

微量元素在混源油类型划分及油源对比中的应用

陈哲龙^{1,2}, 柳广弟¹, 王绪龙³, 任江玲³, 高 岗¹, 马万云³, 高 平⁴

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000; 4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:采用微量元素分析三叠系百口泉组和二叠系原油及烃源岩抽提物样品, 利用 V、Ni、Co、Mo 等微量元素含量及其比值将准噶尔盆地玛湖凹陷原油划分为三类单源油(A1、A2、B)和两类混源油(C1、C2), 分析烃源岩抽提物微量元素分布特征, 建立混源油微量元素识别图版。结果表明:原油中普遍富集 V、Cr、Ni、Cu、Mo 等过渡金属元素, 稀土元素(REE)含量则普遍较低; V/Ni、Co/Ni、Cr/Mo(元素含量比值)等可以作为油源对比的有效指标, A1 类原油来源于风城组碳酸盐岩源岩, A2 类来源于风城组泥岩类, B 类则主要来源于乌尔禾组源岩, C1 类为 A1 及 B 类混源, C2 类为 A2 及 B 类混源; 该划分方法进一步证明微量元素可以作为复杂高熟条件下原油类型划分及油源对比的有效工具。

关键词:微量元素; 混源油; 油源对比; 百口泉组; 玛湖凹陷; 准噶尔盆地

中图分类号:TE 122.14

文献标志码:A

引用格式:陈哲龙, 柳广弟, 王绪龙, 等. 微量元素在混源油类型划分及油源对比中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 50-63.

CHEN Zhelong, LIU Guangdi, WANG Xulong, et al. Application of trace elements in mixed-oils classification and oil-source correlation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 50-63.

Application of trace elements in mixed-oils classification and oil-source correlation

CHEN Zhelong^{1,2}, LIU Guangdi¹, WANG Xulong³, REN Jiangling³, GAO Gang¹, MA Wanyun³, GAO Ping⁴

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
3. Research Institute of Experiment and Testing, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 843000, China;
4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The trace elements in crude oils from Triassic Baikouquan formation, Permian and bitumens of Permian source rocks in Mahu sag in Junggar Basin have been analyzed. And on the basis of the contents and ratios of trace metals, like V, Cr, Ni and Mo, etc, the oils have been classified into three single-sourced oils (A1, A2 and B) and two groups of mixed oils (C1 and C2). Trace elements distribution of source rock bitumens were investigated, then the recognition chart of distinguishing mixed oils has been established. It is found that the transition metals like V, Cr, Cu, Mo are enriched in crude oils and the contents of rare earth elements (REE) are very low. The ratios of V/Ni, Co/Ni and Cr/Mo can be effective index for oil-source correlations. And A1 oils are mainly from P₁f carbonate source rocks, while A2 oils are from P₁f mudstones, and B oils are from P₂w mudstones. C1 are the mixtures of A1 and B, while C2 are the mixtures of A2 and B. This classification method has proven that the trace elements can be effective tools for high-maturity oil classification and oil-source correlations in complex geological conditions.

Keywords: trace elements; mixed-oils; oil-source correlation; Baikouquan Formation; Mahu sag; Junggar Basin

近年来,原油及烃源岩中的微量元素研究在油气 勘探中受到越来越多的重视,其中各元素的含量和分

布可以提供原油类型、来源以及源岩沉积环境等方面的重要信息^[1-3]。微量元素含量及其比值已被广泛用于油-油及油-源对比研究,特别是在原油及烃源岩演化程度较高的地区,传统的生物标志物及同位素方法往往不能提供油源关系的有力证据,微量元素含量及比值受成熟度影响相对较小,可为油源对比提供一定辅助^[4-7]。Ni 和 V 通常是其含量最高的元素^[8],元素 Ni 和 V 主要以金属卟啉的形式赋存于原油中,在源岩早期成岩作用过程中,干酪根中的金属混合物释放及矿物-干酪根反应的金属有机化合物的形成是微量元素分配的主要过程,其含量与沉积环境及有机质类型相关,后期经受包括原油运移、成熟作用及生物降解过程中与矿物基质和地层水的反应,这些作用会影响个别微量元素的绝对浓度^[9],主要是因为元素含量主要与极性物或沥青质的含量有关,但对于微量元素比值则影响较小,如 V/Ni、V/Cr 等在原油生成、运移及后期改造过程中基本保持相对稳定,这为油源对比和混源油的识别提供了理论基础。笔者以准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组原油为研究对象,兼顾二叠系上乌尔禾组及风城组已发现原油,优选出在原油生成、演化、聚集过程中具有代表性的、相对恒定的多个元素含量或比值作为主要参数,进行高熟-过熟原油类型划分、油源对比及对混源油进行识别。本区原油来源主要为二叠

系下乌尔禾组、风城组及佳木河组三套源岩^[10],原油成熟度高、混源现象普遍^[11],利用传统的分子、同位素地球化学方法始终无法有效确定原油类型及其来源,前人在研究准噶尔盆地原油中微量元素特征时,发现各时代原油微量元素特征差别较大,其中二叠系原油以 Mn/Ni、Fe/Ni、Cr/Ni 含量高为特征^[12]。笔者尝试利用微量元素对本区高熟、混源原油进行区分,并对源岩抽提沥青元素分布特征进行研究,在此基础上优选元素指标进行油源对比。

1 地质概况

准噶尔盆地是中国西北大型含油气盆地之一,油气资源丰富。玛湖凹陷是准噶尔盆地中央坳陷的次一级负向构造单元,西邻西北缘克-夏断裂带,东接达巴松凸起、南邻中拐凸起,总面积达 11 400 km²^[13]。玛湖凹陷先后经历海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期次构造运动,早石炭-二叠纪前陆隆起,盆地受挤压应力影响,形成了一系列沟通烃源岩层的大型逆断裂,逆断层持续发育至早中三叠世停止,现今构造较为简单,其西斜坡主要表现为东南倾的平缓单斜,局部发育低幅度背斜或鼻状构造^[14]。近年在玛湖西斜坡区三叠系百口泉组勘探取得重大突破^[15],探明亿吨级油气田,初步形成了以玛北斜坡区、艾湖及玛湖地区为主的大油气区(图 1)。

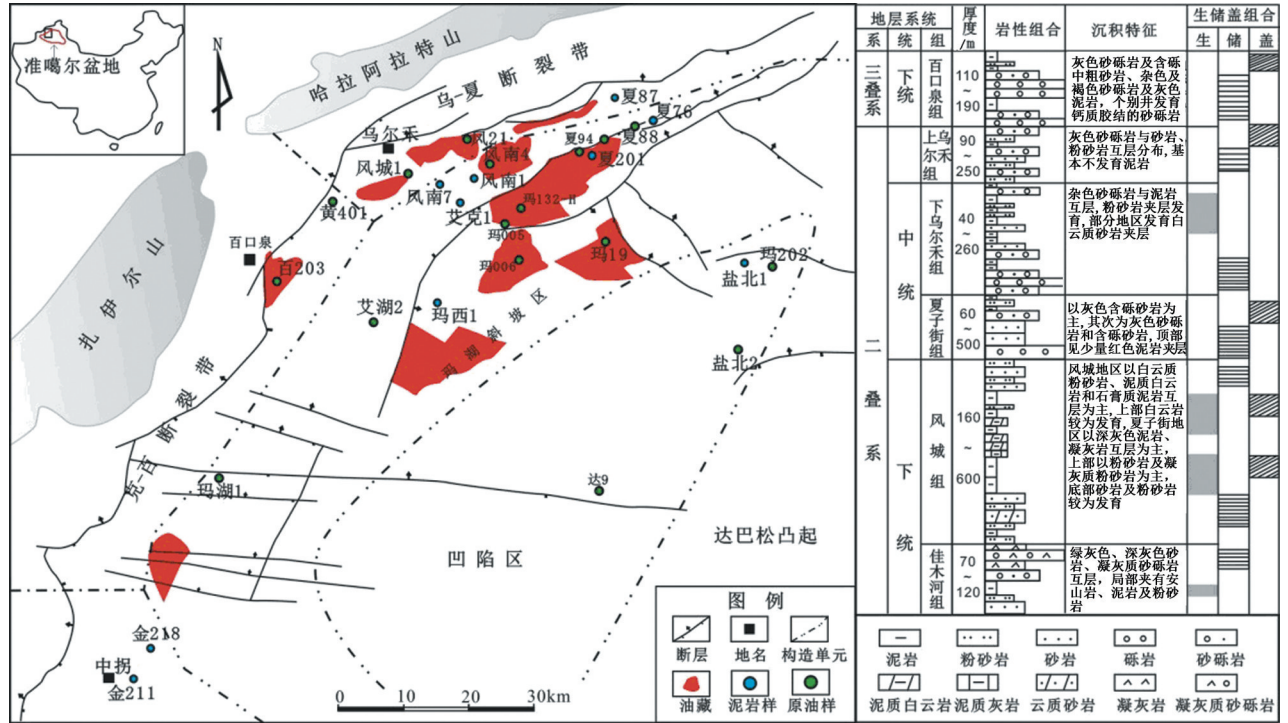


图 1 原油及烃源岩取样分布和地层综合柱状图

Fig. 1 Distribution of crude oils, source rock samples and its comprehensive stratigraphic column

