

地球科学与测绘



移动扫码阅读

薛冰,刘度,罗洪浩,等.太行山东麓页岩储层地球化学参数测井计算方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):325-333. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.036

XUE Bing, LIU Du, LUO Honghao, et al. Study on well logging calculation method of geochemical parameters of shale reservoir in eastern foot of Taihang Mountain [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 325-333. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.036

太行山东麓页岩储层地球化学参数测井计算方法研究

薛冰¹,刘度²,罗洪浩¹,牛然¹

(1.河南省煤炭地质勘察研究总院,河南 郑州 450052;2.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:为了较好地进行太行山东麓的页岩气储层测井评价,地球化学参数是研究页岩储层的重要参数,对储层有效性评价具有重要意义。基于太行山东麓页岩常规测井资料和地球化学参数测试,以石炭系上统太原组泥页岩为研究对象,对页岩储层测井响应特征统计分析。通过对页岩储层总有机碳含量、镜质体反射率和生烃潜力与测井参数值相关性分析,优选敏感参数并建立相应测井计算模型,利用所建模型对页岩储层3个地球化学参数进行了计算,进而查明页岩储层总有机碳含量、镜质体反射率及生烃潜力平面展布特征。结果表明:此页岩储层测井响应特征总体呈现“三高、一低、一中”特征;总有机碳含量与自然伽马、密度和声波时差相关性好;镜质体反射率与常规测井响应的相关性比较差,与深度呈良好的正相关关系;生烃潜力与镜质体反射率、声波时差及自然电位相关性较好。采用多元回归分析方法建立了太行山东麓A区块页岩储层总有机碳含量、镜质体反射率和生烃潜力计算模型,计算结果与实测结果吻合度较高,总有机碳含量相对误差小于8%,镜质体反射率相对误差小于3%,生烃潜力相对误差小于5%,表明该计算方法对该区地球化学参数计算效果明显。

关键词:太行山东麓;太原组;页岩储层;地球化学参数;测井计算

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)07-0325-09

Study on well logging calculation method of geochemical parameters of shale reservoir in eastern foot of Taihang Mountain

XUE Bing¹, LIU Du², LUO Honghao¹, NIU Ran¹

(1. Henan Provincial Coal Geological Survey and Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to complete shale reservoir logging evaluation in the eastern foot of Taihang Mountain, geochemical parameters are very important in studying shale reservoir and play a significant part in assessing shale reservoir effectively. The statistical analysis was performed on the logging response characteristics of shale reservoirs of the mud shale in Taiyuan Formation of Upper Carboniferous using the conventional logging data and shale geochemical parameter tests. By analyzing the correlation that logging parameters have with total organic carbon, vitrinite reflectance and hydrocarbon generation potential in shale reservoir, followed by optimizing sensitive logging parameters, relevant calculation models are constructed to figure out the planar distribution characteristics of the total organic carbon, vitrinite reflectance and hydrocarbon potential. The results indicate that logging response from the shale reservoir can be generally summarized as “three high, one low and one medium”. The total organic carbon has good correlation with natural gamma, density and acoustic. However, the correlation between vitrinite reflectance and the response of conventional logging is poor, but vitrinite reflectance is in good positive correlation with the depth. And the hydrocarbon potential is well correlated with vitrinite reflectance, acoustic and spontaneous potential. In summary, a calculation model is constructed using multiple regression analysis for calculating the total organic carbon, vitrinite re-

收稿日期:2019-12-12;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41902113);河南省地勘基金资助项目(豫国土资发[2017]22号)

作者简介:薛冰(1985—),男,河南荥阳人,硕士,工程师。E-mail: xuebing2046@163.com

通讯作者:刘度(1989—),男,河南洛阳人,博士研究生。E-mail: liudu1220@126.com

reflectance and hydrocarbon potential of shale reservoir in Area A of Taihang Mountain. Furthermore, the calculated results are in good agreement with the measured ones. The relative error of the total organic carbon, vitrinite reflectance and hydrocarbon potential are generally within 8%, 3%, 5% respectively, indicating that the method is effective for studying geochemical parameters.

Key words: eastern foot of Taihang Mountain; shale reservoir; geochemical parameters; logging calculation

0 引言

随着我国能源战略转型需求,非常规油气勘探开发力度逐步增强,其中页岩气备受关注,并有望成为常规油气的接替领域^[1]。页岩气是指在富含有机质烃源岩层系中的以吸附态和游离态甲烷为主的非常规天然气^[2-3]。页岩储层评价在非常规油气勘探开发中起着重要作用^[4],而地球化学参数计算是页岩储层评价的主要环节,包括总有机碳含量(TOC)、镜质体反射率(R_o)及生烃潜力(S_1+S_2)等评价指标,前两者是衡量有机质成熟度的重要依据^[5-6]。目前,准确获取地球化学参数最直接方法是对取心样品做分析化验,但由于井下情况的特殊性,可能导致取心质量差、数量少、分析不连续等问题,难以通过实验室测试手段满足页岩气勘探开发需要^[7]。部分国内外学者采用常规测井资料获取页岩储层总有机碳含量,主要包含有神经网络法^[8]、干酪根含量计算法^[9]、 ΔlgR 法^[10]、元素俘获能谱测井法和拟合法等^[11]。PASSEY等^[10]采用电阻率、孔隙度测井的 ΔlgR 法;KADKHODAIE等^[12]依据核磁共振测井资料,采用模糊数学和神经网络法的方法对总有机碳含量进行计算与分析;MO-HAMMAD等^[13]利用地震反演与测井资料综合分析,构建总有机碳含量和孔隙度关系模型,估算出页岩储层潜力区的优劣;SCHMOKER等^[14]基于密度测井及岩心分析资料回归评价分析页岩储层有机碳含量;朱光有等^[15]提出改进的 ΔlgR 法;熊镭等^[9]通过分析几种常用的总有机碳含量测井评价方法的限制因素,建立了BP神经网络法、拟合法和干酪根法3种总有机碳含量计算模型,利用镜质体反射率 R_o 、生烃潜力(S_1+S_2)测井资料定量评价的较少, R_o 利用深度粗略估计其大小^[16];HUSSEIN等^[17]依据声波时差与电阻率比来定量计算镜质体反射率;张作青等^[18]利用中子—密度重合法来指示镜质体反射率大小;刘震等^[19]依据地震速度求取镜质体反射率;吴迅达等^[20]利用(S_1+S_2)与 TOC 的相关关系,完成生烃潜力(S_1+S_2)的测井计算;闫建平^[21]对油页岩、油泥岩及泥岩拟合 S_2 与 TOC 及测井变量间的关系,建立 S_2 与 TOC 模型来计算生烃潜力。

