元素扫描测井在煤系烃源岩识别与评价中的应用

王斌[1,2,3]，夏宗立[4a,4b]，张科[1,2,3]，李玲[1,2,3]，王中瑞[4a,4b]，赵飞[4a,4b]，张有鹏[5]，赖锦[4a,4b*]

1. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心，新疆 库尔勒 841000；
2. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心，新疆 库尔勒 841000；
3. 新疆超深油气重点实验室，新疆 库尔勒 841000；
4. 中国石油大学（北京）a. 油气资源与工程国家重点实验室；b. 地球科学学院，北京 102249；
5. 中国石油集团测井有限公司测井技术研究院，北京 102206

第一作者，E-mail：wangb3-tlm@petrolchina.com.cn

* 通信作者，E-mail：laijin@cup.edu.cn

2024-07-11 收稿；2024-10-09 修回；2024-11-21 接受

基金项目：中国石油天然气集团有限公司科技项目“超深层碎屑岩油气分布规律与区带目标优选”（2023ZZ14YJ02）；中国石油天然气股份有限公司科技专项“塔里木盆地深层碎屑岩重点地区综合地质研究、目标优选、技术攻关与现场试验”（2022KT0201）；国家自然科学基金项目（42072150）；中国石油大学（北京）科研启动基金项目（2462021YXZZ003）；中国石油-中国石油大学（北京）战略合作协议项目（ZLZX2020-01）

中图分类号：P631.8　　文章编号：2096-8523(2026)01-0291-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240386

摘　要：库车坳陷三叠系、侏罗系发育湖泊相和沼泽相间互沉积的 5 套烃源岩层系，按岩性可划分出煤、碳质泥岩和暗色泥岩，其烃源岩具有总有机碳（TOC）丰度较高、厚度大、分布范围广等特征。由于烃源岩纵向分布层系多，不同岩性分布及纵向非均质性强，导致常用的 $\Delta \lg R$（R 为测井电阻率）法等在 TOC 测井定量表征中应用效果较差。为了更好地了解库车坳陷油气资源潜力以及评估油气储量，首先通过岩心等识别了烃源岩岩性特征，进一步通过地球化学分析资料实现烃源岩地质特征评价。将 $\Delta \lg R$ 法运用于 TOC 测井定量评价，然后将元素扫描测井应用于烃源岩岩性的测井识别工作中，并进一步利用元素扫描测井实现 TOC 测井定量评价。整体上，三叠系、侏罗系有机质类型以Ⅱ$_1$型、Ⅱ$_2$型和Ⅲ型为主，有机质演化为成熟阶段，其烃源岩品质为好-优质烃源岩。通过元素扫描测井识别不同岩性烃源岩并进一步定量评价 TOC 的方法，其精度相比 $\Delta \lg R$ 法提升显著。研究成果对库车坳陷油气资源潜力评估有一定指导意义，同时还有利于拓展元素扫描测井资料应用范围。

关键词：烃源岩；测井评价；总有机碳（TOC）；元素扫描测井；库车坳陷；煤；碳质泥岩；暗色泥岩

烃源岩是油气生成的物质基础，同时“源控论”认为油气的运移、聚集和分布与烃源岩有直接或间接的联系，因此烃源岩的精细研究对于沉积盆地的生油能力研究、油气资源潜力评估以及油气勘探具有重要意义[1-4]。作为含油气系统研究的重点，总有机碳质量分数（w(TOC)）是烃源岩识别与评价的关键指标[5-8]。通常烃源岩的研究可依托地球化学分析测试资料开展，地球化学分析测试虽然可以提供准确的烃源岩地球化学数据，但受到经济技术原因影响，取心资料往往不连续，如果采用离散且有限的烃源岩地球化学参数来表征全井段或者全盆地烃源岩特征往往容易产生误差[2, 4, 9-10]。此外，通过实验分析化验的方法进行研究，不仅研究周期较长、费用昂贵，而且烃源岩岩性等非均质性较强，地球化学评价结果受分析样品的影响具有局限性，可能会掩盖局部高丰度对烃源岩评价的影响，且当岩心样品受到污染后，评价结果无法保证其精确性，从而制约了油气勘探开发的步伐。相比较而言，纵向分辨率高且连

著录信息：王斌，夏宗立，张科，等. 元素扫描测井在煤系烃源岩识别与评价中的应用［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：291-301.
WANG Bin, XIA Zongli, ZHANG Ke, et al. Application of LithoScanner logging in recognition and evaluation of coaly source rocks[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 291-301.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

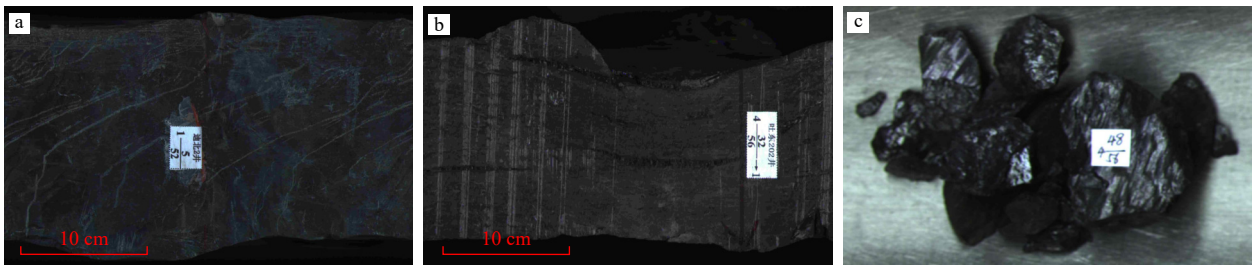
续性好的地球物理测井资料包含丰富地质信息，可以实现 w(TOC)连续定量表征，其评价结果能够实现烃源岩连续分级评价[2, 9, 11-13]。

众多国内外专家学者[3, 4, 6, 14-19]对烃源岩的测井识别及其定量表征开展了探索性的工作，目前已经形成了 Δlg$R$ 法、多元地质统计法、人工智能法等 TOC 质量分数测井定量预测方法。库车坳陷是“西气东输”的气源地，目前已发现多个大、中型天然气田。库车前陆盆地油气成藏地质条件十分优越，三叠系–侏罗系发育湖泊相和沼泽相间互沉积的 3 套烃源岩，包括侏罗系克孜勒努尔组、阳霞组、恰克马克组以及三叠系塔里奇克组和黄山街组，岩性包括煤层、碳质泥岩以及暗色泥岩，烃源岩具有厚度大、分布范围广、TOC 丰度较高等特征[20]。因此，库车坳陷烃源岩纵向分布层系多，不同岩性(暗色泥岩、碳质泥岩、煤层)分布及纵向变化差异较大，同时烃源岩发育平面区域跨度大，导致常规的 Δlg$R$ 法甚至是分岩性的 Δlg$R$ 法在库车坳陷不同层系和岩性烃源岩 TOC 测井定量表征中应用效果较差。

为了更好地了解油气资源潜力，本研究首先通过岩心等实现了烃源岩岩性等特征识别，在此基础上通过地球化学分析资料进行烃源岩地质特征评价，然后将元素扫描测井应用于烃源岩岩性的识别工作中，进一步利用元素扫描测井实现 TOC 测井定量评价，旨在实现库车坳陷暗色泥岩、碳质泥岩以及煤等不同岩性烃源岩测井识别，还可进一步实现不同岩性烃源岩 TOC 测井定量评价。这对库车坳陷油气资源潜力评估具有一定的指导意义，同时还有利于拓展元素扫描测井资料应用领域与范围。

