

南华北盆地二叠系山西组页岩气 成藏地质条件及勘探前景

孙 军^{1,2}, 郑求根^{1*}, 温珍河², 侯方辉², 肖 睿³, 任君喆¹

(1 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2 国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要:对南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩发育的地质背景、有机地球化学参数以及钻井资料的分析研究表明,南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩在研究区内分布广泛,沉积厚度达 30~100 m,其中在太康、鹿邑地区的平均厚度超过 60 m;有机质丰度中等—高(1.76%~4.16%),镜质体反射率适中,有机质处于成熟—过成熟阶段。研究区山西组地层发育微孔隙、微裂缝等孔隙类型,储集性能较好。等温吸附实验测得暗色泥页岩吸附气含量平均为 1.32 m³/t,表明山西组暗色泥页岩具有较强的吸附能力,吸附性较好。综合研究认为,南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩在荥阳—通许—太康—郸城一带分布厚度大,埋深适中,页岩气保存地质条件较好,具有良好的资源开发前景。

关键词:页岩气;成藏条件;山西组;南华北盆地

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

页岩气是指主体以吸附、游离等方式存在于暗色泥页岩及其间所夹砂质、粉砂质泥岩地层中的一种非常规天然气资源^[1-3]。我国富含有机质泥页岩分布广泛,具备页岩气成藏条件,页岩气资源潜力巨大^[4]。南华北盆地自 20 世纪 50 年代进行油气勘探以来,积累了大量的研究成果。前人研究证实南华北盆地二叠系发育一套海陆交互相的沉积地层,暗色泥页岩分布广泛,沉积厚度大^[5,6]。但由于我国页岩气研究起步较晚、南华

北地区地质演化复杂等原因,目前对该地区页岩气成藏条件的研究程度较低。为此,通过野外踏勘、样品采集、室内试验分析等手段,结合页岩气研究的最新进展,对南华北盆地二叠系山西组的页岩气成藏地质条件及资源勘探前景进行了分析。

1 区域地质背景

南华北盆地位于华北地台南部,东邻郯庐断裂带,南接秦岭—大别造山带,西达豫西隆起区,是一个在华北地台基础上发育起来的中、新生代叠合盆地^[6,7]。该盆地的构造演化受控于秦岭—大别造山带和郯庐断裂带,总体呈 NW—NWW 向构造格局。盆地内自北向南依次可划分为开封坳陷、太康隆起、周口坳陷、长山隆起和信阳—合肥坳陷 5 个次级构造单元,各次级构造单元又划分为若干凹陷和凸起,总面积约 150 000 km²(图 1)^[6-9]。

收稿日期:2014-01-08

基金项目:中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504);全国油气资源战略选区调查与评价项目(2009YQXQ15-07001)

