

文章编号: 0254 - 5357(2012)06 - 0931 - 08

页岩气实验测试技术现状与研究进展

帅琴, 黄瑞成, 高强, 徐生瑞, 邱海鸥, 汤志勇

(中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:页岩气是一种潜力巨大的非常规资源,已经在北美地区得到成功开发,成为全球油气勘探的一个新领域。目前对页岩气的储量评估和产气能力评价研究主要集中在页岩气藏的岩性成分、成因来源、赋存形式、成藏特征、成藏条件、页岩含气量等方面。而开展这些研究的基础是首先要准确测定页岩有机地球化学、岩石学以及含气量等相关参数,因此页岩实验测试技术是页岩气勘探开发研究的关键技术之一。通过对页岩进行分析检测可以得到总有机碳含量、成熟度、孔隙度、渗透率及含气量等重要参数,这些参数的获得对页岩气成藏研究和勘探开发具有重要意义。因此尽快梳理页岩实验测试技术,建立页岩特征参数常规分析测试方法体系和页岩测试专用实验室显得十分重要。本文在调研国内外文献的基础上,围绕页岩有机地球化学特征、页岩岩石学相关参数和页岩含气量测定,对页岩的有机质丰度、干酪根类型、有机质生油、生气关键指标等地球化学特征分析,页岩矿物组成、孔隙度和渗透率测定等储层表征技术,以及页岩含气量测试技术进行了概述。大量文献资料表明:加强页岩总有机碳含量、干酪根类型、页岩有机质成熟度、页岩孔隙度和渗透率、页岩含气量等参数的研究对页岩气的开发利用具有重要作用。

关键词:页岩气;实验测试技术;进展

中图分类号: P618.12 **文献标识码:** A

Research Development of Analytical Techniques for Shale Gas

SHUAI Qin, HUANG Rui-cheng, GAO Qiang, XU Sheng-ruì, QIU Hai-ou, TANG Zhi-yong
(Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan 430074, China)

Abstract: As an unconventional gas resource with huge exploration potential, shale gas has been successfully exploited in North America and has become a new field of oil and gas exploration. At present, researches on the evaluation of reserves and gas generating capacity for shale gas are focused on lithological composition, origin, occurrence form, reservoir characteristics, reservoir conditions and gas content of the shale gas. All research is based on the accurate measurement of organic geochemistry and petrological parameters and gas contents. Therefore, analytical techniques of shale gas are the key technologies for shale gas exploration and development. Many important parameters, such as the concentration of total organic carbon, maturity, porosity, permeability and gas content etc., can be obtained through the analysis of shale, and play an important role in the study of accumulation and development of shale gas. It is important to establish the routine analysis procedures and special laboratory for the characteristic parameters of shale based on the studying of analysis technologies for shale. Based on literatures, the analytical techniques of shale were reviewed, with particular focus on the geochemical analysis (the concentration of total organic carbon, kerogen type, key indicators of organic matter of oil and gas generation, etc.), shale reservoir characterization (mineral compositions, porosity and permeability of shale) and gas content measurement of shale, which are very important to shale gas exploration and development.

Key words: shale gas; analytical techniques; progress

收稿日期: 2012 - 07 - 13; 接受日期: 2012 - 08 - 08

基金项目: 中国地质大调查项目(1212011120281, 1212011120274, 1212011120324)

作者简介: 帅琴, 教授, 主要从事地质分析及其资源综合利用研究。E-mail: shuaiqin@cug.edu.cn。

随着我国经济的持续快速发展,能源需求大幅增加,我国常规油气的产量已经无法满足当前经济发展的需要,常规油气的对外依存度越来越大。2011年我国原油进口量达 2.54×10^8 t,对外依存度已经达到56.5%,2011年我国天然气进口量达 313.9×10^8 m³,对外依存度达21.56%。根据中国工程院预测,我国的天然气供需缺口在2020年将达到 800×10^8 m³[1]。在我国油气消费需求与日俱增的情况下,为进一步从根本上解决油气资源的可持续发展问题,需要积极寻找新的接替资源。随着北美地区页岩气资源开发技术的突破,以及大规模的商业化开发利用,页岩气在非常规天然气开发领域成为全球油气资源勘探开发的新亮点,是现实的常规油气资源的接替资源之一。

