

多芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的方法

——以银额盆地中生界烃源岩为例

陈治军^{1,2}, 张亚雄³, 王永昌⁴, 王希⁴, 葛宏选², 高志亮², 李子梁²

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100;

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院, 西安 710075;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石油集团 渤海钻探工程有限公司 定向井分公司, 天津 300280

摘要:芳烃成熟度参数被广泛应用于评价烃源岩或原油成熟度,但实际上生源特征、沉积环境等因素对一些参数的影响可能大于成熟度的控制,导致一些参数在某些研究区的应用效果并不理想,且前人基于单一参数建立的计算视镜质体反射率(R_c)的关系式也并不适用于所有研究区,因此,探索出了一种芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的方法。该方法基于研究区一定数量的烃源岩芳烃组分的色谱—质谱(GC-MS)分析数据,通过开展各芳烃成熟度参数与 R_c 的相关性分析,分别在烷基萘系列、烷基菲系列和烷基二苯并噻吩系列3大类芳烃成熟度参数中找出1个对成熟度最敏感(相关系数最大)的参数,利用数值分析软件对这几个参数和 R_c 进行多元线性回归,拟合出一个利用多参数定量计算 R_c 的关系式。该方法在银额盆地哈日凹陷中生界湖相混合型(有机质类型以II₁—II₂型为主)烃源岩研究中取得了很好的应用效果。用该方法拟合出的关系式计算的 R_c 与 R_c 的相关系数 R^2 高达0.96,相对于单一芳烃参数,相关系数有了大幅度的提高,表明该方法具有可靠性。

关键词:芳烃成熟度参数;多元回归法;定量评价;烃源岩成熟度;银额盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Quantitative assessment of source rock maturity with multiple aromatic parameters:

a case study of Mesozoic source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin

CHEN Zhijun^{1,2}, ZHANG Yaxiong³, WANG Yongchang⁴, WANG Xi⁴,

GE Hongxuan², GAO Zhiliang², LI Ziliang²

1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

4. Directional Drilling Company, Bohai Drilling Company, CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract: Aromatic parameters have been widely applied to assess the maturity of organic matters. Some parameters may not only be affected by maturation, but also more affected by organic matter source, sedimentary environment, etc. Therefore, the application effect of some parameters in some study areas were not satisfying, and the previous relational expression to calculate the vitrinite reflectance (R_c) which only based on a single parameter is also not suitable for other areas. In this study, we proposed a method to improve the accuracy of using multiple aromatic parameters to quantitatively evaluate source rock maturity. This method was based on a certain number of GC-MS analysis data of aromatic fractions of source rocks in the study area, to find out a most sensitive parameter to maturity in three categories of aromatics (alkyl naphthalene series, alkyl phenanthrene series and alkyl dibenzothiophene series) respectively. Here the most sensitive parameter meant having the largest correlation

收稿日期:2021-08-09;修订日期:2021-12-03。

作者简介:陈治军(1980—),男,博士研究生,高级工程师,从事油气地球化学研究。E-mail:chenzhijun2203@aliyun.com。

通信作者:张亚雄(1983—),男,博士,高级工程师,从事石油地质学、沉积学研究工作。E-mail:157498674@qq.com。

基金项目:国土资源部重点项目“十三五全国油气资源评价”(2017YQZYPJ01)和延长集团科技攻关项目“银额盆地哈日凹陷主力烃源岩生烃特征与资源潜力分析”(ycsy2020jcyjB-03)联合资助。

coefficient to R_o in certain category. Then a multiple linear regression equation was established among these three parameters and R_o using a numerical analysis software, and with this equation R_c can then be calculated with multiple parameters. This method is applied to the study of Mesozoic lacustrine source rocks in the Hari Sag of Yingen-Ejinaqi Basin, the organic matter types of these source rock are mainly type II₁ - II₂. The results indicated that the correlation coefficient (R_c) between R_o and R_c which was calculated by established formula was as high as 0.96, and compared with the single aromatics parameter, the correlation coefficient has been considerably improved.

Key words: maturity parameters of polycyclic aromatic; multiple regression method; quantitative evaluation; maturity of source rock; Yingen-Ejinaqi Basin

在烃源岩成烃有效性评价、原油性质分析等方面,成熟度研究是一个重要的环节。传统的成熟度评价方法有镜质体反射率法(R_o)和岩石热解最高峰温法(T_{max})等^[1-3]。然而传统的成熟度评价方法在实际应用中存在着局限性,比如以烃源岩为基础建立的上述方法无法应用于原油成熟度研究,再比如由于海相烃源岩普遍缺乏镜质组而不能采用 R_o 法评价成熟度。

在有机质热演化过程中,生物标志化合物中热稳定性差的化合物会向热稳定性好的化合物转化,使得生物标志化合物成为成熟度评价的有效指标,在烃源岩或原油成熟度研究方面有广泛的应用^[1]。相对于常用于成熟度研究的饱和烃化合物,芳烃化合物具有含量较高、热稳定性较好等特点,在成熟度研究方面更具优越性^[3-8]。芳烃成熟度参数建立的理论依据为:在有机质热演化过程中,芳烃化合物的甲基化、脱甲基化、甲基重排等作用均受控于热稳定性,伴随热演化程度的增加,热稳定性好的化合物的相对含量逐渐增加,而热稳定性差的化合物的相对含量会逐渐减少,相关化合物的含量比值对成熟度有很好的指示作用^[1,3]。基于上述原理,前人建立了多种芳烃成熟度参数,这些参数被广泛应用于不同地区、不同类型烃源岩成熟度的研究中,但应用效果不一^[9-13]。基于芳烃参数和成熟度的相关性分析,前人建立了一些利用芳烃参数计算视镜质体反射率(R_c)的关系式^[7-10,13-14]。但这些定量评价公式都是基于单一的芳烃参数,且在其他区域运用效果较差,甚至出现计算出的视镜质体反射率与实际地质情况相矛盾的现象。如利用甲基菲指数 MPII 计算 R_o 的定量评价关系式最早由 RADKE 等^[7]建立,计算公式得到了广泛应用,但王辉^[6]在利用该公式计算某一地区湖相烃源岩成熟度时,某一样品的实测镜质体反射率(R_o)为 1.47%,而计算出的 R_c 为 2.30% 或 0.40%,数值相差甚远。而实际上,一些芳烃成

熟度参数可能并非仅受成熟度控制,生源、沉积环境等因素对其也有很大的影响,烃源岩的区域差异性和芳烃参数影响因素的复杂性是芳烃成熟度参数及其定量评价关系式在很多区域应用效果不佳的主要原因。越来越多的学者发现,在运用芳烃参数定量评价烃源岩成熟度时,需要建立适合于研究区的定量评价关系式^[1,5]。

在相关地区利用芳烃参数对烃源岩成熟度开展定量评价时,发现利用单一芳烃成熟度参数建立的计算 R_c 的公式开展成熟度定量评价时往往具有较大的误差。笔者探索出了一种全新的利用芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的方法,即利用多元回归法建立适合研究区的多芳烃参数定量评价成熟度的模型,该方法在一定程度上提高了芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的准确度。

