

银额盆地巴北凹陷烃源岩地球化学特征与资源潜力

高怡文¹,郝世彦¹,王庆²,王维波¹,江绍静¹,范庆雄³,陈治军¹,周晔¹

[1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西 西安 710075;2. 中国石油长庆油田分公司第六采气厂,陕西 西安 710018;
3. 陕西延长石油钻井工程有限公司,陕西 延安 716000]

摘要:为明确银额盆地巴北凹陷烃源岩条件和油气资源潜力,基于研究区2口探井、1 143个泥岩样品的岩石热解和38个泥岩样品的系统测试分析资料,开展烃源岩地球化学特征研究,预测有效烃源岩的分布,分析研究区的油气资源潜力,以期为该区的勘探决策和勘探部署提供依据。结果表明:①研究区潜在烃源岩为发育于银根组(K_1y)、苏红图组(K_1s)、巴音戈壁组三段(K_1b^3)、巴音戈壁组二段(K_1b^2)、巴音戈壁组一段(K_1b^1)和石炭系-二叠系(C-P)的泥岩,其中以 K_1b^3 、 K_1b^2 、 K_1b^1 和C-P的有机质丰度为最高,有机质类型以Ⅱ₂-Ⅲ型为主,且高有机质丰度层段的烃源岩均达到了成熟-过成熟热演化阶段。②在有机质来源方面,高等植物对于各层段烃源岩具有较大的生源贡献。在沉积环境方面,各层段烃源岩均主要形成于弱还原-弱氧化的微咸水环境。③厘定了研究区有效烃源岩的总有机碳含量(TOC)下限值为0.80%,成熟生烃门限深度为1 100 m,有效烃源岩主要发育于 K_1b^3 、 K_1b^2 、 K_1b^1 和C-P,其厚度在南、北两个次凹的沉积中心均较大。较好的烃源岩条件,加上活跃的油气显示,预示着研究区具有较好的油气资源潜力。

关键词:地球化学特征;烃源岩;资源潜力;巴北凹陷;银额盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and hydrocarbon resources potential of source rocks in Babei Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

Gao Yiwen¹, Hao Shiyan¹, Wang Qing², Wang Weibo¹, Jiang Shaojing¹, Fan Qingxiong³, Chen Zhijun¹, Zhou Ye¹

[1. Research Institute, Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2. No. 6 Gas Production Plant, Changqing Oil Field Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018; 3. Drilling Engineering Company, Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China]

Abstract: The source rocks and reservoirs in the Babei Sag, Yingen-Ejinaqi Basin, are assessed for geochemical characterization, effective source rock mapping and hydrocarbon potential analysis based on data from rock pyrolysis experiments of 1 143 mudstone samples and systematic tests of 38 mudstone samples from two local wells. The results show that potential source rocks are developed in mudstones of the Yingen Formation (K_1y), Suhongtu Formation (K_1s), the third, second and first members of the Bayingob Formation (K_1b^3 , K_1b^2 and K_1b^1), and Carboniferous-Permian (C-P) systems in the sag. Among them, the latter four (K_1b^3 , K_1b^2 , K_1b^1 and C-P) have higher organic matter abundance with type Ⅱ₂-type Ⅲ kerogen of maturity and over-maturity. Higher plant made significant contribution to the organic carbon content in the source rocks and a weak reducing—weak oxidizing environment together with brackish water provided a setting for the source rocks to deposit. The source rocks in the sag are deemed effective when their TOC is no less than 0.80 % and threshold depth for hydrocarbon generation is 1 100 m. Based on these criteria, effective source rocks in the sag are mainly developed in K_1b^3 , K_1b^2 , K_1b^1 and C-P and have the largest thickness in two sedimentary centers (northern subsag and southern subsag). Good source rock conditions and active hydrocarbon shows indicate that the study area has good hydrocarbon exploration potential.

Key words: geochemical characteristics, source rock, petroleum resource potential, Babei sag, Yingen-Ejinaqi Basin

收稿日期:2022-04-06;修订日期:2022-09-10。

第一作者简介:高怡文(1982—),女,博士、高级工程师,油气地质与采收率。E-mail: 32952030@qq.com。

通讯作者简介:郝世彦(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探开发技术及管理。E-mail: 463632928@qq.com。

基金项目:自然资源部重点项目(2017YQZYPJ01);延长石油集团科技攻关项目(yesy2020jcyj-B-03)。

引用格式:高怡文,郝世彦,王庆,等. 银额盆地巴北凹陷烃源岩地球化学特征与资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1445-1458. DOI: 10. 11743/ogg20220613.

Gao Yiwen, Hao Shiyen, Wang Qing, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon resources potential of source rocks in Babei Sag, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1445-1458. DOI: 10. 11743/ogg20220613.

近年来,银额盆地的哈日、拐子湖、天草等凹陷相继获得勘探突破,油气勘探呈现“多点开花”的局面,勘探证实这些勘探效果较好的凹陷烃源岩发育程度往往也较好^[1-4],烃源岩研究对于类似银额盆地这种中国北方中、小型断陷湖盆油气成藏研究的重要性不言而喻^[2,5-6]。相比之下,银额盆地巴北凹陷的油气勘探效果并不理想,延长石油集团分别于2014年和2017年在该区实施了两口探井,由于油气显示级别不高,该区的油气勘探一直处于停滞状态。前人对于该区研究很少,且多聚焦于古生界储层特征的研究^[7-8]。但从油气显示情况来看,古生界可能并非主要目的层,因为古生界经历了多期剧烈构造运动,烃源岩热演化程度普遍较高,储层不同程度地发生了变质作用,古生界的油气显示也普遍差于中生界。少数学者对凹陷的烃源岩开展了研究,但都是基于早期一口探井资料的初步评价,数据来源存在局限性,因而不能对复杂多变的烃源岩做出科学的评价^[9-10]。总

体来看,巴北凹陷的烃源岩缺乏系统研究,油气成藏的烃源岩基础尚不明确。同时,该区虽然获得了油气信息,但资源潜力还不明朗。

基于研究区2口探井全井段泥岩的地球化学、录井资料(钻井现场开展岩石热解分析)、关键井段烃源岩样品的测试分析资料,对巴北凹陷开展烃源岩地球化学特征研究,预测有效烃源岩的分布,开展资源潜力分析,以期为该区的后续勘探决策、勘探部署等提供科学依据。

1 烃源岩概况

巴北凹陷位于银额盆地苏红图坳陷的中部(图1),沉积地层自下而上有石炭系-二叠系(C-P)、白垩系和第四系。前人基于对盆地露头区的研究,建立的C-P层序自下而上依次为绿条山组(C_1l)、白山组(C_1b)、石板山组(C_1s)、笈笈台子组(C_1sh)、阿木山组

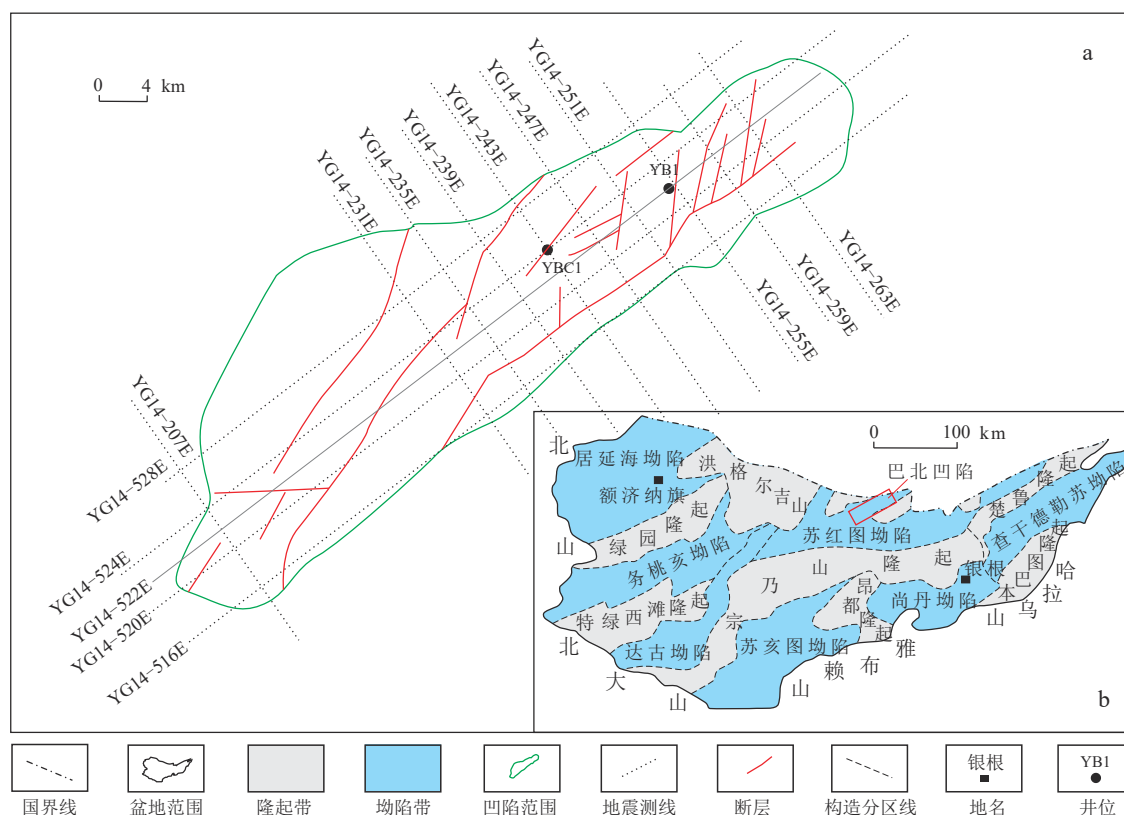


图1 巴北凹陷井位分布(a)和构造位置(b)

