

利用油砂和烃源岩抽提沥青质的稀土元素、过渡族金属元素判识油源

——以鄂尔多斯盆地延安地区延长组下组合为例

张忠义^{1,2,3*}, 陈世加², 张文选^{1,3}, 谢先奎^{1,3}, 李树同⁴, 张晓磊^{1,3}, 刘鑫^{1,3}

¹中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安

²西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

³低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安

⁴中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州

Email: *zhangzy_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020年11月30日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月31日

摘要

针对鄂尔多斯盆地延安地区延长组长8~长10油层组受多种油源供给, 常规烃源岩生物标志化合物难以区分不同油层的油源的问题。本文利用油砂和烃源岩抽提沥青质的稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式, 结合饱和烃的C27、C28、C29重排甾烷, 对研究区长8~长10油层组的油源进行了综合判识。认为研究区长8~长10油源总体上为长7湖盆中心优质烃源岩和研究区长9烃源岩的混源, 而研究区长7暗色泥岩和长10烃源岩基本上没有贡献, 吴起、顺宁、西河口3个地区以及不同的层位的油源存在一定的差异性。研究表明, 油砂和烃源岩抽提沥青质的稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式对研究区长8~长10油层组油源判识具有良好的效果, 该方法是对湖相油源判识的一种有效补充。

关键词

鄂尔多斯盆地, 油源对比, 沥青质, 稀土元素, 过渡族金属元素

The Oil Source Analysis of Rare Earth Elements and Transition Group Metal Elements Extracted from Asphaltenes by Oil Sands and Hydrocarbon Source Rocks

—A Case Study of the Lower Assemblage of Yanchang Formation in

*通讯作者。

文章引用: 张忠义, 陈世加, 张文选, 谢先奎, 李树同, 张晓磊, 刘鑫. 利用油砂和烃源岩抽提沥青质的稀土元素、过渡族金属元素判识油源[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(12): 1256-1265. DOI: 10.12677/ag.2020.1012122

Yan'an Region, Ordos Basin

Zhongyi Zhang^{1,2,3*}, Shijia Chen², Wenxuan Zhang^{1,3}, Xiankui Xie^{1,3}, Shutong Li⁴, Xiaolei Zhang^{1,3}, Xin Liu^{1,3}

¹Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

²School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

³National Engineering Laboratory of Exploration and Development of Low Permeability Oil-Gas Fields, Xi'an Shaanxi

⁴Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

Email: *zhangzy_cq@petrochina.com.cn

Received: Nov. 30th, 2020; accepted: Dec. 23rd, 2020; published: Dec. 31st, 2020

Abstract

The Chang-8~Chang-10 oil reservoirs of Yanchang formation are supplied by multiple oil sources in Yan'an area of Ordos Basin. It is difficult to distinguish the oil sources of different reservoirs by conventional source rock biomarkers. The paper analyzes comprehensively the oil resource of Chang-8~Chang-10 oil-bearing beds in study region by the abundance partitioning model of rare earth elements and transition group metal elements extracted from asphaltenes by oil sands and hydrocarbon source rocks, and by combining with the rearrangement of C27, C28 and C29. It is considered that the oil sources of Chang-8~Chang-10 in the study region are generally a mixture of the high-quality source rocks in the center of the Chang-7 lake basin and the source rocks of Chang-9 in the study area, while the dark mudstone of Chang-7 and the source rocks of Chang-10 in the study region have almost no contribution, and the oil sources of different formation of Wuqi, Shunning and Xihekou in the study region have difference. The result reflects that the abundance partitioning model of rare earth elements and transition group metal elements extracted from asphaltenes by oil sands and hydrocarbon source rocks has good effect on Chang-8~Chang-10 formation. The mean is an effective supplement of lacustrine oil source.

Keywords

Ordos Basin, Oil Source Contrast, Asphaltene, Rare Earth Elements, Transition Group of Metal Elements

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

前人已通过常规的生物标志化合物油源对比技术对鄂尔多斯盆地下组合油藏组做过相关的研究, 鄂尔多斯盆地延安地区下组合发育长 7~长 10 多套油层组, 其中延安地区长 7 油层组中以储油为主的长 7₂ 和 7₁ 油藏中的原油主要来源于长 7₃ 中的“张家滩”页岩[1]。南部吴堡地区长 8 致密砂岩中的油源主要来自上覆长 7₃ 烃源岩、长 8 内部烃源岩和长 9 顶部烃源岩[2]。长 9 储层的油气来源则具有争议, 其核心