1 芳烃成熟度参数的理论基础

芳烃类化合物在石油和沉积有机质中占较大的比例,可在实验室用色谱-质谱(GC-MS)法检测出来。由于各个实验室所有的仪器和测试方法不同,可检测出的芳烃化合物的数量也不尽相同,但通常可鉴定出的芳烃化合物多达 160~180 余种。这些化合物根据结构特征又可划分为十余个系列,最常见的有萘系列、菲系列、蒽系列、三芴系列等。基于对这些化合物热演化特征的研究,前人已建立的芳烃成熟度参数多达 30 余个,这其中最常用、研究程度较高的有烷基萘类、烷基菲类和烷基二苯并噻吩类 3 大类(表 1)。

1.1 萘系列参数

基于一些烷基取代的萘化合物与天然产物结构的类似性,前人认为萘系列化合物衍生于高等植物及细菌的倍半萜至三萜类化合物^[15]。萘系列化合物对有机质成熟度指示作用的理论依据为:随着有机质热演化程度的增加,多甲基萘系列中热稳定性强的异构体含量升高,热稳定性差的异构体含量降低,可用多甲基萘系列化合物的分布特征来研究

表 1 芳烃成熟度参数
Table 1 Maturity parameters of aromatic hydrocarbons

参数类别	参数代号	表达式	资料来源
烷基萘类	MNR	$2\text{-MN}/1\text{-MN}$	文献[1]
	DNR-1	$(2,6\text{-DMN}+2,7\text{-DMN})/1,5\text{-DMN}$	文献[1]
	DNR-2	$2,7\text{-DMN}/1,8\text{-DMN}$	文献[1]
	DNR-3	$2,6\text{-DMN}/1,8\text{-DMN}$	文献[1]
	DNR-4	$1,7\text{-DMN}/1,8\text{-DMN}$	文献[1]
	DNR-5	$1,6\text{-DMN}/1,8\text{-DMN}$	文献[1]
	TMNr	$2,3,6\text{-TMN}/(1,4,6\text{-TMN}+1,2,5\text{-TMN})$	文献[1]
	TMNr1	$2,3,6\text{-TMN}/(1,4,6\text{-TMN}+1,3,5\text{-TMN})$	文献[1]
	TMNr2	$(2,3,6\text{-TMN}+1,3,7\text{-TMN})/(1,4,6\text{-TMN}+1,3,5\text{-TMN}+1,3,6\text{-TMN})$	文献[1]
	TMNr3	$1,3,7\text{-TMN}/(1,3,7\text{-TMN}+1,2,5\text{-TMN})$	文献[1]
	TeMNR	$1,3,6,7\text{-TeMN}/(1,3,6,7\text{-TeMN}+1,2,5,7\text{-TeMN})$	文献[1]
PMNr	$1,2,4,6,7\text{-PMN}/(1,2,4,6,7\text{-PMN}+1,2,3,5,6\text{-PMN})$	文献[1]	
烷基菲类	MPI1	$1.5 \times (2\text{-MP}+3\text{-MP})/(P+1\text{-MP}+9\text{-MP})$	文献[7]
	MPI2	$3 \times (2\text{-MP})/(P+1\text{-MP}+9\text{-MP})$	文献[7]
	MPI3	$(2\text{-MP}+3\text{-MP})/(1\text{-MP}+9\text{-MP})$	文献[5]
	MPR	$(2\text{-MP})/(1\text{-MP})$	文献[1]
	F_1	$(3\text{-MP}+2\text{-MP})/(1\text{-MP}+2\text{-MP}+3\text{-MP}+9\text{-MP})$	文献[9]
	F_2	$2\text{-MP}/(1\text{-MP}+2\text{-MP}+3\text{-MP}+9\text{-MP})$	文献[9]
	DPR	$(2,6\text{-MP}+2,7\text{-MP})/(1,6\text{-MP}+2,10\text{-MP})$	文献[2]
	DPR2	$2,7\text{-MP}/1,8\text{-MP}$	文献[5]
烷基二苯并噻吩类	MDR	$4\text{-MDBT}/1\text{-MDBT}$	文献[12-13]
	MDBI	$4\text{-MDBT}/(\text{DBT}+1\text{-MDBT}+2\text{-MDBT}+3\text{-MDBT}+4\text{-MDBT})$	文献[14]
	DMDBT1	$4,6\text{-DMDBT}/1,4\text{-DMDBT}$	文献[10,12]
	DMDBT2	$2,4\text{-DMDBT}/1,4\text{-DMDBT}$	文献[10,12]
	DMDBT3	$2,6\text{-DMDBT}/1,4\text{-DMDBT}$	文献[10,12]
	DMDBT4	$4,6\text{-DMDBT}/(1,4\text{-DMDBT}+1,6\text{-DMDBT})$	文献[11]
	DMDBT5	$(2,6\text{-DMDBT}+3,6\text{-DMDBT})/(1,4\text{-DMDBT}+1,6\text{-DMDBT})$	文献[11]

注:MN.甲基萘;DMN.二甲基萘;TMN.三甲基萘;TeMN.四甲基萘;PMN.五甲基萘;P.菲;MP.甲基菲;DBT.二苯并噻吩;MDBT.甲基二苯并噻吩;DMDBT.二甲基二苯并噻吩

有机质的热演化程度^[15-16]。萘由 2 个苯环组成, 2 个苯环共用 2 个碳原子, 由于 α 位电子云密度高于 β 位, α 位活性大于 β 位, 在甲基取代反应中一般容易得到 α 位取代物^[3,17-18](图 1)。故 α 位热稳定性比 β 位差, β 位取代萘一旦形成就比较稳定, β 位取代萘与 α 位取代萘异构体的比值可以表征烃源岩和原油的成熟度^[16]。基于上述原理, 前

人建立的烷基萘类成熟度参数有甲基萘参数 (MNR)、二甲基萘参数 (DNR-1—DNR-5)、三甲基萘参数 (TMNr、TMNr1—TMNr3) 等、四甲基萘参数 (TeMNR)、五甲基萘 (PMNr) 等^[3], 并确定了上述参数的表达式(表 1)。如 RADKE 等^[7]认为随着热演化程度的增加, α 取代型的 1,5-二甲基萘 (1,5-DMN) 经甲基迁移和甲基重排重组为 2,6-DMN、

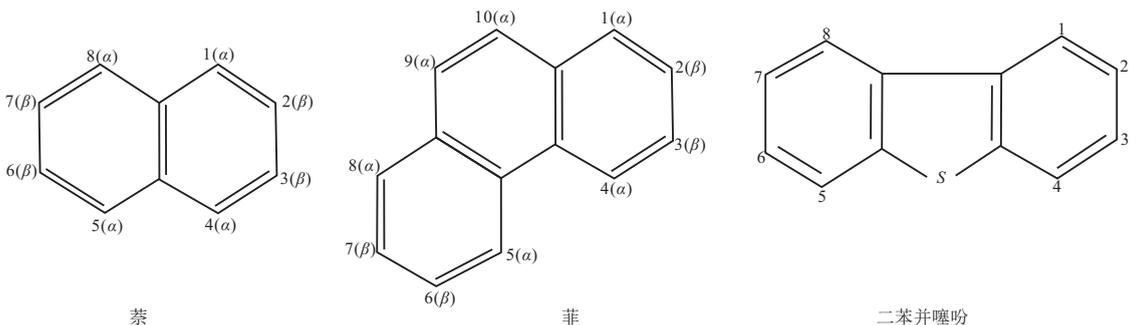


图 1 萘、菲和二苯并噻吩碳骨架型式
据文献[15,18]修改。

Fig.1 Carbon skeleton pattern of naphthalene, phenanthrene and dibenzothiophene compounds

