



## 泥页岩有机非均质性评价及其在烃源岩分级评价中的应用 ——以辽西拗陷中元古界蓟县系为例

石 蕾,宗文明,孙求实,李永飞,陈树旺

中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034

**摘 要:** 泥页岩有机质丰度存在较强的有机非均质性,利用有限的测试样品难以表征整套烃源岩层的生烃潜力。以辽西拗陷辽凌地 2 井为研究对象,对蓟县系主要烃源岩层铁岭组与洪水庄组进行剖析,在有机质地球化学特征研究的基础上,利用烃源岩层的测井响应特征,采用变系数  $\Delta\log R$  技术刻画该井烃源岩 TOC,进而实现烃源岩分级评价,得到不同丰度级别烃源岩的空间分布特征。结果表明,洪水庄组烃源岩有机质丰度一般在 2% 以上,明显高于铁岭组,有机质类型都以 II 型为主并含少量 I 型干酪根,烃源岩都处于生气高峰期的过成熟阶段,应为蓟县系主力烃源岩层。

**关键词:** 烃源岩;变系数  $\Delta\log R$ ;铁岭组;洪水庄组;蓟县系;辽西拗陷

## SHALE ORGANIC HETEROGENEITY EVALUATION METHOD AND ITS APPLICATION IN SOURCE ROCKS GRADING EVALUATION: A Case Study of Mesoproterozoic Jixianianin in Liaoxi Depression

SHI Lei, ZONG Wen-ming, SUN Qiu-shi, LI Yong-fei, CHEN Shu-wang  
Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

**Abstract:** It is difficult to characterize hydrocarbon potential of the whole source rock layer with limited test samples due to the strong heterogeneity in organic matter abundance (TOC) of shale. Taking LLD2 well in Liaoxi Depression as the research object, the paper analyzes the main source rocks of Tieling Formation (Jxt) and Hongshuizhuang Formation (Jxh), and makes the grading evaluation as well as spatial distribution characteristics of source rocks with different abundance grades in terms of TOC through variable coefficient  $\Delta\log R$  on the basis of organic geochemical study and logging response characteristics of source rocks. The results show that the organic matter abundance of Jxh is generally above 2%, significantly higher than that of Jxt, both dominated by the organic matter type II with a little I-type kerogen. The source rocks are in the over-mature stage of gas-generation peak period, probably serving as the main Jixianian source rock layer.

**Key words:** source rock; variable coefficient  $\Delta\log R$ ; Tieling Formation; Hongshuizhuang Formation; Jixianian; Liaoxi Depression

收稿日期:2021-10-29;修回日期:2021-12-29. 编辑:黄欣.

基金项目:国家自然科学基金“松辽盆地及邻区早白垩世陆相地层高精度年代格架”(41790451);中国地质调查局项目“东北地区重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221664).

作者简介:石蕾(1987—),女,硕士,工程师,从事油气地质与砂岩型铀矿方面的研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//shih1101@163.com

通信作者:宗文明(1983—),男,硕士,高级工程师,从事油气基础地质调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//252973823@qq.com

### 0 引言

全球范围内已有十多个国家和地区发现中新元古界原生油气与油气藏,20 世纪 70 年代中国学者在燕山地区的石油地质勘查中,在元古宙地层发现了数十处液体油苗与固体沥青<sup>[1-4]</sup>。近年来,中国地质调查局沈阳地质调查中心在燕辽裂陷带辽西拗陷先后钻遇不同级别的油气显示,表明该地区中一新元古界具有一定的油气资源潜力<sup>[5-6]</sup>。目前该区的油气勘探程度较低,尚无工业油井,有必要进一步对油气资源潜力进行评价。烃源岩作为油气生成的物质基础,对其精细评价是客观评价油气资源潜力的重要前提<sup>[7]</sup>。前人针对燕辽裂陷带中元古界蓟县系泥页岩的地球化学特征、沉积环境等做了详细的研究,然而该区烃源岩的有机非均质性强、实测样品数量有限,致使泥页岩有机质丰度(TOC)在平面和纵向上存在差异,而不同有机质含量烃源岩的生、排烃能力存在差别<sup>[8-9]</sup>,导致预测的资源量存在较大的不确定性,因此对烃源岩开展精细评价显得尤为重要。

在烃源岩评价中,由于资料容易获取,可操作性

强,  $\Delta\log R$  技术应用得最为广泛<sup>[10-16]</sup>。以辽凌地 2 井(LLD2)中元古界蓟县系铁岭组与洪水庄组泥页岩为研究对象,对其有机质丰度、类型来源、成熟度等地球化学特征进行分析和探讨,以岩心测试地球化学数据和常规测井曲线为基础,针对烃源岩非均质性强的特点,采用变系数  $\Delta\log R$  技术分组、分相预测方法,建立泥页岩非均质性刻画评价模型,对蓟县系铁岭组与洪水庄组烃源岩品质进行分级评价,以期为辽西拗陷进一步勘探开发提供依据。

### 1 地质概况

燕辽裂陷带位于华北克拉通北缘的燕山地区,该地区中一新元古界发育相对连续、保存完好,我国标准地层剖面——“蓟县剖面”建立于此。辽西拗陷构造上位于燕辽裂陷带的东北部,是辽西、冀北、宣龙、冀东、京西 5 个拗陷和山海关、密怀 2 个隆起组成的“五拗两隆”构造格局中的一个单元(图 1)。辽西拗陷基底由太古宇到古元古界的混合花岗岩、片麻岩等古老的深变质岩系组成。中一新元古界岩性主要为石英岩、黑色

