

## 美国页岩气压裂增产技术

崔 青

(中国石油大学石油工程学院, 山东东营 257061)

**摘 要:**页岩气是非常规气勘探开发的重要领域,并在美国取得了巨大成功。页岩气以吸附或游离状态为主要存在形式,形成于暗色高碳泥质烃源岩中。页岩气藏是典型的非常规天然气藏,它具有低渗透、生产周期长和开采寿命长的特点。页岩气作为一种高效、清洁的能源,其中蕴藏着巨大的经济和环境效益。美国页岩气开发采用了先进的压裂增产技术,页岩气产量逐年提高。水力压裂技术的改进主要是指各种压裂技术的涌现,如分段压裂技术、重复压裂技术、同步压裂技术和清水压裂技术等。

**关键词:**美国;页岩气;压裂;增产

**中图分类号:**TE375 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-5285(2010)10-0001-03

## Fracture-stimulation technology of American shale gas

CUI Qing

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum,  
Dongying Shandong 257061, China)

**Abstract:** The exploration of shale gas is an important field of the non-conventional gas exploration and it has achieved great success in USA. Shale gas mainly accumulates in adsorbed and free phases. The shale gas reservoir formed in dark-colored high-carboniferous argillaceous hydrocarbon source rocks. Shale gas reservoir is a typical unconventional natural gas reservoir, which has low permeability, long production cycle and exploitation life. As a kind of effective and clean energy, shale gas may bring us tremendous economic and environmental benefits. As the United States is now using advanced fracture stimulation technology mining shale gas, the shale gas production increases every year. As for the hydraulic fracturing technology, its modification mainly refers to the emergence of a variety of fracturing technologies, such as multi-stage hydraulic fracturing, refracturing, simultaneous fracturing and slickwater fracturing.

**Key words:** America; shale gas; fracturing; stimulation

\* 收稿日期:2010-08-24

作者简介:崔青,女(1986-),山东东营人。邮箱:guilicui@163.com。

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。根据页岩气可采资源底数和开采潜力,页岩气已成为继致密砂岩气和煤层气之后的第三种重要的资源。对于页岩气,实现经济开采的重要因素之一就是裂缝的发育程度,但是统计表明 90 % 以上的页岩气井需要采取压裂等增产措施沟通天然裂缝。我国与美国在页岩气地质条件上具有许多相似之处,页岩气富集地质条件优越,具有与美国大致相当的页岩气资源前景和开发潜力。美国已经实现了页岩气的商业化开采,其成功经验值得我国借鉴学习。

## 1 美国页岩气勘探开发现状

美国最先对页岩气进行开采实验,并取得巨大成功,且具有领先地位。页岩气的商业性开采最早(1821 年)始于美国东部,20 世纪 20 年代步入规模,主要产于阿拉巴契亚盆地富含有机质的泥盆系页岩中。美国能源部东部天然气页岩研究项目始于 1976 年,作为地质、地球化学系和石油工程的一系列研究项目重点在于研究增产措施。20 世纪 70 年代以来,由于对天然气需求的快速增加和勘探技术的进步,页岩气开采在美国迅速发展起来。70 年代中期美国页岩气步入规模化发展阶段,70 年代末期页岩气年产量约为 19.6 亿立方米<sup>[1]</sup>。目前,美国已在多个盆地发现了页岩气,并对其进行了开采(见图 1)。2004 年的产量已近 200 亿立方米,2007 年达到 500 亿立方米的水平。页岩气占美国天然气产量的比例也不断提高,1998 年占 1.6 %,2003 年和 2004 年分别占 3.0 % 和 4.5 %,2007 年占 8 %<sup>[2]</sup>。2009 年美国页岩气生产井近 98 590 口,页岩气年产量接近 1 000 亿立方米。预计 2010 年,美国开采页岩气将占其天然气开采总量的 13 %。

