

# 北美超压富集页岩气研究现状及勘探启示

梁正中<sup>1,2</sup>, 余天洪<sup>3</sup>

(1. 榆林学院 能源工程学院 陕西 榆林 719000; 2. 中国地质科学院 北京 100029;  
3. 天津经济技术开发区博士后科研工作站, 天津 300457)

**摘要:** 为了找准国内页岩气富集高产的目标, 分析北美地区页岩气勘探开发特点大有裨益。在探讨北美超压页岩气分布与特点的基础上, 研究了页岩气超压成因机理及有利富集区评价技术。结果表明: 新兴的北美页岩油气区超压特征明显, 以 Marcellus 页岩和 Haynesville 页岩气藏为典型。超压页岩有机质含量普遍较高, 具有较高的热演化程度、相对较高的孔隙度和良好的保存条件。超压页岩气区中游离气量比例大, 气藏产能相对较高。其机理在于生烃增压产生微裂缝, 大幅增强储层渗流性能。同时压力增大提高了页岩气含量, 更有利于增强页岩气的封存。就国内各勘探区块而言, 核心区的确定与地层压力关系尤为重要。应加强地层流体的压力分析, 着重寻找页岩气藏的超压甜点区。  
**关键词:** 页岩气; 超压富集; 核心区; 北美地区

中图分类号: TE122 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)10-0161-06

## Research status and exploration enlightenment on over-pressure and enrichment shale gas in North America

Liang Zhengzhong<sup>1,2</sup>, Yu Tianhong<sup>3</sup>

(1. School of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 71900, China; 2. Chinese Academy of Geology Science, Beijing 100029, China; 3. Post-Doctoral Research Workstation, Tianjin Economic-Technological Development Zone, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In order to acutely seek a rich and high production target of the shale gas in China, the analysis on the exploration and development features of the shale gas in North America would have high benefits. Based on the discussion on the distribution and features of the overpressure shale gas in North America, the paper had a study on the overpressure formation mechanism of the shale gas and the evaluation technology of the favorable enrichment zone. The results showed that the overpressure features of the emerging North America shale gas zone were obvious and the gas reservoirs of the Marcellus shale and Haynesville shale were typical. The organic matter content of the overpressure shale was high generally and would have a high thermal evolution degree, a relative high porosity and a good preservation condition. The free-gas volume had a high percentage in the overpressure shale gas zone and the gas reservoir productivity would be relatively high. The mechanism was the hydrocarbon generation and the pressure increased to make the micro fractures and could highly enhance the seepage performances of the reservoir. Meanwhile, the pressure increased could improve the shale gas content and could be favorable to improve the sealing of the shale oil and gas. As for each exploration block in China, the core zone determined would be important to the pressure relationship of the strata. The certain enrichment evaluation should enhance the pressure analysis on the fluid of the strata and should emphasize to seek the over-pressure sweet zones in the shale gas reservoir.

**Key words:** shale gas; over-pressure enrichment; core zone; North America

## 0 引言

页岩气是目前经济技术条件下, 天然气工业化

勘探开发的重要领域和目标。据统计, 2010 年美国页岩气的产量达到了 1 378 亿 m<sup>3</sup>, 占到该国天然气总产量的 23%。美国的能源供应压力得到了极大

收稿日期: 2016-05-16; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.10.030

基金项目: 天津市企业博士后创新项目择优资助项目(20130224); 榆林学院高层次人才科研启动基金资助项目(16gk18)

作者简介: 梁正中(1978—)男, 湖北潜江人, 工程师, 博士。Tel: 15291249708 E-mail: lzzdatong@sina.com

引用格式: 梁正中, 余天洪. 北美超压富集页岩气研究现状及勘探启示[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 161-166, 76.

Liang Zhengzhong, Yu Tianhong. Research status and exploration enlightenment on over-pressure and enrichment shale gas in North America[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 161-166, 76.