要实现页岩气资源的勘探开发和利用,页岩气的实验测试技术研究非常关键,页岩的总有机碳含量、成熟度、孔隙度、渗透率、含气量等参数直接与页岩气成藏及气藏开发相关,而这些参数均需要通过大量实验测试技术手段去完成和获得。目前国内外对页岩气的研究主要集中在页岩气的成藏条件、成藏机理、储量评估等方面,有关页岩气实验测试技术的专题研究还很薄弱,对页岩气实验测试技术进行综述性的文献甚少。作为一种非常规天然气,目前常规油气资源的实验测试方法并不完全适用于页岩气,本文针对这种现状,对目前页岩气实验测试技术研究进展进行综述,以便为我国页岩气实验测试技术平台的建立和我国页岩气勘探开发利用研究提供一定的参考。

1 页岩气实验测试技术概况

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[2-3]。页岩气可以是生物成因、热裂解成因或混合成因,属于非常规天然气范畴。与常规天然气资源不同,它具有典型的过渡性成藏机理及“自生、自储、自封闭”成藏模式——页岩既是天然气生成的源岩,也是聚集和保存天然气的储层和盖层[4-5]。

勘探开发实践证明,页岩气的形成具有严格的地质地球化学条件[6-29],主要表现在:①有机质剪度高,总有机碳(TOC)含量一般大于2%;②有机质成熟度一般处于生气窗内,镜质组反射率(R_o)一般大于1.3%;③硅质剪剪高,一般大于30%;④吸附气剪剪高;⑤有效页岩的厚度大;⑥埋藏深度适中。这些参数已成为页岩气勘探选区的重要参考条件,综合文献报道的数据将这些结果归纳于表1。

表1 页岩气勘探选区的主要评价指标

Table 1 The main evaluation index for shale gas exploration strategy

参数	标准	参数	标准
TOC含量	>2%	吸附气含量	>20%
镜质组反射率 R_o	>1.3%	厚度	>30 m
硅质含量	>30%	埋藏深度	<3000 m

目前,页岩气的实验测试技术研究主要包括地球化学分析、储层表征以及含气量测定三个方面,相应的分析测试内容列于表2。

表2 页岩气的主要分析测试项目

Table 2 The main measurement items for shale gas analysis

分析测试项目	分析测试内容或方法
地球化学分析实验	总有机碳(TOC)含量
	干酪根类型
	镜质组反射率(R_o)
储层表征实验	矿物组成
	孔隙度和渗透率
含气量测定实验	解吸法
	等温吸附法
	测井解释法

2 页岩气的地球化学实验技术

页岩气储量评估是页岩气勘探开发利用的基础,研究页岩形成油气地球化学条件的实验技术对页岩气储量评估具有重要意义,本文主要围绕页岩生气物质基础、产气能力、成气阶段和成气量大小等方面对页岩地球化学实验技术研究进展进行概述。

2.1 有机质丰度分析

烃源岩有机质丰度反映烃源岩中有机质的数量特征,是形成油气的物质基础,是评价烃源岩的基础指标[30-31]。烃源岩有机质丰度常以总有机碳含量、氯仿可溶有机质(A)和总烃(HC)含量来表达,其中总有机碳是控制后两者的参数,也是油气资源评价的基本参数[32]。在页岩的有机质丰度评价中,总有机碳是最常用的指标。

有机碳是页岩生气的物质基础,决定页岩的生气能力,而且总有机碳含量与页岩对天然气的吸附能力有正相关关系,决定了页岩吸附气的大小,并且是页岩孔隙空间增加的重要因素之一,决定着页岩新增游离气的能力[16,33]。一般来说,总有机碳含量越高,页岩吸附气体的能力越强[34-35]。目前岩石中总有机碳含量主要采用碳硫分析仪或有机碳分析仪[35-42]进行测定。