Fig. 1 Well distribution (a) and tectonic location (b) of the Babei Sag

(C₂-P_{1a})、埋汗哈达组(P_{1-2m})、阿其德组(P_{2a})和哈尔苏海组(P_{3h})^[11]。由于地层差异大,“盆-山”不能建立很好的对比关系,凹陷内C-P暂无法细分。下白垩统自下而上有巴音戈壁组(K_{1b})、苏红图组(K_{1s})和银根组(K_{1y}),上白垩统只有乌兰苏海组(K_{2w}),作为主要目的层的巴音戈壁组自下而上可划分为巴音戈壁组一段(K_{1b}¹)、巴音戈壁组二段(K_{1b}²)和巴音戈壁组三段(K_{1b}³)。银额盆地古生界以浅海陆棚相沉积为主,发育多套厚度大、有机质丰度中等-好的成熟-高过成熟烃源岩^[12-13]。中生界白垩系以湖相沉积为主,发育多套品质较好的烃源岩,但烃源岩发育程度的凹陷差异性非常明显^[14-16]。

钻井揭示,巴北凹陷YBC1井和YB1井泥岩发育程度较好,K_{1y},K_{1s},K_{1b}³,K_{1b}²,K_{1b}¹和C-P均有累计厚度和单层厚度较大的泥岩发育,可作为潜在烃源岩的暗色泥岩在部分层段也有较好程度的发育(表1;图2,图3)。K_{1y}泥岩在YBC1井和YB1井的中累计厚度分别为290 m和75 m,虽然泥岩累计厚度较大,但以棕黄色泥岩、杂色等指示氧化环境的颜色为主,暗色泥岩发育程度差(图3)。K_{1s}泥岩在YBC1井和YB1井的累计厚度分别为436 m和227 m,泥岩最大单层厚度分别为14 m和27 m;泥岩中暗色泥岩有较大的占比,累计厚度在YBC1井和YB1井分别为218 m和227 m,最大单层厚度分别为11 m和27 m,岩性主要为灰色泥岩。K_{1b}³泥岩在YBC1井和YB1井的累计厚度分别为234 m和306 m,泥岩最大单层厚度分别为10 m和26 m;其中暗色泥岩在YBC1井和YB1井的累计厚度分别为208 m和306 m,最大单层厚度分别为10 m和26 m,岩性主要为深灰色泥岩等,暗色泥岩具有较好的发育程度(图3)。K_{1b}²泥岩在YBC1井和YB1井的累计厚度分别为79 m和85 m,泥岩均为暗色泥岩,岩性主要为灰色-深灰色泥岩、灰色粉砂质泥岩等,由于K_{1b}²厚度小,该层段的泥岩的累计厚度

不大。K_{1b}¹泥岩在YBC1井和YB1井的累计厚度分别为76 m和360 m,其中暗色泥岩累计厚度分别为76 m和342 m,总体暗色泥岩发育程度较好,且YB1井发育程度要好于YBC1井。C-P泥岩在YB1井的累计厚度为1 009 m,泥岩均为暗色泥岩,暗色泥岩在地层总厚度中有很大的占比;相比之下,YBC1井C-P由于地层变质,泥岩不发育。由此可见,研究区虽然泥岩发育程度好,但潜在烃源岩主要分布于K_{1s},K_{1b}³,K_{1b}¹和C-P(表1)。

2 样品与测试分析

在YBC1井和YB1井的钻井过程中,对泥岩样品开展了岩石热解分析,样品来源于全井段的泥岩岩屑和岩心,岩屑每隔1 m取1个样,岩心每隔0.5 m取1个样,样品总数为1 105个。其中YBC1井样品总数为307个,YB1井样品总数为798个。层位分布方面,K_{1y} 5个,K_{1s} 147个,K_{1b}³ 241个,K_{1b}² 73个,K_{1b}¹ 162个,C-P 477个。热解分析方法是样品粉碎至100目左右,采用的仪器为YY3000A型油岩综合评价仪,分析方法参照GB/T 18602—2012《岩石热解分析》^[17]。

另外,补充了部分烃源岩的岩心样品,在实验室开展了系统的有机地球化学测试分析。样品数为38个,其中YBC1井30个,YB1井8个。样品的层位分布为:K_{1y} 3个,K_{1s} 5个,K_{1b}³ 14个,K_{1b}² 4个,C-P 12个。对样品开展了有机碳含量测定、岩石热解分析、岩石中氯仿沥青“A”及族组分分析、干酪根元素分析、干酪根镜质体反射率测定、干酪根碳同位素分析、饱和烃气相色谱分析、生物标志物色谱-质谱分析等,测试分析由长江大学地球化学实验室完成。有机碳含量测定方法为称取约100 mg的样品粉末加入坩埚中,用5%盐酸溶液在水浴80℃条件下加热12 h除去碳酸盐,之后用高纯水反复清洗6次至完全除去残余的盐酸,将处理好的样

表1 巴北凹陷泥岩厚度统计

Table 1 Mudstone thickness of different wells in the Babei Sag

层位	潜在烃源岩岩性	YBC1井				YB1井				
		泥岩累计厚度/m	泥岩单层最大厚度/m	暗色泥岩累计厚度/m	暗色泥岩单层最大厚度/m	泥岩累计厚度/m	泥岩单层最大厚度/m	暗色泥岩累计厚度/m	暗色泥岩单层最大厚度/m	暗色泥岩单层最大厚度/m
K _{1y}	灰色泥岩、棕黄色泥岩等	290	225	32	6	棕色粉砂质泥岩	75	12	7	4
K _{1s}	灰色泥岩、棕黄色泥岩等	436	14	218	11	灰色泥岩等	227	27	227	27
K _{1b} ³	灰色泥岩为主	234	10	208	10	灰色泥岩等	306	26	306	26
K _{1b} ²	灰色-深灰色泥岩	79	15	79	15	灰色粉砂质泥岩等	85	12	85	12
K _{1b} ¹	深灰色泥岩等	76	42	76	42	灰色粉砂质泥岩等	360	18	342	18
C-P	灰色泥岩等	0	0	0	0	深灰色泥岩等	1 009	29	1 009	29

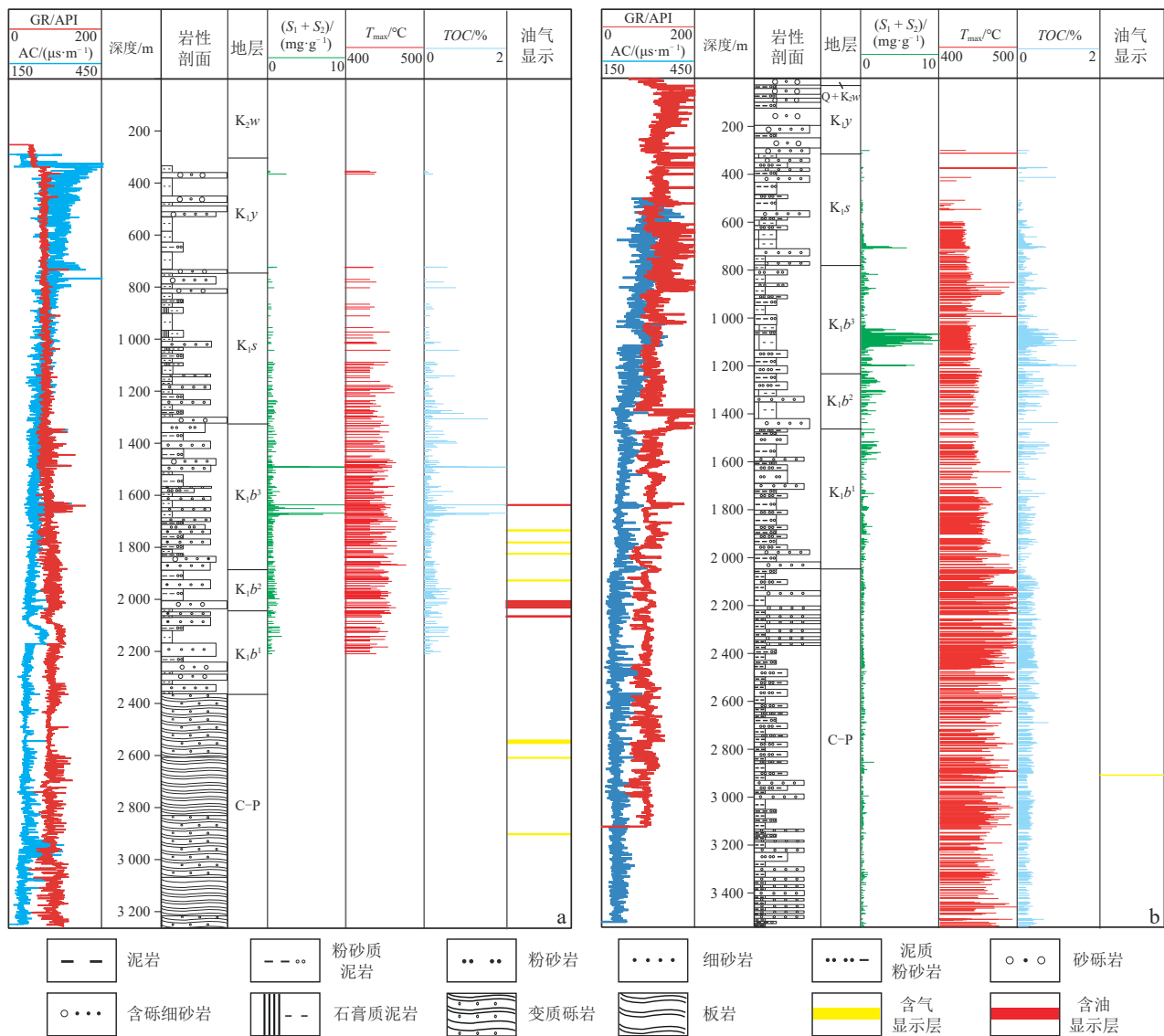


图2 巴北凹陷YBC1井(a)和YB1井(b)综合柱状图

Fig. 2 Composite columnar sections of Well YBC1 and Well YB1 in the Babei Sag



图3 巴北凹陷典型烃源岩岩心照片

Fig. 3 Core photos of typical source rocks in the Babei Sag

a. YB1井,埋深301 m, K₁y,灰色灰质泥岩; b. YBC1井,埋深1 296 m, K₁s,灰色泥岩; c. YBC1井,埋深1 489 m, K₁b³,深灰色泥岩; d. YBC1井,埋深2 028 m, K₁b²,深灰色泥岩; e. YBC1井,埋深2 237 m, K₁b¹,深灰色泥岩; f. YB1井,埋深2 457 m, C-P,灰黑色泥岩