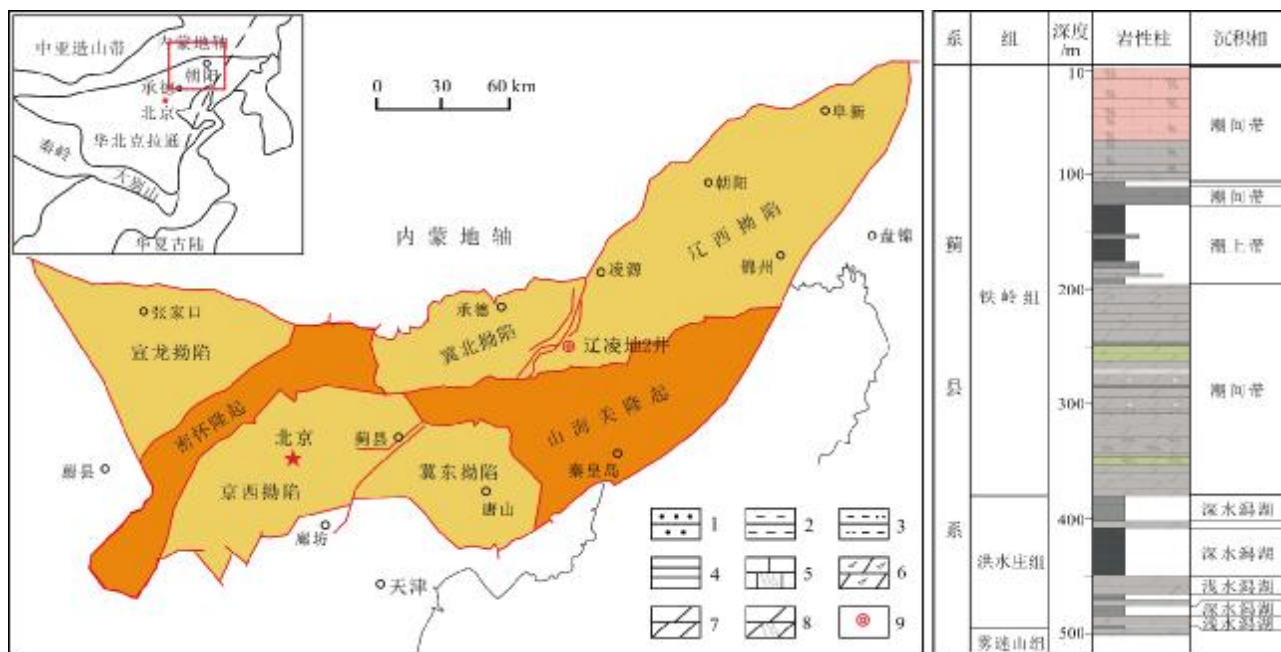


图 1 燕山地区构造分区及辽凌地 2 井柱状图  
(据文献[17])

Fig. 1 Tectonic division of Yanshan area with lithological column of LLD2 well

(From Reference [17])

1—砂岩(sandstone); 2—泥岩(mudstone); 3—粉砂质泥岩(silty mudstone); 4—页岩(shale); 5—粉晶灰岩(crystal powder limestone); 6—砾屑白云岩(dolorudite); 7—泥质白云岩(argillaceous dolomite); 8—粉晶白云岩(crystal powder dolomite); 9—井位(well location)

页岩、泥岩、白云岩、灰岩与陆源碎屑岩等,为碳酸盐岩台地的沉积环境,由下到上依次发育长城系与蓟县系的高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组、铁岭组,以及待建系与青白口系.该区空间上可形成自生自储、上生下储、下生上储等多种成藏模式.洪水庄组、铁岭组发育大段的泥页岩,为主要的烃源岩层<sup>[18-20]</sup>.辽凌地2井位于辽西拗陷老虎洞地区,为全井取心的地质调查井,分别钻遇第四系(Q)、铁岭组(Jxt, 7.5~380 m)、洪水庄组(Jxh, 380~496 m)、雾迷山组(Jxw, 496~937 m)、杨庄组(Jxy, 937~948 m),未见底.

## 2 辽凌地2井烃源岩特征

铁岭组主要为暗色泥岩、白云岩及粉晶灰岩.暗色泥岩的沉积环境为碳酸盐岩台地潮上带,颜色以黑色和深灰色为主,厚度为71 m.洪水庄组主要为暗色泥岩、白云岩.暗色泥岩的沉积环境为深水潟湖相,颜色以黑色和灰色为主,厚度为78.6 m.本研究选取不同深度泥页岩样品铁岭组7件,洪水庄组28件,分别进行分析探讨.

