造、沉积及地貌相对稳定或平缓的地区面积与评价区总面积的比值,利用这一比值可以确定评价区页岩油气远景发育程度。美国页岩气盆地几乎与常规油气盆地叠合,大多数地层平缓,地面起伏不大,区域评价不是特别重要;但在中国,由于地下地质条件复杂、地表起伏大,区域评价就显得相当重要。如在四川盆地的东南部,可以划分出盆地区、斜坡区、高陡区和高原区,盆地区和斜坡区较稳定;而相比之下,高陡区就是一个不稳定区,对页岩气保存和开发都不太有利;而高原区中相对稳定的部分也可算作远景区,不稳定的部分就是无远景区^[14-15]。

1.2 页岩评价

页岩气是指以吸附和游离状态(有时有少量溶解状态)存于低孔隙度、低渗透率、富含有机质页岩层中的天然气。页岩气藏的生成、排烃、运移、聚集和保存全部在烃源岩内部完成,其勘探、开发、研究对象为单一的页岩^[1-2]。页岩气藏具有生成烃的唯一性即页岩中的有机质演化生成的油气是页岩气的唯一来源,储气的多样性即储集空间的多样性和地下状态的多样性,富气的变化性即影响页岩气含量的因素复杂而多变,供气的改造性即只有能进行有效改造的储层才具有经

济生产页岩气的可能。既然页岩气开发不像人们想象中的那么简单,那么在钻井资料不是很丰富的条件下如何能发现经济有效的页岩气分布区呢?页岩评价就是为满足钻井资料不是很丰富、但又要快速锁定一定勘探地区的要求而被提出来的。页岩评价的目的是确定页岩油气发育的有利区。通过综合分析北美各大页岩油气区的勘探实践并考虑国内页岩气区的特征,认为页岩评价内容一般可以概括为“五度”,即页岩埋藏深度、页岩油气储层厚度、页岩中有机质丰度、页岩中有机质热演化程度及页岩强度(脆性度)。

1)页岩的埋藏深度。虽然页岩油气的保存条件没有常规圈闭油气藏要求的那么高,但只有在一定的深度埋藏才具有一定的含油气丰度,一般认为盆地中心区或盆地斜坡区含气页岩的埋藏深度较有利。通过大量实例研究认为,页岩气发育区页岩的埋深要大于800 m,而页岩油发育区页岩的埋深要大于1 500 m,不同的盆地会有所差异。

2)页岩油气储层的厚度。富含有机质页岩厚度要达到一定规模才有利于水平井压裂开发,一般有效厚度要大于15 m,页岩中有机质丰度低的页岩厚度要超过30 m,且区域上要连续稳定分布才为有利区。

3)页岩中的有机质丰度。研究表明,页岩中的吸附天然气主要是有机质吸附的天然气。页岩中的有机质含量要达到一定指标才有形成丰富油气的基础,也才有利于有机质吸附一定量的天然气,同时也有利于有机质热演化生烃过程中一定量有机质颗粒内孔隙的形成。Jarvie等的研究认为(2007),页岩中的孔隙以有机质生烃形成的孔隙为主,并为页岩中游离油气提供储集空间,总有机碳含量(TOC)为7%的页岩,有机

质体积为 14%，但经过热演化完全成熟生烃后，由于碳的丢失而形成 4.9% 的有机质内孔隙。美国页岩油气发育区 TOC 一般大于 2%，最好的超过 2.5%。

4) 页岩中有机质的热演化程度。有机质热演化成熟度 (R_o) 应在生油气窗范围之内才能形成一定量的油气，美国页岩油发育区的 R_o 为 0.7%~1.5%，页岩气发育区的 R_o 为 1.1%~3.5%。虽然也有生物成因的页岩气^[9,14-15]，但因其含气丰度极低，经济性不是很好。

5) 页岩强度(脆性度)。脆性的页岩才有利于水平井压裂改造页岩储层形成人造裂缝，增加泄油气体积，因此，人们称页岩气为“人造气藏”。页岩中的脆性矿物如石英、方解石、长石等含量要大于 30%，而黏土含量要小于 40%。并非所有页岩都能成为页岩油气藏，这里有一个值得注意的问题是：上述标准和概念是相对的。世界上没有一个完全一样的页岩油气盆地，不同盆地其标准是不一样的。另外，随着技术水平的提高，原来被认为是不经济的地区将变得经济有效，但要树立在烃源岩中勘探开发油气的理念。

