



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405705

引用格式:董旭,李岩,王杰,等.基于样品分析与地球物理识别的湘中余田桥组泥页岩特征与评价[J].科学技术与工程,2025,25(19):7941-7952.

Dong Xu, Li Yan, Wang Jie, et al. The laboratory measurements and geophysical investigation on the characteristic evaluation of mud shale in the Shetianqiao Formation of Central Hunan[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 7941-7952.

# 基于样品分析与地球物理识别的湘中 余田桥组泥页岩特征与评价

董旭<sup>1</sup>, 李岩<sup>1\*</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 蔡宁波<sup>2</sup>, 宋锡芳<sup>1</sup>, 李强龙<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 长沙 410600; 2. 湖南省地质新能源勘探开发工程技术研究中心, 长沙 410014)

**摘要** 湘中泥盆系余田桥组作为太和堂-官家嘴地区重要的页岩气勘查层系,近年来的调查评价未有显著发现及突破,余田桥组泥页岩埋深、厚度、地化及储层物性特征不清制约了该地区页岩气发现。在基础地质调查前提下,探索形成基于样品分析与地球物理识别的研究评价体系,以大地电磁(magnetotelluric, MT)地球物理勘查方法,结合样品分析手段,对该地区页岩气有利泥页岩层位赋存特征与分布规律这一关键基础地质问题进行了研究与评价。结果表明:①余田桥组有利层位电阻率整体小于 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ ;②余田桥组厚度 $600\sim 900\ \text{m}$ ,一般埋深 $0\sim 1\ 000\ \text{m}$ ,MT测线共圈出15处断层,地层错动成多段;③余田桥组有机质类型以 $\text{II}_2$ 型为主,有机碳含量在 $0.32\%\sim 3.46\%$ ,平均为 $0.80\%$ ,成熟度 $R_o$ 平均为 $1.78\%$ ,处于高热阶段。

**关键词** 样品分析; 地球物理; 余田桥组; 泥页岩

中图法分类号 P631;

文献标志码 A

## Laboratory Measurements and Geophysical Investigation on the Characteristic Evaluation of Mud Shale in the Shetianqiao Formation of Central Hunan

DONG Xu<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1\*</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, CAI Ning-bo<sup>2</sup>, SONG Xi-fang<sup>1</sup>, LI Qiang-long<sup>1</sup>

(1. Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha 410600, China;

2. New Geological Energy Exploration and Development Engineering, Technology Research Center of Hunan, Changsha 410014, China)

**[Abstract]** The Shetianqiao Formation of the Devonian in central Hunan is an important shale gas reservoir in the Taihetang-Guanjiazui area. However, limited understanding of its geophysical and geochemical signatures has hindered the gas reservoir's large-scale exploration and exploitation. A research and development methodology was presented here based on sample analysis and geophysical characterization. Specifically, the method utilized quantification of shale gas occurrence characteristics and distribution patterns in the Shetianqiao Formation using sample analysis and the magnetotelluric (MT) geophysical data inversion technique. The results show that the overall resistivity of favorable layers in the Shetianqiao Formation is less than  $200\ \Omega\cdot\text{m}$ , with a thickness range of 600 to 900 meters and an average burial depth of  $0\sim 1\ 000$  meters. Furthermore, the MT method reveals 15 faults and their associated multiplexing segments. It is also confirmed that the organic matter in the Shetianqiao Formation is primarily  $\text{II}_2$ , with an organic carbon content ranging from  $0.32\%$  to  $3.46\%$  and an average at  $0.80\%$ . The average maturity  $R_o$  of the formation is  $1.78\%$ , indicating a high maturity stage.

**[Keywords]** sample analysis; geophysics; Shetianqiao Formation; mud shale

美国页岩气勘探开发历程表明其主要勘探开发层系是泥盆系<sup>[1-4]</sup>,并逐渐推动了全球非常规天然气资源的勘探开发。湖南省在湘西北寒武系牛

蹄塘组和志留系龙马溪组页岩层系相继实现页岩气勘查突破<sup>[5-13]</sup>,湘中地区以往油气工作主要针对二叠系、石炭系及泥盆系锡矿山组,多集中于涟源

收稿日期: 2024-07-30 修订日期: 2024-12-23

基金项目: 中国地质调查局“战略性矿产靶区查证技术支撑”项目(DD20230398);中国地质调查局“南方重点地区1:5万页岩气地质调查”项目(DD20190562)

第一作者: 董旭(1985—),男,汉族,河北石家庄人,硕士,高级工程师。研究方向:油气、煤田地球物理勘查与测井。E-mail:feelingbar007@126.com。

\*通信作者: 李岩(1985—),男,汉族,山西运城人,硕士,高级工程师。研究方向:页岩气地质调查与评价。E-mail:353692452@qq.com。

凹陷、邵阳凹陷中西部及零陵凹陷<sup>[14-19]</sup>,其他地区以往油气工作程度极低。

湘中余田桥组泥岩具有层系厚度大、有机质剪度高、成熟度较高、埋深适中以及分布范围广等特点,近年来湘中地区页岩气勘探工作不断开展,发现了不同规模的页岩气层系。

杨宁等<sup>[20]</sup>、李岩等<sup>[21]</sup>以湘中南龙潭组黑色页岩为研究对象,探明湘中南地区龙潭组黑色页岩孔隙发育特征及其影响因素,并分析孔隙特征对于页岩气成藏的作用;罗小平等<sup>[22]</sup>利用湘中泥盆-石炭系野外剖面泥页岩有机地球化学参数及泥页岩等温吸附特征参数,评价了页岩气富集的关键地质参数特征;敬乐等<sup>[23]</sup>基于现代沉积学和层序地层学理论分析,认为湘中地区有利于泥页岩发育的主要相带为台地海盆环境;钱劲等<sup>[24]</sup>恢复了湘中拗陷和湘东南拗陷泥页岩层系岩相古地理,指出余田桥期该地区主要处于台地海盆环境,沉积中心位于邵阳凹陷中部;徐昉昊等<sup>[25]</sup>基于沉积学分析,认为湘中-湘东南地区余田桥组泥页岩主要发育于海相台盆环境;巩书华等<sup>[26]</sup>研究了祁东地区余田桥组暗色页岩的页岩气成藏地质条件及含气性特征,认为湘中祁东地区余田桥组泥页岩具有一定生烃物质基础,储层特征也符合后期页岩气开发条件;吕嵘等<sup>[27]</sup>通过对湘新页1井的岩心和测井资料研究,指出泥盆纪余田桥组底部为优质页岩发育段,厚度达81.1 m,页岩有机碳含量、物性均较好,具有较大资源潜力;陈林等<sup>[28]</sup>对邵阳凹陷余田桥组泥岩岩相及其成因演化进行了研究,结果表明余田桥组泥岩依据矿物

组分含量主要识别出硅质泥岩、混合质泥岩、硅质岩、钙质泥岩4种岩相类型,沉积环境分析表明余田桥组泥岩形成于大陆边缘背景,主要处于相对干热气候条件。

上述研究多集中在湘中涟源凹陷及邵阳凹陷,对湘中其他地区研究较少,研究区位于雪峰山和南岭山系之间的过渡地带,属前人研究较少地区,在基础地质调查前提下,以大地电磁(magnetotelluric, MT)地球物理勘查方法,结合样品分析手段,对该地区页岩气有利泥页岩层位赋存特征与分布规律这一关键基础地质问题进行了研究与评价,从而为该地区页岩气的勘探提供一定的依据与指导。

### 1 区域地质背景

研究区地处湘中腹地,境内丘岗谷地遍布,伴有低丘小平原和若干小型盆地,植被发育,森林覆盖率高,地势为南北山地崛起,东西凸起,中部平坦。在行政区划上主要位于邵阳凹陷祁东县东部太和堂镇-官家嘴地区。构造上处于祁阳断裂内弧与关帝庙北东向隆起交汇部位,经历了加里东、印支、燕山三期构造运动,不同期次构造形迹相互叠加、改造,主要应力特征为先剪后张,导致构造形态十分复杂,发育了一系列近南北向、北北东向、北东向的挤压性质的断裂与褶皱(图1)。区内地层除志留系和上三叠统缺失外,从震旦系到新生界的第四系皆有出露,其中以泥盆系、石炭系分布较为广泛,主要页岩气目的层为上泥盆统余田桥组(表1)。