2.2 有机质类型分析

沉积岩中主要的有机质是干酪根,它是沉积有机质在成岩作用阶段的演化产物,一般指不溶于有机溶剂和不溶于含水碱性溶剂的有机质。同时,干酪根也是主要的生油气母质。不同的沉积环境和不同来源的原始有机质,会形成不同类型的干酪根。不同类型干酪根的演化方向不同,烃类的生成速度和数量也不同。因此,研究干酪根的类型是油气地球化学的一项重要内容,也是评价干酪根生油、生气潜力的基础。一般来说,Ⅰ型干酪根和Ⅱ型干酪根以生油为主,Ⅲ型干酪根则以生气为主^[1,36,43]。

有机质类型评价的指标及技术较多,包括干酪根显微组分鉴定、干酪根元素比、岩石热解分析以及干酪根碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 指标等^[44-45],其中应用最多的是干酪根显微组分鉴定^[24,37,39-40,42,46-52]和岩石热解分析^[35,37,39-42]。

干酪根显微组分鉴定是利用具有投射白光和落射荧光功能的生物显微镜,对干酪根的显微组分进行鉴定,从而确定干酪根类型。干酪根的主要显微组分有腐泥组、壳质组、镜质组和惰质组,其中腐泥组主要来源于藻类和其他水生生物及细菌;壳质组来源于陆生植物的孢子、花粉、角质层、树脂、蜡和木栓层等;镜质组来源于植物的结构和无结构木质纤维;惰质组来源于炭化的木质纤维部分^[43]。利用干酪根显微组分确定干酪根类型主要有两种方法,一种是相对含量法,即统计腐泥组和壳质组之和与镜质组的比例;另一种是类型指数法,即 TI 值, $\text{TI} = (\text{腐泥组含量} \times 100 + \text{壳质组含量} \times 50 - \text{镜质组含量} \times 75 - \text{惰质组含量} \times 100) / 100$ ^[36,43]。利用干酪根显微组分评价有机质类型的标准列于表 3^[36,43]。

表 3 利用干酪根显微组分评价有机质类型的标准

Table 3 The evaluation standards of the type of organic matter based on the identification of kerogen maceral

类型	相对含量法		类型指数法
	(腐泥组 + 壳质组)/%	镜质组/%	TI
Ⅰ	> 90	< 10	> 80
Ⅱ ₁	65 ~ 90	10 ~ 35	40 ~ 80
Ⅱ ₂	25 ~ 65	35 ~ 75	0 ~ 40
Ⅲ	< 25	> 75	< 0

岩石热解分析主要是利用岩石热解分析仪,采用程序升温的方法,将样品中的烃类在不同的温度下热解或热蒸发成气态烃、液态烃和热解烃,由气相色谱氢火焰离子化检测器检测;热解后的残余有机质加热

氧化成二氧化碳,由气相色谱热导或红外检测器检测,从而得到热解参数,确定干酪根类型。利用岩石热解参数评价有机质类型的标准列于表 4^[36]。

表 4 利用岩石热解参数评价有机质类型的标准

Table 4 The evaluation standards of the type of organic matter based on rock pyrolysis parameters

类型	$S_1 + S_2$ (岩石)	S_2/S_3	I_H
Ⅰ	> 20 mg/g	> 20	> 600
Ⅱ	2.0 ~ 20 mg/g	2.5 ~ 20	150 ~ 600
Ⅲ	< 2.0 mg/g	< 2.5	< 150

注: S_1 —游离烃量; S_2 —热解烃量; S_3 —二氧化碳含量; $S_1 + S_2$ —产油气潜力; S_2/S_3 —有机质类型指数; $I_H = S_2/\text{TOC}$ 含量, 氢指数。

2.3 有机质成熟度分析

有机质成熟度是衡量有机质实际生烃能力的重要参数之一,是确定有机质生油、生气的关键指标^[45]。成熟度评价的指标众多,如镜质组反射率 (R_o)、孢粉颜色指数 (SCI)、岩石热解最高峰温 (T_{max}) 等,但应用最多的还是镜质组反射率^[24,37,40,42-46,50-52]。镜质组反射率主要是通过显微光度计在波长为 (546 ± 5) nm 处 (绿光),测定镜质体抛光面的反射光强度与垂直入射光强度的百分比值来获得。

