

银额盆地古生界过成熟烃源岩特征及其地球化学意义

陈治军^{1,2}, 张春明¹, 贺永红², 文志刚¹, 马芳侠², 李渭³, 高怡文², 陈义国², 张慧元³, 魏东涛³

[1. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075;

3. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054]

摘要:银额盆地的部分钻井和野外露头发现了古生界过成熟烃源岩,对于分析盆地古生界油气成藏条件、探讨过成熟烃源岩地球化学问题等有重要的意义。对25个过成熟烃源岩样品开展测试分析,研究其地球化学特征,分析其原始生烃潜力。结果表明:①烃源岩总有机碳含量平均为1.31%,有机质类型为II₁-II₂型,镜质体反射率R_o平均为4.20%,为残余有机碳含量较低、混合型干酪根的过成熟烃源岩;②主要受控于热降解作用,过成熟烃源岩的生物标志化合物普遍呈现“正构烷烃具有双峰型、甾类化合物中孕甾烷(含升孕甾烷)具有异常高的相对含量、萜类化合物中三环萜烷的相对含量较高、芳烃化合物中低碳环数化合物占据优势”等特征;③提出了“有机碳构成”的概念,建立了基于岩石热解资料计算有机碳构成的方法,计算结果表明虽然本研究中过成熟烃源岩的有效碳仅占极小的一部分,但烃源岩原始总有机碳含量平均为2.07%,且烃源岩具有持续时间长、产率较高的生烃特征,明确了银额盆地古生界过成熟烃源岩具有较高的生烃潜力。

关键词:有机碳构成;生物标志化合物;地球化学特征;过成熟烃源岩;古生界;银额盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics and geochemical indication of over-mature source rocks in the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

Chen Zhijun^{1,2}, Zhang Chunming^{1,2}, He Yonghong², Wen Zhigang¹, Ma Fangxia², Li Wei³,

Gao Yiwen², Chen Yiguo², Zhang Huiyuan³, Wei Dongtao³

[1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Research Institute of Yanchang Petroleum

(Group) Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey,

Xi'an, Shaanxi 710054, China]

Abstract: The Paleozoic source rocks encountered by some wells and present on outcrops in Yingen-Ejinaqi Basin are believed to carry with them important geochemical information that will help understand the oil and gas accumulation conditions in the Paleozoic system of the basin. Geochemical characterization and hydrocarbon generation potential assessment of 25 such rock samples indicate over-mature ($R_o=4.20\%$) source rocks with low total organic carbon (TOC) content (1.31%) and mixed kerogen types (types II₁-II₂). They are mainly products of thermal degradation with biomarkers showing a bimodal N-alkanes, abnormally high relative abundance of pregnane (including L pregnane) in steroids, high relative abundance of tricyclic terpene in terpenoids, a predominance of low-carbon ring number compounds in aromatic compounds and other characteristics. A concept of “organic carbon composition” is presented and a method for calculating its value based on rock pyrolysis data is established. The results show that although the pyrolytically effective carbon only accounts for a fraction of organic carbon composition of the over-mature source rock, the original average TOC content of source rock is high at 2.07%. In addition, the duration of hydrocarbon generation is long and its yield is high. Therefore, the Paleozoic over-mature source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin are suggested to have a high original hydrocarbon generation potential.

收稿日期:2021-04-19;修订日期:2022-03-08。

第一作者简介:陈治军(1980—),男,高级工程师、博士研究生,油气地球化学。E-mail: chenzhijun2203@aliyun.com。

通讯作者简介:张春明(1963—),男,教授、博士生导师,油气地球化学。E-mail: Zhangcm1991@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872144);延长石油集团科技攻关项目(ycsy2020jcyj-B-03)。

Key words: organic carbon composition, biomarker compound, geochemical characteristics, over-mature hydrocarbon source rock, Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

引用格式:陈治军,张春明,贺永红,等. 银额盆地古生界过成熟烃源岩特征及其地球化学意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 682-695. DOI: 10. 11743/ogg20220316.

Chen Zhijun, Zhang Chunming, He Yonghong, et al. Characteristics and geochemical indication of over-mature source rocks in the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 682-695. DOI: 10. 11743/ogg20220316.

近年来,银额盆地中生界油气勘探取得了很好的效果,但古生界(石炭系—二叠系)的勘探潜力尚不明朗^[1-3]。卢进才等认为银额盆地古生界烃源岩的成熟度差异很大,烃源岩的热演化程度主要受控于埋藏史,成熟度以成熟—高成熟为主,局部受热变质和构造动力变质作用的影响达到过成熟^[4]。前人对于盆地古生界烃源岩的研究聚焦于镜质体反射率(R_o)为0.70%~1.70%的成熟—高成熟烃源岩^[4-7],对于热演化程度极高的过成熟烃源岩尚未开展过研究,而过成熟烃源岩的研究对于揭示古生界油气成藏条件同样意义重大。

过成熟烃源岩是指 R_o 值大于2%的一类烃源岩^[8],这类烃源岩在四川盆地、江汉盆地、青藏高原等很多地方都有发现^[9-12]。由于具有极高的热演化程度,过成熟烃源岩具有特殊性。例如它们的生烃潜量 S_1+S_2 、氯仿沥青“A”含量、氢指数(HI)、氧指数(OI)等普遍较低^[13-14],评价结果显示烃源岩基本为有机质丰度较低、类型偏差的烃源岩,不能准确反映烃源岩的原始特征^[13,15]。再如许多在“生油窗”范围内有较好应用效果的评价方法对于过成熟烃源岩往往不具适用性,最常见的一个例子是HI与OI交汇的范式图可以判别有机质类型,但过成熟烃源岩的HI和OI都极低,难以运用范式图识别出其有机质类型^[16]。又如过成熟烃源岩的生物标志化合物特征具有很强的趋同性,很多参数都接近或达到演化终点,使得很多分子参数难以对烃源岩的生源、沉积环境、成熟度等做出正确的评价^[17-22]。前人针对高—过成熟烃源岩的有机质类型评价方法^[16]、原始有机质丰度恢复方法^[23]、海相高过成熟烃源岩成熟度评价方法^[24-25]、部分分子成熟度参数的适用性^[18-20]、过成熟烃源岩的生物标志化合物分布特征^[13,21,26]等开展了一些研究。整体来看,前人的研究以海相高—过成熟烃源岩为主,海—陆过渡相高—过成熟烃源岩涉及较少。对过成熟烃源岩的部分生物标志化合物特征进行了报道,但缺乏系统的总结。对于过成熟烃源岩所表现出的低有机碳含量及其成因、有机碳组成特征等问题,更需建立评价方法、深入探讨。

基于对银额盆地中部苏红图坳陷钻井和盆地西部野外露头的古生界烃源岩样品的测试分析资料,明确

烃源岩的地球化学特征,总结过成熟烃源岩生物标志化合物特征并探讨其成因,建立有机碳构成定量评价方法并对过成熟烃源岩的有机碳构成进行研究,基于原始有机碳恢复和盆地模拟研究分析过成熟烃源岩的原始生烃潜力。研究不仅能够明确银额盆地古生界过成熟烃源岩的地球化学特征和原始生烃潜力,也是对过成熟烃源岩有机地球化学理论研究的有益补充。

1 样品与实验

银额盆地古生界主要为石炭系—二叠系,前人认为盆地石炭纪—二叠纪为裂谷—裂陷盆地,以海—陆过渡相和浅海陆棚相沉积为主,发育多套有机质丰度中等—高、以Ⅱ型干酪根为主的烃源岩^[4]。但由于古生界沉积后经过了海西晚期、印支期、燕山期等多期剧烈构造运动,导致地层分布零碎、地层剥蚀程度差别大、地层变形变质程度差异大,这就增加了古生界的研究难度,古生界的地层划分及分布一直存在着很大的争议,古生界的油气地质条件更不明朗。

本次研究的烃源岩样品来自于银额盆地中部苏红图坳陷哈日、乌兰等凹陷的钻井和盆地西部边缘大狐狸山地区的露头(图1)。烃源岩样品数为25个(表1),其中乌兰凹陷的Z1井13个(编号为Z1-1—Z1-13)、巴北凹陷的Y1井2个(编号为Y1-1, Y1-2)、哈日凹陷的X6井3个(编号为X6-1—X6-3)、大狐狸山地区的露头样品7个(编号为DHLS1-1—DHLS-7)。样品的岩性为深灰色—灰黑色泥岩、灰黑色粉砂质泥岩等,由于样品来源的泥岩岩层普遍呈现中—薄层、与砂岩(或粉砂岩)互层,具有海—陆过渡(三角洲相)沉积环境下形成的泥岩的典型特征(图1b)。同时,大多数样品见光滑的“镜面”,表明烃源岩样品经历了强烈的构造运动,具有很高的热演化程度(图2)。

对样品开展的测试分析项目有岩石热解分析、有机碳测定、氯仿沥青“A”含量测定、干酪根显微组分鉴定及类型划分、氯仿抽提物及其族组分分析、氯仿抽提物饱和烃色谱—质谱分析、芳烃色谱—质谱分析等,测试分析由中国石油大学(北京)地球科学学院石油地质

