

陆相页岩气资源评价初探:以延长直罗一下寺湾区中生界长 7 段为例

王香增¹, 张金川², 曹金舟¹, 张丽霞¹, 唐玄², 林腊梅², 姜呈馥¹, 杨镜婷²,
王龙², 吴颖¹

1. 延长石油集团有限责任公司, 陕西 西安 710075

2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

Wang Xiangzeng¹, Zhang Jinchuan², Cao Jinzhou¹, Zhang Lixia¹, Tang Xuan², Lin Lamei²,
Jiang Chengfu¹, Yang Yiting², Wang Long², Wu Ying¹

1. Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd, Xi'an 710075, China

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

Wang Xiangzeng, Zhang Jinchuan, Cao Jinzhou, et al. A preliminary discussion on evaluation of continental shale gas resources: A case study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Zhiluo-Xiasiwan area of Yanchang. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 192-197

Abstract: Shale gas is a kind of unconventional natural gas accumulation types; its practice is still in the experimental stage in China. There are no mature methods to evaluate the resources reasonably at present and it lacks reference especially for evaluation of continental shale gas. Based on the analysis of differences and characteristics between marine shale and continental shale, the conditions and standards of terrestrial shale resource evaluation are confirmed. The continental shale gas resources are evaluated preliminarily on the basis of sample tests and gas content assessment of the Mesozoic Triassic Yanchang Formation shale in Yanchang exploration area. For different exploration degree and geological conditions, different assessing methods should be used. By a comprehensive evaluation, it is shown that the Mesozoic continental shale gas resource is of great value for exploration development; its volume is $626.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ to $6037.2 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Key words: shale gas; Yanchang exploration area; Mesozoic; continental; resource evaluation

摘要:页岩气是一类非常规天然气聚集类型,在中国找页岩气的实践还处于初期阶段,如何合理评价其资源量目前还没有成熟的方法,尤其针对陆相页岩气评价更缺乏借鉴和参考。文中在分析海相、陆相页岩的差异和特点的基础上,明确陆相页岩资源评价的条件和标准。针对延长探区中生界三叠系延长组页岩开展研究,在样品测试、含气量初评的基础上,对陆相页岩气的资源进行初步评价。对不同勘探程度和地质条件采用不同的资源评价方法,综合不同方法获得的结果认为,延长直罗一下寺湾区中生界陆相页岩气资源量达到 $(626.4 \sim 6037.2) \times 10^8 \text{ m}^3$,具有很好的勘探开发价值。

关键词:页岩气;延长探区;中生界;陆相;资源评价

中图分类号:P618.130.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2012)02-0192-06

陆相地层研究是我国油气勘探非常重要的领域,目前发现的一半以上的油气都是来自陆相地域,陆相沉积在我国分布面积大,常规油气丰度层,具有十分重要的油气资源意义。页岩在陆相

收稿日期:2012-01-13;修回日期:2012-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41102088)

作者简介:王香增(1968—),男,高级工程师,主要从事油气田开发及油井特种增产技术研究。E-mail: sxycpcwxz@126.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2012,19(2)

地层中广泛发育,与海相地层相比,有着鲜明的特色。在面积上陆相页岩规模相对较小,较海相相对局限;在构造上陆相页岩的后期改造弱,保存条件较好,继承性明显,基底起伏较大;在沉积上陆相地层表现为频繁的砂泥互层,累计厚度大,夹层发育,单层有效厚度变化较大,部分夹煤层;在矿物学方面陆相地层的泥质含量较高,泥岩的可压裂性较海相差。沉积有机质对水深和气候变化敏感,有机质类型多样,深湖相多发育Ⅰ型干酪根,浅湖相发育过渡类型干酪根,湖沼相多发育Ⅲ型干酪根。有机质热演化程度整体较海相低,主要处于生油窗内。页岩气常为热解气,多与石油伴生,页岩当中常出现油气共存的现象^[1]。上述特点决定了页岩气资源评价不能完全照搬海相页岩气评价的条件、参数和标准。