品放入CS-344型碳硫测定仪开展有机碳机碳含量测定。氯仿沥青“A”测试、干酪根元素分析、干酪根镜质体反射率测定和干酪根碳同位素分析的测试分析方法参照文献[14]。饱和烃气相色谱分析采用HP6890N色谱仪,配以HP-PONA 30 m×0.25 mm×0.5 μm毛细柱进行分析,初始温度35℃,恒温5 min后以4℃/min升温到300℃,恒温20 min,载气为He,采用恒流模式,流量为1 ml/min。生物标志物色谱-质谱分析采用HP6890-GC/5973 MSD色谱-质谱联用仪,色谱柱为HP-5MS 30 m×0.25 mm×0.5 μm,初始温度50℃,恒温2 min后以3℃/min升温到310℃,恒温18 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。

3 烃源岩基础地球化学特征

3.1 有机质丰度

K₁^y泥岩总有机碳含量(TOC)为0.04%~0.55%,平均为0.20%;氯仿沥青“A”含量平均为0.0027%,热

解参数S₁+S₂平均为0.60 mg/g;参照陆相烃源岩有机质评价标准^[18],K₁^y泥岩基本为非-差烃源岩(表2;图4)。K₁^s泥岩TOC为0.03%~2.31%,平均为0.39%;氯仿沥青“A”含量平均为0.0030%,S₁+S₂平均为0.54 mg/g;K₁^{b3}泥岩也主要为非-差烃源岩,但局部井段有中等-好的烃源岩发育(图4)。K₁^{b3}泥岩TOC为0.05%~3.55%,平均为0.64%;氯仿沥青“A”含量平均为

表2 巴北凹陷烃源岩地球化学测试数据

Table 2 Geochemical test results of source rocks in the Babei Sag

层位	TOC/%	氯仿沥青“A”含量/%	岩石热解参数			R _o /%
			(S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)	HII/(mg·g ⁻¹)	T _{max} /°C	
K ₁ ^y	0.04~0.55	0.0001~0.0031	0.03~2.37	117~472	428	0.56~0.66
	0.20(8)	0.0027(3)	0.60(8)	231(8)	428(1)	0.61(3)
K ₁ ^s	0.03~2.31	0.0014~0.0061	0.02~8.69	10~350	425~440	0.75~0.81
	0.39(152)	0.0030(5)	0.54(152)	147(152)	436(20)	0.79(3)
K ₁ ^{b3}	0.05~3.55	0.0014~0.2218	0.11~31.29	26~673	422~459	0.56~1.30
	0.64(255)	0.0529(14)	2.26(255)	287(255)	443(87)	0.89(13)
K ₁ ^{b2}	0.06~2.43	0.0023~0.0208	0.04~4.65	34~711	432~451	1.00~1.46
	0.56(255)	0.0583(4)	2.56(77)	242(77)	447(18)	1.29(4)
K ₁ ^{b1}	0.04~1.90	—	0.03~3.67	3~655	439~472	—
	0.43(162)	—	0.75(162)	250(162)	452(45)	—
C-P	0.02~1.84	0.0012~0.0087	0.01~3.45	1~211	430~524	1.26~2.71
	0.66(489)	0.0046(12)	0.37(489)	73(489)	461(206)	1.66(12)

注:表中数值为“最小值~最大值”,平均值(样品个数)。

*代表TOC_{原始};T_{max}的统计剔除了TOC小于0.6%的异常值;R_o为镜质体反射率。—为无数据。

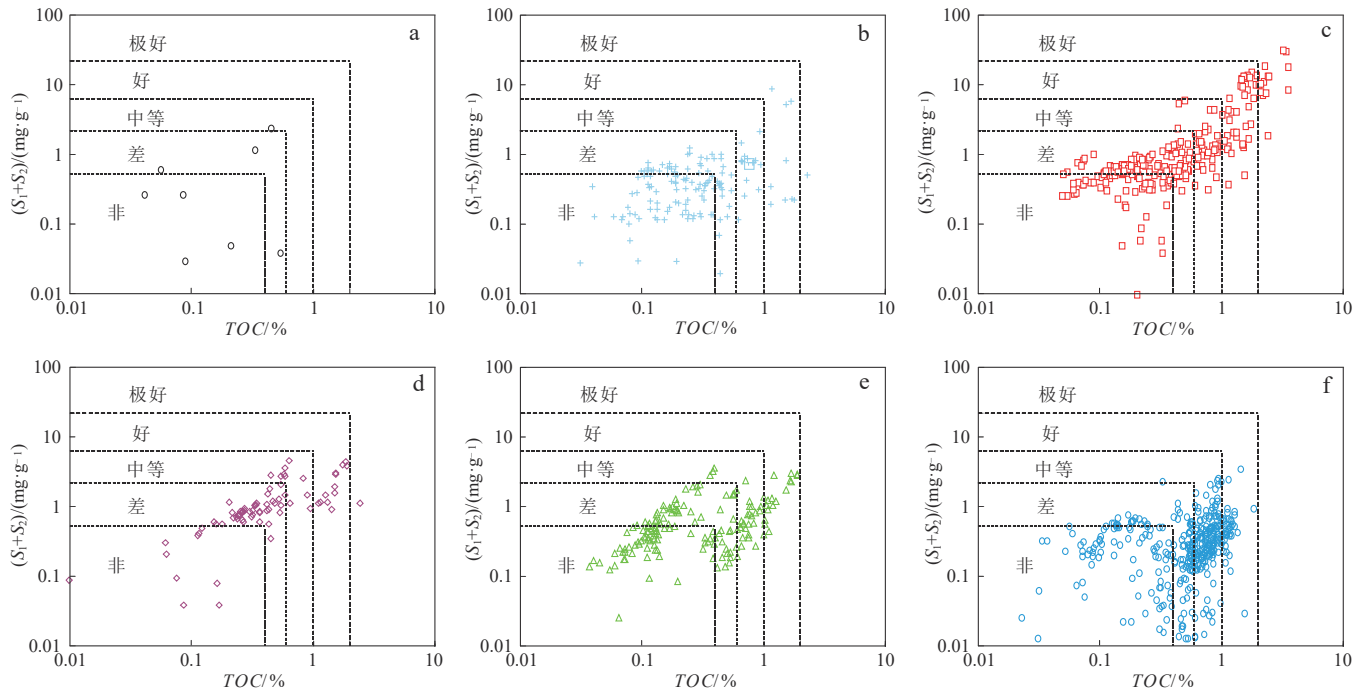


图4 巴北凹陷烃源岩有机质丰度评价TOC与S₁+S₂关系

Fig. 4 Characteristics of the organic matter abundance according to TOC and S₁+S₂ of source rock samples in the Babei Sag

a. K₁^y; b. K₁^s; c. K₁^{b3}; d. K₁^{b2}; e. K₁^{b1}; f. C-P

(有机质丰度评价标准据文献^[18]。)

0.052 9%, $S_1 + S_2$ 平均为 2.26 mg/g; 烃源岩有机质丰度较高, 中等-好的烃源岩有很大的占比(图4)。K₁b²泥岩 TOC 为 0.06% ~ 2.43%, 平均为 0.56%; 氯仿沥青“A”含量平均为 0.058 3%, $S_1 + S_2$ 平均为 2.56 mg/g; 烃源岩以中等-好的烃源岩为主(图4)。K₁b¹泥岩 TOC 为 0.04% ~ 1.90%, 平均为 0.43%; $S_1 + S_2$ 平均为 0.75 mg/g; 烃源岩以差-中等的烃源岩为主(图4)。

C-P 泥岩 TOC 为 0.02% ~ 1.84%, 平均为 0.66%, 如果按照 TOC 评价, 烃源岩主要为中等有机质丰度的烃源岩。氯仿沥青“A”含量平均为 0.004 6%, $S_1 + S_2$ 平均为 0.37 mg/g, 如果按照氯仿沥青“A”和 $S_1 + S_2$ 评价, 该层段泥岩主要为非烃源岩, 评价出的烃源岩品质明显低于参数 TOC 的评价结果, 这可能与 C-P 烃源岩的高成熟度、高成烃转化率有关。考虑到 C-P 烃源岩以高-过成熟演化程度为主, 有机碳损失量大, 在对 C-P 烃源岩开展了原始有机碳恢复后重新开展评价。参照庞雄奇^[19]等对于高过成熟烃源岩 TOC 恢复研究成果, 取原始 TOC 恢复系数为 1.7, 恢复后的 TOC_{原始} 为 0.02% ~ 3.13%, 平均为 1.12%, 烃源岩原始有机质丰度较高, 以好-极好的烃源岩为主(图5)。