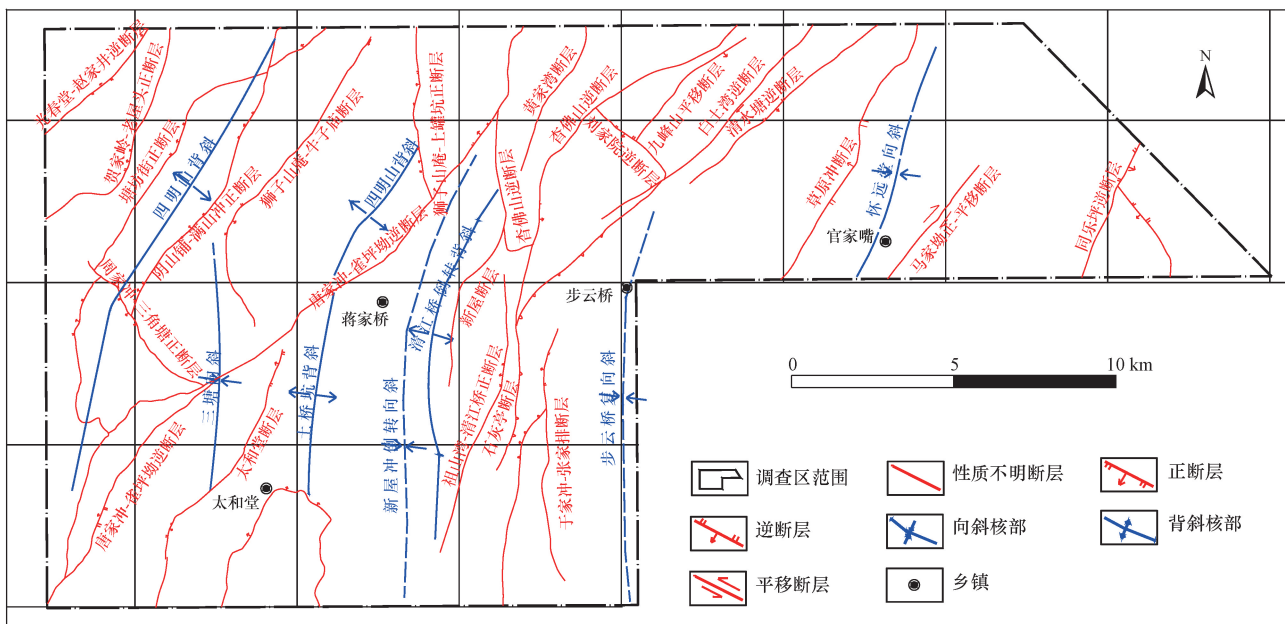


图1 太和堂-官家嘴调查区构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of Taihe Hall Guanjiuzui survey area

表 1 太和堂-官家嘴调查区综合地层表  
Table 1 Comprehensive stratigraphic table of Taihetang Guanjiazu survey area

系	组	代号	厚度/m	岩性
白垩系	神皇山组	Ksh	>492	一套红色碎屑沉积,岩性为紫红色砾岩、含砾砂岩、砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩组合,与下伏地层呈不整合接触
	造上组	TJz	>499	上部为灰褐、紫灰薄-中厚层状泥质粉砂岩夹粉砂质页岩及石英砂岩;中部为黄灰、灰白薄-厚层状石英砂岩与粉砂岩互层;下部为紫红色巨厚层砾岩、含砾砂岩夹石英砂岩
石炭系	壶天群	C <sub>2+3</sub>	546~578	灰白色、肉红色厚-巨厚层状细晶白云岩、白云石(化)灰岩为主夹灰质白云岩。多风化红色土层
	梓门桥组	C <sub>1z</sub>	122~146	灰-深灰色中厚-厚层状生物屑粉晶-泥晶灰岩为主夹泥灰岩、含泥灰岩
	测水组	C <sub>1c</sub>	6~73	灰黄、紫红、黄褐色细粒含铁石英砂岩、含碳砂质页岩夹石英粉砂岩。部分地区局部见煤线,含铁矿结核
	石凳子组	C <sub>1s</sub>	196	深灰色中厚-厚层状含泥质泥晶灰岩、含白云石团块生物碎屑粉晶灰岩、生物屑泥晶灰岩,中下部夹泥灰岩,含硅质结核与条带
	孟公坳组	C <sub>1m</sub>	27~145	顶部为灰色、黄褐色薄层泥灰岩、钙质(粉砂质)页岩、细粒石英砂岩,粉砂岩夹粉晶白云岩灰岩及粉晶棘屑灰岩等,往东尖灭;中下部为一套含砂泥质的碳酸盐岩地层
	锡矿山组	D <sub>3x</sub>	239~623	顶部为灰黄、深灰色厚层状砂岩、粉砂岩;中下部为灰色厚层状亮晶内碎屑灰岩、泥晶灰岩,夹核形石泥晶灰岩、生物碎屑泥质灰岩及泥灰岩
泥盆系	余田桥组	D <sub>3s</sub>	192~923	深灰色薄至中厚层状泥灰岩夹透镜状泥晶灰岩及少量薄层硅质岩、硅质泥灰岩组合。水平纹层构造发育。西薄东厚
	棋梓桥组	D <sub>2q</sub>	41~156	深灰、灰黄色薄-中厚层状泥灰岩,瘤状、条带状含生物屑泥晶灰岩,含粉砂岩泥灰岩组合,部分地段灰岩呈透镜状产出,西薄东厚
	跳马涧组	D <sub>2t</sub>	100~450	紫红、紫灰、灰白色中厚-厚层状石英砂岩、粉砂岩、含铁砂质石英砾岩夹泥质粉砂岩、粉砂质页岩等
奥陶系	天马山组	O <sub>3t</sub>	>765	上部以细粒长石石英杂砂质板岩不等厚互层,间有细粒岩屑石英杂砂岩;中部为类复理石建造之成熟度低、快速堆积的长石石英砂岩、粉砂质板岩、板岩组成多个韵律层,局部可见交错层理构造;下部为浅变质细粒(岩屑)石英杂砂岩夹板岩、含粉砂质黏土岩等,板岩中发育有斜交层理构造
	烟溪组	O <sub>2y</sub>	40~57	岩性为灰黑色薄至中厚层状硅质岩夹炭质板岩、硅质板岩。
	桥亭子组	O <sub>1q</sub>	>600	岩性为浅变质的灰绿、灰黑色中厚层状,条纹(带)状板岩、粉砂质板岩,局部地段夹炭质板岩及少量粉砂岩

## 2 评价思路及研究步骤

### 2.1 方法与思路

利用野外样品采集与分析、地球物理勘查关键技术手段,结合已收集地质和物探相关资料,按照“资料收集→地球物理特征与基础地质条件研究→页岩气综合研究→有利区优选”技术流程(图2),先地表后地下,先取参数后评价,循序渐进,逐步深入。该工作方法及工作流程具有科学性、可行性。

(1)系统收集区域地质、物探、样品测试分析等相关资料,对湘中坳陷余田桥组泥页岩基础地质条件和地球物理特征进行初步归纳与总结,大致了解本区域页岩气赋存特征。

(2)在前期归纳总结的基础上,通过样品采集与分析手段,具体分析湘中坳陷余田桥组泥页岩岩性、电性、有机质类型、有机质丰度以及有机质成熟度特征,从而探讨页岩气形成条件;通过 MT 大地电磁工作手段,大致了解湘中坳陷雪峰山和南岭山系之间的过渡地带地质构造特征,为后期评价页岩气保存条件提供科学依据。