一般来说, $R_o \geq 1.0\%$ 为生油高峰, $R_o \geq 1.3\%$ 为生气阶段 (详见表 5^[36])。尽管美国页岩气形成的成熟度范围较宽 ($0.4\% \sim 2.0\%$)^[6],但从页岩含气量与产量参数对比看,有机质成熟度低,页岩含气量低、产气量小;成熟度高,页岩含气量高、产气量大。有学者认为,页岩气要具备经济开采价值,页岩处于生气窗内是甚佳的条件^[7-8],一般认为 R_o 应大于 1.3% 。

表 5 利用镜质组反射率划分有机质热演化阶段的标准

Table 5 The division standard of organic matter thermal evolution stage based on vitrinite reflectance

演化阶段	镜质组反射率 R_o /%	不同阶段生成物
未成熟	< 0.5	生物气,未熟重油
低成熟	0.5 ~ 0.7	低成熟油
成熟	0.7 ~ 1.0	正常原油 (高峰前)
高成熟早期	1.0 ~ 1.3	轻质原油 (高峰后)
高成熟晚期	1.3 ~ 2.0	凝析油-湿气
过成熟	> 2.0	甲烷

3 储层表征技术

页岩的岩石矿物组成直接影响页岩吸附气体的能力,页岩孔隙度和渗透率的大小则控制着游离态页岩气的储集空间以及决定着页岩气藏是否具有经济开采价值,因此目前页岩储层表征技术主要围绕页岩矿物组成、孔隙度和渗透率开展实验技术研究。

3.1 页岩矿物组成分析

页岩的矿物成分主要是黏土矿物、陆源碎屑(石英、长石等)以及其他矿物(碳酸盐岩、黄铁矿和硫酸盐等),由于矿物结构、力学性质的不同,所以矿物的相对含量会直接影响页岩的岩石力学性质、物性、对气体的吸附能力以及页岩气的产能^[13,33]。目前,国内外主要是利用X射线衍射法(XRD)对页岩进行全岩矿物组分和黏土矿物的分析^[20,22,24,35,38,49,52-57],北美裂缝性页岩气的综合评价中也采用元素俘获能谱测井(Elemental Capture Spectroscopy, ECS)手段,通过谱图分析观测页岩的矿物含量^[58-59]。

3.2 页岩孔隙度和渗透率测定

孔隙度大小直接控制着游离态页岩气的含量^[60],渗透率则是判断页岩气藏是否具有开发经济价值的重要参数^[14],页岩的孔隙度和渗透率越大,游离态页岩气的储集空间就越大。

测定孔隙度的传统方法是利用岩芯,通过氦置换法和汞置换法直接在实验室进行测定^[61-63]。但是,页岩气藏的储集空间包括基质孔隙和裂缝,裂缝的张开度受压力的影响较大,在岩芯的采集过程中压力的改变会使岩芯的裂缝孔隙度发生改变,不适合用岩芯直接测定,因此,应该分别确定基质孔隙度和裂缝孔隙度。目前,一般以岩芯孔隙度为基础,利用测井资料测定基质孔隙度。由于页岩基质孔隙度小,用单一的测井方法求取的孔隙度的值误差大,因此利用声波、中子和密度测井曲线,根据双矿物体积模型(砂岩、碳酸盐岩),列出三孔隙度测井响应方程,这样求取的孔隙度数据比较可靠^[64]。此外,核磁共振测井作为一种新方法近年来被用于孔隙度的测定,它能弥补常规测井受气层和岩性影响的不足^[65]。对于裂缝孔隙度的测定,双侧向测井(探测深度不同的两种侧向测井的组合)是较为成熟的方法,该方法适用于评价致密砂岩、碳酸盐岩等低渗储层裂缝孔隙度^[66-68]。

页岩储层渗透率极低,难以应用常规渗透率测试方法进行测试。目前一般采用脉冲降压法和美国天然气研究协会(Gas Research Institute, GRI)制定的GRI法,测试速度较快^[57,69]。