焦点在于是否有来自长 7 烃源岩的注入, 有人认为该区区长 9 储层原油来源于长 7 “张家滩”油页岩和长 9 “李家畔”油页岩的共同贡献[3]; 也有人认为志丹地区区长 9 储层油源主要来源于长 9 烃源岩, 而无长 7 烃源岩的混入[4] [5]。而对该区长 10 油层组中油气的来源, 不同的学者研究得出了不同的结论, 具有较大的争议性, 其核心焦点在于长 7、长 9 和长 10 那一套烃源岩供烃。有观点认为陕北志丹地区区长 10 原油来自长 7 优质烃源岩[6] [7]; 长 9 烃源岩为长 10 油藏的主力烃源岩, 长 7 烃源岩也有贡献, 但作用有限[8]; 长 10 原油主要为长 9 烃源岩贡献, 长 10 烃源岩有一定贡献[9] [10]。由此可以看出, 对于志丹地区延长组下组合各油层组中的油气来源问题, 目前还没有统一的认识, 因此, 有必要对该地区延长组下组合的油气来源做一个系统的、精细的分析, 弄清各油层组主要的油气来源贡献。

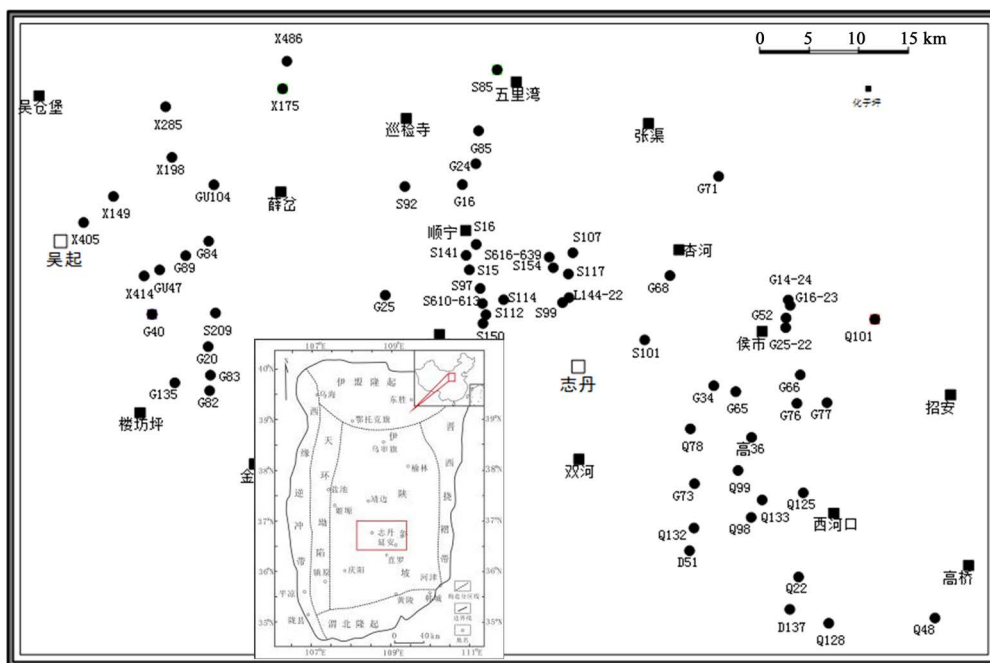


Figure 1. Study area and sample location distribution
图 1. 研究区及样品位置分布

近年来, 随着鄂尔多斯盆地石油勘探的逐渐深入, 发现在延安地区延长组的下组合地层中发育有长 7、长 9 和长 10 这 3 套有效烃源岩, 3 套烃源岩的存在使得长 8、长 9 和长 10 原油的来源问题成为研究的焦点[11] [12] [13]。前人在该问题上已经做了大量的、卓有成效的工作, 但是得出的结论存在很大争议。目前关于造成研究区延长组下组合油源对比结果存在较大分歧的主要原因: 1) 湖相油源本身的复杂性, 研究区存在长 7、长 8、长 9、长 10 四套烃源岩, 且均属于延长湖沉积期形成的, 本身之间的地球化学特征就差别不大; 2) 研究手段的单一性, 主要运用地球化学指标进行油源对比, 缺乏一些辅助的手段提供佐证。随着现代测试技术的进步, 原油中可以检出的微量元素种类日益增多, 目前已从石油中鉴定出大约 80 多种微量元素。原油中这种微量元素地球化学组成种类众多的特点为应用其开展油源对比研究奠定了良好基础。据此, 一些学者通过统计归纳分析, 并与常规有机地球化学研究结果相互对比, 寻找判断原油成因类型和油源对比的指标。生油岩有机质中含有一定量的微量元素, 其生成的油气可继承有机质及其沉积成岩环境中特有的微量元素组成, 其中的某些微量元素组成像指纹一样记录了母岩的遗传信息, 而且不易因油气运移、油藏破坏、氧化和生物降解作用而变化[14] [15] [16]。在面对复杂油气运聚, 几乎所有常见有机地球化学指标参数发生无规律变化时, 原油中微量元素分析是油源对比的重要补充手