缓解并且天然气由进口变为出口,甚至改变了全球天然气市场的竞争态势。加拿大、澳大利亚、俄罗斯等国家也相继开展了页岩气的勘探和研究工作。面对清洁能源日益增长的需求和环境压力,国内天然气供需矛盾非常突出<sup>[1]</sup>。

我国不同地质时代富有机质泥页岩广泛发育,页岩气资源潜力巨大,但由于起步较晚,相关基础研究薄弱,亟需借鉴北美成功经验并加强成因机理探索<sup>[2]</sup>。2003年以来,国内相关科研院所相继对北美地区页岩气的成藏条件、勘探形势进行了调研。在此基础上,相关油田公司对页岩气的前景进行了分析。2007年,中国石油与美国新田公司签定了威远地区页岩气联合研究协议,2009年,美国与我国签署了《中美关于在页岩气领域开展合作的谅解备忘录》,近几年,非油企业如神华集团均涉入页岩气勘探开发领域。随着中美关系良好发展,中美在页岩气领域的合作将进一步得到加强。

根据现有页岩气成藏机理,原生页岩气储层应为异常高压条件<sup>[3]</sup>。美国传统5大页岩气产区除Barnett页岩气藏外均表现为常压,而新兴的北美页岩油气区超压特征明显。据研究,中国页岩气具有高有机质丰度、高热演化程度及高后期改造程度等

特点。人们逐渐认识到中国南方海相页岩在断裂发育的背景下,必须把地层压力作为一项关键性的重要参数进行全面考虑<sup>[4-5]</sup>。中国石油和中国石化分别在四川和重庆地区率先取得重大突破的探井都揭示强超压存在,涪陵页岩气田具有气井产量高,天然气组分好,气藏压力高的特点。由此富含页岩的层段可形成盆地规模的大型超压封存箱,暗示只有超压发育的地区才可能实现规模商业化开发。因此,系统研究超压页岩气富集成藏机理对提高我国页岩气勘探开发水平很有必要。

## 1 北美超压页岩气分布与特点

### 1.1 美国

美国页岩气具有悠久的勘探开发历史,随着水平钻井及水力压裂技术的进步,页岩气得以大规模开发并成为北美最为重要的非常规天然气之一<sup>[6]</sup>。近几年,Marcellus、Haynesville、Eagle Ford等页岩气储量的探明及新矿井的开发,使年轻新兴页岩资源在总产量中的占比逐年扩大(表1)。目前主要集中于Barnett、Haynesville和Marcellus等3大优质页岩的储层,其占全美产量比例由2000年1月的27%逐年上升至2013年6月的67%<sup>[7-9]</sup>。

表1 北美典型超压页岩气藏特征<sup>[2]</sup>

Table 1 Characteristics of typical over-pressured shale gas in North America

参数	页岩层系					
	Eagle Ford	Haynesville	Barnett	Marcellus	Horn River	Duvernay
深度/m	1 200~4 200	3 000~4 100	1 981~2 591	1 220~2 600	2 400~2 800	2 400~5 000
厚度/m	20~90	50~90	15~61	15~91	50	15~50
黏土含量/%	15~25	25~35	10~30	20~35	10~15	10~30
总有机碳含量 TOC/%	2.0~6.0	0.5~5.0	3.0~8.0	3~14	0.5~6.0	1.0~6.0
镜质组反射率 $R_o$ /%	1.0~1.6	1.3~2.2	1.2~2.0	0.9~3.5	1.7~2.8	0.2~2.0
孔隙度/%	6.0~14.0	6.0~15.0	4.0~5.0	4.0~11.0	4.0~6.0	5.0
压力系数	1.35~1.80	1.60~2.10	1.00~1.27	1.10~1.70	1.57~1.58	1.50~2.00

Barnett页岩位于德克萨斯州Fort Worth盆地中部,是美国最早的页岩气产区。产层埋深为1 981~2 591 m,为高成熟度的热成因页岩气藏,储层主要由含钙硅质页岩和含黏土灰质泥岩构成,有机质保存好,有机碳含量TOC平均值达4.5%,页岩厚度为35 m,孔隙度4.5%,渗透率约 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,天然微裂缝发育。2008年EIA机构的评价结果显示,Barnett页岩区的页岩气技术可采储量为1.8万亿 $\text{m}^3$ 。页岩中存在小幅度超压,对孔隙的保存具有积

