

文章编号:0253-9993(2013)05-0721-07

北美页岩气研究及对我国下古生界页岩气开发的启示

肖贤明¹,宋之光¹,朱炎铭²,田 辉¹,尹宏伟³

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘 要:北美近 10 a 来对构造较简单、中-高成熟度($R_o < 3.0\%$)、埋藏较浅地层($< 4\ 000\ m$)页岩气的形成、赋存与富集机理、评价方法与核心区预测作了大量研究,取得了实质性的进展,并实现了页岩气的大规模工业开发。我国南方下古生界成熟很高($R_o = 2.5\% \sim 4.0\%$)、构造改造强烈、埋藏深度差异大,对于这套地层的页岩气的评价,缺乏相关理论与方法。为规避风险、获得效益,需以北美页岩气研究为借鉴,针对其地质地球化学特点,在广泛开展相关基础研究的基础上,重点发展页岩含气量的现场测试技术与原地气量的定量评价体系,评估勘探开发示范区页岩的资源潜力,确定页岩气的主控因素,为实现我国南方下古生界页岩气的高效开发提供理论指导与方法基础。

关键词:北美;页岩气;中国南方;下古生界;页岩气富集区;主控因素

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A

Summary of shale gas research in North American and revelations to shale gas exploration of Lower Paleozoic strata in China south area

XIAO Xian-ming¹, SONG Zhi-guang¹, ZHU Yan-ming², TIAN Hui¹, YIN Hong-wei³

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In North American, a lot of work had been done on shale gas formation, storage, enrichment, evaluation and core area prediction for gas shale strata with relative simple structure deformations, middle-high maturities ($R_o < 3.0\%$) and shallower burial depths ($< 4\ 000\ m$), great achievements have been made, and industrial scale shale gas exploitation have been carried out. The lower Paleozoic strata in China south area are characterized by excessively high thermal maturities ($R_o = 2.5\% - 4.0\%$), strong structure reforming, and great variations of their current burial depths. For the shale gas evaluation of this set of strata, there is lack of available theories and methods. In order to elude exploration risk and obtain benefit, the fundamental researches pointing to these characters should be conducted based on achievements made by North American, mainly including techniques of in situ measurements of gas content in shales and quantitative assessment system of OGIP (original gas in place), evaluation of shale gas potentials of the demonstrated areas or blocks, and determination of the main factors controlling shale gas resources. The purpose of these studies is to provide theoretical guides and technical methods for the high efficient exploitation of shale gas in the Lower Paleozoic strata of China South area.

Key words: North American; shale gas; China South area; Lower Paleozoic; shale gas plays; main controlling factor

美国是页岩气开发最早、研究最深入、页岩气产量最大的国家,其次是加拿大,也进入了页岩气的工业开发阶段^[1]。欧洲有页岩气资源潜力评价方面的

文献报道^[2],但由于资源富集程度与环保等方面的问题^[2-4],尚未进行页岩气的工业开发。我国不同时代富有机质页岩广泛发育,页岩气资源潜力巨大,但

收稿日期:2012-03-10 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214705)

作者简介:肖贤明(1962—),男,湖南汉寿人,研究员,博士生导师。Tel:020-85290176, E-mail: xmxiao@gig.ac.cn

由于起步较晚,相关基础研究薄弱,没有形成工业产能。笔者在综述近 10 a 来北美页岩气研究与开发进展的基础上,结合我国南方下古生界页岩的地质背景与地球化学特征,提出了在页岩气资源评估与富集区预测等方面应当重点关注的科学问题,希望对我国目前广泛开展的页岩气相关研究提供一些可借鉴的思路。

1 北美页岩气的研究进展

虽然北美页岩气的利用已有 100 多年历史,但在 21 世纪初才对页岩气开展系统的研究工作,取得了实质性的进展,并极大地推动了页岩气勘探开发,同时也揭露了一系列急需解决的理论问题。进展与现状总结为如下几个方面。