3.2 有机质类型

依据烃源岩岩石热解参数氢指数(HI)、最高热解峰温(T_{max})等可对其有机质类型进行有效判别^[20-23]。运用该方法时需特别注意, 参数异常会导致对烃源岩的有机质类型做出无效判别, 参数异常有以下几种情况: ①如果烃源岩有机质丰度极低, 热解过程中的 S_2 峰不明显, 会导致 T_{max} 值存在异常(异常高或异常低)^[24]; ②如果烃源岩热演化程度很高, 氢元素由于生烃转化作用损失量很大, HI 会出现异常低值^[25]。本次对 TOC 小于 0.6% 的样品做剔除处理, 在此基础上利用 HI- T_{max} 图版法对烃源岩的有机质类型进行了划分(图6)。可以看出: K₁y 烃源岩有机质类型主要为 III 型; K₁s 烃源岩

有机质类型也是以 III 型为主; K₁b³ 烃源岩有机质类型主要为 II₁-III 型; K₁b² 和 K₁b¹ 烃源岩有机质类型主要为 II₂-III 型; C-P 烃源岩由于成熟度过高, 较低的 HI 使得利用图版法不能对烃源岩的有机质类型做出有效识别。

烃源岩干酪根碳同位素的组成取决于生物母质, 陆生植物和海洋水生生物的碳同位素组成差异明显, 且干酪根形成和演化过程中分馏作用对碳同位素组成影响较小, 因此干酪根碳同位素组成是划分烃源岩有机质类型的可靠指标^[26]。从表3可以看出, K₁y 和 K₁s 烃源岩有机质类型以 III 型为主, K₁b³, K₁b² 和 C-P 烃源岩有机质类型主要为 II-III 型。

3.3 有机质成熟度

本次运用参数镜质体反射率(R_o)和岩石热解分析的最高热解峰温(T_{max})对各层段烃源岩的热演化程度开展了评价, 考虑到低有机质丰度烃源岩的 T_{max} 普遍存在异常, 在利用参数 T_{max} 评价烃源岩成熟度时剔除了 TOC 小于 0.6% 的样品。

K₁y 烃源岩 R_o 为 0.56% ~ 0.66%, 平均为 0.61%; TOC 大于 0.6% 的样品仅 1 个, 其 T_{max} 值为 428 °C; K₁y 烃源岩整体处于未成熟-低成熟热演化阶段(表2)。K₁s 烃源岩 R_o 为 0.75% ~ 0.81%, 平均为 0.79%; T_{max} 平均为 436 °C; K₁s 以低成熟-成熟烃源岩为主。K₁b³ 烃源岩 R_o 为 0.56% ~ 1.30%, 平均为 0.89%; T_{max} 为 422 ~ 459 °C, 平均为 443 °C; K₁b³ 基本为成熟烃源岩。K₁b² 烃源岩 R_o 为 1.00% ~ 1.46%, 平均为 1.29%, T_{max} 平均为 447 °C, 主要为成熟-高成熟烃源岩。K₁b¹ 烃源岩未获得 R_o 资料, T_{max} 为 439 ~ 472 °C, 平均为 452 °C, 以高成熟烃源岩为主。C-P 烃源岩 R_o 为 1.26% ~ 2.71%, 平均为 1.66%, T_{max} 平均为 461 °C, 烃源岩成熟度较高, 以高成熟为主, 且过成熟烃源岩有一定的占比。

图7显示参数 R_o 和 T_{max} 与烃源岩的埋深呈正相关关系, 参照陆相烃源岩有机质成熟度评价标准^[18], 烃源岩在 R_o 大于 0.7% 或 T_{max} 大于 440 °C 后达到成熟热演化阶段, 该成熟度对应的井深均为 1 100 m, 指示研究区烃源岩成熟生烃门限深度应为 1 100 m。

4 生物标志化合物特征

4.1 成熟度异构化参数特征

在热演化早期, 烃源岩正构烷烃普遍具有明显的奇偶优势, 即参数碳优势指数(CPI)和奇偶优势(OEP)

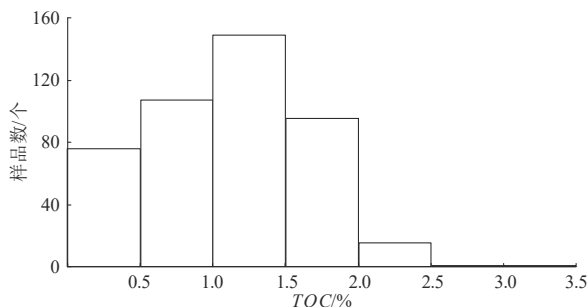
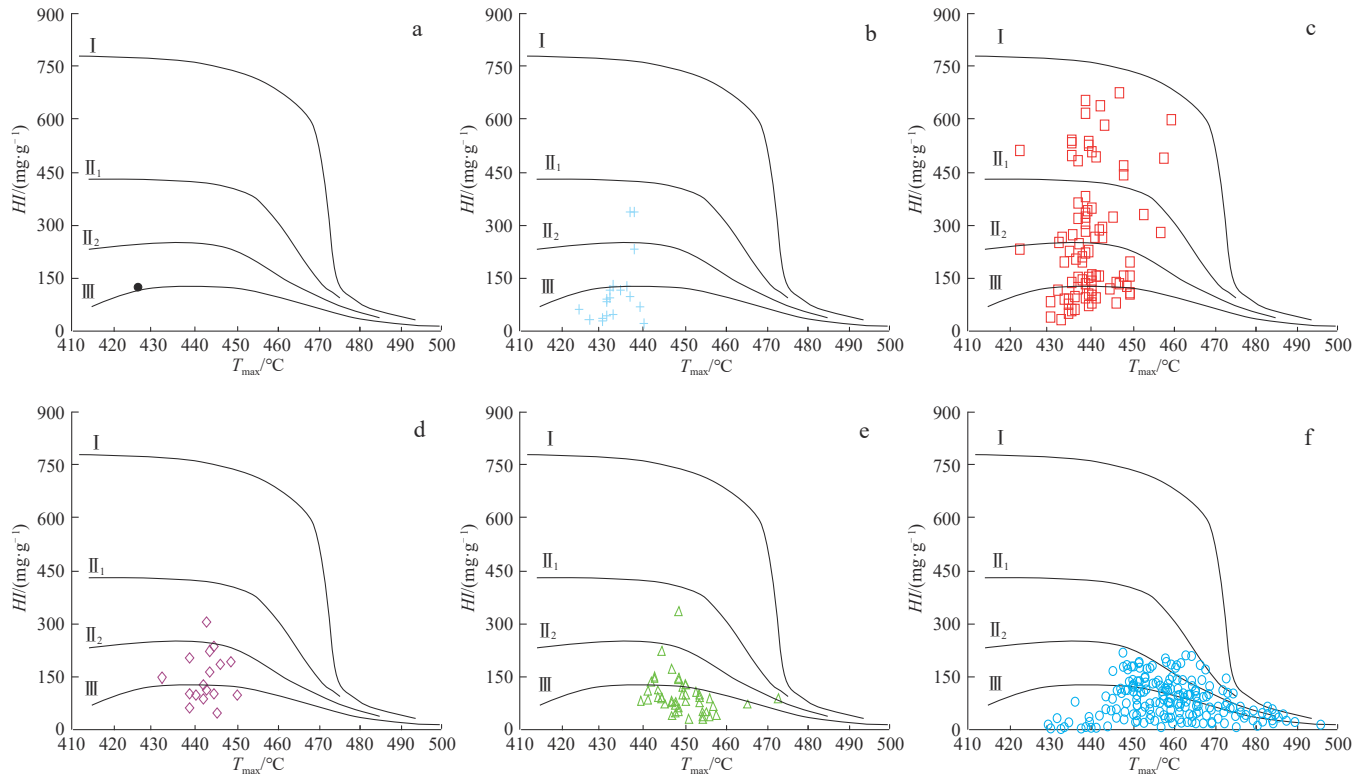


图5 巴北凹陷C-P烃源岩原始TOC分布频率

Fig. 5 Histogram of TOC of C-P source rock samples in the Babei Sag

图6 巴北凹陷烃源岩有机质分类 $HI-T_{max}$ 关系Fig. 6 Organic-matter classification according to HI and T_{max} of source rock samples in the Babei Saga. K_1Y ; b. K_1S ; c. K_1b^3 ; d. K_1b^2 ; e. K_1b^1 ; f. C-P(I型代表腐泥型; II₁型代表腐殖-腐泥型; II₂型代表腐泥-腐殖型; III型代表腐殖型。有机质类型划分图据文献[20]。)表3 巴北凹陷烃源岩干酪根 $\delta^{13}C$ 与有机质类型Table 3 Kerogen $\delta^{13}C$ and organic-matter types of source rocks in the Babei Sag

层位	$\delta^{13}C(PDB)/\%$	有机质类型	层位	$\delta^{13}C(PDB)/\%$	有机质类型
K_1Y	-24.0 ~ -23.7	III型	K_1b^2	-26.1 ~ -22.3	II型-III型
K_1S	-25.5 ~ -23.8	III型	K_1b^1	—	—
K_1b^3	-27.1 ~ -24.6	II-III型	C-P	-27.6 ~ -19.9	II-III型

基本大于1.2^[14,26-28]。但随着成熟度的增加,正构烷烃不具明显的奇偶优势,成熟-高过成熟烃源岩的 CPI 和 OEP 一般小于1.2,且趋于平衡值1.0左右^[14,26-28]。 K_1Y 烃源岩的 CPI 和 OEP 平均为1.83和1.53(表4),奇偶优势明显,烃源岩为未成熟-低成熟烃源岩。 K_1S 、 K_1b^3 、 K_1b^2 和C-P烃源岩的 CPI 值为1.04 ~ 1.14, OEP 值为1.09 ~ 1.16(表4),指示成熟有机质的特征。

