

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.01.009

河南中牟区块页岩气特征及勘探前景分析

邱庆伦^{1,3}, 张古彬^{1,3}, 冯辉^{2,3}, 张栋^{1,3}, 张馨元^{1,3}

(1. 河南省地质调查院, 郑州 450001;

2. 河南豫矿地质勘查投资有限公司, 郑州 450053;

3. 地下清洁能源勘查开发产业技术创新战略联盟, 郑州 450001)

摘要: 文章通过对河南中牟区块海陆过渡相太原组和山西组页岩气形成的地质条件与特征分析, 认为区块构造较为简单、稳定, 其海陆交互相沉积环境控制太原组和山西组页岩发育, 分布广泛, 富含有机质页岩厚度大, 为页岩气目标层; 有机碳含量 $w(\text{TOC}) = 1.1\% \sim 3.7\%$, 有机质类型为Ⅲ型, 有机质成熟度指标镜质体反射率 $(R_o) > 3.0\% \sim 3.8\%$; 目标层有效孔隙度 $1.0\% \sim 5.0\%$, 黏土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主; 含气量 $0.5 \sim 3.3 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均 $1.7 \text{ m}^3/\text{t}$ 。对牟页1井太原组、山西组三段采用快钻桥塞分段压裂, 累计注入压裂液量 $5\,055.9 \text{ m}^3$, 加砂量 202.7 m^3 , 三层合采求产为 $1\,256 \text{ m}^3/\text{d}$, 标志着南华北盆地海陆过渡相页岩气勘探取得重大发现。通过地质评价和资源量计算, 中牟区块太原组、山西组页岩气地质资源量较为丰富, 勘探有利区面积大, 具备较好的页岩气勘探前景。

关键词: 中牟区块; 页岩气; 地质评价; 有利区; 太原组; 山西组; 勘探展望; 河南省

中图分类号: P618.13; TE132.2 **文献标识码:** A

0 引言

页岩气作为一种非常规天然气, 日益受到世界各国的关注^[1-7]。近年来, 受美国页岩气成功商业性开发的影响, 为保障国家能源安全, 我国也开始尝试对页岩气进行勘探, 国土资源部已经启动了2轮页岩气矿权招标。目前重庆涪陵焦石坝、四川长宁—威远等地已取得页岩气开发重大突破, 其中焦石坝地区探明页岩气地质储量 $1\,067.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2015年页岩气年产达 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 由此, 中国、加拿大、美国成为仅有的三个页岩气商业性开发的国家。

为顺应国际、国内清洁能源勘查大趋势, 河南豫矿地质勘查投资有限公司在2012年国土资源部举

行的第二轮页岩气探矿权招标中获得了河南中牟和河南温县两个页岩气勘查区块探矿权, 河南省地质调查院作为这两个页岩气区块的勘查实施单位。

河南省页岩气勘查主要针对石炭二叠系海陆过渡相岩系进行勘探, 组织实施了河南省内第一口页岩气探井(牟页1井), 对该井太原组、山西组143 m厚的含气层段分三段进行分压合试, 获得了日产天然气 $1\,256 \text{ m}^3$ 的较稳定气流, 实现了我国北方海陆过渡相地区页岩气勘探的重大发现。随后, 中国地质调查局油气调查中心组织实施的华北地区河南等省页岩气资源潜力评价、尉参1井项目的目的层也是海陆过渡相层系页岩气, 表明区内石炭二叠系海陆过渡相层系页岩气具有良好的勘探前景。本文将分析河南中牟区块太原组、山西组页岩气特征、成藏条件及勘探潜力。

收稿日期: 2016-11-24; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 河南省重大科技专项“河南页岩气勘查开发及示范应用研究”项目(编号:151100311000)、国土资源部第二轮页岩气探矿权项目“河南中牟页岩气勘查”(编号:GT2012YQTKQCR0020)联合资助。

作者简介: 邱庆伦(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事页岩气勘探研究及地质矿产调查工作。通信地址: 河南省郑州市科学大道81号, 河南省地质调查院; 邮政编码: 450001; E-mail: qiuqinglun@163.com

1 地质概况

中牟页岩气勘查区块位于河南省郑州市东约 20 km 处,其区域构造位置是通许隆起尉北凸起与中牟凹陷南部斜坡的交界地带(图 1)。受多方向断层的控制,形成了杜营、东吴、荆隆宫、延津、原阳等 5 个次凹、太平镇次凸和中牟斜坡。中牟区块为第四系和新近系覆盖区,区内勘查钻井较少且深度一般小于 3 000 m,地质工作程度较低。