极意义,同时压力提高了开采过程中天然气的流速与压裂开采效率,是Barnett页岩气稳定产率增加的标志。

美国地质储量更大的页岩气区带不断涌现,其中最为引人注目的是阿巴拉契亚盆地Marcellus页岩气藏。Marcellus页岩位于纽约州西部、宾夕法尼亚州、俄亥俄州以及弗吉尼亚西部,储气面积约为17万 $\text{km}^2$ ,是目前美国最大的页岩气区,产层埋藏较浅,总厚度91~304 m不等,单位面积产气量在

1.4万~11.3万 $m^3$ , Marcellus页岩的面积、厚度、孔隙度、渗透率、地层压力等评价参数总体均优于前述Barnett页岩, 并且其资源量和技术可采储量远大于Barnett页岩气<sup>[10]</sup>。Marcellus页岩有机质成熟度大, 压力系数高达1.7, 更有利于微裂缝的发育, 可以保持长期稳产。

Haynesville页岩位于美国路易斯安那州北部以及德克萨斯州东部, 是一套黑色富含有机质的上侏罗统页岩。产层埋深平均为3048m, 页岩厚度50~90m, 预计页岩气储量3万亿~7万亿 $m^3$ 。Haynesville页岩中有机质丰度为0.5%~4.0%, 孔隙度为8%~9%。Haynesville页岩地温高, 压力更大。该页岩区并不是美国面积最大的, 但勘探结果显示其很可能是页岩气产量最高地区之一。据专家预测, 未来10年间在美国天然气需求持续增长的总体背景下, 页岩气将占天然气总产量的50%, 其中Haynesville和Marcellus超压页岩气区带将成为主要的气产区。

## 1.2 加拿大

加拿大是继美国成功的开发后, 较早研究并发现页岩气可观经济资源的国家。勘探开发的地区主要集中在其西部沉积盆地, 包括不列颠哥伦比亚省东北部中泥盆统Horn River盆地与阿尔伯塔省三叠系Montney页岩等<sup>[11]</sup>, 目前加拿大页岩气勘探重点正从干气向富液天然气转变。

### 1.2.1 Duvernay页岩气

Duvernay页岩区面积大, 主体位于阿尔伯塔省中西部, 天然气储量丰富, 可媲美美国得克萨斯州的Eagle Ford。Duvernay页岩和北美众多的页岩油气田处于同一期的沉积, 埋深2000~5500m, 厚度不等。Duvernay页岩干酪根为I、II型, 有机碳含量为0.1%~11.1%,  $R_o = 0.2\% \sim 2.0\%$ , 是西加拿大沉积盆地泥盆系油气藏的主要区域性源岩。Duvernay页岩具有纯页岩厚度薄、钙质/硅质含量高、吸附气比例低、单位面积资源量丰度高以及含液烃比例高的特点。页岩具有超压, 目前是加拿大新兴的页岩油气区且有很大发展空间。

### 1.2.2 Horn River页岩气

Horn River页岩气区位于不列颠哥伦比亚省省东北部Horn River盆地, 面积1.3万 $km^2$ 。发育台地相富含有机质的开阔浅海相页岩沉积, 形成3套富产天然气的深灰色-黑色页岩产层。3套页岩厚度大, 横向上分布稳定, 自上而下依次为Muskwa、

Otter Park和Evie/Kluk泥盆系页岩。有机质含量丰富, 以I、II型干酪根为主, 页岩都位于气窗内,  $R_o = 1.7\% \sim 2.2\%$ 。吸附气含量20%~31%, 平均25%~28%。测试资料表明页岩超压(图1), 预示页岩气较为富集。