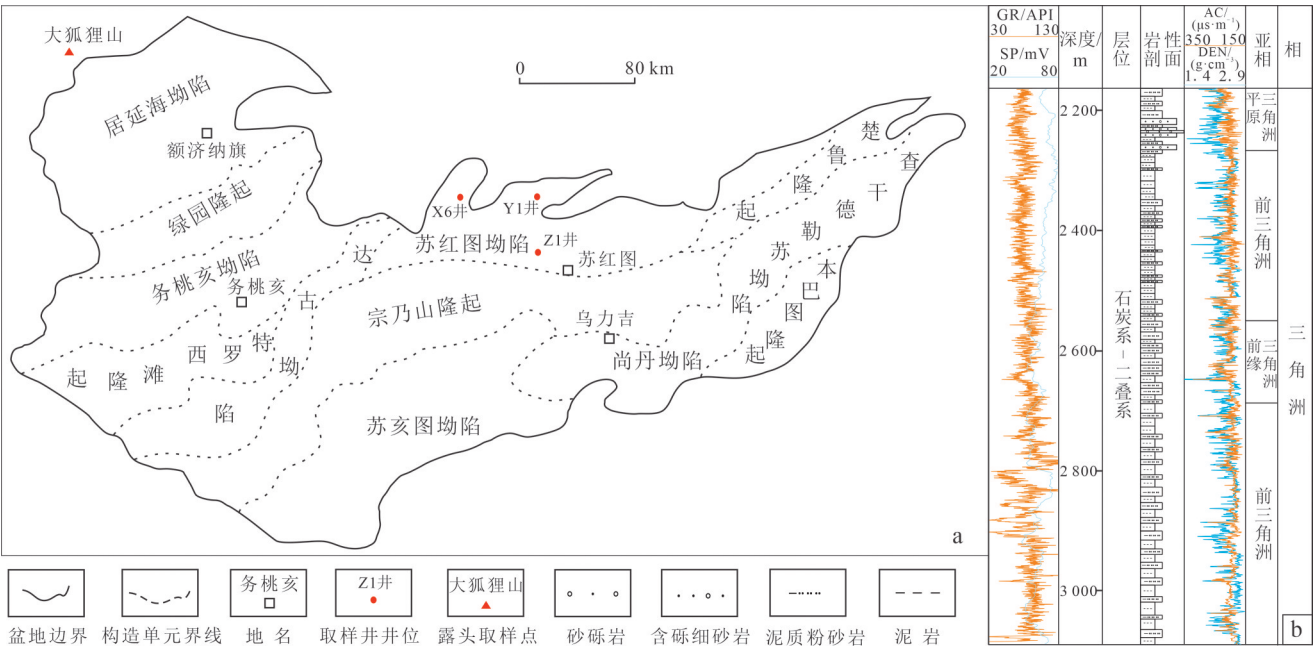


图1 银额盆地取样点位置(a)与Z1井古生界综合柱状图(b)
Fig. 1 Sampling points (a) in the Yingen-Ejinaqi Basin with composite stratigraphic column of the Palaeozoic in Well Z1 (b)

表1 银额盆地古生界过成熟烃源岩样品信息

Table 1 Statistics of the over-mature source rock samples from the Paleozoic in the Yingen-Ejinaqi Basin

样品编号	取样井/取样地点	岩性	样品深度/m	样品编号	取样井/取样地点	岩性	样品深度/m
Z1-1	Z1井	灰色粉砂质泥岩	2 305.84	X6-1	H6井	深灰色泥岩	3 771.48
Z1-2	Z1井	深灰色泥岩	2 306.72	X6-2	H6井	深灰色泥岩	3 696.21
Z1-3	Z1井	深灰色泥岩	2 307.63	X6-3	H6井	深灰色泥岩	3 673.19
Z1-4	Z1井	深灰色泥岩	2 308.32	Y1-1	Y1井	深灰色泥岩	2 455.80
Z1-5	Z1井	深灰色泥岩	2 308.83	Y1-2	Y1井	深灰色泥岩	2 457.07
Z1-6	Z1井	灰黑色粉砂质泥岩	2 501.35	DHLS-1	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-7	Z1井	灰色泥质粉砂岩	2 502.80	DHLS-2	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-8	Z1井	灰色泥质粉砂岩	2 503.70	DHLS-3	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-9	Z1井	灰黑色粉砂质泥岩	2 504.60	DHLS-4	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-10	Z1井	灰黑色粉砂质泥岩	2 505.46	DHLS-5	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-11	Z1井	灰黑色粉砂质泥岩	2 829.61	DHLS-6	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-12	Z1井	深灰色粉砂质泥岩	2 830.97	DHLS-7	大狐狸山地区	灰黑色泥岩	—
Z1-13	Z1井	深灰色粉砂质泥岩	2 831.80				

注：—代表样品来自于地表露头。

实验室完成。饱和烃和芳烃色谱-质谱(GC-MS)分析中,首先将样品粉碎至150目,用索氏抽提法抽提24 h后获得抽提物,再用石油醚清除抽提物中的沥青质,然后用硅胶/氧化铝层析柱脱去抽提物中的沥青质,最后将得到的抽提物分成饱和烃、芳烃和非烃3个馏分,检测依据石油天然气行业标准SY/T5119—2008《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》^[27]。分别对饱和烃和芳烃馏分开展GC-MS分析,执行标准为GB/T 18606—2017《气相色谱质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》^[28],测试仪器为美国Agilent 6890GC/5975iMS,色

谱柱为HP-5 ms(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。初始温度设置为50℃,恒温1 min后以20℃/min升温到1 200℃,再以3℃/min升温到310℃,恒温10 min。载气为He,采用恒流模式,流量为1 mL/min,质谱检测方式为多离子检测。

2 烃源岩基础地球化学特征

2.1 有机质丰度

烃源岩残余总有机碳(TOC)含量为0.22%~

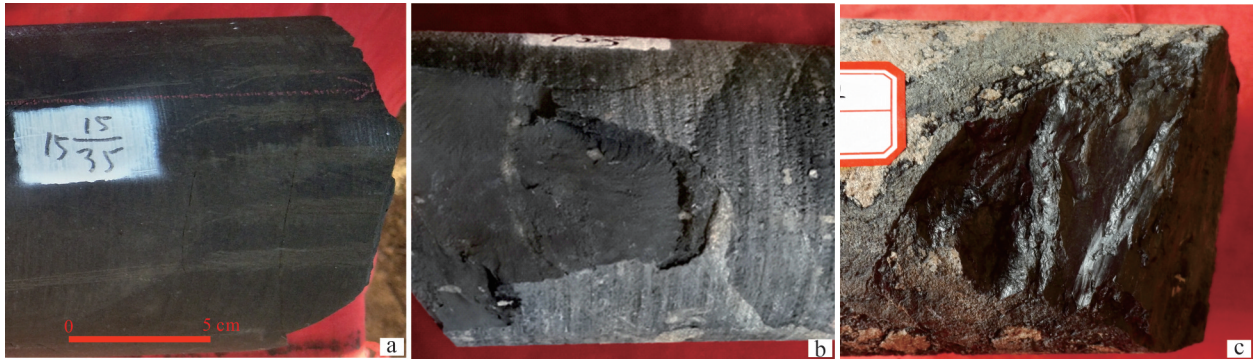


图2 银额盆地古生界过成熟烃源岩典型样品的岩心照片

Fig. 2 Core photos showing typical over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

a. 样品X6-1, H6井, 埋深3 771.48 m, 深灰色泥岩; b. 样品Z1-11, Z1井, 埋深2 829.61 m, 灰黑色粉砂质泥岩;
c. 样品Y1-2, Y1井, 埋深2 457.07 m, 深灰色泥岩

10.00%, 平均为1.30%。其中1个样品的 TOC 含量极高, 为10.00%, 其余样品均小于3.50%, 小于1.00%的样品占64%, 如果按照残余有机碳评价, 大多数烃源岩数样品为有机质丰度较低的差-中等烃源岩(表2, 表3; 图3a)。烃源岩的生烃潜量(S_1+S_2)为0.01~0.45 mg/g, 平均为0.12 mg/g; 氯仿沥青“A”含量为0.002%~0.014%, 平均为0.003%(表3)。如果依据 S_1+S_2 和氯仿沥青“A”含量这两个参数, 参照陆相烃源岩有机质评价标准^[8], 烃源岩应基本都为非烃源岩, 评价出的有机质丰度级别明显低于依据 TOC 含量评价出的级别, 图3a也可直观地反映出这一现象, 这表明过成熟烃源岩中可热解的有机碳和可溶有机质含量极低, 而不可热解的有机碳在总有机碳中可能有很大的占比。同时, 测试结果显示出的低有机质丰度似乎与深色岩石所反映较高有机质丰度存在着一定的矛盾

(图2), 可能原因是烃源岩的原始有机碳含量较高, 有机质在经过很高的热演化阶段后含量明显减少, 而烃源岩的颜色并未发生实质性的变化, 导致这种异常现象的发生。

2.2 有机质类型

一般在生油窗内, 利用岩石热解相关参数 HI 、 OI 、最高热解峰温(T_{max})等可对烃源岩的有机质类型进行有效判别^[29-30], 但由于过成熟烃源岩的 HI 值极低, 热解参数的有关判别图版很难对本研究烃源岩样品的有机质类型做出有效判别(表3; 图3b)。烃源岩抽提物族组分的相对含量也可以反映泥页岩有机母质类型, I型干酪根具有较高的饱和烃含量(相对含量通常为40%~60%)和较低的非烃+沥青质含量(相对含量通常为20%~40%), III型干酪根具有较低的饱和烃含

表2 银额盆地古生界过成熟烃源岩样品残余有机碳含量

Table 2 Residual TOC contents of over-mature source rock samples from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

样品编号	$TOC/\%$	样品编号	$TOC/\%$	样品编号	$TOC/\%$	样品编号	$TOC/\%$	样品编号	$TOC/\%$
Z1-1	0.65	Z1-6	0.33	Z1-11	2.57	X6-3	1.05	DHLS-3	0.73
Z1-2	0.64	Z1-7	0.73	Z1-12	3.49	Y1-1	0.44	DHLS-4	0.36
Z1-3	0.75	Z1-8	0.66	Z1-13	1.44	Y1-2	1.35	DHLS-5	0.49
Z1-4	0.62	Z1-9	1.26	X6-1	0.39	DHLS-1	1.55	DHLS-6	0.61
Z1-5	0.22	Z1-10	1.11	X6-2	0.50	DHLS-2	10.00	DHLS-7	0.66

表3 银额盆地古生界过成熟烃源岩样品地球化学测试数据

Table 3 Geochemical data of over-mature source rock samples from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

