

文章编号: 1000-3754 (2008) 06-0010-05

世界页岩气资源勘探开发现状与展望

江怀友¹, 宋新民², 安晓璇³, 齐仁理⁴, 孔 强³, 彭仕宓⁵

(1. 中国石油 经济技术研究院, 北京 100011; 2. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083;
4. 大庆石油学院 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163001; 5. 中国石油大学, 北京 102249)

摘要: 当前国际能源供需矛盾突出, 能源安全日益成为各国关注的焦点, 页岩气资源勘探开发备受世界瞩目。页岩气主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中, 是以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集, 页岩气储层孔隙度一般为 4% ~ 5%, 渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 世界页岩气储量为 $456.24 \times 10^{12} \text{m}^3$, 主要分布在北美、中亚、中国、拉美、中东、北非和前苏联。页岩气勘探方法有地质法、地球物理法、地球化学勘探法、钻井法, 页岩气开发技术主要是水平井、压裂技术。世界页岩气勘探开发方兴未艾。

关键词: 页岩气资源; 页岩气勘探; 页岩气开发

中图分类号: TE121

文献标识码: A

Current state and outlook of exploration and development of the shale gas resources in the world

JIANG Huai-you¹, SONG Xin-min², AN Xiao-xuan³, QI Ren-li⁴, KONG Qiang³, PENG Shi-mi⁵

(1. *Research Institute of Economy and Techniques of PetroChina, Beijing 100011, China*; 2. *Research Institute of Exploration and Development of PetroChina, Beijing 100083, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 4. *College of Geosciences of Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China*;
5. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: At present, the contradiction of international energy supply and need is obvious, energy security is become more and more focus point for all the countries. So the exploration and development of shale gas are emphasized to a great deal. Shale gas is such kind of natural gas that's mainly located in the dark mud shale or high-carbon mud shale and exists in the principal ways of absorption or free states. The porosity of shale reservoir is generally 4%—5%, permeability less than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The world reserves of shale gas is $456.24 \times 10^{12} \text{m}^3$, they are mainly distributed in North America, Middle Asia, China, Latin America, Middle East, North Africa and Former Soviet Union. The exploration methods of shale gas are geological, geophysical, geochemical and drilling methods. Horizontal well and fracturing are the main techniques for shale gas development at present. The exploration and development of shale gas in the world are flourishing.

Key words: shale gas resources; shale gas exploration; shale gas development

能源安全影响到国家经济的发展和社 会稳定, 世界各国通过各种渠道解决自身的能源问题, 其中最重要的就是寻找替代能源。非常规油气资源已经在全球能源结构中扮演着重要角色, 非常规天然气资源包括煤层气、致密砂岩气(即低渗透率砂岩气藏)、页岩气、水溶气等。美国非常规天然气产量已占本国产量的近一半, 全球非常规油产量超过 $7\,500 \times 10^4 \text{t}$, 非常规天

然气产量超过 $1\,800 \times 10^8 \text{m}^3$ 。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, 是天然气生成之后在烃源岩层内就近聚集的结果, 表现为典型的“原地”成藏模式。页岩气是目前经济技术条件下天然气工业化勘探的重要领域和目标^[1-2]。页岩气藏在 20 世纪 70 年代中期之前被归入非经济可采资源, 随着天然气开发技

基金项目: 中国石油重大科技专项(2008D-5004)资助。

收稿日期: 2008-06-19

作者简介: 江怀友(1965-), 男, 高级工程师, 中国地质大学(北京)兼职教授, 从事世界油气资源勘探开发技术研究。

术的提高及对天然气的依赖逐渐变为经济可采资源。页岩气因其资源潜力巨大和经济效益显著被各国政府及能源公司重视。美国目前已对密西根、印第安纳等 5 个盆地的页岩气进行了商业性开采,2005 年页岩气产量达到 $198 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为重要的天然气资源之一。

1 页岩气资源的勘探开发历程

1976 年,美国能源部及能源研究、开发署(ER-DA)联合国家地质调查所、州级地质调查所、大学以及工业团体,实施了针对页岩气研究与开发的东部页岩气工程(EGSP,主要包括阿巴拉契亚、密执安和伊利诺斯盆地),目的是加强对页岩气的地质、地球化学、开发工程等方面研究,导致页岩气产量的大幅度增加和一批科研成果的产出。