4 页岩含气量测试技术

页岩含气量是计算页岩原地气量的关键参数,对页岩含气性评价、资源储量预测具有重要的意义,决定了该地区有无页岩气,以及有无工业开采价值。页岩含气量的测试方法有解吸法、等温吸附法、测井解释法等。其中解吸法是页岩含气量测定的直接方法,也是最常用的方法,它能够在模拟地层实际环境的条件下反映页岩的含气性特征,因此被用来作为页岩含气量测量的基本方法,但这种方法耗时长、误差较大^[70];等温吸附法和测井解释法是页岩含气量测定的间接方法^[70-71]。等温吸附是解吸的逆过程,通过等温吸附模拟,可以研究富有机质页岩的吸附特征和能力,获得吸附气含量参数数据,但是对于吸附态量少的页岩气而言,采用等温吸附法并不合适,而且误差很大;测井解释法是通过测井资料解释获得页岩含气量的方法,这种方法首先要建立岩电关系,包括岩石密度与有机质含量、放射性物质含量与有机质含量、有机质含量与含气量的关系等,再通过测井资料解释吸附气含量、游离气含量和总含气量,但目前我国页岩气的岩电关系还没有有效建立^[72]。下面分别概述这几种含气量测试方法的研究进展。

4.1 解吸法

目前,国内外主要采用解吸法来测定页岩的含气量^[28,70-73]。解吸法测得的页岩含气量由解吸气量、残余气量和损失气量三部分构成。

解吸气量的测定:解吸气量是指页岩岩芯装入解吸罐后在大气压力下自然解吸出的气体含量。将页岩岩芯密闭保存于解吸罐内,利用水浴加热至储层温度,在大气压力下进行解吸。页岩岩芯的解吸方式有自然解吸和快速解吸两种,自然解吸时间长,但测量结果比较准确;快速解吸时间短,方便野外现场使用。通过适当提高解吸温度和连续观测,并选择匹配的终止限,可以合理而有效地缩短测定周期^[74]。

残余气量的测定:残余气量是指样品在解吸罐中解吸终止后仍留在岩芯中的气体体积,一般采用球磨法测定^[75]。解吸结束后,将页岩岩芯用球磨机粉碎到0.246 mm以下,然后利用水浴加热至储层温度,在大气压力下进行解吸。如果是快速解吸方式,则要将岩芯反复破碎、解吸,直到连续两次破碎、解吸的气量小于10 cm³。

损失气量的估计:损失气量是指钻头钻遇岩层到岩芯从井口取出装入解吸罐之前释放出的气体体积。损失气是页岩含气量的重要组成部分,也是解吸法中误差较大的部分。在钻井取芯过程中,天然

气散失不可避免,取芯方式、测定方法、逸散时间以及估算方法都影响到损失气量的大小^[76]。目前通常采用美国矿务局(United States Bureau of Mines, USBM)制定的 USBM 法)直线回归来估计损失气量,其原理是根据损失气量与解吸时间平方根成正比,利用解吸过程前4 h的数据,恢复损失气量^[72],估算出损失气量。

4.2 等温吸附法

等温吸附法是通过页岩样品的等温吸附实验来模拟页岩的吸附过程,从而得到页岩的含气量^[70],在页岩的含气量测定中应用也较多^[23,38,50,52,58,72,77]。等温吸附模拟实验的主要作用是:评价页岩的吸附能力;在持续生产或压力释放造成的气藏压力不断下降时,评价无束缚气体资源;确定临界解吸压力^[56]。

等温吸附模拟的基本实验流程为:①将页岩岩芯压碎、加热,排除已吸附的天然气,求取 Langmuir 参数;②将碎样置于密封容器内,在不同的温压条件下,测定页岩岩芯吸附甲烷的量,将结果与 Langmuir 方程拟合,建立页岩实际状态方程($P-V-T$ 关系)下的等温吸附曲线^[78]。

北美页岩气的勘探实践表明,页岩对甲烷气体的吸附遵循 Langmuir 等温吸附关系^[35,79-81]:

$$V_E = V_L \cdot P / (P_L + P)$$

式中, V_E 为在压力 P 下单位体积储层里吸附气的体积, m^3/t ; V_L 为 Langmuir 体积,表示吸附剂的最大吸附体积, m^3/t ; P 为气体压力,MPa; P_L 为 Langmuir 压力,MPa。

