

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.002

新疆三塘湖盆地石头梅地区芦草沟组油页岩测井响应特征及识别模型

徐银波^{1,2}, 姚树青^{3*}, 罗晓玲⁴, 毕彩芹¹

XU Yinbo^{1,2}, YAO Shuqing^{3*}, LUO Xiaoling⁴, BI Caiqin¹

1. 中国地质调查局油气资源调查中心/中国地质调查局非常规油气地质重点实验室, 北京 100083;

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

3. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083;

4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055

1. Oil and Gas Survey, China Geological Survey/ Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Geology, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

3. Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

4. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China

摘要:为了研究三塘湖盆地石头梅地区油页岩测井响应特征,建立油页岩测井识别模型,基于样品测试数据和钻井测井数据分析,开展了油页岩特征分析、测井响应特征和 $\Delta\log R$ 模型搭建。研究表明,三塘湖盆地石头梅地区油页岩有机质丰度高,成熟度低,有机质类型为 I—II₁型,含油率中等。与围岩相比,油页岩具有高电阻率、高声波时差、低密度、高自然伽马的特征。泥岩的总有机碳(TOC)与电阻率和声波时差具有很好的相关性,利用 2 条曲线的叠合,建立了 $\Delta\log R$ 的计算公式。在此基础上,对 TOC 和 $\Delta\log R$ 进行耦合,建立了 TOC 的测井识别模型。油页岩的含油率与 TOC 具有良好的相关性,根据含油率和 TOC 的相关公式及 TOC 和 $\Delta\log R$ 的相关公式,建立了基于 $\Delta\log R$ 的油页岩含油率测井识别模型。基于此模型获得的预测的含油率与实测含油率相关系数可达 0.86,具有较好的相关性,可为研究区后续油页岩的识别和老井资料的使用提供依据。

关键词:油页岩;测井; $\Delta\log R$;芦草沟组;石头梅地区;三塘湖盆地;油气勘查工程

中图分类号:P618.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)11-1808-10

Xu Y B, Yao S Q, Luo X L, Bi C Q. Logging response characteristics and identification model of oil shale of Lucaogou Formation in Shitoumei area of Santanghu Basin, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1808–1817

Abstract: This contribution studied the organic geochemistry and logging response characteristics of oil shale in Shitoumei area of Santanghu Basin and built a $\Delta\log R$ model based on the analysis of sample testing data and logging data, in order to establish a logging identification model of oil shale. The results show that the oil shale in the study area has high organic matter abundance and low maturity, and the organic matter type is I—II₁ with a medium oil yield. Compared with surrounding rock, oil shale is characterized by high resistivity, high sonic interval transit time, low density and high natural gamma. The TOC of mudstone in the study area shows the best correlation with the resistivity and the sonic interval transit time logging and a calculation formula for $\Delta\log R$ model is thus established based on the superposition of the two logging curves. Then, through the coupling of the TOC data and $\Delta\log R$, a logging

收稿日期:2021-10-25;修订日期:2021-12-01

资助项目:中国地质调查局项目《全国煤层气重点调查区战略性矿产调查评价》(编号:DD20230325)和国家自然科学基金项目《油页岩纹层中古环境信息重建及毫米级有机质富集机理研究》(批准号:41772092)

作者简介:徐银波(1987-),男,硕士,工程师,从事油页岩成矿理论、沉积学、层序地层学研究。E-mail:xuyinbo87@126.com

* 通信作者:姚树青(1988-),女,博士,工程师,从事非常规能源调查研究工作。E-mail:yaoshuqing15@163.com

identification model of TOC is established. The oil yield of oil shale in the study area has a good correlation with TOC, so the logging identification model of oil yield of oil shale is established based on the relevant formulas of oil yield and TOC, as well as the relevant formulas of TOC and $\Delta\log R$. The correlation coefficient between the measured oil yield and the predicted oil yield based on this model can reach 0.86, indicating a good correlation. These models can be a basis for the subsequent identification of oil shale and the utilization of old well data in the study area.

Key words: oil shale; logging response; $\Delta\log R$; Lucaogou Formation; Shitoumei area; Santanghu Basin; oil and gas exploration engineering

$\Delta\log R$ 技术是 Exxon 和 Esso 公司于 1979 开发的一种利用测井资料识别和计算含有机质岩层中有机碳的方法(朱振宇等, 2003)。油页岩含丰富的有机质, 其岩石骨架结构和成分组成与泥岩、页岩、砂岩不同, 在测井曲线上反映出不同的特征(朱建伟等, 2012)。 $\Delta\log R$ 技术被应用于松辽盆地(贺君玲等, 2006; 胡霞等, 2014; 翟艇等, 2015)、柴达木盆地(范晶晶等, 2016; 李永红等, 2018)、鄂尔多斯盆地(李玉宏等, 2014)、新疆大长沟盆地(张美琪等, 2020)等地区的油页岩研究和评价中, 并取得了良好的效果, 因此该技术在油页岩识别中是一项较成熟的技术。

三塘湖盆地是中国西北一个重要的陆相含油气盆地, 盆地内蕴含常规油气和致密油、页岩油、页岩气、煤层气、油页岩等非常规油气资源(陈孟晋等, 2003; 贾承造等, 2012; 马永生, 2020; 张金川等, 2021)。三塘湖盆地预测油页岩资源 113.75×10^8 t, 主要为潜在资源和远景资源, 工作程度较低(夏明, 2020)。目前针对油页岩的研究较少, 主要包括沉积构造背景和微量、稀土元素特征研究(Tao et al., 2017; 张国伟等, 2017), 其他方面有待开展进一步的研究。为了解决三塘湖盆地油页岩研究少、资料少、测试数据少的问题, 本文利用现有的一口油页岩钻井, 通过分析油页岩的测井响应特征, 建立油页岩的测井识别模型, 带动研究区油页岩研究中测井资料的利用, 提高油页岩的研究程度。

1 区域地质背景

三塘湖盆地是中国西北一个北西—南东向展布的狭长盆地, 盆地面积约 2.3×10^4 km², 与准噶尔盆地、吐哈盆地相邻(熊春雷等, 2021)。大地构造上位于西伯利亚板块与哈萨克—准噶尔板块的结合部位, 夹持在阿曼太—扎河坝与卡拉麦里巨型缝合带之间(图 1-a)(李玮等, 2012; 徐银波等, 2022c)。该盆地经历了断陷、拗陷、挤压改造、逆冲、走滑等演化过程(柳益群等, 2006), 现今呈南北分带、东西