甾烷异构化参数 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/20(R+S)$ 被广泛地应用于烃源岩成熟度评价中,随着成熟度的增加,这两个参数的值也在升高, C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/20(R+S)$ 在0.52 ~ 0.55达到“平衡状态”, C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 在0.67 ~ 0.71达到“平衡状态”^[29-31]。 K_1Y 烃源岩 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/20(R+S)$ 值平均为0.32和0.31(表4),按

照陆相烃源岩有机质评价标准^[18],烃源岩为低成熟烃源岩。 K_1S 、 K_1b^3 和 K_1b^2 烃源岩 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/20(R+S)$ 值均大于0.40(表4),为成熟-高成熟烃源岩。C-P烃源岩 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/20(R+S)$ 值接近演化终点,烃源岩应具有很高的成熟度。

18 α -三降藿烷(T_s)和17 α -三降藿烷(T_m)是三降藿烷的异构体,在有机质热演化过程中, T_m 会转变为更稳定的 T_s ,参数 $T_s/(T_s + T_m)$ 可以用来评价成熟度^[32-33]。 $T_s/(T_s + T_m)$ 对研究区烃源岩成熟度也有很好的指示作用,指示从 K_1Y 到C-P烃源岩热演化程度逐渐变高(表4;图8)。

4.2 生源输入特征

正构烷烃的分布特征可反映有机质的生源输入,来源于高等植物的有机质一般 nC_{23} — nC_{35} 高分子量正构烷烃具有优势;而以 nC_{15} 或 nC_{17} 为主峰,奇偶优势不明显的中等相对分子量(nC_{15} — nC_{21})的正构烷烃则指示为藻类等浮游生物来源^[26,34-35]。但是伴随热演化程度的增加,烃源岩长链正构烷烃由于热裂解作用通常发生C-C键断裂而变成中、短链正构烷烃,正构烷烃的

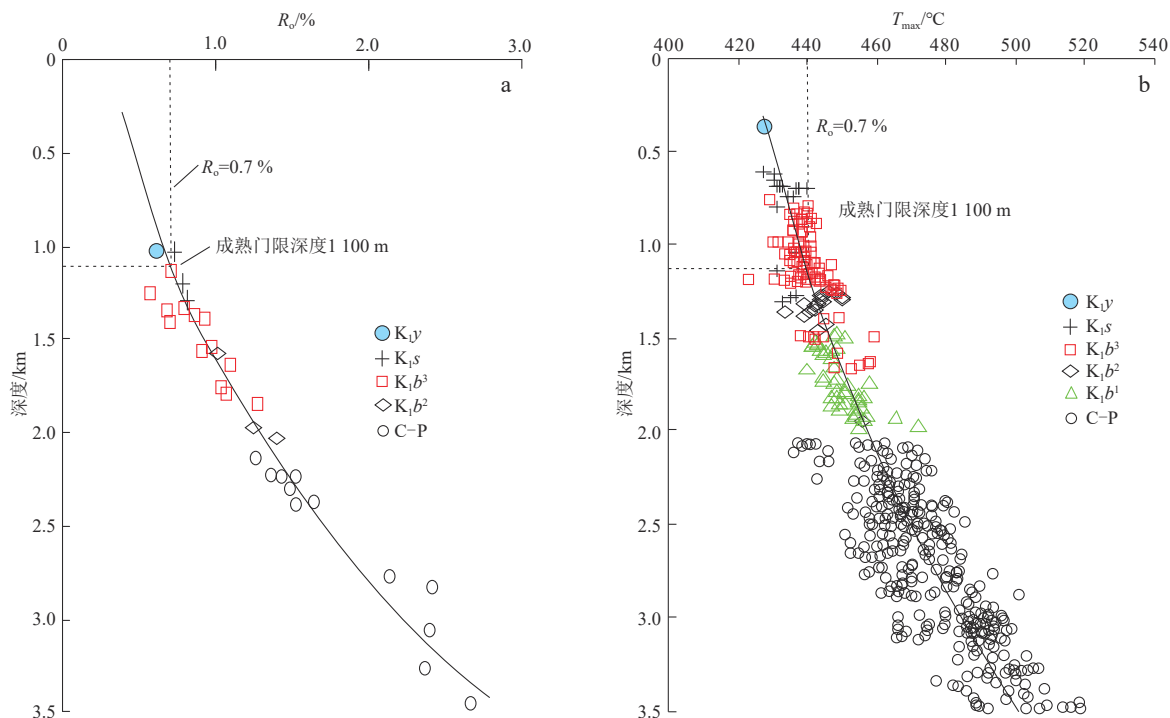
图7 巴北凹陷烃源岩 R_o 和 T_{max} 与深度关系Fig. 7 Cross-plots of R_o and T_{max} vs. depth of source rocks in the Babei Saga. R_o -深度; b. T_{max} -深度

表4 银额盆地巴北凹陷烃源岩部分生物标志化合物参数统计

Table 4 Selected geochemical parameters of source rocks in the Babei Sag, Yingen-Ejinaqi Basin

层位	A	B	C	D	E	F	G	H	I
K_1y	1.54 ~ 2.12 1.83(3)	1.21 ~ 1.75 1.53(3)	0.61 ~ 1.01 0.75(3)	0.65 ~ 1.05 0.78(3)	1.03 ~ 1.74 1.33(3)	0.14 ~ 0.28 0.19(3)	0.22 ~ 0.39 0.31(3)	0.23 ~ 0.38 0.32(3)	0.17 ~ 0.44 0.31(3)
K_1s	1.02 ~ 1.26 1.14(5)	0.99 ~ 1.36 1.16(5)	0.43 ~ 1.09 0.74(5)	0.53 ~ 1.08 0.67(5)	1.46 ~ 1.79 1.59(5)	0.13 ~ 0.22 0.17(5)	0.34 ~ 0.44 0.38(5)	0.37 ~ 0.48 0.41(5)	0.35 ~ 0.47 0.42(5)
K_1b^3	1.03 ~ 1.24 1.12(13)	0.56 ~ 1.89 1.10(13)	0.57 ~ 1.86 0.99(13)	0.92 ~ 6.06 2.99(13)	0.24 ~ 1.67 0.87(13)	0.10 ~ 0.69 0.32(13)	0.33 ~ 0.49 0.40(13)	0.38 ~ 0.47 0.43(13)	0.36 ~ 0.46 0.41(13)
K_1b^2	1.04 ~ 1.32 1.09(3)	0.84 ~ 1.23 1.09(3)	0.76 ~ 1.24 0.93(3)	0.68 ~ 1.03 0.96(3)	1.05 ~ 1.45 1.28(3)	0.02 ~ 0.41 0.23(3)	0.34 ~ 0.47 0.43(3)	0.39 ~ 0.52 0.48(3)	0.43 ~ 0.53 0.48(3)
C-P	1.00 ~ 1.12 1.04(12)	0.91 ~ 1.89 1.10(12)	1.35 ~ 5.59 2.59(12)	1.85 ~ 7.98 4.28(12)	1.03 ~ 2.01 1.34(12)	0.15 ~ 0.48 0.25(12)	0.43 ~ 0.52 0.48(12)	0.53 ~ 0.60 0.55(12)	0.46 ~ 0.53 0.50(12)

注:表中数值为“最小值~最大值”
平均值(样品个数)。

A为CPI(碳优势指数),B为OEP(奇偶优势),C为 $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$,D为 nC_{21+22}/nC_{28+29} ,E为Pr/Ph,F为伽马蜡烷/ C_{30} 霍烷,G为Ts/(Ts+Tm),H为 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$,I为 C_{29} 甾烷20S/20(S+R)。

分布峰型前移,轻碳优势变得明显,这就使得在利用参数 $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 和 nC_{21+22}/nC_{28+29} 判断烃源岩有机质母质来源时,特别需要考虑成熟度因素^[33]。

由于 K_1y 、 K_1s 、 K_1b^3 、 K_1b^2 和 K_1b^1 烃源岩以未成熟-成熟烃源岩为主,只有少数埋深较大的烃源岩达到高成熟热演化阶段,参数 $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 和 nC_{21+22}/nC_{28+29} 对烃源岩有机质母质来源有一定的指示作用。 K_1y 烃源岩正构烷烃主峰主要为 nC_{25} (图8), $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 平均为0.75, nC_{21+22}/nC_{28+29} 平均为0.78(表4),正构烷烃具有较

为明显的重碳优势,烃源岩的有机母质主要来源于高等植物。 K_1s 烃源岩正构烷烃分布范围主要为 nC_{15} — nC_{36} ,其中 nC_{23} — nC_{31} 高分子量正构烷烃的含量占据优势, $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 为0.74, nC_{21+22}/nC_{28+29} 为0.67(表4),正构烷烃重碳优势明显,高等植物对于烃源岩具有较大的生源贡献。 K_1b^3 正构烷烃主峰主要为 nC_{18} 、 nC_{23} 和 nC_{25} , $\sum nC_{21}/\sum nC_{22+}$ 为0.57~1.86, nC_{21+22}/nC_{28+29} 为0.92~6.06(表4),表明烃源岩有机母质来源以高等植物为主,但局部井段也有藻类等水生生物的优势生源贡献,这也