玛湖凹陷地层发育齐全,自下而上主要发育有石炭系,二叠系佳木河组、风城组、夏子街组、乌尔禾组,三叠系百口泉组、克拉玛依组、白碱滩组,侏罗系八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组及白垩系。其中,三叠系百口泉组储层主要发育扇三角洲、冲积扇沉积,埋深 3 ~ 4 km,整体为低孔低渗储层,孔隙度介于 6.95% ~ 13.9%,平均为 9%,渗透率介于 $(0.05 \sim 139) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,百口泉组及二叠系形成了多套生储盖组合,为油气成藏提供了良好的地质条件(图 1)。玛湖地区百口泉组原油物性较为接近,原油密度以 0.84 ~ 0.9 g/cm³ 为主,黏度主要介于 5 ~ 50 mPa · s,含蜡量处于 2% ~ 7%,原油整体以轻质—中质为主,重质油较少,黏度较低,大部分含蜡,说明原油属于典型的陆相高成熟原油。烃源岩包括二叠系佳木河组、风城组及乌尔禾组 3 套,其中以风城组沉积以深湖相泥岩为主,其分布面积广、厚度大,有机碳含量(TOC)在 0.14% ~ 32.23%,平均可达 2.91%,热解氢指数为 100 ~ 500 mg/g,有机质类型以 II 型为主,少量 I 型。从有机质的热演化程度来看,源岩在斜坡区埋深较大,整体处于成熟—高成熟演化阶段。乌尔禾组源岩样品 TOC 大多处于 0.5% ~ 1.0%,氢指数处于 10 ~ 200 mg/g,佳木河组演化程度更高,基本处于过熟阶段,因此利用微量元素作为研究本区原油类型及油源对比工具,相比于传统生物标志物方法具有一定的优越性。

表 1 准噶尔盆地玛湖凹陷原油基本特征及主要微量元素含量

Table 1 Data of basic characteristics and major trace element content in crude oils of Mahu Sag, Junggar Basin													
样品号	井名	层位	密度/ (g · cm ⁻³)	黏度/ (mPa · s)	C ₂₉ 甾烷 ββ/αα+ββ	元素含量/(μg · g ⁻¹)							
						V	Cr	Co	Ni	Zn	Sr	Mo	Ba
MHY-8	夏 94	T ₁ b	0.832	—	0.50	0.122	0.188	0.049	2.280	13.900	0.100	0.024	0.852
MHY-27	风南 4	P ₁ f	0.908	230.40	—	0.874	0.567	0.272	33.000	1.300	0.075	0.225	0.147
MHY-29	风城 1	P ₁ f	0.904	110.40	0.54	0.411	0.335	0.029	5.510	2.190	0.051	0.082	0.207
MHY-30	风 21	P ₁ f	0.879	25.10	0.48	0.571	0.190	0.104	17.600	1.160	0.084	0.033	0.195
MHY-41	风 19	P ₁ f	0.841	59.00	0.44	0.460	0.346	0.175	15.200	4.680	0.732	0.055	1.190
MHY-2	达 9	T ₁ b	0.799	2.11	0.60	0.143	0.102	0.015	0.361	1.090	0.267	0.002	0.362
MHY-5	盐北 2	T ₁ b	0.837	7.94	0.64	0.351	0.359	0.007	0.222	0.462	0.078	0.006	0.149
MHY-6	玛 202	P ₃ w	0.818	3.56	0.64	0.327	0.164	0.015	0.420	0.883	0.090	0.003	0.181
MHY-20	玛 132-H	T ₁ b	0.817	3.20	0.60	0.155	0.099	0.110	0.567	0.673	0.047	0.006	0.163
MHY-24	风南 4	T ₁ b	0.829	4.60	0.60	0.242	0.106	0.120	0.663	1.520	0.048	0.004	0.266
MHY-34	黄 401	T ₂ k	0.818	3.44	—	0.160	0.080	0.180	1.140	1.270	0.062	0.007	0.191
MHY-35	玛西 1	T ₁ b	0.806	2.91	0.62	0.272	0.377	0.510	1.390	0.484	0.030	0.008	0.08
MHY-42	玛 006	P ₃ w	—	—	0.57	0.252	0.158	0.340	1.670	0.917	1.390	0.009	3.550
MHY-11	夏 89	T ₁ b	0.878	—	0.58	0.819	0.199	0.178	15.800	0.772	0.060	0.030	0.176
MHY-12	夏 88	P ₁ f	0.881	45.40	0.54	0.307	0.133	0.042	4.980	1.600	0.079	0.011	0.348
MHY-37	玛湖 1	T ₁ b	0.824	6.01	0.64	0.327	0.166	0.221	7.560	1.710	5.470	0.007	0.958
MHY-38	玛湖 1	P ₂ x	0.863	—	0.58	0.348	0.250	0.124	4.410	6.620	0.112	0.009	1.260
MHY-40	艾湖 2	T ₁ b	0.804	2.56	0.57	0.170	0.540	0.018	0.499	4.040	0.071	0.022	0.616
MHY-14	玛 19	T ₁ b	—	—	0.56	0.344	0.117	0.008	0.232	4.190	0.053	0.004	0.255
MHY-32	百 203	T ₁ b	0.857	11.60	0.54	0.219	0.296	0.129	2.660	2.220	0.102	0.007	0.310
MHY-22	玛 005	T ₁ b	0.831	—	0.56	0.303	0.094	0.017	0.797	0.543	0.044	0.002	0.098
MHY-13	夏 76	T ₁ b	0.858	38.30	0.60	0.422	0.218	0.004	0.545	0.748	0.038	0.005	0.105

2 样品与实验

本次研究共选取原油样品 22 个,泥岩抽提物样品 12 个,原油样品为中途测试(DST)取样原油,层位主要为三叠系百口泉组(T₁b),少量二叠系上乌尔禾组(P₃w)、夏子街组(P₂x)及风城组(P₁f)原油;泥岩样品主要为研究区内二叠系三套源岩样品,包括佳木河组(P₁j)、风城组(P₁f)及下乌尔禾组(P₂w),其中风城组(P₁f)在本区发育碳酸盐岩类和泥岩类两种岩性,不同岩性对应不同沉积环境,会造成微量元素分布的差异。测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,微量元素采用酸溶法,制备好的样品溶液在 ICP-MS 上测试,所用仪器为德国 Finnigan-MAT 公司制的 HR-ICP-MS(ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪),测试方法和依据《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定》(GB/T 14506.30-2010),工作温度、相对湿度分别为 20 ℃和 30%,微量元素含量大于 1×10⁻⁶时相对误差小于 5%,含量小于 1×10⁻⁶时的相对误差小于 10%,原油基本特征及主要元素分析结果见表 1,烃源岩抽提物基本特征及主要元素分析结果见表 2。此外,还收集了本地区所有烃源岩及原油样品(包含本次选用样品)的 GC-MS 分析和同位素分析数据。

表 2 玛湖凹陷二叠系烃源岩基本特征及其抽提物主要微量元素含量

井号	深度/ m	层位	岩性	TOC/ %	S ₁ /(mg· g ⁻¹)	S ₂ /(mg· g ⁻¹)	T _{max} / ℃	元素含量/(μg·g ⁻¹)							
								V	Cr	Co	Ni	Zn	Sr	Mo	Ba
风南 4	4 402.86	P ₁ f	泥质白云岩	0.56	0.05	0.18	440	1.520	0.977	0.181	28.200	12.31	1.820	0.100	1.310
风南 7	4 237.80	P ₁ f	白云质泥岩	1.11	9.35	1.96	407	0.630	1.490	0.290	40.500	9.03	0.390	0.149	0.602
风南 1	4 096.50	P ₁ f	白云质泥岩	1.42	1.72	6.89	435	1.240	0.990	0.384	41.900	2.26	0.136	0.125	0.375
夏 201	4 719.80	P ₁ f	粉砂质泥岩	0.94	3.62	1.61	412	3.424	1.030	0.044	4.710	1.94	0.172	0.011	0.463
夏 76	3 455.50	P ₁ f	灰色泥岩	0.53	1.27	1.38	435	9.170	3.879	0.130	13.600	2.25	0.632	0.061	1.030
夏 88	3 670.50	P ₁ f	灰黑色泥岩	0.87	0.48	0.55	423	4.170	1.880	0.202	9.600	7.89	0.429	0.035	1.410
盐北 1	4 010.50	P ₂ w	灰黑色泥岩	1.71	0.19	0.64	454	1.966	2.180	1.430	8.900	8.73	0.635	0.050	2.380
金 211	3 808.70	P ₂ w	灰黑色泥岩	0.96	0.03	0.30	447	2.430	1.130	3.560	7.740	18.80	3.570	0.053	6.380
玛西 1	3 849.20	P ₂ w	灰褐色泥岩	0.52	0.12	0.07	544	4.960	10.200	2.696	12.960	34.80	2.360	0.282	6.750
艾克 1	5 667.00	P ₁ j	白云质泥岩	0.43	0.62	0.87	447	0.285	1.470	0.049	2.311	4.32	0.672	0.034	1.460
金 218	3 888.00	P ₁ j	灰黑色凝灰岩	1.87	8.18	8.21	433	0.866	1.010	0.652	2.400	3.19	0.142	0.015	0.310
风城 1	5 457.50	P ₁ j	碳质泥岩	1.00	0.04	0.36	491	0.599	3.400	0.152	1.290	29.20	3.000	0.033	2.200

