

# 鲁西地区石炭-二叠系太原组页岩气潜力

韩作振<sup>1</sup>, 李 贇<sup>1</sup>, 高丽华<sup>1</sup>, 秦 祯<sup>2</sup>, 孟 阳<sup>3</sup>, 韩 梅<sup>1</sup>, 刘固耀<sup>1</sup>, 彭 超<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015;

3. 中国石化胜利油田分公司 开发处, 山东 东营 257000)

**摘 要:**通过野外剖面观测取样、室内薄片鉴定、X射线衍射分析、扫描电镜分析及有机地球化学分析,结合钻井资料,从富有机质页岩的地质背景、有机地球化学指标、储层特征等方面,探讨鲁西石炭-二叠系太原组页岩特征。研究发现,鲁西地区太原组页岩厚度20~140 m,平均70 m,单层页岩厚度一般5~80 m,埋深140~4 000 m,厚度大,埋深适中。太原组页岩有机碳含量为0.82%~10.1%,平均值达3.59%,有机质含量高,属非常好的烃源岩;干酪根类型为II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>和III型,生气及吸附能力强; $R_o$ 为1.05%~1.9%,平均值为1.31%,处于高成熟热裂解生气阶段。太原组页岩脆性矿物含量30%~60%,平均值为46.44%,含量高,易于水力压裂人工造缝;页岩孔隙主要为晶间微孔、粒内溶蚀微孔和裂缝。鲁西地区太原组页岩与美国Barnett页岩具有相似性,具有良好的页岩气潜力。

**关键词:**页岩气;太原组;海相页岩;鲁西地区

中图分类号:P618.130.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)02-0051-07

## Shale Gas Resource Potential of Permo-Carboniferous System Taiyuan Formation in West Shandong Province

Han Zuozhen, Li Yun, Gao Lihua, Qin Zhen, Meng Yang, Han Mei, Liu Guyao, Peng Chao

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 253015, China;

2. Shandong Provincial Lubei Geo-engineering Exploration Inститутs, Dezhou, Shandong 253015, China;

3. Development Department, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

**Abstract:** Through outcrop investigation and sampling, thin-section observation, X diffraction, scanning electron microscopy, organic geochemistry experiment and drilling data analysis, this paper explored the shale characteristics of Permo-Carboniferous System Taiyuan formation in West Shandong province, from aspects of geological background, organic geochemistry and reservoir conditions of the organic-rich shale. The research shows that with a thickness of 20~140 m, averaging 70 m, single layer thickness of 5~80 m and burial depth of 140~4 000 m, the Taiyuan formation shale in West Shandong province enjoys a great thickness and a moderate burial depth. With the organic carbon content of 0.82%~10.1%, averaging 3.59%, the Taiyuan formation shale is a superduper hydrocarbon source rock with high organic content. With the kerogen types of II<sub>1</sub>, II<sub>2</sub> and III, the shale has strong gas production and adsorption capacity. With  $R_o$  of 1.05%~1.9%, averaging 1.31%, the shale is at high mature thermal cracking gas stage. With a high brittle mineral content of 30%~60%, averaging 46.44%, the Taiyuan formation shale is apt to make artificial cracks with hydraulic fracturing. The shale pores are mainly intergranular micropores, particle micropores and fractures. Similar to Barnett shale in America, Taiyuan formation shale in West Shandong province has great potentiality of shale gas.

**Key words:** shale gas; Taiyuan formation; marine shale; West Shandong province

收稿日期:2014-12-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB723104);国家自然科学基金项目(41372108,41372134);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133718130001);山东省高校优秀科研创新团队计划项目;山东省科技发展计划项目(2013G0020403);青岛市重点科研项目发展计划(13-4-1-2-gx)

作者简介:韩作振(1965—),河南新乡人,教授,博士生导师,主要从事油气沉积与成藏方面的研究工作。E-mail:hazz@163.com

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气,成分以甲烷为主<sup>[1-2]</sup>。美国是页岩气开发最早、研究最深入、目前产量最大的国家<sup>[3]</sup>。我国页岩气资源十分丰富,初步估计资源量可达  $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[4-5]</sup>。中国的页岩气富集类型分为南方型、北方型及西北型;以扬子地台为核心的南方型古生界海相页岩气;以华北地台为主体的北方型页岩气;以塔里木地台为基础的西北型页岩气<sup>[6]</sup>。目前,国内针对南方和西北页岩气的研究较多,而对华北尤其是鲁西地区页岩气的研究较少。因此,开展鲁西地区页岩气的研究尤为必要。