$TOC/\%$	氯仿沥青“A”含量/%	岩石热解参数			$R_o/\%$
		$(S_1+S_2)/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$HI/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_{max}/^\circ\text{C}$	
0.22~10.00	0.002~0.014	0.01~0.45	1~41	383~600	2.55~4.52
1.30/25	0.003/25	0.12/25	9/25	527/25	4.20/25

注: 表中数据为 最小值~最大值
平均值/样品数。

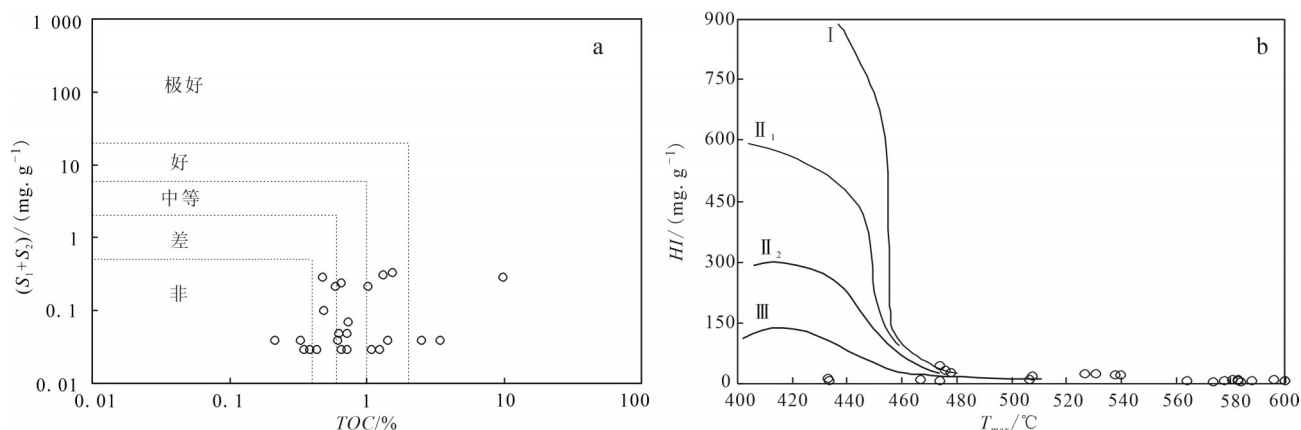


图3 银额盆地古生界过成熟烃源岩样品有机质丰度和类型特征

Fig. 3 Abundance and types of organic matter in over-mature source rock samples from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

a. TOC与 S_1+S_2 相关关系; b. HI- T_{max} 分类I. 腐泥型; II₁. 腐殖-腐泥型; II₂. 腐泥-腐殖型; III. 腐殖型

(有机质丰度评价标准据文献[5],有机质类型划分底图据文献[21].)

量(相对含量通常低于20%)和较高的非烃+沥青质含量(相对含量通常为70%~80%), II型干酪根介于I型干酪根和III型干酪根之间^[7]。本次烃源岩样品的非烃+沥青质含量为69.77%~97.25%,饱和烃含量为1.72%~16.28%,芳烃含量为1.03%~13.95%,极高的非烃+沥青质含量、极低的饱和烃含量使得依据抽提物族组成对有机质类型也不能做出有效判断(图4)。烃源岩干酪根显微组分中腐泥组的相对含量平均为52.61%,壳质组的相对含量平均为24.67%,镜质组的相对含量平均为22.50%,惰质组的相对含量平均为0.17%,参照前人的计算方法和评价标准^[15,31],类型指数为-16.7~79.2,有机质类型主要为II₁-II₂型(表4),判别出的有机质类型与烃源岩的沉积环境相符,表明干酪根显微组分有机质类型判别法对于过成熟烃源岩仍然有效。

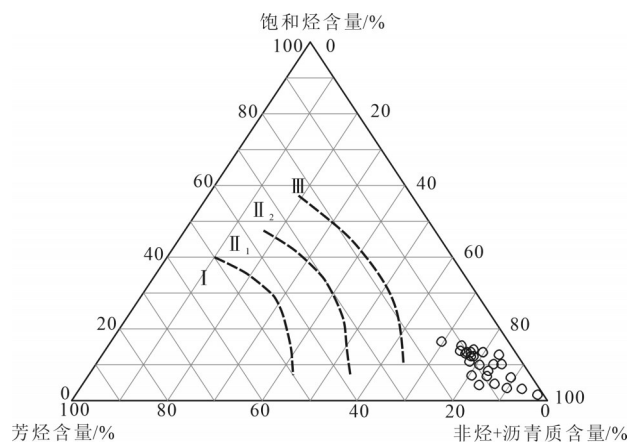


图4 银额盆地古生界过成熟烃源岩抽提物族组成与有机质类型

Fig. 4 Group compositions of EOM (extractable organic matter) and types of organic matter in over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

表4 银额盆地古生界过成熟烃源岩干酪根显微组分及其类型

Table 4 Macerals and the kerogen types of over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

样品编号	显微组分含量/%				类型指数	类型	样品编号	显微组分含量/%				类型指数	类型
	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组				腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组		
Z1-1	61	21	18	0	57.6	II ₁	Z1-10	73	10	17	0	64.7	II ₁
Z1-2	45	29	26	0	40.2	II ₁	Z1-11	0	47	53	0	-16.7	III
Z1-3	12	44	44	0	0.4	II ₂	Z1-12	2	47	51	0	-13.2	III
Z1-4	79	8	13	0	73.7	II ₁	Z1-13	2	57	41	0	0.2	II ₂
Z1-5	66	18	16	0	62.8	II ₁	X6-1	80	12	7	1	79.2	II ₁
Z1-6	71	15	14	0	68.2	II ₁	X6-2	75	17	7	0	78.5	II ₁
Z1-7	75	13	12	0	72.9	II ₁	X6-3	80	11	8	1	78.1	II ₁
Z1-8	74	12	14	0	69.7	II ₁	Y1-1	0	60	40	0	0.4	II ₂
Z1-9	74	11	15	0	68.3	II ₁	Y1-2	78	12	9	1	75.8	II ₁

2.3 有机质成熟度

烃源岩镜质体反射率 R_o 为2.55%~4.52%,平均为4.20%(表3),其中大于4.00%的占77.8%,表明烃源岩成熟度极高。岩石热解参数 T_{max} 为383~600℃,平均为527℃(表3), T_{max} 大于480℃的占77.85.0%,表明 T_{max} 存在着异常高的现象,图3b也能清楚地反映出这种异常。整体来看,虽然 T_{max} 存在着异常而对成熟度不能做出有效评价,但 R_o 作为成熟度评价常用参数对于过成熟烃源岩仍然有效^[13],指示着本研究所采集的烃源岩样品具有极高的热演化程度,为过成熟烃源岩。

3 过成熟烃源岩生物标志化合物特征

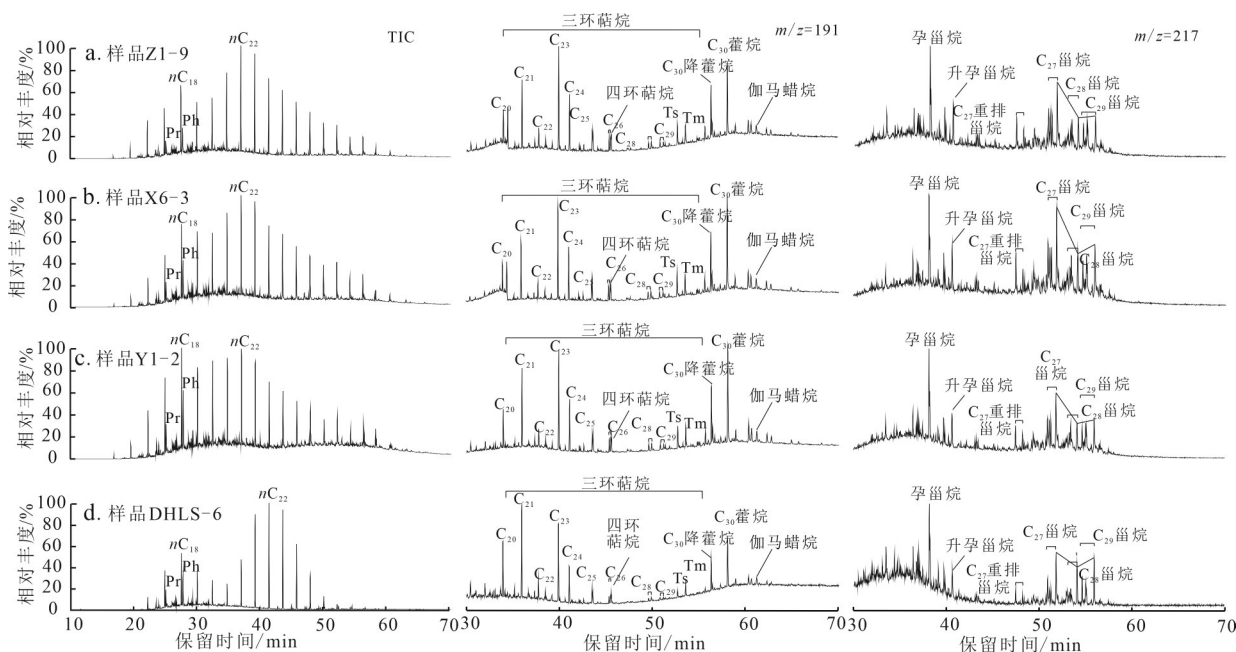
3.1 正构烷烃

烃源岩正构烷烃分布范围主要为 nC_{11} — nC_{35} ,其中 nC_{16} — nC_{29} 中等分子量正构烷烃含量占据优势(图5)。 $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 为0.24~1.78,平均为0.89; nC_{21+22}/nC_{28+29} 为1.24~14.18,平均为3.61。 $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 和 nC_{21+22}/nC_{28+29} 值变化范围较大,可能是由于部分样品的有机质丰度过低而导致的参数失真,剔除Z1-5,Z1-6,X6-1,Y1-1,DHLS-4和DHLS-5等6个低有机质丰度($TOC < 0.5\%$)样品后, $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 为0.66~1.43(平均为