常规油气资源评价按照其原理,划分为类比法、成因法、统计法和综合法 4 类主导方法。目前的页岩气资源评价,美国常用的 FORSPAN 方法和单井储量预测的方法都是建立在已有开发数据基础上,估算结果为未开发资源量,这些方法较适合于已开发单元的剩余资源潜力预测^[2];计算原地资源量(gas in place)主要使用体积法^[3-9],这对连续分布型天然气使用体积法是合适的,但较少考虑页岩的非均质性。为试验各种资源评价方法在页岩气资源评价中的差别,本文以延长油田直罗一下寺湾区为例,对比各种方法的评价结果,对比不同资源评价方法的差异和适用条件。

1 延长直罗一下寺湾区陆相页岩气地质特征

1.1 陆相页岩的分布

鄂尔多斯陕北斜坡整体为一西倾平缓单斜,地层倾角一般小于 1° ,平均坡降 $7\sim 8$ m/km,内部发育因差异压实作用形成的鼻状构造。鄂尔多斯盆地于晚侏罗世出现雏形,晚三叠世开始经历了大型内陆湖盆间歇震荡式湖进、湖退兴衰演化的完整历史,并进入大型内陆差异沉积盆地的形成和发展时期,为一大型微咸水湖盆。

研究区陆相页岩主要发育在上三叠统延长组长 9 和长 7 段,其中长 7 段沉积时期盆地基底整体强烈下沉,湖盆发育达鼎盛时期,水体明显加深,水生生物和浮游生物繁盛,含大量的淡水-半咸水动物

化石,有机质丰富,发育深灰色泥岩、黑色泥岩、页岩和油页岩,其有机质泥页岩分布稳定、厚度大,长 7 段发育厚 $70\sim 120$ m 的深灰色、灰黑色泥岩和 $30\sim 100$ m 厚的油页岩,呈北西南东展布,以定边—吴起—志丹—甘泉—富县一带最厚^[10-11],是中生界重要的烃源岩分布区。直罗一下寺湾探区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡东南部延长探区内,长 7 泥页岩厚 $10\sim 70$ m,厚度最大可达 78 m,目前在柳坪 177 井长 7 段页岩中已获得工业气流,证明了陆相页岩气的存在。

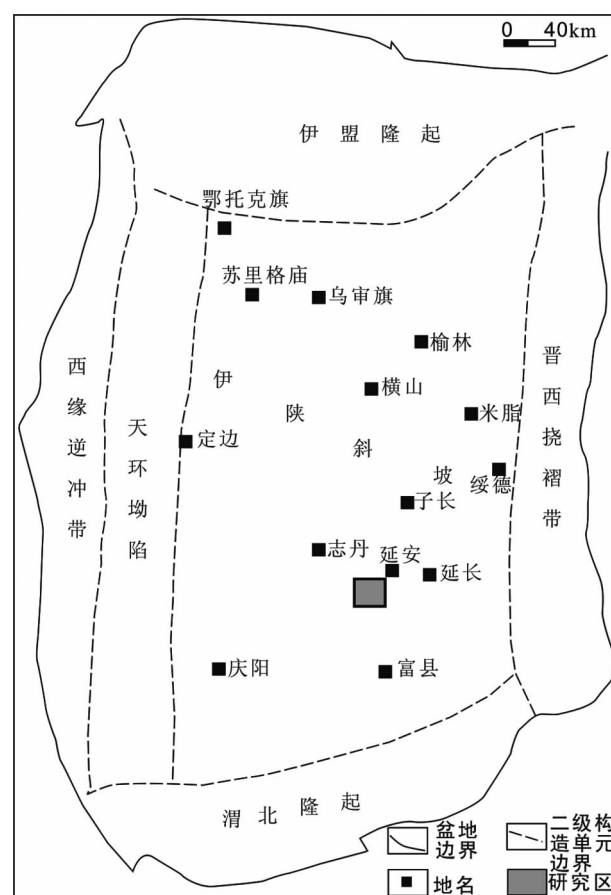


图 1 直罗一下寺湾区位置图

Fig. 1 Location of Zhiluo-Xiasiwan area, Southeastern Ordos basin

1.2 页岩的特点

研究区内长 7 段页岩母质类型以腐殖-腐泥型为主,显微组分以腐泥无定型为主,其次为惰质组和镜质组,有机碳含量为 $1.76\%\sim 6.28\%$,氯仿沥青“A”含量为 $0.25\%\sim 0.67\%$,总烃含量为 $(1\ 847\sim 5\ 218)\times 10^{-6}$,长 7 段在盆地内大部分地区处于成熟阶段, R_o 分布在 $0.7\%\sim 1.5\%$,局部地区向高成熟阶段过渡^[12]。在测井上表现为“三高一低”特征,