段[17]。

本文在调研前人关于长 9~长 10 成藏地质条件、油源及有机物微量元素等方面研究成果的基础上,采用生物标志化合物和微量元素综合研究对研究区的油源进行精细对比,以期弄清不同区块、不同层位原油的来源。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,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。

2. 样品采集与分析

为了开展研究组延长组下组合油源精细对比,本次研究共采集烃源岩样品 21 个(其中长 10 泥岩 5 个,长 9 泥岩 6 个,长 7 烃源岩 10 个),油砂样品 11 个,原油样品 22 个,样品信息见表 1,分布见图 1。对各类型的样品进行了粉碎、抽提、分离、饱和烃生物标志化合物、沥青质中的微量元素相关实验分析。

Table 1. Collection information table of mud shale, oil sand and crude oil samples

表 1. 泥页岩、油砂和原油样品采集信息表

序号	井名	层位	深度(m)	岩性	序号	井名	层位	深度(m)	类型	序号	井名	层位	深度(m)	类型
1	G68	长 10	1901	泥岩	19	G135	长 9	1880.95	泥岩	37	G14~22	长 10	1718	原油
2	G34	长 10	1828.1	泥岩	20	W107	长 9	2089.3	泥岩	38	G16~23	长 10	1717	原油
3	Q132	长 10	1928.9	泥岩	21	W24	长 9	762.42	泥岩	39	S103	长 7	1840~1842	原油
4	G36	长 10	1736.9	泥岩	22	G135	长 9	1975.5	油砂	40	S107	长 7	1849~1851	原油
5	G83	长 10	2141.88	泥岩	23	G20	长 8	1969.7	油砂	41	S85	长 8	2081~2085	原油
6	G77	长 7	1335.42	泥岩	24	G25	长 9	2046.4	油砂	42	S117	长 8	1840	原油
7	G135	长 7	1852.35	泥岩	25	G68	长 8	1696.8	油砂	43	S15	长 8	1761~1765	原油
8	B407	长 7	2021.2	泥岩	26	G76	长 8	1449.25	油砂	44	S154	长 8	1748~1752	原油
9	B516	长 7	2078.34	泥岩	27	G83	长 9	2028	油砂	45	S114	长 8	1793~1797	原油
10	B212	长 7	2041.56	泥岩	28	G83	长 10	2032.16	油砂	46	S101	长 8	1757~1760	原油
11	B27	长 7	2554	泥岩	29	G84	长 8	2103	油砂	47	S112	长 9	1986.5	原油
12	B417	长 7	2165.35	泥岩	30	G89	长 10	2114.45	油砂	48	S616~639	长 9	2037.7	原油
13	H320	长 7	2868.08	泥岩	31	Q125	长 9	1619.91	油砂	49	S16	长 9	1723~1727	原油
14	T211	长 7	1624	泥岩	32	Q22	长 8	1427.32	油砂	50	S141	长 9	1871.5	原油
15	H25	长 7	2271.53	泥岩	33	Q128	长 8	1619~1621	原油	51	S116	长 9	1969~1971	原油
16	G52	长 9	1656.45	泥岩	34	Q133	长 9	1677~1680	原油	52	S99	长 10	1912~1914	原油
17	Q22	长 9	1481.35	泥岩	35	Q125	长 10	1712~1714	原油	53	S610~613	长 10	2116.05	原油
18	G66	长 9	1658	泥岩	36	G16~22	长 10	1785	原油	54	S175	长 8	2141~2145	原油

2.1. 烃源岩及油砂抽提及原油分离

首先,烃源岩样品和油砂样品粉碎至 100 目,防止微量元素分析时样品受到污染,本次碎样用碳化钨锅进行碎样,将碎好的烃源岩和油砂样品用索氏抽提法进行抽提。其次,对原油及泥岩抽提物样品进