基于前人研究成果,笔者以太行山东麓A区块

A-001井太原组地层为研究对象,利用该区常规测井曲线和页岩储层地球化学测试分析数据,开展页岩储层总有机碳含量、镜质体反射率和生烃潜力与测井参数的相关性研究,并建立相应地球化学参数计算模型,查明页岩储层地球化学参数平面展布特征,为页岩储层评价奠定基础。

1 页岩储层测井响应特征

测井信息相对岩心资料而言,具有纵向分辨率高、连续性、成本低的特点,充分利用测井信息对地球化学参数定量评价至关重要^[22]。页岩储层评价常用测井曲线主要有:自然伽马曲线、深/浅侧向电阻率曲线、声波时差曲线、密度曲线、补偿中子测井曲线及成像测井资料等。典型页岩储层测井响应特征主要表现为高自然伽马、高电阻率、高声波时差、高补偿中子和低体积密度“四高一低”的特征^[23]。当页岩中总有机碳含量较高时,含有较高放射性物质,导致自然伽马值高,电阻率随着生烃量的增大而增大;声波时差与井径有关,由于页岩脆性较大,造成钻井时井径容易扩径造成声波时差增大;页岩储层中含有大量的低密度有机质,随着有机质热解生气,密度降低,页岩体积密度与有机质热解程度呈现负相关。

太行山东麓A区块位于河南省北部,属于二叠时期华北地层区的太行山区,地层由老到新依次为太古界登封群,下元古界嵩山群,上元古界熊耳群、汝阳群与前震旦系,下古生界寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系以及新生界新近系和第四系,构造形态整体呈现单斜构造,地层走向为NE-NNE,倾向为SE,倾角为 $5^\circ \sim 40^\circ$ 。其中,石炭系、二叠系是该区页岩气储层重点研究层位,主要研究目的层段为太原组泥页岩,太原组地层平均厚度125 m,沉积地层属于陆表海碳酸盐—潟湖障壁岛沉积体系,含有丰富的植物化石,泥页岩层位稳定,厚度大,有机质含量高。

根据太行山东麓A区收集到的测井资料,选择具有代表性的A-002、A-003、A-004、A-005、A-006、A-007、A-008等7口井作为测井响应统计对象,依据岩心资料、地质资料及钻井资料,综合确定了太行山东麓A区的岩石主要包括砂岩、泥页岩、煤和石灰

岩等4种。对选取的7口井进行统计分析,查明页岩储层的自然伽马 GR 、自然电位 SP (归一化值)、密度 DEN 、声波时差 AC 及侧向电阻率 LLD 测井响应情况。针对该区而言,页岩储层主要指泥页岩及其中所

夹砂质泥岩。由表1可知,该区泥页岩的典型测井响应组合特征为:高自然伽马、高密度、高自然电位、中等声波时差、较低电阻率,简称“三高、一低、一中”(表1)。

表1 泥页岩储层测井参数响应统计

Table 1 Statistical of logging parameters response of shale reservoir

项目	A-002	A-003	A-004	A-005	A-006	A-007	A-008	平均值
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.57	2.54	2.4	2.48	2.57	2.45	2.55	2.51
声波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	242	238	253	237	226	246	242	241
自然电位(归一化值)	0.69	0.71	0.87	0.70	0.53	0.94	0.78	0.75
自然伽马/API	87	79	158	175	241	180	197	160
侧向电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	26	152	31	18	28	29	46	47

2 页岩储层地球化学参数敏感测井曲线分析及其预测模型建立

2.1 页岩储层总有机碳含量测试资料分析

总有机碳含量(TOC)是页岩气评价一个重要的参数,其从侧面反映含气页岩中有机质含量的多少和生烃能力大小^[24]。有研究表明,页岩气储层的含气量主要取决于其总有机碳含量,有机质可作为吸附气的核心载体, TOC 的大小直接影响吸附气数量的变化。因取心样品的限制,通常是根据间隔一定距离的 TOC 测定值的几何平均值来评价整段烃源

岩的生烃潜力,导致页岩储层在含气性评价过程中存在着相当大的误差。通过测井方法,能够合理地从纵向上连续反映储层变化情况。

笔者基于 A-001 井的地球化学参数测试资料,对太行山东麓 A 区 TOC 测试进行分析,在收集到的14个 TOC 测试样资料中,对太原组的测试样的测井参数响应值进行相关性分析,除去异常点,建模最终使用的样品个数为12个,统计了 TOC 测试样深度处的常规测井响应值(表2)。该井在太原组段 TOC 测试值整体范围为1.65%~4.07%,平均为2.60%,据此推断该区太原组页岩储层具有一定的生烃潜力。