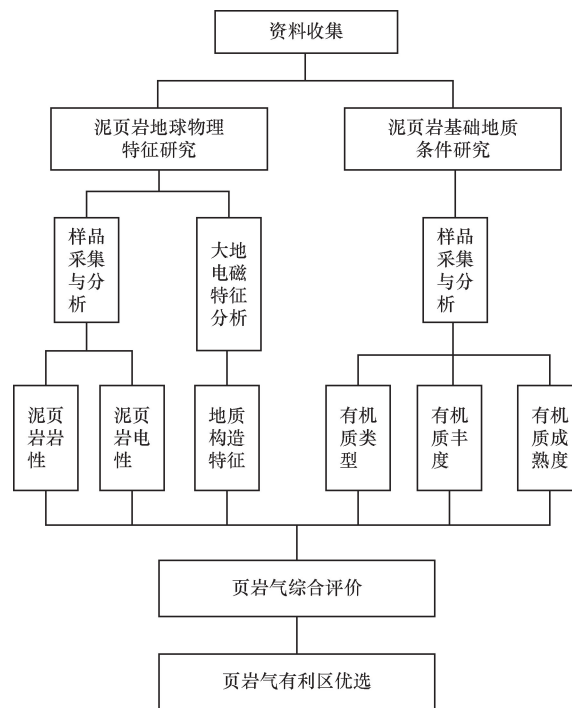


图 2 评价思路与流程图

Fig. 2 Evaluation approach and research flow chart

(3)通过样品采集与分析、MT 大地电磁等手段获取地质、地球物理相关参数,并对其进行综合研究,明确湘中坳陷余田桥组泥页岩电性、岩性、地质构造及有机地球化学特征,圈定页岩气有利目标区。

## 2.2 标本测试

由于前人在本测区内开展区域物探测量和石油勘探工作较少,大地电磁测量(MT)共采集了283块岩矿石标本,选用SQ-3C双频道轻便型激电仪,采用强迫电流法测量了其电阻率参数,具体统计结果如表2所示。

从表2可知,调查区内以生物碎屑灰岩、灰岩和白云岩为主的地层表现为高阻特征;以石英砂岩、硅质岩、泥质灰岩为主的地层表现为中阻特征;以页岩、炭质页岩、炭质板岩、板岩、泥质粉砂岩为主的地层表现为低阻特征,其中,炭质页岩、炭质板岩电阻率最低。目标层位与围岩之间存在电性差异,可以通过电阻率的变化,来划分地下岩层的变化,

进而推断页岩地层在深部的空间展布,为MT工作提供物探依据。

## 2.3 MT测线布置及成果解译

调查区内共布置MT测线4条(图3),数据采集使用GMS-07e大地电磁测深系统,采用固定远参考试站,“十”字行布极方式,开工前进行了仪器平行实验、一致性实验、采集时间、极距试验以及不同参考试距对比试验,确定了最优采集观测系统,数据处理及反演采用5D-DataProcessSystem软件。

以大地电磁测深反演电阻率剖面为主要依据,结合地质调查成果,以物性资料为桥梁,系统解释了调查区内4条MT剖面,对电性层分布特征所反映的地质信息进行识别,得到地质结构和地层分布等地质认识(图4)。

(1)如图4(a)所示,MT1线宏观上呈多层盘形态,由浅至深,电阻率呈高-低-高-低-高特征,与地质资料解译的向斜盆地构造吻合;向斜核部地表出露

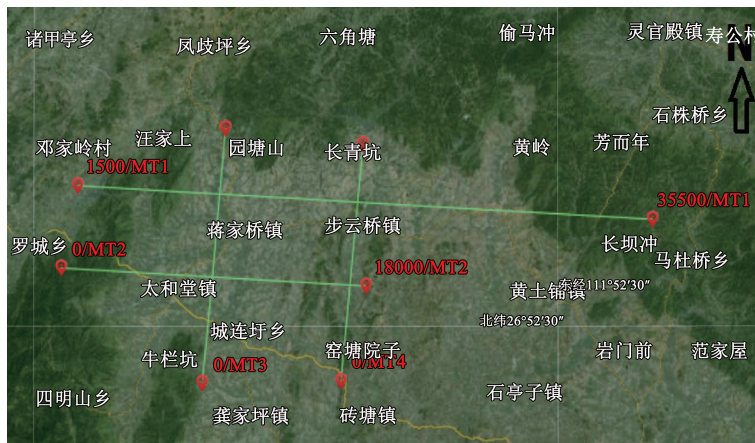


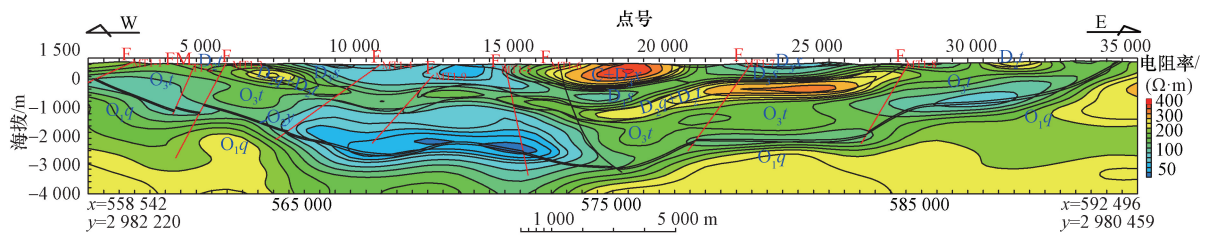
图3 MT测线布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of MT survey line layout