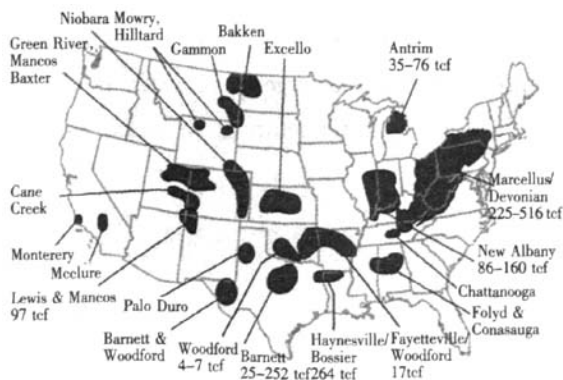


图 1 美国页岩气盆地分布图

## 2 美国页岩气压裂增产技术

页岩气储层具有渗透率极低的特点,所以开发过程中必须采用适当的增产技术,才能实现商业开发。大多数产页岩气岩具有分布范围广、层厚、普遍含气等特点,从而使得页岩气井能够长期的以稳定的速率产气。开采页岩气层需要采取增产措施和特殊的钻井和完井方法,目前多采用水平井或斜井开采,斜井钻进是开发透镜状气藏可选择的最佳方法,而水平井将成为开发边缘海相和海相席状砂岩的最佳方法<sup>[3]</sup>。页岩气开采技术主要包括水平井分段压裂技术、重复压裂技术、同步压裂技术和清水压裂技术等,这些先进的技术不断提高着页岩气井的产量。正是这些先进技术的应用,促使了美国页岩气开发的快速发展。

### 2.1 水平井分段压裂技术

水平钻井和分段压裂相结合的技术被广泛应用于页岩气开采。水平井可以增加井筒与油层的接触面积,从而提高油气的产量和最终采收率,从水平井中获得的最最终采收率是直井的 3 倍,而费用只相当于直井的 2 倍,因此被越来越多的作业者应用。但是由于页岩气储层渗透率低气流阻力比传统天然气大得多,还要对水平井进行压裂增产,提高水平井产能(见图 2)。

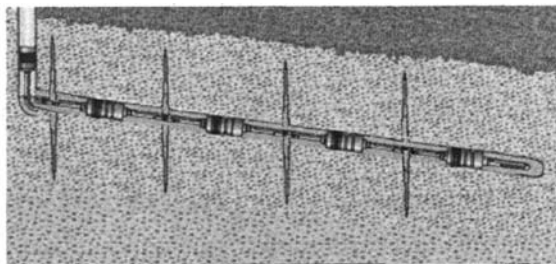


图 2 水平井分段压裂示意图

分段压裂利用封隔器或其它材料段塞,在水平井筒内一次压裂一个井段,逐段压裂,压开多条裂缝。通常情况下分为三个阶段,第一阶段,将前置液泵入储层。前置液是一种没有支撑剂的压裂液;第二阶段,将含有一定浓度支撑剂的压裂液泵入储层;第三阶段,使用含有更高浓度支撑剂的压裂液。随后,数量不定的压裂液泵入储层,且相继处理措施要比之前支撑剂浓度高<sup>[4]</sup>。该技术即可用于单一储层区域,也可用于储层中几个不相连区域。其常被应用于垂直堆叠的致密气地层的增产。作业者可以使用桥塞、连续油管、封隔器以及整体隔离系统,从而达到短生产时间和低成本的要求。

### 2.2 重复压裂技术

所谓重复压裂是指同层第二次的或更多次的压

裂,即第一次对某层段进行压裂后,对该层段再进行压裂,甚至更多次的压裂。要使重复压裂处理获得成功,必须在压裂后,能够产生更长或导流能力更好的支撑剂裂缝,或者使作业井能够比重复压裂前更好的连通净产层。实现这些目标需要掌握更多关于储层和生产井状况资料,以便了解重复增产处理获得成功的原因,并以此为基础改进以后的处理。评估重复压裂前、后的平均储层压力、渗透率厚度乘积和有效裂缝长度与导流能力,能够使工程师们确定重新压裂前生产井产能不好的原因,以及重复压裂成功或失败的因素<sup>[9]</sup>。