(1) 系统总结了页岩气富集的一般特点。

根据对北美页岩气基础理论与勘探开发实践^[5-7],页岩气富集区(shale gas plays)主要体现如下特点:

① 页岩气储层的岩石类型多样。虽然页岩气是指主体赋存于富有机质的泥页岩中,主要以吸附与游离状态的天然气聚集,但储层也包括了泥页岩层中的粉砂岩、砂岩,甚至碳酸盐岩夹层;

② 页岩气可以是生物气、热成因气,或是二者的混合气,但热成因气是主体,页岩气的富集气或者甜点区一般与原油和干酪根的高温裂解成气有关;

③ 页岩气的赋存相态多样,但以游离态与吸附态为主,在异常高压区或者温度在 100 °C 以上的深埋区,游离气占主导地位;

④ 虽然页岩气定义为自生、自储、自封闭的油气系统,但保存条件至关重要,北美主要页岩气盆地的页岩气富集区都发育有良好的盖层;

⑤ 页岩气储层一般表现为致密物性特点,孔隙度低,一般为 3% ~ 10%,渗透率低,一般仅数个微达西,具有饱气特点,需要注水压裂来增加连通性,实现有效的开发;

⑥ 页岩地层中流体压力变化大,压力系数为 1.0 ~ 2.0,其主要与构造抬升与构造改造所控制的保存条件有关,页岩气核心区(core area)一般体现超压的特点。

近年来勘探开发实践也揭示出一些现有页岩气富集理论难解释的现象与进一步需要解决的问题,如:在有些区块临近的生产井,页岩气产量差别很大;有些高 TOC 页岩区块,页岩气产量并不高,而有些 TOC 较低的页岩,页岩气产量很高,在一定地质条件下页岩气是否也存在明显的运移;页岩中原生水含量

的控制因素及其对页岩气赋存状态的影响。

(2) 认识到吸附与解吸附作用是页岩气赋存和开发的关键控制因素。

吸附气是页岩气的重要组成部分,在很大程度上决定了页岩中天然气的富集程度。影响页岩吸附能力的因素包括总有机质含量与类型、矿物组成和孔隙结构、以及热演化程度^[8-10]。有机碳含量高,镜质组或者惰性组含量高,以及成熟度高一般都会增加页岩的吸附能力^[6]。有机质类型也是影响有机质吸附性的一个重要因素。一般来讲,由于 III 型干酪根具有较大微孔体积,与 I 和 II 型的干酪根相比,具有更高的甲烷气体吸附量^[11-12]。

黏土矿物类型与含量是影响页岩吸附气数量的另一重要因素。黏土矿物具有由黏土晶层形成的层间微孔隙,这些微孔隙不仅增加了页岩的比表面积,还为天然气提供了吸附的场所^[13-15],但不同的黏土矿物具有不同的气体吸附能力,尤其是在页岩中黏土矿物与有机质形成的复合体,其气体吸附特征是目前研究的重点。

在页岩气开发过程中,随着储层压力条件的改变,吸附气转变为游离气,页岩气的脱附主要涉及到气(流)体宏观与微观流动机制,包括自由流体、脱附、扩散以及抽吸作用。有研究表明,高成熟度页岩气体脱附需要较低的压力条件^[16],但目前对有关脱附的微观机制仍然了解不够,尤其是针对不同纳米级孔径的气体脱附以及抽吸脱附的动力学行为缺乏研究。

(3) 认识到页岩孔隙系统的复杂性及纳米级孔隙的重要性。

页岩气的赋存机理一直是页岩气研究的核心内容,而页岩有机与无机组成及孔隙系统直接影响页岩气的赋存与富集。页岩孔隙结构复杂,包括肉眼可见的宏观孔隙,普通光学显微镜下可见的微米级孔隙、以及电子显微镜下才可见的纳米级孔隙^[17]。页岩中以纳米孔隙占优势,成为页岩气赋存与富集的典型特点^[10,18-19]。页岩中的有机质是纳米孔隙发育的主要载体,富有机质页岩中有机质的平均孔径远小于无机质的平均孔径^[20]。有机质的纳米孔隙主要包括微孔(<2 nm)与介孔(2 ~ 50 nm),在热演化程度很高的页岩中,有机质的纳米孔隙较大,可在 50 nm 以上,采用离子减薄与场发射电子显微镜技术(FBI-SEM)可构建页岩孔隙结构的三维图像^[21-22],为全面了解页岩的孔隙网络与储气机理提供了最直接的信息。