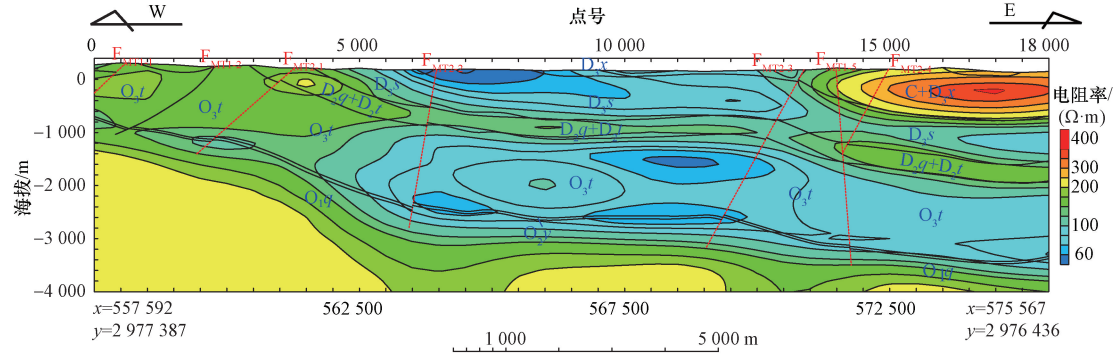
表2 大地电磁测深标本物性参数

Table 2 Physical parameters of magnetotelluric sounding specimens

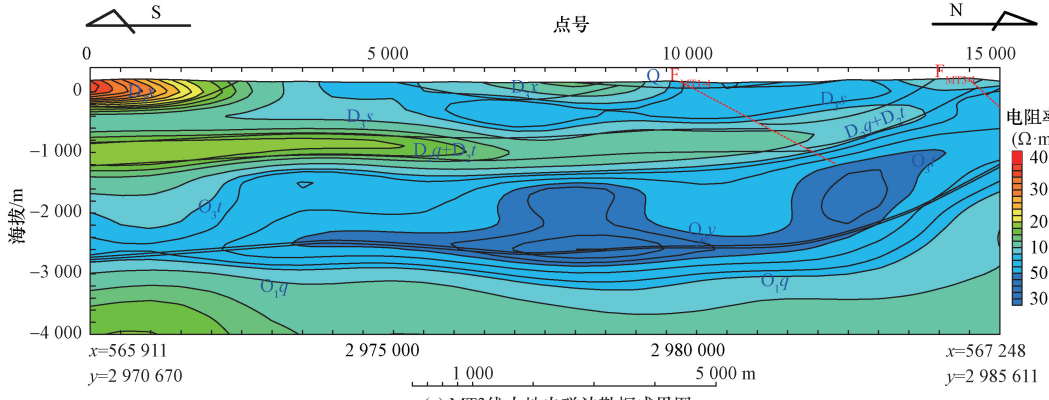
地层	标本岩性(块数)	电阻率变化范围/ $(\Omega \cdot m)$	电阻率平均值/ $(\Omega \cdot m)$	
白垩系	砾岩(22)、砂岩(25)	188 ~ 1 424	479	
三叠-侏罗系	$T_3-J_1$ 泥质粉砂岩(27)	147 ~ 712	361	
石炭系	C 生物碎屑灰岩(28)	1 425 ~ 5 354	3 271	
	泥灰岩(27)	193 ~ 971	569	
	白云岩(30)	1 867 ~ 4 512	3 142	
	锡矿山组	灰岩(27)	1 361 ~ 4 336	2 788
泥盆系	余田桥组	泥质灰岩(31)	301 ~ 1 012	
	页岩(32)	103 ~ 344	224	
	硅质岩(27)	358 ~ 1 319	705	
	棋梓桥组	灰岩(25)	1 448 ~ 3 251	2 113
	泥灰岩(30)	569 ~ 1 376	804	
跳马洞组	石英砂岩(26)、粉砂岩(22)、砾岩(27)	337 ~ 1 586	683	
奥陶统	天马山组	板岩(29)	218 ~ 512	
	长石石英砂岩(26)	493 ~ 1 453	717	
	烟溪组	炭质板岩(30)、板岩(27)	92 ~ 507	193
	桥亭子组	板岩(24)	243 ~ 653	414



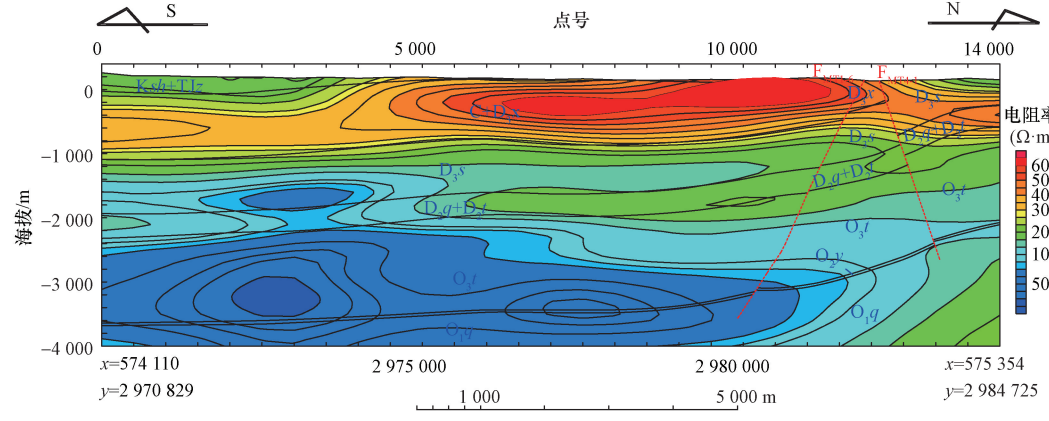
(a) MT1线大地电磁法勘探成果图



(b) MT2线大地电磁法勘探成果图



(c) MT3线大地电磁法勘探成果图



(d) MT4线大地电磁法勘探成果图

$\frac{\rho_{00}}{2\pi}$	电阻率等值线	$\frac{O_1^f}{O_1^q}$	推测地层界限	$F_{MT1-S}$	物探推测断层	Q	第四系
Ksh	神皇山组	Tlz	造上组	C	石炭系	D <sub>3x</sub>	锡矿山组
D <sub>3s</sub>	余田桥组	D <sub>2q</sub>	棋梓桥组	D <sub>2f</sub>	跳马涧组	O <sub>3f</sub>	天马山组
O <sub>3y</sub>	烟溪组	O <sub>1q</sub>	桥亭子组				

图4 太和堂镇-官家嘴地区大地电磁勘探成果图

Fig. 4 Magnetotelluric exploration results of Taihetang Town Guanjiazu Area

石炭系灰岩地层,电阻率相对较高,大于  $200 \Omega \cdot m$ ,部分地段出露泥盆系上统锡矿山组的灰岩地层,受岩石风化、溶蚀作用,电阻率偏低;7000~27000号点间、-1300 m 标高以上的低阻夹层,电阻率值普遍低于  $120 \Omega \cdot m$ ,推测为泥盆系上统余田桥组地层的电性反映,推测该层厚 400~800 m,为本区页岩气目标层位;余田桥组往下,呈现相对高阻层,电阻率值普遍大于  $150 \Omega \cdot m$ ,层厚较稳定,约 400 m,推测为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组地层的电性反映;再往下,为一厚层低阻层位区,电阻率值普遍低于  $150 \Omega \cdot m$ ,结合地质资料,推测为奥陶系上统天马山组+中统烟溪组地层的反映,推测层厚 1400 m 左右,其中,烟溪组炭质板岩层电阻率极低,但厚度不大,天马山组+中统烟溪组板岩、炭质板岩层有望成为本区页岩气深部目标层位;烟溪组往下,呈相对高阻,推测为奥陶系下统桥亭子组板岩地层的电性反映。

此外,根据电阻率等值线横向变化特征、结合地质资料,MT1 线还圈定 9 条主要断层,除一条逆断层,其余八条均为正断层。受断层影响,地层错动,断层面附近岩石破碎、含水。

(2)如图 4(b)所示,宏观上与 MT1 线西半区电性特征基本类似,整体上由浅至深,电阻率呈高-低-高-低-高特征,地质资料解译的向斜构造西翼吻合;向斜核部地表出露石炭系+泥盆系上统锡矿山组灰岩地层,电阻率相对较高,电阻率值大于  $200 \Omega \cdot m$ ,部分地段出露泥盆系上统锡矿山组的灰岩地层,受岩石风化、溶蚀作用,电阻率偏低;4000~18000号点间、-1600 m 标高以上的低阻夹层,平均电阻率小于  $120 \Omega \cdot m$ ,推测为泥盆系上统余田桥组地层的电性反映,推测该层厚 600~850 m,为本区页岩气目标层位;余田桥组往下,呈现相对高阻层,电阻率值普遍大于  $150 \Omega \cdot m$ ,层厚较稳定,约 400 m,推测为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组地层的电性反映;再往下,为一厚层低阻层位区,电阻率值普遍低于  $150 \Omega \cdot m$ ,结合地质资料,推测为奥陶系上统天马山组+中统烟溪组地层的反映,推测层厚 1400 m 左右,其中,烟溪组炭质板岩层电阻率极低,但厚度不大,天马山组+中统烟溪组板岩、炭质板岩层有望成为本区页岩气深部目标层位;烟溪组往下,呈相对高阻,推测为奥陶系下统桥亭子组板岩地层的电性反映。

此外,根据电阻率等值线横向变化特征、结合地质资料,MT2 线还圈定 7 条主要断层,其中 6 条为正断层,仅  $F_{MT2-4}$  为逆断层。受断层影响,地层错动,断层面附近岩石破碎、含水。

(3)如图 4(c)所示,宏观上由浅至深,电阻率呈高-低-高-低-高特征,且等值线较平缓,推测地层平缓;0~2500号点、5000~8500号点地表出露石炭

系+泥盆系上统锡矿山组灰岩地层,电阻率相对较高,大于  $200 \Omega \cdot m$ ,部分地段出露泥盆系上统锡矿山组的灰岩地层,受岩石风化、溶蚀作用,电阻率偏低;-800 m 标高以上的低阻夹层,电阻率值普遍小于  $150 \Omega \cdot m$ ,推测为泥盆系上统余田桥组地层的电性反映,推测该层厚 600~825 m,为本区页岩气目标层位;余田桥组往下,呈现相对高阻层,电阻率值普遍大于  $150 \Omega \cdot m$ ,层厚较稳定,约 400 m,推测为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组地层的电性反映;再往下,为一厚层低阻层位区,电阻率值普遍低于  $100 \Omega \cdot m$ ,结合地质资料,推测为奥陶系上统天马山组+中统烟溪组地层的反映,推测层厚 1400 m 左右,其中,烟溪组炭质板岩层电阻率极低,但厚度不大,天马山组+中统烟溪组板岩、炭质板岩层有望成为本区页岩气深部目标层位;烟溪组往下,呈相对高阻,推测为奥陶系下统桥亭子组板岩地层的电性反映。