决定页岩气重复压裂成功与否的一个重要因素是裂缝转向。在 Barnett 页岩气重复压裂历史中,通过对远、近地应力场研究表明,重复压裂裂缝刚开始沿着原先的裂缝方向延伸,延伸很短的一段距离后裂缝开始转向。由于 Barnett 页岩地层的非均质程度小,裂缝转向并形成新缝网是可行的,但并不是每次重复压裂都能使裂缝转向,可以通过微地震裂缝监测对裂缝转向和新缝网进一步认识。微地震裂缝监测技术的主要依据是,在水力压裂过程中,裂缝周围的薄弱层面(如天然裂缝、横推断层、层理面)的稳定性受到影响,发生剪切滑动,产生了类似于断层发生的“微地震”或“微天然地震”。微地震辐射出弹性波的频率相当高,一般处在声波的频率范围内。这些弹性波信号可以用精密的传感器在邻井探测,并通过数据处理分析出有关震源的信息<sup>[9]</sup>。

### 2.3 同步压裂技术

在 Barnett 页岩压裂技术中,同步压裂技术越来越多的被作业者采用。2006 年,同步平行压裂技术开始在 Barnett 页岩气井完井中实施。在此技术中,2 口或者更多的邻近平行井同时压裂,目的是使页岩受到更大的压力作用,从而通过增加水力裂隙网的密度,产生一个复杂的裂缝三维网络,同时也增加了压裂工作的表面积。当压裂液注入两井之间的空间时,每个井的排油面积增加,这是在单井压裂时不可能出现的。同步压裂费用较高,并且需要更多的协调工作以及后勤保障,作业场所也更大<sup>[7]</sup>。同时,它的收效大,因为压裂设备会更高效的应用,2 口井会在一周内完井而不是两周,采用该技术的页岩气井短期内增产效果非常明显。

### 2.4 清水压裂技术

清水压裂是指应用在清水中加入降阻剂、活性剂、防膨剂等或线性胶作为工作液进行的压裂作业。具有成本低、伤害低以及能够深度解堵等优点。因为清水压裂在 East Texas 的 Cotton Valley Sand, 自从 1997 年不断的成功应用, Mitchell Energy 和其他的作业公司开始在

别的致密天然气储层例如 Barnett 页岩进行实验。许多早期方法在注入高浓度压裂支撑剂时遇到困难,因此限制支撑剂浓度平均为 0.05~0.5 磅/加仑。一口直井的排量大约是每英尺 2 000~2 400 加仑。一个重要的关于清水压裂的观测结果是抽吸的流体体积正相关于初始采收率和对应的储量<sup>[9]</sup>。由于岩石中的天然裂缝具有一定表面粗糙度,闭合后仍能保持一定的缝隙,形成对低渗透层来说已经足够的导流能力。清水压裂很少需要清理,基本上不存在残渣伤害问题,且可提供更长的裂缝,并将压裂支撑剂运到远至裂缝网络,与其 20 世纪 90 年代的凝胶压裂技术相比,可节约 50%~60% 的成本。该技术已成为开发如 Barnett 页岩气等的主要开采手段。