### 2.1 有机质丰度

实验分析结果表明,铁岭组暗色泥岩实测 TOC 值 0.30%~1.57%, 平均值为 0.97%; 可溶烃  $S_1$  含量在  $0.02 \times 10^{-3}$ ~ $0.15 \times 10^{-3}$  之间, 平均值为  $0.08 \times 10^{-3}$ ; 生烃势 ( $S_1+S_2$ ) 值  $0.06 \times 10^{-3}$ ~ $0.47 \times 10^{-3}$ , 平均值为  $0.31 \times 10^{-3}$ ; 氯仿沥青“A”值 0.004%~0.08%, 平均值为 0.02%. 由于实测样品成熟度较高, 基本都在过成熟阶段, 因此对 ( $S_1+S_2$ ) 值进行了恢复, 以便于对烃源岩品质的评价更加客观<sup>[16]</sup>, 恢复后的 ( $S_1+S_2$ ) 分布在  $2.41 \times 10^{-3}$ ~ $6.41 \times 10^{-3}$  之间, 平均值为  $3.73 \times 10^{-3}$ . 洪水庄组暗色泥岩实测 TOC 值 0.35%~5.20%, 平均值为 3.20%; ( $S_1+S_2$ ) 值  $0.03 \times 10^{-3}$ ~ $1.08 \times 10^{-3}$ , 平均值为  $0.52 \times 10^{-3}$ , 同理, 恢复后的 ( $S_1+S_2$ ) 值  $1.63 \times 10^{-3}$ ~ $30.51 \times 10^{-3}$ , 平均值为  $16.16 \times 10^{-3}$ .

本研究按照中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价方法<sup>[21]</sup>, 将烃源岩划分为中等、较好及优质(极好)烃源岩3种级别(表1).

通过热解参数交会图(图2)发现, 铁岭组整体处于中等烃源岩范畴, 洪水庄组不同级别烃源岩均有分布, 但大部分为较好及优质烃源岩, 整体生烃潜力好于铁岭组.

表1 烃源岩分级标准

级别	TOC/%	( $S_1+S_2$ )/ $10^{-3}$
优质烃源岩	>4	>20
较好烃源岩	1.5~4	6~20
中等烃源岩	<1.5	<6

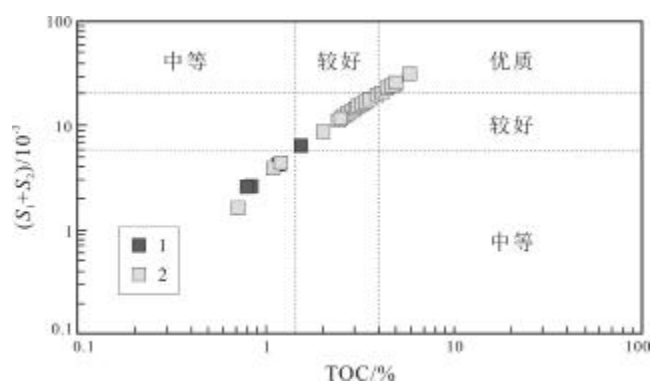


图2 铁岭组、洪水庄组烃源岩热解参数交会图

Fig. 2 Pyrolytic parameter cross plot for source rocks of Tieling and Hongshuizhuang formations  
1—铁岭组(Jxt); 2—洪水庄组(Jxh)

### 2.2 有机质类型

不同的生物来源指示着不同的有机质类型, 也决定着产物的类型是油还是气. 从生物标志化合物来看, 指示铁岭组有机质来源以腐泥型为主, 并含少量腐殖型, 即有机质类型为 I 型及 II<sub>1</sub> 型(图3); 洪水庄组有机质来源为腐泥—腐殖型(II<sub>1</sub> 型). 根据  $\alpha\alpha(R)$  构型甾烷的  $C_{27}$ - $C_{28}$ - $C_{29}$  相对含量判别有机质来源<sup>[22-23]</sup>, 可以看出铁岭组与洪水庄组烃源岩有机质类型都以 II 型为主, 且为开阔海环境的低等生物输入(图4). 整体看来, 辽凌地2井铁岭组与洪水庄组有机质类型以 II 型为主, 并含少量 I 型干酪根.

### 2.3 有机质成熟度

铁岭组暗色泥岩样品镜质组反射率 ( $R_o$ ) 值为 2.08%~2.18%, 洪水庄组暗色泥岩样品  $R_o$  值为 2.08%~2.26%, 铁岭组与洪水庄组烃源岩都处于生气高峰期的过成熟阶段(图5).

## 3 泥页岩非均质性刻画与分级评价

不同区域和层位泥页岩 TOC 差异可以在一定程度上反映油气富集程度的差异, 由于有机质的发育特

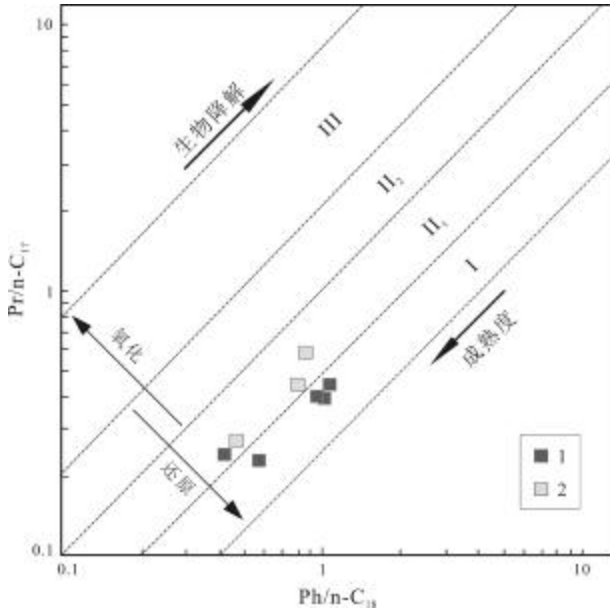


图3 铁岭组、洪水庄组烃源岩  $Ph/nC_{18}$  与  $Pr/nC_{17}$  相关图  
 Fig. 3 The  $Ph/nC_{18}$ - $Pr/nC_{17}$  cross plot for source rocks of Tieling and Hongshuizhuang formations  
 1—铁岭组(Jxt); 2—洪水庄组(Jxh)