页岩对甲烷气体的吸附特征是在低压下,吸附量随着压力的增大快速增加,达到一定压力后吸附量达到饱和,成为一条几乎不变的平滑直线。

4.3 测井解释法

测井解释法是通过测井资料解释获得页岩含气量的方法。通过准确获得页岩的孔隙度、渗透率、含气饱和度、矿物组成等参数^[59,81-83],然后利用储层孔隙度及含气饱和度计算游离气含量^[72,84],利用等温吸附曲线以及地层温度、压力计算地层吸附气含量^[85-87],经过校正得到地层吸附气含量^[88],页岩含气量即为地层游离气和吸附气之和。

此外,通过研究各参数(总有机碳含量、孔隙度、矿物组成等)对页岩含气量的影响规律,获取影响页岩含气量的关键参数,并且利用统计方法,建立不同参数与含气量之间的量化关系,可以对页岩含气量进行预测。研究表明^[52],通过不同参数与含气

量之间的多元线性回归可以得出计算页岩含气量的统计公式,由这些公式计算得到的含气量与实测值吻合良好,而且选取的参数越多,预测结果越准确。

5 结语

页岩气的勘探开发涉及的技术和内容非常广泛,无论是在烃源岩潜力的评价阶段,还是在页岩气的储量计算阶段或开发阶段,页岩气的实验测试技术至关重要。通过对页岩气进行分析检测,可以得到总有机碳含量、干酪根类型镜质组反射率 R_o 、矿物组成、孔隙度、渗透率、含气量等众多参数,这些参数对评估页岩的产气能力、储集气能力以及可开采性等研究具有重要意义。目前,我国关于页岩气实验测试技术研究还处于起步阶段,如何将各种先进的测试技术应用于页岩气实验测试中,提高测试效率,如何尽快建立页岩气实验测试技术平台,为我国页岩气的勘探开发提供重要的技术支撑,是一项亟待解决的课题。

6 参考文献

- [1] 王祥,刘玉华,张敏,胡素云,刘红俊.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
- [2] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [3] 张金川,徐波,聂海宽,邓飞涌.中国天然气勘探的两个重要领域[J].天然气工业,2007,27(11):1-6.
- [4] 张金川,薛会,张德明,蒲军.页岩气及其成藏机理[J].现代地质,2003,17(4):466.
- [5] Hill R G, Jarvie D M, Zumberge J, Henry M, Pollastro R M. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 445-473.
- [6] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [7] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 91(4): 523-533.
- [8] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [9] 张金川,聂海宽,徐波,姜生玲,张培先.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.