通过地震与钻井揭示,区内主要发育奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。区内页岩气目的层主要为二叠系太原组、山西组,次要目的层为下石盒子组^[8-9]。

2 页岩气区块地质特征

2.1 页岩发育及分布特征

中牟区块所处的开封坳陷及太康隆起是一个经历了早白垩世晚期、古近纪两期剪切拉张力作用而形成的断陷型坳陷和隆起,其属不同时期、不同类型盆地叠加在一起构成一个叠置坳陷;从早至晚,其形成演化大体上经历了寒武纪—中奥陶世滨浅海相沉降盆地发育时期、晚奥陶世—泥盆纪克拉通古陆

隆起剥蚀期、石炭纪—二叠纪海陆交互相沉降盆地发育时期和三叠纪—第四纪陆相盆地发育时期 5 个演化阶段。其中,早二叠统太原组为三套灰岩夹二套黑色泥岩及煤层沉积组合,总体表现为海进序列,其中泥页岩段为潟湖相、灰岩段为局限台地相;而山西组下部主要为砂岩,上部总体为黑色泥岩与煤层,总体表现为海退序列,逐渐由前三三角洲向三角洲前缘,最后发展为三角洲平原的演化历程(图 2)。

2.2 页岩有机地球化学特征

(1)有机质类型

富含有机质的烃源岩能否生成油气,取决于有机质类型。干酪根的类型不但对岩石的生烃能力有一定的影响作用,还可以影响天然气吸附率和扩散率。

对中牟区块内牟页 1 井山西组、太原组页岩气层段采集了 55 个干酪根样品,干酪根镜检结果显示牟页 1 井目的层段泥页岩干酪根显微组分 75% 为镜质组,其次为腐泥组,壳质组含量很少,无惰质组,有机质类型均为Ⅲ型,其中镜质组以黑色镜质体为主。有机质碳同位素分析显示 $\delta(^{13}\text{C})$ 均大于 -27×10^{-3} ,表示有机质来源于陆地高等植物。

(2)有机质丰度

通过对牟页 1 井二叠系山西组、太原组有机碳含量分析,中牟区块主要页岩气层段有机碳含量较高,其 $w(\text{TOC})=0.16\% \sim 10\%$,平均 2.18%,其中约 45% 的总有机碳含量超过 2.0%。即区内的二叠

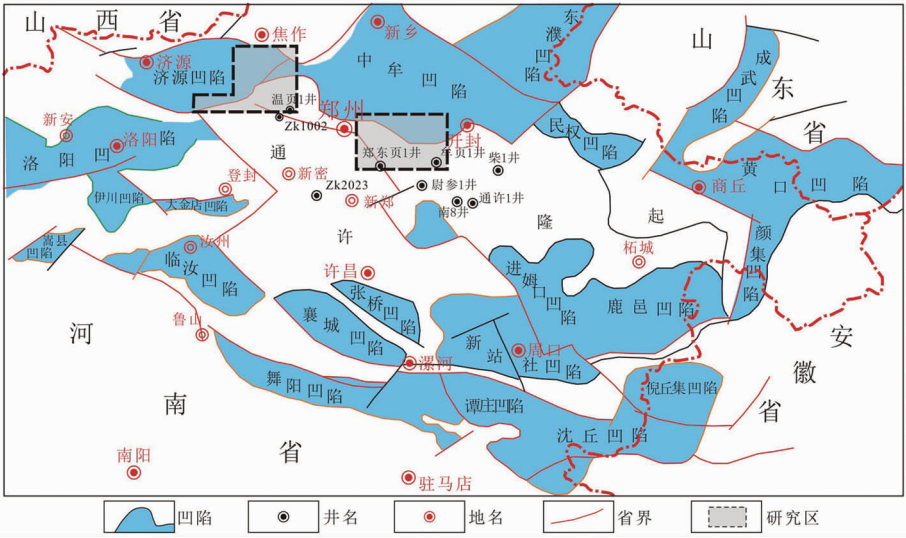


图 1 河南中牟页岩气区块构造背景及地理位置

Fig. 1 Map showing structural background and Location of Zhongmu shale gas block, Henan province