1　研究区地质概况

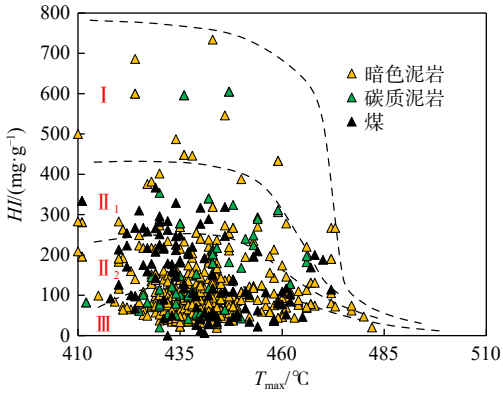
当前常用有机质丰度、成熟度和干酪根类型等指标进行烃源岩评价与分类[21]。烃源岩通常按岩性可分为煤系、碳酸盐岩和泥页岩烃源岩[22]。库车坳陷侏罗系和三叠系烃源岩按岩性可分为暗色泥岩、碳质泥岩和煤三大类(图 1)。暗色泥岩包括恰克马克组、黄山街组湖相泥岩和克孜勒努尔组、阳霞组、塔里奇克组煤系泥岩。根据氢指数(HI)等参数，库车坳陷三叠系、侏罗系烃源岩有机质类型以Ⅱ$_1$型、Ⅱ$_2$型和Ⅲ型为主(图 2)，实测镜质体反射率(R_o)数据表明烃源岩成熟度中等–高(表 1)[23-24]。



a. 暗色泥岩，J_2kz(克孜勒努尔组，下同)，DB2 井，4 045.17 m；b. 碳质泥岩，T_3t(塔里奇克组，下同)，TD202 井，5 110.22 m；c. 煤，T_3t，TD202 井，5 111.85 m

图 1　库车坳陷三叠系–侏罗系烃源岩岩性特征图

Fig. 1　Lithologic characteristics map of Triassic-Jurassic source rocks in Kuqa Depression



HI. 氢指数；T_{max}. 最大热解峰温；Ⅱ$_1$，Ⅱ$_2$ 和Ⅲ. 均为有机质类型；下同

图 2　库车坳陷三叠系–侏罗系烃源岩 HI 与 T_{max} 关系图

Fig. 2　Relationship between HI and T_{max} of Triassic-Jurassic source rocks in Kuqa Depression

按照烃源岩评价标准(SY/T 5735-2019)[25]，根据岩心实测的 TOC 含量以及生烃潜量(P_g)($P_g = S_1 + S_2$，S_1 为游离烃，S_2 为热解烃)，侏罗系恰克马克组湖相泥岩样品以好–优质烃源岩为主；三叠系黄山街组湖相泥岩主体为好–优质烃源岩；侏罗系克孜勒努尔组煤系泥岩也主要为好–优质烃源岩；侏罗系阳霞组煤系泥岩烃源岩品质也较好，为好–优质烃源岩；三叠系塔里奇克组煤系泥岩也为好–优质烃源岩；碳质泥岩的烃源岩品质较差，如侏罗系克孜勒努尔组、阳霞组碳质泥岩以一般–好烃源岩为主；三叠系塔里奇克组碳质泥岩也以一般–好烃源岩为主。整体上侏罗系煤系泥岩的有机质丰度明显高于三叠系湖相泥岩，且暗色泥岩、湖相泥岩的烃源岩品质要优于碳质

表 1　库车坳陷三叠系–侏罗系烃源岩实测镜质体反射率 (R_o)

Table 1　Reflectance of vitrinite measured of Triassic-Jurassic source rocks in Kuqa Depression

地区	井号	层位	R_o平均值/%	层位	R_o平均值/%
吐格地区	TX1	J_1y	0.82	J_2kz	–
	MN1		0.58		0.59
	TG4		0.76		–
	TG6		1.17		0.88
	TD2		1.09		–
迪北地区	YS4	J_1y	0.71	J_2kz	0.68
	YN2		0.95		0.85
	YN4		0.96		0.81
	YN5		0.96		–
	DB5		1.17		0.98
	DB6		1.18		0.88
阳霞地区	YT1	J_1y	1.05	J_2kz	1.07
	YX1		0.92		0.89

注：J_1y.下侏罗统阳霞组；J_2kz.中侏罗统克孜勒努尔组；下同

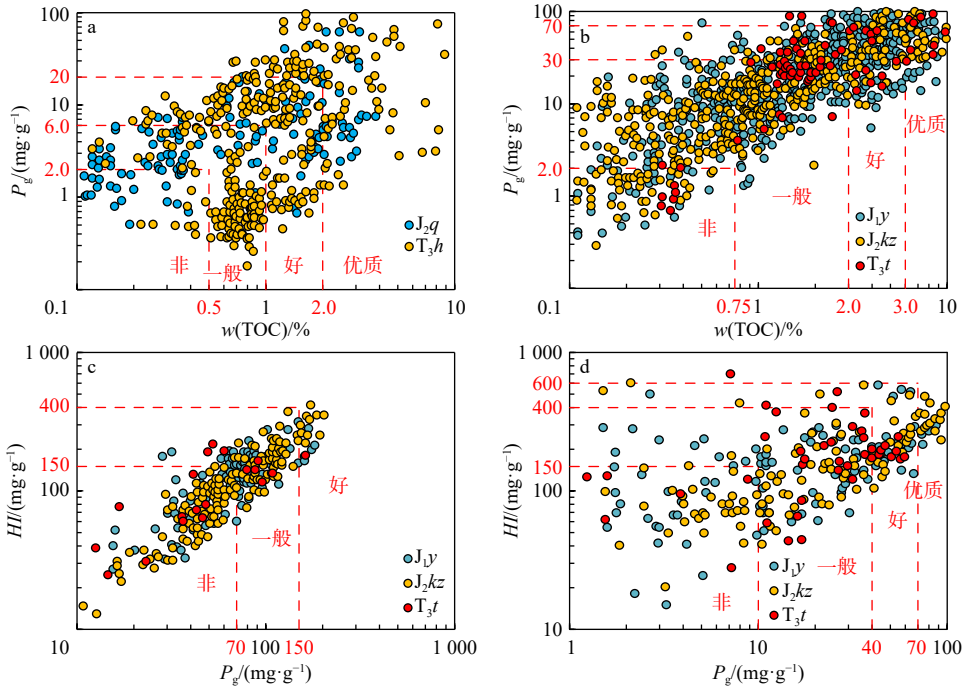
泥岩(图 3)。

2　样品及实验方法

烃源岩测井响应特征分析是用测井资料实现烃源岩定量评价的基础[26]。测井曲线对不同岩性岩石物理性质差异的响应，是利用测井信息识别不同岩性烃源岩以及反演烃源岩地球化学参数的基础[4, 21]。通常情况下，烃源岩一般表现为“四高一低”的特征，即高自然伽马(*GR*)、高电阻率(*RT*)、高声波时差(*DT*)、高中子(*CNC*)、低密度(*DEN*)测井响应[4, 27-28]。通常煤系烃源岩按有机质丰度由高到低可以划分出煤、碳质泥岩和暗色泥岩，因此，岩性和 *w*(TOC)差异导致了各类烃源岩在测井曲线组合特征上的差异[4, 22]。湖相烃源岩由泥质和干酪根组成，但碳质泥岩富含炭屑，因此与暗色泥岩在岩石物理响应上有差别，此外煤系烃源岩主要由煤和夹矸构成[26]。