作者简介:孙 军(1989—),男,在读硕士,主要从事海洋地质与构造地质方面的研究工作. E-mail:sunjun607@126.com

通讯作者:郑求根(1964—),男,副教授,主要从事海底构造与资源方面的研究工作. E-mail:zhengqiugen@126.com

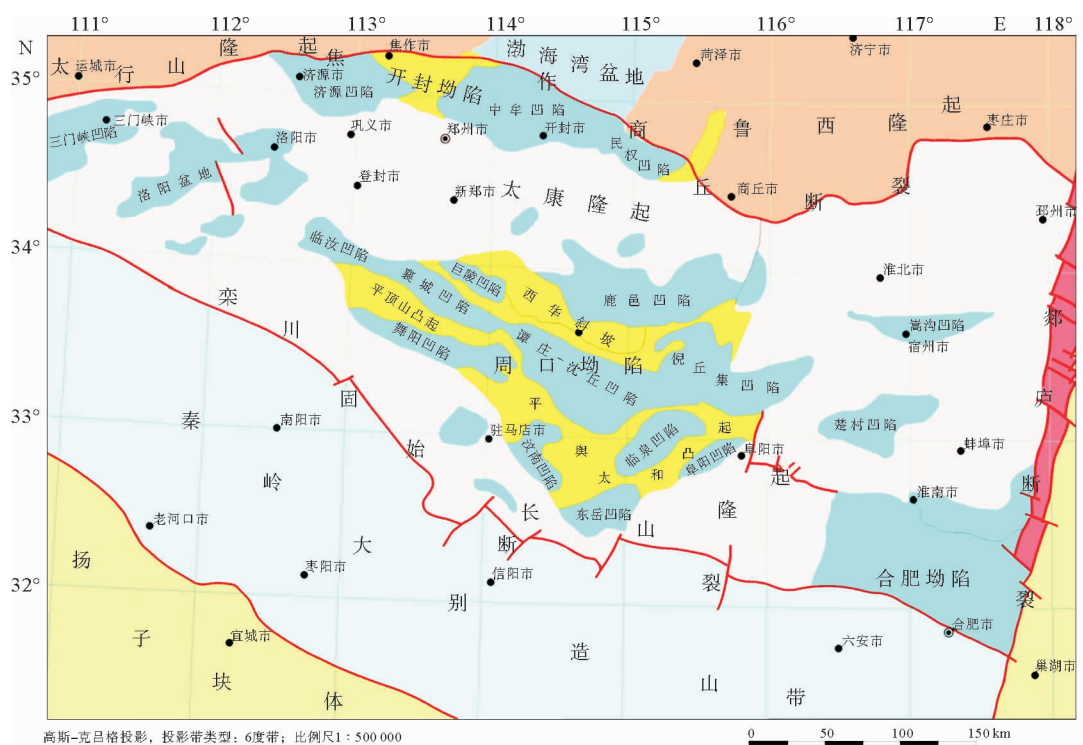


图1 南华北盆地构造位置及构造单元划分

Fig. 1 Tectonic map of Southern North China Basin

南华北盆地在晚古生代为华北克拉通盆地的一部分,受晚石炭世全球海平面上升影响,研究区开始接受海侵,开始了从陆表海到陆相盆地的演化过程^[8]。二叠系早期受阴山古陆抬升影响,华北陆表海海水自西北向东南退缩,南华北盆地山西组发育了一套以海相和海陆过渡相为主的沉积地层:即早期为在陆表海海水逐渐退出基础上形成的潮坪和泥炭沼泽相沉积;晚期为河流作用为主的三角洲相沉积^[6,7,10,11]。

2 暗色泥页岩沉积特征

南华北盆地二叠系山西组自下而上可分为2段:下段为海陆过渡环境下的潮坪和泥炭沼泽相沉积,主要发育黑色碎屑岩、泥岩、粉砂质泥岩、炭质泥岩和煤层等;上部为河流作用为主的三角洲相沉积,发育中细砂岩、黑色砂质泥岩、泥岩、煤层、紫斑泥岩等^[5,10]。山西组地层在平面展布上呈北厚南薄、由东向西减薄之势,暗色泥页岩的厚度中心位于研究区北部的太康隆起—鹿邑凹陷—洛阳盆地一带,平均厚度超过60 m,并以此向剥

蚀区减薄,盆地沉积中心厚度在100 m左右,其他地区厚度大多在30 m左右^[10,11](图2)。

3 暗色泥页岩有机地球化学特征

3.1 有机质类型

有机质类型是衡量暗色泥页岩生气潜力的重要因素。南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩主要为煤系烃源岩,包括煤系泥岩、炭质泥页岩和煤等^[7,10]。有机质类型以腐殖型为主。暗色泥页岩的显微组分同煤相比明显不同,大多富含壳质组+腐泥组(一般>40%),反映了暗色泥页岩有机质类型相对偏好,一般为Ⅱ—Ⅲ干酪根^[11]。其中在2012年测试的17个暗色泥页岩样品中,结果全部为Ⅲ干酪根。

3.2 有机质丰度

有机质丰度是评价暗色泥页岩生气潜能的关键因素,有机质丰度评价包括有机碳(TOC)含量(%)、氯仿沥青、热解生烃潜量($S_1 + S_2$)(mg/g)