行族组分分离，具体方法如下：首先用正己烷沉淀出沥青质后，用氧化铝/硅胶柱进行分离；饱和烃和芳烃馏分分别用正己烷 + 苯冲洗，非烃馏分用乙醇冲洗；氯仿沥青“**A**”中的沥青质用正己烷沉淀后，分离出饱和烃，见流程**图 2**。

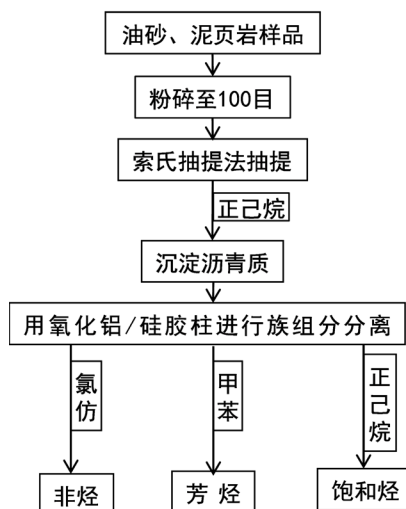


Figure 2. The sample separation flow chart
图 2. 样品分离流程图

2.2. 样品测定

饱和烃使用安捷伦科技有限公司 6890N-GC/5973N-MS 进行分析。分析条件：炉温初始温度 80℃，以 4℃/min 程序升温至 290℃，恒温 30 min；色谱进样口离子源温度为 280℃；载气为高纯氮(99.999%)；载气流量 1.2 mL/min；弹性石英毛细管柱为美国 HP-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)；无分流进样；使用全扫描模式和选择离子模式进行检测；进样量：1 微升。MS 条件：离子源为 EI 源；离子源温度 230℃；四极杆温度 150℃；离子源电离能 70 eV；质谱与色谱接口为 280℃。谱库使用美国 NIST02L 谱库。

微量元素分析 ICP-MS 7500a 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司)：利用调谐液调谐 ICP-MS 各项指标，使仪器灵敏度、氧化物、双电荷、分辨率等指标达到测定要求。仪器 RF 功率 1350 W，采样深度 6.80 mm，采样锥(Ni)孔径 1.00 mm，截取锥(Ni)孔径 0.80 mm，等离子体气流速 16.0 L/min，辅助气流速 1.00 L/min，载气流速 1.12 L/min，样品提升速率 1.00 mL/min，定量分析模式，单位质量数采集点数为 3，驻留时间 30 ms，数据采集重复次数 3 次，积分时间 0.1 s。

3. 烃源岩类型划分

由于研究区存在长 7、长 9 已经证实了的烃源岩[6]-[12]，对加之长 10 烃源岩，三套烃源岩均属于延长湖泊沉积而成，因此，烃源岩的沉积环境趋于一致，且这三套烃源岩均距离长 8、长 9、长 10 储层较近极易形成混源。前人关于研究区延长组下组合烃源岩的重排藿烷、伽马蜡烷，Ts/Tm 比值，C₃₀^{*}/C₃₀ 藿烷比值，C₂₉Ts/C₃₀ 藿烷等生物标志化合物参数均未取得很好的油源比效果。本次利用 C₂₇,C₂₈,C₂₉ 重排甾烷判识油源。

通过对烃源岩样品饱和烃的 C₂₇DiaH、C₂₈DiaH、C₂₉DiaH 三角图可分为五种类型，长 7 湖盆中心的优质烃源岩、研究区内的黑色泥岩，生油母质类型以低等水生生物为主；长 9 吴起地区黑色泥岩、西河口和顺宁地区黑色泥岩，其生油母质类型以高等植物为主；长 10 研究区黑色泥岩，其生油母质类型以陆源高等植物为主(图 3)。

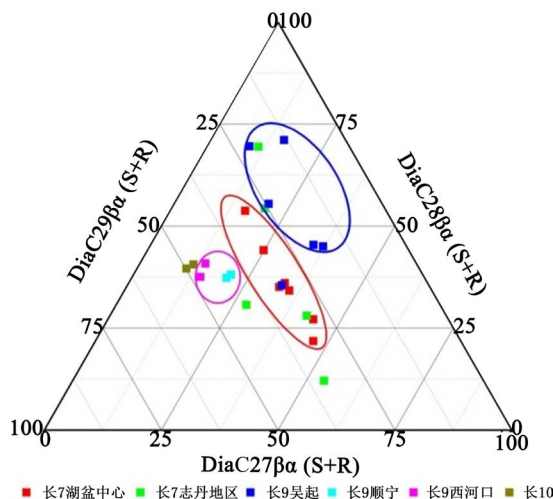


Figure 3. Triangulation of the types of alkanes from C_{27} DiaH, C_{28} DiaH and C_{29} DiaH
 图 3. C_{27} DiaH、 C_{28} DiaH、 C_{29} DiaH 烷烃源岩类型划分三角图