库车坳陷由于烃源岩岩性较为复杂且纵向变化较快，因此烃源岩测井评价首先要进行烃源岩岩性的测井识别。成像测井等资料与常规测井结合可以较好地反映岩性等信息，因而也可以用于烃源岩测井评价[29]。而恰恰元素扫描测井在岩性识别与评价中效果显著，通过岩心资料刻度常规测井、成像测井以及元素扫描测井，可以揭示库车坳陷三叠系–侏罗系烃源岩暗色泥岩、碳质泥岩以及煤 3 种烃源岩的测井响应特征。

暗色泥岩岩心上发育水平层理，偶见裂缝，常规测井上表现为“四高一低”：高伽马(*GR*>120 API)、高中子(*CNC*>20%)、高声波时差(*DT*>70 μs/ft)、中等–高电阻率(*RT*>5 Ω·m)、中等–低密度(*DEN*<2.6 g/cm^3)，伽马能谱曲线无明显变化；成像测井上可



a. 湖相泥岩；b. 煤系泥岩；c. 煤岩；d. 碳质泥岩；P_g. 生烃潜量；*w*(TOC). 总有机碳质量分数；J_2q. 中侏罗统恰克马克组；T_3h. 上三叠统黄山组；T_3t. 上三叠统塔里奇克组；下同

图 3　库车坳陷三叠系–侏罗系烃源岩品质评价

Fig. 3　Quality evaluation of Triassic-Jurassic source rocks in Kuqa Depression

看到明暗相间的水平纹层，指示水平层理发育，元素扫描测井解释的岩性剖面显示岩性以黏土质（伊利石）为主，长英质含量较少（图 4a）。

碳质泥岩常规测井上表现为高伽马（*GR*>120 API）、高中子（*CNC*>30%）、中−高声波时差（*DT*>80 μs/ft）、低密度（*DEN*<2.5 g/cm^3），即三孔隙度曲线明显左偏；中等电阻率（*RT*>10 Ω·m），伽马能谱曲线钍含量略微增加；成像测井上显示为局部亮斑状模式，指示高阻炭屑的发育；而元素扫描测井解释的岩性剖面显示岩性以泥岩（伊利石）为主，局部含炭屑（图 4b）。

在常规测井曲线上，典型煤层表现为“三高两低”特征：高中子（*CNC*>40%）、高声波时差（*DT*>110 μs/ft）、高电阻率（*RT*>50 Ω·m）、低自然伽马（*GR*<60 API）、低密度（*DEN*<2.0 g/cm^3），伽马能谱曲线铀钍钾含量略微降低；成像测井上显示为亮块状、亮斑状模式，指示高阻的特征，同时发育高角度裂缝；同时煤层中发育夹矸，成像上呈暗色层状；元素测井解释的岩性剖面显示岩性以煤岩为主，也可看到夹矸的存在[30-31]，在元素扫描测井显示为煤层中间长英质含量增加（图 4c）。

总体而言，煤层“三高两低”的特征，易于和围岩区分，相比较而言，碳质泥岩和暗色泥岩则表现为“四高一低”特点（表 2），仅仅依靠常规测井难以区分，如果有成像测井则可以较好地实现不同岩性烃源岩测井判别[22, 32]。

3　煤系烃源岩 TOC 测井定量评价

在烃源岩岩性识别的基础上，烃源岩 TOC 含量测井预测至关重要[4, 12, 33-35]。由前文煤系烃源岩的测井响应特征表（表 2）可知，测井响应信息和烃源岩中有机碳含量关系密切，即每种对烃源岩响应敏感参数（测井曲线）都可以用于定量计算有机碳含量。因此可用单个测井参数建立 TOC 模型，进而进行 TOC 的定量计算。早在 1981 年就有 SCHMOKER 等[36-37]采用自然伽马求取有机质丰度，目前为止，单因素法已经得到普遍应用；由于自然伽马、中子孔隙度、声波时差、密度及电阻率测井对有机碳的响应相关性均较好，故可以综合多因素建立 TOC 预测模型；师展等[38]利用多元回归法建立了鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩 TOC 预测模型，其模型误差较小；由于碳/氧能谱中子测井可同时提供 C/O 比和 Si/Ca 比，赵彦超[39]经过推导，建立了该测井提供的 C/O 比和 Si/Ca 参数同烃源岩有机碳含量之间的数值关系；除了实现烃源岩岩性定性识别，元素扫描测井在烃源岩 TOC 参数定量评价方面优势也较为明显[4, 12, 40]。元素扫描测井可以测量获得地层总碳含量（total carbon，简称 TC），减去岩石中无机碳含量（total inorganic carbon，简称 TIC）后，即可得到地层 TOC 含量，该方法简单明确，且无需与岩心测试结果标定[41-43]。

3.1　Δlg*R* 法

PASSEY 等[14]提出了一种将声波和电阻率曲线重叠的 TOC 测井定量计算的技术，即 Δlg*R* 技术，该 Δlg*R* 法将电阻率（对数刻度）曲线与声波时差（线性刻度）曲线重叠，每 100 μs/ft 声波时差刻度对应 2 个电阻率对数刻度，如声波时差若为 200 ~ 0 μs/ft 刻度（每 50 μs/ft 1 个刻度），那么电阻率曲线应当为 0.01 ~ 100 Ω·m 刻度（中间刻度分别为 0.1，1，10 Ω·m）。当 2 条曲线重叠时为基线（本研究选取电阻率基线为 20 Ω·m；声波时差基线为 65 μs/ft），基线对应非烃源岩层，在基线确定以后，2 条曲线之间的幅度差记为 Δlg*R*（式 (1) 和式 (2)）[14-15, 34, 44]。