页岩纳米孔隙中存储的气体具有复杂的热力学状态,是影响页岩气开发不可忽视的因素。研究表

明^[23-24]:气体(流体)活动的体积大小依赖于孔隙的大小,且存在于孔隙的中心部位,这个部位分子间以及分子与孔隙壁间相互作用力影响最弱;在孔径小于2 nm的孔隙内,CH₄分子通常在孔隙壁作用力场影响下处于吸附状态,由于孔隙壁效应使得超临界CH₄以结构化方式存在;直到孔径达到50 nm,气体的热力学状态发生改变,分子在孔隙中发生运动。正是这种纳米孔隙的大量存在,特别是与微米级孔隙相连接的纳米孔隙网络共同控制了页岩气的赋存和运移机理^[23-25],以及由此导致的气体热力学状态的复杂性,使得页岩气在页岩中的渗流难以用传统的达西流模型表达。

由此可见,要精确评估页岩的原地气量(original gas in place),不仅仅是评价页岩的孔隙度,而且需要准确评估页岩中气体的孔隙体积,还应当深入研究气体的不同热力学状态。美国页岩气开发实践表明,前期的资源评估往往小于实际页岩气产量,一个可能的原因是不很了解页岩中纳米级孔隙的复杂性及其中天然气的赋存机理。

(4)建立了页岩气远景区带的评价指标与方法。

评价页岩气潜力可归纳为三大方面:页岩的生气能力、储气能力和易开采性。页岩的生气能力与其总有机碳(TOC)含量、有机质成熟度(R_o)、页岩体积成正相关。页岩的储集能力主要包括储集的游离气和吸附气两个方面:游离气的主要控制因素为孔隙度、含气饱和度、压力和温度条件;吸附气的主要控制因素为有机质类型与含量、成熟度、黏土矿物类型与含量、压力和温度条件。页岩气的易开采性主要与页岩的岩石矿物组成、天然裂缝系统发育程度及渗透率等因素有关,一般页岩中脆性矿物含量越多,可压裂性越好,对于页岩气开发越有利。对于页岩气远景区带评价,不同学者提出的指标有所不同,但基本相似。如:Jarvie等^[7]、Curtis等^[26]根据对美国页岩气勘探开发实践研究认为,页岩气远景区带的页岩需要具备以下4个基本特征:①有机碳含量高,TOC下限在1.0%以上,一般情况下要求有机碳含量大于2%,最好在2.5%~3.0%或以上;②热成熟度达到主生气阶段以上,除生物成因气需要达到一定的成熟度水平外,还有6项评价指标: $R_o > 1.1\% \sim 1.2\%$; T_{HI} (基于氢指数的转化率) $> 80\%$;氢指数HI < 100 mg/g TOC(假设原始氢指数HI ≥ 350 mg/g TOC);干气含量(C_1/C_{1-4}) $> 80\%$; $T_{max} > 455$ °C; $C_{20} > 95\%$;③页岩有效厚度足够大,在满足前两个要素基础上要求页岩的最小厚度为9 m,一般有效厚度在15 m以上,如有机碳含量小于2%,则厚度要在30 m以上;④脆性矿物

含量,适度的脆性既有利于页岩气的储集,又有利于页岩气的开发。采用的指标是:石英/(石英+碳酸盐+黏土)。该指标与开采过程中页岩的可压裂性有关,直接关系到页岩气的可开采性。当石英含量超过20%时,页岩气产量明显增加。