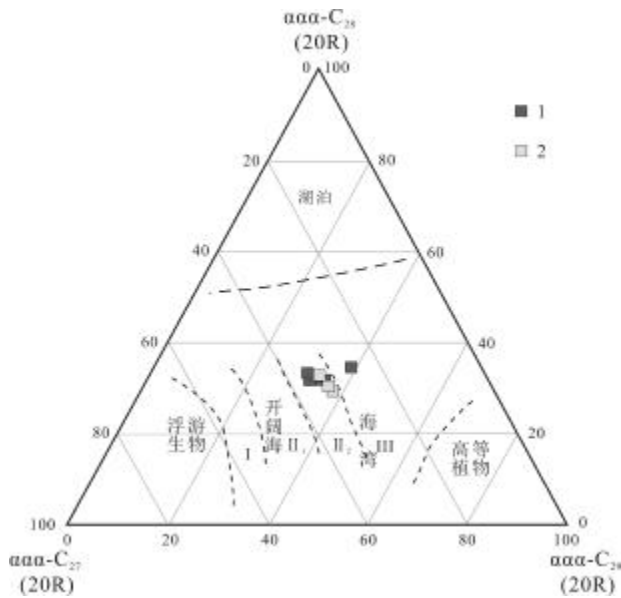


图4 铁岭组、洪水庄组烃源岩  $C_{27}$ - $C_{28}$ - $C_{29}\alpha\alpha(R)$  构型甾烷相对质量分数三角图  
 Fig. 4 Relative percentage triangle diagram of  $C_{27}$ - $C_{28}$ - $C_{29}\alpha\alpha(R)$  sterane distribution for source rocks of Tieling and Hongshuizhuang formations  
 1—铁岭组(Jxt); 2—洪水庄组(Jxh)

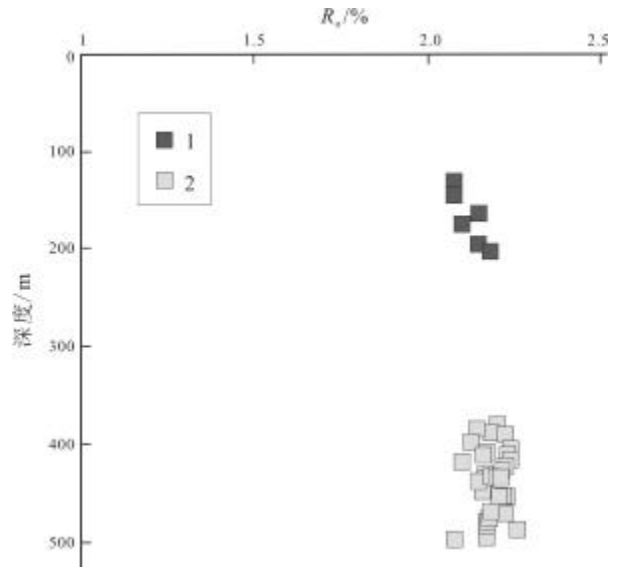


图5 铁岭组、洪水庄组烃源岩成熟度-深度关系图  
 Fig. 5 The  $R_o$  vs. depth diagram for source rocks of Tieling and Hongshuizhuang formations  
 1—铁岭组(Jxt); 2—洪水庄组(Jxh)

征对众多测井响应都有影响<sup>[24]</sup>,利用测井资料的纵向连续性和高分辨率来评价这种差异性(非均质性)变得可行.本研究采用变系数  $\Delta\log R$  技术<sup>[25-26]</sup>,利用地球化学参数 TOC 对铁岭组与洪水庄组烃源岩进行有机非均质性刻画,建立地球化学数学模型,并用计算结果对源岩进行分级评价.

变系数  $\Delta\log R$  模型的计算公式为:

$$\Delta\log R = K \times (\log R - \text{Baseline}) + (1 - K) \times (\Delta t - \text{Baseline}) \quad (1)$$

$$\text{TOC} = a \times \Delta\log R + b \quad (2)$$

式中,  $R$  为深侧向电阻率曲线 ( $\Omega m$ ),  $K$  为电阻率部分在  $\Delta\log R$  中所占比例,  $\Delta t$  为声波时差曲线 ( $\mu s/m$ ), Baseline 为相对基线值,  $a$  和  $b$  为公式拟合系数.

### 3.1 TOC 预测模型的建立

为减少误差,对电阻率测井曲线与声波时差测井曲线进行标准化处理,使两者数量级相当.标准化后的曲线结合实测 TOC 数据,针对铁岭组、洪水庄组建立有机非均质性测井响应模型.铁岭组曲线拟合效果较好,从所建模型计算值与实测值关系图(图6)中可以看出,趋势线斜率接近于1,表明计算值与实测值较为接近;从幅度差与实测值关系图(图7)中可以看出,实测值与幅度差拟合关系较好,具有明显的线性关系,

收敛于一条直线附近,表明模型可信度较高.洪水庄组在标定过程中为避免个别异常数据影响整体标定结果,剔除了极少数明显偏离整体趋势的异常点.从模型效果看,实测值与计算值及幅度差的拟合关系均较好,相关系数  $R^2$  大于 0.85,线性关系较明显,模型可信度较高(图 8、9).