1980 年,天然气研究所(GRI)开始对东部页岩气进行系统研究,目的是摸清页岩气的分布规律并进行资源潜力评价,新的发现不断产生,页岩气产量、储量提高。页岩气勘探和研究迅速向其他盆地扩展,其研究全面展开。

美国的页岩气年产量在 1979—1999 年间净增 7 倍,最重要的发展是认识到页岩气的吸附作用机理,使其产、储量大幅度提高。美国是天然气地质勘探程度和开发技术水平相对较高的国家,页岩气是其中已投入工业性勘探开发的四大非常规天然气类型之一。非常规产量所占比例为:致密砂岩气占 23%、煤层气占 7%、页岩气占 4%、水溶气少量、常规气占 66%^[34]。

2 世界页岩气资源现状

2.1 页岩气储量

从世界范围看,泥、页岩约占全部沉积岩的 60%,页岩气资源前景巨大。全球页岩气资源量为 $456.24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在北美、中亚、中国、拉美、中东、北非、前苏联等(表 1)^[5-7]。

表 1 世界主要地区页岩气储量

Table 1 Reserves of shale gas in the main region of the world	
地 区	页岩气/ 10^{12} m^3
北 美	108.79
拉丁美洲	59.95
西 欧	14.44
中欧和东欧	1.1
前苏联	17.75
中东和北非	72.15
非洲沙哈拉地区	7.76
中亚和中国	99.9
太平洋(经济合作和发展组织)	65.5
亚太其他地区	8.89
南 亚	0
世 界	456.24

中国南方志留系发育黑色页岩,有机碳含量多达 10%~15%,演化程度高,可形成的页岩气资源潜力大。四川盆地为古生代海相沉积背景下形成的富含有机碳页岩,与美国东部地区页岩气发育盆地相似,其威远、泸州地区的页岩气资源潜力为 $6.8 \times 10^{12} \sim 8.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于四川盆地的常规天然气资源总量。中国松辽盆地的白垩系、江汉盆地的第三系以及渤海湾、南华北、柴达木酒泉盆地均具有页岩气资源。

2.2 页岩气产量

页岩气产量与储层性质有关,影响储层性质的因素有储层内流体的流动(大的孔喉有利于油气的流动)、好的水动力系统及良好的开采技术。目前,美国有页岩气井 4 259 口。美国近年页岩气年产量已跃升至 $168 \times 10^8 \sim 204 \times 10^8 \text{ m}^3$,预测 2010 年美国的页岩气产量将占天然气总产量的 13%。

3 页岩气资源勘探技术与方法

3.1 页岩气地质理论

页岩气藏因其自身的有效基质孔隙度很低,主要由大范围发育的区域性裂缝或热裂解生气阶段异常高压在沿应力集中面、岩性接触过渡面、脆性薄弱面产生的裂缝提供成藏所需的储集孔隙度和渗透率,孔隙度最高仅为 4%~5%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

页岩在地层组成上多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层。在页岩中,天然气的赋存状态多种多样,除极少量的溶解状态天然气以外,大部分以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面,或以游离状态赋存于孔隙、裂缝中。吸附状态天然气的赋存与有机质含量关系密切,其中吸附状态天然气的含量为 20%~85%。页岩气介于煤层吸附气(吸附气含量超过 85%)和常规圈闭气(吸附气含量通常忽略为零)之间,其成藏体现出非常复杂的多机理递变特点,表现为成藏过程中的无运移或极短距离的有限运移,因此页岩气藏具有典型煤层气、典型常规圈闭气成藏的多重机理(表 2)。

页岩气藏的形成是天然气在烃源岩中大规模滞留的结果,是“自生自储”式气藏,运移距离极短,现今保存状态基本上可以反映烃类运移时的状态,即天然气主要以游离相、吸附相和溶解相存在。在生物化学生气阶段,天然气首先吸附在有机质和岩石颗粒表面,饱和后则富余的天然气以游离相或溶解相进行运移,当达到热裂解生气阶段,由于压力升高,若页岩内部产生裂缝,则天然气以游离相为主向其中运移聚集,受周围致密页岩烃源岩层遮挡、圈闭,易形成工业性页岩气藏。由于扩散作用对气态烃的运移起到相当大的作用,天然气继续大量生成,将因生烃膨胀