地质资料显示,鲁西地区石炭-二叠系含煤地层泥页岩厚度大,约 200~300 m;有机质丰度高,有机碳含量为 0.57%~4.59%,氯仿沥青“A”含量为 0.012%~0.251%,有机质类型好,干酪根类型主要为 II 型、III 型;R<sub>o</sub> 值为 0.6%~1%,整体处于成熟-高成熟阶段,生烃潜力为 0.42~2.86 kg/t,具有较好的页岩气资源潜力<sup>[7]</sup>。其中太原组作为一套海陆交互相含煤地层,其富有机质泥页岩是页岩气勘探的重点层系。位于美国页岩气年产量第二位<sup>[8]</sup>的 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩同为海相沉积岩,且主要分布于密西西比系(下石炭统)及宾夕法尼亚系(上石炭统)<sup>[9]</sup>,可以作为页岩气勘探的类比模型,为鲁西地区石炭-二叠系页岩气勘探提供参考和借鉴<sup>[10]</sup>。

## 1 地质背景

鲁西地区位于华北板块东南缘,属华北地层大区、晋冀鲁豫地层区之鲁西地层分区。研究区构造极其复杂,地层出露相对完整,太原组岩性以灰-灰黑色泥岩、页岩和粉砂岩为主,夹砂岩、石灰岩和煤层,整合于本溪组之上,是一套海陆交互相含煤沉积,其中泥页岩主要形成于泻湖相、潮坪相,为海相泥页岩。泥页岩埋深 140~4 000 m,厚度 20~140 m,平均厚 70 m,单层泥页岩厚度一般为 5~80 m(图 1)。美国 Barnett 页岩埋

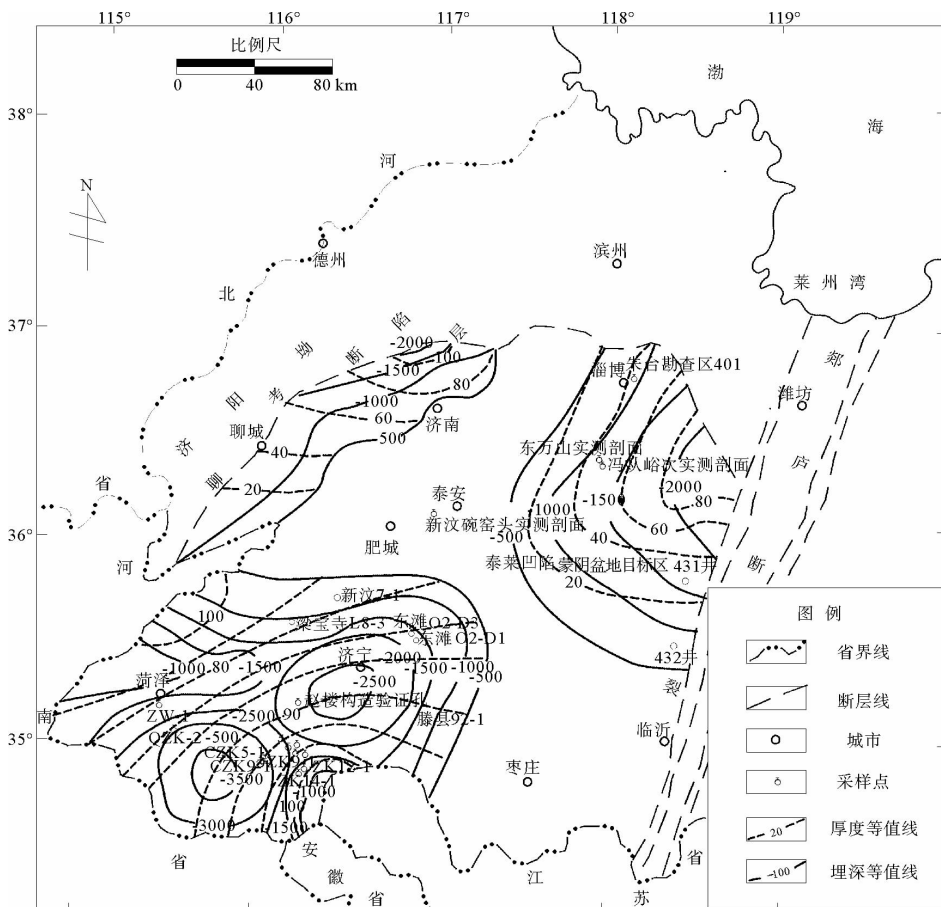


图 1 鲁西地区太原组页岩厚度及顶面埋深等值线图

Fig. 1 The thickness and burial depth of shale top interface contour map of Taiyuan formation in West Shandong province