页岩评价是一种非常规油气评价，同时也是连续性油气藏评价，与常规油气评价不同的地方在于有机质丰度及类型、有机质成熟度和页岩脆性度评价。

1.3 页岩油气储量评估

页岩油气储量评估可以确定形成页岩油气的核心区或“甜点”区。核心区应该是经过试验性开采后证明有经济性而确定的区域，“甜点”区应具有有机质含量高、有机质演化形成的孔隙发育等有利条件，这样的话，储层中的含油气量就较高。页岩存在天然裂缝、其他成因的孔隙发育、一定的岩性体、构造挠曲和低幅构造等都是形成页岩油气“甜点”区的有利条件。

页岩油气储量评估的方法很多，这里只介绍一种北美地区应用最广泛的直接法。页岩油气储量评估与常规油气储量评估有很大不同，由于页岩油气藏是一种连续性油气藏，但每个区域因地质条件的不同储量参数又是变化的，如页岩厚度、油气层压力和温度、孔隙度等，而依据掌握钻井资料程度的不同，储量评估的方法就有两种选择。其一是等值线法：该方法适用于钻井资料丰富的地区。先计算出每个井点的单位原始地质储量，再勾绘单位原始地质储量平面分布等值线图，利用积分法累加各等值线内地质储量即可得到总原始地质储量。其二是分区法：适用于只有少量钻井资料的地区。先根据地质特征对整个矿区进行分区，有钻井资料的区域先计算每个井点的单位原始地质储量，再乘以该区面积得到该区原始地质储量。对于没

有钻井资料的地区，利用地质特征类比法，得到该区单位原始地质储量，再乘以该区面积得到该区原始地质储量，最后各区原始地质储量相加即得到总原始地质储量。

计算单位原始地质储量(储量面积丰度)采用体积法和含气量法，单位储量计算公式如下。

1.3.1 页岩油发育区储量计算

$$\text{页岩油: } OIP = \frac{Ah\varphi_{\text{eff}} S_o}{B_o}$$

$$\text{溶解气: } GIP_{\text{dis}} = OIP \times GOR$$

式中 OIP 表示单位原始石油地质储量， $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ； A 表示面积， 1 km^2 ； h 表示储层厚度， km ； φ_{eff} 表示有效孔隙度； S_o 表示含油饱和度； B_o 表示原始原油体积系数； GIP_{dis} 表示单位溶解气地质储量， $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ； GOR 表示原始溶解气油比。

1.3.2 页岩气发育区储量计算

单位总页岩气储量=单位游离气储量+单位吸附气储量

$$\text{游离气: } GIP_{\text{fre}} = \frac{Ah\varphi_{\text{eff}} S_g p}{Z(T+459.67)}$$

$$\text{吸附气: } GIP_{\text{ads}} = \frac{Ah\bar{\rho}_b \bar{G}_{\text{sc}}}{10^3}$$

式中 GIP_{fre} 表示单位原始游离气地质储量， $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ； S_g 表示含气饱和度； p 表示储层压力， psia ($1 \text{ psia} = 6.8948 \text{ kPa}$)； T 表示储层温度， $^{\circ}\text{F}$ ($x^{\circ}\text{F} = 32 + x^{\circ}\text{C} \times 1.8$)； Z 表示天然气偏差因子； GIP_{ads} 表示单位原始吸附气地质储量， $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ； $\bar{\rho}_b$ 表示地层平均体积密度， g/cm^3 ； \bar{G}_{sc} 表示地层平均吸附气含量， m^3/t 。

2 某盆地页岩油气地质评价实例

某盆地面积大约为 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，需要评价的页岩油气矿区位于该盆地的西北部，面积约为 2400 km^2 。

2.1 区域地层

该盆地中要评价的页岩沉积在距今约 89 Ma 前的晚白垩世被动大陆边缘，发育在一组石灰岩地层之上，为一套稳定浅海相富含有机质页岩，并且是大量商业性油气田的烃源岩，上覆为白垩层。该盆地页岩的厚度受深部构造的控制，一般介于 $30.5 \sim 122 \text{ m}$ ，最厚处分布在西部及南部边缘。同时，埋深从西到东、从北向南不断增加，深度范围介于 $1219 \sim 4267 \text{ m}$ 。该盆地北部露出了上述页岩地层，而在盆地的西北部发育火山岩，整个盆地地层是从北向南倾斜。需要评价的矿区位于盆地的中部，无论是沉积和构造都处在稳定区(图 2)。