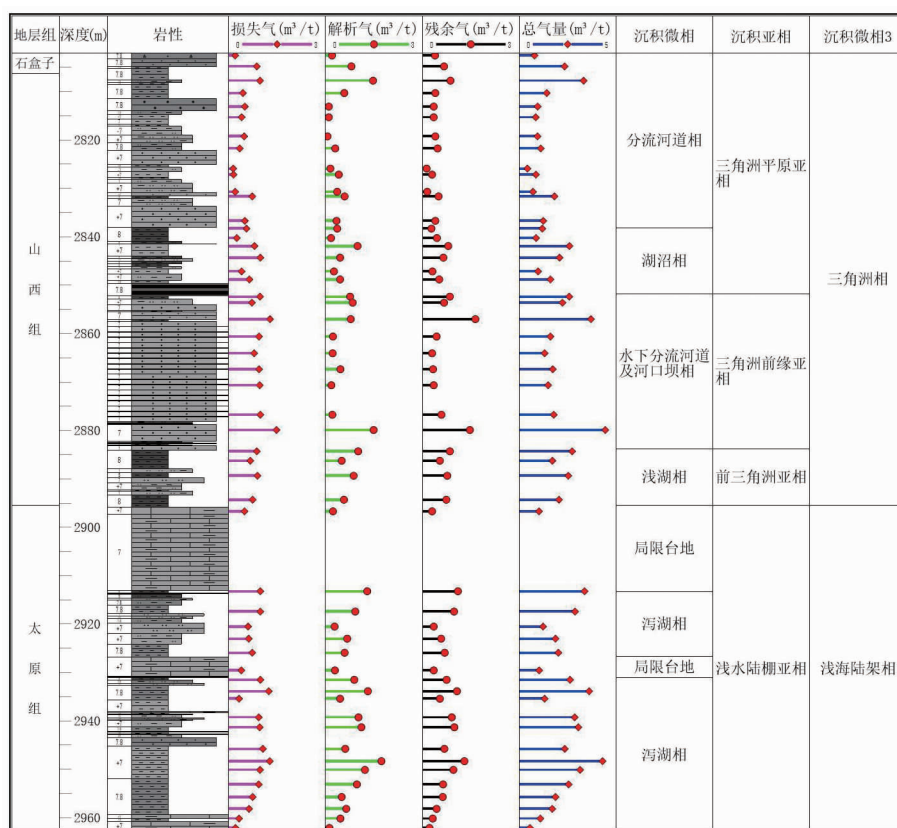


图2 牟页1井综合剖面图

Fig. 2 The synthetical section of Muye1 well

系山西组、太原组目的层段泥页岩,总体属于好的烃源岩,有机质丰度满足页岩气成藏要求。

(3) 有机质成熟度

对中牟区块内牟页1井山西组、太原组页岩气层段泥页岩采集的干酪根样品进行的镜质体反射率(R_o)分析结果表明,牟页1井太原组和山西组泥页岩成熟度全部超过2.0%, R_o 值介于3.0%~3.8%之间,平均3.5%,均处于过成熟晚期干气阶段。

太原组烃源岩在中三叠世末,达到低成熟—成熟早期;早白垩世末,大部分地区达到高成熟,以干气为主;渐新世末,仍处于干气阶段。

2.3 页岩埋深特征

为确定太原组、山西组页岩层系的有效展布面积,本次工作根据中牟区块及周缘地区二维地震、钻井、前新生界基岩地质图等资料进行分析,中牟区块太原组、山西组现今埋深多在2 000 m—9 000 m之间;勘查区的南部稍浅,约在2 000 m—2 500 m之间;中部地区的埋深,约在3 100 m左右;北东部近开封凹陷中心,埋深大于9 000 m。

2.4 页岩储集特征

(1) 页岩脆性矿物以石英为主,黏土矿物中伊利石含量最高

中牟区块牟页1井太原组页岩储层矿物成分以黏土矿物和石英为主,石英含量(体积分数)6%~55%;黏土矿物含量(体积分数)为32%~64%;山西组泥页岩储层矿物成分也以黏土矿物和石英为主, $\varphi(\text{石英})=3\%\sim 52\%$, $\varphi(\text{黏土矿物})=35\%\sim 89\%$ 。

太原组中的黏土矿物以伊利石、高岭石和伊蒙混层为主,含少量的绿泥石,其中伊利石含量(体积分数)18%~51%,高岭石平均22.17%,伊蒙混层含量平均20.17%;山西组中的黏土矿物以伊利石、高岭石为主,含少量的绿泥石和伊蒙混层,其中伊利石体积分数平均67.36%,高岭石平均28.18%,伊蒙混层含量平均25.09%。