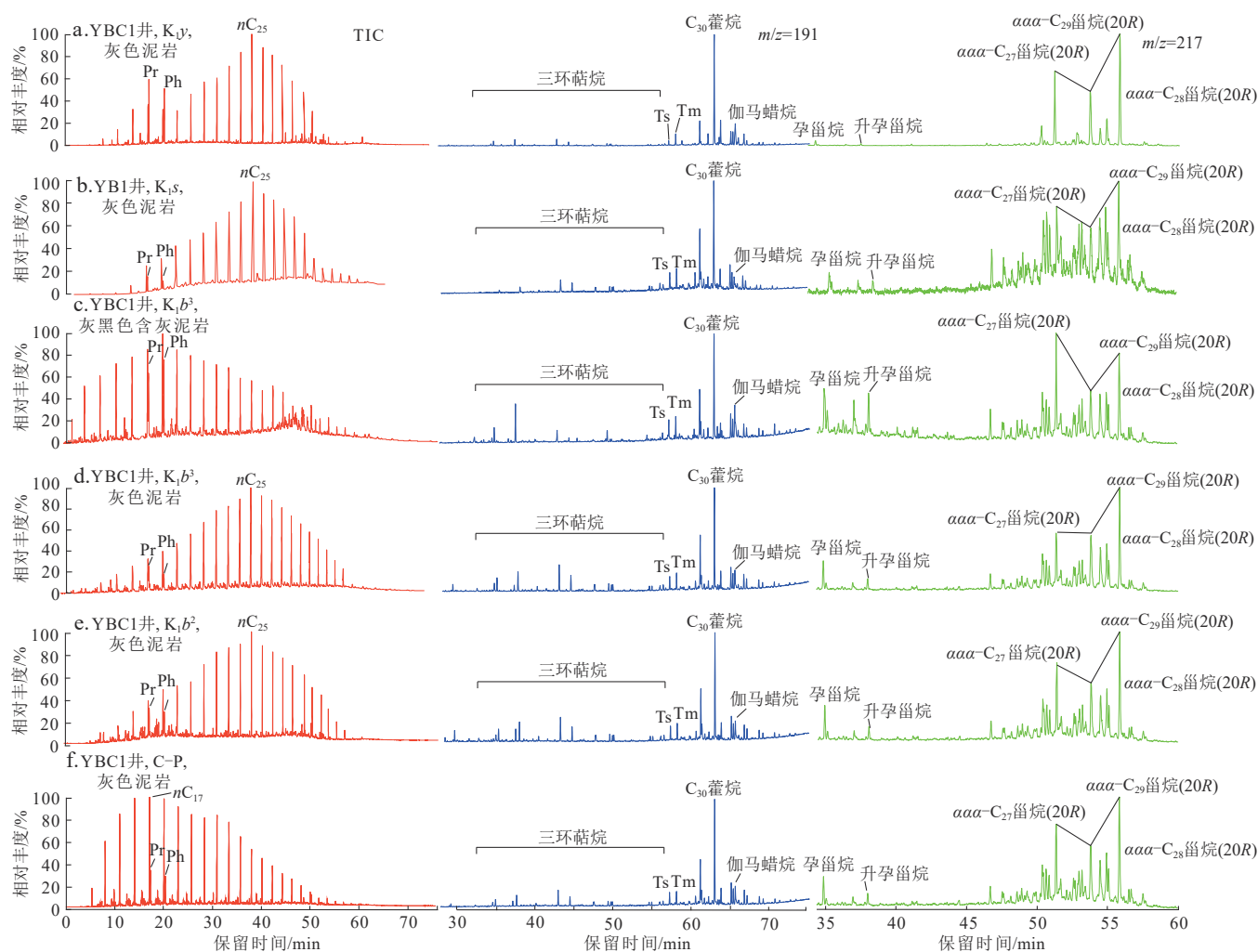


图8 巴北凹陷不同层段烃源岩生物标志化合物色谱-质谱

Fig. 8 Biomarker GC-MC of source rocks in different layers of the Babei Sag

是 K_1b^3 烃源岩有机质类型整体以Ⅲ型为主,部分样品为Ⅱ₁型的主要原因。 K_1b^2 烃源岩正构烷烃主峰主要为 nC_{25} , $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 平均为 0.93, nC_{21+22}/nC_{28+29} 平均为 0.96(表4),正构烷烃重碳优势较为明显,高等植物的生源贡献相对较大,有机质类型偏腐殖型。而 C-P 烃源岩以高成熟-过成熟烃源岩为主,参数 $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 和 nC_{21+22}/nC_{28+29} 对烃源岩有机质母质来源不能做出有效判别。如 C-P 烃源岩正构烷烃 $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 为 1.35 ~ 5.59, nC_{21+22}/nC_{28+29} 为 1.85 ~ 7.98(表4),正构烷烃具有明显的轻碳优势。按照正构烷烃生源输入参数的一般原理,单从数值判断 C-P 烃源岩以水生生物的母源输入为主,有机质类型较好,但实际上 C-P 烃源岩以浅海陆棚相沉积为主,有机质类型主要为Ⅱ-Ⅲ型,烃源岩有机质的母质来源应该以高等植物为主。

前人认为, C_{27} 甾烷来源于低等水生生物和藻类, C_{29} 甾烷来源于陆源高等植物^[36], 通常用 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{29}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{30}$ 规则甾烷的分布特征来判

断生源输入^[37-38]。K₁I^y, K₁S, K₁b²和C-P烃源岩 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{29}$ 规则甾烷的分布呈现反“L”型或不对称“V”字形, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{29}$ 规则甾烷的相对含量稍占据优势, 指示烃源岩的生源具有高等植物输入占据优势的特征。K₁b³烃源岩 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{29}$ 规则甾烷的分布呈现“L”型或反“L”型, 表明烃源岩有机母质来源以高等植物为主, 但局部井段也有藻类等水生生物的优势生源贡献(图8)。C-P烃源岩的 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{29}$ 规则甾烷的分布呈现反“L”型, 表明烃源岩有机母质来源以高等植物为主。

4.3 沉积环境特征

尽管姥鲨烷(Pr)和植烷(Ph)受成熟度、沉积环境等多方面的影响,但Pr/Ph依然是指示烃源岩沉积古环境的有效指标^[39-40]。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^[25,41]。K_{1y} 烃源岩 Pr/Ph 值平均为 1.33, K_{1s} 烃源岩 Pr/Ph 值平均为 1.59, K_{1b}³ 烃源岩 Pr/Ph 值平均为 1.28, C-P 烃源岩 Pr/Ph 值平均为 1.34, 指示这些层段烃源岩均形成于弱还原-弱氧化环境(表3)。K_{1b}³ 烃源岩 Pr/Ph 值为 0.24 ~ 1.67, 平均为 0.87, 烃源岩的形成环境整体以弱还原-弱氧化为主。

伽马蜡烷是异常盐度或稳定水体分层的标志, 也被认为是咸水还原环境的标志物^[15,42]。K_{1y}, K_{1s}, K_{1b}³, K_{1b}² 和 C-P 烃源岩的伽马蜡烷指数平均值分别为 0.19, 0.17, 0.32, 0.23 和 0.25, 相比于邻区哈日凹陷 K_{1y} 咸水环境下形成的烃源岩(伽马蜡烷指数为 0.36)^[15], 研究区各层段烃源岩伽马蜡烷含量并不高, 表明烃源岩形成于微咸水沉积环境, 且沉积期水体不具明显的分层。

5 资源潜力

5.1 有效烃源岩分布特征

“有效烃源岩控藏”理论为源控论的一次重要发展, 该理论认为生成并排出商业性油气的烃源岩, 通常为有机质丰度较高、类型较好并且已经成熟的烃源岩, 该理论的科学之处是既考虑了烃源岩的生烃有效性又明确了烃源岩的排烃有效性^[5,43-45]。对于有效烃源岩的判别标准, 通常的做法是根据研究经验确定一个 TOC 下限值作为有效烃源岩的下限^[46-47]。但在一个新的研究区开展研究, 借鉴前人建立的有效烃源岩评价标准通常会存在很多问题。比如前人建立的标准较多、且差别很大, 对于标准的选取具有盲目性。再比如烃源岩的差异性无处不在, 套用他区的标准不能对研究区有效烃源岩做出客观的评价。

考虑到烃源岩的差异性, 有学者探索出了依据有

机碳含量与烃指数关系确定有效烃源岩的包络线法, 可用于建立适合不同研究区、更为科学的有效烃源岩识别标准^[48-49]。该方法定义“烃指数”为单位有机质残留烃的含量, 计算公式是 S_i/TOC , 认为随着有机碳含量的增大烃指数呈现先增大后减小的变化趋势, S_i/TOC 开始降低的点对应的 TOC 值就是该区有效烃源岩的有机质丰度下限值, 这是因为烃源岩的大量排烃是从 S_i/TOC 降低开始的^[47]。研究区烃源岩 S_i/TOC 与 TOC 相关关系显示, S_i/TOC 开始降低的点对应的 TOC 值为 0.80%, 由此确定研究区有效烃源岩的 TOC 下限值为 0.80% (图9)。考虑到成熟度因素, 确定研究区有效烃源岩识别标准为: $TOC \geq 0.80\%$, 且烃源岩埋深 ≥ 1100 m。

依据本研究所建立的标准, 对巴北凹陷2口钻井的有效烃源岩进行了识别。可以看出, 整体上 YB1 井有效烃源岩发育程度好于 YBC1 井, 有效烃源岩发育的层位主要为 K_{1b}³, K_{1b}², K_{1b}¹ 和 C-P (表5)。参照沉积相展布特征对研究区有效烃源岩进行了预测, K_{1b}³, K_{1b}², K_{1b}¹ 和 C-P 在南北两个次凹的沉积中心都有厚度较大的有效烃源岩分布, 同时北次凹的发育程度好于南次凹 (图10)。K_{1b}³ 有效烃源岩在北次凹的最大厚度为 120 余