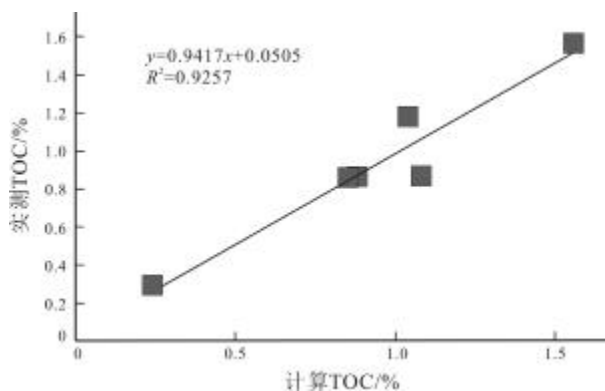


图 6 铁岭组计算 TOC 与实测 TOC 相关关系图

Fig. 6 Correlation between calculated and measured TOCs of Tieling Formation

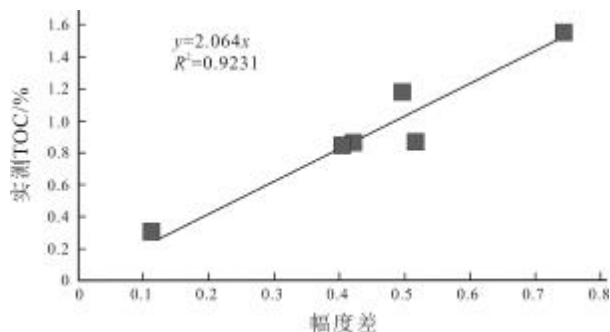


图 7 铁岭组幅度差与实测 TOC 相关关系图

Fig. 7 Correlation between amplitude difference and measured TOC of Tieling Formation

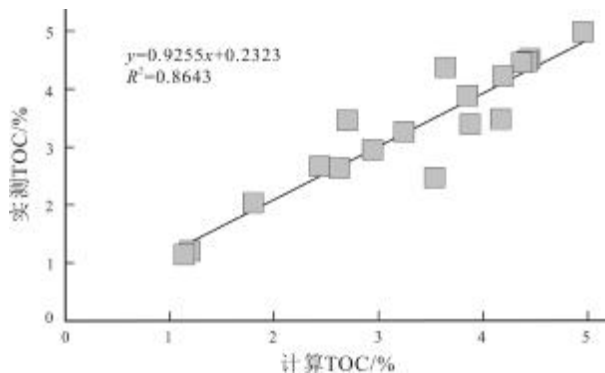


图 8 洪水庄组计算 TOC 与实测 TOC 相关关系图

Fig. 8 Correlation between calculated and measured TOCs of Hongshuizhuang Formation

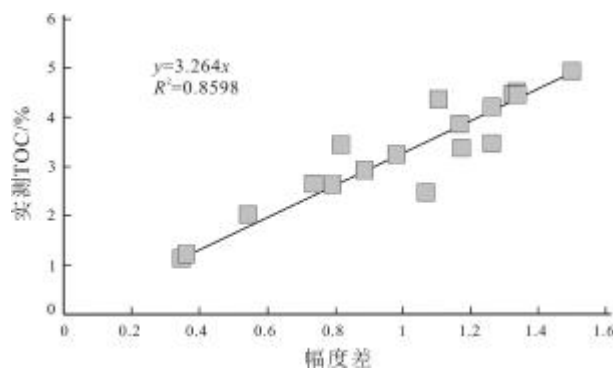


图 9 洪水庄组幅度差与实测 TOC 相关关系图

Fig. 9 Correlation between amplitude difference and measured TOC of Hongshuizhuang Formation

### 3.2 泥页岩非均质性刻画

通过所建立的预测模型,对辽凌地 2 井中元古界蓟县系铁岭组、洪水庄组泥页岩 TOC 进行了刻画描述.铁岭组泥页岩 TOC 值波动幅度较小,计算值大多在 0.8%~1.2%之间浮动,最大值为 2.91%,计算值与实测值吻合较好,测井计算 TOC 曲线较准确地反映了实测 TOC 的垂向变化(图 10).洪水庄组泥页岩 TOC 值从上到下整体呈现“增大—减小—增大—减小”的波动趋势,计算值一般在 2%~6%之间,最大值为 10.2%,计算值与实测值整体吻合较好,测井计算 TOC 曲线较准确地反映了实测 TOC 的垂向变化.

### 3.3 烃源岩分级评价

结合 TOC 非均质性刻画结果,对辽凌地 2 井中元古界蓟县系铁岭组与洪水庄组泥页岩进行分级评价.

铁岭组泥页岩累计厚度为 70.2 m(表 2),优质烃源岩累计厚度为 0 m;较好烃源岩累计厚度为 6.45 m,占总厚度比值为 9.19%,最大连续厚度为 2.8 m;中等烃源岩累计厚度为 63.75 m,占总厚比值为 90.81%,最大连续厚度为 33 m.洪水庄组泥页岩累计厚度为 78.6 m,优质烃源岩累计厚度为 32.1 m,占总厚比值为 40.84%,最大连续厚度为 22 m;较好烃源岩累计厚度为 33.7 m,占总厚度比值为 42.88%,最大连续厚度为 9 m;中等烃源岩累计厚度为 12.8 m,占总厚比值为 16.28%,最大连续厚度为 2.8 m.