高电阻、高自然伽马、高声波时差、低电位(图 2),测井曲线横向对比明显。

研究区内的具体参数见表 1,研究区长 7 页岩厚度分布在 50 m 到 80 m,平均厚 60 m,有机质丰

度分布于 2.0%~5.0%,成熟度为 0.8%~1.2%,平均 1.0%,有效页岩面积为 2 500 km²。

1.3 页岩气资源预测

1.3.1 类比法

从各项参数对比来看,延长探区与福特沃斯盆地的地球化学条件最为相似(表 1),有机碳含量和成熟度都比较接近,有机碳含量分布在 2%~6%,成熟度镜质体反射率分布在 1.0%左右,处于大规模生油时期。福特沃斯盆地吸附气含量在 1.7~3.54 m³/t,而延长探区吸附气量可能更高,含气量为 2.43~6.45 m³/t,因而从有机质丰度,成熟度和含气量方面,延长探区中生界地层和福特沃斯 Barnett 页岩具有较大的可比性^[13-15]。长 7 段的有机碳(TOC)含量与 Barnett 和 Lewis 页岩相似,成熟度也较相似,Barnett 页岩的地质资源丰度达到 (3.28~4.37)×10⁸ m³/km²,Lewis 页岩的地质资源丰度达到 (0.87~5.46)×10⁸ m³/km²,因而利用类比法,采用这当中的最小和最大值加以预测,延长探区页岩气资源量可以达到 (0.87~5.46)×10⁸ m³/km²,折算成资源量可以达到 (626.4~3 931.2)×10⁸ m³。

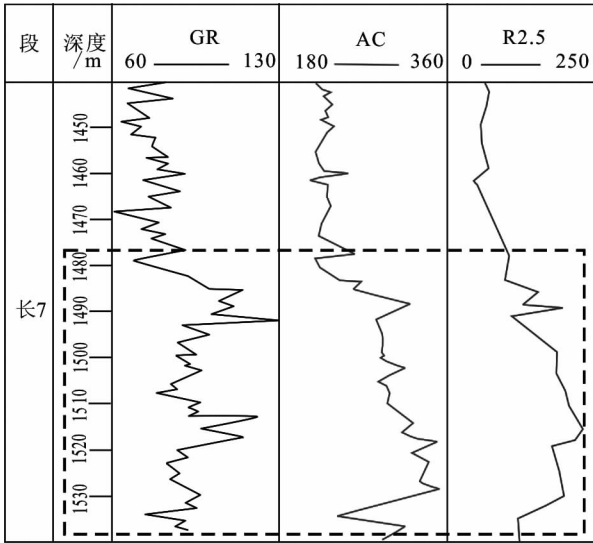


图 2 柳评 180 井长 7 段测井响应特征
Fig. 2 Logging characteristics of shale of Chang 7 member, Yanchang Formation, Well Liuping 180