0.89), nC_{21+22}/nC_{28+29} 为1.37~4.25(平均为3.61),表明烃源岩正构烷烃具有较为明显的重碳优势。

烃源岩正构烷烃的分布具有明显的“双峰型”的特征,前峰群的主峰碳数基本为 nC_{18} ,而后峰群的主峰碳数主要为 nC_{22} 或 nC_{25} ,前、后两个峰群之间的波谷所对应的碳数为 nC_{19} 或 nC_{21} 。参照包建平等^[26]建立的表征前、后两个峰群优势特征的参数 $FCPR$ (前峰群中的主峰碳与波谷碳峰面积的比值)和 $LCPR$ (后峰群中的主峰碳与波谷碳峰面积的比值),本研究中烃源岩正构烷烃的分布主要呈现“势均型”或“后峰型”的双峰型特征(图6)。在前人的相关研究中,也发现过成熟烃源岩和古油藏储层沥青正构烷烃的分布具有“双峰型”这一现象^[26],表明过成熟烃源岩正构烷烃“双峰型”分布特征是一个普遍现象。

一般认为,正构烷烃的双峰型常出现于中-低成熟度阶段的烃源岩或原油中, nC_{15} — nC_{21} 中、低分子量正构烷烃来源于水生生物,而 nC_{23} — nC_{35} 高分子量正构烷烃来源于高等植物^[32-33],正构烷烃的双峰型是混合母源输入的一个重要标志^[26,32]。但伴随热演化程度的增加,正构烷烃发生裂解,长链正构烷烃发生C—C键断裂而变成中、短链正构烷烃,正构烷烃的峰型前移、双峰型变得不明显或者消失^[32-33]。对于过成熟烃源岩存在正构烷烃双峰型异常现象的成因,前人认为海相古老地层过成熟烃源岩的正构烷烃双峰型源于富氢的菌藻类和富含长链脂族结构的混合母源输



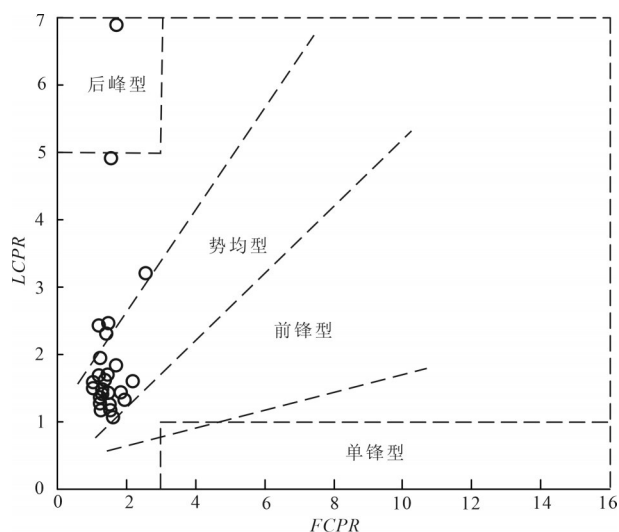


图6 银额盆地古生界过成熟烃源岩正构烷烃参数FCPR和LCPR特征(底图据文献[26])

Fig. 6 FCPR vs. LCPR for the normal alkanes in over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin (basemap from reference [26])

入、复杂的有机质赋存形式、有机质差异成熟作用、不同分布特征正构烷烃的叠置作用等^[26]。海-陆过渡相烃源岩的母质主要来源于高等植物和藻类等水生生物,混源特征更为明显,有机质赋存形式更为复杂性,有机质差异成熟作用更为强烈,过成熟烃源岩正构烷烃的双峰型应该也是源于复杂混源有机质正构烷烃的叠置作用。

3.2 类异戊二烯烷烃

姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)为最常见的类异戊二烯烷烃,尽管它们的丰度受成熟度、沉积环境等方面的影响,但这种影响并不显著,其依然是指示氧化还原环境的有效指标^[34-36]。一般认为,Pr/Ph<0.5代表着强还原环境,Pr/Ph为0.5~1.0指示为还原环境,Pr/Ph为1.0~2.0代表着弱还原-弱氧化环境,Pr/Ph>2.0指示为氧化环境^[32,37]。本次研究的烃源岩样品的Pr/Ph值为0.35~0.60,平均0.52,指示着烃源岩的具较强的还原沉积古环境(表2)。Ph/nC₁₈值为0.41~1.01,平均0.73;Pr/nC₁₇值为0.34~0.75,平均0.55;指示着烃源岩具有较好的有机质类型、较高的成熟度(图7)。

3.3 甾类化合物

鉴定出来的甾类化合物主要有孕甾烷、升孕甾烷、C₂₇规则甾烷、C₂₈规则甾烷、C₂₉规则甾烷和C₂₇重排甾烷,还有少量的C₂₉重排甾烷和C₃₀甾烷(图5)。烃源岩C₂₇—C₂₉规则甾烷基本以 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 异构体的含量

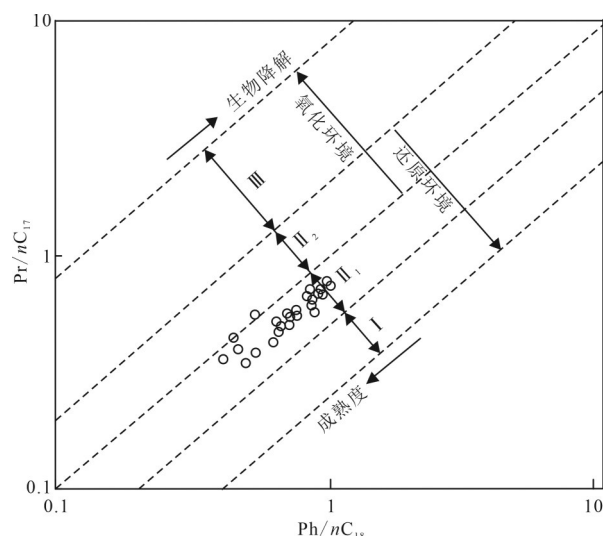


图7 银额盆地古生界过成熟烃源岩Ph/nC₁₈与Pr/nC₁₇相关关系(底图据文献[35])

Fig. 7 Ph/nC₁₈ vs. Pr/nC₁₇ in over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin (basemap from reference [35])

为最高,绝大多数样品的 $\alpha\alpha\alpha 20R$ -C₂₇、 $\alpha\alpha\alpha 20R$ -C₂₈和 $\alpha\alpha\alpha 20R$ -C₂₉规则甾烷的分布呈现不对称“L”字形,C₂₇甾烷/C₂₉甾烷比值平均为2.95,反应出母质来源以水生生物为主。重排甾烷/规则甾烷为0.08~0.20,平均为0.17,较高的重排甾烷相对含量指示烃源岩具有较高的成熟度。

规则甾烷异构化成熟度参数C₂₉甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 值为0.27~0.67,平均0.38,其中大于0.52的样品数仅为1;C₂₉甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20R+20S)$ 值为0.18~0.56,平均0.35,其中大于等于0.67的样品数也仅为1(表5)。烃源岩样品的C₂₉规则甾烷成熟度参数并不高,这与烃源岩样品的高成熟度相矛盾。为了探其原因,去除低丰度样品后重新统计,结果C₂₉甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 值平均为0.40,C₂₉甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20R+20S)$ 值平均为0.38,C₂₉规则甾烷成熟度参数仍然并不高(表5)。前人认为C₂₉甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 在0.67~0.71达到“平衡状态”、C₂₉甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20R+20S)$ 在0.52~0.55达到“平衡状态”^[18,38]。本研究中只有少数过成熟烃源岩样品达到或接近异构化终点,大多数样品的C₂₉规则甾烷成熟度参数值并不是太高,表明参数C₂₉甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20R+20S)$ 和C₂₉甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 在过成熟阶段可能会出现“逆转”,前人的研究也发现了类似的现象^[18]。

需要注意的是,本次研究的烃源岩普遍具有异常高的孕甾烷和升孕甾烷相对含量(图5),(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为0.04~0.39,平均为0.24(表5);(孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha 20R$ -C₂₉规则甾烷为0.46~

表5 银额盆地古生界过成熟烃源岩部分甾、萜类相关地球化学参数

Table 5 Selected geochemical parameters relative to the steroids and terpenoids for over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

样品	$C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$	$C_{29}20S/(20S+20R)$	重排甾烷/ 规则甾烷	(孕甾烷+升孕甾烷)/ 规则甾烷	C_{23} 三环萜烷/ C_{30} 藿烷	$C_{19}+C_{20}$ 三环 萜烷/藿烷	Ts/Tm	伽马蜡烷 指数
全部样品	0.27~0.67 0.38/25	0.18~0.56 0.35/25	0.08~0.20 0.17/25	0.04~0.39 0.24/25	0.20~1.57 0.88/25	0.04~0.55 0.23/25	0.36~1.96 1.05/25	0.12~0.23 0.17/25
剔除低丰度 样品	0.35~0.67 0.40/25	0.32~0.56 0.38/19	0.08~0.20 0.16/19	0.13~0.39 0.25/19	0.38~1.57 0.92/19	0.06~0.55 0.24/19	0.67~1.96 1.21/19	0.15~0.23 0.18/19

注: $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 和 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 为 C_{29} 规则甾烷异构化参数比; Ts 为 $18\alpha(H)-22,29,30$ -三降藿烷; Tm 为 $17\alpha(H)-22,29,30$ -三降藿烷; 伽马蜡烷指数为伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷。