整体看来,辽凌地 2 井蓟县系洪水庄组泥页岩烃源岩品质优于铁岭组,应为蓟县系主力烃源岩.其中铁岭组泥页岩整体以中等烃源岩为主,190 m 处发育少量较好烃源岩,未见优质品质烃源岩;洪水庄组以优

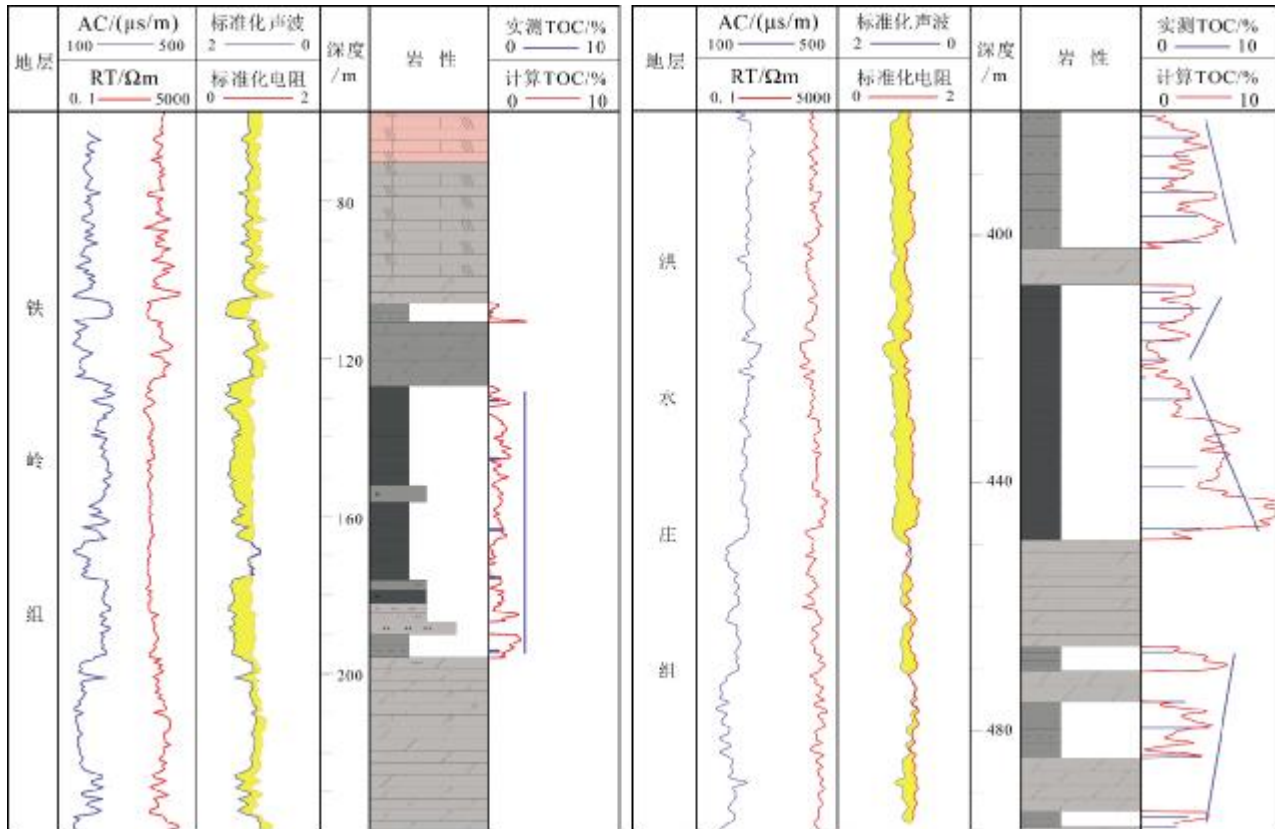


图 10 铁岭组、洪水庄组泥页岩测井识别 TOC 模型结果

Fig. 10 TOC results of logging identification of shale from Tieling and Hongshuizhuang formations

表 2 辽凌地 2 井铁岭组与洪水庄组泥页岩分级评价数据表  
Table 2 Grading evaluation data for shales of Tieling and Hongshuizhuang formations in LLD2 well

烃源岩级别	层位	泥页岩厚度/m	TOC/%	最大连续厚度/m	泥页岩累计厚度/m	占比/%
优质源岩	Jxt	70.2	>4.0	0	0	0
	Jxh	78.6		22	32.1	40.84
较好源岩	Jxt	70.2	1.5~4.0	4.5	6.45	9.19
	Jxh	78.6		9	33.7	42.88
中等源岩	Jxt	70.2	0.5~1.5	33	63.75	90.81
	Jxh	78.6		2.8	12.8	16.28

质烃源岩及较好烃源岩为主,两者数量大致相当,总体占 83%以上, 优质烃源岩主要分布在洪水庄组中下部,较好烃源岩分布以中上部为主,少量的中等烃源岩分布在大段黑色泥岩建造的中上部(图 11)。