4. 微量元素分析

利用 ICP-MS 仪器测定了烃源岩样品沥青质中的微量元素，烃源岩沥青质中含有多种微量元素，稀土元素包括：La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Tb、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 过渡族金属元素：Se、V、Cr、Fe、Co、Ni、Zn、Cu、La、Ti、Cs 等元素。通过对烃源岩沥青质中的稀土元素丰度配分模式分析表明(图 4)：长 7 烃源岩的稀土元素丰度配分模式分为两类，其中以长 7 湖盆中心优质烃源岩为代表的(G135、B212、B27、B407、B417、B516、H320)井位一类，而位于研究区的 G77 井的长 7 黑色泥岩为一类；长 9 烃源岩中 G135、G66、G22 井稀土元素配分模式为一类，G52 井则为一类；长 10 烃源岩的 G34、G36、G68、Q132 井的稀土元素配分模式整体上为一类。另外，通过对烃源岩沥青质中的过渡族金属元素丰度配分模式分析表明(图 5)：长 7 烃源岩的 10 口井的过渡族金属元素的配分模式一致，为一类型烃源岩，与稀土元素配分模式的两种类型存在一定的差异，这可能过渡族金属元素在油气运移过程中，受到水岩的作用使之过渡族金属元素含量发生变化有关；长 9 烃源岩的沥青质中的过渡族金属元素丰度配分模式分为两类，G135、G66、G22 井过渡族金属元素配分模式为一类，G52 井则为一类，这一特征与稀土元素的划分类型完全一致；长 10 烃源岩的沥青质中的过渡族金属元素配分模式整体上为一类，这与稀土元素配分模式划分特征一致。

综合烃源岩样品饱和烃的 C_{27} DiaH、 C_{28} DiaH、 C_{29} DiaH 三角图、稀土元素丰度配分模式及过渡族金属元素丰度配分模式，将所采集的长 10、长 9、长 7 烃源岩划分为五种类型：长 7 湖盆中心的优质

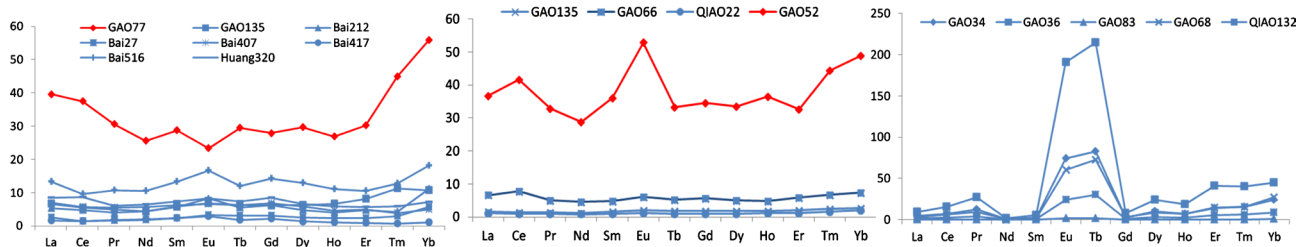


Figure 4. Distribution pattern of rare earth elements in asphaltene of Yanchang formation in the study area (left: Chang 7, middle: Chang 9, right: Chang 10)

图 4. 研究区延长组烃源岩沥青质中稀土元素配分模式图(左: 长 7, 中: 长 9, 右: 长 10)

烃源岩、长7研究区内的黑色泥岩,长9吴起地区黑色泥岩、长9西河口和顺宁地区黑色泥岩,长10研究区黑色泥岩。在此基础上,将分析的稀土元素和过渡族金属元素同一类型进行平均值化(图6,图7)。