可见,页岩气的评价指标主要是地球化学指标,其趋势是地球化学评价与地质参数相结合,向定量评价方向发展。目前北美页岩气盆地页岩中有机质类型以I型与II型为主体,对于III型烃源岩是否具有较大的页岩气潜力以及评价指标如何,目前涉及的研究不多,应当是下一步研究的重点。

(5)页岩气的地球化学指标可预测页岩气核心区。

在北美盆地某些页岩气区块,页岩气的湿度指数低,碳同位素出现倒转^[27]。虽然页岩气碳同位素倒转的机理还不是很清楚^[28-30],但一般与页岩地层流体超压及页岩气高产相关^[31-32],这种相关性被应用于指示页岩气核心区。页岩在较高成熟度阶段($R_o > 2.0\%$),页岩气成分中重烃(C_{2-5})发生二次裂解,形成更多小分子烃,气体体积增加,增加流体压力;同时干酪根孔隙度增加,使得页岩更脆。这不仅有利于页岩气富集,而且有利于页岩气压裂开发。页岩中残留油裂解气与干酪根裂解气的混合,被认为是导致碳同位素倒转最可能的原因^[28]。研究还发现泥浆气(Mud gas)与顶空气(Headspace gas) $\delta^{13}C_1$ 的差别是页岩渗透率高低的标志,在高渗透层位两者差别大,在低渗透层位两者差别小^[32]。这些认识说明,页岩气的地球化学指标不仅反映其成因与成熟度,有些指标可指示页岩的渗透性及页岩气开发潜力。这方面的工作刚刚起步,更多的信息有待进一步研究与探索。

(6)发现多个具工业页岩气潜力的盆地和页岩层系,并实现了工业的开发。

美国的页岩主要发育在20个州的50多个盆地,页岩气技术可采资源量约为28万亿m³。根据2011年页岩气产量数据^[33],排在前6位的页岩是:Haynesville页岩(1.56亿m³/d)、Barnett页岩(1.42亿m³/d)、Marcellus页岩(0.71亿m³/d)、Fayetteville页岩(0.71亿m³/d)、Woodford页岩(0.28亿m³/d)及Eagle Ford页岩(0.14亿m³/d),它们贡献了美国90%左右的页岩气产量。此外,美国的Lewis页岩、Antrim页岩、Ohio页岩及New Albany页岩也实现了页岩气的工业开发。美国的页岩气产量从2007年开始出现快速增长:2004年产量仅为196亿m³,2006年产量为311亿m³,2007年产量为

366 亿 m^3 , 2010 年产量为 1 378 亿 m^3 , 2011 年超过 1 970 亿 m^3 , 2012 年达到 2 300 亿 m^3 。

加拿大是世界第 2 个页岩气商业开采的国家。加拿大页岩气资源分布广、层位多, 预测页岩气资源量超过 42.5 万亿 m^3 ^[34]。页岩气资源主要分布在 British Columbia 和 Alberta 地区的下白垩统、侏罗系、三叠系和泥盆系, 尤其泥盆纪 Muskwa 页岩, 与美国 Barnett 页岩的埋藏深度相当, 但厚度更大, 渗透率更好, 地质构造更简单且基本不含水^[35], 预计页岩气资源量为 1.98 万亿 m^3 , 是 Barnett 页岩的资源量 2.5 倍。该地区有望成为北美最大的储气盆地。在 2007 年该地区页岩气产量约 8.5 亿 m^3 。2009 年加拿大页岩气产量达到 72 亿 m^3 , 主要产于 Montney 和 Horn River 两个页岩气区带。据预测, 加拿大页岩气产量预计到 2020 年将超过 625 亿 m^3 ^[36]。

2 北美页岩气的研究与开发对中国的启示

(1) 南方下古生界页岩与北美页岩地质地球化学特征的差别。

根据国土资源部 2012 年发布的数据, 我国页岩气可采资源潜力为 25.08 万亿 m^3 (不含青藏区)。其中, 上扬子及滇黔桂区 9.94 万亿 m^3 , 中下扬子及东南区 4.64 万亿 m^3 , 两者合计占全国总量的 58.12%。该区域主体实际上就是南方下古生界海相地层, 主要包括下寒武统与下志留统, 这两套富有机质页岩是我国目前页岩气勘探开发的重点层位。