深为 1 981~2 591 m,最大厚度 305 m,平均厚度 76 m,中心产区的平均厚度约 106.7 m。

## 2 有机地球化学指标

### 2.1 有机质丰度

有机质丰度是指单位质量岩石中有机质的含量<sup>[11]</sup>。它既影响页岩裂缝的发育程度,又决定了页岩的气体吸附能力。鲁西地区太原组暗色页岩总有机碳含量(total organic carbon, TOC)为 0.82%~10.1%,平均值为 3.59%;与 Barnett 页岩 TOC 平均值 4.5% 比较接近,属于非常好的泥质烃源岩(图 2)。

### 2.2 有机质类型

有机质类型是衡量有机质生烃能力和吸附性的一个重要因素。有机质干酪根一般划分为三种类型,即 I 型、II 型和 III 型, 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。且由于 III 型干酪根具有较大微孔体积,具有更高的甲烷气体吸附量<sup>[12-13]</sup>。研究发现,鲁西太原组干酪根类型包括 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 和 III 型(图 3),Barnett 页岩有机质干酪根类型以 II 型为主,类型十分相似。

烃源岩干酪根中有机显微组分的成因和母质来源不同,生烃潜力也不同。通过透射光-荧光干酪根显微组分鉴定,腐泥质镜下团粒结构明显,具有大量薄膜状无定形原始生物结构(图 4(a))。镜质组主要为正常镜质体和荧光镜质体,呈分散状分布于岩石基质中,既不顺层,也不出现在裂隙中(图 4(b))。惰质组主要见丝质体、菌类体、半丝质体及碎屑惰性体,形状各异,轮廓分明,边缘常呈棱角状(图 4(c)),无任何荧光显示。研究区太原组泥页岩腐泥组含量较高,表明其主要生烃母质是腐泥组分,且保存条件较好,具有很高的生烃潜力。

### 2.3 有机质成熟度

有机质成熟度( $R_o$ )是确定有机质生油、生气或有机质向烃类转化程度的关键指标。研究区太原组页岩  $R_o$  范围为 1.05%~1.9%,平均值为 1.38%,属于成熟-高成熟阶段,进入生气窗,成因类型为热裂解气(图 5)。Barnett 页岩气  $R_o$  分布在 0.7%~3.0%,其中  $R_o$  为 1.1%~1.4% 的是主要产气区,鲁西地区太原组  $R_o$  平均值恰位于这个区间。

## 3 储层特征

### 3.1 矿物组成

页岩的矿物组成主要包括粘土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石)和脆性矿物(石英、斜长石、方解石、白云石)。粘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。粘土矿物发育层间微孔隙,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场所。但高粘土矿物含量的页岩塑性强,不利于页岩体

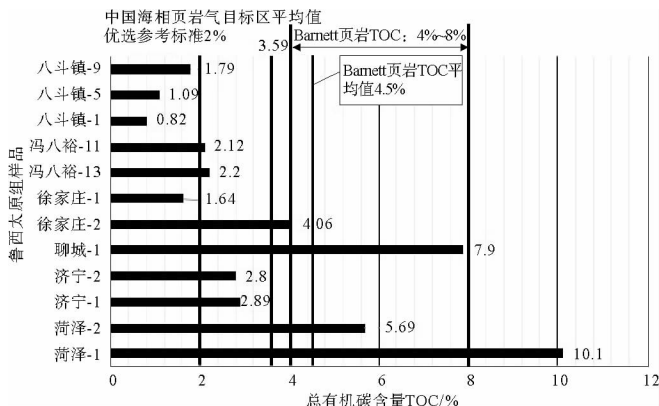


图 2 鲁西地区太原组泥页岩总有机碳含量图  
Fig. 2 Shale TOC of Taiyuan formation in West Shandong province