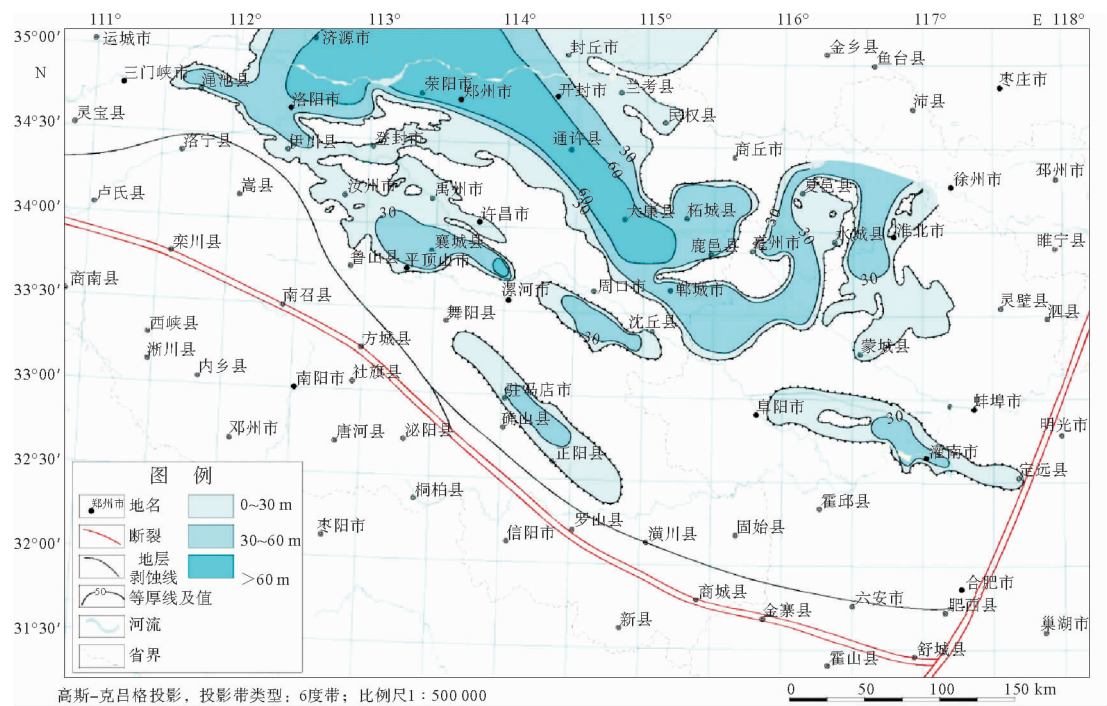


图 2 南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩等厚图(据文献[11]修改)

Fig. 2 Isopach map of dark shale of Shanxi Formation of Permian in Southern North China Basin(Modified from reference [11])

等指标^[12]。南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩受长期的地质演化和风化因素影响,可溶有机质散失严重,有机碳含量成为主要的丰度评价指标,结合山西组煤系地层的特点,热解生烃潜量等指标仍作为重要的评价依据^[7]。

研究区山西组暗色泥页岩的平均有机碳含量主要分布在 0.76%~3.33%之间,其中中等—好烃源岩在太康、鹿邑地区的厚度较大,有机碳含量

平均为 1.76%~4.16%,最高达 17.48%,呈环带状向四周降低。氯仿沥青“A”质量分数主要分布在 0.01%~0.05%,谭庄地区的样品测试结果高达 0.11%;研究区暗色泥页岩的可溶有机质散失严重,暗色泥页岩分布厚度较大的太康、鹿邑地区的生烃潜量($S_1 + S_2$)平均为 0.04~0.15 mg/g (表 1)^[6,10]。

表 1 南华北盆地山西组暗色泥页岩有机碳丰度参数统计(据文献[12])

Table 1 The abundance of organic matter of dark shale in Shanxi Formation in Southern North China Basin (from reference [12])

地区	井号	暗色泥岩			有效烃源岩			氯仿沥青“A”/%		(S ₁ +S ₂)/(mg/g)		总烃/×10 ⁻⁶	
		厚度/m	TOC/%	样数	厚度/m	TOC/%	样数	均值	样数	均值	样数	均值	样数
太康	太参 3	50.5	1.56	12	30.5	2.21	3	0.01	2	0.15	12	25	3
	太参 2	64	1.07	6	13	1.76	1	0.03	1	—	—	—	—
	新太参 1	56	0.76	7	—	—	—	0.05	1	—	—	—	—
鹿邑	周参 7	67	2.13	30	26.5	4.16	2	0.03	7	0.09	26	324	5
	周参 8	47	0.79	3	5.5	17.48	1	0.01	3	0.04	1	61	2
	周参 13	74.5	3.05	3	74.5	3.05	3	—	—	—	—	—	—