国内学者主要从沉积环境条件、泥页岩发育程度、TOC (总有机碳) 含量等方面, 讨论了南方下寒武统、下志留统页岩与北美页岩气产区页岩的相似性, 近年来也开始关注它们在地质地球化学特征上的差异^[37-38], 表 1 汇总了主要的地质特征与地球化学指标。可见, 南方下古生界页岩与北美页岩气盆地页岩的关键指标可比性差。如: 对于控制页岩气生成的成熟度指标, 北美页岩 R_o (镜质组反射率) 主值为 1.0% ~ 2.5%, 处在油裂解及主生气阶段, 而南方下古生界页岩 $R_{o,eq}$ (等效镜质组反射率) 主值为 2.5% ~ 4.5%, 处在生气晚期或者进入生气下限阶段; 对于影响页岩气保存的构造活动特征, 北美盆地主要表现为简单的构造抬升, 抬升幅度一般不会超过 2 000 m, 具有良好的保存条件, 而南方下古生界地层体现为强烈抬升, 有些地区存在多期强烈构造改造, 在四川盆地地层剥蚀厚度可达 3 000 ~ 4 000 m, 在其他构造隆起区, 地层剥蚀厚度一般可达 5 000 ~ 6 000 m, 页岩气保存条件在不同地区存在很大差别。因此, 对于南方下古生界页岩气评价, 不仅仅是对比

与北美页岩气盆地的相似性, 更应当关注它们之间的差异, 开展有针对性的工作。

表 1 我国南方下古生界页岩与北美页岩地质特征与地球化学指标对比

Table 1 A comparison of geological and geochemical characteristics between Lower Paleozoic shales in China South area and shales in North American

比较指标	中国南方下古生界	北美(美国, 加拿大)
层位	寒武、奥陶—志留	泥盆、石炭、白垩
类型	I-II	II
主体埋深/m	1 000 ~ 6 000	350 ~ 4 500
页岩厚度/m	30 ~ 300	30 ~ 150
TOC 含量/%	1.0 ~ 9.0	2.0 ~ 20.0
成熟度 R_o /%	主体 2.5 ~ 4.5 (很高)	主体 1.0 ~ 2.5 (中—高)
微裂缝	发育	发育
构造活动	复杂(强烈抬升/改造)	简单(抬升)
勘探程度	低, 多为油气勘探风险区	高, 和油气勘探区基本重叠

(2) 南方下古生界页岩气评价的关键科学问题。

页岩气评价面临与常规油气完全不同的科学问题, 加之我国在该领域基本上没有开展实质性研究, 北美现有理论与方法对于我国南方下古生界页岩气评价只可借鉴, 不可直接套用, 有关这套地层页岩气的成因、含气性评价、赋存富集机理、保存条件直接关系到页岩气资源潜力评估与富集区预测, 需要重点开展相关研究。

① 很高成熟度页岩纳米孔隙结构特征及页岩气赋存机理。

页岩气以吸附与游离状态为主的赋存方式, 这一机理得到了很大程度的认可, 但却难以解释美国 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩惊人的高产页岩气系统^[7]等问题。页岩气的赋存形式还包括溶解态^[20,23-25], 然而是否存在固溶态没有被理论研究所证实。页岩孔隙结构特征与储气机理会随着成熟度演化而改变, 目前国外的研究仅限于中、高成熟度的页岩 ($R_o < 2.5\%$), 对于很高演化阶段 ($R_o = 2.5\% \sim 4.0\%$) 的页岩缺乏研究, 而该区域正是我国南方下古生界的主体成熟度范围。因此, 从纳米级孔隙结构入手, 研究很高成熟度页岩孔隙结构特征与页岩气赋存机理, 是当前急需解决的重要科学问题, 也是构建我国页岩气地质理论的重要内容。