表 2 页岩气与煤层气天然气对比
Table 2 Comparison between shale gas and coal-bed methane and natural gas

	页岩气	煤层气	天然气
成因类型	有机质热演化成因,生物成因	有机质热演化成因,生物成因	有机质热演化成因,生物成因,原油裂解成因
主要成分	甲烷为主,少量乙烷,丙烷等	甲烷为主	甲烷为主,乙烷、丙烷等含量变化较大
成藏特点	自生、自储、自保	自生、自储、自保	生、储、盖合理组合
分布特点	受页岩分布控制,有广布性	受煤层分布控制,有广布性	受生、储、盖组合控制
储集方式	吸附气和游离气并存,吸附气占 20%~80%	吸附气为主,占 80% 以上	游离气为主
埋藏深度	200 m 及以深,最浅 8.2 m	一般大于 300 m	一般大于 500 m
资源潜力	不清	$37 \times 10^{12} \text{ m}^3$	$44 \times 10^{12} \text{ m}^3$
开采特点	排气降压解析开采	排水降压解析开采	自然压力开采

作用使富余的天然气向外扩散运移,此时无论是页岩地层本身还是薄互层分布的砂岩储层,均表现为普遍的饱含气性。

表 3 页岩气成藏模式(据葛岩,2007)

Table 3 Reservoir-forming model of shale gas (According to Ge Yan, 2007)

国 家	盆 地	地 层	页 岩	TOC/%	吸附气/%	R_o /%	天然气类型
美 国	Fort Worth	密西西比系	Barnett 组	1~12	40~60	0.6~1.6	热解气
美 国	Appalachian	泥盆系	Ohio 组	1~4.5	50	0.4~1.3	热解气
美 国	Michigan	泥盆系	Antrim 组	1~20	70~75	0.4~0.6	热解气
美 国	Illinois	泥盆系	New Albany 组	1~25	40~60	0.4~1.0	热解气
美 国	San Juan	白垩系	Lewis 组	1~2.5	50~85	1.6~1.9	热解气、生物气
加拿大	加拿大西部盆地(WCSB)	白垩系	White Speckled 组	1~11.9		未成熟至过成熟	热解气
中 国	四川盆地	志留系	龙马溪组	0.5~4		2.0~4.5	热解气、干气

页岩气是充填于页岩裂隙、微细孔隙及层面内的天然气,其储层渗透率低,气流阻力比传统天然气大得多,难以开采。开采页岩气层需要采取某种增产措施和特殊的钻井、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。

岩石内必须具备足够的通道使天然气流入井筒而产至地面。在页岩中,气源岩中裂缝引起的渗透性在一定程度上可以补偿基质的低渗透率。因此,将页岩作为开采目标的作业者应事先考虑系统渗透率,即包含页岩基质和天然裂缝的综合渗透率。为了更好地利用储层中的天然裂缝,并且使井筒穿越更多储层,越来越多的作业者都在应用水平钻井技术。该技术在石油工业中并不是一项新技术,但它对扩大页岩气成功

在陆相盆地中,湖沼相和三角洲相沉积产物一般是页岩气成藏的最好条件,但通常位于或接近盆地的沉降—沉积中心,导致页岩气的有利分布区集中于盆地中心处。从天然气的生成角度分析,生物气的产生需要厌氧环境,而热成因气的产生也需要较高的温度条件,因此靠近盆地中心方向是页岩气成藏的有利区域^[8]。表 3 为页岩气成藏模式。

3.2 页岩气的勘探方法

页岩气勘探方法有地质法、地球物理法、地球化学勘探法、钻井法,采用多学科综合勘探是页岩气勘探发展方向。

3.3 页岩气开发技术

页岩气藏的特性决定了页岩气只有在特定条件下才能被开采出来。美国地质调查局(USGS)认为,页岩气产自连续的气藏,USGS 列举的 16 个特征说明这些特征都有可能在连续气藏中出现。与含气页岩有关的特征包括缺少明显的盖层和圈闭、无清晰的气水界面、天然裂缝发育、最终采收率低于常规气藏以及极低的基岩渗透率。此外,其经济产量在很大程度上依赖于完井技术^[9-11]。