表2 测试样 TOC 常规测井响应值

Table 2 Conventional logging response value of test sample about TOC

样品	深度/m	$TOC/\%$	$R_o/\%$	GR/API	SP (归一化)	$DEN/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$AC/(\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$LLD/(\Omega \cdot \text{m})$
AH-014	1 486.00	3.58	—	0.57	0.48	0.64	252	0.09
AH-013	1 503.54	3.33	—	0.55	0.48	0.62	240	0.10
AH-011	1 521.10	1.65	1.78	0.43	0.43	0.74	215	0.16
AH-010	1 527.00	2.30	1.76	0.5	0.52	0.73	227	0.09
AH-009	1 534.40	1.72	1.77	0.45	0.5	0.68	220	0.16
AH-007	1 539.30	2.28	—	0.48	0.59	0.68	230	0.07
AH-008	1 542.00	2.14	1.82	0.49	0.58	0.72	265	0.07
AH-006	1 543.40	1.65	1.81	0.44	0.57	0.69	242	0.08
AH-005	1 545.40	4.07	1.79	0.60	0.66	0.38	296	0.04
AH-004	1 554.00	2.93	1.80	0.51	0.55	0.58	232	0.10
AH-002	1 565.10	1.96	1.85	0.45	0.53	0.74	224	0.19
AH-001	1 609.89	3.61	1.89	0.51	0.67	0.59	280	0.13

2.1.1 页岩总有机碳含量与测井响应相关性分析

基于 A-001 井总有机碳含量(TOC)测试结果,根据岩心归位后 TOC 测试值与其对应的测井曲线值进行单因素相关分析(图2),分析结果表明该井的 TOC 与自然伽马相对值、密度、声波时差相关性较好,相关系数分别为0.89、0.67、0.55。因此,可选用自然伽马、密度和声波时差预测 TOC 。

2.1.2 A 区 TOC 测井计算模型的建立

结合 TOC 常用计算方法^[7]及测井资料实际情况,笔者认为采用多元回归方法计算 TOC 较为合适。前述研究表明,该 TOC 与自然伽马相对值、密度相对值以及声波时差相关性好。

根据多元线性回归数学方法,将页岩储层总有机碳含量作为应变变量 y ,测井参数曲线(GR 、 AC 、

DEN)作为变量 x ,应用 SPSS 软件线性回归分析模块,对 TOC 进行多元回归分析,主要开展了相关二

元回归分析与三元回归分析比较研究,最终优选三元回归拟合公式计算 TOC,见式(2)。

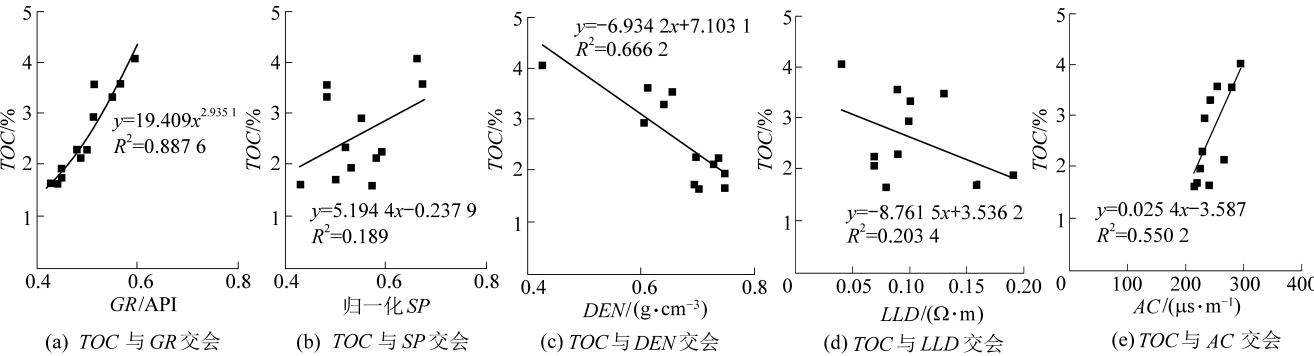


图 1 TOC 与各测井参数交会图

Fig.1 Cross plot of TOC and various logging parameters

$$TOC = 13.04477GR + 0.00629AC - 5.43164$$
$$R^2 = 0.895 \tag{1}$$

$$TOC = 11.75700GR + 0.00420AC - 1.33900DEN - 3.40500$$
$$R^2 = 0.90 \tag{2}$$

通过多元回归分析得到自然伽马、声波时差和密度与 TOC 回归方程,对 A-001 井实测样本进行计算,将计算的 TOC 与测试结果对比(图 2),由图可知,计算 TOC 与测试 TOC 吻合度较高,相对误差绝大多数在 8% 以内,表明利用多元回归建立的 TOC 解释模型具有较好的应用价值。

2.2 页岩储层镜质体反射率 R_o 测试资料分析

镜质体反射率 R_o 是衡量有机质成熟度的重要指标,是衡量有机质向油气转化程度的重要参数之一^[25],镜质体反射率随着热演化程度的升高而稳定的增加,并具有相对广泛的、稳定的可比性,且其他有机质成熟度指标均与 R_o 具有密切的相关性,成为目前应用最为广泛的成熟度指标。因此,准确预测镜质体反射率对页岩气储层测井解释研究具有重要意义。

2.2.1 镜质体反射率 R_o 与测井响应相关性分析

笔者收集到 A-001 井 9 个测试样的镜质体反射率 R_o 测试资料。由表 2 可知,太行山东麓 A 区 R_o 最大为 1.89%,最小为 1.76%,平均为 1.81%,表明该区目的层段烃源岩处于高成熟期(表 3)。

表 3 中国南方黑色页岩成熟阶段划分标准(据中石化研究院,2005)

Table 3 Criteria for the maturation stage of black shale in south China(Sinopec Research Institute of Petroleum Processing,2005)