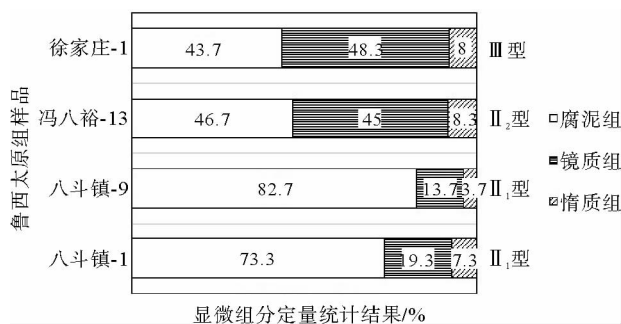
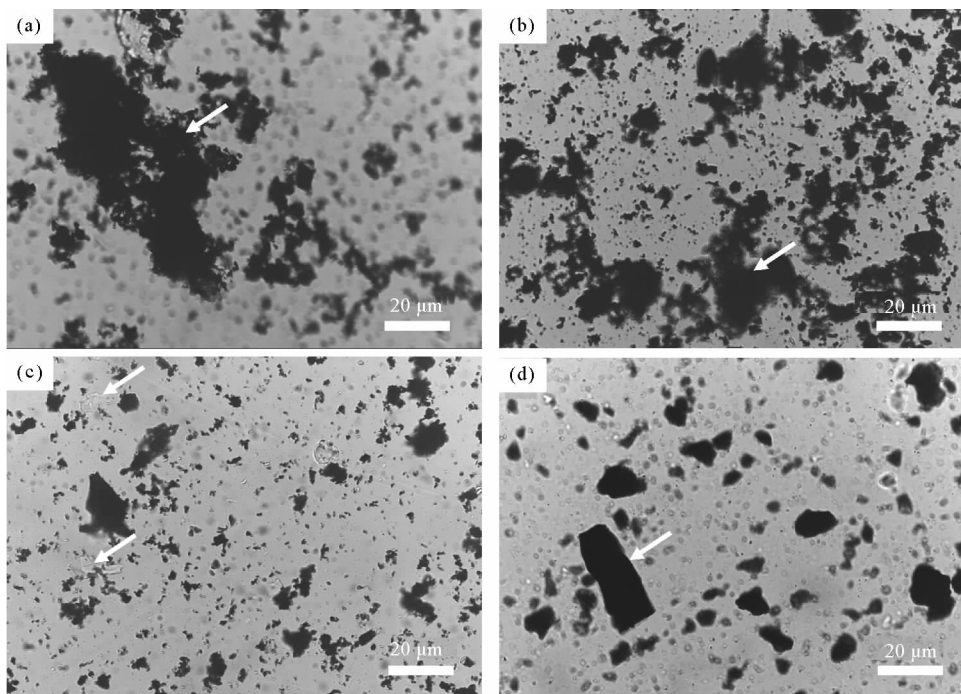


图 3 鲁西地区太原组显微组分定量统计结果  
Fig. 3 Maceral quantitative statistical results of Taiyuan formation in West Shandong province



(a)淄博八斗镇,太原组,透射光;(b)淄博八斗镇,太原组,透射光;(c)淄博冯八峪,太原组,透射光;(d)淄博八斗镇,太原组,透射光

图 4 淄博地区太原组干酪根镜鉴照片

Fig. 4 Kerogen identification photoes of Taiyuan formation in Zibo area

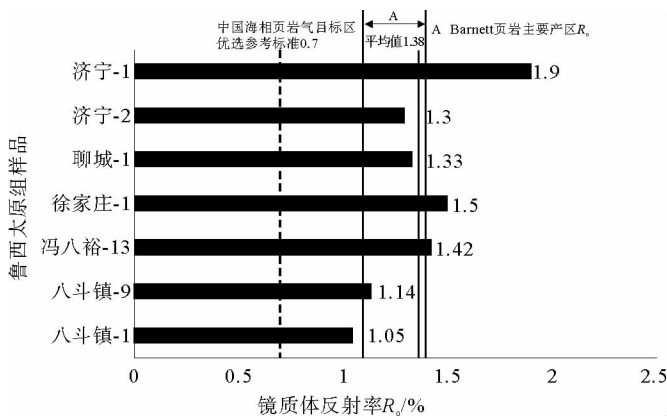


图 5 鲁西地区太原组镜质体反射率分析结果

Fig. 5 Vitrinite reflectance results of Taiyuan formation in West Shandong province