续表 1													
地区	井号	暗色泥岩			有效烃源岩			氯仿沥青“A”/%		(S ₁ +S ₂)/(mg/g)		总烃/×10 ⁻⁶	
		厚度/m	TOC/%	样数	厚度/m	TOC/%	样数	均值	样数	均值	样数	均值	样数
倪丘集	南 6	45	1.09	22	1.5	3.64	3	0.03	4	2.78	4	73	2
谭庄	周 16	48	1.49	4	15	3.16	1	0.11	1	0.02	4	70	2
襄城	襄 5	54	1.98	5	15	5.09	1	0.04	3	—	—	91	2
	新襄 6	45.5	3.33	3	28.5	4.91	1	0.01	2	—	—	—	—

3.3 有机质成熟度

目前,判断暗色泥页岩有机质成熟度最常用的指标是镜质体反射率(Ro)。南华北盆地二叠系山西组煤系烃源岩镜质体反射率在平面展布上呈“北高南低、西高东低”之势^[11]。通过分析本次样品的测试结果,结合前人的研究成果^[7,11],研究区东部煤系烃源岩 Ro 值较低,一般在 0.5%~1.0%,南部 Ro 值 0.7%~1.2%,处于未成熟—成熟阶段;北部 Ro 值高达 3.50%以上,处于过成熟阶段。南华北二叠系山西组暗色泥页岩有机质总体上处于成熟—过成熟阶段。

4 暗色泥页岩储集特征

4.1 储层矿物特征

暗色泥页岩中的矿物组成直接影响泥页岩的物理性质及页岩气的储集能力^[13-15]。其矿物成分主要包括黏土矿物以及石英等脆性矿物,黏土矿物的含量对于暗色泥页岩的吸气能力具有重要影响,而脆性矿物则是暗色泥页岩储层的孔隙和裂缝、压裂改造方式等的重要因素^[14,15]。

在研究区的野外露头 and 钻井剖面上,山西组暗色泥页岩主要表现为泥岩、页岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、含灰质泥页岩、泥质灰岩等多种岩性组合。通过对山西组不同层段、不同岩性组合中的 17 个暗色泥页岩样品进行全岩 X 衍射分析,测试结果显示暗色泥页岩的主要矿物成分为黏土、石英以及少量钾长石、斜长石和方解石。黏土矿物包括:高岭石、绿泥石、伊利石、伊/蒙混层。黏土矿物的平均含量为 55.19%,石英的平均含量为 41.21%(图 3)。

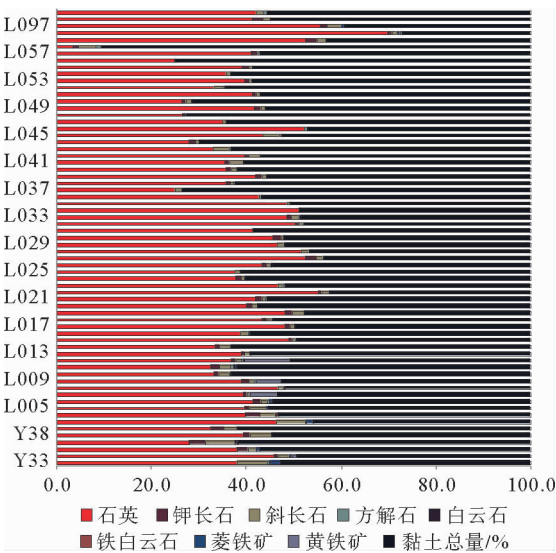
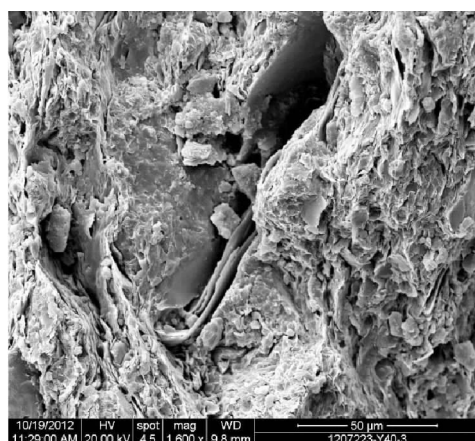


图 3 南华北盆地山西组暗色泥页岩 X 衍射矿物分析
Fig. 3 X-ray diffraction analysis of dark shale in Shanxi Formation of the Southern North China Basin