## 3 结论

美国的页岩气勘探开发取得巨大成功,压裂增产技术是开发成功的关键。美国针对页岩气储层的特点采用了水平井分段压裂技术,重复压裂技术,同步压裂技术和清水压裂技术等。

美国的页岩气开采有巨大的前景,各种新技术的应用必将使美国的页岩气产量攀升到更高水平。

### 参考文献:

- [1] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,董大志,程克明.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [2] 张抗,谭云冬.世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景[J].当代石油石化,2009,17(3):9-12.
- [3] 江怀友,宋新民,安晓璇,齐仁理,乔卫杰,董利娟.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.
- [4] S. Zahid, A. A. Bhatti, H. A. Khan, and T. Ahmad. Development of Unconventional Gas Resources: Stimulation Perspective (SPE107053) [C]//Production and Operations Symposium, 31 March-3 April 2007, Oklahoma City, Oklahoma, US.
- [5] George Dozier, Jack Elbel, Eugene Fielder, et al. 重复压裂方法 [EB/OL]. <http://www.slb-sis.com.cn/toc/2003/Autumn/Refracturing%20Works.pdf>.
- [6] 王治中,邓金根,赵振峰,慕立俊,刘建安,田红.井下微地震裂缝监测设计及压裂效果评价[J].大庆石油地质与开发,2006,25(6):76-78.
- [7] P N Mutalik, and Bob Gibson. Case History of Sequential and Simultaneous Fracturing of the Barnett Shale in Parker County (SPE116124) [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008, Denver, Colorado, USA.
- [8] H. Lee Matthews, Gary Schein, Mark Malone. Stimulation of Gas Shales: They're All Same-Right? (SPE106070) [C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 29-31 January 2007, College Station, Texas USA.

作者: 崔青  
作者单位: 中国石油大学石油工程学院, 山东东营, 257061  
刊名: 石油化工应用  
英文刊名: PETROCHEMICAL INDUSTRY APPLICATION  
年, 卷(期): 2010, 29(10)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(8条)

1. 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 董大忠, 程克明. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-6.
2. 张抗, 谭云冬. 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景[J]. 当代石油石化, 2009, 17(3): 9-12.
3. 江怀友, 宋新民, 安晓骥, 齐仁理, 乔卫杰, 董利娟. 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.
4. S. Zahid, A. A. Bhatti, H. A. Khan, and T. Ahmad. Development of Unconventional Gas Resources: Stimulation Perspective (SPE107053) [C]//Production and Operations Symposium, 31 March-3 April 2007, Oklahoma City, Oklahoma, US.
5. George Dozier, Jack Elbel, Eugene Fielder, et al. 重复压裂方法[EB/OL]. <http://www.slb-sis.com.cn/toc/2003/Autumn/Refracturing%20Works.pdf>.
6. 王治中, 邓金根, 赵振峰, 幕立俊, 刘建安, 田红. 井下微地震裂缝监测设计及压裂效果评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 76-78.
7. P. N. Mutalik, and Bob Gibson. Case History of Sequential and Simultaneous Fracturing of the Barnett Shale in Parker County (SPE116124) [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008, Denver, Colorado, USA.
8. H. Lee Matthews, Gary Schein, Mark Malone. Stimulation of Gas Shales: They're All Same-Right? (SPE106070) [C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 29-31 January 2007, College Station, Texas USA.

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 潘继平. Pan Jiping 页岩气开发现状及发展前景——关于促进我国页岩气资源开发的思考 - 国际石油经济 2009, 17(11)  
全球页岩气资源量为456.2万亿立方米, 约占全球非常规天然气资源量的50%。页岩气开发是一个新兴的能源产业, 目前主要集中在美国、加拿大以及欧洲的一些国家。2008年, 美国页岩气产量为507亿立方米, 占全美天然气总产量的9%左右。中国具有良好的页岩气形成和富集的地质条件, 但页岩气开发还处于前期的探索和准备阶段, 商业化开发尚未起步。为此, 建议我国开展全国页岩气资源战略调查与评价; 研究制定全国页岩气发展规划, 引导页岩气开发; 创新油气资源管理体制, 完善区块矿权设置制度; 实行引进与自主创新相结合, 加强关键技术研发; 制定优惠税费政策, 激励页岩气开发; 积极开展对外合作, 建立页岩气开发先导试验区。
2. 期刊论文 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 程克明, 董大忠. HUANG Yu-zhen, HUANG Jin-liang, GE Chun-mei, CHENG Ke-ming, DONG Da-zhong 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键 - 天然气工业 2009(5)  
近年来, 美国页岩气的勘探开发步入大规模快速发展阶段。除了得益于天然气市场需求的增长、国家政策扶持等因素外, 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键因素, 其中钻井、完井与增产技术的进步, 尤其是水平井钻井、水力多段压裂、重复压裂、同步压裂以及裂缝综合监测等技术的突破与广泛运用起着极为重要的作用。美国页岩气勘探开发的巨大成功表明, 只要突破传统的勘探思想, 坚持不懈地开展技术创新, 仍然能够使分布广泛的页岩气资源逐步转化为经济和技术可采储量。
3. 期刊论文 杨玉峰. Yang Yufeng 美国页岩气发展对全球天然气市场的影响 - 国际石油经济 2009, 17(12)  
在页岩气勘探开发技术取得突破后, 美国页岩气产量迅速增加。这不仅给美国天然气市场带来一场变革, 而且对其进口来源国——加拿大的天然气生产影响显著, 并改变了北美及全球天然气和LNG市场的供求关系。亚太地区的天然气和LNG市场将获得更多资源保障。我国应抓住这一机遇, 加强与美国、加拿大、俄罗斯等国的国际合作, 加快国内页岩气资源的开发, 同时适时调整国内天然气利用政策, 加快我国天然气工业的发展。
4. 期刊论文 张抗, 谭云冬. Zhang Kang, Tan Yundong 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景 - 当代