表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值/样品数}}$ 。

41.98, 平均为 3.39。类似的现象在前人的研究中也报道, 赵孟军等^[21]的研究揭示南江盆地中、下泥盆统过成熟烃源岩具有较高的孕甾烷相对含量, 梁狄刚等^[17]也发现中国南方高-过成熟海相烃源岩普遍具有异常高的孕甾烷相对含量, 表明异常高孕甾烷和升孕甾烷相对含量是高-过成熟烃源岩在生物标志化合物方面呈现的又一特性。一般认为, 孕甾烷主要来自生物激素孕甾醇和孕甾酮、热演化中规则甾烷的侧链断裂等^[39], 黄第藩等认为原始沉积输入的孕甾烷仅占 10%~20%, 而热解生成的孕甾烷占 80%~90%, 在成熟阶段热降解孕甾烷将掩盖其原始输入量的差别^[39]。过成熟烃源岩经历了漫长的高温演化过程, 热降解作用持续而彻底, 规则甾烷发生侧链断裂形成的大量的孕甾烷, 其结果是规则甾烷的相对含量降低, 而孕甾烷呈现出异常高的相对含量。

3.4 萜类化合物

检测出的萜类化合物较为丰富, 主要有三环萜烷、五环三萜烷(主要包括藿烷系列化合物和伽马蜡烷)、二环倍半萜烷等, 其中低碳数的三环萜烷的相对含量占绝对优势, 五环三萜烷含量中等, 二环倍半萜烷含量极少(图5)。

三环萜烷较为完整, C_{19} — C_{30} 三环萜烷均有发现, 三环萜烷以 C_{21} 或 C_{23} 为主峰。 C_{23} 三环萜烷/ C_{30} 藿烷为 0.20~1.57, 平均为 0.88(表5); (C_{19} 三环萜烷+ C_{20} 三环萜烷)/藿烷为 0.04~0.55, 平均为 0.23。前人认为, 三环萜烷的分布受沉积环境的影响较大, 如肖洪等^[40]建立了利用 C_{19} — C_{23} 三环萜烷系列化合物来区分海相/咸水湖相、淡水湖相、河流/三角洲以及沼泽相等 4 种不同沉积环境的图版。但三环萜烷高相对含量的特征在其他地区的过成熟烃源岩中也有发现, 特别是中国南方古生界海相烃源岩^[17], 表明成熟度对萜类化

合物的分布也有明显的影响, 高三环萜烷相对含量是过成熟烃源岩的一个普遍现象。这种现象的成因未见报道, 可能在有机质热演化过程中存在着热降解作用使得萜烷类的高碳环数化合物向同系物中的低碳环数化合物转化, 这种机制使得过成熟烃源岩的萜类中低碳环数化合物占据优势。

藿烷系列化合物的碳数分布范围为 C_{29} — C_{35} , 以 $17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ — C_{30} 藿烷为主峰, C_{31} — C_{35} 升藿烷含量依次降低。藿烷化合物中的 Ts 和 Tm 是常用的成熟度指标, 因为 Ts 是比较稳定的化合物, 而 Tm 则与热演化有关, 随着热演化程度的增加, Ts/Tm 值逐渐增大^[32,34]。本次样品的 Ts/Tm 值 0.36~1.96, 平均为 1.05。剔除低丰度样品后 Ts/Tm 值 0.67~1.96, 平均为 1.21(表5), 较高的 Ts/Tm 值指示着烃源岩具有较高的成熟度。伽马蜡烷是有效的沉积环境指标, 高伽马蜡烷含量常被作为强还原超盐度环境的指示, 而且与水体的分层有关^[37,41-42]。本次烃源岩样品的伽马蜡烷指数为 0.12~0.23, 平均 0.17(表5)。无论是所有样品的统计, 还是剔除低丰度样品后的统计, 烃源岩伽马蜡烷含量并不高(表5), 而 Pr/Ph 值指示烃源岩的沉积环境为较强的还原环境, 可能预示本研究过成熟烃源岩具有不明显的沉积水体分层。

3.5 芳烃化合物

烃源岩中的芳烃具有含量较高、热稳定性较高、分布较为广泛等特征, 对有机质的母质来源、沉积环境、成熟度等均有很好的指示作用^[41,43-45]。本次烃源岩样品共检测出 16 个系列、169 种芳烃化合物, 这 16 个系列分别是萘系列、蒽系列、菲系列、苯并蒽系列、䓬系列、苯并䓬系列、苯并芘系列、芘系列、二苯并噻吩系列、联苯系列、二苯并呋喃系列、茚系列、萤蒽系列、苯并茚系列、芘系列和三芳甾烷系列。从各系列化合物相对含量来

看,三环菲系列化合物的相对含量最高。芳烃化合物的宏观组成也对成熟度也有一定的指示作用,未成熟-低成熟度的原油/烃源岩,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/烃源岩,芳烃化合物中二环或三环化合物占优势^[46-47]。本次烃源岩样品芳烃中低环的非系列的相对含量占据绝对优势,也指示着烃源岩具有很高的热演化程度(图8)。过成熟烃源岩芳烃化合物中低碳环数化合物占据优势的成因未见报道,可能在芳烃化合物热演化过程中也存在着同样的机制,热降解作用使得芳烃类化合物中的高碳环数化合物向同系物中低碳环数化合物转化,使得过成熟烃源岩芳烃化合物中低碳环数化合物占据优势。

芳烃中“二苯并呋喃、二苯并噻吩与芴”系列化合物的相对含量对烃源岩的沉积环境有很好的指示作用,二苯并噻吩的高相对含量指示着强还原环境,二苯并呋喃的较高相对含量则意味着较强的氧化性沉积环境^[42,48-50]。从这3类系列化合物的相对含量来看,绝大多数烃源岩样品中二苯并噻吩的相对含量占据优势,表明烃源岩的沉积古环境为强还原环境(图9)。

4 过成熟烃源岩原始生烃潜力

4.1 有机碳构成特征

过成熟烃源岩基础地球化学特征表明其有机碳中

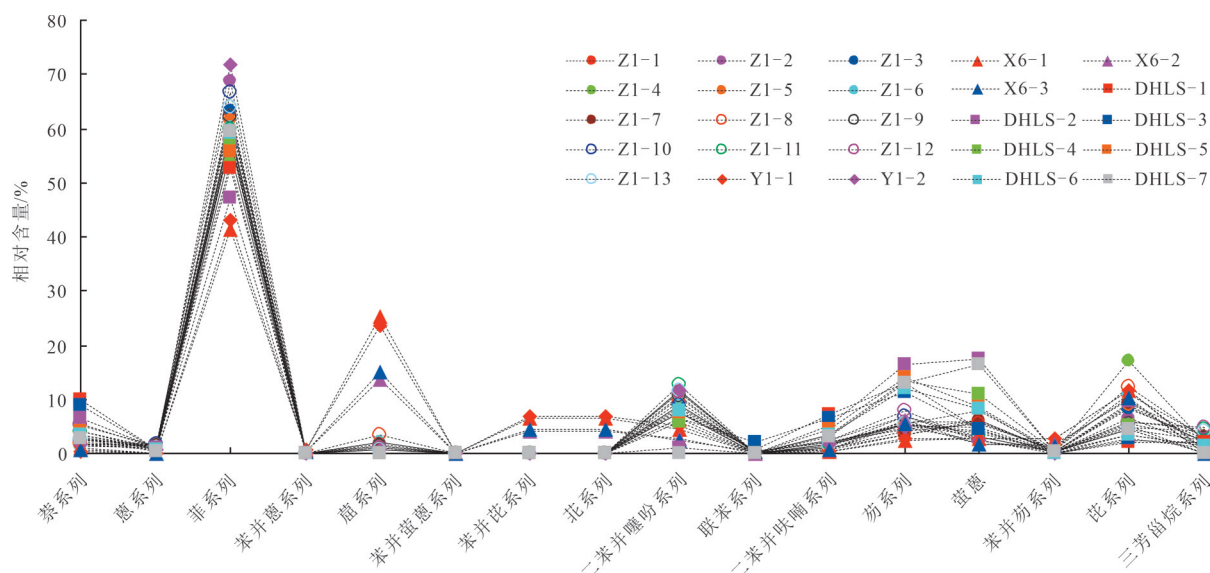


图8 银额盆地古生界过成熟烃源岩样品芳烃系列相对含量

Fig. 8 Relative content of aromatic series in over-mature source rock samples from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

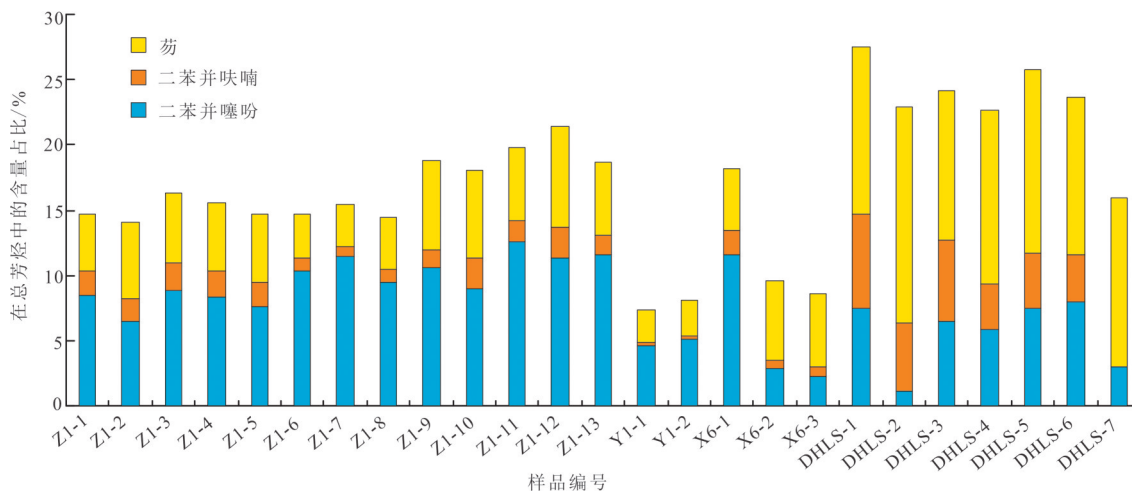


图9 银额盆地古生界过成熟烃源岩芳烃二苯并呋喃、二苯并噻吩与芴系列含量分布特征

Fig. 9 Distribution of fluorine, dibenzothiophene and dibenzofuran in over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