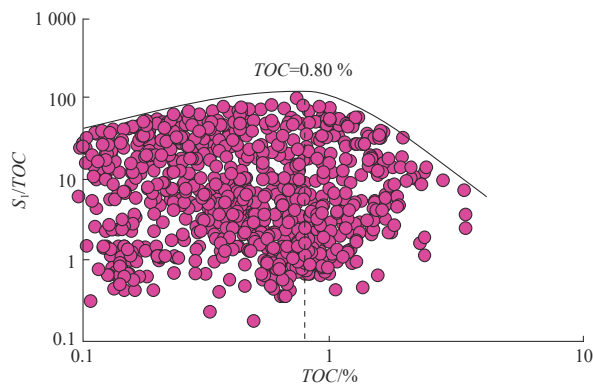


图9 巴北凹陷烃源岩 TOC 与 S_i/TOC 的关系

Fig. 9 Relationship between TOC and S_i/TOC of source rocks in the Babei Sag

表5 巴北凹陷2口井有效烃源岩统计

Table 5 Statistics of effective source rocks of two wells in the Babei Sag

YBC1 井				YB1 井			
层位	单层厚度/m	层数	累计厚度/m	层位	单层厚度/m	层数	累计厚度/m
K _{1y}	0	0	0	K _{1y}	0	0	0
K _{1s}	6 ~ 13	3	29	K _{1s}	0	0	0
K _{1b} ³	2 ~ 4	6	18	K _{1b} ³	9 ~ 69	6	146
K _{1b} ²	5 ~ 12	3	24	K _{1b} ²	4 ~ 23	6	75
K _{1b} ¹	10 ~ 30	2	40	K _{1b} ¹	3 ~ 32	6	125
C-P	5 ~ 28	3	42	C-P	4 ~ 122	17	676

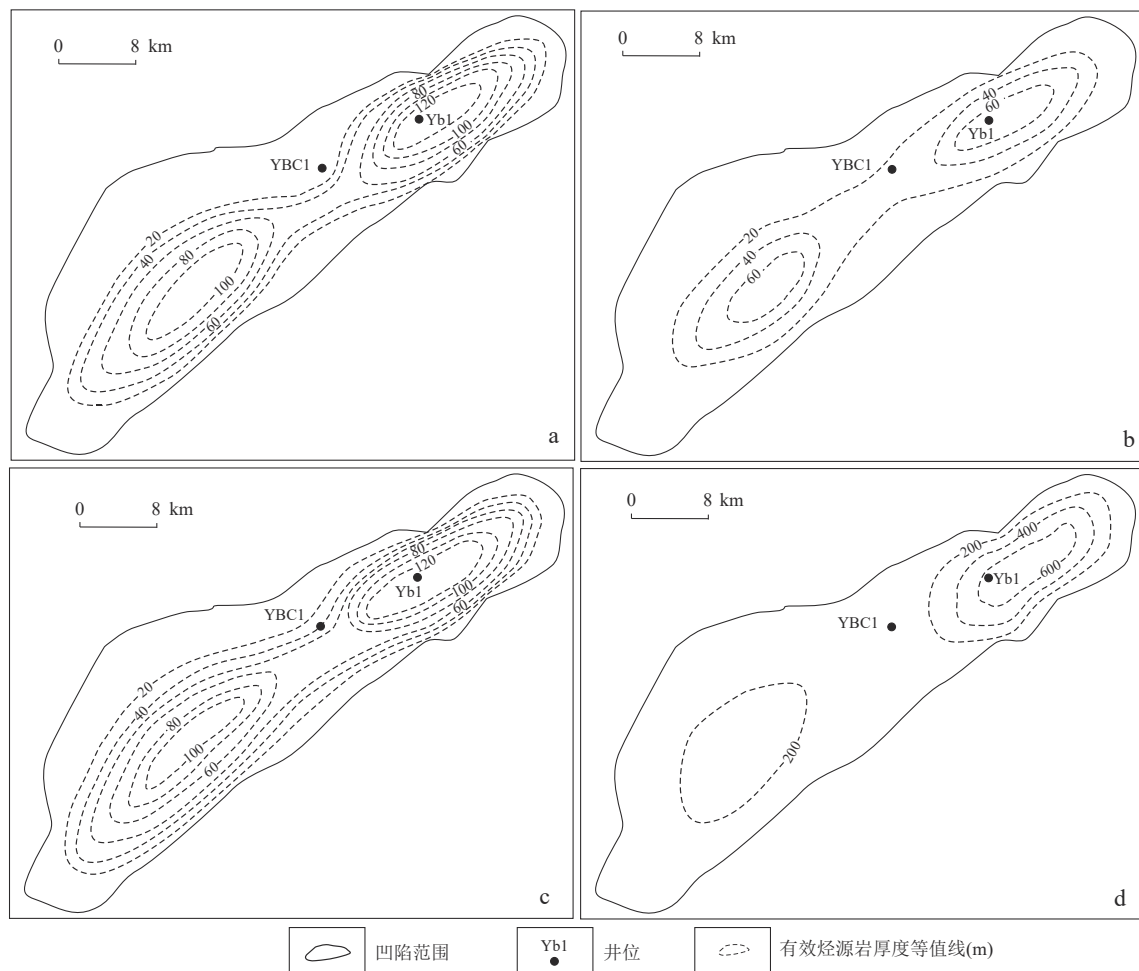


图10 巴北凹陷有效烃源岩厚度分布

Fig. 10 Isopach of effective source rocks in the Babei Sag

a. K_1b^3 ; b. K_1b^2 ; c. K_1b^1 ; d. C-P

米,在南次凹的最大厚度为100余米; K_1b^2 有效烃源岩在北次凹的最大厚度为70余米,在南次凹的最大厚度为60余米; K_1b^1 有效烃源岩在北次凹的最大厚度为130余米,在南次凹的最大厚度为100余米;C-P有效烃源岩整体厚度较大,但分布较为局限,在北次凹的最大厚度达700余米,在南次凹的最大厚度为100余米。

5.2 油气信息与勘探潜力

YB1井见1.5 m气测异常油气显示,显示层位为C-P,岩性为细砂岩,气测全烃值最大为0.72%, C_1 — C_4 组分齐全。YBC1井的油气显示相比于YB1井更为活跃,全井共见13 m/6层的荧光显示和21 m/8层的气测异常显示,油气显示集中于3个井段(图11)。油气显示段1:井深为2542~2902 m,层位为C-P,岩性为细砂岩,共见14 m/5层气测异常油气显示,气测全烃值最大为7.90%, C_1 值最大为4.34%, C_1 — C_4 组分齐全。油气显示段2:井深为1927~2067 m,层位为 K_1b^2 ,岩

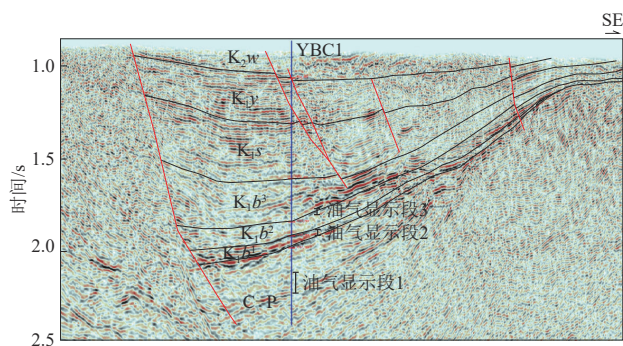


图11 巴北凹陷YG14-243E测线地震剖面

Fig. 11 Seismic section of line YG14-243E in the Babei Sag

性为细砂岩、含砾细砂岩等,共见11 m/5层荧光油气显示。油气显示段3:井深为1639~1828 m,层位为 K_1b^3 ,岩性为细砂岩和含砾细砂岩,共见7 m/3层气测异常油气显示和2 m/1层的荧光显示,气测异常显示段全烃值最大为0.97%。由于油气显示级别不高等原因,2口探井均未开展试油气工作,油气层产能情况未

知。但活跃的油气显示表明,研究区不仅具有较好的油气成藏烃源岩条件,而且发生过油气聚集并具有好的油气成藏结果,因而具备较好的油气勘探潜力。

6 结论与认识

1)银额盆地巴北凹陷潜在烃源岩为发育于 K_1y , K_1s , K_1b^3 , K_1b^2 , K_1b^1 和 C-P 的泥岩,其中以 K_1b^3 , K_1b^2 , K_1b^1 和 C-P 泥岩的有机质丰度为最高;他们的有机质类型偏腐殖型,以 II_2 型-III 型为主;成熟度方面, K_1y 和 K_1s 烃源岩以成熟-低成熟烃源岩为主, K_1b^3 , K_1b^2 和 K_1b^1 烃源岩达到了成熟-高成熟热演化阶段, C-P 烃源岩以过成熟烃源岩为主。

2)生物标志化合物特征表明,在有机质来源方面,其有机质母质来源主要为陆源高等植物,但 K_1b^3 烃源岩在局部井段表现出藻类等水生生物相对于高等植物的优势生源贡献。在沉积环境方面,各层段烃源岩均主要形成于弱还原-弱氧化的微咸水环境。