2,7-DMN 等 $\beta\beta$ 取代型的异构体,参数 DNR-1 的表达式为 $[(2,6\text{-DMN}+2,7\text{-DMN})/1,5\text{-DMN}]$, 其与 R_o 有很好的相关性^[7]。

然而这些参数对于不同地区的应用效果不一,体现出烃源岩的区域差异性和参数影响因素的复杂性。如前人认为三甲基萘指数与成熟度具有持续的正相关关系,但刘亚洲等^[4]运用这些指数对鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 烃源岩成熟度进行评价时,发现了与实际情况有很多相矛盾之处,指出三甲基萘指数可能受生源、沉积环境等其他因素影响较大。因此,有学者指出烷系列化合物在甲基迁移、甲基重排等作用的过程中并不是只受热动力学作用控制,黏土等矿物的催化作用、母质来源、生物降解等也对烷基萘成熟度参数有很大的影响^[3,18-19]。因此,在运用萘系列参数评价烃源岩成熟度时,要特别注意其他因素对参数的影响。

1.2 烷基菲系列参数

菲系列化合物在各类沉积有机质及化石燃料中广泛分布,且丰度较高,并在中—高成熟阶段显示出最高的丰度,因此在烃源岩或原油成熟度评价方面具有一定的优势,也是应用于成熟度研究较早的芳烃化合物^[14,18]。菲系列化合物的碳骨架型式见图 1,由 3 个苯环相连而组成, β 位取代基较 α 位取代基稳定,随着有机质热演化程度的增加, α 位取代的异构体的相对含量逐渐降低, β 位取代的异构体的相对含量逐渐增加, β 位异构体与 α 位异构体的比值可以表征成熟度^[3,20-22]。基于这一理论基础,前人建立的烷基菲系列成熟度参数有甲基菲指数 MPI1—MPI3、甲基菲比值 MPR、甲基菲分布分数 F_1 和 F_2 、二甲基菲指数 DPR 和 DPR2 等^[1-2,5,9](表 1)。

这些参数被广泛应用于不同地区烃源岩或原油的成熟度研究中,但在应用中也存在部分参数并非主要受成熟度控制、对某些参数随成熟度的变化规律存较大的争议、一些参数的定量评价应用效果不佳等问题,这可能由烃源岩存在区域差异性、参数影响因素存在复杂性、化验分析存在误差性等原因所致。如前人^[4]利用 KVALHEIM 等^[9]建立的关系式计算出的某一地区的烃源岩样品的甲基菲分布分数 F_2 为 0.22~0.28,按照已有的评价标准^[23](低熟阶段 $F_2 < 0.27$,成熟阶段 $F_2 = 0.27 \sim 0.35$,高熟阶段 $F_2 > 0.35$),这些烃源岩以低成熟烃源岩为主,而实际上这些烃源岩为成熟—高成熟烃源岩,这种矛盾表明对于研究区甲基菲比值可能受到成熟度以外的其他因素的影响较大。基于此,前人认为应用烷基菲参数定量评价成熟度,需建立适合于

研究区的关系式^[1,6]。

1.3 烷基二苯并噻吩系列参数

二苯并噻吩类化合物广泛存在于沉积有机质中,由于分子结构对称(图 1),该类化合物具有较高的稳定性^[4,11]。二苯并噻吩系列化合物在有机质热演化过程中也存在着甲基化和甲基重排作用,同样由于热稳定性的差异,一些热稳定性强的化合物的相对含量越来越大,而一些热稳定性差的化合物的相对含量越来越小,相关化合物的比值可以指示成熟度。这些参数在不同地区的应用中有很好的效果,且这些参数在较广的成熟度范围内对成熟度均有较好的响应,在高成熟度下更具持续、稳定的优势^[11]。现有研究已建立了很多烷基二苯并噻吩成熟度参数,如甲基二苯并噻吩参数 MDR^[12-13]、甲基二苯并噻吩分布指数 MDBI^[14]、二甲基二苯并噻吩参数 DMDBT1、DMDBT2、DMDBT3、DMDBT4、DMDBT5^[10-12]等(表 1)。如 HUGHES^[13]认为 4-甲基二苯并噻吩(4-MDBT)的热稳定性好于 1-甲基二苯并噻吩(1-MDBT),建立了甲基二苯并噻吩参数 MDR,认为随热演化程度增加该值应该逐渐增大。魏志彬等^[14]提出了甲基二苯并噻吩分布指数 MDBI,并验证了 R_o 在 0.67%~1.22% 范围内,MDBI 与 R_o 有很好的正相关关系。CHAKHMAKHCHEV 等^[10]研究发现 2,4-二甲基二苯并噻吩(2,4-DMDBT)和 4,6-二甲基二苯并噻吩(4,6-DMDBT)的相对含量随着热演化程度的增加而增大,而 1,4-二甲基二苯并噻吩(1,4-DMDBT)相对含量随着热演化程度的增加而减小,提出了一系列二甲基二苯并噻吩成熟度参数。

尽管烷基二苯并噻吩系列成熟度参数被广泛应用,但他们的影响因素可能更为复杂。周叶骏等^[11]的研究表明,二苯并噻吩类的烷基化程度在咸水湖相、海相、淡水湖相中呈现较为明显的分异,认为盐度差异相对于海陆原始有机物组成差异是主导二苯并噻吩类化合物烷基化程度的更为重要的因素。前人建立了一些利用烷基二苯并噻吩系列成熟度参数计算 R_o 的关系式,但基本都是针对中—低成熟度烃源岩,对于高一过成熟度烃源岩还处于探索阶段^[1]。这主要是因为一些烷基二苯并噻吩系列成熟度参数与烃源岩实测 R_o 的关系更为复杂,存在变化不明显、甚至反转等现象,使得建立定量评价关系式变得较为困难^[11,14]。

2 方法介绍

由于芳烃化合物成熟度参数的影响因素比理论中更为复杂,且烃源岩存在着区域差异性,使得

利用单一参数定量评价烃源岩成熟度的做法会出现较大误差。这就需要在实际研究中做到以下两点:一是针对不同地区、不同类型的烃源岩,套用他区已建立的关系式可能会达不到理想的应用效果,需要建立适合研究区的芳烃参数定量评价关系式;二是在利用芳烃成熟度参数定量评价成熟度时,要尽量避免利用单一参数,采用多参数综合分析可能会减少误差。

基于上述考虑,笔者在相关研究中探索出了一种提高芳烃参数定量评价烃源岩成熟度准确度的方法。该方法基于研究区一定数量的烃源岩芳烃色谱—质谱(GC-MS)分析数据,通过开展各芳烃成熟度参数与 R_o 的相关性分析,分别在3大类芳烃成熟度参数(烷基萘系列、烷基菲系列和烷基二苯并噻吩系列)中找出1个对成熟度最敏感(相关系数最大)的参数,利用数值分析软件对这几个参数和 R_o 进行多元线性回归,拟合出一个利用多参数定量计算 R_o 的关系式。