分块的构造格局(刘兴旺等, 2010)。其中, 中央拗陷带可划分为“四凸五凹”9 个构造单元(图 1-b)(陈常超等, 2018)。

三塘湖盆地以古生界为基底, 其上发育以陆内河流、湖泊相为特征的二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系—新近系等陆源碎屑沉积(朱伯生等, 1997; 周鼎武等, 2006)。中二叠世芦草沟组时期, 湖盆由乌拉泊—井子沟组时期的湖盆扩张期进入到湖盆发育的鼎盛期, 盆地的沉积环境也由河流相—三角洲相—湖泊相的组合环境变为滨浅湖—半深湖为主的沉积环境, 并以深湖—半深湖相沉积的暗色泥岩为特点(李红等, 2012; 李哲萱等, 2019), 研究区芦草沟组正是处于这种深水湖泊环境中。芦草沟组可进一步划分为 3 段, 其中芦草沟组一段以砂泥岩为主, 夹少量泥灰岩; 二段以泥岩、泥灰岩为主; 三段以泥岩为主夹薄层泥灰岩(图 2)(方向等, 2023)。其中, 芦草沟组二段为主要烃源岩发育层位(方向等, 2023), 也是油页岩发育的主要层位。芦草沟组主要分布于马郎凹陷、条湖凹陷, 以及三塘湖乡、石头梅和跃进沟地区(栗维民等, 2001; 齐雪峰等, 2013; 徐银波等, 2022b)。

2 取样测试和研究方法

本次研究样品取自三塘湖盆地石头梅地区巴油页 1 井和野外剖面, 其中野外剖面(位置见图 1)取油页岩样品 3 个, 巴油页 1 井(位置见图 1)取样 25 个, 包含油页岩样品 7 个。对所取样品进行了总有机碳(TOC)、热解、含油率测试, 测试均在吉林大学测试中心完成。其中含油率测试运用低温干馏法(SH/T0508—92)完成, 分析误差小于 0.4%; TOC 运用美国 LECO 碳硫仪, 依据 GB/T19145—2003 进行测试, 分析误差小于 0.2%; 热解运用法国 Vinci Rock eval-6 热解分析仪, 依据 GB/T 18602—2012 进行测试, 分析误差小于 0.2%。巴油页 1 井取样的具体位置见图 3。

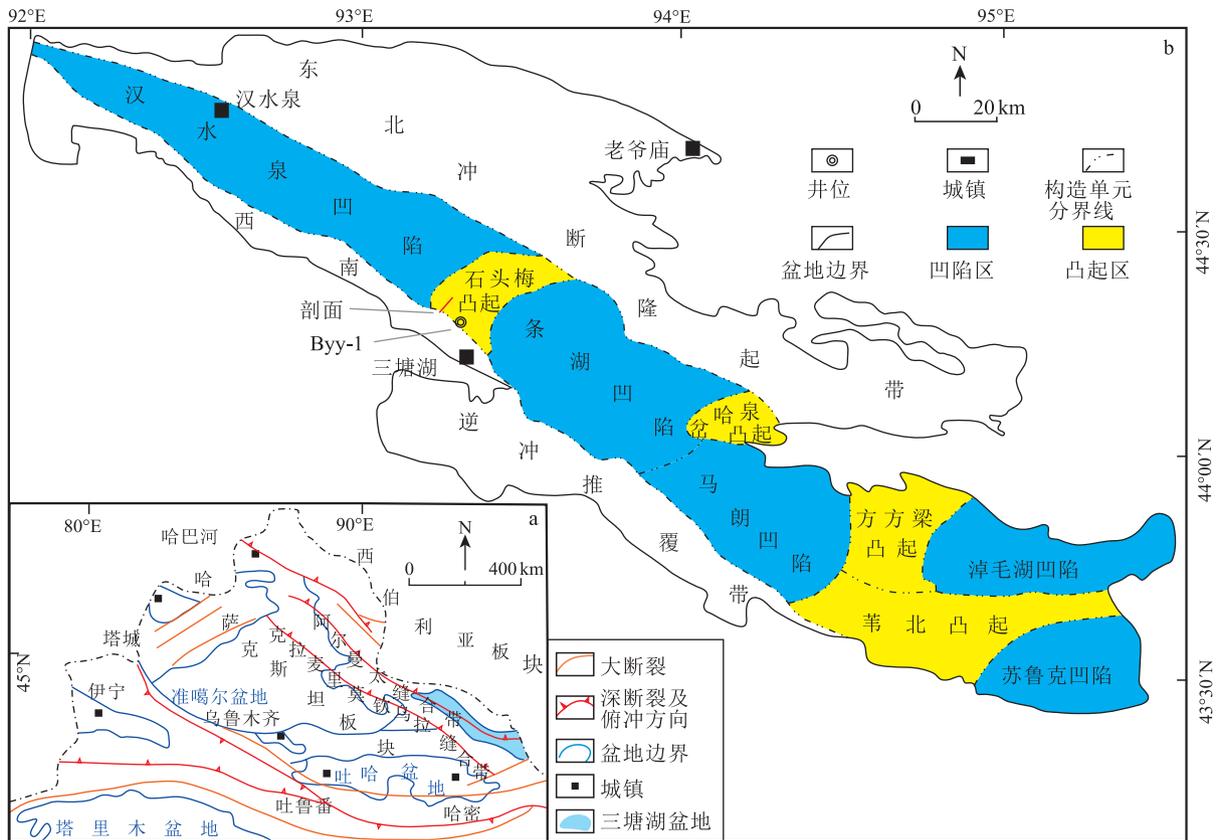


图1 三塘湖盆地大地构造(a,据刘兴旺等,2010)和构造单元划分图(b,据梁世君,2020)

Fig. 1 Geotectonic location map(a) and tectonic units (b) of Santanghu Basin

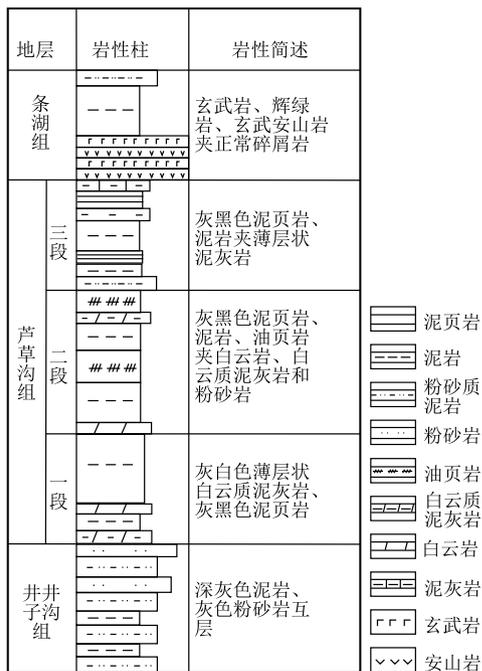


图2 三塘湖盆地芦草沟组柱状图(齐雪峰等,2013)