牟页1井山西组、太原组矿物组成及黏土矿物含量分析数据表明,牟页1井山西组页岩储层石英体积分数平均近30%,太原组页岩储层石英体积分数平均37%;山西组黏土矿物以伊利石、高岭石为主,太原组黏土矿物以伊利石、高岭石和伊蒙混层为

主。充分表明区内页岩储层岩石脆性与造缝能力较强,较适宜进行压裂改造。

(2) 储层具致密特低渗物性特征

牟页1井录井过程中进行的孔隙度与渗透率测定结果统计表明,该区太原组含气页岩层段的孔隙度分布范围在0.4%~4.5%,平均为2.1%;渗透率分布在 $1.21 \times 10^{-6} \sim 0.11$ mD,平均为 7.48×10^{-3} mD。山西组含气页岩层段的孔隙度分布范围在0.3%~8.8%,平均为2.3%;渗透率分布在 $23 \times 10^{-6} \sim 0.92$ mD,平均为0.045 mD。根据特殊测井解释,泥岩发育水平层理,砂岩主要发育低角度层理,局部发育交错层理。太原组灰岩中缝合线和高导缝较发育,说明储层连通性较好。

从区内页岩储层的渗透率来看,都小于0.1 mD,属于特低渗类型。总体上,区内储层的孔隙度与渗透率均较低,其泥页岩储层均为低孔低渗储层。

2.5 岩石力学性质

综合杨氏模量、泊松比、破裂压力和脆性指数几项分析岩石的可压性。一般情况下,杨氏模量大、泊松比小、脆性指数大、破裂压力小的地层性脆,易于压裂。根据测井成果,太原组、山西组主要含气层段岩石杨氏模量20~45 GPa之间。泊松比0.29~0.35之间,脆性指数为39%~71%,平均脆性指数接近于50%。根据岩芯单轴压缩试验测试结果,储层弹性模量9.39~38.68 GPa,平均21.22 GPa,泊松比0.15~0.24,平均0.21,与测井解释结果较接近。表明储层脆性指数大,地层易于压裂。

牟页1井计算的最小水平主应力在45~65 MPa,平均值为49 MPa,最大水平主应力56~77 MPa,平均值为61 MPa,水平两向主应力差异相对较小,差异系数低于25%,易于形成体积缝网。根据各向异性提供的快横波方位及钻井诱导缝,确定最大水平主应力方向为北东东70°左右。

FMI测量处理解释显示,太原组、山西组含气页岩层段发育水平层理,砂岩发育低角度层理,局部见交错层理。另外,高导缝发育,见到大量的钻井诱导缝与井壁崩落,有利于多裂缝的产生。

2.6 页岩含气特征

中牟区块牟页1井下二叠统太原组、山西组钻进中发现多次气测异常,现场解吸普遍含气(图3),总含气量介于0.42~4.44 m³/t之间,平均为1.93 m³/t,损失气的比例要小于解析气和残余气的比例,解吸气量和残余气量相当。总含气量大小总体上可分为三段,即太原组中部2 913.08~2 960.00 m,平

均含气量为2.38 m³/t;山西组下部2 832.20~2 895.50 m,平均含气量为2.01 m³/t;山西组上部2 802.0~2 832.20 m,平均含气量为1.29 m³/t;总含气量由顶到底呈现出逐渐升高的趋势。现场解吸的气体成分主要包括甲烷、二氧化碳、氮气以及少量的乙烷和丙烷,其中甲烷占80.95%~96.36%,平均值89.49%。

2.7 压裂测试获得海陆过渡相页岩气重大发现

牟页1井太原组、山西组,三段采用快钻桥塞分段压裂技术累计注入压裂液量5 055.9 m³,加砂量202.7 m³,各段压后放喷期间均点火成功,焰高1.0~7.5 m。抽油机采排测试,在冲程4.27 m、冲次5.0次/分的生产制度下,套压稳定在0.68 MPa,三层合采求产为1 256.0 m³/d,96小时累计产气16 240.0 m³,见稳定的页岩气气流,标志着南华北盆地海陆过渡相页岩气勘探取得重大发现,预示着目标区块具有较好的页岩气开发前景。