## 石油石化2009, 17(3)

介绍了页岩气的特点及全球资源潜力, 分析了美国沃思堡盆地页岩气开发实例及其启示, 简述了中国页岩气研究动向, 指出我国应加大政策扶持力度促进页岩气快速发展.

5. 期刊论文 [李世臻, 乔德武, 冯志刚, 刘丽君, 王倩, 聂海宽, LI Shi-zhen, QIAO De-wu, FENG Zhi-gang, LIU Li-jun,](#)

[WANG Qian, NIE Hai-kuan](#) 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示 -地质通报2010, 29(6)

页岩气是一种潜在资源量巨大的非常规天然气资源, 具有开采技术要求高、开采寿命长、稳产周期长的特点. 近些年来, 严峻的能源紧张形势和能源价格的快速增长, 使页岩气资源在全世界受到了广泛的重视. 回顾了美国页岩气勘探开发的历史, 总结了美国的页岩气发育情况, 跟踪了世界其他地区(加拿大、欧洲)包括中国页岩气研究的最新进展情况. 根据前人的资料, 认为中国南海相页岩和北方盆地的湖相页岩具有巨大的页岩气资源潜力. 鉴于页岩气是一种非常规能源, 对其研究具有重大的现实意义, 建议中国相关部门加大研究投入力度, 尽快开展页岩气资源战略调查和选区研究工作, 加强技术攻关创新、引进和国际合作, 探讨中国现实国情下的页岩气相关政策, 以早日实现页岩气在中国的商业性开发, 促进经济快速发展.

6. 期刊论文 [蒲泊伶, 包书景, 王毅, 蒋有录](#) 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例 -石油地质与工程

2008, 22(3)

页岩气藏不同于常规气藏, 页岩既是源岩也是储层, 烃类气体主要以吸附状态赋存在干酪根和粘土颗粒的表面. 气体可以是热成因、生物成因或混合成因. 页岩含气量主要与有机质丰度、类型及演化程度有关. 页岩的孔隙度与渗透率极低, 需要裂缝来提高孔渗性能. 一般情况下, 页岩气藏需要人工压裂才能进行工业生产. 大多数产气页岩具有分布范围广、层厚、普遍含气等特点, 这使得页岩气并能够长期地以稳定的速率产气.

7. 期刊论文 [钱伯章, 朱建芳, QIAN Bo-zhang, ZHU Jian-fang](#) 页岩气开发的现状与前景 -天然气技术2010, 04(2)

美国在页岩气开发技术方面走在世界前列, 已探索出水井加多段压裂技术、清水压裂技术和同步压裂技术等先进的开采技术. 到2030年, 美国以页岩气为代表的非常规气产量将超过3681×108m<sup>3</sup>, 占其天然气总产量的一半以上. 中国主要盆地和地区的页岩气资源量约为(15~30)×1012m<sup>3</sup>, 与美国主要盆地和地区28.3×1012m<sup>3</sup>的资源量大致相当, 经济价值巨大. 我国页岩气资源勘探刚起步, 经验匮乏, 制约着我国页岩气产业的发展, 应加快技术研发和与国外的合作以及引进技术的步伐.