Fig. 2 Stratigraphic histogram of Lucaogou Formation in Santanghu Basin

3 油页岩测井响应特征

3.1 油页岩特征

研究区油页岩发育于中二叠统芦草沟组二段,主要形成于半深湖—深湖环境(李哲萱等,2019;徐银波等,2022a)。通过钻井岩心和剖面样品油页岩测试,研究区油页岩含油率为3.54%~8.20%,平均为5.02%,有机碳含量(TOC)为6.17%~12.4%,平均为9.58%,生烃潜量(S_1+S_2)主要分布区间为41.83~94.41 mg/g,平均为59.77 mg/g, T_{max} 分布区间为425~448℃,平均为441.7℃。氢指数(HI)表示单位质量有机碳中含氢量的大小,其计算方法是 $S_2 \times 100 / TOC$,氧指数(OI)表示单位质量有机碳中含氧量的大小,其计算方法是 $S_3 \times 100 / TOC$ (Wu et al., 2007)。研究区油页岩HI指数主要分布区间为531~806 mg·HC/g·TOC,平均为604 mg·HC/g·TOC, OI指数主要分布区间为4~51 mg·HC/g·TOC,平均为18 mg·HC/g·TOC(表1)。有机质类型为I—II₁型(图4),成熟度主要为低成熟(图4-c)。

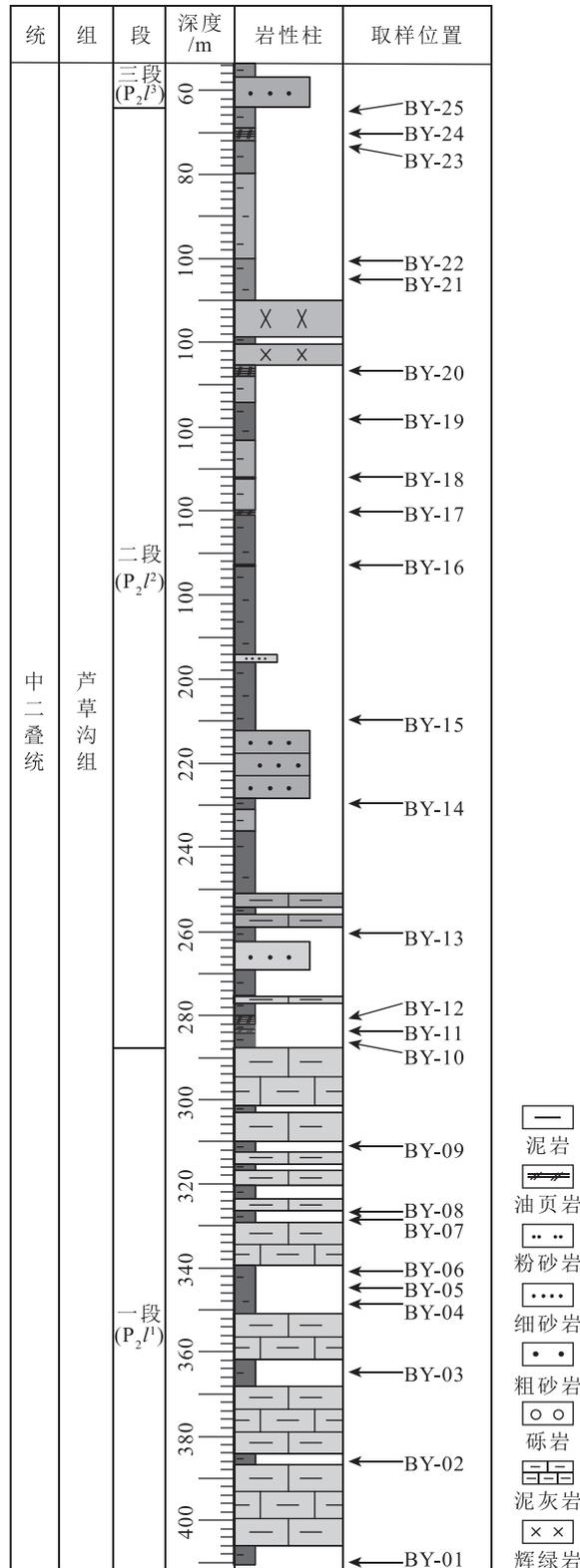


图 3 巴油页 1 井取样位置图

Fig. 3 Sampling point of borehole Byy-1

3.2 油页岩测井响应特征

通过对比巴油页 1 井岩心、测井和地球化学测试分析结果,发现研究区油页岩具有“三高一低”的测井响应特征:高电阻率、高声波时差、低密度、高自然伽马(图 5、图 6)。通过测井曲线特征可以识别出潜在油页岩段。

3.2.1 电阻率

岩石的电阻率一般受岩性组成、岩石孔隙及孔隙流体性质、泥质成分含量等因素的影响(贾建亮, 2012)。当泥岩层富含有机质时,由于干酪根和油气的导电性较差,其电阻率比不含有有机质的同样岩性的地层电阻率高(张寒等, 2007)。油页岩往往富含有机质,如巴油页 1 井油页岩平均 TOC 为 9.11%,因此其电阻率值一般较高。

表 2 显示,巴油页 1 井 By17 油页岩电阻率值为 689.22~911.64 $\Omega \cdot m$,平均值为 849.99 $\Omega \cdot m$,高于上覆泥岩(平均值为 558.88 $\Omega \cdot m$)和下伏泥岩(平均值为 590.03 $\Omega \cdot m$);By12 油页岩电阻率值为 905.12~1500.19 $\Omega \cdot m$,平均值为 1288.40 $\Omega \cdot m$,高于上覆泥岩(平均值为 858.20 $\Omega \cdot m$)和下伏泥岩(平均值为 590.32 $\Omega \cdot m$)(表 2;图 5、图 6)。由此表明,油页岩电阻率值明显高于上下层泥岩。

3.2.2 声波时差

岩石组分中,有机质和粘土矿物具有很高的声波时差,而陆源碎屑矿物、碳酸盐矿物、重矿物等的声波时差值则较低(小于 200 $\mu s/m$)(贾建亮, 2012)。油页岩由于含有较高的有机质和粘土矿物,声波时差值一般较高,且有机质和粘土矿物的含量会明显影响声波时差值。