成熟阶段	未成熟	成熟期	高成熟期	过成熟早期	过成熟晚期	变质期
$R_o/\%$	<0.5	0.5~1.3	1.3~2.0	2~3	3~4	>4
生烃阶段	生物气	成油期	凝析油-湿气	干气	干气	生烃终止

将镜质体反射率与埋深和常规测井参进行拟合,分析镜质体反射率与各测井参数间的相关性,获取对镜质体反射率反映最敏感的参数,建立镜质体

反射率定量评价模型。太行山东麓 A 区镜质体反射率 R_o 与常规测井参数的相关性比较差,与深度呈良好的正相关关系(图 3)。

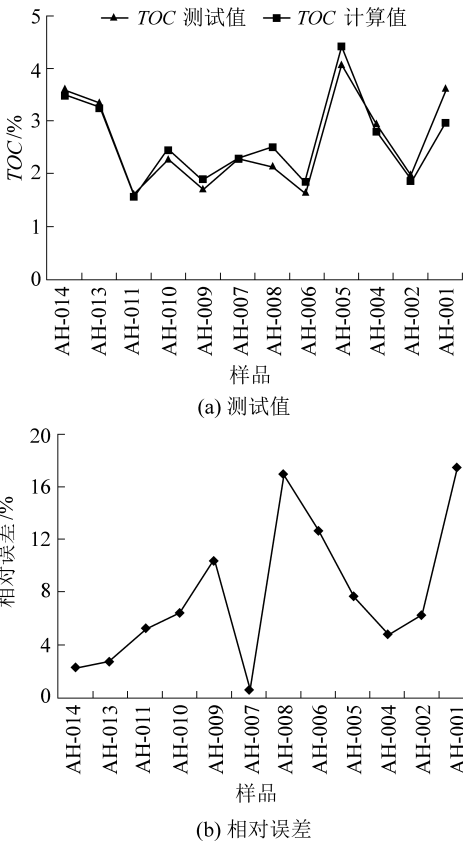


图 2 TOC 测试值与计算值吻合度对比及相对误差

Fig.2 Consistency comparison of TOC test value and calculated value and relative error

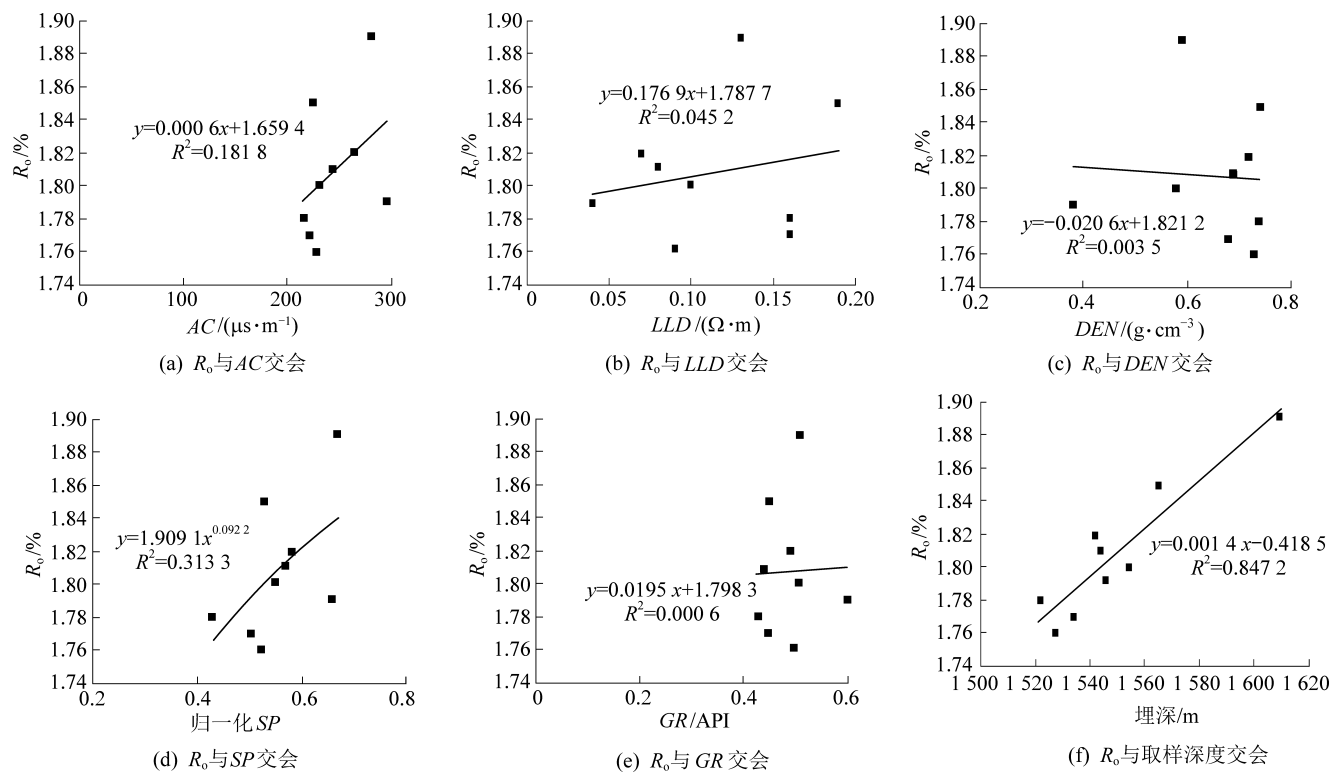


图 3 R_0 与各测井参数相关交会
Fig.3 Cross plot of R_0 and logging parameters

2.2.2 镜质体反射率 R_0 测井解释模型建立

通过镜质体反射率 R_0 与测井响应值及埋深相关性分析,利用埋深预测 R_0 效果最好。因此,笔者选取镜质体反射率 R_0 与深度建立回归方程式(3),计算该区镜质体反射率 R_0 ,计算值与测试值对比效果(图4), R_0 计算值略高于测试值,从误差分析角度,发现该模型预测的镜质体反射率与实测镜质体反射率相对误差均小于3%。因此该模型预测效果较好,可以对镜质体反射率 R_0 进行计算,即