该方法的具体实施步骤是:(1)选取研究目标,对具有代表性的烃源岩进行取样。研究目标区应为同一盆地或同一凹陷。目标层系选择参照沉积体系,如可将海相沉积体系、湖相沉积体系和海陆过渡相沉积体系中的1个沉积体系所包含的烃源岩作为研究目标层系。烃源岩样品具有代表性体现在以下3个方面:一是样品的数量多,为开展相关性分析,样品数量要求大于3个,当然样品数量越多越好;二是成熟度范围大,最好涵盖未成熟、低成熟、成熟、高成熟、过成熟等所有热演化阶段;三是样品在各演化阶段均有较为均匀的分布。在获取烃源岩样品后,对所有烃源岩样品开展干酪根 R_o 测定,对沥青抽提物的芳烃馏分开展GC-MS分析,也可收集研究目标区前期的相关资料。(2)计算每个样品的芳烃成熟度参数,参数的名称和计算公式参照表1。开展各芳烃成熟度参数与 R_o 的相关性分析,分别在烷基萘类、烷基菲类和烷基二苯并噻吩类3大类芳烃成熟度参数中找出1个对成熟度最敏感的参数,对成熟度最敏感体现在该参数在该系列所有参数中与 R_o 的相关系数最大。运用数值分析软件(如SPSS等),对所确定的3个成熟度参数和 R_o 进行多元回归,拟合出一个利用多参数定量计算 R_o 的多元关系式。(3)对建立的多元关系式开展有效性评价,即利用所建立的模型计算所有样品的 R_o ,对 R_o 和 R_o 开展相关性分析。如果相关系数高(如相关系数 $R^2>0.9$)、且相比于单一芳烃成熟度参数与 R_o 的相关系数有大幅度提高,

说明定量评价的准确度有明显的提高,建立的模型适合在研究区推广或作为相关研究的参考。如果相关系数不高(如相关系数 $R^2<0.9$),但相比于单一芳烃成熟度参数与 R_o 的相关系数有大幅度提高,说明选取的目标研究区不合理(即选择的区域太大、或目标层系所包含的沉积体系过多),需要调整缩小研究目标,再次尝试该方法,直到定量评价的准确度有明显的提高。如果相关系数较低(如 $R^2\ll 0.9$)、且相比于单一芳烃成熟度参数与 R_o 的相关系数也没有大幅度提高,说明芳烃成熟度参数在研究区的影响因素较为复杂,不适合开展芳烃成熟度参数定量评价烃源岩成熟度。

该方法提供了一种全新的利用芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的研究思路,在很大程度上提高了芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的准确度,研究目标区所建立的评价模型对该区相关研究有很好的参考意义。同时,该方法具备很好的可操作性,对于各种勘探研究区块均值得推广。

3 应用实例

3.1 烃源岩地球化学特征

以银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩为例(图2),验证该方法的应用效果。哈日凹陷中生代为断陷湖盆的全面发展期,主要发育湖泊沉积体系^[24-27]。中生代的沉积地层主要有下白垩统和上白垩统,下白垩统自下而上有巴音戈壁组、苏红图组和银根组,上白垩统仅有乌兰苏海组^[27-30]。该区中生界烃源岩较为发育,烃源岩岩性主要有深灰

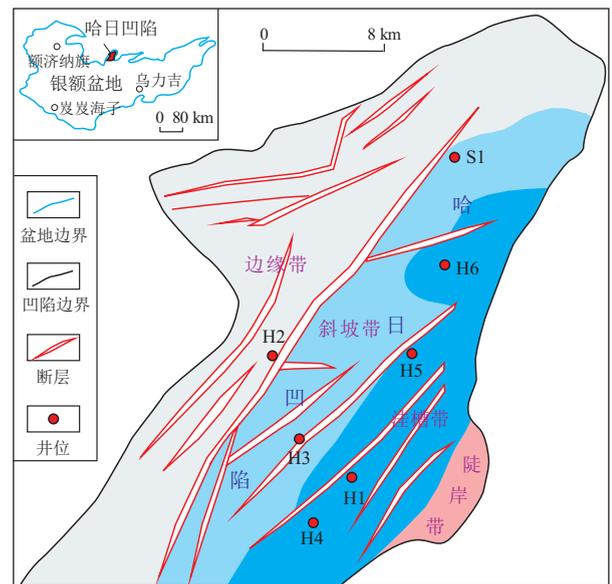


图2 银额盆地哈日凹陷构造位置及相关取样井
Fig.2 Tectonic location of Hari Sag in Yingen-Ejinaqi Basin and relevant sampling wells

色—黑色含灰泥岩、灰色—深灰色泥岩、灰色灰质泥岩、灰色白云质泥岩、灰色泥质白云岩等^[27-28,31]。

本次研究的烃源岩样品来自于 H1 井—H6 井(图 2),数量为 69 个,样品岩性为灰质泥岩、含灰泥岩、含云泥岩等。对所有烃源岩样品开展有机地球化学测试分析,由长江大学地球化学实验室完成;对所有烃源岩样品的沥青抽提物的芳烃馏分开展色谱—质谱(GC-MS)分析,相关测试分析也是由长江大学地球化学实验室完成,分析仪器及流程见文献[27]。

结果表明,样品的总有机碳(TOC)含量为 0.05%~6.91%,平均为 1.47%;热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.03~77.87 mg/g,平均为 6.40 mg/g。从 TOC 的分布频率来看(图 3a),有机质丰度较低的非烃源岩(TOC 小于 0.4%,评价标准据文献[32-33],下同)占总样品的 33.3%,差烃源岩(TOC 为 0.4%~0.6%)占 8.7%,中等有机质丰度烃源岩(TOC 为 0.6%~1.0%)占 17.4%,好的烃源岩(TOC 为 1.0%~2.0%)占 15.9%,极好的烃源岩(TOC 大于 2.0%)占 24.6%。从 S_1+S_2 的分布频率同样也可以看出本

次研究样品有机质丰度的多样性,部分烃源岩的生烃潜力较大,但较小生烃潜力的烃源岩也有很大的占比(图 3b)。

岩石热解参数氢指数(I_H)、氧指数(I_O)、最高热解峰温(T_{max})对烃源岩的有机质类型有很好的指示作用^[27,32-33],分类结果显示烃源岩有机质类型主要为混合型(II_1 — II_2 型),也有少量有机质类型较好的 I 型和较差的 III 型存在,样品具有典型的湖相烃源岩特征(图 4)。样品的 R_o 为 0.52%~2.35%,平均为 0.95%。其中低成熟烃源岩(R_o 为 0.50%~0.70%,评价标准据文献[32-33],下同)样品占总样品的 36%,成熟烃源岩(R_o 为 0.70%~1.30%)样品占总样品的 47%,高成熟烃源岩(R_o 为 1.30%~2.00%)样品占总样品的 9%,过成熟烃源岩(R_o 大于 2.00%)样品占总样品的 8%。

总的来说,本次研究的烃源岩样品数量多,有机质丰度具有多样性,有机质类型丰富,有机质成熟度跨度大,且烃源岩在低成熟、成熟、高成熟、过成熟等热演化阶段有较为均匀分布,具有很好的代表性,适合运用该方法进行研究。