开发却有着重大的意义,从水平井中获得的最终采收率是直井的 3 倍,而费用只相当于直井的 2 倍。

采用三维地震解释技术设计水平井轨迹。作业者将页岩钻井扩展到那些被一直误认为没有产能、含水且位于页岩下方的喀斯特白云岩区域。通常,作业者通过沿垂直于最大水平应力方向钻井的方法增加井筒与裂缝相交的可能性,从而打开更多的页岩表面进行开采。但是,常规的定向钻井技术可能受到扭矩和阻力的影响,扭矩和阻力通常是司钻在井筒造斜过程中由滑动和旋转造成的。在更复杂的井眼轨迹中,扭矩和阻力可能限制横向位移,加大测井难度。因此在开采较直且曲折度不大的井时,可以采用旋转导向系统。某些情况下,从水平段底部到顶部的倾角变化低于 0.5°。

随钻成像测井系统被用于解决水平井测井存在的问题。应用该系统后,可以在整个井筒长度范围内产生电阻率成像和井筒地层倾角分析。成像测井提供构造信息、地层信息和力学特性信息,用于优化完井作业。成像能够将地层天然裂缝和钻井诱发裂缝进行比较,帮助作业者确定射孔和油井增产的最佳目标。利用这些测井得到的成像资料识别地震资料无法识别的断层以及与之相关的从下伏喀斯特白云岩中产水的天然裂缝群。在进行加密钻井时,井眼成像有助于识别邻井中的水力裂缝,从而帮助作业者将注意力集中在储层中先前未被压裂部分的增产措施上。井中是否有钻井诱发裂缝的存在及钻井诱发裂缝的方向对确定整个水平井的应力变化及力学特性非常有用,在减轻页岩完井难度及降低相关费用方面起作用。

裂缝的发育程度是页岩气运移聚集、经济开采的控制因素之一,仅有少数天然裂缝十分发育的页岩气井可直接投入生产,其余 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,提高井筒附近储层导流能力。Fort Worth 盆地 Barnett 组页岩埋藏较深,地层压力较高,其开发历程印证了钻采技术(N_2 压裂、泡沫压裂、凝胶压裂、清水压裂、水平井钻探技术)的不断更新。

页岩储层改造技术要求针对页岩储层特点优选压裂层位和施工工艺。对于埋藏较浅、地层压力较低的储层,通常采用 N_2 泡沫压裂。清水压裂的压裂液中通常已加入适量抑制剂,但仍要求储层中膨胀性蒙脱石含量不能很高,原因是其水敏性强,遇水易膨胀、分散和运移,导致岩石渗透率下降,所以利用 X-衍射和 SEM 测试结果分析黏土矿物的类型和含量十分必要。

4 页岩气勘探开发盆地及参与的石油公司

在美国 Molopo 公司拥有 50% 相当于 $2.31 \times 10^7 m^2$ 土地的页岩气开采权,在 Mason 盆地 Gassy Acreage 已经拥有 37 口页岩气井。

2007 年 8 月, TXCO 资源公司和 St Mary 勘探公司签署协议,加入到开发 Pearsall 和 Eagle Ford 白垩系的页岩气藏行列中。该区块总面积为 $1.41 \times 10^9 m^2$, 位于得克萨斯州西南部的 Maverick 盆地,目前该区的开发权属于 Anadarko 石油公司。TXCO 资源公司和 St Mary 勘探公司将有权在 Anadarko 石油公司管辖区内进行开发,每年可以在 Pearsall 和 Eagle Ford 白垩系的页岩气藏钻 4 口水平井,任意选择井位,同时可以赚取 50% 的利润,开发权截止 2013 年。