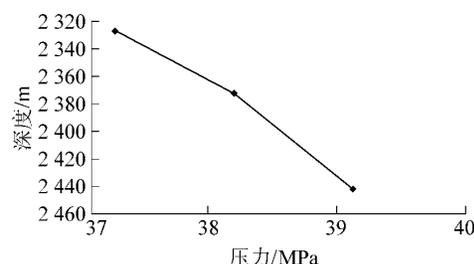


图1 Horn River页岩气井地层压力分析  
Fig. 1 Distribution of formation pressure in Horn River Shales Well

### 1.2.3 Bakken页岩气

Bakken页岩位于Williston盆地, 面积约51.8万 $km^2$ , 横跨加拿大和美国, 在美国北达科他州、蒙大拿州和加拿大的马尼托巴省、萨斯喀彻温省均有分布。Williston盆地从寒武纪到第四纪均接受沉积, 最大沉积厚度大于4573m。Bakken页岩属上泥盆系到下密西西比系深水沉积, 地层最厚约为44m。页岩有机质含量高、类型好, 在美加边界附近主要生油, 在Alberta盆地西北偏生气。该页岩既是主要烃源岩, 同时也是超压带, 实测压力系数1.35~1.58。区域上成功的生产井大都钻遇天然裂缝, 有利页岩油气区发展前景良好。

## 2 超压页岩气特点及成因机理

### 2.1 超压页岩气典型特征

页岩气指以吸附或游离状态赋存于富有机质泥页岩地层中, 具有商业价值的生物成因或热成因的非常规天然气。通常所说的压力主要指地层孔隙流体压力; 异常压力是地下某一特定深度范围的地层中, 由于地质因素引起的背离正常地层静水压力趋势线的流体压力, 包括异常的超压和欠压。超压页岩体系有机质含量普遍较高, 具有较高的热演化程度、相对较高的孔隙度和良好的保存条件。超压带泥页岩的测井曲线特征一般表现为具有异常高的声波时差和异常低的电阻率值。井旁地震速度换算声波时差显示在超压带内明显倒转, 传播速度降低。从前述北美页岩气区来看, 其组成中游离态气体的含量比例大, 碳同位素普遍存在反序。超压气藏产

能相对较高<sup>[12]</sup>。

## 2.2 异常压力页岩理论

国内外超压油气田的发现和研究表明,异常压力与常规油气分布存在密切关系,异常压力的形成及对成藏作用研究引起广泛关注。在不同的含油气盆地中,超压的产生经常是多种成因起作用,但一般只有某一种或很少的几种成因占主导地位,其中有有机质的生烃作用对烃源岩层极为重要<sup>[13-15]</sup>。干酪根成烃作用引起的超压是由 Momper(1978)提出的,生烃增压的基本原理是烃源岩中相对密度较大的干酪根成熟后生成的密度较小油气体积大幅超过原始干酪根的体积<sup>[12]</sup>。页岩在较高成熟度阶段,页岩气成分中重烃( $C_{2-5}$ )会发生二次裂解,形成更多小分子烃,进一步增加流体压力。根据热成因页岩气成藏机理分析,由于特-低孔渗特征,流体很难排出,页岩中特别是厚度较大的页岩中常常出现异常超压。页岩气藏发生构造沉降或抬升时,气藏压力滞留,也可能形成异常压力。

## 2.3 压力的影响

异常超压的生烃增压机制是常规天然气藏压力的重要成藏动力<sup>[16-17]</sup>。超压同时意味着孔隙中富含天然气,存在的储层能量可使产能增加。非常规页岩气属于连续型油气聚集,成藏运移距离一般较短,水柱压力与浮力在油气运聚过程中的作用非常局限,而压力的影响更加显著(图2)<sup>[18]</sup>。