可热解的有机碳含量极低,为了定量分析可热解的有机碳在总有机碳中的占比,本研究提出了“有机碳构成”的概念,即根据有机碳能否热解定义有机碳构成包括有效碳和无效碳。有效碳是在足够的温度和时间作用下可热解、参与生烃反应、可转化为油气的有机碳,其绝对含量随着烃源岩热演化程度的增加而递减^[51-53]。无效碳也叫“死碳”,是在烃源岩热演化过程中不参与生烃反应、不能转化为烃类,即使烃源岩经历了很高的热演化阶段,其绝对含量在烃源岩热演化过程中也是不变的^[54]。同时,本研究还建立了一种低成本、快速有效的计算有机碳构成的方法,即基于岩石热解资料定量计算烃源岩的残余有效碳相对含量、残余无效碳相对含量、原始有效碳相对含量和原始无效碳相对含量。

岩石热解分析的基本原理是将烃源岩岩石样品粉碎后置于热解炉中,以一定的升温速率(如 20 °C/min)加热到一定的温度(如 600 °C),使得岩石中的烃类、沥青质、干酪根在不同温度下挥发、裂解,并从岩石中脱离出来,产物由载气携带进入检测器检测,由此得到 S_0 , S_1 , S_2 , S_4 和 $T_{\max}$ 等参数用于评价烃源岩^[55]。参数 S_0 代表生油岩中吸附的 C_1 以前气态烃,也就是生成的气态烃在生油岩中的残留量。参数 S_1 表示生油岩已生成未运移的 C_8 — C_{33} 液态烃残留量,也就是生成的油在生油岩中的残留量。参数 S_2 代表生油岩中干酪根热解烃的总量。参数 S_4 表示生油岩中残余烃的总量,也就是不可热解烃的量。 S_0 , S_1 , S_2 和 S_4 的单位为 mg/g 或 kg/t。根据热解参数的含义,对其进行派生运算便可计算烃

源岩的有机碳构成。如有效碳含量 PC 的计算公式为 $(S_0+S_1+S_2) \times 0.083$, 单位为%;无效碳含量 S_{TOC} 的计算公式为 $S_4 \times 0.083$, 单位为%;如果用 C_{ot} 表示基于热解参数计算出的总有机碳含量,它的计算公式为 $(S_0+S_1+S_2+S_4) \times 0.083$, 单位为%。用 $S_{\text{TOC}}/C_{\text{ot}}$ 来表征烃源岩残余有机碳(现今有机碳)中无效碳的含量,用 PC/C_{ot} 来表征残余有机碳中有效碳的含量。本次研究的 25 个烃源岩样品的残余有机碳构成计算结果见表 6, $S_{\text{TOC}}/C_{\text{ot}}$ 为 92.64 % ~ 10.00 %, 平均高达 98.06 %, PC/C_{ot} 为 0 ~ 7.36 %, 平均仅为 1.94 %, 表明过成熟烃源岩的有机碳几乎都为不可热解的“死碳”,而有效碳仅占极小的一部分(图 10a)。

4.2 原始生烃潜力

过成熟烃源岩的有效碳占比极小,可能并不代表烃源岩品质差,而是绝大多数有效碳在经历了热解过程后以油气的形式被排出^[14,56-59]。对本次样品进行有机碳恢复,原始有机碳恢复系数参照庞雄奇等^[14]的研究成果,Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型母质的高-过成熟泥质岩烃源岩 TOC 含量的恢复系数分别为 3.0、2.0 和 1.4。由于本次研究的烃源岩样品为泥岩,有机质类型为Ⅱ型,取恢复系数 2.0, C_{ot} 乘以系数 2.0 即可推算出原始总有机碳含量 $C_{\text{ot原始}}$ 。结果显示,25 个过成熟样品的 $C_{\text{ot原始}}$ 为 0.16 % ~ 19.99 %, 平均为 2.07 %, 表明银额盆地古生界烃源岩原始有机质丰度较高,以好-极好的烃源岩为主,具有较高的生烃潜力。生烃模拟显示:Z1 井古生界下部烃源岩生油高峰期从二叠纪末期一直持续到

表 6 银额盆地古生界过成熟烃源岩岩石热解参数与有机碳构成

Table 6 Rock pyrolysis parameters and organic carbon composition of over-mature source rocks from the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8
Z1-1	0.000 7	0.003 8	0.022 3	6.320 5	0.38	99.62	50.19	49.81	X6-1	0.000 8	0.043 2	0.056 2	8.148 9	1.17	98.69	50.66	49.34
Z1-2	0.000 5	0.011 5	0.028 2	7.394 2	0.49	99.51	50.24	49.76	X6-2	0.022 9	0.174 6	0.279 2	9.564 3	4.80	95.32	52.34	47.66
Z1-3	0.000 2	0.001 6	0.025 1	9.160 4	0.26	99.61	50.20	49.80	X6-3	0	0.020 5	0.147 3	14.455 0	1.15	98.85	50.58	49.42
Z1-4	0.001 1	0.002 2	0.044 7	16.524 1	0.29	99.78	50.11	49.89	Y1-1	0	0	0.011 3	6.235 3	0.19	100.00	50.00	50.00
Z1-5	0.000 7	0.011 6	0.068 0	2.363 4	3.45	96.55	51.72	48.28	Y1-2	0	0	0.053 3	2.464 5	1.91	98.09	50.96	49.04
Z1-6	0.001 0	0.012 9	0.034 7	11.272 6	0.43	99.57	50.21	49.79	DHLS-1	0.030 0	0.070 0	0.270 0	18.340 8	0.02	98.02	50.99	49.01
Z1-7	0.000 9	0.078 2	0.064 1	11.370 8	1.26	98.74	50.63	49.37	DHLS-2	0.300 0	0.070 0	0.220 0	119.843 7	0.00	99.51	50.24	49.76
Z1-8	0.000 8	0.012 9	0.132 0	1.823 5	7.36	92.64	53.68	46.32	DHLS-3	0.010 0	0.020 0	0.030 0	8.726 7	0.01	99.32	50.34	49.66
Z1-9	0.000 8	0.001 9	0.023 8	8.361 8	0.29	99.71	50.14	49.86	DHLS-4	0.020 0	0.010 0	0.020 0	4.246 4	0.01	98.84	50.58	49.42
Z1-10	0.000 7	0.005 3	0.078 1	7.283 9	1.14	98.86	50.57	49.43	DHLS-5	0.030 0	0.090 0	0.200 0	5.589 6	0.05	94.59	52.71	47.29
Z1-11	0.000 5	0.009 8	0.040 1	1.278 9	3.64	96.36	51.82	48.18	DHLS-6	0.020 0	0.050 0	0.170 0	7.054 0	0.03	96.71	51.65	48.35
Z1-12	0.000 9	0.008 7	0.051 5	11.078 8	0.54	99.46	50.27	49.73	DHLS-7	0.010 0	0.080 0	0.160 0	7.725 9	0.03	96.87	51.57	48.43
Z1-13	0.000 4	0.004 6	0.033 7	0.942 3	3.70	96.30	51.85	48.15									

注:1为 S_0 , mg/g; 2为 S_1 , mg/g; 3为 S_2 , mg/g; 4为 S_4 , mg/g; 5为 PC/C_{ot} , %; 6为 $S_{\text{TOC}}/C_{\text{ot}}$, %; 7为 $PC_{\text{原始}}/C_{\text{ot原始}}$, %; 8为 $S_{\text{TOC原始}}/C_{\text{ot原始}}$, %。

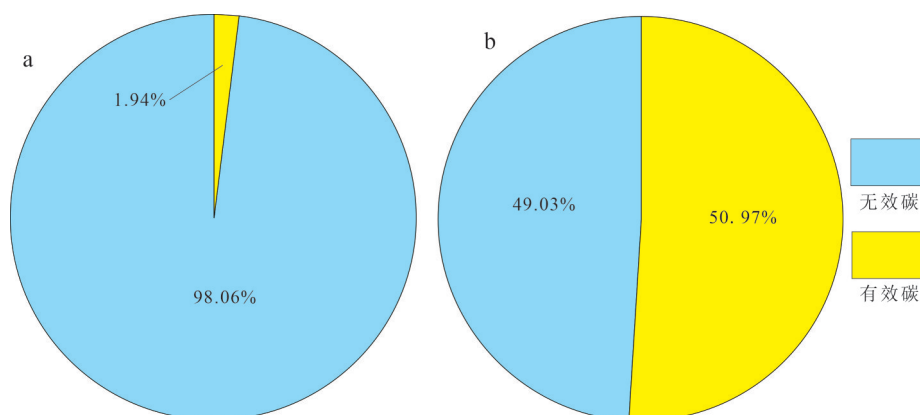


图10 银额盆地古生界过成熟烃源岩残余和原始有机碳构成饼状图

Fig. 10 Pie diagrams showing the residual and primary organic carbon composition of over-mature source rocks from the Paleozoic ,

Yingen-Ejinaqi Basin

a. 残余有机碳构成; b. 原始有机碳构成

早白垩世,最高生油速率为420 mg/g;生气高峰期早白垩世至晚白垩世,最高生气速率为290 mg/g;古生界上部烃源岩的生油高峰期为早白垩世至晚白垩世,最高生油速率亦为420 mg/g;上部烃源岩大规模生气从晚白垩世开始,目前尚未达到生气高峰,最高生气速率为90 mg/g。因此,古生界过界烃源岩具有较高、持续时间较长的生油气潜力(图11)。

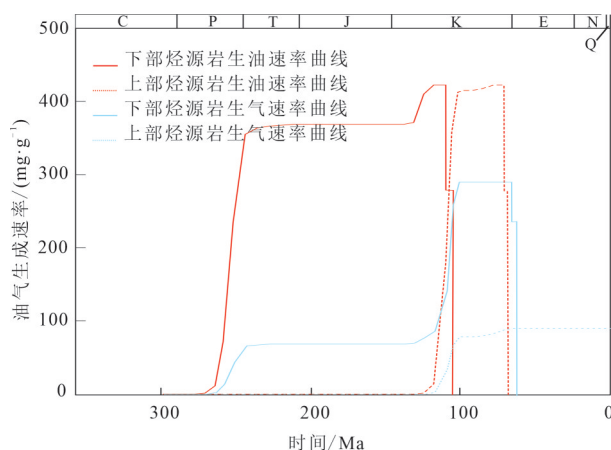


图11 银额盆地Z1井古生界烃源岩生烃速率演化历史

Fig. 11 Evolution of hydrocarbon generation rate of the Paleozoic source rocks in Well Z1, Yingen-Ejinaqi Basin