积改造。页岩中脆性矿物含量高,岩石脆性强,在外力作用下易形成天然裂缝和诱导裂缝,有利于页岩气开采。在我国海相页岩气储层评价标准中,将页岩中石英、方解石等脆性矿物的含量大于 40%、粘土矿物含量小于 30% 作为一个重要评价指标。

利用 X 射线衍射分析太原组暗色富有机质泥页岩矿物成分,碎屑矿物(石英、斜长石)含量 30%~57%、碳酸盐矿物(方解石、白云石)含量 2%~31%、粘土矿物(高岭石,伊利石和蒙脱石)含量 37%~65%。Barnett 页岩碎屑矿物含量 40%~70%,碳酸盐矿物 2%~30%,粘土矿物 25%~50%(图 6)。研究区太原组页岩的脆性矿物含量比 Barnett 页岩稍低,粘土矿物含量稍高,总体很接近,说明其具备良好的页岩气储集及开发条件。

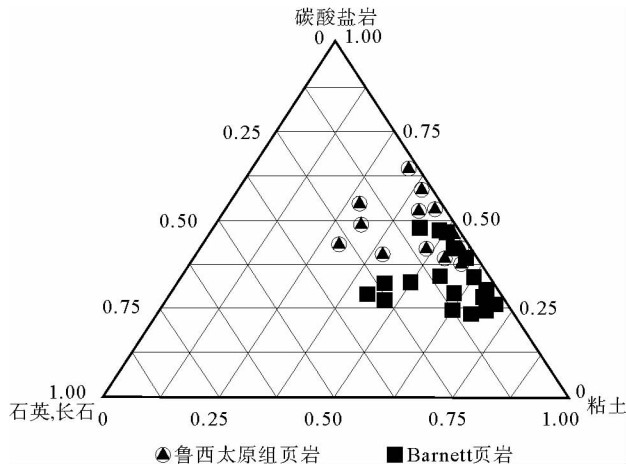
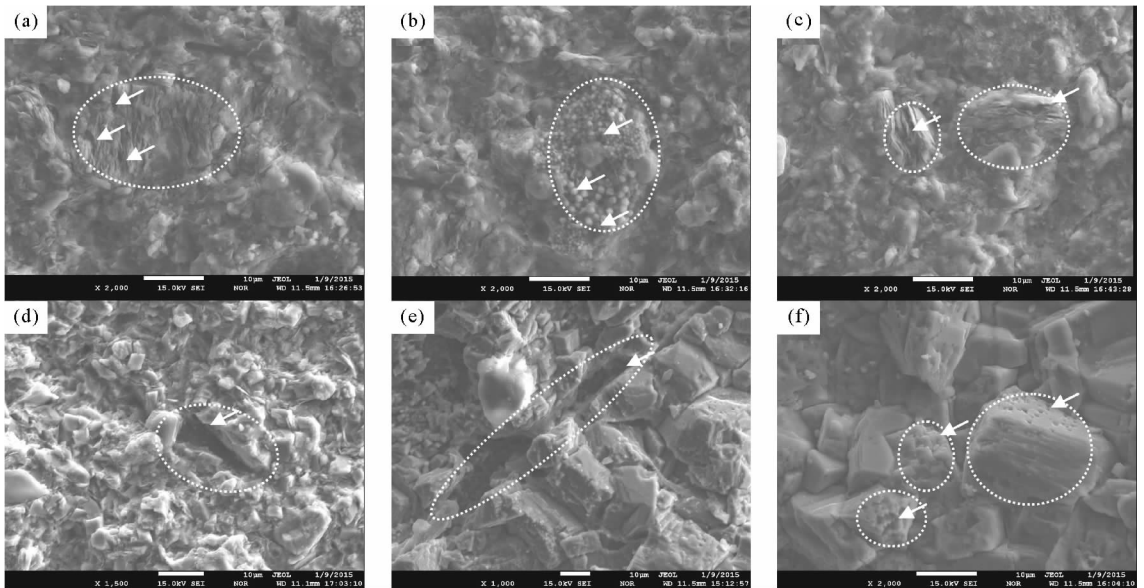