3 原油元素地化特征及分类

原油中含有多种微量元素,包括 Se、V、Cr、Fe、Co、Ni、Zn、Cu、La、Ti、Cs 等元素,这些元素在各个样品中的含量存在差异,德国学者 Ellrich 等^[16]最早利用原油中分布较为稳定的 V、Co、Ni 等元素将德国南部原油分为两类,一类相对富含 V、S、Ni 的第三系原油,V/Ni 比介于 0.03 ~ 0.06;另一类为元素含量较低的三叠—侏罗系原油,其 V/Ni 介于 0.13 ~ 0.16,因此对于不同地区的样品选择合适的微量元素对比参数对于原油类型划分及油源对比具有重要意义。

3.1 元素参数优选

由于各地区沉积环境及所经历地质过程的差异,其原油中微量元素的分布及含量存在明显差异^[17],因此,在进行原油类型划分时,首先应选择含量较高、差异相对明显且主要指示原始沉积环境的微量元素作为典型指标。以玛湖凹陷玛 132-H 井 T₁b 原油为例(图 2),其主要富集 Sc、V、Cr、Co、Ni、

Ti 等过渡金属元素,含有少量的碱金属元素,而稀土元素含量普遍较低,基本小于 1 μg/g。稀土元素由于含量相对较低,受后期各种地质因素影响较大,不适合作为本区对比的典型指标;而碱金属元素由于活性较大、易受后期作用影响,也不适于作为主要对比指标;过渡金属元素则由于其主要以有机金属化合物形式富集于原油的重组分中,可以较多反映原始沉积环境信息,因此其元素浓度或比值可以作为油-油对比的有效指标,其来源主要为源岩中有机质干酪根,受沉积环境氧化-还原条件的控制,如 Hitchon 和 Filby^[18]在研究加拿大阿尔伯塔原油的有效指标时认为根据 Sc、Co、Se、V 和 Br 可以对原油进行有效归类,Curiale^[19]利用原油中的 V/Ni 对美国阿拉斯加地区原油类型进行了划分,并认为除了 V 和 Ni 以外的其他过渡金属元素如 Cu、Fe、Mn 等元素也可以作为原油类型划分的良好指标。综上所述,结合本地区的实际情况,主要选择 V、Ni、Co、Mo、Ba 等元素含量及其相关比值作为原油类型划分的主要参数。

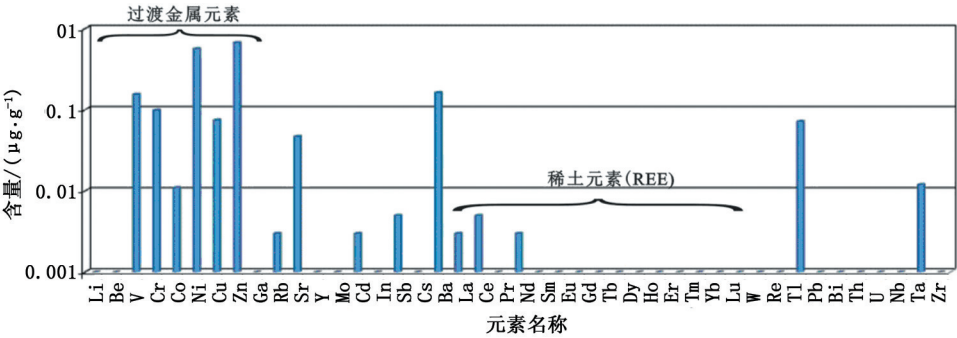


图 2 准噶尔盆地玛湖凹陷 T₁b 玛 132-H 井原油各微量元素分布柱状图

Fig. 2 Bar chart of trace elements distribution in crude oil of well Ma 132-H in Mahu Sag, Junggar Basin

3.2 原油类型划分及混源识别

在确定了微量元素有效划分参数的基础上,首先尝试运用生标及同位素数据对玛湖凹陷原油类型进行划分,其大致可以划分为 A、B、C 三大类,其中 A 类和 C 类又可分为 A1 和 A2 及 C1 和 C2 两个亚类,其中 A 类与 B 类具有单源特征, C 类具有混源特征。前人研究已证实准噶尔盆地西北缘地区三环萜的分布与源岩沉积环境具有一定的对应关系,且被广泛用于油源对比^[20,21],从常规生物标志物三环萜参数上可以看出 A 类原油及风城组源岩样品具有三环萜烷 C_{20} 、 C_{21} 及 C_{23} 含量呈现逐渐增加的趋势(图 3(a)),且 A1 类与 A2 类原油及其对应烃源岩的分布区间存在差异: A1 类原油样品与风城组

型源岩与原油的对应关系,如图 3(b)所示 A1 类原油碳同位素 $\delta^{13}C$ 相对较轻,与风城组白云岩类烃源岩对应关系良好, A2 类原油 $\delta^{13}C$ 则相对较重,与风城组泥岩对应关系良好; B 类原油碳同位素则相对更重,与乌尔禾组源岩对应较好, C 类原油表现出 C1 类原油 $\delta^{13}C$ 较轻而 C2 类原油相对略重的特征,说明 C1 类可能有来自风城组碳酸盐的混入,而 C2 类可能有来自风城组泥岩来源原油的混入。

此外,从生标谱图上也可以看出这五类原油与三套烃源岩的亲缘关系。如图 4 所示,每一类原油和源岩的对应关系,特征非常相似,如风城组原油整体特征相似,但 A2 类与 A1 类相比, C_{25} 三环萜烷含量较高,对应风城组泥岩 C_{25} 三环萜含量也较高,乌尔禾组源岩三环萜整体呈下降型分布,与 B 类原油对应;而混源油则具有两种油气相混合的特征,如 C1 类混源油,其总离子流图与 B 类下乌尔禾组原油相似,而其萜烷特征则明显混入了风城组原油的特征,规则萜烷含量相较于典型乌尔禾组有了明显的提升,说明混入了风城组的原油。C2 类混源特征与此类似。

在确定 A、B、C 三大类原油可能来源及其特征的基础上,为了进一步确定混源油的具体类型和来源,对这些原油样品的微量元素含量(Cu、Zn、Mo、Co)及相关比值(V/Ni 、 Sr/Ba)进行研究,其中 V/Ni 被广泛应用于原油类型划分与油源对比研究,由于其含量较高,受影响较小,故可信度较高,且使用广泛^[22-23]; Cu、Cr、Zn、Mo 等元素对古环境具有指示意义,其中 Cu、Zn 等元素可以反映水体氧化-还原环境的强弱, Co 元素含量可能与原地生物富集程度相关, Mo 属于氧化还原敏感元素,其含量常常与沉积水体 S 离子相关, Sr/Ba 较高则反映了沉积水体盐度可能较高^[24-25]。如图 5(a)所示, A1 类原油 V/Ni 较低基本低于 0.1, 反映了其沉积环境水体相对较浅, Cu 含量相对较高,说明其还原程度较高,属于封闭的蒸发湖湾沉积,而 A2 类型原油 V/Ni 基本大于 0.5, 反映其母源属于半深湖相沉积环境,但 Cu 元素含量相对较低,反映了水体半还原的环境,说明其水体虽然可能较深,但物源输入对其影响较大,保存条件一般。而 B 类原油则介于 A1 与 A2 类之间,属于以上两类间的过渡沉积环境;图 5(b)中, A1 类原油 Co 含量较高,反映其母源主要为原地生物富集,而 A2 类 Co 含量较低,反映其母源沉积物受外来物源影响大;图 5(c)中, A1 类原油 Mo、Zn 含量较高,反映其水体还原性较高, A2 类则相对较弱,反映其水体较为动荡,物源受外来影响较多。综上所述,

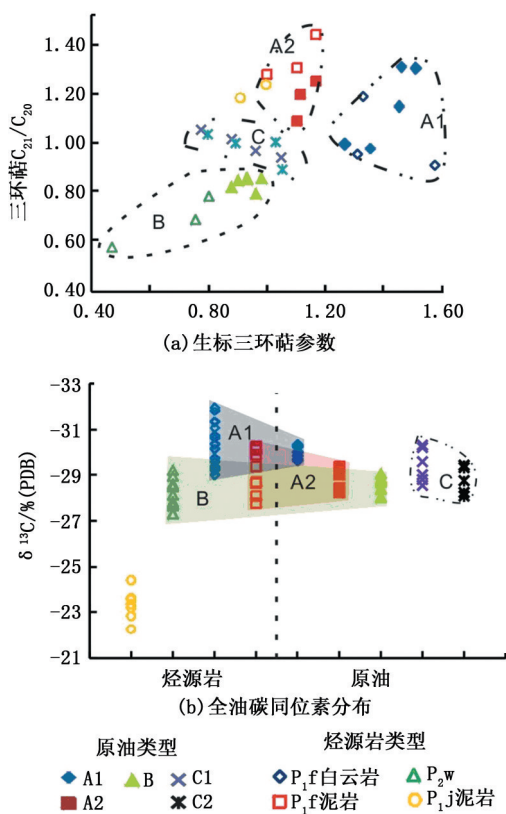


图3 玛湖凹陷油源对比散点图

Fig.3 Scatter diagram of oil-source correlation in Mahu Sag

(P_{1f}) 碳酸盐岩类样品较为接近, A2 类原油样品与风城组泥质岩类烃源岩分布区间相近。B 类原油和乌尔禾组源岩(P_{2w})样品则呈现逐渐下降的趋势, C 类原油介于两者之间, 显示出风城组与乌尔禾组源岩混源的特征, 但对应于风城组在不同地区发育不同岩性烃源岩的特点, 必然造成不同地区 C 类混源油也会形成 C1 与 C2 两个亚类。此外, 从源岩抽提物和原油碳同位素上也可以一定程度上看出不同类