$$R_0=0.0017H-0.7953 \tag{3}$$

式中: H 为地层深度,m。

2.3 页岩储层生烃潜力(S_1+S_2)测试资料分析

生烃潜力(S_1+S_2)是评价烃源岩生烃能力的重要参数之一,与烃源岩有机质丰度、母质类型和热成熟度密切相关。一般常用 S_1 (残留烃)与 S_2 (干热解烃)之和来表征烃源岩的生烃潜力,其中,影响干热解烃量因素包含机质类型、丰度、成熟度和矿物基质等^[21]。笔者收集 A-001 井的 10 个样点生烃潜力测试资料,去掉 2 个异常点,建模使用 8 个样点的测试资料(表4)。一般将生烃潜力大于 6.0 mg/g 的烃源岩称为好烃源岩;生烃潜力 2~6 mg/g 为称中等烃源岩;生烃潜力小于 2.0 mg/g 称为差烃源岩^[26]。A 区生烃潜力测试值结果位

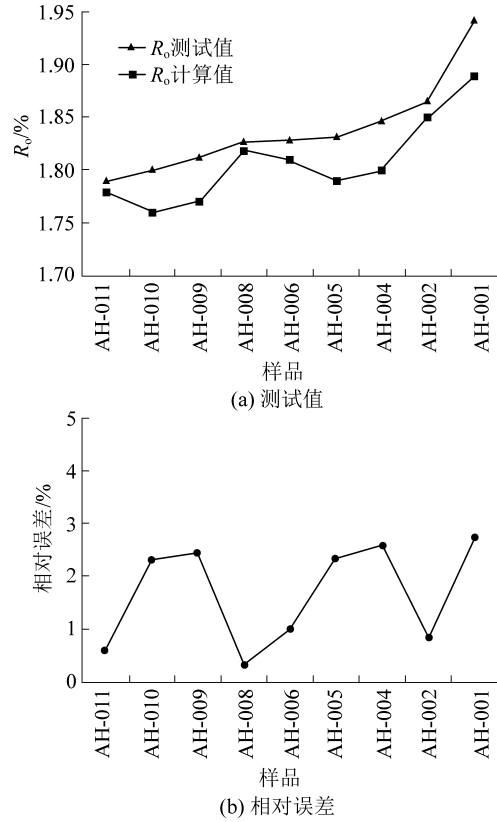


图 4 R_0 测试值与计算值吻合度对比及相对误差
Fig.4 Consistency comparison of R_0 test value and calculated value and relative error

于0.05~2.00 mg/g,平均值0.85 mg/g。由此表明,烃源岩处于成熟阶段,生烃潜力(S_1+S_2)为低值。

2.3.1 生烃潜力(S_1+S_2)与测井响应相关性分析

基于生烃潜力测试资料,对生烃潜力与TOC、

测试值及测井参数相关性进行分析(图5)。由图5可知,生烃潜力(S_1+S_2)与镜质体反射率 R_o ($R^2=0.93$)、声波时差AC($R^2=0.74$)及自然电位SP(归一化值)($R^2=0.66$)相关性较好。

表4 生烃潜力测试资料统计

Table 4 Statistical of test data of hydrocarbon potential

样品	深度/m	$S_1+S_2/(mg \cdot g^{-1})$	GR/API	SP(归一化)	DEN/(g·cm ⁻³)	AC/(μs·m ⁻¹)	LLD/(Ω·m)
AH-44	1 399.49	0.05	0.50	0.34	0.67	239	0.11
AH-40	1 427.00	0.22	0.54	0.36	0.72	244	0.12
AH-39	1 446.89	0.80	0.54	0.37	0.70	233	0.29
AH-38	1 470.53	0.74	0.57	0.40	0.69	254	0.16
AH-013	1 503.54	0.80	0.49	0.46	0.71	252	0.21
AH-25	1 505.10	1.17	0.50	0.37	0.78	256	0.12
AH-22	1 513.79	0.99	0.56	0.52	0.63	263	0.08
AH-03	1 618.54	2.00	0.52	0.61	0.41	330	0.31