2007 年 8 月, Crew Energy 公司计划获得大不列

颠哥伦比亚东北部三叠系 Montney 层 104 段的开采权,以 0.24 美元/ m^2 的价格购买。一旦完成购买, Crew 公司将拥有 $1.23 \times 10^9 m^2$ 的开发土地权,其中 45% 的土地位于大不列颠哥伦比亚东北部。Crew 公司计划对 Montney 层进行资源再评价,预计厚度达到 292.6 m,并计划于 2008 年打水平井钻穿 Montney 页岩气区块进行测试。

2007 年,加拿大卡尔加里市的 Trident Exploration 公司在加拿大西部地区的净产量达到 $2.744 \times 10^6 m^3/d$ 。与 2006 年相比总产量提高 37%。Trident 勘探公司有 51% 的产量为 Mannville 层的页岩气,其中 44% 的煤层气产于 Horseshoe Canyon 地层,只有 5% 的产量为常规储层。Trident 勘探公司在 2007 年钻了 157 口水平井和 175 口直井,该公司在 Albert 和 British Columbia 拥有 $3.12 \times 10^9 m^2$ 的开采土地,美国超过 $2.18 \times 10^9 m^2$ 的开采面积。在大不列颠哥伦比亚东北部的 Montney 层勘探页岩气。

Houston independent Apache 公司于 2008 年冬天在大不列颠哥伦比亚的页岩区块 Ootla 钻了 3 口水平井,对 Muskwa 页岩气藏进行了开采。这 3 口井的测试结果分别为 $2.49 \times 10^5 m^3/d$ 、 $1.73 \times 10^5 m^3/d$ 和 $1.50 \times 10^5 m^3/d$ 。该公司表示, Ootla 页岩气藏有望成为北美最大的页岩气盆地之一。该公司于 2000 年取得了该地区的开采权,在 2005 年冬成功钻了第一口位于 Muskwa 页岩气藏的页岩气井。

Nexen 在大不列颠哥伦比亚省的东北部约 123 000 英亩 ($1 \text{ 英亩} = 4 047 m^2$) 的面积内有潜在的页岩气藏,该地区有望成为加拿大最重要的页岩气区块之一。Nexen 预计,截至 2008 年冬天将在该区完成 2 口垂直井和 3 口水平井,以获取油藏的信息。

5 世界页岩气资源勘探开发展望

随着非常规气体勘探开发技术的发展,非常规气的产量在天然气总产量中所占比重将有所增加,有望从 2000 年的 35% 增加到 2012 年的 54%。

5.1 美国

2007 年,美国天然气产量增长主要是页岩气(增长了 20%),其他产量有所下降。由于页岩气的飞速增长,使得总产量得到了增长。

在 2005 年,北美的 Barrent 盆地页岩气产量为 $1.3 \times 10^8 m^3$,其中水平井的产量大,将近 60% 的产量来自于 EOG、XTD、边缘资源。技术不断提高,“技术实验室”将会推动页岩气的发展。Antrim 盆地页岩气总产量为 $4.07 \times 10^8 m^3$, Appalachisn 盆地产量近 $1.35 \times 10^8 m^3$ 。Arkoma 盆地当年钻页岩气井数较

少,但产量增加了 $5.94 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

美国页岩气的进一步勘探开发方向为北部地区,预计美国维吉尼亚页岩气有望稳步增长。

5.2 加拿大

加拿大在西部沉积盆地 (British Columbia 东部和 Alberta 地区) 上白垩统 Wilrich 组及其同时代地层、侏罗系 Nordegg/Fernie 组、三叠系 Doig/Doig Phosphate/Montney 组、Exshaw/Bakken 组和泥盆系 Ireton/Duverney 组开展页岩气勘探潜力评价,预测该区页岩气资源量约 $24 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。加拿大非常规天然气协会 (CSUG) 认为,西部 (包括 British Columbia 北部 Bowser 盆地) Colorado 页岩段、侏罗系及古生界页岩和东南部的泥盆系页岩具有开发潜力。British Columbia 油气委员会已核准的白垩系和泥盆系页岩气试验区块共计 22 个。西加拿大沉积盆地页岩气产量达到 $1.13 \times 10^8 \sim 1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,有望在 2008 年得到突破。