- [10] 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[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-39.
- [11] 张金川,汪宗余,聂海宽,徐波,邓飞涌,张培先,殷毅,郭华强,林拓,张琴,张德明. 页岩气及其勘探研究意义[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 640-646.
- [12] 陈更生,董大忠,王世谦,王兰生. 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.
- [13] 张林晔,李政,朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.
- [14] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- [15] 潘仁芳,伍媛,宋争. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 2009(3): 6-9, 28.
- [16] 杨振恒,李志明,沈宝剑,韩志艳. 页岩气成藏条件及我国黔南拗陷页岩气勘探前景浅析[J]. 中国石油勘探, 2009(3): 24-28.
- [17] 张利萍,潘仁芳. 页岩气的主要成藏要素与气储改造[J]. 中国石油勘探, 2009(3): 20-23.
- [18] 李登华,李建忠,王社教,李新景. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 22-26.
- [19] 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明. 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, 2010, 37(6): 641-653.
- [20] 蒋裕强,董大忠,漆麟,沈妍斐,蒋婵,何溥为. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 地质勘探, 2010, 30(10): 7-12.
- [21] 董大忠,程克明,王玉满,李新景,王社教,黄金亮. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288-299, 308.
- [22] 张卫东,郭敏,姜在兴. 页岩气评价指标与方法[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1093-1099.
- [23] 周文,苏瑗,王付斌,陈小梅,周小勇. 鄂尔多斯盆地富县区块中生界页岩气成藏条件与勘探方向[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 29-33.
- [24] 唐显春,曾辉,张培先,汪凯明,何贵松. 宣城地区荷塘组页岩含气性浅析[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(1-2): 78-84.
- [25] 杨振恒,腾格尔,李志明. 页岩气勘探选区模型——以中上扬子下寒武统海相地层页岩气勘探评价为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 8-14.
- [26] 李延钧,刘欢,刘家霞,曹利春,贾学成. 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, 33(2): 28-34.
- [27] 徐国盛,徐志星,段亮,袁海锋,张武. 页岩气研究现状及发展趋势[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(6): 603-610.
- [28] 杨一鸣,毛俊莉,李晶晶. 页岩气藏地质特征及地质选区评价方法——以辽河拗陷东部凸起为例[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 46-49.
- [29] 孟庆峰,侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 11-14.
- [30] 秦建中,刘宝泉,国建英,刘井旺,于国营,郭树芝. 关于碳酸盐烃源岩的评价标准[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 281-286.
- [31] 郭小文,何生. 珠江口盆地番禺低隆起-白云凹陷恩平组烃源岩特征[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(1): 31-33, 46.
- [32] 金强,查明,赵磊. 柴达木盆地西部第三系盐湖相有效生油岩的识别[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 125-129.
- [33] 黄菲,王保全. 页岩气成藏地质条件分析[J]. 内江科技, 2011(2): 129, 137.
- [34] Chalmers G R L, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part I: geological controls on methane sorption capacity [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2008, 56(1): 1-21.
- [35] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member northeastern British Columbia, Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1): 51-75.
- [36] 戴鸿鸣,王顺玉,陈义才. 油气勘探地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 54-65, 98, 365-379.
- [37] 于会娟,妥进才,刘洛夫,陈践发,赵磊. 柴达木盆地东部地区侏罗系烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 132-138.
- [38] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87-125.
- [39] 段宏亮,钟建华,邱旭明,李亚辉,尹成明. 柴东地区石炭系烃源岩地球化学特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 219-230.
- [40] 张家震,徐备,庞绪勇,卫巍,王宇. 新疆富蕴县沙尔布拉克地区南明水组烃源岩有机地球化学特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(2): 231-236.
- [41] 高福红,高红梅,樊馥. 漠河盆地早白垩世依列克得

- 组火山岩系烃源岩有机地球化学特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(1): 9-14.
- [42] 谢其锋,周立发,马国福,谭修中,万延周,梁士伟,张凯,赵俊辉. 南祁连盆地三叠系烃源岩有机地球化学特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(6): 1034-1040.
- [43] 蒋有录,查明. 石油天然气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 51-59.
- [44] 李志明,徐二社,秦建中,郑伦举,鲍云杰. 烃源岩评价中的若干问题[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(6): 8-12, 27.
- [45] 王乐闻,刘四兵,王鹏,张勇. 沾化凹陷烃源岩地球化学特征分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(6): 26-29.
- [46] 孔庆芬,张文正,李剑锋,王可仁. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩生烃能力评价[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 62-64.
- [47] 张林,魏国齐,韩龙,王立龙,王东良. 四川盆地震旦系-下古生界高过成熟度烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 286-291.
- [48] 江晨,李建明. 柴达木盆地西北缘侏罗系烃源岩地球化学特征分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2009, 11(2): 8-10.
- [49] 王社教,李登华,李建忠,董大忠,张文正,马军. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 40-46.
- [50] 聂海宽,张金川,李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 959-967.
- [51] 罗小平,刘军,徐国盛,马若龙,鲜志尧,徐猛. 湘中拗陷泥盆-石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 206-214.
- [52] 聂海宽,张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 1-12.
- [53] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579-601.
- [54] Schettler P D, Parmoly C R. The measurement of gas desorption isotherms for Devonian shale [J]. *GRI Devonian Gas Shale Technology Review*, 1990, 7(1): 4-9.
- [55] 雷宇,王凤琴,刘红军,马华,张成乘. 鄂尔多斯盆地中生界页岩气成藏地质条件[J]. 油气田开发, 2011, 29(6): 49-54.
- [56] 刘弋生,谢军,武浩宇. 页岩气储层评价技术的方法——实验分析技术[J]. 内江科技, 2012(3): 101-102.
- [57] 熊伟,郭为,刘洪林,高树生,胡志明,杨发荣. 页岩的储层特征以及等温吸附特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 113-116.
- [58] 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.
- [59] 吴庆红,李晓波,刘洪林,陈霞. 页岩气测井解释和岩芯测试技术——以四川盆地页岩气勘探开发为例[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 484-488.
- [60] Chalmers G R L, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shales in north eastern British Columbia, Part II: Evaluation of regional potential gas resource [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2008, 56(1): 22-61.
- [61] Luffel D L, Guidry F K. New core analysis method for measuring reservoir rock properties of Devonian shale [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1992, 44(11): 1184-1190.
- [62] Luffel D L, Guidry F K, Curtis J B. Evaluation in Devonian shale through application of new core and log analysis methods[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1992, 44(11): 1192-1197.
- [63] Hill D G, Lombardi T E, Martin J P. Fractured shale gas potential in New York [J]. *Northeastern Geology and Environmental Sciences*, 2004, 26(1-2): 57-78.
- [64] 李显路,曾小阳,胡志方,刘丽琼,台怀忠. 安棚深层系储层孔隙度计算方法[J]. 河南石油, 2004, 18(6): 17-18.
- [65] 王胜奎,罗水亮,张俊. 应用核磁共振测井资料评价低渗透储层[J]. 断块油气田, 2007, 14(6): 81-83.
- [66] 李善军,肖永文,汪涵明,张庚骥. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-854.
- [67] 蒋进勇. 塔河油田碳酸盐岩储层孔隙度模型的改进[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 564-567.
- [68] 秦启荣,黄平辉,周志远,王嘉. 全直径样品分析在测井解释裂缝孔隙度中的应用研究——以克拉玛依油田百31井区二叠系油藏为例[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 637-640.
- [69] Prince C M, Steele D D, Devier C A. Permeability estimation in tight gas sands and shales using NMR—A new interpretive methodology [C] // The 9th AAPG International Conference and Exhibition. Brazil: Rio de Janeiro, 2009: 1-9.