巴油页 1 井 By17 油页岩声波时差值为 89.04~100.16 $\mu s/m$,平均值为 96.06 $\mu s/m$,高于上覆泥岩(平均值为 90.43 $\mu s/m$)和下伏泥岩(平均值为 89.31 $\mu s/m$);By12 油页岩声波时差值为 73.37~96.99 $\mu s/m$,平均值为 87.93 $\mu s/m$,略高于上覆泥岩(平均值为 87.25 $\mu s/m$)和下伏泥岩(平均值为 87.07 $\mu s/m$)(表 2;图 5、图 6)。由此表明,油页岩声波时差值高于上下层泥岩。

3.2.3 自然伽马

岩石的自然伽马值是由其放射性核素的种类和含量决定的。沉积岩本身并不含放射性矿物,因其吸附放射性物质而呈现放射性,随着沉积岩中泥

表1 三塘湖油页岩测试数据

Table 1 Analysis data of oil shale in Santanghu Basin

样品来源	样品号	含油率/%	TOC/%	S_1	S_2	S_1+S_2	$T_{max}/^{\circ}C$	HI	OI
				$/(mg \cdot g^{-1})$	$/(mg \cdot g^{-1})$	$/(mg \cdot g^{-1})$		$/(mg \cdot HC/g \cdot TOC^{-1})$	$/(mg \cdot HC \cdot g \cdot TOC^{-1})$
钻井	By24	3.90	7.87	0.21	1.22	1.43	443	16	8
	By20	3.67	7.31	0.79	46.25	47.04	448	633	6
	By18	3.54	6.17	0.84	42.58	43.42	444	691	4
	By17	8.20	12.40	1.8	92.61	94.41	445	747	4
	By16	6.06	9.44	3.51	69.69	73.2	440	738	13
	By12	5.17	8.98	0.97	72.38	73.35	447	806	5
	By11	5.03	11.60	0.75	92.42	93.17	448	797	4
剖面	C1-7	6.26	13.8	0.99	72.25	73.24	437	531	46
	C1-5	4.55	10.55	1.9	54.53	56.43	425	535	37
	C1-3	3.82	7.68	0.21	41.83	42.04	440	547	51

表2 三塘湖盆地巴油页1井油页岩及上下泥岩测井值

Table 2 Logging values of oil shale and upper and lower mudstones in well Byy 1, Santanghu Basin

岩层	含油率/%	自然伽马/API		密度/ $(g \cdot cm^{-3})$		聚焦电阻率/ $(\Omega \cdot m)$		声波时差/ $(\mu s \cdot m^{-1})$	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
By17 上部泥岩	-	2.43~19.49	10.11	2.22~2.5	2.38	415.9~790.28	558.88	83.52~98.47	90.43
By17 油页岩	8.20	4.17~26.89	18.07	2.02~2.28	2.13	689.22~911.64	849.99	89.04~100.16	96.06
By17 下部泥岩	-	3.97~26.33	16.86	2.25~2.35	2.30	410.96~665.37	590.03	83.93~97.33	89.31
By12 上部泥岩	-	2.1~19.54	8.61	2.15~2.59	2.40	658.16~1119.69	858.20	84.18~90.56	87.25
By12 油页岩	5.70	2.87~23.37	14.11	2.02~2.31	2.18	905.12~1500.19	1288.40	73.37~96.99	87.93
By12 下部泥岩	-	1.23~22.05	12.56	2.17~2.46	2.27	407.95~901.8	590.32	84.8~90.4	87.07

质含量的增加,吸附能力增加,因此粘土矿物含量越高,其放射值越高(贾建亮,2012)。油页岩中粘土矿物含量较高,因此其自然伽马值一般高于其他沉积岩。

巴油页1井By17油页岩自然伽马值为4.17~26.89 API,平均值为18.07 API,略高于上覆泥岩(平均值为10.11 API)和下伏泥岩(平均值为16.86 API);By12油页岩自然伽马值为2.87~23.37 API,平均值为14.11 API,略高于上覆泥岩(平均值为8.61 API)和下伏泥岩(平均值为12.56 API)(表2;图5、图6)。由此表明,油页岩自然伽马值高于上下层泥岩。

3.2.4 密度

在组成岩石的各组分中,有机质具有很低的密度,约为 $1.1 g/cm^3$,远远低于陆源碎屑矿物、粘土矿物、碳酸盐矿物等其他岩石组分的密度(大于 $2 g/cm^3$)。

而油页岩相对于其他岩石,其内含有较高的有机质含量,因此其密度常小于上下围岩,且有机质丰度越高,其密度一般越低(贾建亮,2012)。

巴油页1井By17油页岩密度值为 $2.02 \sim 2.28 g/cm^3$,平均值为 $2.13 g/cm^3$,低于上覆泥岩(平均值为 $2.38 g/cm^3$)和下伏泥岩(平均值为 $2.30 g/cm^3$);By12油页岩密度值为 $2.02 \sim 2.31 g/cm^3$,平均值为 $2.18 g/cm^3$,低于上覆泥岩(平均值为 $2.40 g/cm^3$)和下伏泥岩(平均值为 $2.27 g/cm^3$)(表2;图5、图6)。由此表明,油页岩密度值低于上下层泥岩。

4 $\Delta \log R$ 模型

$\Delta \log R$ 模型是Passey et al.(1990)提出的利用测井资料识别和测定富含有机质烃源岩的方法,并给出了相应的经验公式。利用测井曲线的叠合及给定的叠合系数进行计算,得出 $\Delta \log R$ 和TOC之间

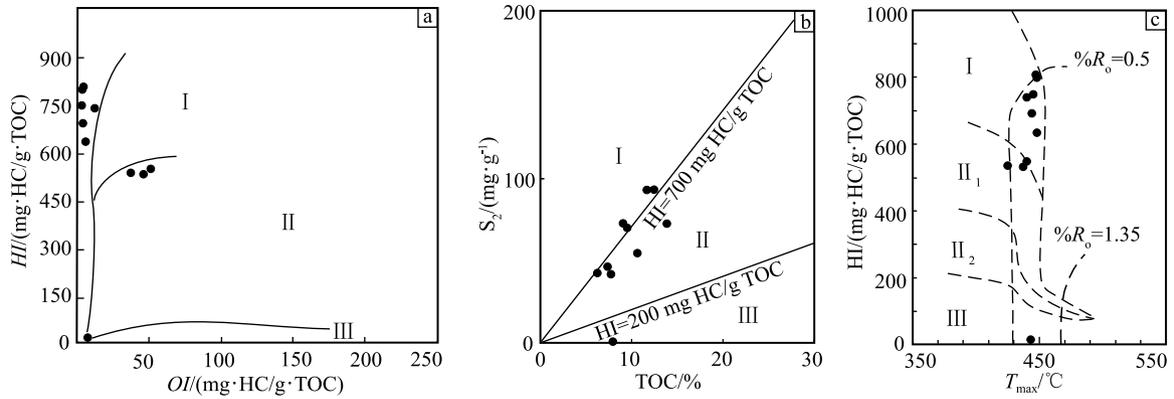


图 4 三塘湖盆地芦草沟组油页岩有机质类型及成熟度

Fig. 4 Organic matter types and maturity of Lucaogou Formation oil shale in Santanghu Basin