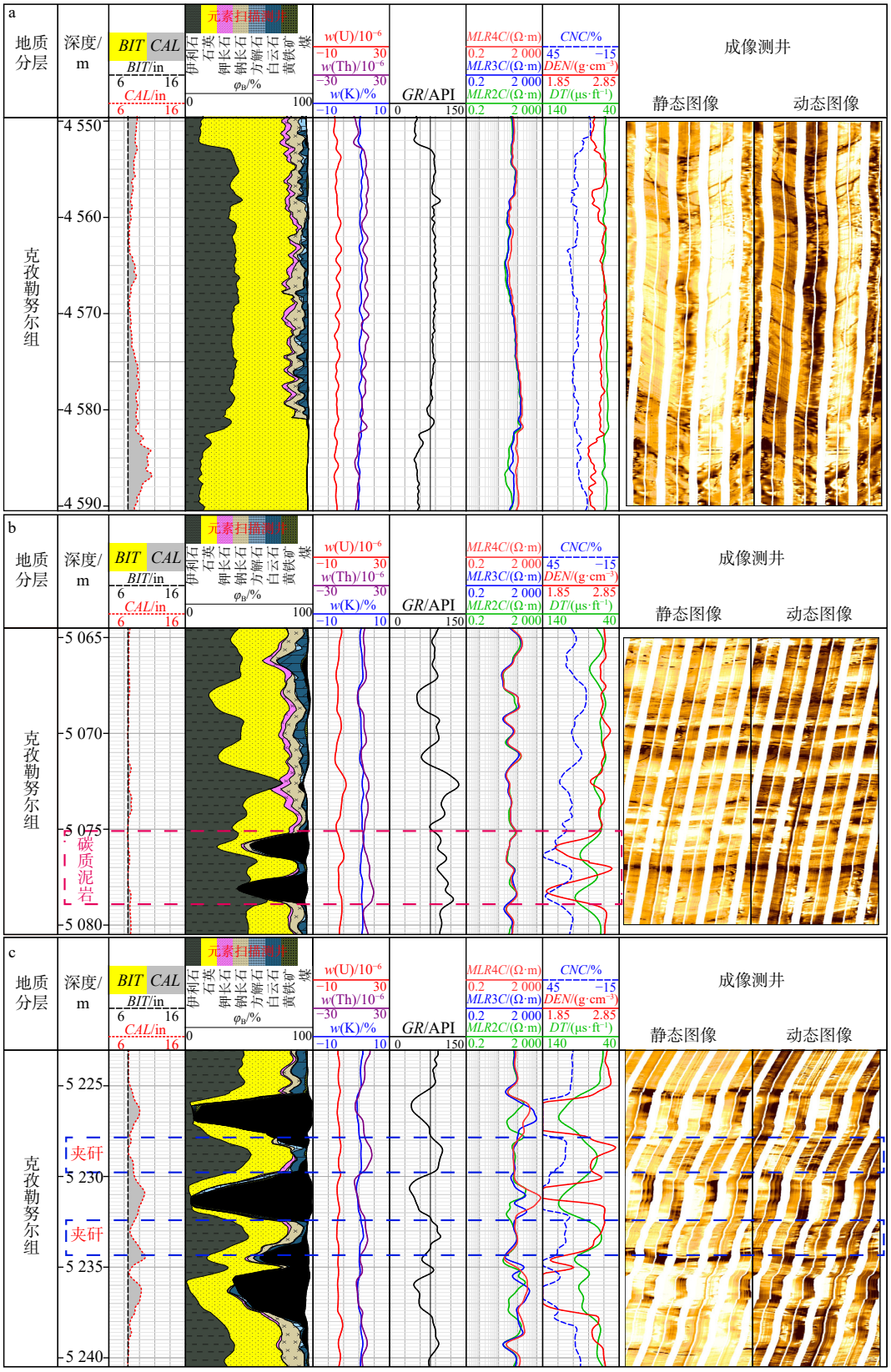
当然选定基线时，也不是所有 2 条曲线重叠的地方均可作为基线，实际操作时，应当剔除油层等储层段，此外井壁垮塌段等干扰井段后也应当剔除[45]。剔除以上干扰因素后，在贫有机质地层中，声波时差低，电阻率也低，2 条曲线平行且叠加；而在富有机质烃源岩层中，声波时差高，电阻率高，2 条曲线即发生分离[28, 46]。

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{\text{Baseline}}) + 0.02(\Delta t - \Delta t_{\text{Baseline}}), \quad (1)$$

$$w(\text{TOC}) = \Delta \lg R \times 10^{(2.297 - 0.168\,8LOM)}, \quad (2)$$

式中：R 为测井电阻率，一般为深电阻率，Ω·m；Δt 为测井声波时差，μs/ft；R_{Baseline}，$\Delta t_{\text{Baseline}}$ 分别为基线的电阻率和声波时差值；*LOM* 为成熟度评价指标。

Δlg*R* 法通过声波时差和电阻率曲线重叠克服了利用单条曲线进行 TOC 预测时容易产生的误差，消除了孔隙度变化影响[12, 15, 30-31, 47]。通过 Δlg*R* 方法实现 DB501 井 TOC 测井定量预测，结果与岩心实测结果有一定的吻合性，但在数值区域，吻合度较差（图 5），Δlg*R* 法计算的 w(TOC) 与岩心实测 w(TOC) 拟合的复相关系数 R^2=0.299 4（图 6），说明 Δlg*R* 法在库车坳陷深层复杂岩性烃源岩 TOC 定量计算中效果较差。主要原因在于，随着地层埋深增加，上覆岩层重力加强，压实作用强度增大，进而导致地层逐渐被压实致密，此时，*DT* 和 *RT* 曲线将趋于平直，因而难以反映 TOC 含量的变化，此外，煤系烃源岩本身岩性变化较为复杂，*DT* 和 *RT* 曲线除了反映 TOC 含量变化之外，岩性变化对其测井响应也有一定的影响，由此导致 Δlg*R* 法计算深层煤系烃源岩的精度



BIT. 钻头直径; *CAL*. 井径; *GR*. 自然伽马; *MLR4C*. 深电阻率; *MLR3C*. 中电阻率; *MLR2C*. 浅电阻率; *CNC*. 中子; *DEN*. 密度; *DT*. 声波时差; 1 in=2.54 cm; 下同

图 4　库车坳陷 DB501 井侏罗系克孜勒努尔组暗色泥岩 (a)、碳质泥岩 (b) 和煤 (c) 常规−成像−元素扫描测井响应

Fig. 4　Conventional-image logging-LithoScanner logging responses of dark mudstones (a), canbonferious mudstones (b) and coal (c) of Jurassic Kezilenuer Formation of Well DB501 in Kuqa Depression

表 2　库车坳陷三叠系–侏罗系煤系烃源岩测井响应特征

Table 2　Logging response characteristics of coaly source rocks of Triassic-Jurassic in Kucha Depression

岩性	暗色泥岩	碳质泥岩	煤
GR/API	>120	>120	<60
CNC/%	>20	>30	>40
DT/(μs·ft^{-1})	>70	>80	>110
RT/(Ω·m)	>5	>10	>50
DEN/(g·cm^{-3})	<2.6	<2.5	<2.0