图6 鲁西地区太原组页岩矿物成分三角图

Fig. 6 Mineral composition triangle chart of shale in Taiyuan formation of West Shandong province

### 3.2 孔隙特征

近年来,随着非常规油气藏勘探开发研究的深入,页岩储层的孔隙结构也受到了广泛关注<sup>[14-15]</sup>。页岩作为一种致密油气储层,其孔径达到纳米量级。Mississippian盆地Barnett页岩孔径范围为5~750 nm,平均为100 nm<sup>[16]</sup>;中国四川盆地页岩孔径约100 nm<sup>[17-18]</sup>。页岩储层的结构与孔隙特性不仅影响气体的储集和吸附能力,而且影响气体的运移<sup>[19]</sup>。扫描电子显微镜照片显示,鲁西太原组泥页岩内部有大量微孔隙和裂缝,孔径在1~500 nm之间,与Barnett页岩和中国四川盆地相似。研究区页岩的储集空间类型主要为显微孔隙和裂缝两类:①显微孔隙分为粒间孔、次生溶蚀孔、晶间孔、粘土矿物层间微孔以及有机质微孔;②裂缝分为构造缝和成岩缝(图7)。这些微孔隙和裂缝中发育大量的内表面积,具有许多潜在吸附能力,可以储存大量气体。从孔隙对页岩气的吸附影响来看,鲁西太原组页岩有利于吸附气的形成。



(a) 片状粘土矿物溶蚀形成的微孔隙,淄博八斗镇,太原组;(b) 黄铁矿微球团颗粒晶间孔,淄博八斗镇,太原组;  
(c) 片状粘土矿物溶蚀形成的层间孔隙,淄博八斗镇,太原组;(d) 粘土矿物粒间孔,淄博八斗镇,太原组;  
(e) 构造裂缝,淄博冯八峪,太原组;(f) 碎屑矿物粒内溶孔,淄博冯八峪,太原组

图7 鲁西地区太原组页岩孔隙发育特征

Fig. 7 Shale porosity characters of Taiyuan formation in West Shandong province

#### 4 对比分析及含气量预测

将鲁西地区石炭-二叠系太原组富有机质页岩与美国 Barnett 页岩的地质条件进行对比(表 1),可以发现二者在地质背景、有机地球化学指标、储层特征等方面都十分相似,说明鲁西地区太原组页岩具备优越的页岩气形成条件。

表 1 鲁西地区太原组页岩与美国 Barnett 页岩特点对比表<sup>[14]</sup>

Tab. 1 Comparison between shale gas of Taiyuan formation in Western Shandong province and Barnett in North America

国家	地点	页岩类型	时代	地层	埋深/m	厚度/m	TOC/%	R <sub>o</sub> /%	有机质类型	脆性矿物/%
美国	福特沃斯	海相	石炭纪	Barnett	1 981~2 591	61~152	4~8 平均 4.5	0.7~3	II	40~70
中国	鲁西	海相	石炭-二叠纪	太原组	140~4 000	20~140	0.82~10.1 平均 3.59	1.05~1.9	II <sub>1</sub> 、II <sub>2</sub> 、III	30~60

Barnett 页岩气藏生产表明,气体产量大的地方,有机碳含量相对较高,有机碳含量和气体含量(包括总气体含量和吸附气含量)具有很好的正相关关系(图 8)。根据图 8 中 Barnett 页岩有机碳含量与含气量的关系预测鲁西地区太原组总含气量平均值为 4.71 m<sup>3</sup>/t,吸附气含量平均 2.15 m<sup>3</sup>/t。

#### 5 结论

1)鲁西地区太原组页岩为海相页岩,分布范围广泛,埋深 140~4 000 m,厚度 20~140 m,平均厚 70 m,单层泥页岩厚度一般 5~80 m,有利于页岩气成藏。

2)太原组暗色富有机质泥页岩矿物成分,碎屑矿物(石英、斜长石)含量 30%~57%、碳酸盐矿物(方解石、白云石)含量 2%~31%、粘土矿物(高岭石,伊利石和蒙脱石)含量 37%~65%。脆性矿物含量(30%~60%),平均值为 46.44%,含量高,易于水力压裂人工造裂缝;页岩孔隙主要为晶间微孔、粒内溶蚀微孔和裂缝。