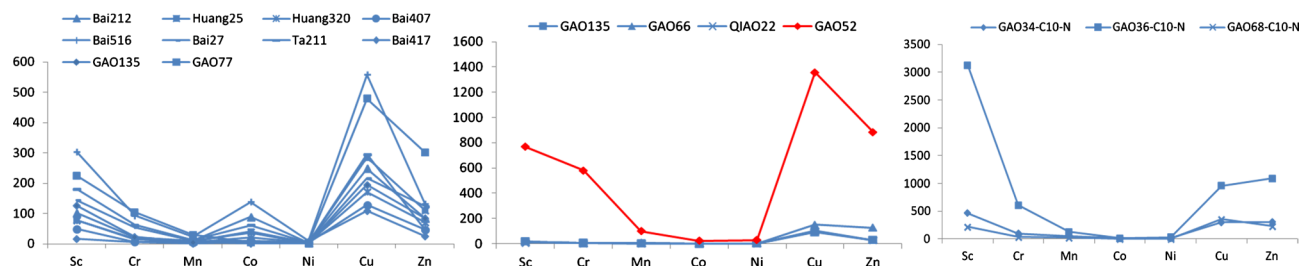


Figure 5. The distribution pattern of transition group metal elements in the asphaltene of Yanchang formation in the study area (left: Chang 7, middle: Chang 9, right: Chang 10)

图5. 研究区延长组烃源岩沥青质中过渡族金属元素配分模式图(左:长7,中:长9,右:长10)

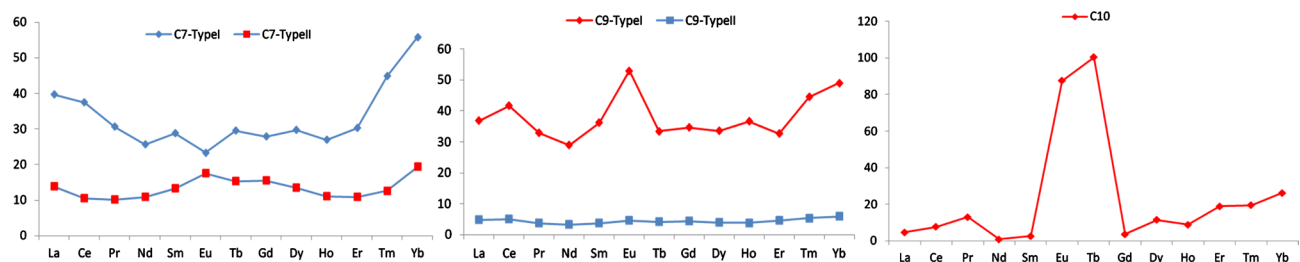


Figure 6. The average distribution pattern of rare earth elements in the asphaltene of Yanchang formation in the study area (left: Chang 7, middle: Chang 9, right: Chang 10)

图6. 研究区延长组烃源岩沥青质中稀土元素平均值配分模式图(左:长7,中:长9,右:长10)

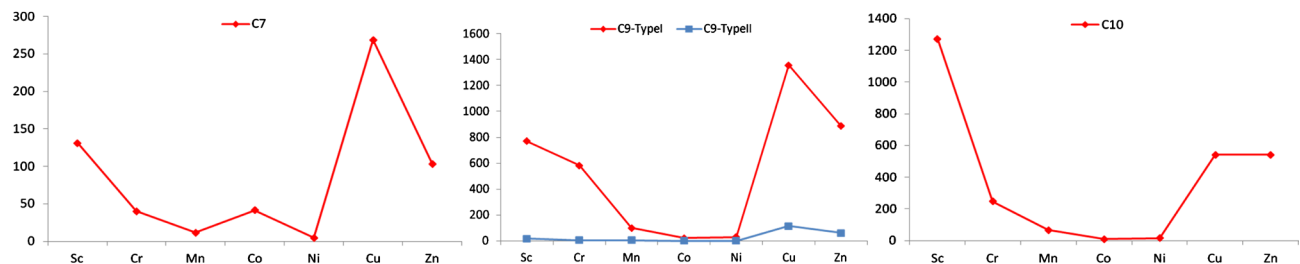


Figure 7. Average partition pattern of transition group metal elements in the asphaltene of Yanchang formation in the study area (left: Chang 7, middle: Chang 9, right: Chang 10)

图7. 研究区延长组烃源岩沥青质中过渡族金属元素平均值配分模式图(左:长7,中:长9,右:长10)

5. 油源精细对比

为了进行研究区延长组下组合油源的精细对比,本次研究将长7、长9、长10三套5种类型的烃源岩与原油的生物标志化合物参数、原油和烃源岩沥青质中的稀土元素、过渡族金属元素进行多参数分析,对长8、长9、长10油藏进行油源精细对比,

5.1. 长10油层组

烃源岩及原油样品饱和烃的 $C_{27}DiaH$ 、 $C_{28}DiaH$ 、 $C_{29}DiaH$ 三角图分析(图8),研究区长10油源散点投在了长7湖盆中心的优质烃源岩和吴起地区的长9烃源岩范围内,而与长10烃源岩和西河口地区的长9烃源岩无关系;通过长10原油和烃源岩沥青质中的稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式可以看出,长10原油与长7湖盆中心的优质烃源岩及长9烃源岩的配分模式保持一致,而与长10烃源岩的配分模