在烃源岩生排烃过程中,无效碳不参与生烃反应,也就是 S_{TOC} 没有损失,原始有机碳中的无效碳 $S_{\text{TOC原始}}$ 等于 S_{TOC} ,原始有机碳中的有效碳 $PC_{\text{原始}}$ 等于 $C_{\text{ot原始}}$ 减去 $S_{\text{TOC原始}}$ 。因此, $S_{\text{TOC原始}}/C_{\text{ot原始}}$ 就可以表征过成熟烃源岩原始总有机碳中无效碳的含量, $PC_{\text{原始}}/C_{\text{ot原始}}$ 就可以表征过成熟烃源岩原始总有机碳中有效碳的含量。本研究25个过成熟烃源岩样品的 $S_{\text{TOC原始}}/C_{\text{ot原始}}$ 为46.32%~50.00%,平均为49.03%;而 $PC_{\text{原始}}/C_{\text{ot原始}}$ 为50.00%~

53.68%,平均为50.97%(表7)。表明原始有机碳中有效碳有很大的占比,有效碳甚至多于无效碳(图10b),这表明烃源岩类型较好。

5 结论与认识

1) 银额盆地中部苏红图坳陷钻井和盆地西部野外露头古生界过成熟烃源岩地球化学特征显示,烃源岩TOC含量平均为1.31%,有机质类型为 II_1-II_2 型, R_o 平均为4.20%,烃源岩为残余有机碳含量较低、混合型干酪根的过成熟烃源岩。

2) 过成熟烃源岩普遍存在的一些生物标志化合物特征及其成因如下:正构烷烃普遍具有双峰型特征,这种现象可能源于复杂混源有机质正构烷烃的叠置作用;甾类化合物中孕甾烷(含升孕甾烷)具有异常高的相对含量,这是由于热降解作用导致规则甾烷发生侧链断裂形成大量的孕甾烷所致;另外一些生物标志化合物特征如萜类化合物中三环萜烷的相对含量较高、芳烃化合物中低碳环数化合物占据优势等,可能源于热降解作用使得萜烷类和芳烃类化合物中的高碳环数化合物向低碳环数化合物转化。

3) 提出了“有机碳构成”的概念,建立了基于岩石热解资料计算有机碳构成的方法,研究结果表明本研究中过成熟烃源岩可热解的有效碳仅占极小的一部分。但过成熟烃源岩原始总有机碳含量平均为2.07%,且该套烃源岩具有持续时间长、产率较高的生烃特征,具有较高的生烃潜力。

参 考 文 献

[1] 李天军,黄志龙,王瑞,等. 银根—额济纳旗盆地天草凹陷下

- 白垩统巴音戈壁组有效烃源岩地球化学特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 957-972.
- Li Tianjun, Huang Zhilong, Wang Rui, et al. Geochemical characteristics and formation environment of effective hydrocarbon source rock of the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in Tiancao Sag, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 957-972.
- [2] 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.
- [3] 任来义,贺永红,陈治军,等. 银额盆地哈日凹陷巴音戈壁组流体包裹体特征与油气成藏期次[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 709-720.
- en Laiyi, He Yonghong, Chen Zhijun, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation periods of Bayingebi Formation in Hari Sag, the Yingen-Ejinaqi Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 709-720.
- [4] 卢进才,陈高潮,李玉宏,等. 银额盆地及其邻区石炭系—二叠系油气资源远景调查主要进展及成果[J]. 中国地质调查, 2014, 1(2): 35-44.
- Lu Jincai, Chen Gaochao, Li Yuhong, et al. Main progress and achievements of the Permo-Carboniferous petroleum prospective survey in Yine Basin and its surrounding areas [J]. Geological Survey of China, 2014, 1(2): 35-44.
- [5] 魏建设,姜亭,王宝文,等. 银额盆地居延海坳陷吉格达凹陷石炭系—二叠系烃源岩生物标志化合物特征及其意义[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 273-283.
- Wei Jianshe, Jiang Ting, Wang Baowen, et al. The biomarker characteristics and its significance of the Carboniferous-Permian source rocks in Jigeda Sag of Juyanhai Depression in Yin'er Basin [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(3): 273-283.
- [6] 吕程,张敏,李洪波. 内蒙古银额盆地居延海坳陷0-1井烃源岩地球化学特征[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(29): 13-17.
- Lv Cheng, Zhang Min, Li Honhbo. Geochemistry characteristics of hydrocarbon source rocks in well 0-1 of Juyanhai depression in Yin'e Basin [J]. Journal of the Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(29): 13-17.
- [7] 刘晓翔. 银额盆地居延海坳陷石炭—二叠系泥页岩特征及勘探前景[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Liu Xiaoxiang. The characteristics and exploration prospects of the Carboniferous-Permian mud shale in Juyanhai Depression, Yin'e Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [8] 中国石油天然气总公司. 陆相烃源岩地球化学评价方法: SY/T5735-1995[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- China National Petroleum Company. Geochemical evaluation standard of terrestrial hydrocarbon source rock: SY/T5735-1995 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [9] 杨熙雅,刘成林,刘文平,等. 四川盆地富顺—永川地区龙马溪组页岩有机孔特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1321-1333.
- Yang Xiya, Liu Chenglin, Liu Wenping, et al. Characteristics of and factors influencing organic pores in the Lower Silurian Longmaxi Formation, Fushun-Yongchuan area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1321-1333.
- [10] 洪剑,唐玄,张聪,等. 中扬子地区龙马溪组页岩有机质孔隙发育特征及控制因素——以湖南省永顺地区永页3井为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1060-1072.
- Hong Jian, Tang Xuan, Zhang Cong, et al. Characteristics and controlling factors of organic-matter pores in Longmaxi Formation shale, Middle Yangtze Region: A case study of Well YY3 [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1060-1072.
- [11] 吴诗倩,郭建华,李智宇,等. 中国南方海相地层牛蹄塘组页岩“甜点段”识别和优选[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1048-1059.
- Wu Shiqing, Guo Jianhua, Li Zhiyu, et al. Identification and optimization of shale gas “sweet spots” in marine Niutitang Formation, South China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1048-1059.
- [12] 徐亮,杨威,姜振学,等. 四川盆地川西坳陷三叠系须家河组页岩有机孔演化及成因[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 325-340.
- Xu Liang, Yang Wei, Jiang Zhenxue, et al. Evolution and genesis of organic pores in Triassic Xujiahe Formation shale, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 325-340.
- [13] 李蔚洋. 中扬子地区古生界高成熟—过成熟海相烃源岩评价指标浅析[J]. 河北地质大学学报, 2017, (2): 10-14.
- Li Weiyang. Research on the evaluation criterion of high-over-mature marine-source rock in the middle Yangtze Region [J]. Journal of Hebei GEO University, 2017, (2): 10-14.
- [14] 庞雄奇,李倩文,陈践发,等. 含油气盆地深部高过成熟烃源岩古 TOC 恢复方法及其应用[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 769-788.
- Pang Xiongqi, Li Qianwen, Chen Jianfa, et al. Recovery method of original TOC and its application in source rocks at high-mature-over-mature stage in deep petroliferous basins [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(6): 769-788.
- [15] 龚建明,张莉,陈小慧,等. 青藏高原原鸟丽冻土区过成熟烃源岩原始有机质类型讨论[J]. 西北地质, 2014, 47(2): 208-215.
- Gong Jianming, Zhang Li, Chen Xiaohui, et al. Discussion on organic types of over-mature source rocks in Wuli Permafrost zone of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(2): 208-215.
- [16] 李春鹏,隋桂梅,刘志国,等. 成熟—过成熟烃源岩有机质类型识别[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 219-223.
- Li Chunpeng, Sui Guimei, Liu Zhiguo, et al. Organic type identification for mature and postmature source rock [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 219-223.
- [17] 梁狄刚,陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 8-14.
- Liang Digang, Chen Jianping. Oil-source correlations for high and over-matured marine source rocks in South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 8-14.
- [18] 刘四兵,沈忠民,朱宏权,等. 川西坳陷高成熟煤系烃源岩分子成熟度参数的异常分布[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(2): 1-6.
- Liu Sibing, Shen Zhongmin, Zhu Hongquan, et al. The abnormal distribution of molecular maturity parameters of coal measure rocks in high maturity in west Sichuan Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(2): 1-6.
- [19] 李颖,朱扬明,郝芳,等. 四川盆地北部上三叠统须家河组高成熟煤系烃源岩芳烃热演化与应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(7): 953-962.
- Li Ying, Zhu Yangming, Hao Fang, et al. Thermal evolution and applications of aromatic hydrocarbons in highly mature coal-bea-