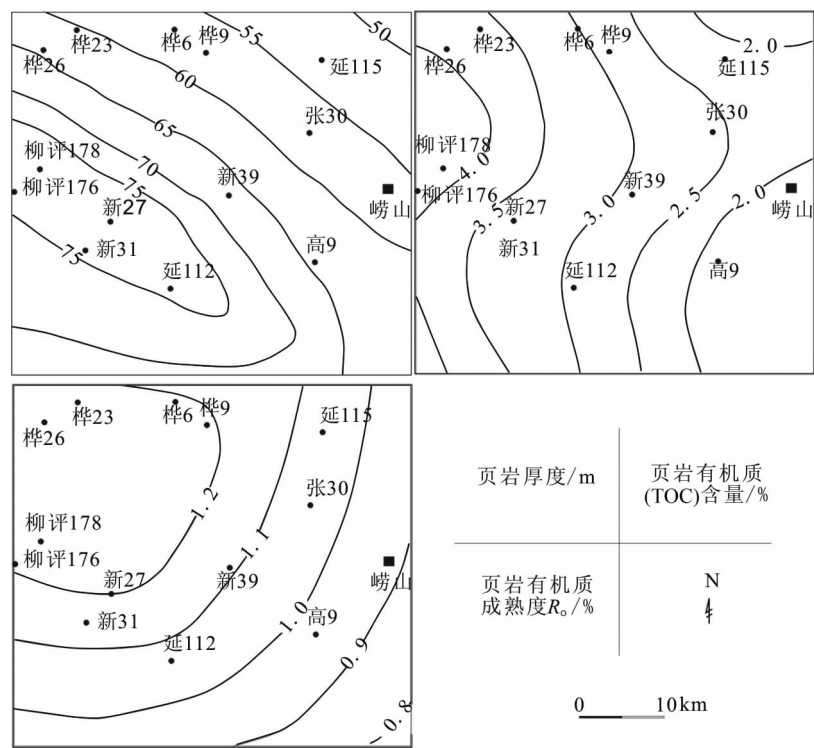


图 3 研究区页岩分布与有机质特点
Fig. 3 Shale distribution and organic matter parameter in research area

表 1 研究区长 7 段页岩特征及与国外页岩对比表^[13]

Table 1 Shale parameter of Chang 7 Member in research area and comparison with shale in USA

层位	厚度/m	w(TOC)/%	有机质类型	R _o /%	石英含量/%	吸附气量/ (m ³ ·t ⁻¹)	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)
长 7	50~80	2~5	Ⅱ ₂ -Ⅲ	0.8~1.2	20~30	1.25~2.75	0.87~5.46*
Barnett	60~90	4.5		1.0~1.3		1.7~3.54	3.28~4.37
Lewis	150~570	0.45~2.5		1.6~1.88			0.87~5.46
New albany	30~120	1~25		0.4~1.0			0.76~1.09

注：* 是类比 Barnett 页岩和 Lewis 页岩的资源丰度值。

1.3.2 成因法

根据成因法,生产天然气资源量=烃源岩质量×有机质丰度×有机质转化率×剩余烃系数,即

$$Q = A_s \cdot H_s \cdot r \cdot C \cdot K_c \cdot (1 - K) \tag{1}$$

式中:Q 为天然气资源量(10⁸m³);A_s 为页岩有效面积(km²);H_s 为页岩有效厚度(km);r 为页岩密度(10⁸t/km³);C 为页岩有机碳含量;K_c 为有机碳转化系数(m³/t);K 为排烃系数。计算过程中,产气率和排烃系数的确定是关键。

这里关键参数是有机碳转化系数和排烃系数。据何自新^[11]模拟,鄂尔多斯盆地烃源岩总分布面积为 77 139.7 km²,生油量为 2 251.17×10⁸ t。最大生烃强度 300×10⁴ t/km²,排油系数取 48.5%,延长组烃源岩排油量为 1 091.82×10⁸ t。通过对不同类型干酪根热压模拟实验,获取了不同干酪根的生排烃量,这个相当于理论上最大的生烃量,含草本藻类相(Ⅱ₁型)烃源岩最高生气态烃为 513.9 m³/t,其中含藻类草本相(Ⅱ₂型)烃源岩在 450~500℃时烃气最高达到 440.6~417.8 m³/t,木本相(Ⅲ型)烃源岩生成的烃气量最高达到(271.6~265.8)×10⁸ m³/t,利用这个范围可以从理论上大致限定烃气产率达到(271.6~513.9)×10⁸ m³/t。排烃率按照 50%算的话,剩下来还有 50%。因而将上述参数带入公式(1),可以得到页岩气资源量为(3 297~5 531.62)×10⁸ m³。