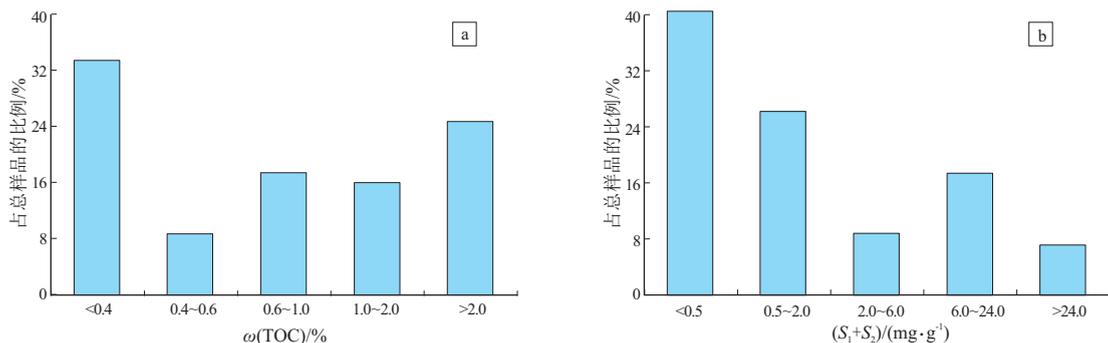


图 3 银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩样品的 TOC(a)、 S_1+S_2 (b)分布频率直方图

Fig.3 Distribution frequency of TOC (a) and S_1+S_2 (b) of lacustrine source rock samples from Mesozoic, Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

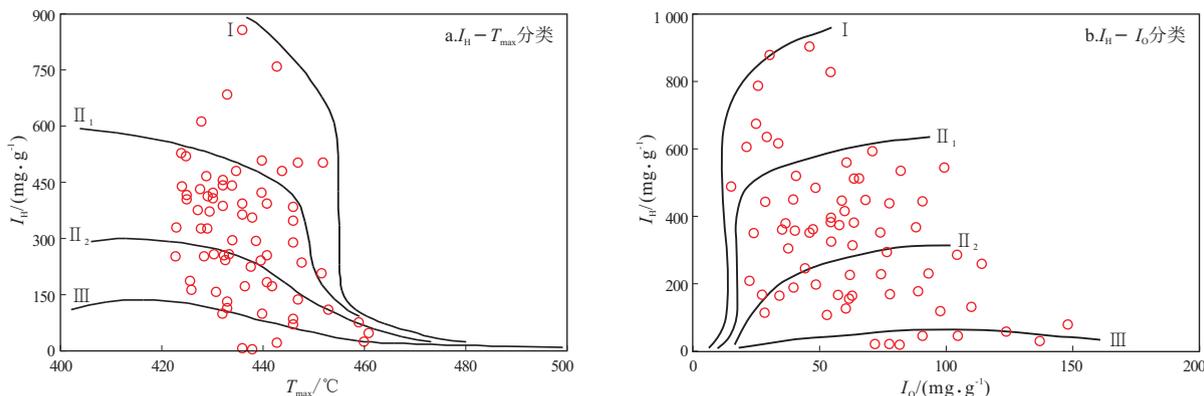


图 4 银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩样品有机质类型划分
底图据文献[32-33]。

Fig.4 Organic matter types of lacustrine source rock samples from Mesozoic, Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

3.2 芳烃宏观组成

前人研究表明,烃源岩生源特征、沉积环境、成熟度等均会对芳烃的组成产生影响。如 1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘可能来源于高等植物生源的五环三萜香树素或树脂生源的二环二萜刺柏酸,较高的 1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘含量预示着较高的陆源高等植物输入^[5,33-34]。“三芴”系列化合物的相对组成可以指示烃源岩和原油的沉积环境,陆相淡水或微咸水湖相下的烃源岩/原油中芴的含量较高,盐湖相和海相碳酸盐岩烃源岩/原油中硫芴(二苯并噻吩)含量较高,在沼泽相煤或煤成油中氧芴(二苯并呋喃)含量较高^[35-36]。芳烃化合物的宏观组成对成熟度也有一定的指示作用,未成熟—低成熟度原油,芳烃化合物中四环、五环化合物含量较高;中—高成熟度的原油,芳烃化合物中二环或三环化合物占优势^[5,21]。

本次烃源岩样品检测出的芳烃化合物多达 175 种,可分为萘、菲、蒽、芘、二苯并噻吩、联苯、芘等 16 个系列。虽然研究区中生界同为湖相沉积,但不同井、不同层段的烃源岩存在着生源特征、沉积环境、成熟度等方面的细微差异,表现为芳烃系列相对含量有所差别。但从芳烃化合物相对含量的归一化处理结果来看,整体上二环的萘系列和三环的菲系列有较高的含量,其次为蒽系列、芘系列和三芳甾烷系列,其他系列化合物含量较少(图 5)。

3.3 芳烃参数与 R_o 相关性分析

前人建立的烷基萘成熟度参数多达 12 个,由于本次 GC-MS 分析未能检出 1,8-二甲基萘(1,8-DMN),相关参数 DNR-2、DNR-3、DNR-4

和 DNR-5 未能求取,绘制出其他 8 个烷基萘类成熟度参数与 R_o 的交会图(图 6a-h),并分别开展线性回归和相关性分析。可以看出,烷基萘成熟度参数整体与 R_o 的相关性差别很大。甲基萘参数 MNR、二甲基萘比值 DNR-1、三甲基萘指数 TMNr3 和五甲基萘指数 PMNr 在本次研究的成熟度范围内(R_o 为 0.52%~2.35%)与 R_o 相关性较差或者几乎无相关性,相关系数 R^2 仅为 0.000 4~0.110 1(图 6a,b,f,h),表明对于湖相烃源岩,这些参数可能受沉积环境、生源等其他因素影响较大。三甲基萘指数 TMNr、TMNr1、TMNr2 和四甲基萘指数 TeMNr 等参数虽然在中低成熟度阶段($R_o < 1.00\%$)值较为分散,但整体与 R_o 相关性较好, R^2 为 0.281 1~0.550 3(图 6c-e,g)。烷基萘成熟度参数中参数 TMNr 的 R^2 最大,说明研究区烷基萘类成熟度参数中 TMNr 为对 R_o 最敏感的参数。

同样,绘制出 8 个烷基菲成熟度参数与 R_o 的交会图(图 6i-p),并开展线性回归分析。可以看出,参数 DPR、DPR2 与 R_o 的相关性较差,因为它们与 R_o 的相关系数 R^2 分别仅为 0.068 6 和 0.013 5(图 6o,p)。除了参数 DPR 和 DPR2,其他参数与 R_o 的相关性显著, R^2 为 0.674 4~0.923 7,表明烷基菲成熟度参数对于湖相烃源岩有很好的适用性。其中,参数 MPR 的 R^2 最大,为 0.923 7,预示着研究区烷基菲类成熟度参数中 MPR 对 R_o 最敏感。

烷基二苯并噻吩类 7 个成熟度参数与 R_o 的线性回归分析结果表明,除了参数 MDR、MDBI 与 R_o 的相关性不显著外(R^2 分别为 0.089 9 和 0.213 2),其他烷基二苯并噻吩成熟度参数与 R_o 的相关性均较好(图 5q-u), R^2 为 0.808 5~0.904 5,其中参数 DMDBT1 与 R_o 的相关系数 R^2 最大,为 0.904 5,说