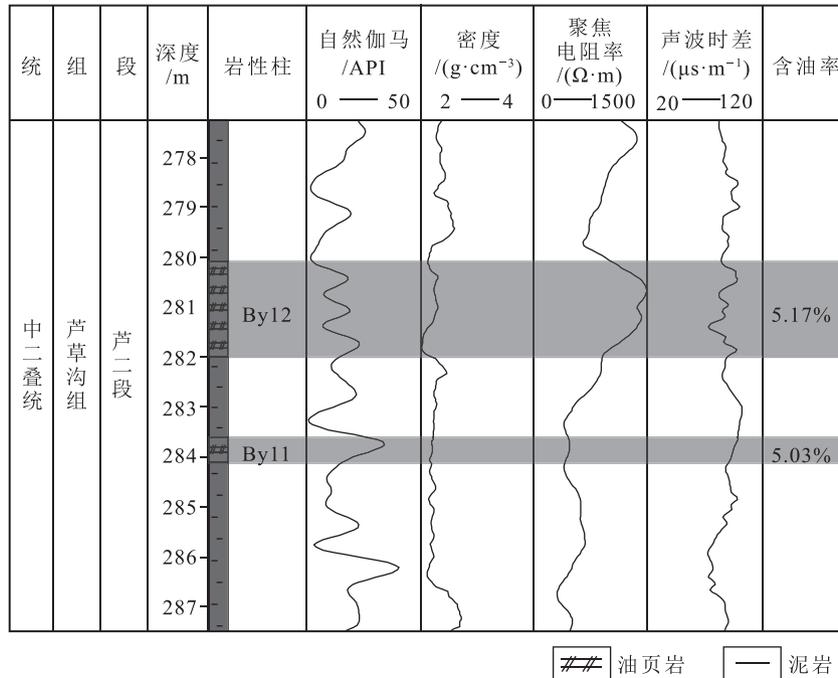


图 5 三塘湖盆地巴油页岩 1 井 By12 油页岩测井响应特征

Fig. 5 Logging response characteristics of By12 oil shale in well By1, Santanghu Basin

的关系式。根据两者的关系,可以利用测井数据计算 TOC。

含油率是界定油页岩的概念指标,也是评价油页岩的重要指标(董清水等,2006)。由于 TOC 与含油率通常呈正相关关系(张佳佳等,2012;徐银波等,2022d),结合 TOC 和 $\Delta\log R$ 的关系式,可以利用测井数据预测含油率数据。

4.1 预测 TOC

传统的 $\Delta\log R$ 模型,即 Passey 模型,是在电阻率

(RT) 曲线上叠加一个具有适当给定叠合系数的孔隙度测井曲线(通常是声波时差曲线)。这 2 条曲线在饱和水、无有机质的岩石上相互平行,被确定为基线。有机质丰富的烃源岩中 2 个测井曲线之间的距离被标定为 $\Delta\log R$ (Wang et al., 2019)。根据声波和电阻率计算 $\Delta\log R$ 的公式为:

$$\Delta\log R = \log_{10} (R/R_{\text{baseline}}) + K \times (\Delta t - \Delta t_{\text{baseline}}) \quad (1)$$

式中, $\Delta\log R$ 为 2 条曲线之间的距离; R 为测得的电阻率 ($\Omega \cdot m$); t 为测得的声波 ($\mu s/ft$); R_{baseline}

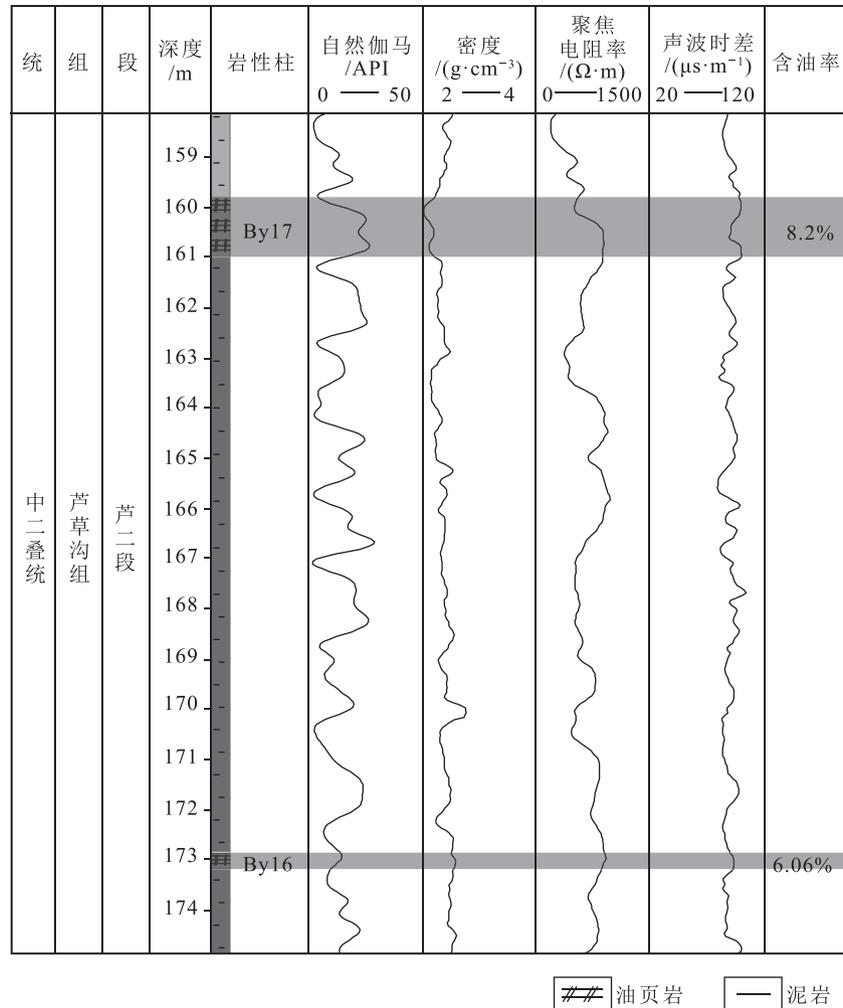


图6 三塘湖盆地巴油页1井By17油页岩测井响应特征

Fig. 6 Logging response characteristics of By17 oil shale in well By1, Santanghu Basin