此外,根据电阻率等值线横向变化特征、结合地质资料,MT3 线还圈定 2 条主要断层。受断层影响,地层错动,断层面附近岩石破碎、含水。

(4)如图 4(d)所示,宏观上由浅至深,电阻率呈低-高-低-高-低-高特征,且等值线较平缓,推测地层平缓;表层受岩石风化作用,电阻率偏低;上部高阻层推测为石炭系+泥盆系上统锡矿山组的灰岩地层,电阻率大于  $250 \Omega \cdot m$ ,推测层厚 600~1000 m;-1900 m 标高以上的低阻夹层,电阻率值普遍小于  $200 \Omega \cdot m$ ,推测为泥盆系上统余田桥组地层的电性反映,推测该层厚 650~825 m,为本区页岩气目标层位之一;余田桥组往下,呈现相对高阻层,电阻率值普遍大于  $150 \Omega \cdot m$ ,层厚较稳定,约 400 m,推测为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组地层的电性反映;再往下,为一厚层低阻层位区,电阻率值普遍低于  $150 \Omega \cdot m$ ,结合地质资料,推测为奥陶系上统天马山组+中统烟溪组地层的反映,推测层厚 1400 m 左右,其中,烟溪组炭质板岩层电阻率极低,但厚度不大,天马山组+中统烟溪组板岩、炭质板岩层有望成为本区页岩气深部目标层位;烟溪组往下,呈相对高阻,推测为奥陶系下统桥亭子组板岩地层的电性反映。

此外,根据电阻率等值线横向变化特征、结合地质资料,MT4 线还圈定 2 条主要断层。受断层影响,地层错动,断层面附近岩石破碎、含水。

## 2.4 MT 综合解译

### 2.4.1 目标层位与构造发育

根据图 4 所示,研究区共圈出了目标层位 2 个,泥盆系上统余田桥组为主要含气层位,奥陶系上统天马山组+中统烟溪组为深部有利远景层位;此外,四条测线共圈出 15 处断层,受断层影响,目标层

位错动成多段,目标层界面清晰,断层、褶皱形态清晰。后经邵地1井钻孔资料显示的各层位特征与推断解释成果基本一致。

2.4.2 目标地层电性分布规律

(1)泥盆系上统余田桥组主要岩性为砂岩、页岩、局部夹灰岩,电阻率整体小于 200 Ω·m,其上覆地层石炭系+泥盆系上统锡矿山组主要岩性为灰岩、白云岩、石英砂岩,电阻率大于 200 Ω·m。下伏地层为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组灰岩、泥灰岩、石英砂岩,电阻率也是相对较高,电阻率大于 150 Ω·m。

(2)奥陶系上统天马山组+中统烟溪组主要岩性为长石石英杂砂质板岩、板岩、页岩,炭质页岩,电阻率整体小于 200 Ω·m;其上覆地层为泥盆系中统棋梓桥组+跳马涧组地层,为相对高阻;下伏地层为奥陶系下统桥亭子组板岩地层,电阻率也相对较高,值整体大于 120 Ω·m;通过低阻特征可以圈定泥盆系上统余田桥组、奥陶系上统天马山组+中统烟溪组层位。

3 泥页岩有机地化特征

3.1 泥页岩有机质类型

本次研究工作对余田桥组、天马山组及烟溪组样品进行了干酪根类型检测,检测结果如表3所示。

其中余田桥组暗色泥页岩显微组分中以腐泥组分含量最高,并含有少量镜质组与惰质组,类型指数为 72.8~74.5,干酪根类型为 II<sub>2</sub>型;天马山组与烟溪组炭质板岩及含炭质硅质页岩干酪根显微组分主要为腐泥组与惰质组,几乎不含镜质组与壳质组,类型指数均大于 80,干酪根类型以 I 型为主。

整体来看,区块内暗色泥页岩的干酪根类型均为生烃潜力强的类型,因此干酪根类型不是影响页岩气成藏的主控因素。

3.2 泥页岩有机质丰度

有机碳含量(total organic content, TOC)是反映页岩有机质丰度的指标,是页岩气成藏的主控因素之一。调查区黑色泥页岩演化程度较高,采用有机碳含量对余田桥组泥页岩层进行了评价(表4、图5、

图6),评价方法采用中国公认的有机碳质量分数等于 0.5% 为下限的划分标准。

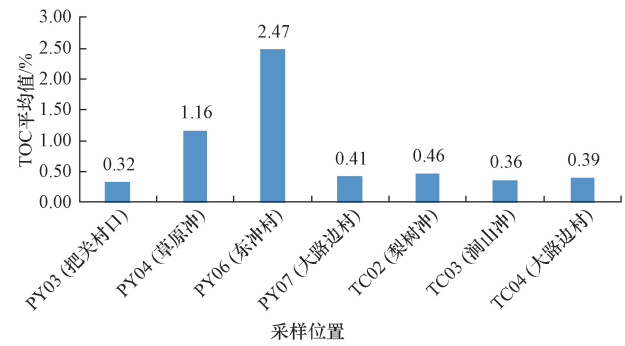


图5 余田桥组 TOC 含量分布

Fig. 5 Distribution of TOC content in Shetianqiao Formation

表4 余田桥组样品有机碳含量检测结果表

Table 4 Organic carbon content test results of Shetianqiao Formation samples

样品编号	TOC/%	样品编号	TOC/%
PY03-01	0.64	TC02-01	0.76
PY03-02	0.59	TC02-02	0.55
PY03-03	0.29	TC02-03	0.23
PY03-04	0.19	TC02-04	0.62
PY03-05	0.15	TC02-05	1.95
PY03-06	0.09	TC02-06	0.18
PY03-07	0.36	TC02-07	0.15
PY03-08	0.27	TC02-08	0.23
PY03-09	0.33	TC02-09	0.2
PY03-10	0.35	TC02-10	0.2
PY03-11	0.27	TC02-11	0.16
PY03-12	0.32	TC02-12	0.33
PY04-01	1.64	TC03-01	0.44
PY04-02	0.68	TC03-02	0.24
PY06-01	2.39	TC03-03	0.22
PY06-02	0.47	TC03-04	0.28
PY06-03	2.27	TC03-05	0.52
PY06-04	2.49	TC03-06	0.22
PY06-05	2.23	TC03-07	0.58
PY06-06	3.03	TC04-01	0.35
PY06-07	2.39	TC04-03	0.61
PY06-08	2.98	TC04-04	0.26
PY06-09	3.46	TC04-05	0.24
PY06-10	2.97	TC04-06	0.35
PY07-01	0.41	TC04-07	0.53

表3 干酪根显微组分鉴定及类型划分表

Table 3 Microscopic component identification and type classification of Kerogen

层位	样品编号	腐泥组成分 含量/%				壳质组成分 含量/%				镜质组成分 含量/%			惰质组成分 含量/%		类型	
		藻类体	腐泥无定形体	腐泥碎屑体	小计	腐殖无定形体	菌胞体	壳质碎屑体	小计	结构镜质体	无结构镜质体	小计	丝质体	指数	类型	
O <sub>3t</sub>	PY01-06	—	94	—	94	—	—	—	0	—	2	2	4	88.50	I	
O <sub>2y</sub>	PY05-2	—	96	—	96	—	—	—	0	—	2	2	2	92.50	I	
O <sub>3t</sub>	PY08-02	—	94	—	94	—	—	—	0	—	3	3	3	88.75	I	
D <sub>3s</sub>	PY6-03	—	85	—	85	—	—	—	0	—	11	11	4	72.80	II <sub>2</sub>	
O <sub>2y</sub>	TC01-13	—	95	—	95	—	—	—	0	—	3	3	2	90.75	I	
D <sub>3s</sub>	TC02-08	—	86	—	86	—	—	—	0	—	10	10	4	74.50	II <sub>2</sub>	
D <sub>3s</sub>	TC03-02	—	81	—	81	—	—	—	0	—	14	14	5	65.50	II <sub>2</sub>	