② 深层页岩储集物性。

深层页岩的储集物性是一个在世界范围内尚缺乏研究, 但又体现南方下古生界典型地质特色的科学问题。南方下古生界页岩在地质历史时期埋藏深度

普遍达到7 000~10 000 m,一般达到生气下限阶段。在深部高温高压条件下,页岩微孔隙结构、气体赋存状态、岩石脆性及力学性质等都与北美埋藏较浅的页岩有很大的差别,页岩中矿物与烃类、CO₂、原生水及裂隙水等之间的化学反应,以及压实、压溶等成岩作用等的影响与改造,都会影响其储集物性、含气性及页岩气的地球化学特征^[39]。这些问题是影响南方下古生界页岩气资源潜力评价与勘探开发的另一关键科学问题。

③ 构造改造对页岩含气性的影响。

沉积盆地构造改造(包括地层抬升)会导致地层的温压条件发生变化,页岩原有的孔裂隙系统遭到破坏,吸附气解吸为游离气而快速逸散,导致页岩含气量减少。同时,构造改造也使页岩基质膨胀、微裂缝发育、页岩储层物性显著改善。因此,构造改造涉及到非常复杂的吸附与解吸机理等科学问题。在构造改造过程中,页岩流体压力的动态演化过程及对页岩储层物性的影响,页岩中气体的存在形式、数量等如何演化、页岩气散失机理,构造变动条件下页岩储层物性变化的宏观和微观机制等重要力学理论问题,均缺乏深入系统研究,成为制约南方学古生界页岩气勘探和开发的重要科学问题。

④ 页岩的原地气量评价。

确定页岩的原地气量是页岩气评价非常重要的内容,其理论模型可简化为:原地气量=游离气+吸附气+溶解气。目前主要有两种方法确定页岩的原地气量:间接法与直接法。间接法有两种:一种方法是采用实际页岩颗粒样品,应用高压气体吸附仪模拟地层温度压力条件下页岩的饱和气量^[40];另一种方法采用高压气体吸附仪测定页岩的吸附气含量,再根据页岩孔隙度数据,应用PVT软件模拟计算其游离气含量^[41],两者之和即为页岩的原地气量。由于间接法难于模拟页岩中原生水含量的影响,也不能准确评估页岩的含气饱和度,加之高压气体吸附在方法上还存在问题,评价结果与地质条件下的实际含气量往往存在较大差别。因此,页岩原地气量的确定一般都需要进行现场测试,即所谓的直接法,计算公式为:总含气量=损失气量+解析气量+残余气量。其中,评价损失气量的问题较多^[42],由于保压取芯技术与经济性的限制,北美目前一般采用井壁取芯进行现场解析,涉及到的关键技术是高灵敏度的解析与测试装置,按照一定程序记录解析气量,建立解析动力学方程,推导损失气量。我国目前缺乏相关技术,所报道的为数不多的页岩含气性数据都是由美国公司测定^[43]。因此,急需开展具有针对性的页岩原地气量

评价理论与方法体系。

⑤ 页岩气的资源潜力评价方法。

评价页岩气资源潜力有多种方法,如:类比法(规模类比法、聚集条件类比法、综合类比法等)、成因法(产气历史分析法、剩余资源分析法、成因分析法等)、统计法(体积统计法、地质要素分布概率风险分析法、产量分割法等)、综合分析法(蒙特卡洛法、打分法、盆地模拟法、专家赋值法、特尔菲综合法等)、容积法。评价方法的选择与限定指标的确定对评价结果的影响甚大。南方下古生界页岩气的地质地球化学特点与美国页岩气盆地在诸多方面不具备可比性,与美国盆地类比或者完全套用美国盆地参数与方法计算,存在很大风险。因此,在充分研究南方下古生界页岩气赋存富集机理、主控因素等相关科学问题研究的基础上,构建页岩气评价指标,建立有针对性的资源潜力评价方法。

上述问题既是我国南方下古生界页岩气资源潜力评价与富集区预测的关键问题,也是全球构造复杂、高成熟地层面临的共性问题。开展这方面的研究,既是对页岩气地质理论的发展与完善,又对页岩气的勘探开发提供理论指导。