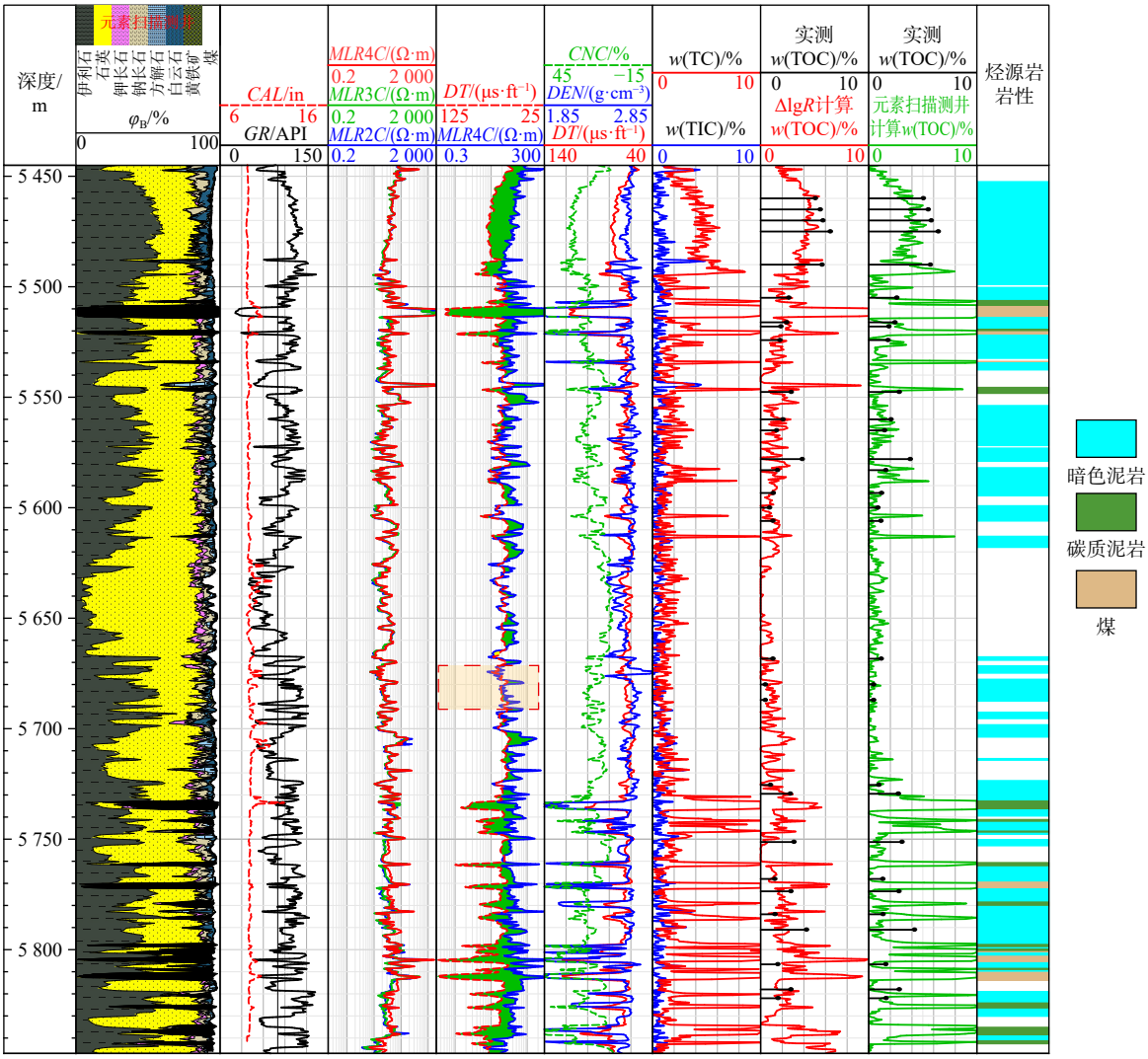
注：*RT*. 电阻率

明显变差[4, 48-50]。因此，该方法适用于中浅层、正常压实烃源岩[32]，对于库车坳陷深层煤系烃源岩而言，Δlg*R* 方法难以实现烃源岩 TOC 测井定量评价。同时 Δlg*R* 方法需要人为确定 2 条曲线基线、成熟度参数，若 *LOM* 估计不准确，则计算会产生误差，同时计算公式中叠合系数选用固定值 0.02 也缺乏对应的岩石物理意义，这增加了 Δlg*R* 方法推广应用难度[11]。

3.2　元素扫描测井计算 *w*（TOC）

元素扫描（LithoScanner）测井，也叫岩性扫描测井，是在元素俘获测井（ECS）基础上发展起来的[51]。元素扫描测井不受井眼环境限制，可以提供高精准度的矿物组分剖面，因而可对复杂岩性进行识别与判断，被地质学家广泛应用在地层界面识别[52-53]、岩性岩相判别[54-55]、脆性指数评价[56-57]、成岩作用分析[58]，甚至元素扫描测井还可辅助解读核磁共振、密度测井等[51]。

而在烃源岩测井识别与评价方面，元素扫描测井首先可以识别不同岩性，如煤、碳质泥岩与暗色泥岩，其次元素扫描测井可以通过对获取的非弹性谱解谱直接获取到地层总碳元素（TC）含量，且不受井眼稳定性等因素所影响，再做无机碳（TIC）含量校正后可得到 TOC 含量[54, 59]。利用元素扫描测井定量



w(TC)，*w*(TIC). 分别为总碳质量分数和无机碳质量分数

图 5　基于 Δlg*R* 法与岩性扫描测井的库车坳陷烃源岩 TOC 测井定量评价（DB501 井）

Fig. 5　TOC content evaluation of source rocks in Kuqa Depression using Δlg*R* method and LithoScanner logging

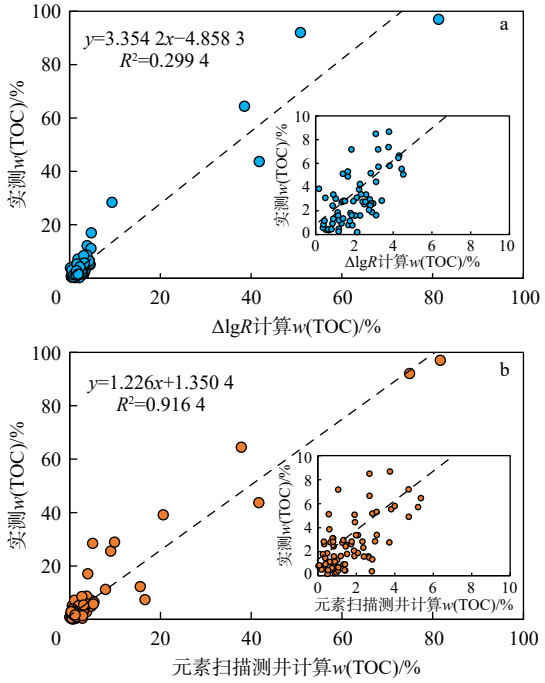


图 6　岩心实测 w（TOC）与 Δlg$R$ 法计算 w（TOC）(a)、元素扫描测井计算 w（TOC）(b) 交会图

Fig. 6　Crossplot of rock core measurement w(TOC) versus w(TOC) calculated by Δlg$R$ method (a), by Litho-Scanner logging (b)

计算 w(TOC)的原理在于，元素扫描仪器可以测量得到总碳元素含量(有机碳含量和无机碳含量)，而地层中无机碳主要由方解石、白云石、菱铁矿和铁白云石等矿物所提供[60]，通过去除掉上述碳酸盐矿物的碳组分，可以计算出有机碳的含量(w(TOC)=w(TC)−w(TIC))，该方法得到的有机碳含量可以不用岩心实测资料进行验证和刻度[11-12, 51, 61]。

本研究通过元素扫描测井对库车坳陷三叠系−侏罗系烃源岩进行了 w(TOC)测井计算，结果发现岩心实测 w(TOC)与元素扫描定量计算出的 w(TOC)具有较好的一致性(图 5)，同时与 Δlg$R$ 法相比，元素扫描测井计算出来的 w(TOC)精度明显得到提升，复相关系数(R^2)由 Δlg$R$ 法的 0.299 4(图 6a)提升到元素扫描计算的 0.916 4(图 6b)，展现其在计算 w(TOC)上具有明显的优越性(图 6)。因此元素扫描通过直接获取地层总碳含量去除无机碳含量得到地层总 TOC 的含量，该方法适用于库车坳陷深层复杂岩性烃源岩岩性识别以及 w(TOC)测井定量计算。

全球“双碳”背景下，“两深—非—老”(陆上深地、海域深水、非常规油气和老油田剩余油)油气成为增储上产的主要领域，煤岩气非常规天然气的一匹“黑马”，是支撑国家“稳油增气”能源战略目标的重要支柱，而本研究建立的煤系烃源岩测井评价技术可为煤岩气勘探开发提供重要支柱[62-65]。