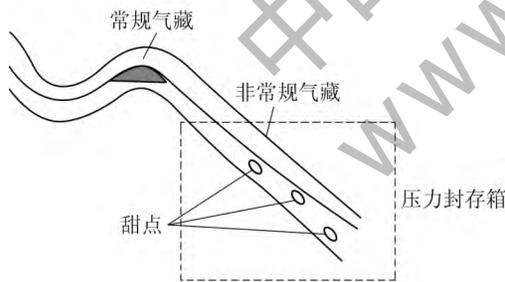


图2 油气藏分布模式

Fig. 2 Accumulation model of oil and gas

通常异常压力存在时,孔隙流体将承受一部分上覆岩层的压力,会阻碍压实作用。处于异常压力带内的泥页岩比相同埋深的正常孔隙度要高,为页岩气的大量聚集提供了更好的储层条件。当流体压力升高到一定程度时将产生微裂缝,也大幅增强了储层渗流性能。压力对页岩含气量影响首先表现在对气体的吸附能力的增加。理论上在压力较低的情况下,气体吸附需达到较高的结合能,当压力不断增

大,所需结合能不断减少,气体吸附的量随之增加。游离气的储存与压力、温度关系更密切,随压力的增加表现出平稳增加的趋势,但由于储集空间有限,压力增大到一定程度以后,含气量增加速率变缓。

同常规气成藏类似,页岩气也要一定封闭保存条件。而压力系统的性质反映了地下流体的能量和其内流体的封闭程度,泥页岩存在超压系统表明盆地不同层位流体的连通性差,不利于能量的流动交换。因此,超压的存在更有利于增强页岩油气的封存能力。页岩气赋存方式多样。压力较高时,气体赋存常以游离态为主导,如 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气藏具有微超压梯度的特征,其吸附态气体的含量较少<sup>[6]</sup>。在开采过程中,高压可能会导致吸附气的释放缓慢,但是会产出更多的游离气。页岩中的超压会提高开采过程中天然气的流速;另外,超压页岩孔隙增加改善页岩脆性即能在压裂过程中与水力作用相配合,使压开裂缝朝井眼汇集,优化压裂开采效率<sup>[2]</sup>。

## 3 有利富集区评价技术

页岩油气在有利页岩层地震响应、测井判别、钻采开发等方面与常规油气藏有很大不同,勘探评价技术也有其特殊性。通过与北美典型页岩气形成条件对比,页岩气地质评价的重点是寻找储量丰度高、单井产量高的核心区。根据异常压力理论,异常压力封存箱既是一个封闭的水动力系统和水化学系统,也是一个独立的生烃灶。考虑到页岩气自生自储自封闭特点,可将流体压力分析技术应用于页岩气富集区带评价中。北美新兴的页岩油气异常压力封存,国外 Chevron、BP 公司页岩气富集关键因素评判已考虑异常超压因素。在中国海陆相页岩构造复杂、断裂发育及活动性强的背景下,必须把地层压力作为一项关键性的重要参数进行考虑。国内贾承造等<sup>[19-20]</sup>提出了类似的核心区选择指标如下:

面积/km <sup>2</sup>	>500
有效单层厚度/m	>30
有机碳含量/%	>2.0
$R_o$ /%	>1.3
矿物组成(脆性/黏土)	>40% / <30%
埋深/m	1 500—3 500
压力	超压
敏感性	低
可压裂性	好

在实际勘探中,由于有效源岩、有效储层、异常高的地层压力等各成藏的有力因素是相伴出现的,对超压的预测就是对有利富集成藏区段的圈定。具体的选区评价首先依据泥页岩的分布及发育情况,结合地质与地化特征等判断页岩气的有利生成区;再从目的地层的流体压力场分析出发,以声波测井、地震速度资料为基础预测页岩气藏的异常超压区;从而在泥页岩裂缝带的发育规律背景下,寻找页岩气藏内部的超压富集甜点。

#### 4 对我国页岩气开发的启示

就国内各勘探区块而言,核心区的确定与压力因素关系尤为重要,超压成藏机理的正确解释及相关研究可为我国页岩气勘探开发工作取得新进展提供理论依据。

##### 4.1 南方海相盆地

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)。南方下古生界海相地层是资源主体,主要包括下寒武统与下志留统两套富有机质泥页岩,是目前页岩气勘探开发的重点层位<sup>[20-22]</sup>。南方下古生界优质泥页岩极为发育,但 $R_o$ 大多数为2.5%~4.0%,已处在生气晚期或进入生气下限阶段。同时地层体现为强烈抬升,有些地区存在多期强烈构造改造,所以页岩气地质特征较北美地区复杂,保存条件是大规模滞留成藏的关键。