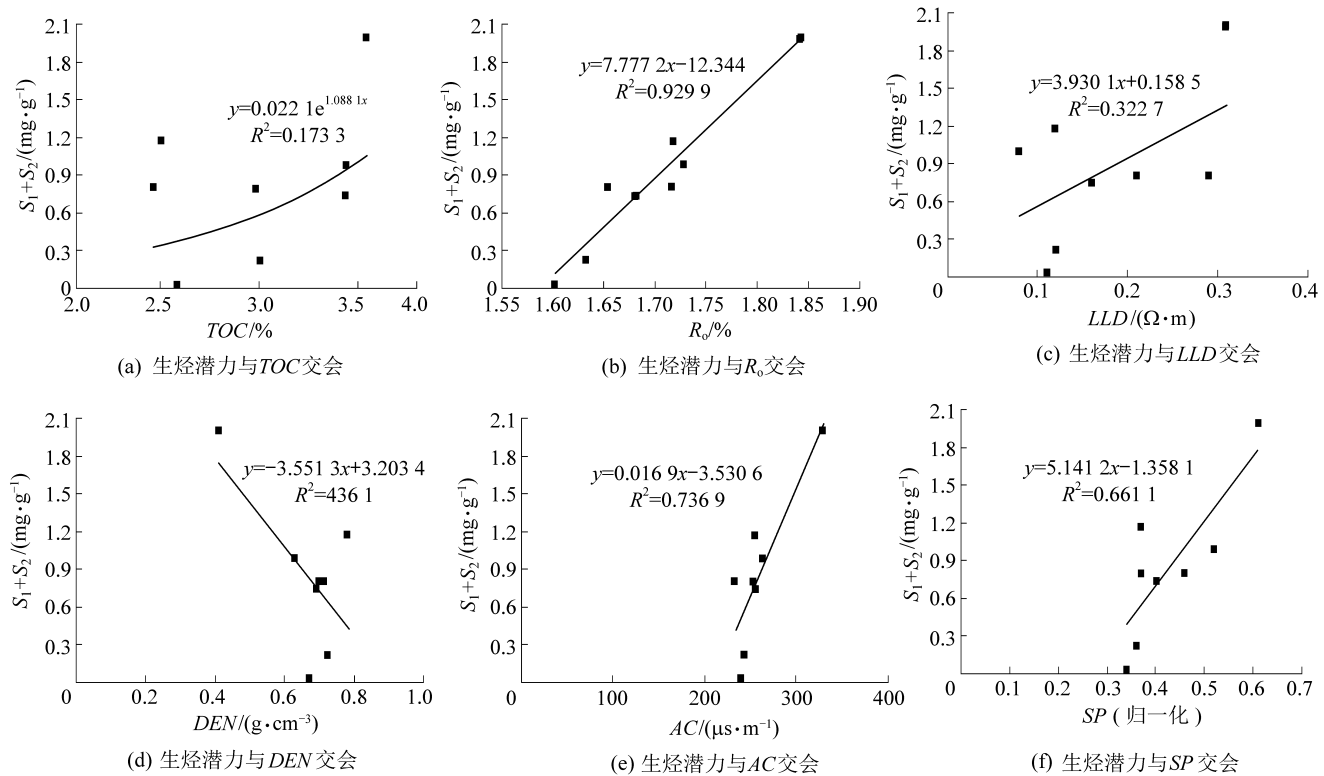


图5 生烃潜力与各测井参数相关交会

Fig.5 Cross plot of hydrocarbon potential and logging parameters

2.3.2 生烃潜力(S_1+S_2)计算模型建立

笔者同样采用多元回归法对声波时差、自然电位相对值、镜质体反射率进行二元及三元回归分析,同时与TOC相关法进行比较。根据相关程度及平均误差,最终采用三元回归分析法对该区生烃潜力进行计算。即

$$S_1+S_2=0.045\ 2TOC-3.432\ 5DEN+2.989\ 2$$

$$R^2=0.44 \quad (4)$$

$$S_1+S_2=1.607\ 6SP+0.012\ 5AC-3.078\ 2$$

$$R^2=0.75 \quad (5)$$

$$S_1+S_2=10.523\ 9R_o-0.000\ 4AC-2.241\ 4SP-15.938\ 4$$

$$R^2=0.95 \quad (6)$$

通过回归分析得到镜质体反射率、自然电位及声波时差与生烃潜力得到回归方程式(6),对B-002井实测样本进行计算,将计算的(S_1+S_2)与测试结果对比(表5)。由表5可知,计算(S_1+S_2)与测试值

(S_1+S_2)绝大多数误差范围小于5%,吻合度较高,表明利用多元回归建立的(S_1+S_2)解释模型可以应用到该区含气页岩储层生烃潜力评价。

表5 生烃潜力测试值与计算结果值统计对比

Table 5 Statistical of measured value and calculated value of hydrocarbon potential

样品编号	深度/m	$S_1+S_2/(mg \cdot g^{-1})$		相对误差/%
		测试值	计算值	
AH-44	1 399.49	0.05	0.06	20
AH-40	1 427.00	0.22	0.33	50
AH-39	1 446.89	0.80	0.54	30
AH-38	1 470.53	0.74	0.74	0
AH-013	1 503.54	0.80	0.99	24
AH-25	1 505.10	1.17	1.20	3
AH-22	1 513.79	0.99	0.97	2
AH-03	1 618.54	2.00	1.95	3

2.4 页岩地球化学参数展布特征

笔者据总有机碳含量(TOC)、镜质体反射率 R_o 及生烃潜力(S_1+S_2)与测井参数多元回归分析得出相应计算模型,对太原组页岩储层地球化学参数进行计算,并绘制了相关平面等值线图(图6)B井为没取样井,A井为取样井。)

一般情况下,总有机碳含量 TOC 是影响页岩储

层生烃能力最重要因素^[27],目前,国际上公认当总有机碳含量大于下限值2%,页岩储层才具有开发价值,但该值也不是固定不变的,当页岩储层的物性、热演化程度、储层厚度、埋藏条件都比较优越的条件下,可以适当下调下限值。如 Barnett 页岩和 Lewis 页岩^[28]。因此,影响页岩储层产能因素较多,需综合考虑。根据计算结果(图6),在太行山东麓A区太原组泥页岩 TOC 主要集中在2%~5%,局部高于5%,表明该区具有较好生烃的物质基础,平面分布特征整体表现为从中间向两侧呈现递增趋势,局部由西向东逐渐降低。镜质体反射率能够反映干酪根向烃类转化的程度,不宜过高或过低,过高情况下,生成气体不易保存,反之,难以向烃类气体转化。镜质体反射率需要处在一个合适的范围,一般 R_o 要大于1.0%,该区太原组主要集中在1.1%~1.6%,平面分布特征表现为从中间向两边逐渐升高趋势,表明页岩储层烃源岩为成熟~高成熟阶段。有机质丰度是烃源岩生烃的基础,生烃潜力(S_1+S_2)可有效地表征烃源岩中总有机质丰度。页岩储层生烃潜力平面分布特征总体表现为,从东部向西部逐渐增强趋势,整体生烃潜力范围为1.3~2.2 mg/g,表明该区烃源岩为中-差烃源岩,生烃潜力较低。