1.3.3 体积法

以吸附和游离状态赋存于泥页岩地层中的天然气聚集,目前根据吸附量+游离量的算法。在实际当中,我们利用解吸仪器可以直接获得页岩当中解吸出来的天然气,这当中应该是既有游离态的气,也有吸附状态的天然气,可以视为全含气量。以延长

探区万 169 井为例,3 kg 岩心,解吸最高含气量为 2 347 mL,按照二次回归,损失气量达 17 016 mL,最后含气量换算为 6.45 m³/t(图 4)。

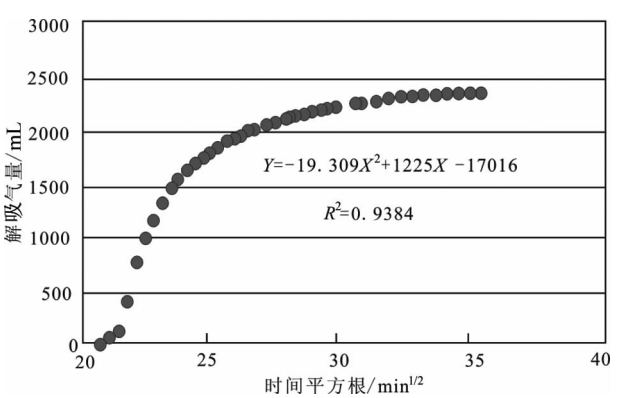


图 4 万 169 井的解吸气拟合图
Fig. 4 Shale gas adsorption curve for Well Wang 169

利用此方法和原理,测试了柳评 171 井和万 169 井数据,其结果如表 2 所示,长 7 段含气量分布为 2.43~6.45 m³/t。

表 2 解吸数据表

Table 2 Shale gas adsorption data

井号	样品号	层位	采样深度/m	岩心质量/kg	解吸气量/mL	吸附气量换算量/(m ³ ·t ⁻¹)
柳评 171	L-1	长 7	1 730	3	2 347	6.45
柳评 171	L-2	长 7	1 780	0.6		
万 169	W-1	长 7	973	0.55	605	2.43
万 169	W-2	长 7	974.4	0.22	660	5.5

根据本次含气量测试,长 7 段含气量分布为 2.43~6.45 m³/t 岩石,长 9 段和山西组缺少测试数据。根据研究院提供的直罗—下寺湾地区页岩厚

度和有效面积,按照页岩岩石密度 2.6 g/cm³ 估算资源量达(1 581.4~6 037.20)×10⁸ m³。

2 讨论

不同方法采用的思路不一样,结果也不一样,而且可能会相差较大(表 3)。这里试根据其计算原理并结合地质条件讨论其差别存在的原因。

(1)在勘探成熟区利用井控储量估算方法获得的资源量最靠近可采资源量的,数据最准确,但是偏保守,而且严格受制于勘探工作量的投入,因而决定了中国在目前的页岩气勘探阶段该方法还难以实现。另外一方面,本文采用类比法测算的研究区资源量偏低,原因也就是 Barnett 页岩气储量就是用单井储量法取得,因而获得的类比值也较低,但可能最接近可开采储量。

表 3 资源量统计表

Table 3 Resource calculated through various methods

方法	资源量/(10 ⁸ m ³)	
	最小值	最大值
类比法	626.4	3 931.2
成因法	3 297.0	5 531.62
体积法	1 581.4	6 037.2

(2)类比法主观因素较强。因为地质条件是复杂的,有很多的地质要素和变量,类比法中常常出现一些变量相似,而另外一些变量却相差较大,条件全都相似的实例在地质上几乎没有。另外,即使地质参数在宏观上相似,在微观上未必也具有同样的对等性,非均质性的特点在页岩气当中仍然非常显著。因而这些必然导致相似系数选择上的主观性,也同时决定了类比法的准确程度。

(3)成因法在理论上具有严密的逻辑性,但是在参数的获取上比较困难,需要借助于较严格的、系统的、大量的科学实验数据,而且在空间上由于参数的变化,通过排除其他干扰因素获得的数据往往偏大。