A1 类原油来源于原地生物较发育的相对浅水蒸发还原环境,A2 类则属于受外来物源影响较多的半还原较深水沉积环境,B 类原油母源沉积环境整体介于两者之间。

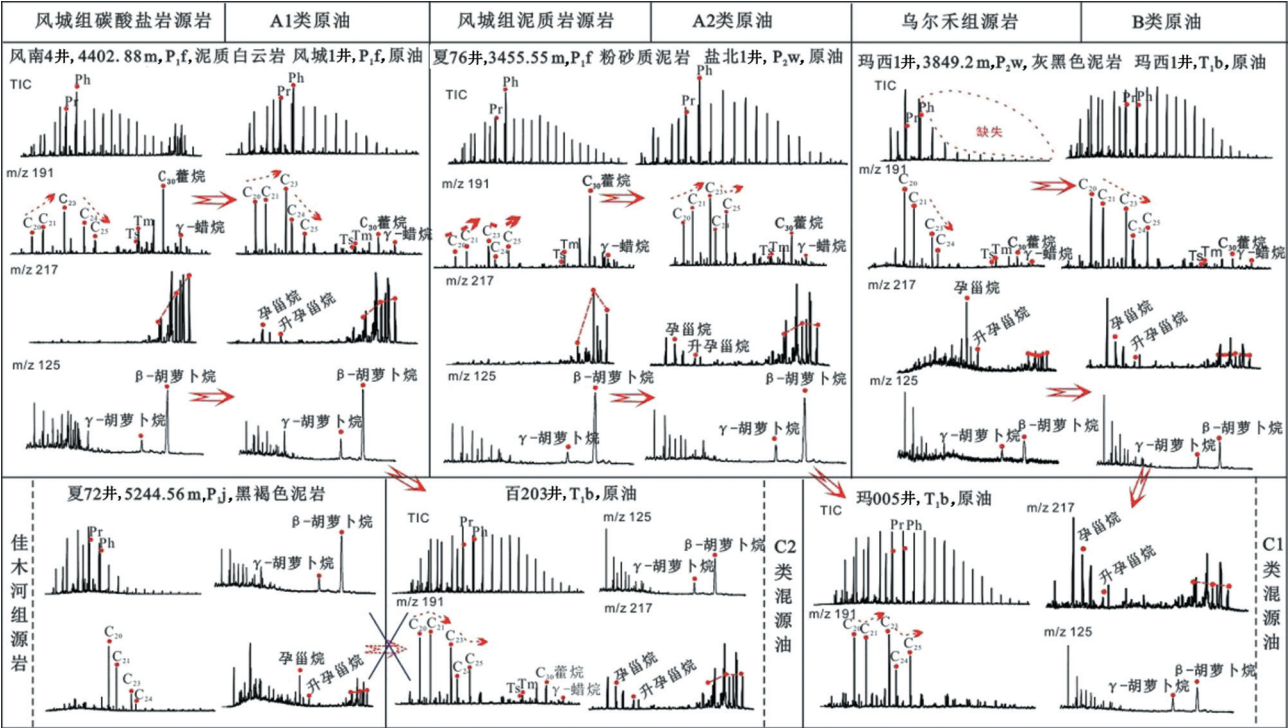


图 4 玛湖凹陷油源对比 GC-MS 谱图

Fig. 4 GC-MS graphs for oil-source correlation in Mahu Sag

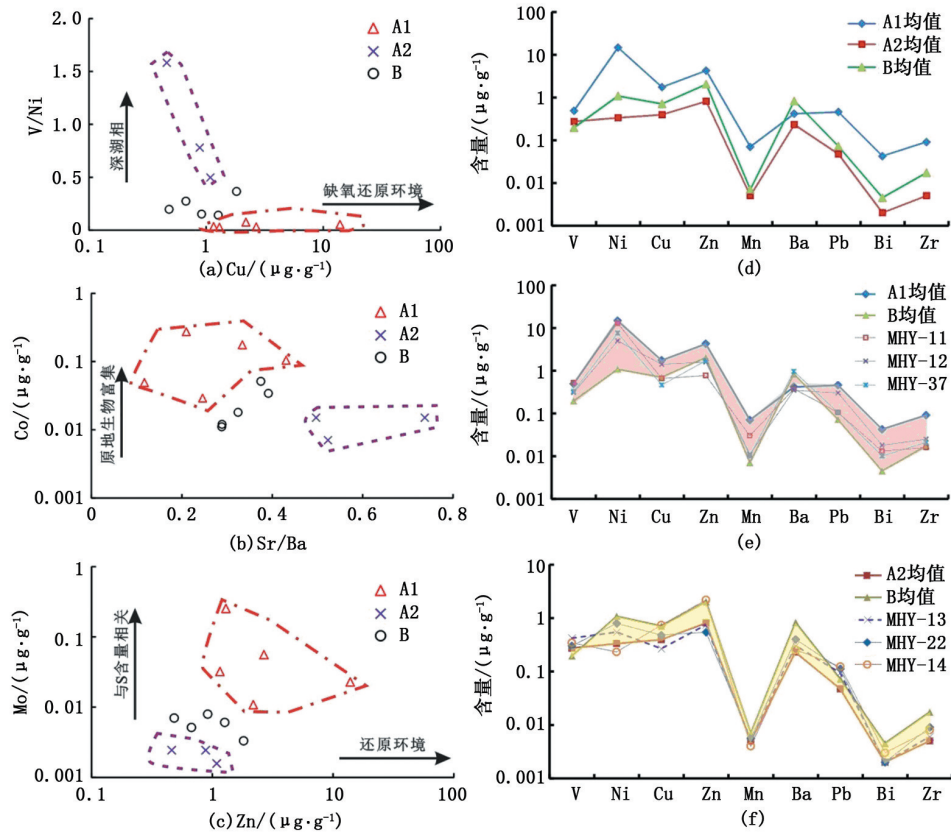


图 5 玛湖凹陷原油类型划分微量元素散点折线图

Fig. 5 Scatter diagram and line charts of trace elements for classifying crude oil of Mahu Sag

对于混源油的识别,仅利用生物标志物及同位素并不能快速、准确区分其来源与类型。其中微量元素含量在不受其他污染的情况下,理论上应该介于两类端元油之间,但由于很多情况下原油在运移过程中存在被周围侵染的可能性,在个别元素上存在一定变化,考虑多个具有代表性的微量元素含量分布时,其整体分布趋势应介于两类端元油之间。因此,认为多个相关元素的折线图可以较好地反映样品的整体变化趋势,从而代表样品的特征。首先通过对单源油 A1、A2 及 B 类所有样品求平均值,然后做折线图可以看出三类端元油在多种元素含量上存在较大差异(图 5(d)),如 Ni 含量表现为 A1 类平均含量大于 $10 \mu\text{g/g}$, A2 与 B 含量基本小于 $1 \mu\text{g/g}$;对于 Mo 含量, A1 类位于约 $0.1 \mu\text{g/g}$,而 A2 和 B 类则小一个数量级位于约 $0.01 \mu\text{g/g}$ 。对于所选的 V、Ni、Cu、Zn 等 9 个元素含量, A1 类整体展现出含量较高的特征, A2 类则相对较低, B 类介于两者之间。若混源样品元素含量整体高于 B 类则可能混入了 A1 类原油,而低于 B 类则可能混入了 A2 类原油,有机地球化学方面的证据及风城组不同类型烃源岩的不同平面分布区域导致了基本不存在 A1 与 A2 原油混源的类型,因此元素含量的这种差异性为前述混源油类型的细分提供了可靠依据。利用此类差别,分别绘制了 A1 与 B 类及 A2 与 B 类混源油元素含量分布图(图 5(e))。通过对混源油样品 MHY-11、MHY-12 及 MHY-37 样品元素含量进行投点,发现其典型元素含量基本位于 A1 类均值与 B 类之间,个别元素大于或小于均值且相差不大,但多元素含量整体分布形态介于两类端元油 A1 类及 B 类原油均值之间,说明其主要来源于此两类端元油,而混源油样品 MHY-13、MHY-14 及 MHY-22 微量元素含量分布介于 A2 类及 B 类均值的分布形态之间,除个别点有少量浮动外,整体变化趋势与两类端元油较为类似(图 5(f))。通过此种方法,将具有混源特征的原油微量元素投入图版可以快速识别混源油的类型,再结合油源对比即可分析其主要来源。