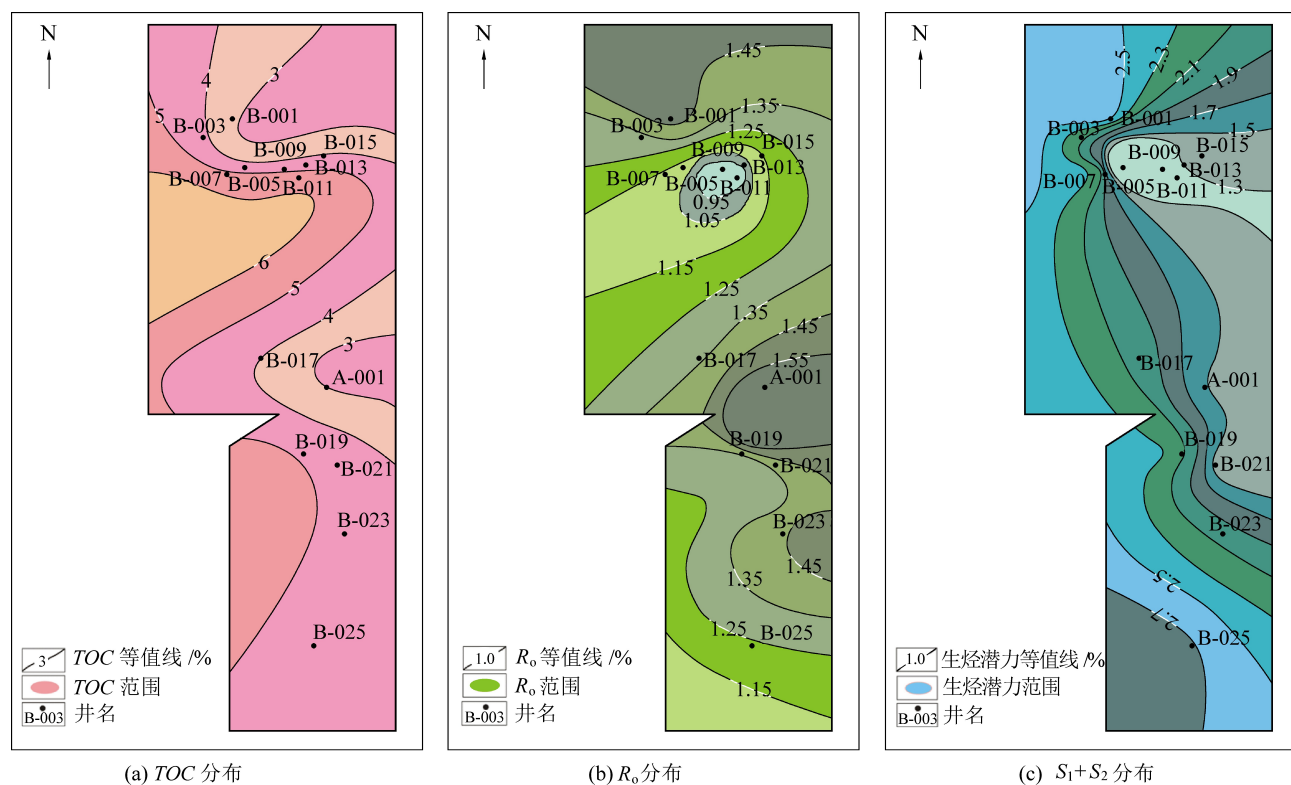


图6 太原组泥页岩地球化学参数分布

Fig.6 Planar distribution of geochemical parameters of mud shale in Taiyuan formation

3 结 论

1) 太行山东麓 A 区泥页岩储层典型测井响应呈现高自然伽马、高密度、高自然电位、中等声波时差、较低电阻率的特征。总有机碳含量与自然伽马、密度和声波时差敏感性好; 镜质体反射率与常规测井响应的相关性比较差, 与深度呈良好的正相关关系; 生烃潜力与镜质体反射率、声波时差及自然电位相关性较好。

2) 基于多元回归分析方法建立了太行山东麓 A 区块页岩储层有总有机碳含量、镜质体反射率和生烃潜力计算模型, 计算结果与实测结果吻合度较高, TOC 相对误差一般小于 8%, R_o 相对误差小于 3%, (S_1+S_2) 相对误差小于 5%, 表明该计算方法适应 A 区的使用。

3) 太行山东麓 A 区太原组泥页岩总有机碳含量平面分布特征整体表现中间向两侧呈现递增趋势, 主要集中在 2%~5%; 镜质体反射率平面分布特征表现为从中间向两边逐渐升高趋势, 为 1.1%~1.6%, 页岩储层烃源岩为成熟~高成熟阶段; 其生烃潜力平面分布特征总体表现为从东部向西部逐渐增强趋势, 为 1.3~2.2 mg/g, 整体生烃潜力低。

参考文献 (References):

[1] 邹才能, 董大忠, 杨 桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践 [J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, *et al.* Formation conditions and exploration practice of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.

[2] 蒋裕强, 董大忠, 漆 麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, *et al.* Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.

[3] 张 鹏, 黄宇琪, 杨军伟, 等. 黔西北龙潭组页岩储层特征研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 174-180.
ZHANG Peng, HUANG Yuqi, YANG Junwei, *et al.* Study on characteristics of shale reservoirs from Longtan Formation in northwest Guizhou [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 174-180.

[4] 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.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.

[5] 王 民, 石 蕾, 王文广, 等. 中美页岩油、致密油发育的地球化学特征对比 [J]. 岩性油气藏, 2014, 26(3): 67-73.
WANG Min, SHI Lei, WANG Wenguang, *et al.* Comparative study on geochemical characteristics of shale oil between China and USA

[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(3): 67-73.