3)鲁西地区太原组暗色页岩 TOC 为 0.82%~10.1%,平均值为 3.59%,属于非常好的泥质烃源岩;干酪根类型包括 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 和 III 型,腐泥组含量较高,表明其主要生烃母质是腐泥组分,且保存条件较好,具有很高的生烃潜力;R<sub>o</sub> 范围为 1.05%~1.9%,平均值为 1.38%,属于成熟-高成熟阶段,进入生气窗,成因类型为热裂解气。

4)鲁西地区太原组页岩的地质背景、有机地球化学指标、储层特征等方面都与美国 Barnett 页岩十分相似,具备优越的页岩气形成条件。根据 Barnett 页岩有机碳含量与含气量的关系估算鲁西地区太原组页岩总含气量平均值为 4.71 m<sup>3</sup>/t,吸附气含量平均 2.15 m<sup>3</sup>/t。

#### 参考文献:

[1]张金川,薛会,张德明,等.页岩气及其成藏机理[J].现代地质,2003,17(4):466-467.  
 [2]龚晓峰,何家雄,吴从康,等.中国非常规天然气资源的基本地质地球化学特征及特点[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(5):95-105.  
 Gong Xiaofeng, He Jiexiong, Wu Congkang, et al. Basic geological and geochemical background of unconventional gas resources in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(5): 95-105.  
 [3]Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western

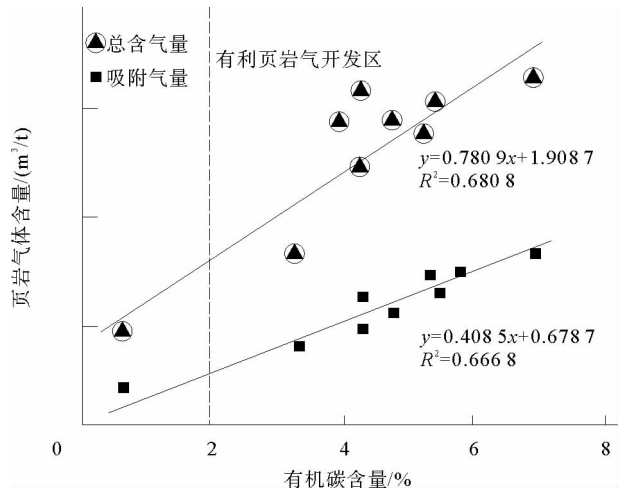


图 8 Barnett 页岩总有机碳含量与含气量的关系图<sup>[20]</sup>

Fig. 8 Relationship between TOC and gas content of Barnett shale

- Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92: 87-125.
- [4] 赵群, 王红岩, 刘人和, 等. 世界页岩气发展现状及我国勘探前景[J]. 天然气技术, 2008, 2(3): 11-14.  
Zhao Qun, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. Global development and China's exploration for shale gas[J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(3): 11-14.
- [5] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 689-694.  
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Research status and trends of shale gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 689-694.
- [6] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109-114.  
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.
- [7] 张增奇, 田京祥, 张春池, 等. 国内外页岩气研究进展及山东省页岩气资源潜力[J]. 山东国土资源, 2012, 28(10): 1-6.  
Zhang Zengqi, Tian Jingxiang, Zhang Chunchi, et al. Research progress on shale gas at home and abroad and shale gas resource potentiality in Shandong province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2012, 28(10): 1-6.
- [8] US Energy Information Agency. Annual Energy Outlook[R]. America: United States Government Printing, 2011, DOE/EIA-0383.
- [9] Jarvie D M, Hill R J, Ruble 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.
- [10] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [11] 卢炳雄, 郑荣才, 文华国, 等. 皖南地区下寒武统页岩气成藏地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 712-719.  
Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in southern Anhui province[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 712-719.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [15] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.  
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 775-782.
- [16] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [17] 邹才能, 李建忠, 董大忠, 等. 中国首次在页岩气储集层中发现丰富的纳米级孔隙[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 508-509.  
Zou Caineng, Li Jianzhong, Dong Dazhong, et al. Rich nanometer pore in shale gas reservoir is discovered in China for the first time[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 508-509.
- [18] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [19] Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale gas flow in shale gas sediments[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(10): 55-61.
- [20] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.