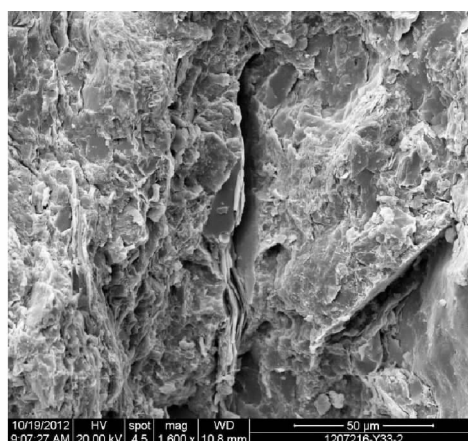
4.2 孔隙和裂缝特征

页岩气藏的储集空间包括宏观的微孔隙、微裂缝和微观上的纳米级孔隙。孔隙和裂缝不仅为页岩气提供聚集空间,也为页岩气提供运移通道。南华北地区二叠系地层沉积后,受印支、燕山和喜马拉雅等多期次构造运动的挤压、拉张影响^[6],使得暗色泥页岩发育孔隙和微裂缝。在普通扫描电镜下观察到较多微孔隙(图 4),主要包括溶蚀孔(图 4a、4b)、颗粒粒间孔与粒内孔(图 4c、4d、4f)、微裂缝(图 4e)。溶蚀孔隙孔径一般为 1~60 μm 不等,也有 60~1 000 μm 的孔隙(这种较大孔隙多被硅质物质充填或部分充填)。

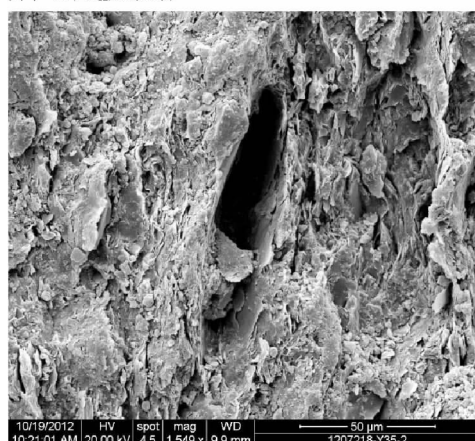
南华北盆地山西组暗色泥页岩样品扫描电镜照片显示本地区暗色泥页岩内部普遍发育有伊利石化体积缩小的微孔隙、次生溶蚀孔隙及微裂



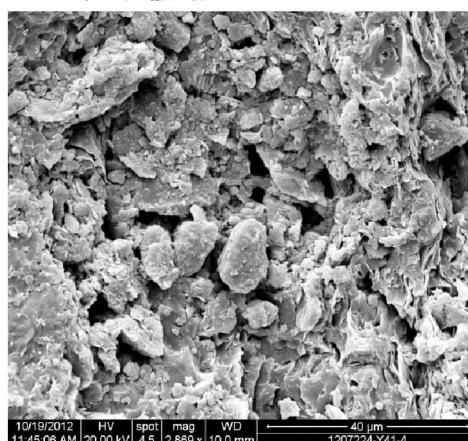
a 放大1 600倍, 云母具溶蚀形成次生片理孔, 样品编号为Y40, 沁池县陈村乡陈村村L-17井, 山西组泥页岩



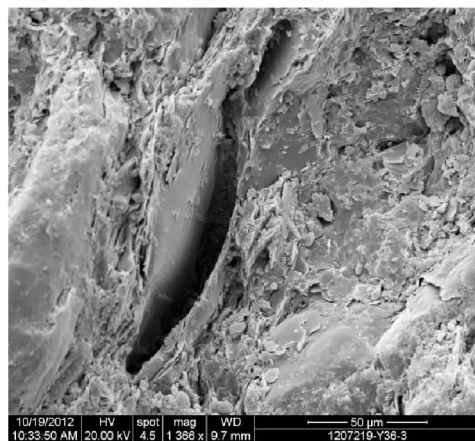
b 放大1 600倍, 云母具溶蚀形成次生片理孔, 长约50~80 μm, 样品编号为Y33, 禹州2号井, 639.2 m, 山西组泥岩