综上所述,原油中的微量元素可以提供其母源沉积环境方面的信息^[26-27]。原油中 Cu、Zn 等过渡金属元素在缺氧环境中较为富集,而 V/Ni、Sr/Ba 等参数可以提供沉积相类型及水体盐度等相关信息,从这些微量元素含量及比值参数上可以看出本区原油 A1、A2、B 三类具有较为明显的区分特征,而混源油 C 类从这些单一参数上的区分在不同参数上存

在差异,为此对单源原油多元素含量均值做折线图,再将混源油样品投在图版上可以观察混源油分布区间,从而可以快速区分不同混源油类型。

4 原油与源岩沥青元素对比

前人普遍认为原油中的微量元素指纹继承了源岩抽提沥青,后期发生的运移、成熟和其他过程对单个元素的含量又一定影响,但对 V/Ni、V/Cr、Ni/Co、U/Th 等微量元素比值影响不大^[28],因为元素含量主要与极性物或沥青质含量有关,且元素往往具有同步变化特征^[29],故金属元素比值受影响较小。根据元素比值可以有效进行油源对比。首先对源岩特征进行研究是进行油源对比的基础。前人研究认为玛湖地区烃源岩主要为二叠系佳木河组、风城组及乌尔禾组三套^[30],其中佳木河组沉积期火山活动较为剧烈,沉积相以冲积扇为主,有机质以偏腐植型为主,生油能力较弱;湖水面积在风城组沉积期迅速扩大,水体盐度因浓缩作用明显升高,属于咸水湖或盐湖沉积^[31],在湖湾地区形成了以泥质白云岩、粉砂质白云岩为主的碳酸盐岩沉积,而在其他地区形成了以凝灰质泥岩、粉砂质泥岩为主的泥岩类沉积^[32],风城组源岩显微组分以荧光无定形体、藻类体最为丰富,生油能力最强;在夏子街组沉积期,湖盆逐渐萎缩,泥质岩类总体不发育,而在上覆的下乌尔禾组沉积期,湖盆又开始重新发育,但水体已淡化,属于淡水湖相沉积,有机质类型相当于混合偏腐泥型,具有一定的生油能力^[33,34]。在此基础上,以下重点研究各套源岩抽提物的元素分布特征。

4.1 源岩抽提物微量元素特征

岩石中的金属离子浓度可以反映沉积演化过程中的 Ph 和 Eh,因此利用金属元素含量可以追溯沉积环境的变化^[35],曹剑等(2012)在研究准噶尔盆地烃源岩微量元素时发现,二叠系烃源岩 Sr、V、K、Ba 含量较高,石炭系源岩 Sr、Ba 含量高,三叠系源岩 B、Fe、Ga、Ni、Al、Zn 含量高^[36]。烃源岩由于其在生排烃过程中会发生元素的迁移,因此利用源岩抽提物近似代替本套源岩的元素分配特征相比直接分析源岩或干酪根中的元素更具对比的优势^[37],且由于源岩成分复杂,不仅包含干酪根,更有其他碎屑矿物,单一元素指标对于油源对比并无普遍的适用规律^[38],因此本研究采用泥岩抽提物与原油进行对比。由于碳酸盐岩一般在相对静水还原的沉积环境中发育会导致较高的 Ca 和 Sr 含量。V 和 Mn 则对沉积环境较为敏感,其在湖相环境中比在海相环境

中运移扩散更快,可能是因为是在弱酸性的湖相水中这些金属化合物溶解度的变化所致^[39]。鉴于风城组岩性较为复杂,将其烃源岩分为泥岩类与碳酸盐岩类两类分别进行研究,从表 2 中也可以看出风城组碳酸盐岩中 Ni 含量较高,而泥岩则 V 含量较高,呈现出显著的差异,此外,乌尔禾组源岩显示 Co、Cr、Ba 含量较高的特征,Ni 含量则与风城组泥岩沉积物较为接近,说明泥岩沉积物有其相似的元素分配特征,这些过渡金属受到沉积时氧化-还原条件影响,因此是沉积环境的良好指标。

为了更清晰地表现各套源岩的差异,特选取 V/Ni、Zn/Ba、Co/Ni、Mo/Ni、Sr/Ba 5 个参数探讨玛湖凹陷二叠系各套源岩抽提物元素分配的差异。如图 5 所示,风城组碳酸盐 3 个代表样品表现出 Zn/Ba 比值较高,约为 10,但 V/Ni 比值较低,介于 0.1 ~ 0.01,Co/Ni 比值约为 0.01,Sr/Ba 相对较高(图 6 (a)),反映了风城组碳酸盐岩沉积时水体为还原性

较强、盐度较高的封闭湖湾相特征;而风城组泥岩样品与风城组碳酸盐岩分布相差较大,表现为 V/Ni 比值较高,约为 1,Zn/Ba 小于 10,且 Sr/Ba 相对较低的特征(图 6(b)),反映了风城组泥岩沉积时水体还原性较差、盐度较低的较深湖相特征,这与苗建宇^[40]对本区二叠系源岩沉积环境的认识相似;乌尔禾组泥岩样品整体上与风城组泥岩样品分布形态接近,但其 V/Ni 比更低,基本小于 1,Co/Ni 比较大,基本在 0.1 以上,显示出与风城组不同的元素比值分布样式(图 6(c)),其本地来源有机质较多,湖水较深,受外来物源影响相对较小;佳木河组泥岩各个样品则相对变化较大,如艾克 1 井泥岩其元素分布与风城组泥岩较类似,而金 218 井泥岩则与乌尔禾组泥岩较为类似的特征,这可能与佳木河组沉积期区域内火山活动明显、源岩非均质性明显对其元素分布影响较大^[41]。

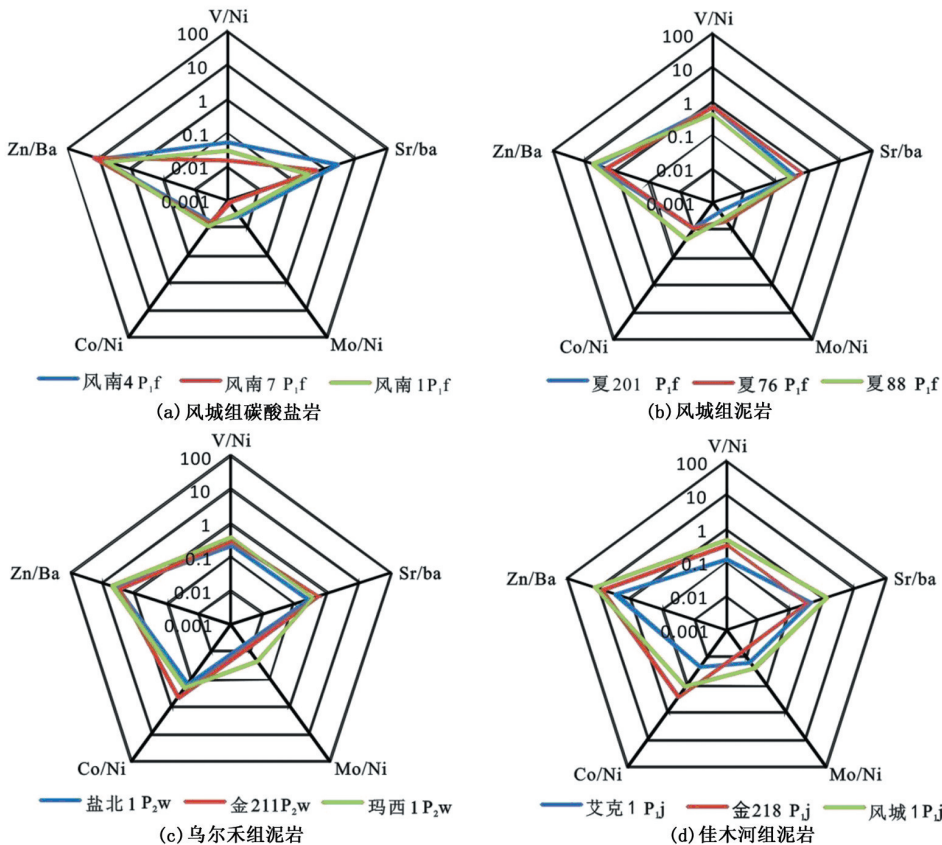


图 6 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩抽提物微量元素比值雷达图

Fig. 6 Radar graphs of trace elements ratio of Permian source rock extracts in Mahu Sag, Junggar Basin

4.2 油源对比及原油分布特征

利用元素进行油源对比时,由于单个元素含量会受到原油成熟度、排烃运移及后生作用影响,而元素比值则相对较为稳定,可以作为油源对比的有效

指标^[42-43]。丁祖国等^[44]运用 V/Ni、Co/Ni、Mn/Ni、Fe/Ni 等元素比值对原油与源岩之间的关系,对江汉油田原油与源岩有机抽提物的的关系进行了研究,认为元素比值可以作为油源对比的一种手段。