式不一致(图 9、图 10), 因此, 综合分析认为, 长 10 原油来自长 7 湖盆中心的优质烃源岩和长 9 烃源岩, 为二源供烃的混源, 而长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩基本上对长 10 原油没有贡献, 所以长 10 具有长 7 远源侧向运移和长 9 近距垂向倒灌的石油运移及成藏特征。

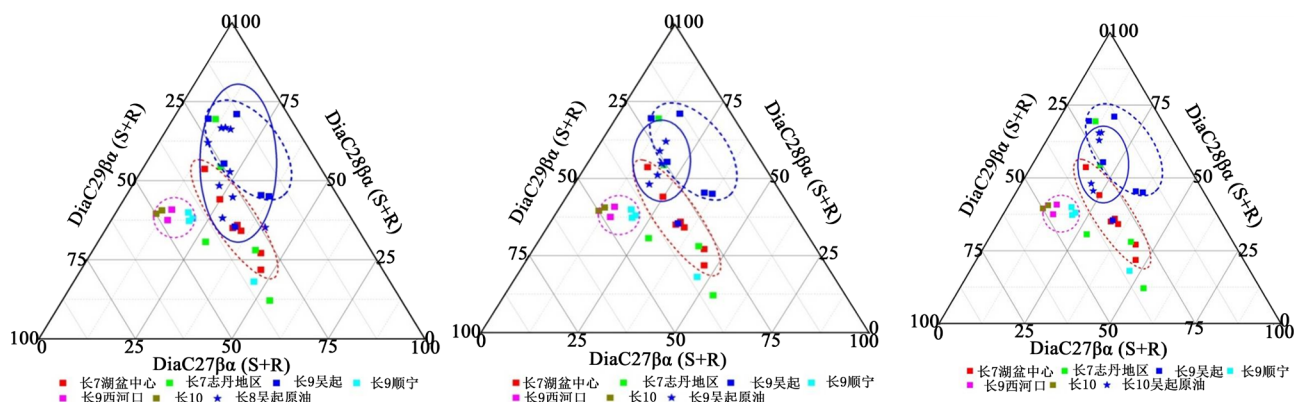


Figure 8. The oil source comparison triangle of the lower combined biomarkers in Yanchang group in the study area (left: Chang 10, middle: Chang 9, right: Chang 8)

图 8. 研究区延长组下组合生物标志化合物油源对比三角图(左: 长 10, 中: 长 9, 右: 长 8)

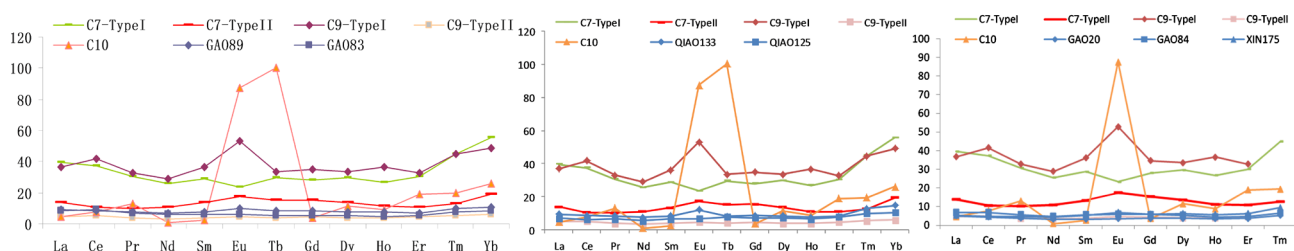


Figure 9. Oil source comparison diagram of the distribution model of combined rare earth elements in the Yanchang formation in the study area (left: Chang 10, middle: Chang 9, right: Chang 8)

图 9. 研究地区延长组下组合稀土元素配分模式油源对比图(左: 长 10, 中: 长 9, 右: 长 8)