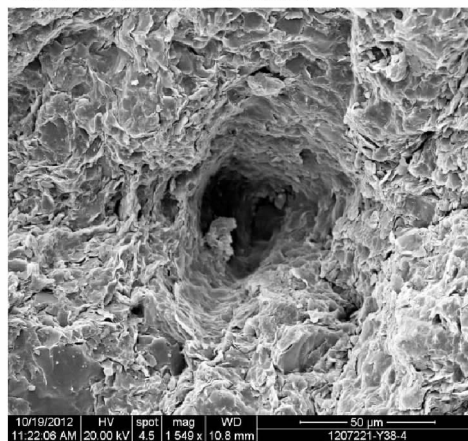
c 放大1 549倍, 孔隙呈短柱状, 孔径约为100 μm, 大致顺层分布, 样品编号为Y35, 西村1号井, 957.55 m, 山西组泥岩



d 放大2 869倍, 孔隙较富集, 孔隙呈次圆—不规则状, 孔径为5~15 μm, 样品编号为Y41, 西村1号井, 839.00 m, 山西组泥岩



e 放大1 366倍, 孔长约200 μm, 部分泥质向云母化伊利石转化, 样品编号为Y36, 西村1号井, 933.96 m, 山西组泥岩



f 放大1 549倍, 孔隙呈次圆状, 孔径约为70 μm, 样品编号为Y38, 西村1号井, 879.5 m, 山西组泥岩

图4 南华北盆地山西组暗色泥页岩在扫描电镜下的孔隙特征

Fig. 4 Pore characteristics of dark shale in Shanxi Formation of the Southern North China Basin under SEM

缝,为页岩气的储藏提供了空间基础。其中次生溶蚀孔隙孔径最大达 $60\ \mu\text{m}$,且多呈蜂窝状或与相邻孔隙组合形成孔隙群,大大提高了储气能力。

4.3 吸附性特征

页岩气在暗色泥页岩储层中的赋存形式包括吸附态、游离态以及溶解态等^[15]。其中,吸附态是最主要的存在形式,其吸附能力受暗色泥页岩的有机碳含量、地层压力、有机质热演化程度等因素影响,其中有机碳含量与地层压力为主控因素,暗色泥页岩的吸附气含量同有机碳含量和地层压力呈正比^[16]。

在温度为 $30\ ^\circ\text{C}$ 、湿度为 $1.09\%\sim 1.67\%$ 、甲烷浓度为 99.999% 的试验条件下,通过等温吸附实验对南华北盆地6块暗色泥页岩样品进行测试,实验结果表明每吨泥页岩的吸附气量为 $0.42\sim 3.27\ \text{m}^3$,平均为 $1.32\ \text{m}^3/\text{t}$,最大吸附气含量对应的测试压力为 $5.91\sim 10.96\ \text{MPa}$ 。图5为山西组L17样品的等温吸附曲线,在 $30\ ^\circ\text{C}$ 等温条件下,暗色泥页岩的吸附能力随着压力的增高逐渐增大,在压力达到 $10.86\ \text{Ma}$ 时,暗色泥页岩的吸附气量达 $3.27\ \text{m}^3$ 。表明南华北盆地山西组暗色泥页岩吸附能力强,吸附性较好。

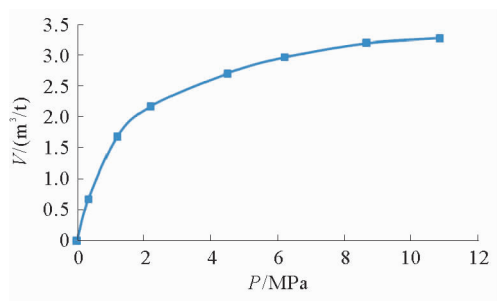


图5 南华北盆地山西组L17暗色泥页岩样品等温吸附气含量曲线

Fig. 5 Isothermal adsorption gas content of No. 17 dark shale in Shanxi Formation of the Southern North China Basin

5 有利区预测

页岩气的赋存受控于暗色泥页岩的有机质类型和丰度、地层厚度、孔隙和裂缝、埋藏深度以及

矿物组成等因素。目前我国页岩气开发刚进入工业性突破阶段,关于页岩气的分布特征有待于进一步研究。

南华北盆地二叠系山西组为一套海陆过渡相沉积地层,对其赋存的页岩气有利区优选参考页岩气成藏的主控因素及前人研究成果^[17],采用信息叠合法,以研究区山西组暗色泥页岩连续厚度 $\geq 30\ \text{m}$ 或泥地比 $> 60\%$,有机碳含量 $> 1.5\%$ 且埋藏深度 $< 3\ 000\ \text{m}$ 为主要评价依据,基于研究区暗色泥页岩分布、有机地球化学特征和含气量的模拟研究等指标,优选出南华北盆地荥阳、通许—太康、郸城等区块为研究区山西组页岩气发育的有利地区(图6),分布面积达 $13\ 056\ \text{km}^2$ 。