3)厘定了研究区有效烃源岩的 TOC 下限值为 0.80%,成熟生烃门限深度为 1 100 m,有效烃源岩主要发育于 K_1b^3 , K_1b^2 , K_1b^1 和 C-P,在南、北两个次凹沉积中心的厚度均较大,且在北次凹的发育程度好于南次凹。同时,活跃的油气显示表明研究区具有较好的油气勘探潜力。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 陈治军,王文慧,刘金丰,等. 银额盆地哈日凹陷多类型油气藏共生特征及其成藏机理[J]. 沉积学报,2022,40(2):557-572.
Chen Zhijun, Wang WenHui, Liu JinFeng, et al. Symbiotic characteristics and hydrocarbon accumulation mechanism of multi-type oil and gas reservoirs in the Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 557-572.
- [3] 王萍,向连格,姜海健,等. 银根-额济纳旗盆地拐子湖凹陷白垩系油源对比分析[J]. 石油实验地质,2019,41(3):427-434.
Wang Ping, Xiang Liange, Jiang Haijian, et al. Cretaceous oil-source correlation in Guaizihu Sag, Yin'gen-E'ji'naqi Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019,41(3): 427-434.
- [4] 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.
- [5] 潘宾锋,高月泉,潘涛,等. 银额盆地拐子湖凹陷北部地区白垩系烃源岩特征[J]. 岩性油气藏,2021,33(6):114-123.
Pan Binfeng, Gaoquan, Pan tao, et al. Characteristics of Cretaceous source rocks in northern Guaizihu Sag, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 114-123.
- [6] 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 Shuangfang, Ma Yanling, Cao Ruichen, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications: Taking the Wuerxun Sag in Hailaer Basin as an example [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3): 535-544.
- [7] 白胜伟,李锦华. 银额盆地巴北凹陷二叠系砂砾岩储层特征及成岩演化[J]. 地下水,2020,42(3):138-141.
Bai Shengwei, Li Jinhua. Reservoir feature and diagenetic evolution of Permian glutenite in Babei sag, Yinger Basin [J]. Ground water, 2020, 42(3): 138-141.
- [8] 徐铠炯,王纳申,申彪,等. 银额盆地巴北凹陷二叠系埋汗哈达组储层敏感性[J]. 地质通报,2020,39(10):1600-1607.
Xu Kaitong, Wang Nashen, Shen Biao, et al. Maihanhada formation reservoir sensitivity of Permian in Babei sag, Yin'E Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(10): 1600-1607.
- [9] 王志伟. 银额盆地巴北凹陷延巴参1井烃源岩评价[J]. 石化技术,2018,25(9):201.
Wang Zhiwei. Evaluation of hydrocarbon source rocks of Yanbacan 1 well in Babei sag, Yin'E Basin [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(9): 201.
- [10] 王纳申. 银额盆地巴北凹陷白垩系油气成藏条件研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
Wang Nashen. A Study on Cretaceous hydrocarbon accumulation conditions in Babei Sag, Yin-E Basin [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [11] 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.
- [12] 卢进才,陈高潮,李玉宏,等. 银额盆地及其邻区石炭系一二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.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Hou Y C, Wang H Y, Fan T L, et al. Rift-related sedimentary evolution and its response to tectonics and climate changes: A case study of the Guaizihu sag, Yingen-Ejinaqi Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 195.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩石热解分析: GB/T 18602-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Rock pyrolysis analysis: GB/T 18602-2012[S]. Beijing: Standards Press of China: 2013.
- [18] 中国石油天然气总公司. 陆相烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735-1995[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- China National Petroleum Company. Geochemical evaluation standard of terrestrial hydrocarbon source rock: SY/T 5735-1995[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [19] 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]. 古地纪学报, 2014, 16(6): 769-789.
- 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): 769-789.
- [20] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [21] 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.
- [22] 李志强, 杨波, 王军, 等. 南黄海盆地中-新生界湖相烃源岩地球化学特征及生烃史[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 419-431.
- Li Zhiqiang, Yang Bo, Wang Jun, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the South Yellow Sea Basin, offshore eastern China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 419-431.
- [23] 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.
- [24] 张振苓, 郭立言, 舒念祖. 烃源岩热解分析参数 $T_{\max}$ 异常的原因[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 72-75.
- Zhang Zhenling, Wu Liyan, Shu Nianzu. Cause analysis of abnormal $T_{\max}$ values on Rock-Eval pyrolysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 72-75.
- [25] 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.
- [26] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- Lu Shuangfang, Zhang Min. Oil and gas geochemical [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [27] 王元. 莺琼盆地烃源岩生源构成、生烃潜力及其控藏作用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- Wang Yuan. Source composition, hydrocarbon generation potential of source rocks and its control on hydrocarbon accumulation in YingQiong Basin [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.
- [28] 刘洪军, 杜治利, 陈夷, 等. 武威盆地武地1井石炭系烃源岩地球化学特征及地质意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 1061-1072.
- Liu Hongjun, Du Zhili, Chen Yi, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Carboniferous source rocks in Well Wudi 1, Wuwei Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 1061-1072.
- [29] 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.
- [30] 范胜安, 宋焕新, 文志刚, 等. 雁石坪——温泉兵站地区侏罗系烃源岩地球化学特征[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 8-13.
- Fan Sheng'an, Song Huanxin, Wen Zhigang, et al. Geochemical Characteristics of Jurassic source rocks in Yanshiping-Wenquanbingzhan Area [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(3): 8-13.
- [31] 张运波, 王明健, 杜治利, 等. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷主力烃源岩及油源对比[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 39-48.
- Zhang Yunbo, Wang Mingjian, Du Zhili, et al. Main oil source rocks and oil-source correlation in the Sikeshe sag, the southern

- margin of Junggar Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(12): 39–48.
- [32] 张参, 阳宏, 王飞龙, 等. 渤中凹陷南洼东营组烃源岩有机地球化学特征[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 35–44.
- Zhang Can, Yang Hong, Wang Feilong, et al. Organic geochemistry of the source rocks in the Dongying formation of the south Bozhong subsag[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(11): 35–44.
- [33] 李美俊, 刘晓强, 韩秋雅, 等. 分子模拟在油气地球化学中的应用研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 919–930.
- Li Meijun, Liu Xiaoqiang, Han Qiuya, et al. Progress of molecular simulation application research in petroleum geochemistry[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 919–930.
- [34] 李福来, 吕琳, 马文宽, 等. 乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1): 31–40.
- Li Fulai, Lv Lin, Ma Wenkuan, et al. Geochemical characteristics of source rocks in Liushagang Formation of Wushi Sag[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2021, 45(1): 31–40.
- [35] 孙雷, 莫少武, 宗文明, 等. 大兴安岭北部拉布达林盆地中生代烃源岩生物标志化合物特征及其意义[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(6): 73–82.
- Sun Lei, Mo Shaowu, Zong Wenming, et al. Characteristics and implications of biomarker compounds of the Mesozoic source rock in Labudalin Basin, Northern Daxinganling Mountains [J]. *Journal of northeast petroleum university*, 2019, 43(6): 73–82.
- [36] Tang X Q, Huang G H, Zhang M, et al. Compositional characteristics and geochemical significance of *N*-alkanes in process of crude oil cracking[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 372–378.
- [37] 陈治军, 王志伟, 张少清, 等. 二连盆地宝勒根陶海凹陷烃源岩生物标志化合物特征与油源对比[J]. *沉积学报*, 2020, 38(2): 451–462.
- Chen ZhiJun, Wang ZhiWei, Zhang ShaoQing, et al. Biomarker characteristics of source rocks and oil Source correlation in Baolegentao Hai Sag, Erlian Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(2): 451–462.
- [38] 周勇水, 彭君, 李红磊, 等. 成熟度对甾萜类化合物组成特征的影响——以银额盆地查干凹陷为例[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(6): 103–113.
- Zhou Yongshuil, Peng Jun, Li Honglei, et al. Effects of maturity on the compositional characteristics of steranes and terpanes: a case study of Chagan Sag in Yin'gen-Eji'naqi Basin[J]. *Journal of northeast petroleum university*, 2020, 44(6): 103–113.
- [39] 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 Shouliang, Li Yongfei, Zhang Tao, 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.
- [40] 覃建华, 高僊博, 彭寿昌, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油地球化学特征及油—源对比[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(1): 1–10.
- Qin Jianhua, Gao Xuanbo, Peng Shouchang, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin, China[J]. *Journal of northeast petroleum university*, 2021, 45(1): 1–10.
- [41] Peters K E, Clark M E, Das G U, et al. Recognition of an Infracambrian source rock based on biomarkers in the Baghewala-1 oil, India[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(10): 1481–1494.
- [42] 孙求实, 张坤, 李永飞, 等. 辽西金羊盆地北票组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. *地质与资源*, 2018, 27(1): 69–76.
- Sun Qiushi, Zhang Kun, Li Yongfei, et al. Characteristics and implication of biomarker compounds in source rocks from Beipiao formation in Jinyang Basin, Western Liaoning province [J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(1): 69–76.
- [43] 朱光有, 金强, 王锐. 有效烃源岩的识别方法[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(2): 6–9.
- Zhu Guangyou, Jin Jiang, Wang Rui. Identification methods for efficient source rocks[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(2): 6–9.
- [44] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- Pang Xiongqi. Theory and application of hydrocarbon controlled by expulsion threshold[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [45] 张心罡, 庞宏, 庞雄奇, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩生、排烃特征及资源潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 621–632.
- Zhang Xingang, Pang Hong, Pang Xiongqi, et al. Hydrocarbon generation and expulsion characteristics and resource potential of source rocks in the Longtan Formation of Upper Permian, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 621–632.
- [46] Pang Bo, Chen Junqing, Pang Xiongqi, et al. Possible new method to discriminate effective source rocks in petroliferous basins: A case study in the Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 38(2): 1–17.
- [47] 饶丹, 章平澜, 邱蕴玉. 有效烃源岩下限指标初探[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(S): 578–581.
- Rao Dan, Zhang Pinglan, Qiu Yunyu. Discussion on lower limit of content of organic matters for effective source rocks [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(S): 578–581.
- [48] 赵贤正, 柳广弟, 金凤鸣, 等. 小型断陷湖盆有效烃源岩分布特征与分布模式——以二连盆地地下白垩统为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(6): 641–652.
- Zhao Xianzheng, Liu Guangdi, Jin Fengming, et al. Distribution features and pattern of effective source rock in small faulted lacustrine basin: a case study of the Lower Cretaceous in Erlian Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 641–652.
- [49] Si W, Hou D J, Wu P, et al. Geochemical characteristics of lower cretaceous lacustrine organic matter in the southern sag of the Wuliyasitai depression, Erlian Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020: 1–18.