4　结　论

(1)库车坳陷侏罗系和三叠系烃源岩按岩性分为暗色泥岩、碳质泥岩和煤 3 类。整体上库车坳陷三叠系、侏罗系烃源岩有机质类型以Ⅱ$_1$型、Ⅱ$_2$型和Ⅲ型为主，有机质演化为成熟阶段，其烃源岩品质为好−优质烃源岩。

(2)通过岩心刻度常规测井、成像测井以及元素扫描测井，可以实现不同岩性烃源岩的测井判别。暗色泥岩在常规测井上表现为高伽马、高中子、高声波时差、中等−高电阻率、中等−低密度；在成像测井上可看到明暗相间的水平纹层；元素扫描测井解释的岩性剖面显示岩性以黏土质(伊利石)为主，长英质含量较少。煤在常规测井上表现为高电阻率、高中子、高声波时差、低伽马、低密度；在成像测井上显示为亮块状、亮斑状模式；同时煤层中发育夹矸，在成像上呈暗色层状；元素测井解释的岩性剖面显示岩性以煤岩为主，也可看到夹矸的存在。碳质泥岩在常规测井上除表现为“四高一低”外，还出现三孔隙度曲线明显左偏，成像测井上显示为局部亮斑状模式，指示高阻炭屑的发育；而元素扫描测井解释的岩性剖面显示岩性以泥岩为主，局部含炭屑。

(3)对于库车坳陷深层煤系烃源岩而言，Δlg$R$ 法难以实现烃源岩 TOC 测井定量评价，主要原因在于深埋导致烃源岩压实程度增加，AC 和 RT 曲线将趋于平直，难以反映 TOC 的变化。此外库车坳陷烃源岩岩性变化对其测井响应也有一定的影响，由此导致 Δlg$R$ 方法计算深层煤系烃源岩的精度明显变差。

(4)元素扫描测井可以识别暗色泥岩、碳质泥岩和煤 3 类烃源岩岩性，同时还可用于 TOC 含量测井定量评价，可以提供不需要岩心刻度的 TOC 数值，因而在深层烃源岩岩性测井识别以及 TOC 定量预测中应用广泛。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　邹才能, 陶士振, 薛叔浩. “相控论”的内涵及其勘探意义 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 7-12.
ZOU C N, TAO S Z, XUE S H. Connotation of "facies control theory" and its significance for exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 7-12. (in Chinese with English abstract)

[2] 霍秋立, 曾花森, 付丽, 等. ΔlgR 测井源岩评价方法的改进及其在松辽盆地的应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 586-591.
HUO Q L, ZENG H S, FU L, et al. The advance of ΔlgR method and its application in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(2): 586-591. (in Chinese with English abstract)

[3] 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.
HU H T, LU S F, LIU C, et al. Models for calculating organic carbon content from logging information: Comparison and analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1199-1205. (in Chinese with English abstract)

[4] 赖锦, 白天宇, 苏洋, 等. 烃源岩测井识别与评价方法研究进展 [J]. 地质论评, 2024, 70(2): 721-741.
LAI J, BAI T Y, SU Y, et al. Researches progress in well log recognition and evaluation of source rocks[J]. Geological Review, 2024, 70(2): 721-741. (in Chinese with English abstract)

[5] 高阳. 利用测井信息评价盐湖相烃源岩 [J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 730-737.
GAO Y. Salt lake source rock evaluation by logging data[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 730-737. (in Chinese with English abstract)

[6] MAHMOUD A A A, ELKATATNY S, MAHMOUD M, et al. Determination of the total organic carbon (TOC) based on conventional well logs using artificial neural network[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 179: 72-80.

[7] 殷杰, 王权. 利用测井和地震信息识别和预测优质烃源岩: 以渤海湾盆地饶阳凹陷沙一段为例 [J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1761-1770.
YIN J, WANG Q. Using seismic and log information to identify and predict high-quality source rocks: A case study of the First Member of Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1761-1770. (in Chinese with English abstract)

[8] LAI J, SU Y, XIAO L, et al. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect[J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(3): 101779.

[9] 陈海峰, 王凤启, 王民, 等. 基于变系数 ΔlogR 技术的烃源岩 TOC 精细评价 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 54-64.
CHEN H F, WANG F Q, WANG M, et al. TOC evaluation using variable-coefficient ΔlogR model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 54-64. (in Chinese with English abstract)

[10] AZIZ H, EHSAN M, ALI A, et al. Hydrocarbon source rock evaluation and quantification of organic richness from correlation of well logs and geochemical data: A case study from the sembar formation, southern Indus Basin, Pakistan[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81: 103433.

[11] 袁超, 周灿灿, 胡松, 等. 地层有机碳含量测井评价方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2831-2837.
YUAN C, ZHOU C C, HU S, et al. Summary on well logging evaluation method of total organic carbon content in formation[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2831-2837. (in Chinese with English abstract)

[12] LAI J, WANG G W, FAN Q X, et al. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(3): 913-957.

[13] 赖锦, 苏洋, 肖承文, 等. 地球物理测井在地质领域应用经典案例解析 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 279-288.
LAI J, SU Y, XIAO C W, et al. Analysis of typical applications of geophysical well logs in geological fields[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 279-288. (in Chinese with English abstract)

[14] PASSEY 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.

[15] 王贵文, 朱振宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 50-52.
WANG G W, ZHU Z Y. Logging identification and evaluation Cambrian-Ordovician source rocks in syneclise of Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 50-52. (in Chinese with English abstract)

[16] ZHAO P Q, MAO Z Q, HUANG Z H, et al. A new method for estimating total organic carbon content from well logs[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(8): 1311-1327.

[17] AMOSU A, SUN Y F. Identification of thermally mature total organic carbon-rich layers in shale formations using an effective machine-learning approach[J]. Interpretation, 2021, 9(3): 735-745.

[18] 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 T T, SHAO D L, CAO G W, et al. Logging quantitative evaluation method for hydrocarbon source rock[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 285-291. (in Chinese with English abstract)

[19] LAI J, ZHAO F, XIA Z L, et al. Well log prediction of total organic carbon: A comprehensive review[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 258: 104913.

[20] 袁龙, 王谦, 虞兵, 等. 致密气藏烃源岩地化参数测井综合评价方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 239-249.
YUAN L, WANG Q, YU B, et al. Well logging evaluation method research of source rock geochemical parameters in the tight gas[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 239-249. (in Chinese with English abstract)

[21] 黄小鹏, 杨占龙, 张兆辉, 等. 烃源岩地化参数的测井反演: 以雅布赖盆地小湖次凹侏罗系新河组下段为例 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊 1): 415-426.
HUANG X P, YANG Z L, ZHANG Z H, et al. Logging inversion geochemical parameters of hydrocarbon source rocks: A case study of Jurassic Lower Xinhe Formation in Xiaohu sub-sag, Yabulai Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 415-426. (in Chinese with English abstract)

[22] 杜文凤, 王攀, 梁明星, 等. 煤系烃源岩有机碳含量测井响应特征与定量预测模型 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 954-963.
DU W F, WANG P, LIANG M X, et al. Well logs response characteristics and quantitative prediction model of organic carbon content of hydrocarbon source rocks in coal-bearing strata measures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 954-963. (in Chinese with English abstract)

[23] 凡闪, 卢玉红, 李玲, 等. 塔里木盆地库车坳陷吐格尔明及周缘地区三叠系–侏罗系烃源岩地球化学特征、分布规律与油气地质意义 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(12): 2074-2086.