[6] 赵楷棣, 傅雪海, 张 苗, 等. 煤系泥页岩有机地球化学特征及生烃潜力评价 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 182-188.
ZHAO Kaidi, FU Xuehai, ZHANG Miao, *et al.* Evaluation of organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of coal measure mud shale [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 182-188.

[7] 杨涛涛, 邵大力, 曹光伟, 等. 烃源岩测井定量评价方法探讨 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 285-291.
YANG Taotao, SHAO Dali, CAO Guangwei, *et al.* Logging quantitative evaluation method for hydrocarbon source rock [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 285-291.

[8] 郭 龙, 陈践发, 苗忠英. 一种新的 TOC 含量拟合方法研究与应用 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 951-956.
GUO Long, CHEN Jianfa, MIAO Zhongying. Study and application of a new overlay method of the TOC content [J]. Nature Gas Geoscience, 2009, 20(6): 951-956.

[9] 熊 镭, 张超谟, 张 冲, 等. A 地区页岩气储层总有机碳含量测井评价方法研究 [J]. 岩性油气藏, 2014, 26(6): 74-85.
XIONG Lei, ZHANG Chaomo, ZHANG Chong, *et al.* Research on logging evaluation method of TOC content of shale gas reservoir in Area A [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(6): 74-85.

[10] PASSEY Q R, MORETTI F U, STROUD J D. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.

[11] 孟召平, 郭彦省, 刘 尉. 页岩气储层有机碳含量与测井参数的关系及预测模型 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 247-253.
MENG Zhaoping, GUO Yansheng, LIU Wei. Relationship between organic carbon content of shale gas reservoir and logging parameters and its prediction model [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 247-253.

[12] KADKHODAIE A, REZAEI R. Estimation of vitrinite reflectance from well log data [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 148: 92-94.

[13] MOHAMMAD R K, AHAD A M. Total organic carbon content determined from well logs using A log R and Neuro Fuzzy techniques [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(3/4): 141-148.

[14] SCHMOKER J W. Determination of organic matter content of Appalachian Devonian shale from Gamma ray logs [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 285-1298.

[15] 朱光有, 金 强, 张林峰. 用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究 [J]. 测井技术, 2003, 27(2): 104-109, 146.
ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHANG Linye. Using log information to analyze the geochemical characteristics of source rocks in Jiyang depression [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 104-109, 146.

[16] HINES G A, BERG R R. Estimating organic maturity from well logs Upper Cretaceous Austin Chalk, Texas Gulf coast [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 55-60.

[17] HUSSEIN H S, ABDULA R A. Multiple linear regression approach for the vitrinite reflectance estimation from well logs: A case study in Sargelu and Naokelekan Formations - Shaikhan - 2 Well,

- Shaikhan Oilfield, Iraq[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2018; 1095-1102.
- [18] 张作清, 孙建孟. 页岩气测井评价评价进展[J]. 石油与天然气学报, 2013, 45(3): 90-95, 166.
- ZHANG Zuoqing, SUN Jianmeng. Progress of logging evaluation on shale gas reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 45(3): 90-95, 166.
- [19] 刘震, 常迈, 赵阳, 等. 低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 159-167.
- LIU Zhen, CHANG Mai, ZHAO Yang, *et al.* Method of early prediction on source rocks in basins with low exploration activity [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 159-167.
- [20] 吴迅达, 孙婷. 烃源岩有机地球化学参数的测井综合评价方法及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2015-2019.
- WU Xunda, SUN Ting. Comprehensive evaluation method of source rock organic geochemical parameters by well logs and application [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2015-2019.
- [21] 闫建平, 梁强, 耿斌, 等. 湖相泥页岩地球化学参数测井计算方法及应用: 以沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 108-116.
- YAN Jianping, LIANG Qiang, GENG Bin, *et al.* Log calculation method of geochemical parameters of lacustrine shale and its application: a case of lower Es₃ in Bonan subsag, Zhanhua Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 108-116.
- [22] 李泽辰, 杜文凤, 胡进奎, 等. 基于测井参数的页岩有机碳含量支持向量机预测[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 199-204.
- LI Zechen, DU Wenfeng, HU Jinkui, *et al.* Prediction of shale organic carbon content support vector machine based on logging parameters [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 199-204.
- [23] 孙建孟, 熊铸, 罗红, 等. 扬子地区下古生界页岩气储层低阻成因分析及测井评价[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2018, 42(5): 52-61.
- SUN Jianmeng, XIONG Zhu, LUO Hong, *et al.* Mechanism analysis and logging evaluation of low resistivity in lower Paleozoic shale gas reservoirs of Yangtze region [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2018, 42(5): 52-61.
- [24] 张卫东, 郭敏, 姜在兴. 页岩气评价指标与方法[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1093-1099.
- ZHANG Weidong, GUO Min, JIANG Zaixing. Parameters and method for shale gas reservoir evaluation [J]. Nature Gas Geosciences, 2011, 22(6): 1093-1099.
- [25] SAKAGUCHI A, YANAGIHARA A, UJIE K, *et al.* Thermal maturity of a fold - thrust belt based on vitrinite reflectance analysis in the Western Foothills complex, western Taiwan [J]. Tectonophysics, 2007, 443(3/4): 0-232
- [26] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142.
- CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, *et al.* Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132-1142.
- [27] 陈尚斌, 张楚, 刘宇. 页岩气赋存状态及其分子模拟研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 36-44.
- CHEN Shangbin, ZHANG Chu, LIU Yu. Research progress and prospect of shale gas occurrence and its molecular simulation [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 36-44.
- [28] 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 the rmogenic shale gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.