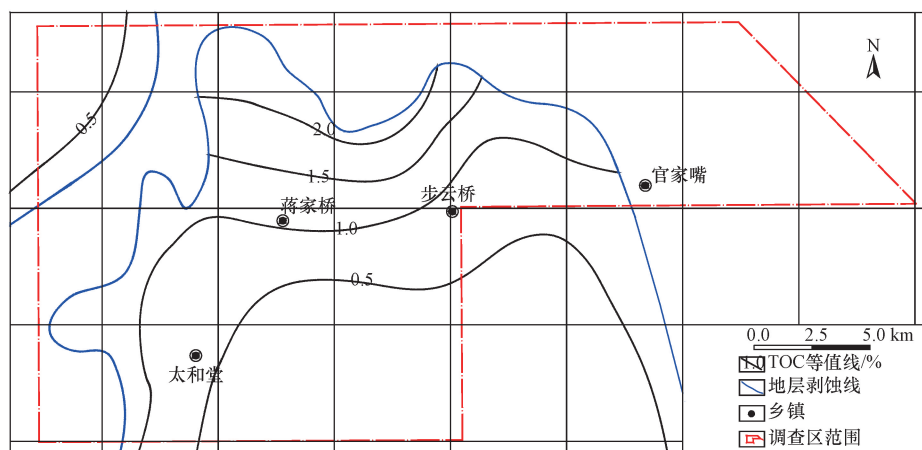


图6 余田桥组有机碳含量等值线图

Fig. 6 Contour map of organic carbon content in Shetianqiao Formation

根据测试分析结果,余田桥组有机碳含量在0.32%~3.46%,平均为0.80%。其中以东冲村余田桥组有机碳含量最高,为2.47%,其他剖面普遍较低,整体表现为自北西向南东递减趋势。

### 3.3 泥页岩有机质成熟度

有机质成熟度  $R_o$  是评价页岩气资源评价的关键参数,一般来说,只有在成熟度较高的区域才有页岩气的产出,说明成熟度高有利于页岩气的生产,在合适的成熟度条件下泥页岩中才能富集气藏。根据天然气技术研究所公布的 Barnett 页岩气成熟度指标<sup>[4]</sup>,认为  $0.6\% < R_o < 1.3\%$  处于成熟阶段,  $1.3\% < R_o < 2.0\%$  处于高成熟阶段,  $R_o > 2.0\%$  处于过成熟阶段。

根据余田桥组干酪根成熟度测试结果,镜质体反射率  $R_o$  范围为0.79%~2.51%,平均为1.78%,处于高熟-过成熟阶段。最大热解温度  $T_{max}$  为304.2~

539.0 °C,平均450 °C,也表示热演化程度处于高演化阶段。平面上,全区  $R_o$  平均值均已超过1.7%以上,预示大部分地区余田桥组泥岩处于高成熟阶段,与地层沉积中心对应,调查区自北西部往东南方向成熟度增高(图7、表5、表6、图8)。

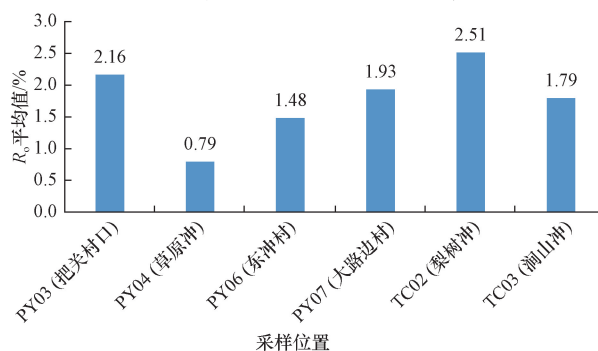
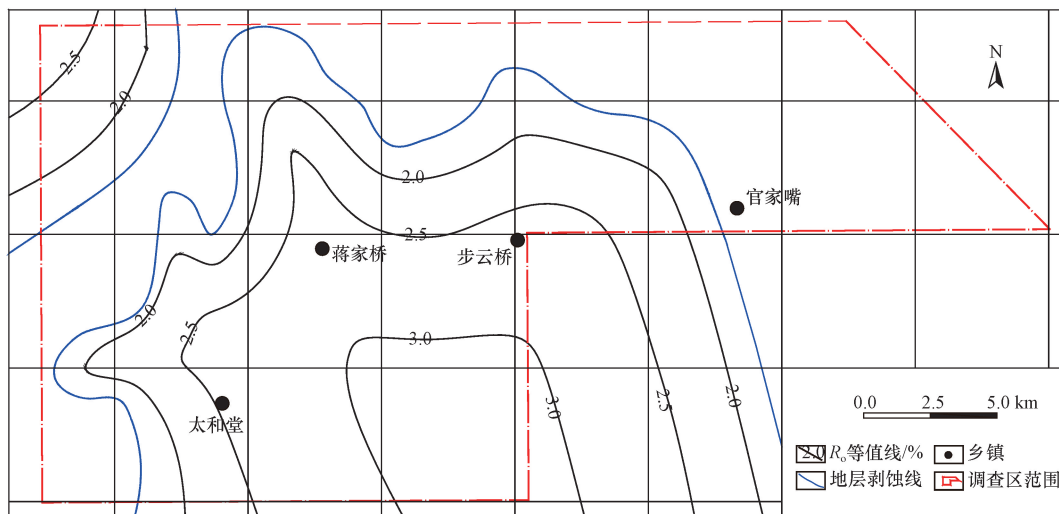
图7 余田桥组  $R_o$  分布Fig. 7 Distribution of  $R_o$  in Shetianqiao Formation图8 余田桥组暗色泥页岩  $R_o$  等值线图Fig. 8  $R_o$  contour map of dark mudstone shale in Shetianqiao Formation

表5 余田桥组样品岩石热解分析数据

Table 5 Thermal decomposition analysis data of Shetianqiao Formation sample rocks

样品编号	$S_1/(mg \cdot g^{-1})$	$S_2/(mg \cdot g^{-1})$	$T_{max}/^{\circ}C$
PY03-02	0.029 2	0.057 6	539.0
PY03-06	0.002 8	0.009 6	485.0
PY03-10	0.016 9	0.081 3	502.0
PY04-01	0.034 5	0.081 1	374.0
PY06-03	0.002 0	0.006 8	516.0
PY06-06	0.023 9	0.071 2	362.8
PY07-01	0.016 4	0.080 8	403.7
TC02-07	0.006 1	0.015 0	516.6
TC03-02	0.004 0	0.005 3	304.2
TC03-01	0.014 2	0.008 5	495.8

注: $S_1$ 表示在300℃温度条件下检测到的单位质量岩石中烃含量,这部分烃为液态烃,通常称为热解烃; $S_2$ 表示在300~600℃温度条件下检测到的单位质量岩石中胶质、沥青质组分含量,这部分烃为裂解烃。

表6 余田桥组样品镜质体反射率数据

Table 6 Vitreous reflectance data of Shetianqiao Formation samples

样品编号	$R_o/\%$	样品编号	$R_o/\%$
PY03-02	2.36	PY06-06	1.51
PY03-06	1.95	PY07-01	1.93
PY04-01	0.79	TC02-07	2.51
PY06-03	1.45	TC03-05	1.79

表7 海相页岩气有利区优选参考指标

Table 7 Reference indicators for optimal selection of marine shale Gas Beneficial Areas