2008 年 3 月,在北美洲东北部的哥伦比亚北部偏远地区发现了一套泥盆纪的页岩气藏,有望成为北美洲最大的储气盆地。该区带的 Muskwa 页岩分布于卡尔加里东北部的合恩河盆地,面积为 $5.67 \times 10^8 \text{ m}^2$,预计含气资源量为 $1.98 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是约翰逊县 Barnett 页岩的 2.5 倍。Muskwa 页岩和 Barnett 页岩的埋藏深度相当,但厚度更大,渗透率更好,地质构造更简单,而且不含水。

5.3 中国

页岩气在中国具有良好的勘探前景,对页岩气的勘探研究已逐步展开。在四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地、吐哈盆地、江汉盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等均有页岩气成藏的地质条件,局部有机碳含量超过 30%,发现了典型页岩层中局部的天然气富集。其中,暗色页岩发育的地区和层位是需要重点研究的领域和目标。

在吐哈盆地,吐鲁番坳陷水西沟群广泛发育了暗色泥岩和碳质泥页岩,碳质泥岩累积平均厚度超过 30 m,有机碳含量一般为 6%~30%。暗色泥页岩厚度更大,如八道湾组暗色泥页岩厚度一般大于 100 m,盆地中北部达 200 m 以上,西山窑组暗色泥页岩最大厚度超过 600 m,有机质成熟度目前多处于 0.4%~1.5%,非常有利于页岩气藏的形成和发育。此外,中国南方志留系广布区中泥页岩气的勘探前景乐观。

四川盆地志留统烃源岩约 $60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,下古生界海相页岩气平均可采资源量约 $3.0 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。在四川盆地华蓥山以西的下寒武统筇竹寺组和以东的下志留统龙马溪组厚层页岩发育区,其页岩具有干酪根生烃、成岩作用以及构造应力产生

裂缝的条件,是未来页岩气资源的勘探方向。图 1 为中国天然气产量预测图^[12]。

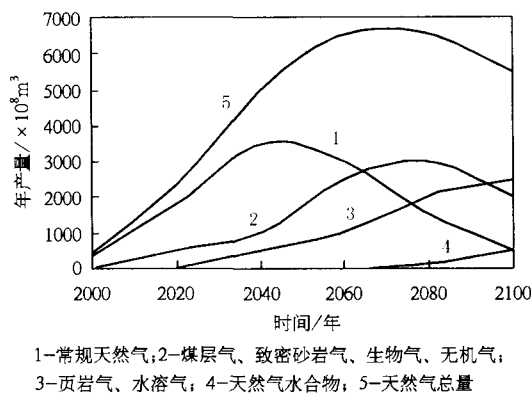


Fig.1 Predicted production of natural gas in China

6 结束语

在世界范围内,泥、页岩约占全部沉积岩的60%,页岩气资源前景巨大。页岩气产量与储层性质有关,开采页岩气层需要采取某种增产措施和特殊的钻井和完井方法,采用水平井或斜井开采。斜井钻进是开发透镜状气藏的最佳方法,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。裂缝的发育程度是页岩气运移聚集、经济开采的主要控制因素之一,通过对世界页岩气资源勘探开发现状研究实现页岩气资源的优化利用,改善勘探开发效果必将为全球页岩气资源的高水平、高效益勘探开发和可持续发展提供理论及实践依据。

参考文献:

- [1] Exxon. Exxon Annual Report 2006 [R]. 2006.
- [2] Mobil. Mobil Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [3] ExxonMobil. ExxonMobil Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [4] Shell. Shell Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [5] BP. BP Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [6] Chevron. Chevron Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [7] ChevronTexaco. ChevronTexaco Annual Report 2007 [R]. 2007.
- [8] 李玉喜. 我国非常规油气资源类型和潜力 [R]. 国土资源部, 2007.
- [9] 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, 8 (4): 392-400.
- [10] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布 [M]. 天然气工业, 2004, 24 (7): 15-18.
- [11] 孙超, 朱筱敏, 陈菁, 等. 页岩气与深盆气成藏的相似与相关 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14 (1): 26-31.
- [12] 范泊江. 中国非常规天然气资源及前景分析 [R]. 中国石油大学, 2007.