为曲线在非源页岩中基线时与基线值相对应的电阻率; $K = 0.02$, 为声波时差和电阻率间的叠合系数, 是基于每一电阻率循环的 $-50 \mu s / ft$ 比率。 $\Delta \log R$ 与 TOC 呈线性相关, 是成熟度的函数:

$$TOC = \log R \times 10^{(2.297 - 0.1688 \times LOM)} + \Delta TOC \quad (2)$$

式中, TOC 为计算出的有机碳值; LOM 为成熟度; ΔTOC 为有机碳含量背景值, 需人为确定。因此, 这种模型在基线取值、有机碳含量背景值、叠合系数 K 、成熟度参数方面存在不足或不便推导(胡慧婷等, 2011)。许多学者为了避免这些缺陷, 提出了改进型的 $\Delta \log R$ 模型(胡慧婷等, 2011; 李永红等, 2018)。

本文在分析巴油页1井的电阻率、密度、声波时差、自然伽马与 TOC 的相关性之后, 分别建立了一

元回归方程(图7):

$$R = 59.176 TOC + 36.494, R^2 = 0.65 \quad (3)$$

$$AC = 14565 TOC + 75.533, R^2 = 0.33 \quad (4)$$

$$GR = 0.3048 TOC + 13.254, R^2 = 0.02 \quad (5)$$

$$DEN = -0.0076 TOC + 2.423, R^2 = 0.05 \quad (6)$$

式中, TOC 为泥岩总有机碳含量(%); DEN 为密度测井值 (g/cm^3); GR 为自然伽马测井值 (API); R 为电阻率测井值 ($\Omega \cdot m$); AC 为声波时差测井值 ($\mu s/m$); R^2 为相关系数。

从相关性而言, 巴油页1井的电阻率和声波时差与 TOC 的相关性最好, 因此本文采用改进型 $\Delta \log R$ 模型(胡慧婷等, 2011; 李永红等, 2018), 利用声波时差和电阻率叠合, 计算 $\Delta \log R$ 值, 避开了读取基线值的繁琐过程和镜质体反射率 R_o 测试中的

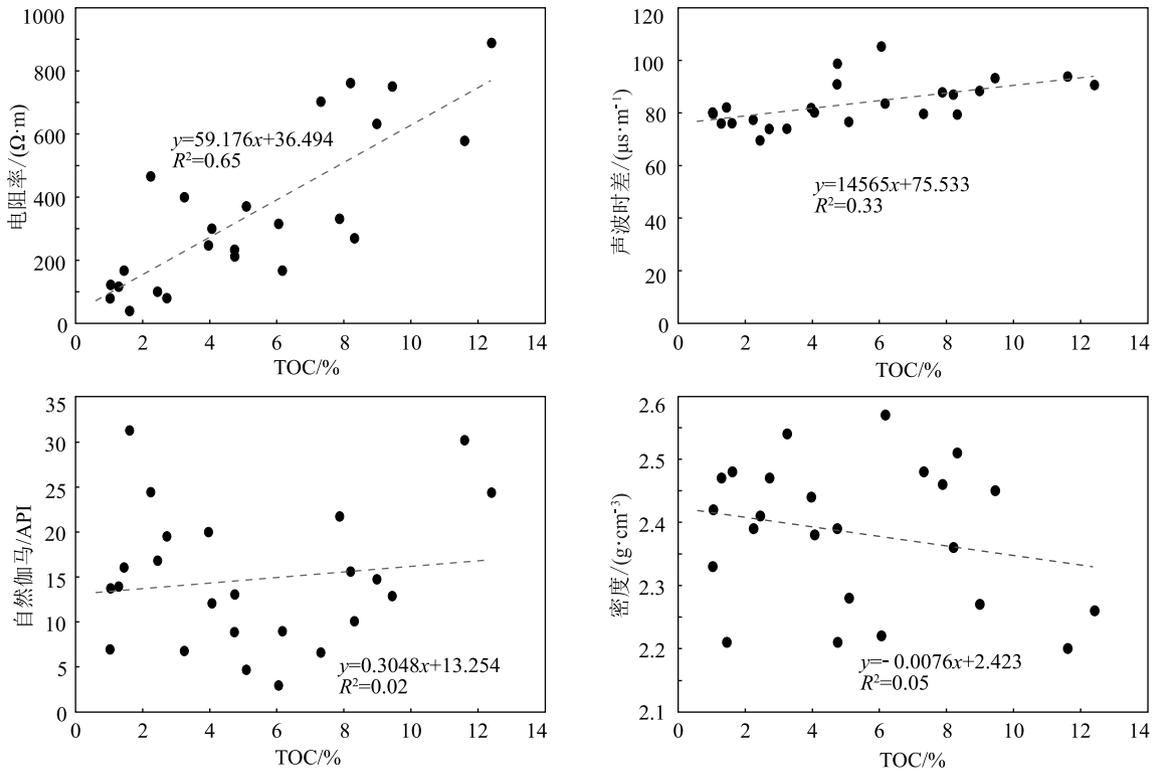


图 7 TOC 与电阻率、密度、声波时差、自然伽马相关性

Fig. 7 The relationship between TOC and density, resistivity, natural gamma, sonic interval transit time logging

较大偏差问题,同时也减少了主观因素的干扰。改进型 $\Delta\log R$ 模型公式如下:

$$\Delta\log R = \lg R + \lg \left(\frac{R_{\max}/R_{\min}}{t_{\max}-t_{\min}} \right) \times (t-t_{\max}) - \lg R_{\min} \quad (7)$$

式中, $\Delta\log R$ 为声波时差和电阻率叠合的间距; R 为实测电阻率测井值, R_{\max} 、 R_{\min} 为声波时差与电阻率曲线叠合后的电阻率最大值和最小值; t 为实测声波时差测井值, t_{\max} 、 t_{\min} 分别为声波时差与电阻率曲线叠合后的声波时差最大值和最小值。

由于研究区只有一口油页岩井,为了更好地验证公式的实用性,将巴油页 1 井分为上、下两部分,其中上半部分用于建立估算公式,下半部分用于验证其有效性。通过对上半部分的计算可得:

$$\Delta\log R = \log R - 0.125t + 6.26 \quad (8)$$

$\Delta\log R$ 与 TOC 呈线性关系,根据 $\Delta\log R$ 计算的 TOC 还需加一定的定量(贺君玲等,2006),其定量评价模型为:

$$TOC = a \times \Delta\log R + b \quad (9)$$

式中, a 和 b 为拟合系数。通过对巴油页 1 井泥岩样品测试数据与 $\Delta\log R$ 数据进行线性回归分析,

建立研究区芦草沟组泥岩 $\Delta\log R$ 与 TOC 的定量关系式:

$$TOC = 2.3847\Delta\log R - 3.5583 \quad (10)$$

$\Delta\log R$ 与 TOC 呈现较好的正相关性,相关系数可达 0.60,可以进行富有机质岩石的识别(图 8)。

应用公式(10)对巴油页 1 井下半部分泥岩的 TOC 进行预测。结果显示,巴油页 1 井下部地层的预测 TOC 和实测 TOC 具有较好的相关性,相关系数为 0.78(图 9),表明该估算公式具有一定的实用性。