主要参数	有利区
页岩面积下限	有可能在其中发现目标(核心)区的最小面积,在稳定区或改造区都可能分布
页岩厚度	厚度稳定,单层不小于10 m,有效厚度>20 m
TOC	平均不小于1.0%
$R_o$	一般介于1.0%~3.5%
埋深	500~4 500 m
地表条件	平原丘陵、低山中山,地形高差较小
保存条件	有一定上覆地层,未遭受严重剥蚀

深、厚度、有机碳含量等值线图、成熟度等值线图,对调查区有利区进行优选。综合前面所做研究成果,将余田桥组有机碳含量等值线图、成熟度等值线图及MT推测的厚度埋深等资料进行叠加分析。最终在调查区范围内优选了页岩气有利区一处,主要目的层位为上泥盆统余田桥组(图9)。

优选的有利区位于调查区中部,蒋家桥镇-步云桥镇一带,步云桥复向斜西翼,面积约47.5 km<sup>2</sup>。区内余田桥组暗色泥页岩厚度基本在25~50 m,且自北东端向南西端厚度增加;底界埋深在500~1 500 m,向南部向斜倾伏端不断加深;据有利区内邵地1井钻测录成果,有机碳含量相对较高,一般在0.36%~3.67%,平均为0.92%;热演化程度 $R_o$ 范围为0.99%~2.51%,平均为1.95%,处于高熟-过成熟阶段;这与样品测试和地球物理解译成果基本一致。有利区范围内地形地貌较平坦,发育多条河流,水文条件较好。

### 4 有利区优选

根据中国地质调查局<sup>[29-30]</sup>页岩气有利区划分标准(表7),主要参考含气页岩层段厚度、有机碳含量、成熟度及埋深等条件,综合调查区含气泥页岩埋

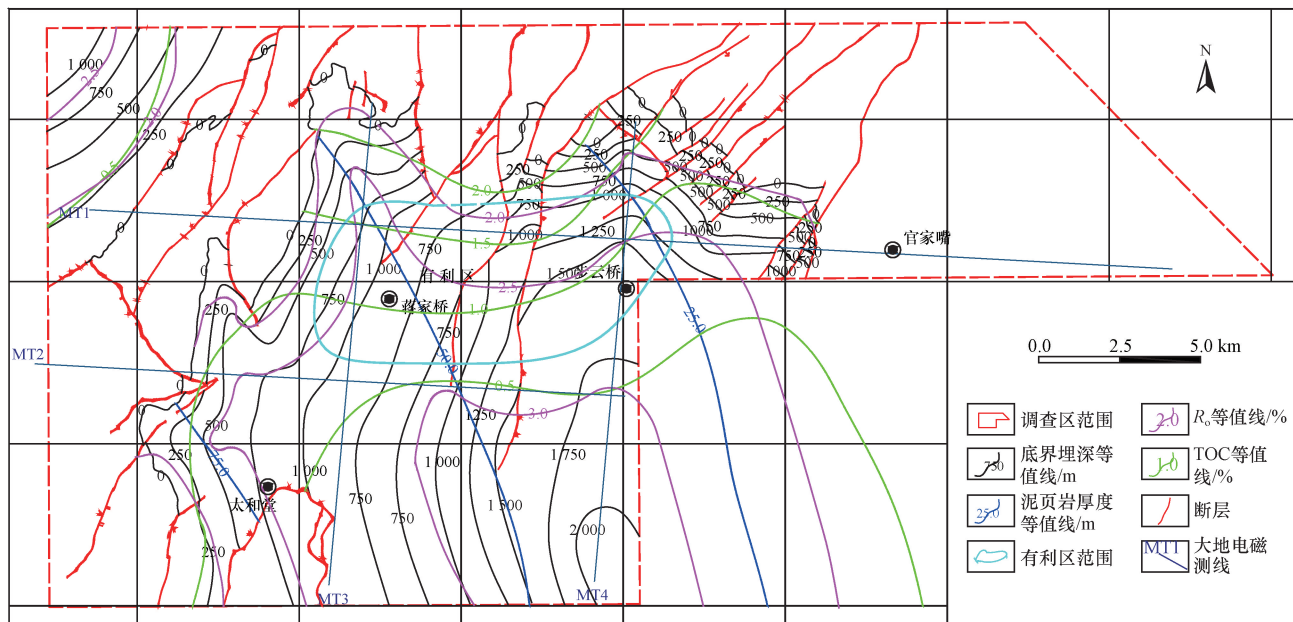


图9 调查区余田桥组页岩气综合评价图

Fig. 9 Comprehensive evaluation of shale gas in the shetianqiao formation of the survey area

## 5 结论

(1)通过地球物理勘查及地质调查,研究区余田桥组主要目的层段为中下段的深灰色泥灰岩、泥质灰岩及钙质泥页岩,厚度平均为48.42 m,自东向西逐渐减薄;该组底界埋深为0~2 000 m,沿背斜两翼依次向北西与南东方向埋深增大,在步云桥复向斜埋深稳定,埋深变化率相对较小。

(2)通过样品分析测试,研究区余田桥组有机质类型以 $II_2$ 型为主,有机碳含量在0.32%~3.46%,平均为0.80%,整体表现为自北西向南东递减趋势;镜质体反射率 $R_o$ 值范围为0.79%~2.51%,平均为1.78%,处于高熟阶段。

(3)综合余田桥组与天马山组暗色泥页岩厚度发育情况、埋深、保存条件以及各项有机地化参数等值线图,参考页岩气有利区优选评价指标,在调查区内步云桥复向斜西翼优选页岩气有利区一处。

(4)因前人研究薄弱,调查区内可参考资料有限,采用样品分析测试与地球物理识别综合调查方法较好的查明了余田桥组泥页岩特征,方法选择具有绿色、低成本、高效的地质、地球物理与地球化学综合刻画技术,后经钻井验证,取得了良好的地质效果。

### 参 考 文 献

[1] Hill R J, Jarvie D M, Zumberge J. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 445-473.

[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] 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, 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 Edition), 2011, 26(2): 1-7.

[4] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 87-93.  
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Zhang Peixian, et al. Shale gas reservoir characteristics of barnett shale gas reservoir in Fort Worth Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 87-93.

[5] 朱文卿, 唐书恒, 郝兆栋, 等. 五峰-龙马溪组页岩有机质赋存特征及其对孔隙结构的影响 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 6839-6846.  
Zhu Wenqing, Tang Shuheng, Xi Zhaodong, et al. Characteristics

of organic matter and its implications for pore structure of Wufeng-Longmaxi Formation [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 6839-6846.

[6] 温晓红, 马超, 梁峰, 等. 页岩气储层含气性影响因素分析-以湘西下寒武统牛蹄塘组为例 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 225-229.  
Wen Xiaohong, Ma Chao, Liang Feng, et al. Gas-bearing influential factors analysis of shale gas reservoir: a case from Niutitang Formation in Lower Cambrian of Western Hunan [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 225-229.

[7] 张兵, 唐书恒, 郝兆栋, 等. 湘西北五峰-龙马溪组层序地层特征及有机质富集探讨—以 XY-3 井为例 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(10): 1026-1038.  
Zhang Bing, Tang Shuheng, Xi Zhaodong, et al. Sequence stratigraphic characteristics and organic matter enrichment of Wufeng-Longmaxi Formation in northwestern Hunan - a case study of Well XY-3 [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(10): 1026-1038.

[8] 郭永岩, 梁明亮, 王宗秀, 等. 湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机地球化学与矿物组成特征 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(3): 392-399.  
Guo Yongyan, Liang Mingliang, Wang Zongxiu, et al. Organic geochemistry and mineral composition characteristics in shales of Niutitang Formation northwestern Hunan [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(3): 392-399.

[9] 高莉, 王宗秀, 梁明亮, 等. 湘西北地区五峰-龙马溪组页岩物质组成特征与页岩气潜力分析 [J]. 中国地质, 2019, 46(2): 407-418.  
Gao Li, Wang Zongxiu, Liang Mingliang, et al. Material composition and hydrocarbon potential of the shale of Wufeng-Longmaxi Formation in northwestern Hunan [J]. Geology in China, 2019, 46(2): 407-418.