FAN S, LU Y H, LI L, et al. Geochemical characteristics, distribution and petroleum geological significance of Triassic-Jurassic source rocks in the Tugeerming and surrounding areas of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(12): 2074-2086. (in Chinese with English abstract)

[24] 丁修建, 高天泽, 李淑凤, 等. 煤系烃源岩特征与发育机制研究现状 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5373-5389.
DING X J, GAO T Z, LI S F, et al. Research status of characteristics and development mechanism of coal-measure source rocks[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5373-5389. (in Chinese with English abstract)

[25] 中国石油天然气总公司. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
China National Petroleum Corporation. Hydrocarbon source rock geochemical evaluation method: SY/T 5735-2019[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

[26] 宋占东, 查明, 张小莉, 等. 烃源岩有机碳测井定量评价及在高邮凹陷永安地区的应用 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(2): 18-20.
SONG Z D, ZHA M, ZHANG X L, et al. A method for the quantitative evaluation of the organic carbon content of the hydrocarbon source rock from well logging information and its application in Yong'an oilfield in Gaoyou Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(2): 18-20. (in Chinese with English abstract)

[27] 杜江民, 张小莉, 郑茜, 等. 致密油烃源岩有机碳含量测井定量预测模型适用性分析: 以柴达木盆地上干柴沟组下段烃源岩为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 239-245.
DU J M, ZHANG X L, ZHENG X, et al. The applicability of well logs prediction models of organic carbon content in source rocks of the tight oil: A case of the source rocks of lower section of N_1 Formation in Qaidm Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 239-245. (in Chinese with English abstract)

[28] 秦建强, 付德亮, 钱亚芳, 等. 烃源岩有机质丰度预测的地球物理研究进展 [J]. 石油物探, 2018, 57(6): 803-812.
QIN J Q, FU D L, QIAN Y F, et al. Progress of geophysical methods for the evaluation of TOC of source rock[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6): 803-812. (in Chinese with English abstract)

[29] 赖锦, 肖露, 白天宇, 等. 成像测井解释评价方法及其地质应用 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 323-340.
LAI J, XIAO L, BAI T Y, et al. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological applications[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 323-340. (in Chinese with English abstract)

[30] ZHAO F, LAI J, XIA Z L, et al. Coaly source rock evaluation using well logs: The Jurassic Kezilenuer Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Petroleum Science, 2025, 22(9): 3599-3612.

[31] 张亮, 夏宗立, 王斌, 等. 深层烃源岩测井评价方法: 以库车坳陷侏罗系阳霞组烃源岩为例 [J]. 地球物理学进展, 2025, 40(4): 1563-1576.
ZHANG L, XIA Z L, WANG B, et al. Well log evaluation methods of deep source rocks: The Jurassic Yangxia Formation in Kuqa Depression[J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(4): 1563-1576. (in Chinese with English abstract)

[32] 李正勇, 郑姝, 彭瀚霖, 等. 安岳气田下寒武统海相烃源岩总有机碳含量测井预测 [J]. 测井技术, 2020, 44(4): 398-403.
LI Z Y, ZHENG S, PENG H L, et al. Log prediction of total organic carbon content in the Lower Cambrian marine source rocks of Anyue gas field[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(4): 398-403. (in Chinese with English abstract)

[33] KHOSHNOODKIA M, MOHSENI H, RAHMANI O, et al. TOC determination of Gadvan Formation in South Pars gas field, using artificial intelligent systems and geochemical data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 119-130.

[34] 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.

[35] WOOD D A. Total organic carbon predictions from lower Barnett shale well-log data applying an optimized data matching algorithm at various sampling densities[J]. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(11): 5451-5468.

[36] SCHMOKER J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs[J]. 1981, 65(7): 1285-1298.

[37] SCHMOKER J W, HESTER T C. Organic carbon in bakken formation, United States portion of Williston Basin[J]. 1983, 67(12): 2165-2174.

[38] 师展, 赵靖舟, 孙雄伟, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤系烃源岩特征及生烃潜力评价 [J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1612-1626.
SHI Z, ZHAO J Z, SUN X W, et al. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Upper Paleozoic coal measure source rocks in the southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1612-1626. (in Chinese with English abstract)

[39] 赵彦超. 生油岩测井评价的理论和实践: 以南阳、泌阳凹陷为例 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 1990, 15(1): 65-74.
ZHAO Y C. The theory and application of logging for source rock evaluation: From the working results in Nanyang and Biyang depressions[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 1990, 15(1): 65-74. (in Chinese with English abstract)

[40] 王清辉, 冯进. 烃源岩 TOC 测井评价方法及应用: 以珠江口盆地文昌组为例 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 251-258.
WANG Q H, FENG J. The TOC logging evaluation methods and application of source rock: A case study of Wenchang Formation in Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 251-258. (in Chinese with English abstract)

[41] 周妍, 王长胜, 林伟川, 等. 页岩油烃源岩地化参数测井评价方法及应用 [J]. 测井技术, 2022, 46(3): 334-339.
ZHOU Y, WANG C S, LIN W C, et al. Evaluation method and application for geochemical parameters of shale oil source rock[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3): 334-339. (in Chinese with English abstract)

[42] 袁龙, 曹志锋, 别康, 等. 深层–超深层碎屑岩测井评价技术进展及展望 [J]. 油气地质与采收率, 2025, 32(6): 1-14.
YUAN L, CAO Z F, BIE K, et al. Review and prospect of logging evaluation technologies for deep and ultra-deep clastic rocks[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(6): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[43] SHALABY M R, JUMAT N, LAI D, et al. Integrated TOC prediction and source rock characterization using machine learning, well

logs and geochemical analysis: Case study from the Jurassic source rocks in Shams Field, NW Desert, Egypt[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 369-380.

[44] 卢妍欣, 包书景, 周志, 等. 高热演化页岩总有机碳地球物理预测方法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 229-241.
LU Y X, BAO S J, ZHOU Z, et al. Research progress of geophysical prediction methods for total organic carbon in high-thermal evolution shale[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 229-241. (in Chinese with English abstract)

[45] 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.
ZHU J W, ZHAO G, LIU B, et al. Identification technology and application of well-logging about oil shale[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 289-295. (in Chinese with English abstract)

[46] 刘瑞, 郭少斌, 王继远. 烃源岩 TOC 计算模型: 以鄂尔多斯盆地太原组−山西组为例 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1628-1636.
LIU R, GUO S B, WANG J Y. TOC calculation model of source rocks: Case study from Taiyuan-Shanxi formations in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(11): 1628-1636. (in Chinese with English abstract)

[47] 胡慧婷, 苏瑞, 刘超, 等. 广义 ΔlgR 技术预测陆相深层烃源岩有机碳含量方法及其应用 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 149-155.
HU H T, SU R, LIU C, et al. The method and application of using generalized-ΔlgR technology to predict the organic carbon content of continental deep source rocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 149-155. (in Chinese with English abstract)

[48] 王宵宇, 谢然红, 毛治国, 等. 基于集成学习的烃源岩总有机碳含量测井评价方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 684-694.
WANG X Y, XIE R H, MAO Z G, et al. Research on logging evaluation method of total organic carbon content of source rock based on ensemble learning[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 684-694. (in Chinese with English abstract)