该优选区主要集中于研究区的中北部,面积分布广泛且连续,太康、鹿邑地区的山西组地层平均厚度超过 $60\ \text{m}$;发育黑色碎屑岩、炭质泥岩、泥岩及煤层等,有机质丰度较高,平均 $1.76\%\sim 4.16\%$,有机质处于成熟—过成熟阶段;等温吸附实验测得暗色泥页岩吸附气含量平均高达 $1.32\ \text{m}^3/\text{t}$,属于勘探前景良好的页岩气优选区。

6 结论

(1)南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩在研究区内分布面积大,沉积厚度大($30\sim 100\ \text{m}$),其中在太康、鹿邑地区的平均厚度超过 $60\ \text{m}$,有效烃源岩有机质丰度中等—高($1.76\%\sim 4.16\%$);镜质体反射率适中,有机质处于成熟—过成熟阶段,主要为Ⅲ型干酪根。

(2)南华北盆地二叠系山西组暗色泥页岩储集空间类型包括微孔隙、微裂缝,具有良好的储集性能,且暗色泥页岩中石英含量较高,储集层脆性较高,利于未来开采。等温吸附实验测得泥页岩的吸附气量为 $0.42\sim 3.27\ \text{m}^3/\text{t}$,平均为 $1.32\ \text{m}^3/\text{t}$,表明研究区山西组暗色泥页岩具有较强的吸附能力,吸附性较好。

(3)基于研究区暗色泥页岩分布、有机地球化学特征及含气量分析等,采用信息叠合法优选出荥阳、通许—太康、郸城等区块为研究区山西组页岩气发育的有利地区,分布面积达 $13\ 056\ \text{km}^2$,具有广阔的开发潜力。

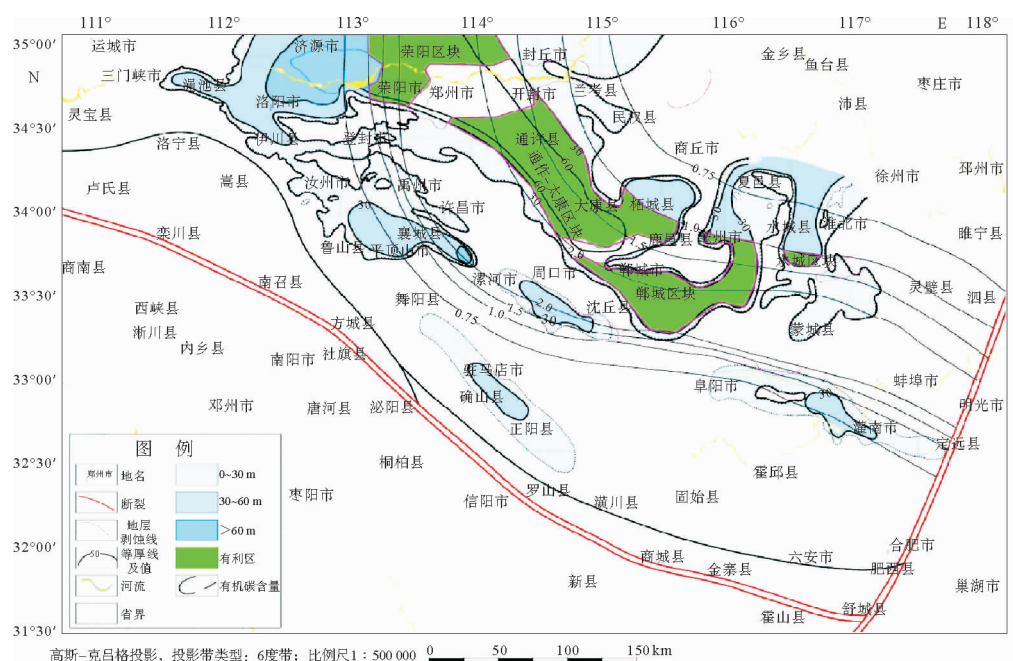


图 6 南华北盆地二叠系山西组页岩气勘探有利区综合评价

Fig. 6 Favorable exploration zone of shale gas in Shanxi Formation of the Southern North China Basin