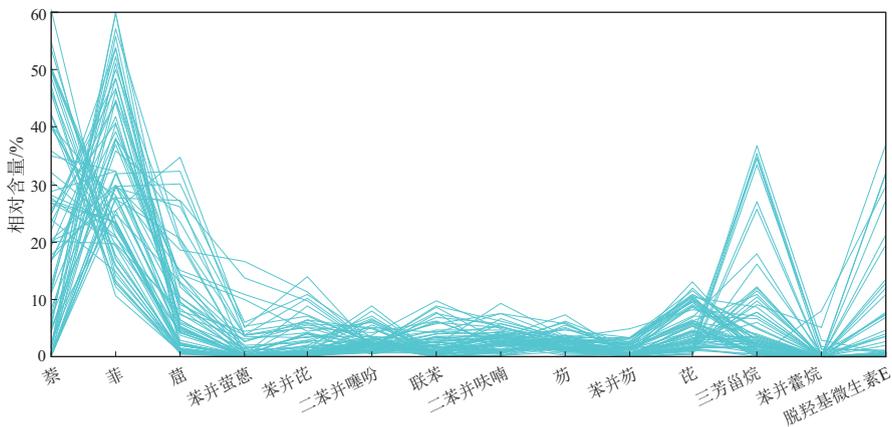


图 5 银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩样品芳烃系列相对含量

Fig.5 Component of polycyclic aromatic compounds of lacustrine source rock samples from Mesozoic, Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

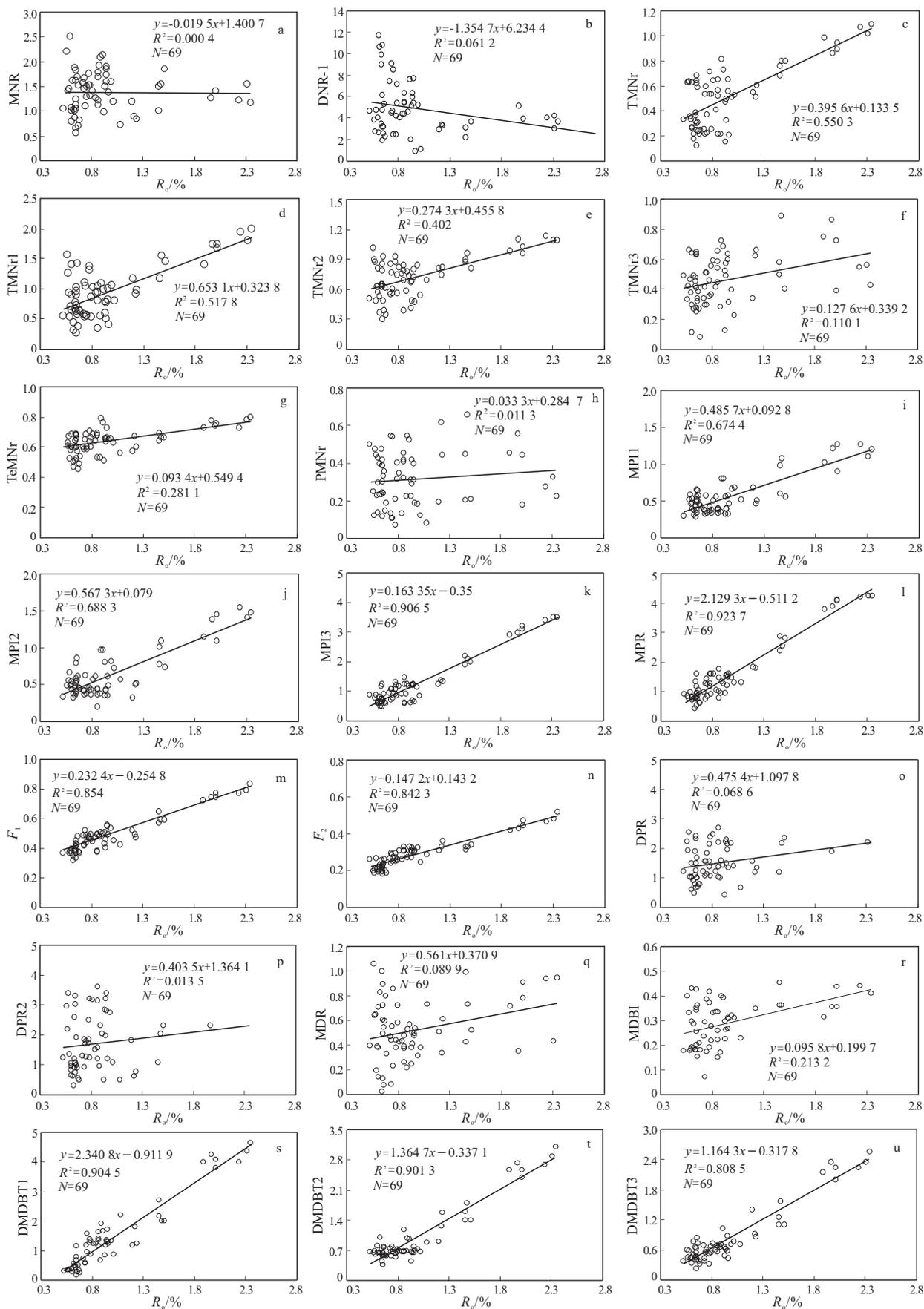


图 6 银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩芳烃参数与 R_o 相关关系

Fig.6 Correlation between maturity parameters of polycyclic aromatic and R_o of lacustrine source rock samples from Mesozoic, Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

明研究区烷基二苯并噻吩类成熟度参数中 DMD-BT1 对 R_o 最敏感。

3.4 模型的建立与应用效果分析

基于以上芳烃参数与 R_o 的相关性分析,确定的研究区烷基萘类、烷基菲类和烷基二苯并噻吩类芳烃成熟度参数中对成熟度最为敏感的参数分别为 TMNr、MPR 和 DMDBT1。对 TMNr、MPR 和 DMDBT1 和 R_o 进行多元线性回归,用 SPSS 软件拟合出的利用这 3 个参数计算视镜质体反射率(R_c)的关系式:

$$R_c = 0.3168 \times \text{TMNr} - 0.2913 \times \text{MPR} + 0.1673 \times \text{DMDBT1} + 0.3956 \quad (1)$$

利用公式(1)计算所有样品的 R_c ,并对 R_c 和 R_o 开展相关性分析,新模型计算出的 R_c 和 R_o 之间的相关系数 R^2 高达 0.96(图 7)。

本应用实例所有样品的 23 个芳烃成熟度参数与 R_o 的相关系数 R^2 为 0.0004~0.9237。虽然有极少数单一参数与 R_o 的相关系数较高,如 MPR 与 R_o 的 R^2 为 0.9237(为最高),DMDBT1 与 R_o 的 R^2 为 0.9045,这几个参数在一定程度上能够满足烃源岩成熟度评价的精度要求,但地质定量评价研究中的精度越高往往会得到更为客观的结论。且绝大多数单一参数与 R_o 的相关系数均较小,如所有单一参数中与 R_o 的相关系数 R^2 小于 0.8 的占 81%。相比于单一芳烃参数与 R_o 的相关系数,新模型计算出的 R_c 与 R_o 的相关系数有了大幅度提高。如分别选取样品中成熟度较低和较高的 2 个样品,实测 R_o 分别为 0.56% 和 2.31%,利用单一芳烃参数中