8. 期刊论文 [龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 聂海宽, 唐颖, 张琴, 刘珠江, LONG Peng-yu, ZHANG Jin-chuan, LI Yu-xi, NIE](#)

[Hai-kuan, TANG Ying, ZHANG Qin, LIU Zhu-jiang](#) 重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力 -天然气工业

2009, 29(12)

四川盆地经历了从震旦纪到中三叠世的克拉通和晚三叠世到新生代的前陆盆地2个构造演化过程, 在克拉通盆地演化阶段主要发育一套巨厚的海相沉积. 晚震旦世和中奥陶世开始的2次大规模海侵作用, 在深水环境中沉积了寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组2套黑色页岩. 由于该盆地演化过程中复杂的构造变动, 重庆及其周缘地区的区域构造主要以大幅抬升及强烈挤压为特点, 下古生界埋藏浅、变形严重、破坏强烈, 现今构造形态表现为高陡状褶皱, 形成了与美国东部典型页岩气盆地相似的构造演化特点和地质条件. 研究表明, 该区具有页岩气富集的有利地质条件, 是页岩气勘探研究值得关注的重要领域. 采用体积法对该区下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气资源量做了初步估算. 结果表明: 重庆及其周缘地区筇竹寺组页岩气资源量约为7.5×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, 五峰组-龙马溪组页岩气资源量约为11.5×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, 显示出该区巨大的页岩气资源勘探潜力.

9. 期刊论文 [李登华, 李建忠, 王社教, 李新景, LI Deng-hua, LI Jian-zhong, WANG She-jiao, LI Xin-jing](#) 页岩气藏形成条件分析 -天然气工业2009(5)

美国页岩气生产时间长、资料丰富, 剖析该国典型的页岩气藏有利于清晰认识页岩气成藏的主控因素. 按天然气成因将页岩气藏分为热成因型、生物成因型和混合成因型, 分析了美国具有代表性的典型气藏. 研究表明, 热成因型页岩气藏主要受页岩热成熟度控制, 生物成因型页岩气藏的主控因素为地层水盐度和裂缝. 根据美国页岩气生产实践, 总结出有利的热成因型页岩气藏的储层特征为: TOC≥2%, 厚度大于等于15 m, R<sub>1</sub>介于1.1%~3%, 石英含量大于等于28%. 在此基础上, 优选出四川盆地南部寒武统筇竹寺组和下志留统龙马溪组2套海相页岩作为有利勘探目标, 并预测湖相页岩也能形成具有商业价值的页岩气藏.

10. 会议论文 [程克明, 熊英, 李新景](#) 一个值得关注的油气勘探新领域——中国页岩气资源潜力巨大 2007

本文对中国页岩气资源潜力进行了分析. 所谓页岩气系指生成、储集、圈闭和封盖四种作用均发生于页岩系统中的天然气. 目前, 美国已在密歇根盆地泥盆系Antrim页岩、阿帕拉契亚盆地泥盆系Ohio页岩、伊里诺依盆地泥盆系New Albany页岩、沃思堡盆地密西西比系Barnett页岩和圣胡安盆地白垩系Levis等五大页岩系统获地质资源量14.07~22.16万亿m<sup>3</sup>; 技术可采储量0.88~2.15万亿m<sup>3</sup>; 现今年产量已近200亿m<sup>3</sup>. 2007年, 美国西南能源公司和Devon能源公司又在美国中陆地区阿科马盆地阿肯色州一侧密西西比系的Fayetteville页岩中发现十分丰富的页岩气, 目前正在大规模勘探, 有望成为美国中陆地区继年产近百亿m<sup>3</sup>的沃思堡盆地密西西比系Barnett页岩气之后的又一勘探开发热点. 加拿大阿尔伯塔省就发现页岩气地质资源量7.08万亿m<sup>3</sup> (B. Faraj, et al, 2004), 占该省天然气总资源量的34%.

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_syhgyy201010001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_syhgyy201010001.aspx)

授权使用: 河南石油勘探局(wfhnyt11), 授权号: aad9cb8e-150c-4618-ac37-9e71007465b7

下载时间: 2011年1月20日