[10] 黄俨然, 肖正辉, 焦鹏, 等. 湘西北牛蹄塘组探井页岩气富集要素的对比和启示 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2240-2248.  
Huang Yanran, Xiao Zhenghui, Jiao Peng, et al. Comparison of factors for shale gas accumulation in Niutitang formation wells in northwestern Hunan and its implications [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(9): 2240-2248.

[11] 焦鹏, 郭建华, 王玺凯, 等. 湘西北牛蹄塘组页岩气储层岩矿特征及意义 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1447-1458.  
Jiao Peng, Guo Jianhua, Wang Xikai, et al. Characteristics and significance of petrological-mineralogical of lower Cambrian Niutitang formation shale gas reservoir in Northwest Hunan [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(6): 1447-1458.

[12] 秦明阳, 郭建华, 黄俨然, 等. 四川盆地外复杂地质条件区海相页岩气“甜点区”优选: 以湘西北地区古生界为例 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 596-606.  
Qin Mingyang, Guo Jianhua, Huang Yanran, et al. “Sweet spots

- zone" optimization of marine shale gas in complex geological conditions area out of Sichuan basin: a case of Paleozoic in Northwestern Hunan, China[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(3): 596-606.
- [13] 扈金刚, 黄勇, 唐书恒, 等. 基于热模拟实验探讨湘鄂西地区黑色页岩孔隙结构演化[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(11): 4306-4315.
- Hu Jingang, Huang Yong, Tang Shuheng, et al. The pore structure evolution of black shale in western Hunan-Hubei provinces based on pyrolysis simulation experiment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(11): 4306-4315.
- [14] 苗凤彬, 张保民, 张国涛, 等. 湘中涟源凹陷泥盆系余田桥组页岩气差异性富集控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1482-1499.
- Miao Fengbin, Zhang Baomin, Zhang Guotao, et al. Controlling factors for the differential enrichment of Devonian Shetianqiao Formation shale gas in Lianyuan Sag, central Hunan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1482-1499.
- [15] 田巍, 陈孝红, 李旭兵, 等. 湘中涟源凹陷下石炭统天鹅坪组页岩气成藏条件及主控因素[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 54-63.
- Tian Wei, Chen Xiaohong, Li Xubing, et al. Accumulation conditions and main factors of the Lower Carboniferous Tianeping Formations in Lianyuan Sag in the middle of Hunan Province[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(5): 54-63.
- [16] 刘安, 孟贵希, 田巍, 等. 湘中邵阳凹陷泥盆系余田桥组古流体特征及其页岩气保存意义[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1469-1481.
- Liu An, Meng Guixi, Tian Wei, et al. Paleo-fluid characteristics of Devonian Shetianqiao Formation in Shaoyang Sag, central Hunan and its shale gas preservation significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1469-1481.
- [17] 陈孝红, 石万钟, 田巍, 等. 湘中拗陷石炭系天鹅坪组富有机质页岩的形成与页岩气富集机理[J]. *中国地质*, 2025, 52(2): 1-15.
- Chen Xiaohong, Shi Wanzhong, Tian Wei, et al. Mechanism of organic-rich shale formation and shale gas enrichment in the Carboniferous Tian'eping Formation from the Xiangzhong Depression[J]. *Geology in China*, 2025, 52(2): 1-15.
- [18] 徐国盛, 张震, 罗小平, 等. 湘中和湘东南拗陷上古生界泥页岩含气性及其影响因素[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 577-587.
- Xu Guosheng, Zhang Zhen, Luo Xiaoping, et al. Gas-bearing characteristics and affected factors of Upper Paleozoic shale in depressions of Central Hunan and Southeast Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 577-587.
- [19] 马若龙. 湘中、湘东南及湘东北地区泥页岩层系地质特征与页岩气勘探潜力[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- Ma Ruolong. The geological characteristics of the argillite formation and potentiality for the exploration of the shale gas in Central Hunan, southeastern Hunan and northeastern Hunan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [20] 杨宁, 唐书恒, 张松航, 等. 湘中南龙潭组页岩孔隙特征及其成藏意义[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(2): 66-73.
- Yang Ning, Tang Shuheng, Zhang Songhang, et al. Structure characteristics and accumulation significance of Pores in Longtan Shale, Central and South Hunan[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(2): 66-73.
- [21] 李岩, 鱼磊, 蔡宁波, 等. 湘中拗陷与湘东南拗陷上二叠统龙潭组页岩气形成条件及资源潜力探讨[J]. *矿产与地质*, 2021, 35(4): 654-662.
- Li Yan, Yu Lei, Cai Ningbo, et al. Study of formation condition and shale-gas resource potential of Upper Permian Longtan Formation in Xiangzhong and Xiangdongnan Depression[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 35(4): 654-662.
- [22] 罗小平, 刘军, 徐国盛, 等. 湘中拗陷泥盆-石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 206-214.
- Luo Xiaoping, Liu Jun, Xu Guosheng, et al. Geochemical characteristics and isothermal adsorption properties of the Devonian-Carboniferous marine mud shale in the Xiangzhong Depression, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(2): 206-214.
- [23] 敬乐, 潘继平, 徐国盛, 等. 湘中拗陷海相页岩层系岩相古地理特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 215-222.
- Jing Le, Pan Jiping, Xu Guosheng, et al. Lithofacies-paleogeography characteristic of the marine shale series of strata in the Xiangzhong depression, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(2): 215-222.
- [24] 钱劲, 马若龙, 步少峰, 等. 湘中、湘东南拗陷泥页岩层系岩相古地理特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(6): 688-695.
- Qian Jin, Ma Ruolong, Bu Shaofeng, et al. Lithofacies-paleogeography characteristic of marine shale series of strata in Xiangzhong and Xiangdongnan depressions, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(6): 688-695.
- [25] 徐昉昊, 钱劲, 袁海锋, 等. 湘中-湘东南拗陷泥页岩层系沉积模式及储层特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 80-89.
- Xu Fanghao, Qian Jin, Yuan Haifeng, et al. Sedimentary mode and reservoir properties of mud shale series of strata in Xiangzhong-Xiangdongnan depression, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42(1): 80-89.
- [26] 巩书华, 蔡宁波, 杜江, 等. 湘中祁东地区余田桥组页岩气成藏地质条件分析[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(8): 35-39.
- Gong Shuhua, Cai Ningbo, Du Jiang, et al. Shetianqiao formation shale gas reservoiring geological condition analysis in Qidong Area, Central Hunan[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(8): 35-39.

- 35-39.
- [27] 吕嵘, 张保民, 李芳, 等. 湖南省涟源凹陷泥盆纪余田桥组页岩储层测井评价[J]. 华南地质, 2021, 37(3): 313-320.  
Lü Rong, Zhang Baomin, Li Fang, et al. Logging evaluation of shale reservoir in devonian Shetianqiao Formation in Lianyuan Sag, Hunan Province [J]. South China Geology, 2021, 37(3): 313-320.
- [28] 陈林, 张保民, 陈孝红, 等. 湘中坳陷邵阳凹陷余田桥组泥岩岩相及其成因演化[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1282-1294.  
Chen Lin, Zhang Baomin, Chen Xiaohong, et al. Lithofacies and origin evolution of mudstone of Shetianqiao Formation in Shaoyang Sag of Xiangzhong Depression[J]. Earth Science, 2021, 46(4): 1282-1294.
- [29] 中国地质调查局. 页岩气基础地质调查工作指南[S]. 北京: 中国地质调查局, 2015.  
China Geological Survey. Guidelines for basic geological survey of shale gas[S]. Beijing: China Geological Survey, 2015.
- [30] 国土资源部油气资源战略研究中心. 页岩气选区标准与资源评价手册[S]. 北京: 国土资源部油气资源战略研究中心, 2011.  
Oil and Gas Resources Strategic Research Center of the Ministry of Land and Resources. Shale gas selection standards and resource evaluation manual[S]. Beijing: Oil and Gas Resources Strategic Research Center of the Ministry of Land and Resources, 2011.