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.
- [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] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 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.
- [4] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 115-118.
- [5] 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 180-204.
- [6] 焦大庆, 等. 华北南部油气地质条件[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 32-254.
- [7] 林小云, 蒋伟, 陈倩岚. 南华北地区二叠系烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 1-5.
- [8] 刁玉杰, 魏久传, 曹红. 南华北盆地石炭一二叠系沉积环境与聚煤规律研究[J]. 海洋科学集刊, 2010, 50: 133-138.
- [9] 刘格云, 孙柏年, 黄臣军, 等. 南华北盆地深层油气成藏潜力与勘探方向[J]. 中山大学研究生学刊, 2009, 30(4): 113-123.
- [10] 林小云, 陈倩岚, 李静. 南华北地区二叠系烃源岩分布及地化特征[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(4): 21-26.
- [11] 周丽. 南华北盆地晚石炭世一中二叠世构造沉积演化与烃源岩评价[D]. 西安: 西北大学, 2005: 45-89.
- [12] 程焯. 南华北盆地二叠系地层特征与页岩气勘探前景[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 25-44.
- [13] 宫美林, 丁文龙, 皮冬冬, 等. 鄂尔多斯盆地东南部下寺湾一云岩区二叠系山西组页岩气形成条件[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3): 1-11.
- [14] 黄菲, 王保全. 页岩气成藏地质条件分析[J]. 内江科技, 2011, 2: 137, 129.
- [15] 陈洁, 朱炎铭, 李伍, 等. 皖南地区荷塘组页岩气成藏条件及有利区预测[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(4): 420-423.
- [16] 徐波, 李敬含, 李晓革, 等. 辽河油田东部凹陷页岩气成藏条件及含气性评价[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 450-458.
- [17] 张大伟, 李玉喜, 张金川, 等. 全国页岩气资源潜力调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 66-69.

SHALE GAS RESERVOIR-FORMING CONDITIONS AND EXPLORATION PROSPECT IN PERMIAN SHANXI FORMATION OF THE SOUTHERN NORTH CHINA BASIN

SUN Jun^{1,2}, ZHENG Qiugen^{1*}, WEN Zhenhe², HOU Fanghui², XIAO Rui³, REN Junzhe¹

(1 School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract: Dark shale is widely distributed in the Shanxi Formation of Permian in Southern North China Basin. Exploration prospects of shale gas in the region were studied in this paper based on the geologic background and the geochemical and drilling data. The Shanxi Formation ranges from 30 up to 100 m in thickness with an average of over 60 m in Taikang-Luyi area characterized by medium-high abundance of organic matter (1.76%-4.16%), and medium vitrinite reflectance. The organic matters are highly and over highly matured. Micro-cracks, and other types of pores are well developed for the formation of high quality reservoirs. The isothermal adsorption experiment shows that the dark shale has strong adsorption ability, which is 1.32 m³/t on average. It is concluded that the region of Xingyang-Tongxu-Taikang-Dancheng within the Southern North China Basin is favorable for shale gas exploration.

Key words: shale gas; reservoir-forming condition; Shanxi Formation; Southern North China Basin

(上接第 19 页)

SUBSIDENCE CHARACTER OF THE PALEOGENE QIONGDONGNAN BASIN

CAI Jia¹, WANG Hua^{2,3}, CUI Min¹

(1 CNOOC Research institute, Beijing 100027, China; 2 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences Wuhan, Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: Back-stripping analysis for Paleogene subsidence history in the Qiongdongnan Basin is made based on the sequence stratigraphic framework. The result shows that the center of subsidence was shifting for different depositional stage, and the rate of settlement changing with the intensity of tectonic activities. Two echelon of settlement are identified in the Qiongdongnan Basin, but the north-west and south-east parts are non-settlement areas. From the result of back-stripping simulation in the deepest position, there are three major faulting episodes in the basin, and the rate of subsidence is decreasing one after another. The subsidence in the south-east part of the central depression zone is faster than that in the north-west part.

Key words: Paleogene; subsidence history; subsidence rate; Qiongdongnan Basin