要寻找页岩气“甜点”富集区,相对超压的地区最有可能。页岩气有利富集区的近期钻井结果揭示,上扬子蜀南、渝东地区深层存在超压现象,压力系数普遍大于1.3。经历多期构造运动改造的焦石坝构造在龙马溪组的优质页岩层系,已测高产层压力系数约为1.55。滇黔桂地区丁页2HF井位于贵州省习水县寨坝镇,也是一口针对龙马溪组页岩气突破探井,同样具有深部页岩层高温超压、含气量大的特点,

##### 4.2 东部断陷盆地

东部断陷盆地富油气凹陷古近系泥页岩与美国Barnett页岩,具有较好的可比性和较好的湖相页岩气成藏条件。以渤海湾盆地为代表,自1961年首次在东营凹陷营2井沙三段碎屑岩超压地层中发现高产油流以来,盆地超压的存在引起了广泛的关注。胡济世较早指出济阳拗陷现今存在异常超压生烃泥岩体。济阳拗陷三套页岩所处地层压力从常压到异

常超压均有分布,但大部分页岩处于异常超压带,压力系数可高达1.72。据何生等分析,东营凹陷沙三-四段超压带整体分布和超压发育幅度与成熟烃源岩的累积厚度、埋深和热成熟生烃作用具有明显的相关性<sup>[23]</sup>。目前总体上的地层压力系数高值区与厚层泥、页岩稳定分布范围比较吻合。以往钻井过程中频繁发生油或气侵、井涌和井喷等,也证明泥页岩储集层处于超压状态并预示大规模页岩气的存在。其他如东濮凹陷主力烃源岩沙河街组湖相泥页岩厚度大,在前梨园洼陷等区压力系数达到1.2~2.0。该套岩层先后进入成熟、过成熟阶段,具备自生自储式裂缝性泥页岩油气成藏条件。

##### 4.3 西北地区

西北主要盆地均具备页岩气大规模成藏的地质条件,如新疆东北三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统超压,泥页岩生烃潜力大,页岩油气富集<sup>[24-25]</sup>。常规油气藏储量丰富的塔里木盆地,预计超压页岩气藏同样潜力巨大。西北油田将在孔雀河地区部署页岩气勘探井,评价多套烃源岩具有页岩气勘探潜力。从页岩气形成的物质基础和储集特征等方面看,鄂尔多斯盆地上古生界的页岩和三叠系延长组泥页岩分布广泛,资源潜力也比较大。

#### 5 结 论

1) 我国特殊的地质条件决定不能直接套用北美页岩气勘探开发理论,但分析北美地区页岩气勘探开发特点对找准国内页岩气富集高产的目标仍大有裨益。当前新兴的北美页岩油气区超压特征明显,如Barnett页岩中存在小幅超压。美国储量更大的超压页岩气区带不断涌现,其中以Marcellus页岩和Haynesville页岩气藏为典型。加拿大勘探开发的地区主要在西部沉积盆地包括泥盆系Horn River盆地与三叠系Montney页岩、Bakken超压页岩等。北美新兴超压页岩特征指标优越,气藏产能较高且发展前景良好。

2) 我国页岩气资源跟美国相比情况更加复杂,任务艰巨,需考虑更多控制因素。就各勘探区块而言,核心区的确定与地层压力的关系尤为重要。具体的富集选区评价应加强地层流体的压力分析,准确地预测页岩气藏的异常超压甜点区。南方下古生界海相地层已取得重大勘探突破,东部断陷盆地古近系和西北诸多盆地超压页岩气亦拥有巨大潜力。