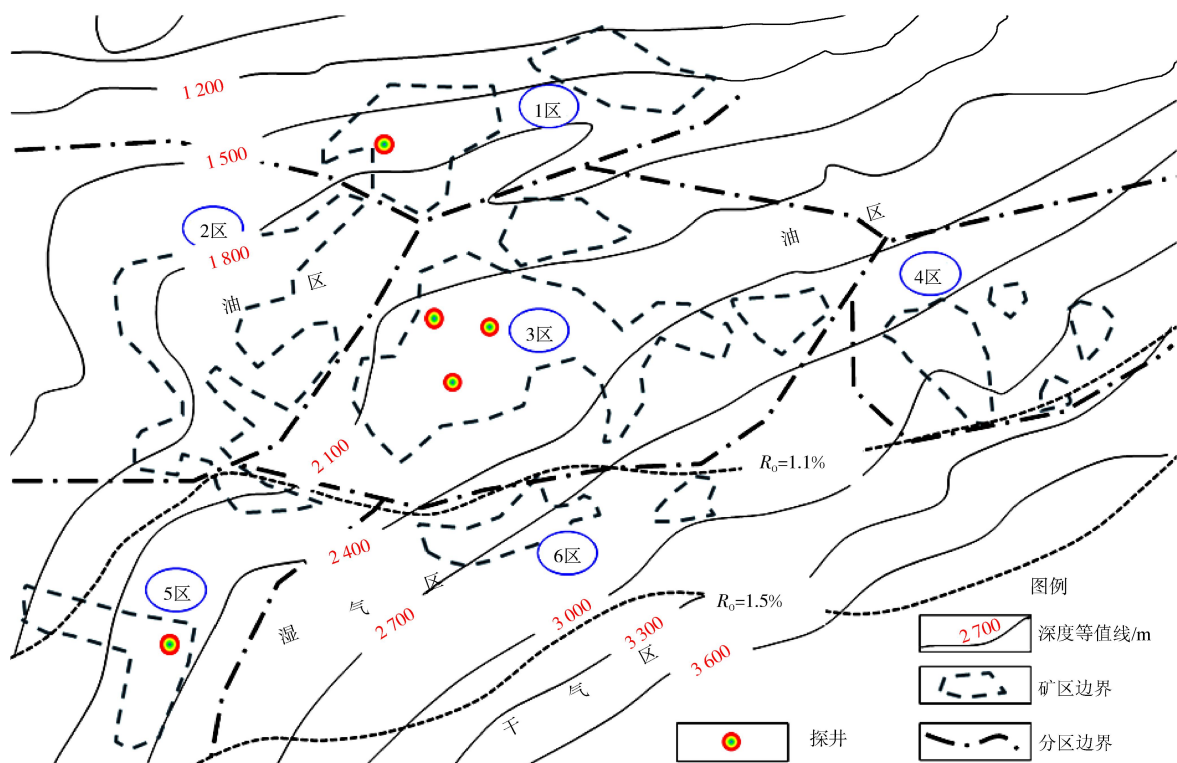


图2 页岩油气盆地构造、矿区分布及评价分区图

2.2 页岩评价

2.2.1 构造特征

从页岩顶部构造图来看(图2),矿区构造简单,为一个向东南倾斜的单斜构造,有几处轻微挠曲,不发育大断层,其储层顶部埋深介于1 219~3 353 m,埋藏深度适中,既有利于页岩油气的保存,也有利于页岩油气的开发。

2.2.2 厚度特征

矿区内页岩总厚度介于61~122 m,最厚处位于西部矿区(达122 m),最薄的部位位于东北矿区,一般为30.5~46 m。一般情况下,页岩厚度超过15 m时才能有效开发页岩油气,矿区页岩厚度大于这一下限值,这为利用水平井多段压裂开发创造了条件。

2.2.3 有机质丰度、类型、成熟度

矿区内页岩中TOC介于1.00%~7.68%,有机质类型为偏腐泥混合型,北部的 R_o 为0.8%,而南部的 R_o 超过了1.5%。

2.2.4 脆性度

脆性矿物含量决定了页岩的被改造能力,脆性矿物含量越高页岩的脆性度就越高,页岩越易被压裂改造。该盆地页岩中钙质含量介于49%~64%,石英含量介于8%~16%,黏土含量介于17%~29%。总的