- [70] 唐颖,张金川,刘珠江,李乐忠. 解吸法测量页岩含气量及其方法的改进[J]. 天然气工业,2011, 31(10): 108-112.
- [71] Webb J S, Thompson M. Analytical requirements in exploration geochemistry [J]. *Pure & Chemistry*, 1977, 49: 1507-1518.
- [72] 李玉喜,乔德武,姜文利,张春贺. 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.
- [73] 黄金亮,邹才能,李建忠,董大忠,王社教,王世谦,程克明. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.
- [74] 庞湘伟. 煤层气含量快速测定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1): 29-32.
- [75] GB/T 19599—2008, 煤层气含量测定方法[S].
- [76] 陈孟晋,王红岩,严启团,张芳. 煤层含气量的测定及影响因素[J]. 中国煤层气, 1997(1): 27-30.
- [77] 郭彤楼,李宇平,魏志红. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 1-7.
- [78] Wadsö I, Robert N G. Standards in isothermal microcalorimetry [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2001, 73(10): 1625-1639.
- [79] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. *Journal of American Chemical Society*, 1918, 40(9): 1403-1461.
- [80] Ross D J K, Bustin R M. Impact of mass balance calculations on adsorption capacities in microporous shale gas reservoirs [J]. *Fuel*, 2007, 86: 2696-2706.
- [81] 刘洪林,王莉,王红岩,魏伟,孙爱. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 68-71.
- [82] 谭茂金,张松扬. 页岩气储层地球物理测井研究进展[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 2024-2030.
- [83] 齐宝权,杨小兵,张树东,曹蓁. 应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 44-47.
- [84] 张培先. 页岩气测井评价研究——以川东南海相地层为例[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 12-15.
- [85] 石强,李剑,李国平,张险峰. 利用测井资料评价生油岩指标的探讨[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 30-32.
- [86] 杨兴旺,赵杰. 火山岩气层孔隙度计算方法探讨[J]. 测井技术, 2009, 33(4): 350-354.
- [87] 刘传平,郑建东,杨景强. 徐深气田深层火山岩测井岩性识别方法[J]. 石油学报, 2006, 27(Z1): 62-65.
- [88] 赵俊峰,赵伟祥,范瑞虹. 用测井方法评价储层的敏感性[J]. 断块油气田, 2004, 11(3): 85-88.