## 参考文献(References):

- [1] 张大伟. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 1-5.  
Zhang Dawei. Main solution ways to speed up shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 1-5.
- [2] 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.  
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [3] 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.  
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 刘大锰, 李俊乾, 李紫楠. 我国页岩气富集成藏机理及其形成条件研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 66-70, 74.  
Liu Dameng, Li Junqian, Li Zinan. Research on enrichment and accumulation mechanism of shale gas and its formation conditions in China[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 66-70, 74.
- [5] 刘洪林, 王红岩. 中国南方海相页岩超低含水饱和度特征及超压核心区选择指标[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 140-144.  
Liu Honglin, Wang Hongyan. Ultra low water saturation characteristics and the identification of over-pressured play fairways of marine shales in south China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 140-144.
- [6] John B Curtis. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [7] 武晓玲, 高波, 叶欣, 等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 455-462.  
Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455-462.
- [8] 赵靖舟, 方朝强, 张洁, 等. 由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(2): 1-7.  
Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, Zhang Jie et al. Evaluation of China shale gas from the exploration and development of North America shale gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science, 2011, 26(2): 1-7.
- [9] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay[J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2): 5-7.
- [10] 孟庆峰, 侯贵廷. 阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩气藏地质特征及启示[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(1): 67-73.  
Meng Qingfeng, Hou Guiting. Geological characteristic and enlightenment of Marcellus shale gas[J]. Petroleum Exploration in China, 2012, 17(1): 67-73.
- [11] McMaster G E. Gas reservoirs, deep basin, western Canada[J]. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1983, 20(3): 62-66.
- [12] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 465-470.  
Fan Changyu, Wang Zhenliang. Geological factors and process in enrichment and high production of shale gas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 465-469.
- [13] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [14] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating over-pressure in sedimentary basins: a reevaluation[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [15] 陈中红, 查明. 断陷湖盆超压分布特征及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 509-515.  
Chen Zhonghong, Zha Ming. Distribution characteristics of over-pressure and its controlling to hydrocarbon accumulation in terrigenous faulted basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 509-515.
- [16] 马卫, 汪东良, 李志生, 等. 湖相烃源岩生烃增压模拟实验[J]. 石油学报, 2013, 34(S1): 65-69.  
Ma Wei, Wang Dongliang, Li Zhisheng et al. A simulation experiment of pressurization during hydrocarbon generation from lacustrine source rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 65-69.
- [17] 李明诚, 李剑. “动力圈闭”: 低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 718-722.  
Li Mingcheng, Li Jian. “Dynamic trap”: a main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability tight reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 718-722.
- [18] Ronald C Surlam, Jiao Zunsheng(焦尊生), Yuri Ganshin. 勘探异常压力天然气藏的新思路: 探明非常规天然气资源的关键要素[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 307-338.  
Ronald C Surlam, Jiao Zunsheng, Yuri Ganshin. A new approach to exploring for anomalously pressured gas accumulations: the key to unlocking huge unconventional gas resources[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 307-338.
- [19] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.  
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [20] 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.  
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [21] 杨宁, 唐书恒, 张松航, 等. 湘西北龙马溪组页岩气地质条件及有利区优选[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 104-108.  
Yang Ning, Tang Shuheng, Zhang Songhang et al. Geological conditions

(下转第76页)