(4)统计法具有后验性,与勘探程度的高低息息相关,因而一般在勘探成熟区应用具有良好的效果。

由上可见,资源量计算方法的可靠性关键取决于参数的选取都是否足够精确,而这完全受制于勘探工作量的投入和勘探程度的高低。

资源预测的方法目前按照方法所基于的原理归

类,类比法、成因法、统计法、综合法是 4 类主导方法,在原理上非常规油气资源评价与之并没有什么本质差别。评价差别主要体现在三方面:(1)资源评价起算条件;(2)资源评价标准不同——面积和厚度下限;(3)赋存模式(吸附+游离+溶解)差异,溶解气油比不同。

为克服参数选择和赋值中的非确定性和赋值过程中的随机性和主观性导致的,目前张金川等^①提出可利用条件概率赋值的方法来对参数进行科学赋值。条件概率可理解为在不同的概率条件下,有可能发生的地质事件。计算过程中,所有的参数均由于地质条件变化的复杂性而存在不确定性,可表示为给定条件下事件发生的可能性或者条件概率。条件概率越小,页岩气聚集的条件就越差,对应的计算参数赋值也就越应当宽松,例如对 TOC 界限的条件概率赋值(表 4)。因此根据这个标准,研究区资源量数据的把握性很大,是比较可靠的。

表 4 TOC 界限的条件概率赋值

Table 4 Conditional probability assignment of TOC

条件概率	有机碳含量界限/%	取值参考
A ₅	0.5	有点可能性
A ₂₅	1.0	把握性不是很大
A ₅₀	1.5	一般有把握
A ₇₅	2.0	比较有把握
A ₉₅	2.5	很有把握

3 结论

(1)非常规页岩气资源具有连续性、非离散性,在空间分布上具有局限性,可采性取决于工程技术水平;陆相页岩气的资源评价方法主要是类比法、成因法和体积法,其他资源评价方法在页岩气勘探当中具有一定的局限性。

(2)延长组湖相页岩有机质主要为 II 型干酪根,有机质演化阶段主要处于成熟和生油窗阶段,有机质丰度较高,分布稳定。

(3)研究区利用类比法获得的资源量(626.4~3 931.2)×10⁸ m³,成因法获得的资源量(3 297~

① 张金川,张大伟,李玉喜,等. 全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选报告. 北京:国土资源部油气资源战略研究中心,2011

$5\,531.62) \times 10^8 \text{ m}^3$;统计法获得的资源量($1\,581.4 \sim 6\,037.2) \times 10^8 \text{ m}^3$,据此推定研究区资源量在($626.4 \sim 6\,037.2) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(4)不同计算方法得到结果不同,最关键的是参数的选取都是否足够精确,这又受制于勘探工作量的投入和勘探程度的高低,利用条件概率赋值的方法是目下比较科学的一个方法,可以让决策者了解资源量计算结果的风险性。

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] Schmoker J W. U. S. Geological Survey assessment model for continuous (unconventional) oil and gas accumulations: The "FORSPAN" model[J]. U. S. Geological Survey Bulletin, 1999, 2168: 1-12.
- [3] 李延钧,刘欢,刘家霞,等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011(2): 28-34.
- [4] 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(5): 33-39.
- [5] 赵鹏飞,余杰,杨磊. 页岩气储量评价方法[J]. 海洋地质前沿, 2011(7): 57-63.
- [6] 张金川. 深盆地气资源量: 储量计算方法[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 32-35.
- [7] 张道勇,张风华. 油气资源量预测3种方法的比较[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2006, 36(3): 453-456.
- [8] 张华义,金之钧. 油气藏规模概率统计法在资源评价中的应用[J]. 天然气工业, 1997, 17(1): 19-23.
- [9] 张杰,金之钧,张金川. 中国非常规油气资源潜力及分布[J]. 当代石油石化, 2004(10): 17-19.
- [10] 杨华,窦伟坦,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 2010(2): 254-263.
- [11] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [12] 徐士林,包书景. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测[J]. 天然气地球科学, 2009(3): 460-465.
- [13] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [14] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [15] 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.