#### 4 结论及认识

1)辽凌地 2 井蓟县系洪水庄组烃源岩有机质丰度

(TOC)大多在 2%以上,明显高于铁岭组,铁岭组与洪水庄组有机质类型都以 II 型为主, 并含少量 I 型干酪根,烃源岩都处于生气高峰期的过成熟阶段。

2)采用变系数  $\Delta \log R$  技术建立了辽凌地 2 井铁岭组与洪水庄组泥页岩 TOC 预测模型,对泥页岩非均质性进行了刻画描述,实现了烃源岩 TOC 准确评价。

3)依据 TOC 分级标准,采用测井计算 TOC 指导烃源岩分级, 得到辽凌地 2 井铁岭组烃源岩品质以中等为主,占泥页岩总厚 90%以上;洪水庄组烃源岩整体以优质烃源岩和较好烃源岩为主, 两者厚度大致相当,厚度占泥页岩总厚 83%以上. 整体看来,洪水庄组烃源岩品质优于铁岭组,应为蓟县系主力烃源岩层。

#### 参考文献(reference):

[1]Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. Global Neoproterozoic petroleum systems: The emerging potential in North Africa[M]. London: Geological Society Special Publications, 2009.  
[2]王铁冠, 韩克猷. 论中—新元古界的原生气资源[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 1-7.

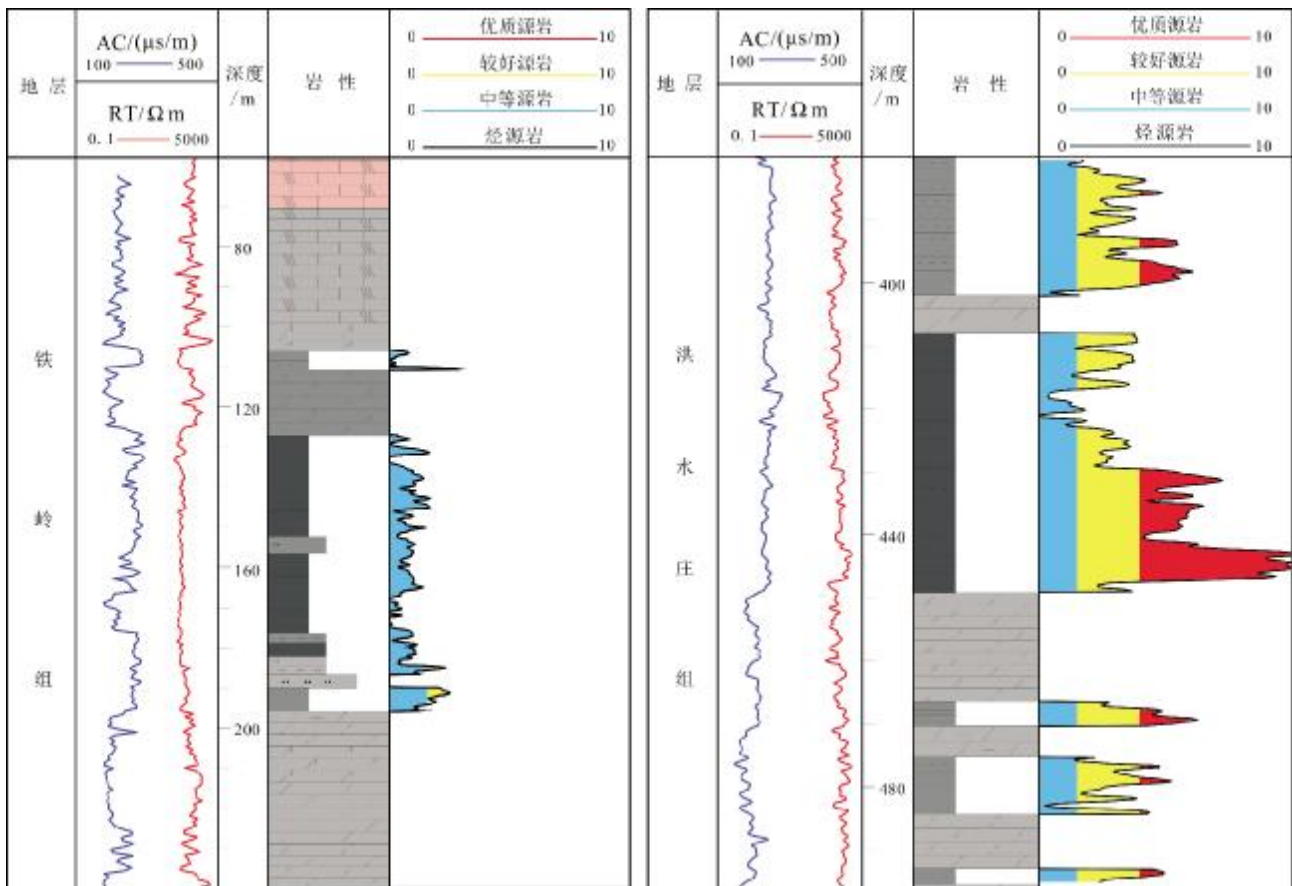


图 11 辽凌地 2 井铁岭组、洪水庄组烃源岩分级评价结果

Fig. 11 Grading evaluation results for source rocks of Tieling and Hongshuizhuang formations in LLD2 well

Wang T G, Han K Y. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources[J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(1): 1-7.

[3]王铁冠. 一种新发现的三环萜烷生物标志物系列[J]. 江汉石油学院学报, 1989, 11(3): 117-118.