- ring source rocks of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northern Sichuan Basin [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2015, 45 (7): 953-962.
- [20] 王保忠,王传尚,汪啸风,等. 海相高过成熟页岩芳烃特征及页岩气意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3705-3716.
Wang Baozhong, Wang Chuanshang, Wang Xiaofeng, et al. Characteristics of aromatic compounds in high-over matured marine shale and its significance to shale gas [J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3705-3716.
- [21] 赵孟军,赵陵,张水昌,等. 南盘江盆地主要烃源岩地球化学特征研究[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 162-167.
Zhao Mengjun, Zhao Ling, Zhang Shuichang, et al. Geochemical characteristics of marine source rocks in the Nanpanjiang Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(2): 162-167.
- [22] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 655-672+683.
Ma Yongsheng, Li Maowen, Cai Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 655-672+683.
- [23] 张丽洁,麦碧娴,汪本善,等. 楚雄盆地高成熟煤成烃源岩中原始有机质丰度和原始产烃潜力的恢复[J]. *地球化学*, 1996, 25 (4): 339-345.
Zhang Lijie, Mai Bixian, Wang Benshan, et al. Reconstruction of original organic matter abundance and its hydrocarbon-generating potentialities in a high mature coal-bearing strata in Chuxiong Basin [J]. *Geochimica*, 1996, 25(4): 339-345.
- [24] 程顶胜,郝石生,王飞宇. 高过成熟烃源岩成熟度指标—镜状体反射率[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(1): 25-28.
Cheng Dingsheng, Hao Shisheng, Wang Feiyu. Reflectance of vitrinite-like macerals, a possible thermal maturity index for high/over-matured source rocks of the Lower Paleozoic [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(1): 25-28.
- [25] 王飞宇,何萍,高岗,等. 下古生界高过成熟烃源岩中的镜状体[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1995, 19(S): 25-30.
Wang Feiyu, He Ping, Gao Gang, et al. Vitrinite-like macerals in Chinese Early Palaeozoic source rocks [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1995, 19(S): 25-30.
- [26] 包建平,斯春松,蒋兴超,等. 黔北坳陷过成熟烃源岩和固体沥青中正构烷烃系列的双峰态分布[J]. *沉积学报*, 2016, 34(1): 181-190.
Bao Jianping, Si Chunsong, Jiang Xingchao, et al. The bimodal distributions of n-alkanes in the post-mature marine source rocks and solid bitumen from the northern Guizhou Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(1): 181-190.
- [27] 岩石中可溶有机物及原油族组分分析:SYT5119-2008[S]. 北京:石油工业出版社, 2008.
Analysis method for fractions of rock extract and crude oil: SYT5119-2008 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [28] 气相色谱质谱法测定沉积物和原油中生物标志物:GB/T 18606-2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
The test method for biomarkers in sediment and crude oil by GC-MS: GB/T 18606-2017 [S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [29] 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.
- [30] 郭立言,顾信章. 热解技术在我国生油岩研究中的应用[J]. *石油学报*, 1986, 7(2): 13-19.
Wu Liyan, Gu Xinzhang. The application of pyrolysis technique in source rock research [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1986, 7(2): 13-19.
- [31] 孔庆芬. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机显微组分特征[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4): 163-166.
Kong Qingfen. The organic maceral characteristic of Yanchang source rock in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(4): 163-166.
- [32] 卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 2018: 200-202.
Lu Shuangfang, Zhang Min. Oil and gas geochemical [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 200-202.
- [33] 刘舵,谢春勤,陈治军,等. 正构烷烃分布特征在确定烃源岩生源构成应用中的有效性[J]. *断块油气田*, 2019, 26(1): 42-47.
Liu Duo, Xie Chunqin, Chen Zhijun, et al. Effectiveness of the n-alkanes distribution on determining parent material composition of hydrocarbon source rock [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(1): 42-47.
- [34] 王炳凯,冯乔,田方正,等. 新疆准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. *地质通报*, 2017, 36 (2/3): 304-313.
Wang Bingkai, Feng Qiao, Tian Fangzheng, et al. The characteristics and significance of biomarker compounds in the Permian Lucaogou Formation hydrocarbon source rock on the southern margin of the Junggar Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36 (2/3): 304-313.
- [35] 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 Haisi sag, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2018, 38(12): 69-81.
- [36] 张亚雄. 鄂尔多斯盆地中部地区三叠系延长组7段暗色泥岩烃源岩特征[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1089-1097.
Zhang Yaxiong. Source rock characterization: The dark mudstone in Chang 7 Member of Triassic, central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1089-1097.
- [37] 张宇龙,范洪海,蔡煜琦,等. 鄂尔多斯盆地黄陵地区直罗组有机地球化学特征及其与铀成矿关系[J]. *地质学报*, 2016, 90 (12): 3408-3423.
Zhang Yulong, Fan Honghai, Cai Yuqi, et al. The organic geochemical characteristic of the Zhiluo Formation and its relationship with uranium mineralization in Huangling area, Ordos Basin [J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3408-3423.
- [38] Seifert W K, Moldowan J M. Use of biological markers in petroleum exploration [J]. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 24, 261-290.
- [39] 黄第藩,张大江,李晋超. 论4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. *石油勘探与开发*, 1989, (3): 8-15.
Huang Difan, Zhang Dajiang, Li Jinchao. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, (3): 8-15.
- [40] 肖洪,李美俊,杨哲,等. 不同环境烃源岩和原油中C₁₉~C₂₃三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. *地球化学*, 2019, 48 (2): 161-170.
Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, et al. Distribution patterns and geochemical implications of C₁₉-C₂₃ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments [J]. *Geochimica*, 2019, 48(2): 161-170.

- [41] 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.
- [42] 杨福林,云露,王铁冠,等. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 851-861.
Yang Fulin, Yun Lu, Wang Tieguan, et al. Geochemical characteristics of Cambrian source rocks in the Tarim Basin and oil-source correlation with typical marine crude oil [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 851-861.
- [43] 刘洪军,秦黎明,张枝焕. 准噶尔盆地西北部和什托落盖盆地侏罗系烃源岩芳烃分布特征及地球化学意义[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1104-1115.
Liu Hongjun, Qin Liming, Zhang Zhihuan. Geochemical significance and distribution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons from Jurassic source rocks in the Heshituoluogai Basin, northwest Junggar [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23 (6): 1104-1115.
- [44] 贺训云,姚根顺,蔡春芳,等. 黔南坳陷油苗芳烃地球化学特征及意义[J]. 地球化学, 2012, 41(5): 442-451.
He Xunyun, Yao Genshun, Cai Chunfang, et al. Aromatic hydrocarbons distribution in oil seepages from the southern Guizhou Depression, SW China: Geochemical characteristics and geological implications[J]. Geochimica, 2012, 41(5): 442-451.
- [45] 常象春,王铁冠,陶小晚,等. 哈拉哈塘凹陷奥陶系原油芳烃生物标志物特征及油源[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 175-183.
Chang Xiangchun, Wang Tieguan, Tao Xiaowan, et al. Aromatic biomarkers and oil source of the Ordovician crude oil in the Hala-hatang Sag, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 175-183.
- [46] 许婷,侯读杰,曹冰,等. 东海盆地西湖凹陷陆相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): 182-191.
- [47] 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]. 沉积学报, 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.
- [48] Li M J, Wang T G, Zhong N N, et al. Ternary diagram of fluorines, dibenzothiophenes and dibenzofurans: Indicating depositional environment of crude oil source rocks [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2013, 31(4): 569-588.
- [49] 蒙炳坤,周世新,李靖,等. 柴达木盆地西北部原油芳烃分子标志化合物分布特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(5): 738-753.
Meng Bingkun, Zhou Shixin, Li Jing, et al. Distribution characteristics and significance of the aromatic hydrocarbons molecular biomarker in crude oil from the northwestern Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(5): 738-753.
- [50] 姜德民,季长军. 羌塘盆地胜利河油页岩芳烃分布特征及意义[J]. 地质找矿论丛, 2020, 35(2): 197-203.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Gao Daling, et al. Distribution characteristic of aromatic hydrocarbon and the significance of Sheng-lihe oil shale in Qiangtang Basin [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2020, 35(2): 197-203.
- [51] Cooles G P, Mackenzie A S, Quigley T M. Calculation of petroleum masses generation and expelled from source rocks [J]. Advance in organic geochemistry, 1986, 20: 235-245.
- [52] 杨晓兰. 埃及西沙漠盆地中生界烃源岩特征及剩余资源分布[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 423-433.
Yang Xiaolan. Geochemical characteristics of the Mesozoic source rocks and the remaining resources in the Western Desert Basin, Egypt [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 423-433.
- [53] 贾建亮,刘招君,孟庆涛,等. 中国陆相油页岩含油率与总有机碳的响应机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 368-377.
Jia Jianliang, Liu Zhaojun, Meng Qingtao, et al. Response mechanism between oil yield and total organic carbon of non-marine oil shale in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 368-377.
- [54] 肖丽华,孟元林,高大岭,等. 地化录井中一种新的生、排烃量计算方法[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 98-102.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Gao Daling, et al. A new calculation method for hydrocarbon generation and discharge amount in geochemical logging [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20 (1): 98-102.
- [55] 靳军,李二庭,杨禄. 油藏地球化学基础与应用——以新疆油田玛湖区块为例[M]. 北京:中国石化出版社, 2020: 17-18.
Jin Jun, Li Erting, Yang Lu. Reservoir geochemistry and its application: A case study of Mahu block in Xinjiang oilfield [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020: 17-18.
- [56] 陈学国. 准噶尔盆地石炭系高-过成熟烃源岩有机质丰度恢复研究新进展[J]. 新疆地质, 2013, 31(4): 324-327.
Chen Xueguo. Restoration of organic abundance for high-over mature source rocks of Carboniferous in Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(4): 324-327.
- [57] 周雨双,贾存善,张奎华,等. 应用TSM盆地模拟技术恢复准噶尔盆地东北缘石炭系烃源岩热演化史[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 297-306.
Zhou Yushuang, Jia Cunshan, Zhang Kuihua, et al. Thermal evolution history reconstruction of Carboniferous source rocks on the northeastern margin of Junggar Basin using TSM basin simulation technology [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43 (2): 297-306.
- [58] 李二庭,王剑,李际,等. 源储一体烃源岩精确评价——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 335-342.
Li Erting, Wang Jian, Li Ji, et al. Accurate evaluation of source rocks in source-reservoir integration: a case study of source rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 335-342.
- [59] 陈治军,文志刚,刘护创,等. 二连盆地伊和乌苏凹陷烃源岩地球化学特征与生烃潜力[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 34-43.
Chen Zhijun, Wen Zhigang, Liu Huchuang, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of source rocks in Yihewusu Sag, Erlian Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(1): 34-43.

(编辑 张亚雄)