来说,从南向北钙质含量增加,而石英和黏土含量减少,但脆性矿物含量都远大于30%,黏土含量都远小于45%,这一特点有利于页岩的压裂改造。

总之,从“五度”来评价,可以快速地认为矿区都处在页岩油气有利区,后期的钻探结果也证实了这一点。

2.3 储量评估

由于该盆地处在勘探阶段,甲方也只提供了5口井的钻井及生产资料,分布在有限地区。因此,储量计算只能应用上述分区法和类比法。

根据页岩有机质成熟度,参考已知油田的油密度和油气比,先把矿区划分成3个大区即页岩油区(R_o 介于0.7%~1.1%),湿气区(R_o 介于1.1%~1.5%),干气区($R_o > 1.5%$)(图2)。再根据其他“五度”特征划分(表1),页岩油区分为4个区,湿气区分为2个区,没有干气区。根据井点资料和各区的“五度”特征,计算代表该区平均单位页岩油、溶解气和油气当量的地质储量,再根据各区面积乘以单位地质储量即得到该区总的页岩油、溶解气和油气当量的地质储量,同理得气区的游离气、吸附气和总天然气地质储量。通过一年近300口井钻探的证实,上述分区合理,预测储量与实际地质储量相差不大。

表 1 矿区分区特征及单位地质储量表

项 目	油 区				湿气区	
	1	2	3	4	5	6
平均深度/m	1 676	1 830	2 286	2 896	2 377	2 743
平均厚度/m	82	122	76	40	111	73
平均总有机碳含量	6.0%	3.5%	3.5%	5.0%	7.0%	5.0%
单位原始页岩油地质储量/($10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	3.4	4.0	2.8	2.5		
单位原始页岩气地质储量/($10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)					191	109

3 结 论

1)页岩油气评价流程包括页岩区域评价、页岩评价、页岩油气储量评估。页岩区域评价包括建立地层格架、区域构造演化及古地理演化研究、地理地貌分析,目的是确定盆地内是否存在形成富含有机质页岩的古地理环境。页岩评价确定页岩油气发育的有利区。页岩油气储量评估过程中可以确定形成页岩油气的核心区或“甜点”区。

2)页岩油气地质评价流程和方法与常规油气有很大不同,页岩油气区域评价强调页岩的稳定性,页岩评价中则有有机质丰度及类型、有机质成熟度和脆性度评价的不同,储量评估则体现了连续油气藏的特点。

3)“五度”评价标准的确定,为页岩油气快速评价提供了可能。

4)实践证明,所建立的页岩油气评价流程和方法便捷有效。

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] 张金川,汪宗余,聂海宽,等.页岩气及其勘探研究意义[J].现代地质,2008,22(4):25-30.

[3] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.

[4] 江怀友,宋新民.世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J].天然气技术,2008,2(6):26-30.

[5] CHONG K K, GRIESER W V, PASSMAN A, et al. A completions guide book to shale-play development: a review of successful approaches towards shale-play stimulation in the last two decades [C]// paper 133874 presented at the Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 2010.

[6] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources [C]// paper 131768 presented at the SPE Unconventional Gas Conference, 23-25 February 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: SPE, 2010.

[7] CHENG K, WU W, HOLDITCH S A, et al. Assessment of the distribution of technically-recoverable resources in North American Basins [C]// paper 137599 presented at the Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 2010.

[8] MARTIN R, BAIHLY J, MALPANI R. Understanding production from Eagle Ford-Austin Chalk system [C]// paper 145117 presented at the SPE Annual Technical Conference, 30 October - 2 November 2011, Denver, Colorado, USA. New York: SPE, 2011.

[9] EDMAN J D, PITMAN J K. Geochemistry of Eagle Ford Group source rocks and oils for the first shot field area: Texas [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2010, 60: 217-234.

[10] RODRIGUEZ N D, PHILP R P. Geochemical characterization of gases from the Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11):1641-1656.

[11] 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.

[12] LASH G G, ENGELDER T. Thickness trends and sequence stratigraphy of the Middle Devonian Marcellus Formation, Appalachian Basin: implications for Acadian foreland basin evolution [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(1): 61-103.

[13] MODICA C J, LAPIERRE S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 87-108.

[14] 页岩气地质与勘探开发实践丛书编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展 [M]. 北京:石油工业出版社, 2009: 640-647.

[15] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践 [J].天然气工业,2011,31(12):32-37.