Jiao 等^[45]提出利用 V/Ni 可以追踪油气运移路径, 由于有机酸的活化, 源岩中的微量元素可以迁移进原油中, 其主要以过渡金属化合物或卟啉螯合物的形式存在于原油的沥青质中随着原油运移^[46]。此外, 玛湖凹陷斜坡区储集层主要为三叠系百口泉组, 垂向上远离二叠系风城组主力源岩层 1~2 km, 下伏源岩层主要依靠海西—印支期发育的一系列垂向走滑断裂向上输导油气, 低孔低渗的储集条件降低了油气侧向运移混合的可能性^[47], 因此随着垂向上不同源岩的依次成熟排烃, 不同类型原油垂向运移进入上部储集层, 原油是否发生混合取决于本地各

套源岩是否发育及是否有断裂沟通源储^[48], 且三叠系百口泉组顶部发育泥岩顶板, 基本大于 3 km 的埋深等条件都为油藏内原油提供了良好的保存条件^[49], 原油中的微量元素含量主要受控于源岩类型且不易受到其他因素的干扰, 此种地质背景为利用微量元素对本区原油与源岩进行油源对比提供了有力条件。

如图 7(a) 所示, 从 V/Ni 与 Mo/Ni 两个比值上可以看出, 风城组碳酸盐类源岩样品与 A1 类原油具有良好的对应关系, 其 V/Ni 、 Mo/Ni 比值基本都小于 0.1; 而风城组泥岩类与 A2 类原油具有较好的

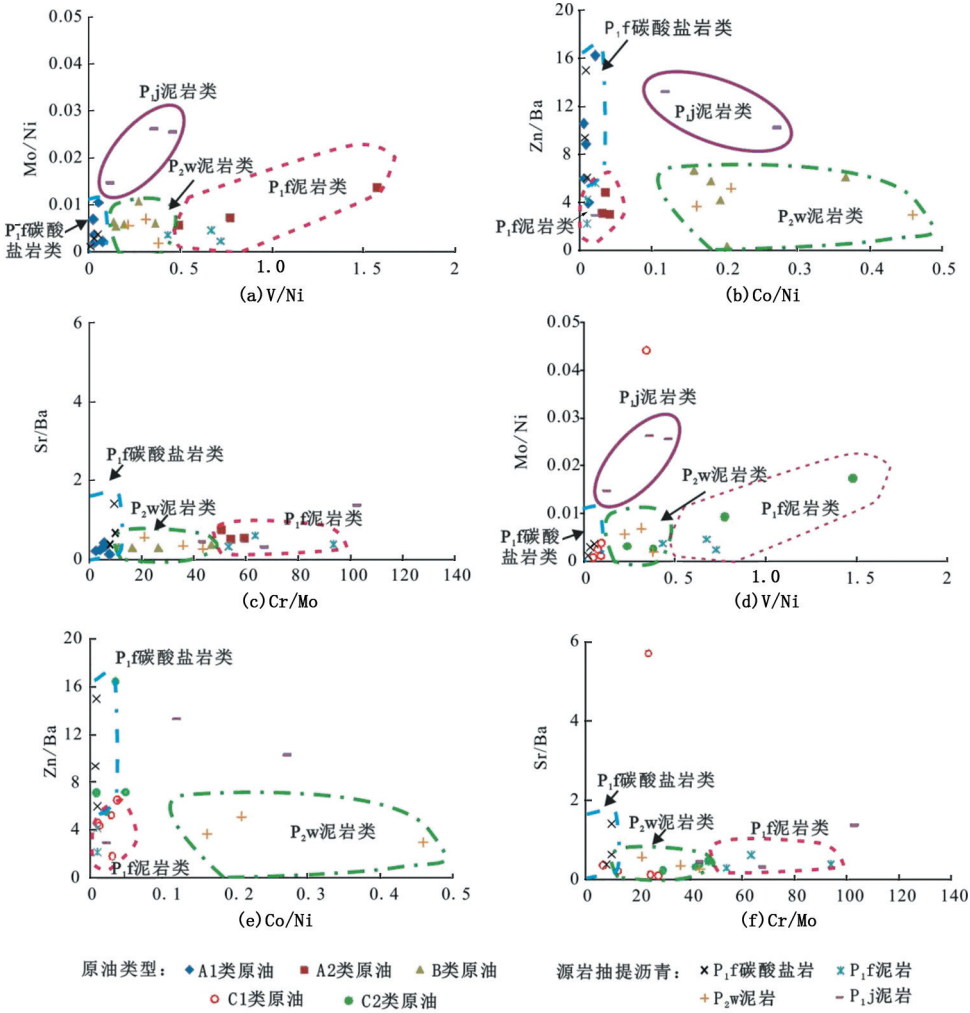


图 7 准噶尔盆地玛湖凹陷原油与源岩沥青微量元素油源对比散点图

Fig. 7 Scatter diagram of oil-source correlation of crude oils and source rock in Mahu Sag, Junggar Basin

对应关系, 其 V/Ni 比值基本大于 0.5, 乌尔禾组泥岩与 B 类原油对应较好, 且 V/Ni 比值介于 0.2~0.5, 而佳木河组烃源岩 Mo/Ni 比值较大, 与各类原油对应关系较差, 基本可以排除其对本区原油的贡献; 如图 7(b) 所示, 从 Co/Ni 、 Zn/Ba 比值上也可以看出, 风城组碳酸盐岩与 A1 类原油的 Co/Ni 比值

较低, 风城组泥岩与 A2 类原油对应关系良好, 与前者相比其 Zn/Ba 比值较低, 而乌尔禾组泥岩与 B 类原油相关性较好, 其 Co/Ni 比值基本大于 0.1, 佳木河组泥岩则 Co/Ni 、 Zn/Ba 比值均较高, 与目前发现的原油对比关系整体较差; 从 Co/Mo 与 Sr/Ba 关系图上 (图 7(c)), 可以看出 Sr/Ba 在区分原油类型上

作用不甚明显,而 Cr/Mo 则较好地指明了油源关系,风城组碳酸盐岩与 A1 类原油样品的 Cr/Mo 比值均小于 10,而乌尔禾组泥岩与 B 类原油样品则介于 10~50,风城组泥岩类与 A2 类原油样品则基本大于 50,以上说明利用微量元素 V/Ni、Co/Ni、Cr/Mo 等比值可以对单源类原油进行油源对比,多个指标共同验证了对比结果,具有较高的可信度,但一些指标如 Sr/Ba 等区分效果则不甚明显。在此基础上,将混源油相关参数投在散点图上观察其来源,从图 7(d)可见 C1 类混源油的点除了 1 个点外,基本在风城组碳酸盐岩和乌尔禾组泥岩之间的分布区域,更加靠向风城组碳酸盐岩分布区域,而 C2 类混源油在元素 V/Ni 比值也处于风城组泥岩与乌尔禾组泥质之间的区域,其中两个点位于乌尔禾组泥岩分布区,两个点位于风城组泥岩分布区域,与前部分

确定其混源端元与来源相符。从图 7 上看,混源油的元素比值 Zn/Ba 对于混源油来源并不能有效区分,这可能是由于不同类金属元素性质差异造成的,Zn 属于过渡金属而 Ba 属于碱土金属元素,不同的分馏效应导致其比值并不能在原油生成、运移、聚集过程中保持相对恒定,因此在利用元素比值进行油源对比时,应以同类金属元素比值为主要依据,Cr/Mo 比值上 C1 类混源油有 1 个点位于风城组碳酸盐岩区间,而另外 3 个点位于乌尔禾组泥岩分布区,C2 类样品除 1 个点位于乌尔禾组泥岩区间外,另外 3 个点基本位于乌尔禾组泥岩与风城组泥岩区间交界的区域,说明其具有混源的特征(图 7(f));Sr/Ba 区分效果则不甚明显。本次油源对比研究中使用的烩源岩抽提物及各类原油的主要元素比值参数见表 3。