3 现状与思考

我国页岩气各项工作刚刚起步,处在资源潜力评估与勘探开发启动阶段。对于成熟度很高、后期构造改造强烈的南方下古生界,缺乏可供借鉴的理论与方法。北美页岩气之所以实现了大规模工业开发,除了政府政策性支持外,主要应当归结于科技的进步,如建立起了有效评价体系,找到了页岩气富集区/核心区,开发了先进的开采技术,实现了页岩气的高效开发,产生了经济效益。这一点应当是北美给我们的最大启示,值得思考。南方下古生界最具页岩潜力,是我国页岩气勘探开发的首要战略选区,多家公司获得了区块。在当前背景下大力推进勘探开发,存在较大的风险。目前的当务之急是,加强南方下古生界页岩的赋存特点与富集机理的研究,发展页岩含气性定量评价技术,广泛开展页岩原位气量评价,确定页岩气的主控因素,预测页岩气富集区,指导勘探开发。这样才能规避风险,获得效益,使我国的页岩气工业迈出坚实的第1步。

参考文献:

- [1] 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, 87-125.
- [2] Hartwig A, Schulz H M. Applying classical shale gas evaluation concepts to Germany—Part I: the basin and slope deposits of the Stassfurt Carbonate (Ca₂, Zechstein, Upper Permian) in Brandenburg [J]. *Chemie der Erde*, 2010, 70(3), 77-91.
- [3] Selley R C. UK shale gas: The story so far [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 31: 100-109.
- [4] Weijermars R. Economic appraisal of shale gas plays in Continental Europe [J]. *Applied Energy*, 2013, 106: 100-115.
- [5] Curtis J B. Fractured shale gas systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86: 1921-1938.
- [6] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of northeastern British Columbia [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70: 223-239.
- [7] Jarvie D M, Hill R J, Rubile T E, et al. 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.
- [8] Manger K C, Oliver S J P. The Antrim shale-structural and stratigraphic influences on gas-production [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(3): 629-629.
- [9] Ramos S. The effect of shale composition on the gas sorption potential of organic-rich mudrocks in the Western Canadian sedimentary basin [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2004: 159.
- [10] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale member northeastern British Columbia [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1): 51-75.
- [11] Chalmers G R L, Bustin R M. Lower cretaceous gas shales in north-eastern British Columbia, part I: Geological controls on methane sorption capacity [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2008, 56(1): 1-21.
- [12] 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.
- [13] Aringhieri R. Nanoporosity characteristics of some natural clay minerals and soils [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2004, 52(6): 700-704.
- [14] Wang C C, Juang L C, Lee C K, et al. Effects of exchanged surfactant cations on the pore structure and adsorption characteristics of montmorillonite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 280(1): 27-35.
- [15] Cheng A L, Huang W L. Selective adsorption of hydrocarbons gases on clays and organic matter [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35: 413-423.
- [16] Zhang T W, Geoffrey S E, Stephen C R, et al. Effect of organic matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale gas system [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 47: 120-131.
- [17] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [18] Christopher R, Clarkson R, Jensen J L, et al. Innovative methods for flow-unit and pore-structure analyses in a tight siltstone and shale gas reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(2): 355-374.
- [19] Gareth R, Chalmers R, Bustin M, et al. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1099-1119.
- [20] Kang S M, Fathi E, Ambrose R J, et al. Carbon dioxide storage capacity of organic-rich shales [A]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence* [C]. *SPE134583*, 2010: 19-22.
- [21] Bai B J, Elgmati M, Zhang H, et al. Rock characterization of Fayetteville shale gas plays [J]. *Fuel*, 2013, 105: 645-652.
- [22] Mark E, Curtis C H, Sondergeld R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665-677.
- [23] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations [A]. *SPE Unconventional Gas Conference* [C]. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010.
- [24] Krishna R. Describing the diffusion of guest molecules inside porous structures [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113: 19756-19781.
- [25] Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale gas flow in shale gas sediments [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, 46(10): 55-61.
- [26] Curtis J B, Jarvie D M, Ferworm K A. Applied geology and geochemistry of gas shales [A]. *AAPG Conference* [C]. Denver Colorado, 2009.
- [27] Zumberge J E, Ferworm K A, Brown S. Isotopic reversal ('roll-over') in shale gases produced from the Mississippian Barnett and Fayetteville formations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 31: 43-52.
- [28] Xia X Y, James C, Braun R, et al. Isotopic reversals with respect to maturity trends due to mixing of primary and secondary products in source rocks [J]. *Chemical Geology*, 2013, 339: 205-212.
- [29] Tilley B, McLellan S, Hiebert S, et al. Gas isotope reversals in fractured gas reservoirs of the western Canadian Foothills: Mature shale gases in disguise [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(8): 1399-1422.
- [30] Xia X Y, Tang Y C. Isotope fractionation of methane during natural gas flow with coupled diffusion and adsorption/desorption [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 77: 489-503.
- [31] Brown D. Research getting unconventional boost [J]. *American Association of Petroleum Geologists Explorer*, 2010, 31: 8-10.
- [32] Zumberge J E, Ferworm K A, Curtis J B. Gas character anomalies found in highly productive shale gas wells [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 2009, 73: 15-39.
- [33] US Energy Information Agency. Annual Energy Outlook [R]. 2011, DOE/EIA-0383.
- [34] Marc Bustin I R, Bustin I A, Ross D, et al. Shale gas opportunities and challenges, adapted from oral presentation at AAPG Annual