3 资源潜力分析

目前我国处于早期页岩气勘探阶段,面临着各种不确定性因素,难以精确地预测页岩气的潜在资源量。当前国际上可用于页岩气资源潜力评价的方法主要有体积法、类比法、统计分析法、成因法和综合法,其中条件概率体积法较适用于我国现阶段页岩气资源量计算。

依据北美页岩气开发经验,对中牟区块取下二叠统太原组、山西组页岩埋深小于3 500 m的区域作为该组页岩气潜力区;由概率体积法计算可知,中牟区块太原组、山西组页岩气资源量为 $2\,056 \times 10^8$ m³,具有较大的资源潜力。

4 页岩气勘查方向

4.1 有利区、远景区评价标准

参考国土资源部确定的远景区、有利区和目标区的评价标准,结合研究区块的地质特征^[10-11],确定出页岩厚度、有机质丰度、有机质热演化程度、构造复杂性和页岩埋深等因素的评价标准,重点以埋深为重要参考依据,即以3 500 m、4 500 m、6 000 m分别作为有利目标区与有利区、有利区与一类远景区、一类远景区与二类远景区的划分界线。如此,对

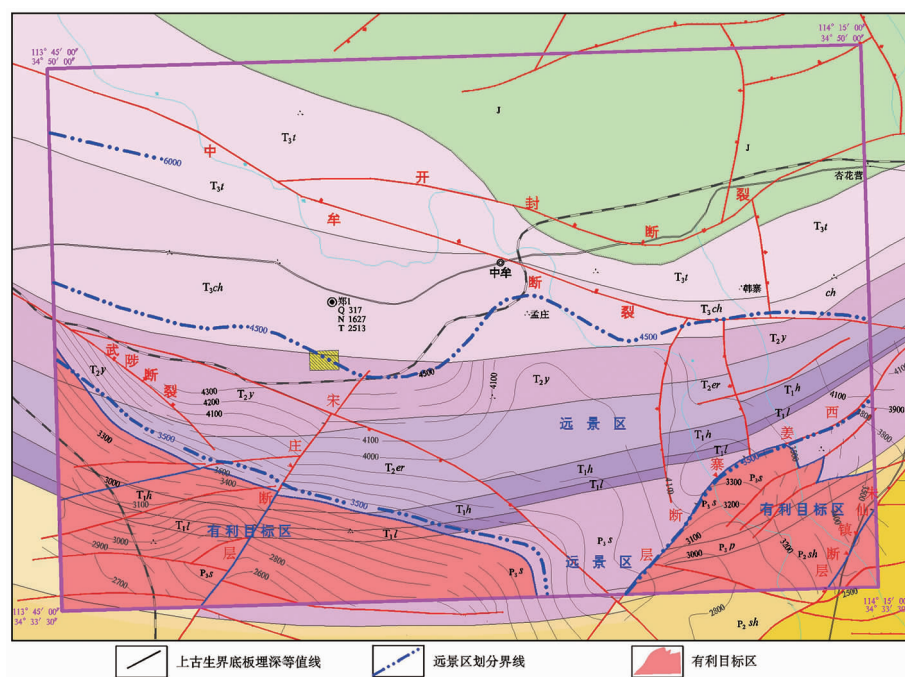


图 3 河南中牟区块页岩气有利区预测

Fig. 3 The predicted diagram of favorable areas of shale gas in Zhongmu block, Henan province

下二叠统太原组、山西组页岩层系进行勘探风险评价,将中牟区块划分出页岩气有利目标区和远景区各 1 个(图 3)。

4.2 评价结果及勘查方向

(1)有利目标区。该区位于勘查区东南部和西南部,太原组底板埋深 3 500~4 500 m 之间,面积 280 km²,目的层系太原组、山西组和下石盒子组总厚度 460~520 m(牟页 1 井揭示目的层系厚度 477 m),泥页岩总有机碳含量 $w(\text{TOC})=1.4\%\sim 4.6\%$,平均含量大于 2.0%,平均含气量 2.0 m³/t,杨氏模量 20.0~45.0 GPa,泊松比 0.29~0.35,即是有利的页岩气勘查目标区。

(2)远景区。该区位于勘查区中部一带,太原组底板埋深 3 500~4 500 m 之间,面积 360 km²,目的层系太原组、山西组和下石盒子组总厚度 460~550 m,目的层系除埋深更大外其余特征与有利目标区相似,目前具有页岩气勘查开发的经济价值。