Wang T G. A new series of tricyclic terpane biomarkers[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1989, 11(3): 117-118. (in Chinese)

[4]王泽九, 苗培实, 马秀兰. 2001 第七次李四光地质科学奖获得者主要科学技术成就与贡献[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 151-161.

Wang Z J, Miao P S, Ma X L. Achievements and contributions of the 7th Li Siguang Prize for geoscience in 2001[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 151-161. (in Chinese)

[5]陈树旺, 许光, 杨建国, 等. 松辽盆地及外围油气资源基础地质调查——“十三五”阶段进展与未来工作展望[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 221-231, 248.

Chen S W, Xu G, Yang J G, et al. Foundational geological survey for oil and gas resources in Songliao Basin and its periphery areas: Progress and prospect[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 221-231, 248.

[6]宗文明, 孙求实, 李晓海, 等. 辽宁凌源牛营子盆地辽凌地 1 井北票组生烃潜力分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 350-356.

Zong W M, Sun Q S, Li X H, et al. Hydrocarbon generation potential of Beipiao Formation from LLD1 well in Niuyingzi basin, western Liaoning[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 350-356.

[7]Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

[8]张林峰, 孔祥星, 张春荣, 等. 济阳拗陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 35-42.

Zhang L Y, Kong X X, Zhang C R, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang depression[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.

[9]Jarvie D. Evaluation of hydrocarbon generation and storage in the Barnett shale, Ft. Worth Basin, Texas[R]. Texas: Humble Geochemical Services Division, 2004.

[10]Passey Q R, Creaney S, Kulla J B. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.

[11]卢双舫, 马延伶, 曹瑞成, 等. 优质烃源岩评价标准及其应用: 以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(3): 535-544.

Lu S F, Ma Y L, Cao R C, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications: Taking the Wuertun Sag in Hailaer

- Basin as an example[J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3): 535–544.
- [12]陈海峰, 王凤启, 王民, 等. 基于变系数  $\Delta\log R$  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  $\Delta\log R$  model[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2017, 41(4): 54–64.
- [13]杨少春, 王娜, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地崇信地区三叠系延长组烃源岩测井评价[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 470–476.  
Yang S C, Wang N, Li M R, et al. The logging evaluation of source rocks of Triassic Yanchang Formation in Chongxin area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 470–476.
- [14]Kamali M R, Mirshady A A. Total organic carbon content determined from well logs using  $\Delta\log R$  and Neuro Fuzzy techniques[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 45(3/4): 141–148.
- [15]Singh P, Husain R, Rabie A, et al. Understanding geophysical responses for identification of sweet spot for Oxfordian shale oil/gas plays in Kuwait[C]//2013 SEG Annual Meeting. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [16]Sharma R K, Chopra S, Ray A K. Seismic characterization of Montney shale formation using Passey's approach [C]//2014 SEG Annual Meeting. Colorado: Society of Exploration Geophysicists, 2014.
- [17]孙守亮, 李永飞, 张涛, 等. 燕辽裂陷带辽西拗陷中元古界高于庄组生物标志化合物特征及意义[J]. *地质与资源*, 2021, 30(3): 341–349.  
Sun S L, Li Y F, Zhang T, et al. Biomarker characteristics and implication of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Liaoxi Depression of Yanliao rift zone[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 341–349.
- [18]孙枢, 王铁冠. 中国东部中—新元古界地质学与油气资源[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 449–467.  
Sun S, Wang T G. Meso-Neoproterozoic geology and petroleum resources in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2015: 449–467. (in Chinese)
- [19]王晓梅, 张水昌, 王华建, 等. 烃源岩非均质性及其意义——以中国元古界下马岭组页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 32–39.  
Wang X M, Zhang S C, Wang H J, et al. Significance of source rock heterogeneities: A case study of Mesoproterozoic Xiamaling Formation shale in North China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 32–39.
- [20]宗文明, 鄧晓勇, 孙求实, 等. 华北北部凌源—宁城盆地蓟县系洪水庄组生烃潜力分析——以小庄户剖面为例[J]. *地质与资源*, 2017, 26(4): 370–376.  
Zong W M, Gao X Y, Sun Q S, et al. Evaluation of the hydrocarbon generating potential of the Jixianian Hongshuizhuang Formation in Lingyuan-Ningcheng Basin, Northern China: A case study of Xiaozhuanghu geological profile[J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(4): 370–376.
- [21]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 J P, Liang D G, Zhang S C, 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.
- [22]卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 177–212.  
Lu S F, Zhang M. *Petroleum geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 177–212. (in Chinese)
- [23]Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 739–745.
- [24]石强, 李剑, 李国平, 等. 利用测井资料评价生油岩指标的探讨[J]. *天然气工业*, 2004, 24(9): 30–32.  
Shi Q, Li J, Li G P, et al. Evaluating source rock indexes by log data[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 30–32.
- [25]刘超, 印长海, 卢双舫. 变系数  $\Delta\log R$  烃源岩测井评价技术关键参数厘定方法及应用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1925–1931.  
Liu C, Yin C H, Lu S F. Predicting key parameters for variable-coefficient  $\Delta\log R$  logging technique and its application in source rocks evaluation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1925–1931.
- [26]刘超, 卢双舫, 薛海涛. 变系数  $\Delta\log R$  方法及其在泥页岩有机质评价中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(1): 312–317.  
Liu C, Lu S F, Xue H T. Variable-coefficient  $\Delta\log R$  model and its application in shale organic evaluation[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(1): 312–317.