- Convention[R]. San Antonio, Texas, 2008.
- [35] Shirley K. Barnett shale living up to potential[J]. AAPG Explorer, 2002, 23(7):19-27.
- [36] Kuuskraa V A. Challenges facing increased production and use of domestic natural gas[A]. Global Energy and Environment Initiative (GEEI) [C]. Washington, 2009.
- [37] 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2009, 29(5):51-58.
Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions and exploration prospect of shale gas in Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):51-58.
- [38] 聂海宽, 何发岐, 包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. 新能源, 2011, 31(11):111-116.
Nie Haikuan, He Faqi, Bao Shujing. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures[J]. New Energy, 2011, 31(11):111-116.
- [39] Burruss R C, Laughrey C D. Carbon and hydrogen isotopic reversals in deep basin gas: evidence for limits to the stability of hydrocarbons[J]. Organic Geochemistry, 2010, 12(41):1285-1296.
- [40] Vasilachei M A. Fast and economic gas isotherm measurements using small shale samples, adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition[R]. New Orleans, Louisiana, 2010.
- [41] 王飞宇, 贺志勇, 孟晓辉, 等. 页岩气赋存形式和初始原地气量(OGIP)预测技术[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3):501-510.
Wang Feiyu, He Zhiyong, Meng Xiaohui, et al. Occurrence of shale gas and prediction of original gas in place(OGIP)[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3):501-510.
- [42] Waechter N B, Hampton G L, James C, et al. Overview of coal and shale gas measurement: field and laboratory procedures[A]. Proceedings of the 2004 International Coalbed Methane Symposium [C]. Tuscaloosa, Alabama: The University of Alabama, 2004:1-17.
- [43] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 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.
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi formation in Southern Sichuan Basin of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1):69-75.

欢迎订阅 2013 年《煤炭学报》杂志

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、面向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PJK、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版总署颁发的“首届国家期刊奖”。2001 年入选“中国期刊方阵”,并被评为“双奖期刊”。2008 年获“中国精品科技期刊”称号。2009 年获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。2004, 2007, 2010, 2011, 2012 年 5 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。2006 年至 2012 年获中国科协精品科技期刊工程项目资助。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,176 页,每册订价 58 元,全年总订价 696 元。欲订者可直接向本编辑部索取订单,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-806 联系人:王婉洁

E-mail:mtxbwj@tom.com,mtxb@vip.163.com