表 3 玛湖凹陷各类原油与二叠系源岩抽提物微量元素比值

Table 3 Data of trace element ratios of crude oils and source rock extracts in Mahu Sag, Junggar Basin								
样品类型	井号	层位	V/Ni	Sr/ba	Mo/Ni	Co/Ni	Zn/Ba	Cr/Mo
A1 类原油	夏 94	T ₁ b	0.054	0.117	0.011	0.021	16.315	7.833
	风南 4	P ₁ f	0.026	0.210	0.007	0.008	8.844	2.520
	风城 1	P ₁ f	0.075	0.246	0.002	0.005	10.580	4.085
	风 21	P ₁ f	0.032	0.431	0.002	0.006	5.949	5.758
	风 19	P ₁ f	0.030	0.334	0.004	0.012	3.933	6.291
A2 类原油	达 9	T ₁ b	0.496	0.738	0.006	0.042	3.011	51.000
	盐北 2	T ₁ b	1.581	0.523	0.014	0.032	3.101	59.833
	玛 202	P ₃ w	0.779	0.497	0.007	0.036	4.878	54.667
B 类原油	玛 132-H	T ₁ b	0.273	0.288	0.011	0.194	4.129	16.500
	风南 4	T ₁ b	0.365	0.289	0.006	0.181	5.714	26.500
	黄 401	T ₂ k	0.140	0.325	0.006	0.158	6.649	11.429
	玛西 1	T ₁ b	0.196	0.375	0.006	0.367	6.050	47.125
	玛 006	P ₃ w	0.151	0.392	0.005	0.204	0.258	17.556
C1 类原油	夏 89	T ₂ k	0.052	0.341	0.002	0.011	4.386	6.633
	夏 88	P ₁ f	0.062	0.227	0.002	0.008	4.598	12.091
	玛湖 1	T ₁ b	0.043	5.710	0.001	0.029	1.785	23.714
	玛湖 1	P ₂ x	0.079	0.089	0.002	0.028	5.254	27.778
	艾湖 2	T ₁ b	0.341	0.115	0.044	0.036	6.558	24.545
C2 类原油	玛 19	T ₁ b	1.483	0.208	0.017	0.034	16.431	29.250
	百 203	T ₁ b	0.082	0.329	0.003	0.048	7.161	42.286
	夏 76	T ₁ b	0.774	0.362	0.009	0.007	7.124	43.600
	玛 005	T ₁ b	0.380	0.449	0.003	0.021	5.541	47.000
P ₁ f 碳酸盐岩 源岩抽提物	风南 4	P ₁ f	0.054	2.916	0.004	0.006	9.397	9.770
	风南 7	P ₁ f	0.016	0.648	0.001	0.007	15.000	10.000
	风南 1	P ₁ f	0.030	0.363	0.003	0.009	6.027	7.920
P ₁ f 泥岩类 源岩抽提物	夏 201	P ₁ f	0.727	0.371	0.002	0.009	4.190	93.636
	夏 76	P ₁ f	0.674	0.614	0.004	0.010	2.184	63.590
	夏 88	P ₁ f	0.434	0.304	0.004	0.021	5.596	53.714
P ₂ w 泥岩类 源岩抽提物	盐北 1	P ₂ w	0.221	0.267	0.006	0.161	3.668	43.600
	金 211	P ₂ w	0.314	0.560	0.007	0.460	2.947	21.321
	玛西 1	P ₂ w	0.383	0.350	0.002	0.208	5.156	36.170
P ₁ j 泥岩类 源岩抽提物	艾克 1	P ₁ j	0.123	0.460	0.015	0.021	2.959	43.235
	金 218	P ₁ j	0.361	0.323	0.026	0.272	10.290	67.333
	风城 1	P ₁ j	0.464	1.364	0.026	0.118	13.273	103.030

综上所述,在区分本区烃源岩抽提物微量元素含量和比值的基础上,认为利用元素比值进行油源对比是一种有效的方法,A类原油主要来自本区风城组源岩,其中 A1 类原油来自风城组碳酸盐岩源岩,A2 类原油来自风城组泥质岩类源岩,B类原油主要来自本区乌尔禾组泥岩,佳木河组泥岩对本区原油贡献可能性较小。C1 类混源油主要来自风城组碳酸盐岩和乌尔禾组泥岩,C2 类混源油主要来自风城组泥岩和乌尔禾组泥岩。利用微量元素比值进行在进行原油类型划分及油源对比中应注意选择分馏机制较为相似的同类元素,多个指标共同验证,方能确定单原油来源及对混源油来源进行追踪。

在原油类型划分的基础上,对本区原油类型分

布进行了研究,并圈定其平面分布范围(图 8)。从图 8 看出:A1 类原油主要分布于风南、乌尔禾地区,A2 类原油主要分布于玛东及玛北地区,B 类原油主要分布于玛湖及玛西地区,C1 类混源油主要在玛北地区,C2 类混源油主要在玛西南地区。在陆相盆地中,原油分布主要受烃源岩分布的影响,因此可以推测风城组碳酸盐岩主要发育于风南及乌尔禾地区,而玛湖凹陷玛北及玛东地区主要发育风城组泥质岩类,乌尔禾组烃源岩主要发育于玛湖深部地区及玛西地区,佳木河组烃源岩则在玛湖凹陷深部发育较少,不同地区可能发育多套烃源岩,造成原油的混源,这为认识本地区不同类型源岩的分布及分析成藏过程提供了可靠依据。

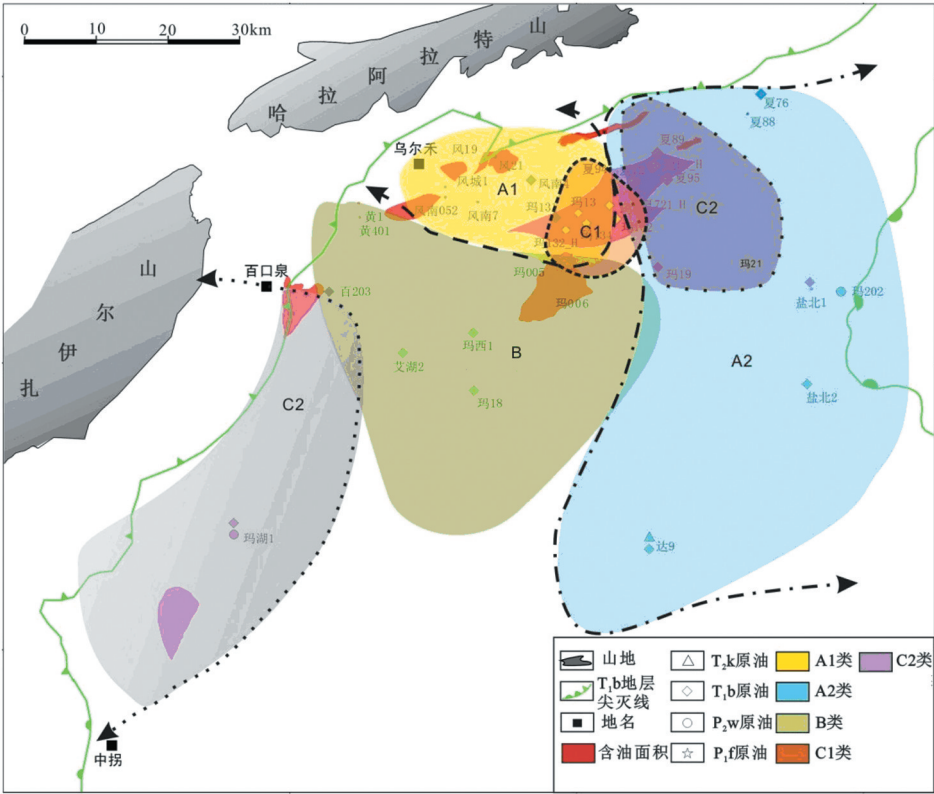


图 8 玛湖凹陷不同类型原油平面分布

Fig.8 Distribution map of different groups of crude oils in Mahu Sag

5 结 论

(1)利用原油中的微量元素含量及相关比值将玛湖凹陷原油划分为三类单原油、两类混源油,其中 A1 类原油来源于原地生物较发育的相对浅水还原环境,表现为 V/Ni 较低,Cu、Co 含量相对较高,Sr/Ba 相对较低,A2 类则受外来物源影响较多的相对半还原较深水沉积环境,元素分布特征与 A1 差别较大,B 类原油母源沉积环境整体介于两者之间;C1

类具有 A1 类与 B 类混源特征,C2 类具有 A2 类与 B 类混源的特征。

(2)元素比值 V/Ni、Co/Ni、Cr/Mo 可以作为本区微量元素油源对比的有效指标, A1 类原油来源于风城组碳酸盐岩源岩,A2 类来源于风城组泥岩类,B 类则来源于乌尔禾组源岩,在确定混源油类型时应以多个元素含量指标共同验证,在对单源及混源原油进行油源对比时选择多个同类元素比值共同验证可信度较高。

参考文献:

- [1] LEWAN M D. Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(11):2231-2238.
- [2] AKINLUA A, ADEKOLA S A, SWAKAMISA O, et al. Trace element characterisation of Cretaceous Orange Basin hydrocarbon source rocks [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(10):1587-1595.
- [3] TAO S, TANG D, XU H, et al. Organic geochemistry and elements distribution in Dahuangshan oil shale, southern Junggar Basin: origin of organic matter and depositional environment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 115:41-51.
- [4] AKINLUA A, AJAYI T R, ADELEKE B B. Organic and inorganic geochemistry of northwestern Niger Delta oils [J]. *Geochemical Journal*, 2007, 41(4):271-281.
- [5] GALARRAGA F, REATEGUI K, MARTINEZ A, et al. V/Ni ratio as a parameter in palaeoenvironmental characterisation of nonmature medium-crude oils from several Latin American Basins[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, 61(1):9-14.
- [6] 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.
- [7] AKINLUA A, SIGEDLE A, BUTHELEZI T, et al. Trace element geochemistry of crude oils and condensates from South African Basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59:286-293.
- [8] FILBY R H. Origin and nature of trace element species in crude oils, bitumens and kerogens: implications for correlation and other geochemical studies[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1994, 78(1):203-219.
- [9] BRANTHAVER J F, FILBY R H. Application of metal complexes in petroleum to exploration geochemistry[M]. Washington DC: American Chemical Society, 1987:84-99.
- [10] 王绪龙,康素芳. 准噶尔盆地西北缘玛北油田油源分析[J]. *西南石油学院学报*, 2001, 23(6):6-8.
WANG Xulong, KANG Sufang. Analysis on the oil source of the Mabei Oilfield, northwest Junggar Basin [J]. *Journal of the Southwest Petroleum Institute*, 2001, 23(6):6-8.
- [11] 陈哲龙,柳广弟,王绪龙,等. 玛湖凹陷三叠系百口泉组油藏多期混源成藏的包裹体证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015(增1):740.
CHEN Zhelong, LIU Guangdi, WANG Xulong, et al. The fluid inclusion evidence of oil-mixed and multi-stage accumulations in Triassic Baikouquan formation in Mahu Depression [J]. *Journal of the Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015(sup1):740.
- [12] 赵增义,赵建华,王海静,等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30(2):30-32.
ZHAO Zengyi, ZHAO Jianhua, WANG Haijing, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30(2):30-32.
- [13] 雷德文,阿布力,唐勇,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组油气高产区控制因素与分布预测[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(5):495-499.
LEI Dewen, A Buli, TANG Yong, et al. Controlling factors and occurrence prediction of high oil-gas production zones in lower Triassic Baikouquan Formation of Mahu Sag in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(5):495-499.
- [14] 匡立春,唐勇,雷德文,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(6):14-23.
KUANG Lichun, TANG Yong, LEI Dewen, et al. Exploration of fan-controlled large area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in slope area of Mahu Depression in Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6):14-23.
- [15] 阿布力米提,曹剑,陈静,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷高成熟油气成因与分布[J]. *新疆石油地质*, 2015(4):379-384.
ABULIMITI, CAO Jian, CHEN Jing, et al. Origin and occurrence of highly matured oil and gas in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015(4):379-384.
- [16] ELLRICH J, HIRNER A, STARK H. Distribution of trace elements in crude oils from Southern Germany [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1):313-323.
- [17] 刘小微,程克明. 微量元素在煤成烃研究中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(5):40-44.
LIU Xiaowei, CHENG Keming. Application of trace element in the study of petroleum from coals [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(5):40-44.
- [18] HITCHON B, FILBY R H. Use of trace elements for classification of crude oils into families: example from Alberta, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(7):

- 838-849.
- [19] CURIALE J A. Distribution of transition metals in North Alaskan oils[M]. Washington DC: American Chemical Society, 1987:135-145.
- [20] 王绪龙,康素芳. 准噶尔盆地腹部及西北缘斜坡区原油成因分析[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(2): 108-112.
- WANG Xulong, KANG Sufang. Analysis of crude origin in hinterland and slope area of northwestern margin, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(2): 108-112.
- [21] XIANG B, ZHOU N, MA W, et al. Multiple-stage migration and accumulation of Permian lacustrine mixed oils in the central Junggar Basin(NW China)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 187-201.
- [22] BARWISE A J G. Role of nickel and vanadium in petroleum classification[J]. Energy & Fuels, 1990, 4(6): 647-652.
- [23] CHEN J H, PHILP R P. Porphyrin distributions in crude oils from the Jiangnan and Biyang Basins, China[J]. Chemical Geology, 1991, 91(2): 139-151.
- [24] MONGENOT T, TRIBOVILLARD N P, DESPRAIRIES A, et al. Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: the Cretaceous La Luna Formation of Venezuela[J]. Sedimentary Geology, 1996, 103(1): 23-37.
- [25] ALBERDI-GENOLET M, TOCCO R. Trace metals and organic geochemistry of the Machiques Member (Aptian—Albian) and La Luna Formation (Cenomanian—Campanian), Venezuela[J]. Chemical Geology, 1999, 160(1): 19-38.
- [26] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 27-32.
- DENG Ping. The application of trace amount of elements in the exploration of oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 27-32.
- [27] FRANKENBERGER A, BROOKS R R, VARELA-ALVAREZ H, et al. Classification of some New Zealand crude oils and condensates by means of their trace element contents[J]. Applied Geochemistry, 1994, 9(1): 65-71.
- [28] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(2): 193-200.
- TENGER, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. Correlative study of parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks formative environment[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(2): 193-200.
- [29] KIMURA H, WATANABE Y. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. Geology, 2001, 29(11): 995-998.
- [30] 王圣柱, 张奎华, 金强. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区原油成因类型及凤城组烃源岩的发现意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 595-602.
- WANG Shengzhu, ZHANG Kuihua, JIN Qiang. The genetic types of crude oils and the petroleum geological significance of the Fengcheng Formation source rock in Hashan area, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 595-602.
- [31] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地地下二叠统凤城组[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 781-790.
- CAO Jian, LEI Dewen, LI Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790.
- [32] LU X, SHI J, ZHANG S, et al. The origin and formation model of Permian dolostones on the northwestern margin of Junggar Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105: 456-467.
- [33] 刘文彬. 准噶尔盆地西北缘凤城组沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 1989, 7(1): 61-70.
- LIU Wenbin. Study on sedimentary environment of Fengcheng Formation at northwest margin of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(1): 61-70.
- [34] 丁安娜, 惠荣耀, 王屿涛. 准噶尔盆地西北缘石炭、二叠系烃源岩有机岩石学特征[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(3): 220-225.
- DING Anna, HUI Rongyao, WANG Yutao. Organic petrography of hydrocarbon source rock of the Carboniferous and Permian in northwestern margin, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15(3): 220-225.
- [35] 杨扬, 高福红, 蒲秀刚. 歧口凹陷古近系沙河街组白云岩稀土元素特征及成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 1-9.
- YANG Yang, GAO Fuhong, PU Xiugang. REE characteristics and genesis of dolostones from Paleogene Shahejie Formation in Qikou Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(2): 1-9.
- [36] 曹剑, 吴明, 王绪龙, 等. 油源对比微量元素地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 925-937.
- CAO Jian, WU Ming, WANG Xulong, et al. Advances in research of using trace elements of crude oil in oil-

- source correlation [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 925-937.
- [37] HIRNER A. Metals in crude oils, asphaltene, bitumen and kerogen in Molasse Basin, Southern Germany [M]. Washington DC: American Chemical Society, 1987: 146-153.
- [38] CAO J, WU M, CHEN Y, et al. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, Northwest China [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2012, 72(3): 245-252.
- [39] NORMAN M D, De DECKKER P. Trace metals in lacustrine and marine sediments: a case study from the Gulf of Carpentaria, Northern Australia [J]. *Chemical Geology*, 1990, 82: 299-318.
- [40] 苗建宇. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征 [D]. 西安: 西北大学, 2001.
MIAO Jianyu. The depositional environment of Permian system hydrocarbon source rocks and its potential hydrocarbon generating characteristics in major basins in North Xinjiang [D]. Xi'an: Northwest University, 2001.
- [41] 鲜本忠, 牛花朋, 董国栋, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩岩性、岩相及其与储层的关系 [J]. *高校地质学报*, 2013(1): 46-55.
XIAN Benzhong, NIU Huapeng, DONG Guodong, et al. Early Permian volcanic lithology, lithofacies and their relations to reservoir in Northwest margin of the Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013(1): 46-55.
- [42] 丁志敏. 微量元素在霸县凹陷油源对比中的应用 [J]. *石油与天然气地质*, 1987(2): 138-144.
DING Zhimin. Application of trace elements in oil source correlation of Baxian Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 1987(2): 138-144.
- [43] GAO P, LIU G, JIA C, et al. Evaluating rare earth elements as a proxy for oil—source correlation: a case study from Aer Sag, Erlian Basin, Northern China [J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 87: 35-54.
- [44] 丁祖国, 柴之芳, 马建国, 等. 江汉油田原油和生油岩有机抽提物中过渡族微量元素特征及其石油地球化学意义 [J]. *沉积学报*, 1992, 10(1): 108-551.
DING Zuguo, CHAI Zhifang, MA Jianguo, et al. Characteristics and petroleum geochemical significance of trace transition elements in crude oils and organic materials extracted from Jiangnan Oilfield [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(1): 108-551.
- [45] JIAO W, YANG H, ZHAO Y, et al. Application of trace elements in the study of oil-source correlation and hydrocarbon migration in the Tarim Basin, China [J]. *Energy, Exploration & Exploitation*, 2010, 28(6): 451-466.
- [46] SUN Y, JIAO W, ZHANG S, et al. Gold enrichment mechanism in crude oils and source rocks in Jiyang Depression [J]. *Energy, Exploration & Exploitation*, 2009, 27(2): 133-142.
- [47] CAO J, ZHANG Y, HU W, et al. The Permian hybrid petroleum system in the northwest margin of the Junggar Basin, Northwest China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(3): 331-349.
- [48] JIN Z, CAO J, HU W, et al. Episodic petroleum fluid migration in fault zones of the Northwestern Junggar Basin (Northwest China): evidence from hydrocarbon-bearing zoned calcite cement [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(9): 1225-1243.
- [49] 李德江. 准噶尔盆地西北缘三叠系储层质量差异及机理研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007.
LI Dejiang. Reservoir property difference and mechanism of Triassic in northwestern margin, Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2007.

(编辑 刘为清)