- two organic-rich shales in southeastern Chongqing Area: insight from Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope (FIB-SEM) [J]. *FIB-SEM Petroleum Geology* 2015 (1): 109-116.
- [13] Hughes R G ,Blunt M J. Network modeling of multiphase flow in fractures [J]. *Advances in Water Resources* ,2001 ,24( 3) : 409-421.
- [14] Yan C H ,Whalen R T ,Beaupré G S ,*et al.* Reconstruction algorithm for polychromatic CT imaging: application to beam hardening correction. [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging* ,2000 ,19( 1) : 1-11.
- [15] Vincent L ,Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on* ,1991 ,13( 6) : 583-598.
- [16] 姚艳斌,刘大锰,蔡益栋,等.基于NMR和X-CT的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. *中国科学:地球科学* ,2010 ,40( 11) : 1598-1607.  
Yao Yanbin ,Liu Dameng ,Cai Yidong ,*et al.* Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography [J]. *Scientia Sinica Terrae* 2010 ,40( 11) : 1598-1607.
- [17] Ma J ,Couples G D ,Jiang Z ,*et al.* A multi-scale framework for digital core analysis of gas shale at millimeter scales [C]// *Unconventional Resources Technology Conference* ,Denver ,Colorado ,USA 2014.
- [18] Zarrouk S J ,Moore T A. Preliminary reservoir model of enhanced coalbed methane (ECBM) in a subbituminous coal seam, Huntly Coalfield, New Zealand [J]. *International Journal of Coal Geology* , 2009 ,77( 1/2) : 153-161.
- [19] Øren P ,Bakke S. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2003 ,39( 3) : 177-199.
- [20] Ioannidis M A ,Chatzis I. On the Geometry and Topology of 3D Stochastic Porous Media. [J]. *Journal of Colloid & Interface Science* 2000 ,229( 2) : 323-334.
- [21] M A K ,H A C ,Saadatfar M ,*et al.* Virtual materials design: properties of cellular solids derived from 3D tomographic images [J]. *Advanced Engineering Materials* 2005 ,7( 4) : 238-243.
- [22] Lindquist W B ,Venkatarangan A ,Dunsmuir J ,*et al.* Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 2000 ,105( B9) : 21509-21527.
- [23] Prodanovi M ,Lindquist W B ,Seright R S. 3D image-based characterization of fluid displacement in a Berea core [J]. *Advances in Water Resources* 2007 ,30( 2) : 214-226.
- [24] Sok R M ,Knackstedt M A ,Sheppard A P ,*et al.* Direct and stochastic generation of network models from tomographic images; effect of topology on residual saturations [J]. *Transport in Porous Media* 2002 ,46( 2) : 345-371.
- [25] Delerue J F ,Perrier E. DXSoil: a library for 3D image analysis in soil science [J]. *Computers & Geosciences* ,2002 ,28( 9) : 1041-1050.
- [26] Vogel H J ,Roth K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure [J]. *Advances in Water Resources* , 2001 ,24( 3/4) : 233-242.
- [27] Silin D ,Patzek T. Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications* 2006 ,371( 2) : 336-360.
- (上接第166页)
- and favorable exploration zones of shale gas in Longmaxi Formation of Northwestern Hunan Area [J]. *Coal Science and Technology* , 2014 ,42( 8) : 104-108.
- [22] 李贤庆,赵佩,孙杰,等.川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J]. *煤炭学报* ,2013 ,38( 5) : 864-869.  
Li Xianqing ,Zhao Pei ,Sun Jie ,*et al.* Study on the accumulation conditions of shale gas from the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin [J]. *Journal of China Coal Society* 2013 ,38( 5) : 864-869.
- [23] 何生,宋国奇,王永诗,等.东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素[J]. *地球科学:中国地质大学学报* , 2012 ,37( 5) : 1029-1042.  
He Sheng ,Song Guoqi ,Wang Yongsi ,*et al.* Distribution and major control factors of the present day large scale overpressured system in Dongying Depressions [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences* 2012 ,37( 5) : 1029-1042.
- [24] 柳波,吕延防,赵荣,等.三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统地层超压与页岩油富集机理[J]. *石油勘探与开发* , 2012 ,39( 6) : 699-705.  
Liu Bo ,Lyu Yanfang ,Zhao Rong ,*et al.* Formation overpressure and shale oil enrichment in the shale system of Lucaogou Formation ,Malang Sag ,Santanghu Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2012 ,39( 6) : 699-705.
- [25] 徐波,李敬含,谢东,等.中石油探区主要盆地页岩气资源分布特征研究[J]. *特种油气藏* ,2011 ,18( 4) : 1-6.  
Xu Bo ,Li Jinhan ,Xie Dong ,*et al.* Distribution of shale gas resources in CNPC exploration area [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs* 2011 ,18( 4) : 1-6.