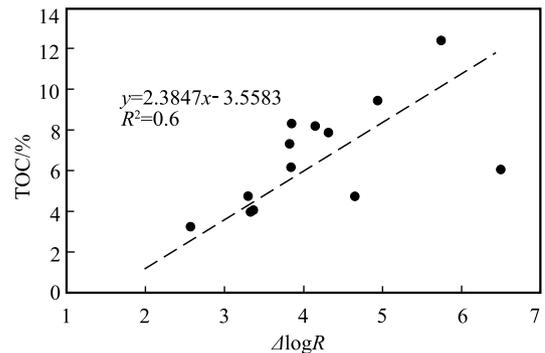


图 8 $\Delta\log R$ 与 TOC 相关性

Fig. 8 The relationship between $\Delta\log R$ and TOC

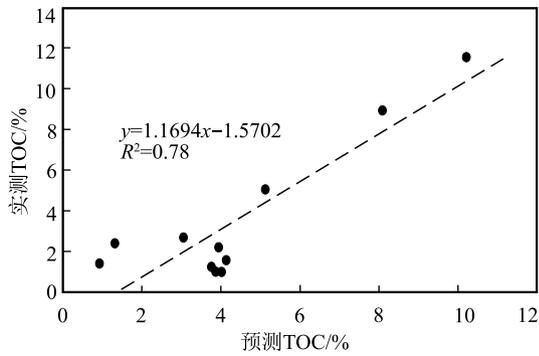


图9 预测 TOC 与实测 TOC 相关性

Fig. 9 The relationship between predicted TOC and measured TOC

4.2 TOC 与含油率相关性

将实际测得的巴油页 1 井油页岩的含油率 (OY) 和 TOC 进行投点 (图 10), 建立两者间的关系:

$$OY = 0.6209TOC - 0.5747 \quad (11)$$

式中, OY 为含油率(%); TOC 为总有机碳含量(%).

图 10 显示, 两者的相关系数 $R^2 = 0.71$, 表明研究区油页岩含油率与 TOC 具有较好的相关性。

4.3 含油率识别模型

根据前文所述, 利用声波时差和电阻率曲线叠合而成的 $\Delta \log R$ 模型可用于识别 TOC, 而 TOC 与含油率之间又为正相关关系, 因此理论上可以用 $\Delta \log R$ 来定量识别含油率。

将实际测得的巴油页 1 井油页岩的含油率 (OY) 和 $\Delta \log R$ 进行投点 (图 11), 建立两者间的关系:

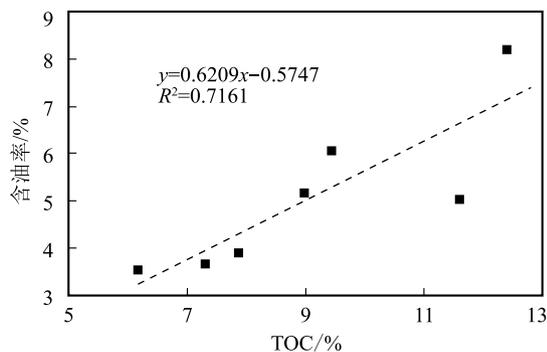


图 10 三塘湖盆地油页岩含油率与 TOC 关系图解
Fig. 10 The relationship between oil yield and TOC of oil shale in Santanghu Basin

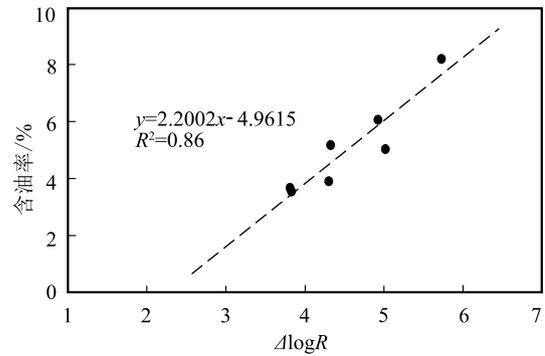
图 11 三塘湖盆地油页岩 $\Delta \log R$ 与含油率关系图解

Fig. 11 The relationship between $\Delta \log R$ and oil yield of oil shale in Santanghu Basin

$$OY = 2.2002\Delta \log R - 4.9615 \quad (12)$$

式中, OY 为含油率(%). 通过预测含油率和实测含油率之间相关性可以看出, 两者之间具有较好的相关性, 相关系数 $R^2 = 0.86$ (图 12), 可用于油页岩识别。

5 结论

(1) 新疆三塘湖盆地石头梅地区芦草沟组油页岩有机质丰度高, 成熟度低, 有机质类型为 I—II₁ 型, 平均含油率 5.02%, 为中等含油率油页岩。

(2) 与相邻围岩相比, 研究区油页岩层具有高电阻率、高声波时差、低密度、高自然伽马的特征。油页岩和泥岩的 TOC 与电阻率和声波时差相关性最好。

(3) 通过电阻率和声波时差曲线的叠合, 建立了改进型 $\Delta \log R$ 模型, 并分别建立了 TOC 测井识别模型和含油率测井识别模型, 预测 TOC 和实测 TOC、预测含油率和实测含油率的相关系数分别为

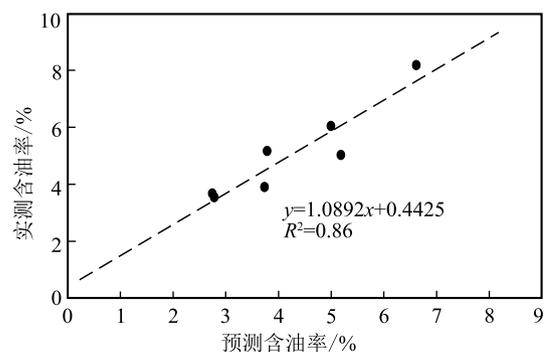


图 12 预测含油率和实测含油率关系图解
Fig. 12 The relationship between predicted oil yield and measured oil yield