与 R_o 的相关性最好的 MPR 参数建立的模型计算出的 R_c 分别为 0.66% 和 2.14%,而新模型计算出的 R_c 分别为 0.54% 和 2.23%,可见新模型计算出的 R_c 精度明显较高。

以上表明利用多芳烃参数建立定量计算 R_c 的方法具有明显的优越性,体现在相对于单因素定量评价的准确度能有大幅度地提高。本研究应用实例的研究对象为湖相烃源岩,代表了最重要的、最广泛的一类烃源岩类型,用本方法建立的公式(1)对于银额盆地中生界烃源岩具有很好的适用性,对于其他区域的湖相烃源岩的相关研究也能提供参考。

4 结论

(1) 基于热稳定性的差异性,前人建立了 30 余个芳烃成熟度参数,但实际上一些参数可能并非仅受成熟度控制,生源特征、沉积环境等因素对其也会有很大影响,导致一些参数在某些研究区的应用效果并不理想,且前人基于单一参数建立的计算 R_c 的模型在其他地区也并不适用。

(2) 本研究探索出了一种提高芳烃参数定量评价烃源岩成熟度准确度的方法。该方法基于研究区一定数量的烃源岩芳烃色谱—质谱(GC-MS)分析数据,通过开展各芳烃成熟度参数与 R_o 的相关性分析,分别在 3 大类芳烃成熟度参数(烷基萘系列、烷基菲系列和烷基二苯并噻吩系列)中找出 1 个对成熟度最敏感(相关系数最大)的参数,利用数值分析软件对这几个参数和 R_o 进行多元线性回归,拟合出一个利用多参数定量计算 R_c 的关系式。

(3) 本方法在银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩研究中取得了很好的应用效果,用本方法拟合出的关系式计算所有样品的 R_c ,结果 R_c 和 R_o 相关系数 R^2 高达 0.96,相对于单一芳烃参数,相关系数有了大幅度的提高,表明该方法具有较好的适用性和较强的可操作性,在相关研究中值得推广。

参考文献:

- [1] 王崇敬,张鹤,李世宇,等.基于分子标志物的有机质成熟度评价参数选择及其适用范围分析[J].地质科技情报,2018,37(4):202-211.
WANG Chongjing, ZHANG He, LI Shiyu, et al. Maturity parameters selection and applicable range analysis of organic matter based on molecular markers[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(4): 202-211.
- [2] 赵文,郭小文,何生.生物标志化合物成熟度参数有效性:以伊通盆地烃源岩为例[J].西安石油大学学报(自然科学

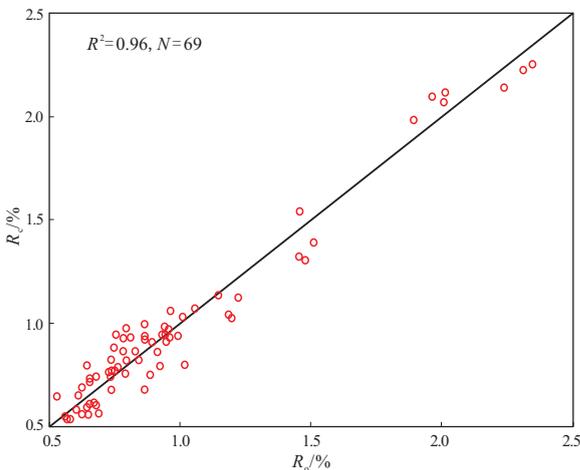


图 7 银额盆地哈日凹陷中生界湖相烃源岩样品新模型计算的 R_c 与 R_o 相关关系

Fig.7 Correlation between R_c calculated by the new model and R_o of lacustrine source rock samples from Mesozoic, Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

- 版),2016,31(6):23-31.
- ZHAO Wen, GUO Xiaowen, HE Sheng. Analysis on validity of maturity parameters of biomarkers: a case study from source rocks in Yitong Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2016, 31(6): 23-31.
- [3] 陈治军, 张佳琪, 牛凌燕, 等. 芳烃参数在湖相烃源岩成熟度评价中的适用性: 以银根—额济纳旗盆地中生界烃源岩为例 [J]. 石油学报, 2020, 41(8): 928-939.
- CHEN Zhijun, ZHANG Jiaqi, NIU Lingyan, et al. Applicability of aromatic parameters in maturity evaluation of lacustrine source rocks: a case study of Mesozoic source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2020, 41(8): 928-939.
- [4] 刘亚洲, 刚文哲, 陈果, 等. 鄂尔多斯盆地盐池—定边地区长 7 段烃源岩芳烃地球化学特征 [J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 818-828.
- LIU Yazhou, GANG Wenzhe, CHEN Guo, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of Chang7 source rocks from the Yanchi-Dingbian area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 818-828.
- [5] 许婷, 侯读杰, 曹冰, 等. 东海盆地西湖凹陷轻质原油芳烃地球化学特征 [J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 182-192.
- XU Ting, HOU Dujie, CAO Bing, et al. Characteristics of aromatic geochemistry in light oils from Xihu Sag in East China Sea Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 182-192.
- [6] 王辉. 辽河西部凹陷沙河街组泥岩中多环芳烃分布特征及其地球化学意义 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2016, 31(6): 39-47.
- WANG Hui. Distribution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in Shahejie Formation mudstone, the western Sag, Liaohe Basin and its geochemical significance [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science), 2016, 31(6): 39-47.
- [7] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(1): 1-10.
- [8] 武英利, 朱建辉, 倪春华, 等. 松辽盆地南部中小断陷白垩系烃源岩成熟度综合评价: 以彰武、昌图断陷为例 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 289-295.
- WU Yingli, ZHU Jianhui, NI Chunhua, et al. Comprehensive evaluation of Cretaceous source rock maturity in medium and small fault depressions in southern Songliao Basin: a case study of Zhangwu and Changtu fault depressions [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 289-295.
- [9] KVALHEIM O M, CHRISTY A A, TELNAES N, et al. Maturity determination of organic matter in coals using the methylphenanthrene distribution [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(7): 1883-1888.
- [10] CHAKHMAKHCHEV A, SUZUKI M, TAKAYAMA K. Distribution of alkylated dibenzothiophenes in petroleum as a tool for maturity assessments [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(7/8): 483-489.
- [11] 周叶骏, 关平, 吴颜雄, 等. 柴达木盆地西部咸水湖相沉积有机质中二苯并噻吩类组成特征及环境意义 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 908-920.
- ZHOU Yejun, GUAN Ping, WU Yanxiong, et al. Characterization on the composition of dibenzothiophene series in saline lacustrine sediments in western Qaidam basin and its environmental implications [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 908-920.
- [12] LI Meijun, WANG T G, SHI Shengbao, et al. Oil maturity assessment using maturity indicators based on methylated dibenzothiophenes [J]. Petroleum Science, 2014, 11(2): 234-246.
- [13] HUGHES W B. Use of thiophenic organosulfur compounds in characterizing crude oils derived from carbonate versus siliciclastic sources [M]//PALACAS J G. Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks. Tulsa; American Association of Petroleum Geologists, 1984: 181-196.
- [14] 魏志彬, 张大江, 张传禄, 等. 甲基二苯并噻吩分布指数 (MDBI) 作为烃源岩成熟度标尺的探讨 [J]. 地球化学, 2001, 30(3): 242-247.
- WEI Zhibin, ZHANG Dajiang, ZHANG Chuanlu, et al. Methyl-dibenzothiophenes distribution index as a tool for maturity assessments of source rocks [J]. Geochimica, 2001, 30(3): 242-247.
- [15] 卢双航, 张敏. 油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- LU Shuanghang, ZHANG Min. Oil and gas geochemical [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [16] 李美俊, 王铁冠. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(6): 606-611.
- LI Meijun, WANG Tieguan. The generating mechanism of methylated naphthalene series in crude oils and the application of their maturity parameters [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(6): 606-611.
- [17] 周佩瑜. 石油烃中烷基萘的形成机理及其地球化学意义 [J]. 地质科技情报, 2008, 27(5): 92-96.
- ZHOU Peiyu. Formation mechanism of alkylated naphthalene in petroleum hydrocarbon and its geochemistry significance [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(5): 92-96.
- [18] 黄海平, 周树青, 初振森, 等. 生物降解作用对原油中烷基萘分布的影响 [J]. 现代地质, 2005, 19(3): 416-424.
- HUANG Haiping, ZHOU Shuqing, CHU Zhenhao, et al. The effect of biodegradation on alkylated phenanthrene distributions in reservoir oils [J]. Geoscience, 2005, 19(3): 416-424.
- [19] 陈琰, 包建平, 刘昭茜, 等. 甲基菲指数及甲基菲比值与有机质热演化关系: 以柴达木盆地北缘地区为例 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 508-512.
- CHEN Yan, BAO Jianping, LIU Zhaoqian, et al. Relationship between methylphenanthrene index, methylphenanthrene ratio and organic thermal evolution: take the northern margin of Qaidam Basin as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 508-512.
- [20] 周士科, 杨志承, 张敏. 柴达木盆地绿参 1 井烃源岩芳烃组成及地球化学意义 [J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4): 31-35.
- ZHOU Shike, YANG Zhicheng, ZHANG Min. Composition features and geochemical significance of aromatic hydrocarbons in oil source rock from well Lucan 1 in Qaidam Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(4): 31-35.