[49] 苏洋, 赖锦, 赵飞, 等. 岩性扫描测井解释评价方法及其地质应用 [J]. 地质论评, 2024, 70(5): 1884-1898.
SU Y, LAI J, ZHAO F, et al. Interpretation and evaluation methods of litho-scanner logging data and its geological application[J]. Geological Review, 2024, 70(5): 1884-1898. (in Chinese with English abstract)

[50] 赖锦, 党文乐, 苏洋, 等. 声波测井地质与工程应用 [J]. 地质论评, 2025, 71(3): 1046-1072.
LAI J, DANG W L, SU Y, et al. Geological and engineering applications of sonic logs[J]. Geological Review, 2025, 71(3): 1046-1072. (in Chinese with English abstract)

[51] 柳建华, 刘瑞林, 吴兴能, 等. 化学元素测井资料在地层界面处的响应特征研究 [J]. 石油天然气学报, 2007, 29(1): 84-87.
LIU J H, LIU R L, WU X N, et al. On the data of response characters of elemental capture spectroscopy (ECS) logging at stratum boundary[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(1): 84-87. (in Chinese with English abstract)

[52] 魏翔宇, 赵延朋, 王璞珺, 等. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山地层期次划分及分布规律 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 12-23.
WEI X Y, ZHAO Y P, WANG P J, et al. Division of volcanic eruption stages and distribution patterns of volcanic rocks in Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(4): 12-23. (in Chinese with English abstract)

[53] 王胜建, 任收麦, 周志, 等. 鄂西地区震旦系陡山沱组二段页岩气储层测井评价初探 [J]. 中国地质, 2020, 47(1): 133-143.
WANG S J, REN S M, ZHOU Z, et al. Discussion on petrophysical evaluation of shale gas reservoir in the Second Member of Sinian Doushantuo Formation in western Hubei Province, South China[J]. Geology in China, 2020, 47(1): 133-143. (in Chinese with English abstract)

[54] 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 等. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例 [J]. 古地理学报, 2023, 25(5): 1156-1175.
PANG X J, WANG G W, KUANG L C, et al. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: A case study of the Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(5): 1156-1175. (in Chinese with English abstract)

[55] 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 等. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展 [J]. 石油科学通报, 2016, 1(3): 330-341.
LAI J, WANG G W, FAN Z Y, et al. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(3): 330-341. (in Chinese with English abstract)

[56] MEWS K S, ALHUBAIL M M, BARATI R G. A review of brittleness index correlations for unconventional tight and ultra-tight reservoirs[J]. Geosciences, 2019, 9(7): 319.

[57] LAI J, WANG G W, CHEN J, et al. Origin and distribution of carbonate cement in tight sandstones: The Upper Triassic Yanchang Formation Chang 8 oil layer in West Ordos Basin, China[J]. Geofluids, 2017, 2017(1): 8681753.

[58] DE S, SENGUPTA D. An advanced well log and an effective methodology to evaluate water saturation of the organic-rich Cambay shale[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(2): 1719-1733.

[59] CHARSKY A, HERRON S. Accurate, direct total organic carbon (TOC) log from a new advanced geochemical spectroscopy tool: Comparison with conventional approaches for TOC estimation[J]. Search and Discovery, 2013, 4116, 2(1): 1-17.

[60] 贺聪, 苏奥, 张明震, 等. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机碳含量测井预测方法优选及应用 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 754-764.
HE C, SU A, ZHANG M Z, et al. Optimal selection and application of prediction means for organic carbon content of source rocks based on logging data in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 754-764. (in Chinese with English abstract)

[61] 赖锦, 凡雪纯, 黎雨航, 等. 苏北盆地古近系阜宁组页岩七性关系与三品质测井评价 [J]. 地质论评, 2022, 68(2): 751-768.
LAI J, FAN X C, LI Y H, et al. Well logging evaluation of seven kinds of relationships and three types of properties of Paleogene Funing Formation oil shales in Subei Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 751-768. (in Chinese with English abstract)

[62] 赖锦, 宋翔羽, 杨薰, 等. 致密砂岩气储层测井综合评价技术研究进展 [J]. 石油学报, 2025, 46(1): 220-235.
LAI J, SONG X Y, YANG X, et al. Research progresses of comprehensive well logging evaluation methods of tight gas sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 220-235. (in

Chinese with English abstract）
[63] 赖锦, 苏洋, 党文乐, 等. 储层裂缝测井评价技术 [J]. 石油学报, 2025, 46(11): 2187-2210.
LAI J, SU Y, DANG W L, et al. Well logging evaluation method of reservoir fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(11): 2187-2210.（in Chinese with English abstract）
[64] ZHAO F, LAI J, XIAO L, et al. Pore structure and gas content evaluation of coal-rock gas using well log data[J]. Unconventional Resources, 2025, 8: 100247.
[65] 邹才能, 赵群, 刘翰林, 等. 中国煤岩气突破及意义 [J]. 天然气工业, 2025(4): 1-18.
ZOU C N, ZHAO Q, LIU H L, et al. China's breakthrough in coal-rock gas and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025(4): 1-18.（in Chinese with English abstract）

Summary for “元素扫描测井在煤系烃源岩识别与评价中的应用”

Application of LithoScanner logging in recognition and evaluation of coaly source rocks

WANG Bin[1,2,3]，XIA Zongli[4a,4b]，ZHANG Ke[1,2,3]，LI Ling[1,2,3]，WANG Zhongrui[4a,4b]，ZHAO Fei[4a,4b]，ZHANG Youpeng[5]，LAI Jin[4a,4b*]

1. Research and Development Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla Xinjiang 841000, China；
2. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla Xinjiang 841000, China；
3. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla Xinjiang 841000, China；
4a. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Engineering； 4b. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China；
5. Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Beijing 102206, China

First author，E-mail：wangb3-tlm@petrolchina.com.cn
* Corresponding author， E-mail：laijin@cup.edu.cn

Abstract：In the Kuqa Depression, the Triassic and Jurassic periods feature five sets of source rock sequences that developed as alternating lake and swamp facies. These sequences can be classified into coal, carbonaceous mudstone, and dark mudstone based on lithology. The source rocks are characterized by high TOC abundance, significant thickness, and wide distribution. However, due to the vertical distribution of multiple source rock layers and the strong heterogeneity in lithological distribution, conventional methods such as the Δlg*R* method perform poorly in TOC logging quantification. [**Objective and Methods**] To better understand the hydrocarbon resource potential and assess reserves in the Kuqa Depression, this study first identified the lithological characteristics of the source rocks through core analysis. Further geological characterization was achieved using geochemical analysis data. The Δlg*R* method was initially applied for quantitative TOC logging evaluation, followed by the application of LithoScanner logging for lithological identification of the source rocks. Subsequently, LithoScanner logging was utilized for quantitative TOC evaluation. [**Results**] Overall, the Triassic and Jurassic source rocks are primarily composed of type Ⅱ$_1$, Ⅱ$_2$, and Ⅲ organic matter, with medium to high maturity. The quality of these source rocks ranges from medium to good. The method of using LithoScanner logging to identify different lithological source rocks and quantitatively evaluate TOC demonstrated a significantly higher accuracy compared to the Δlg*R* method.[**Conclusion**] The findings provide valuable guidance for assessing the hydrocarbon resource potential in the Kuqa Depression and expand the application scope of LithoScanner logging data.

Key words: source rock； logging evaluation； TOC； LithoScanner logging； Kuqa Depression； coal； carbonaceous mudstone； dark mudstone

Received：2024-07-11；Revised：2024-10-09；Accepted：2024-11-21

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240386