0.78 和 0.86, 均具有较好的相关性, 可用于油页岩的识别。

研究区缺少针对油页岩的钻井, 而巴油页 1 井发育油页岩层又较少, 采用的测井相较于油田的测井, 精度偏低, 本次研究基于现有钻井的油页岩测试资料和测井资料, 建立了 $\Delta\log R$ 模型, 存在一定的局限性, 后期随着工作程度的提高, 如获取了更多的油页岩岩心样品, TOC 和含油率测试数据及与之对应的高精度测井数据, 依据更详实的数据可建立更适用的识别模型。

参考文献

- Passy Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (12): 1777-1794.
- Tao S, Xu Y B, Tang D Z, et al. Geochemistry of the Shitoumei oil shale in the Santanghu Basin, Northwest China: Implications for paleoclimate conditions, weathering, provenance and tectonic setting [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 184: 42-56.
- Wang H J, Wu W, Chen T, et al. An improved neural network for TOC, S_1 and S_2 estimation based on conventional well logs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 664-678.
- Wu Y H, Andreas L, Bernd W, et al. Holocene climate change in the Central Tibetan Plateau inferred by lacustrine sediment geochemical records [J]. Science in China Series D, 2007, 50(10): 1548-1555.
- 陈常超, 黄志龙, 陈旋, 等. 新疆三塘湖盆地上石炭统近源凝灰岩致密油藏形成条件 [J]. 地质通报, 2018, 37(1): 83-92.
- 陈孟晋, 张建博. 浅议我国西北低煤阶含煤盆地煤层气的勘探对策 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 18-21.
- 董清水, 王立贤, 于文斌, 等. 油页岩资源评价关键参数及其求取方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 899-903.
- 范晶晶, 王延斌, 李永红. 鱼卡地区侏罗系油页岩测井评价及目标区优选 [J]. 测井技术, 2016, 40(5): 617-622.
- 方向, 郝翠果, 刘俊田, 等. 新疆三塘湖盆地芦草沟组混积岩型致密油形成条件与富集因素 [J]. 地质通报, 2023, 42(2/3): 397-410.
- 贺君玲, 邓守伟, 陈文龙, 等. 利用测井技术评价松辽盆地南部油页岩 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 906-911.
- 胡慧婷, 卢双舫, 刘超, 等. 测井资料计算源岩有机碳含量模型对比及分析 [J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1199-1205.
- 胡霞, 王宇航. 松辽盆地北部嫩江组一段油页岩测井识别 [J]. 地质与资源, 2014, 23(3): 225-229.
- 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景 [J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
- 贾建亮. 基于地球化学-地球物理的松辽盆地上白垩统油页岩识别与资源评价 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2012.
- 李红, 柳益群, 梁浩, 等. 三塘湖盆地二叠系陆相热水沉积方沸石岩特征及成因分析 [J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 205-218.
- 李玮, 柳益群, 董云鹏, 等. 新疆三塘湖地区石炭纪火山岩年代学、地球化学及其大地构造意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1716-1731.
- 李永红, 魏毅, 杨振宁, 等. 测井建模在柴北缘油页岩评价参数解释中的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(增刊 1): 125-128.
- 李玉宏, 姜亭, 武富礼, 等. 鄂尔多斯盆地东南部油页岩资源评价 [J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1417-1424.
- 李哲萱, 柳益群, 周鼎武, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组喷爆岩岩石学、矿物学特征及相关问题探讨 [J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 455-465.
- 栗维民, 梁浩. 三塘湖盆地上二叠统芦草沟组沉积环境 [J]. 新疆石油地质, 2001, 22(6): 497-498.
- 梁世君. 吐哈探区油气勘探成果及潜力 [J]. 新疆石油地质, 2020, 41 (6): 631-641.
- 刘兴旺, 郑建京, 杨鑫, 等. 三塘湖盆地及其周缘地区古生代构造演化及原型盆地研究 [J]. 天然气地质, 2010, 21(6): 947-954.
- 柳益群, 周鼎武, 冯乔, 等. 新疆北部二叠系特征及其三叠系界线划分 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 615-622.
- 马永生. 找油没有捷径——关于油气勘探的几点思考 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 662-669.
- 齐雪峰, 何云生, 赵亮, 等. 新疆三塘湖盆地二叠系芦草沟组古生态环境 [J]. 新疆石油地质, 2013, 34(6): 63-66.
- 夏明. 新疆油页岩资源现状及潜力 [J]. 新疆地质, 2020, 38(4): 523-527.
- 熊春雷, 杨曙光, 吕宁, 等. 三塘湖煤田库木苏矿区煤炭煤质及煤相特征 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(2): 34-36.
- 徐银波, 毕彩芹, 李锋, 等. 三塘湖盆地石头梅地区巴油页 1 井二叠系芦草沟组有机相分析 [J]. 煤炭学报, 2022a, 47(11): 4094-4104.
- 徐银波, 毕彩芹, 张家强, 等. 新疆三塘湖盆地二叠系芦草沟组油页岩特征及成矿背景 [J]. 地质与勘探, 2022b, 58(2): 442-453.
- 徐银波, 李锋, 张家强, 等. 三塘湖盆地石头梅地区二叠系芦草沟组有机质富集特征 [J]. 地质学报, 2022c, 96(11): 4010-4022.
- 徐银波, 孙平昌, 李昭, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔地区二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征与成矿条件 [J]. 中国地质, 2022d, 49 (1): 311-323.
- 翟艇, 潘保芝. 安南扶余地区油页岩测井识别与总含油率计算 [J]. 测井技术, 2015, 39(2): 190-195.
- 张国伟, 陶树, 汤达祯, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组油页岩微量元素和稀土元素地球化学特征 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2081-2089.
- 张寒, 朱光有. 利用地震和测井信息预测和评价烃源岩——以渤海湾盆地富油凹陷为例 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 55-59.
- 张佳佳, 李宏兵, 姚逢昌. 油页岩的地球物理识别和评价方法 [J]. 石油学报, 2012, 33(4): 625-632.
- 张金川, 史森, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 69-80.
- 张美琪, 刘招君, 孙平昌, 等. 新疆大长沟盆地地下侏罗统八道湾组油页岩测井识别 [J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(6): 27-35.
- 周鼎武, 柳益群, 邢秀娟, 等. 新疆吐-哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪 [J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(2): 143-153.
- 朱伯生, 冯建新, 胡斌, 等. 对三塘湖盆地基底的认识 [J]. 新疆石油地质, 1997, 18(3): 197-200.
- 朱建伟, 赵刚, 刘博, 等. 油页岩测井识别技术及应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2), 289-295.
- 朱振宇, 刘洪, 李幼铭. $\Delta\log R$ 技术在烃源岩识别中的应用与分析 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 647-649.