- [21] 赵兴齐,陈践发,郭望,等.开鲁盆地奈曼凹陷奈 1 区块原油及烃源岩芳烃地球化学特征[J].地球化学,2013,42(3):262-273.
ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, GUO Wang, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon in crude oil and source rocks from Nai 1 block of Naiman Depression, Kailu Basin[J]. Geochimica, 2013, 42(3):262-273.
- [22] 刘春,郭庆新,张惠良.川西北地区飞仙关组原油的发现及地质意义[J].天然气地球科学,2011,22(4):692-699.
LIU Chun, GUO Qingxin, ZHANG Huiliang. The discovery and geological significance of petroleum of Triassic Feixianguan Formation in northwest Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4):692-699.
- [23] 包建平,王铁冠,周玉琦,等.甲基菲比值与有机质热演化的关系[J].江汉石油学院学报,1992,14(4):8-13.
BAO Jianping, WANG Tieguan, ZHOU Yuqi, et al. The relationship between methyl phenanthrene ratios and the evolution of organic matter[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1992, 14(4):8-13.
- [24] 陈治军,刘舵,刘护创,等.银额盆地厚层粗碎屑岩沉积特征与地层沉积年代的厘定[J].沉积学报,2018,36(3):468-482.
CHEN Zhijun, LIU Duo, LIU Huchuang, et al. Sedimentary characteristics and stratigraphic age of the thick-bedded coarse clastic rocks in the Yingen-Ejin Banner Basin, Northern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3):468-482.
- [25] 陈志鹏,任战利,崔军平,等.银额盆地哈日凹陷 YHC1 井高产油气层时代归属及油气地质意义[J].石油与天然气地质,2019,40(2):354-368.
CHEN Zhipeng, REN Zhanli, CUI Junping, et al. Age and petroleum geological implications of prolific formations in Ha'ri Depression well YHC1, Yin'e Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):354-368.
- [26] 耿师江,周勇水,王亚明,等.银额盆地查干凹陷稠油油藏特征及成因[J].断块油气田,2021,(4):463-469.
GENG Shijiang, ZHOU Yongshui, WANG Yaming, et al. The characteristics and genesis of heavy oil reservoir in Chagan Sag, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, (4):463-469.
- [27] 陈治军,高怡文,刘护创,等.银根—额济纳旗盆地哈日凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征与油源对比[J].石油学报,2018,39(1):69-81.
CHEN Zhijun, GAO Yiwen, LIU Huchuang, et al. Geochemical characteristics of Lower Cretaceous source rocks and oil-source correlation in Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1):69-81.
- [28] 陈治军,马芳侠,肖刚,等.银额盆地哈日凹陷巴音戈壁组精细油源对比[J].石油与天然气地质,2019,40(4):900-916.
CHEN Zhijun, MA Fangxia, XIAO Gang, et al. Oil-sources rock correlation of Bayingebi Formation in Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4):900-916.
- [29] 蒋航,曾德铭,刘护创,等.银额盆地拐子湖凹陷北部烃源岩特征及控制因素[J].特种油气藏,2020,27(4):33-40.
JIANG Hang, ZENG Deming, LIU Huchuang, et al. Source-rock characterization and main-controlling factors in the Northern Guazihu Depression of Yin'e Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4):33-40.
- [30] 万涛,张洪安,张宝君,等.C₂₉重排谷甾烷在油源对比研究中的应用:以银额盆地查干凹陷为例[J].断块油气田,2021,(2):173-178.
WAN Tao, ZHANG Hongan, ZHANG Baojun, et al. The application of C₂₉ rearranged sitostane in oil source correlation research: taking Chagan Depression of Yingen-Ejinaqi Basin for example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, (2):173-178.
- [31] 王小多,任来义,刘护创,等.银额盆地哈日凹陷下白垩统烃源岩特征及资源潜力[J].西安科技大学学报,2019,39(2):286-293.
WANG Xiaoduo, REN Laiyi, LIU Huchuang, et al. Characteristics and resource potential analysis of the Lower Cretaceous source rocks in the Hari Sag, Yin'e Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(2):286-293.
- [32] 中国石油天然气总公司. SY/T 5735-1995, 陆相烃源岩地球化学评价方法[S].北京:石油工业出版社,1996.
PetroChina Co Ltd. SY/T 5735-1995, Geochemical evaluation standard of terrestrial hydrocarbon source rock[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [33] 侯读杰,张林晔.实用油气地球化学图鉴[M].北京:石油工业出版社,2003.
HOU Dujie, ZHANG Linye. Practical oil and gas geochemical map[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [34] 朱扬明,张洪波,傅家谟,等.塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J].石油学报,1998,19(3):33-37.
ZHU Yangming, ZHANG Hongbo, FU Jiamou, et al. Distribution and composition of aromatic hydrocarbon in various oils from Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3):33-37.
- [35] ZHANG Min, PHILIP P. Geochemical characterization of aromatic hydrocarbons in crude oils from the Tarim, Qaidam and Turpan basins, NW China[J]. Petroleum Science, 2010, 7(4):448-457.
- [36] 贾存善,王延斌,顾忆,等.塔河油田奥陶系原油芳烃地球化学特征[J].石油实验地质,2009,31(4):384-388.
JIA Cunshan, WANG Yanbin, GU Yi, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of crude oils from Ordovician reservoir in the Tahe oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4):384-388.