大、高脆性矿物、低黏土矿物,以及高 TOC、含气量较高的特征,埋深适中的地区分布广泛,保存条件相对较好,具备页岩气形成、储集、保存的基本条件。

(2)通过牟页 1 井太原组、山西组三段含气页岩分段压裂合试,累计注入压裂液量 5 055.9 m³,加砂量 202.7 m³,三层合采求产为 1 256 m³/d,见稳定的页岩气气流,标志着南华北盆地海陆过渡相页岩气勘探取得重大发现,预示着目标区块具有较好的页岩气开发前景。

(3)利用体积法初步计算河南中牟区块太原组、山西组埋深 3 500 m 以浅页岩气资源量为 $2\,056\times 10^8$ m³,具有一定页岩气资源潜力,并优选出了页岩气勘探东南部和西南部为有利目标区。

致谢:感谢河南省地质调查院李中明副院长提出的建设性修改意见;另外,翁纪昌、安西峰、孙永豪、王鹏、李屹昆等参加了野外工作。

参考文献:

- [1] 王玉满,董大忠,李建忠,等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- [2] 王珂,张荣虎,戴俊生,等. 曲低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(2): 44-58.
- [3] 侯读杰,包书景,毛小平,等. 页岩气资源潜力评价的几个关

5 结论

(1)太原组、山西组富有机质黑色页岩层系是河南中牟区块主要勘探目的层,具有沉积稳定、厚度

- 键问题讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(3): 7-16.
- [4] 肖正辉, 牛现强, 杨荣丰, 等. 湘中涟源—邵阳凹陷上二叠统大隆组页岩气储层特征[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(4): 17-24.
- [5] 邱小松, 杨波, 胡明毅, 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1274-1283.
- [6] 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): 466-472.
- [7] 李荣西, 段立志, 张少妮, 等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 364-372.
- [8] 韩作振, 李赞, 高丽华, 等. 鲁西地区石炭—二叠系太原组页岩气潜力[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 51-57.
- [9] 李中明, 张栋, 张古彬, 等. 豫西地区海陆过渡相含气页岩层系优选方法及有利区预测[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 1-9.
- [10] 冷济高, 韩建辉, 李飞, 等. 湘西北地区花桓页岩气区块勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 624-631.
- [11] 周庆华, 宋宁, 王成章, 等. 湖南花桓页岩气区块地质评价与勘探展望[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 130-140.

Characteristics of shale gas and analysis of the prospecting potential in Zhongmu block, Henan Province

QIU Qinglun^{1,3}, ZHANG Gubin^{1,3}, FENG Hui^{2,3}, ZHANG Dong^{1,3}, ZHANG Xinyuan^{1,3}

(1. Henan institute of geological survey, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan YuKuang Geological Exploration Investment Co. Ltd.

Zhengzhou 450053, China;

3. Henan Industry and Technology Innovation Strategy Alliance of

Underground Clean Energy Exploration and Development, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By analyzing geological conditions and features of shale gas formed at marine-continental transitional facies of the Taiyuan Formation and Shanxi Formation in Zhongmu block the researchers consider that structure of the block is simple and stable. The sedimentary environment of the marine-continental transitional facies controls development of the Taiyuan Formation and Shanxi Formation in which shale is widely distributed and in large thickness and contain abundant organic materials $w(\text{TOC})=1.1\%\sim 3.7\%$ thus is the prospecting target. Organic matter type belongs to type III, organic carbon content accounts for 1.1% to 3.7%, and the effective porosity of the shale ranges from 1.0% to 5.0%, the gas content is $0.5\sim 3.3\text{ m}^3/\text{t}$, averagely $1.7\text{ m}^3/\text{t}$ and the values of the R_o , organic matter maturity is greater than 3.0%, less than 3.8%. Clay minerals are mainly Illite and mixed-layered illite/smectite. At Muye well 1 Taiyuan and Shanxi formations are sectionally fractured by quick drill bridge plug with fracturing fluid $5\ 055.9\text{ m}^3$ and sand 202.7 m^3 injected and total gas production of $1\ 256\text{ m}^3/\text{d}$ of the combined mining of three layers. This is a significant discovery in the transitional facies of the north China basins. Geological evaluation and resource calculation suggest that in Zhongmu block the Taiyuan Formation and Shanxi Formation shale are abundant with gas resources, large favorable exploration areas, and good prospects for shale gas exploration.

Key Words: Zhongmu block; Shale gas; geological evaluation; favorable area; Taiyuan Formation; Shanxi Formation; exploration prospect; Henan province