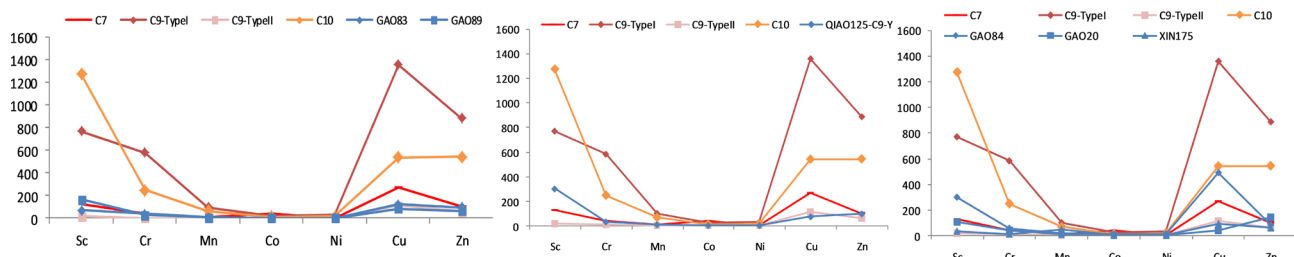


Figure 10. Oil source comparison diagram of composite transition group metal element distribution model in Yanchang group in the study area (left: Chang 10, middle: Chang 9, right: Chang 8)

图 10. 研究区延长组下组合过渡族金属元素配分模式油源对比图(左: 长 10, 中: 长 9, 右: 长 8)

5.2. 长 9 油层组

烃源岩及原油样品饱和烃的 $C_{27}DiaH$ 、 $C_{28}DiaH$ 、 $C_{29}DiaH$ 三角图分析(图 8), 研究区长 9 油源散点投在了长 7 湖盆中心的优质烃源岩和吴起地区的长 9 烃源岩范围内, 而与长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩无关系; 通过长 9 原油和烃源岩沥青质中稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式可以看出, 吴起地区长 9 原油与长 7 湖盆中心的优质烃源岩及长 9 烃源岩的配分模式保持一致, 而与长 10 烃源岩的配

分模式不一致(图 9、图 10)。因此,综合分析认为,吴起地区长 9 原油来自长 7 湖盆中心的优质烃源岩和研究地区的长 9 烃源岩,为二源供烃的混源,而长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩基本上对吴起地区长 9 原油没有贡献,所以吴起地区长 9 具有长 7 远源侧向运移+长 9 近源辅助的运移及成藏特征。

5.3. 长 8 油层组

烃源岩及吴起地区原油样品饱和烃的 $C_{27}DiaH$ 、 $C_{28}DiaH$ 、 $C_{29}DiaH$ 三角图分析(图 8),研究区长 8 油源散点投在了长 7 湖盆中心的优质烃源岩和吴起地区的长 9 烃源岩范围内,而与长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩无关系;通过吴起地区长 8 原油和烃源岩沥青质中稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式可以看出,吴起地区长 8 原油与长 7 湖盆中心的优质烃源岩及志丹地区的长 9 烃源岩沥青质中的稀土元素配分模式保持一致,而与长 10 烃源岩沥青质中稀土元素的配分模式不一致(图 9、图 10)。因此,综合分析认为,吴起地区长 8 原油来自长 7 湖盆中心的优质烃源岩和研究地区的长 9 烃源岩,为二源供烃的混源,而长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩基本上对吴起地区长 8 原油没有贡献,所以吴起地区长 8 具有长 7 远源侧向运移 + 长 9 近源垂向向上的运移及成藏特征。

6. 结论

1) 综合烃源岩饱和烃的 $C_{27}DiaH$ 、 $C_{28}DiaH$ 、 $C_{29}DiaH$ 三角图、沥青质中的稀土元素及过渡族金属元素丰度配分模式,将研究区延长组下组合烃源岩划分为五种类型:长 7 湖盆中心的优质烃源岩,长 7 研究区内的黑色泥岩,长 9 吴起地区黑色泥岩,长 9 西河口和顺宁地区黑色泥岩,长 10 研究区黑色泥岩。

2) 研究区长 8~长 10 油层组原油来自长 7 湖盆中心的优质烃源岩和长 9 烃源岩,为二源供烃的混源,而长 10 烃源岩和西河口地区的长 9 烃源岩基本上对研究区延长组下组合油层原油没有贡献,同时,吴起、顺宁、西河口 3 个地区以及不同的层位的油源存在一定的差异性。

3) 利用油砂和烃源岩抽提沥青质的稀土元素、过渡族金属元素丰度配分模式判识油源在研究区长 8~长 10 油源对比方面具有良好的应用效果,该方法是对鄂尔多斯盆地延长组下组合油源判识的一种有效补充。

基金项目

国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”2016ZX05050 和 2017ZX05001002。

参考文献

- [1] 白玉彬,赵靖舟,赵子龙,等.鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长 7 致密油成藏条件与成藏特征[J].石油与天然气地质,2013,34(5): 631-639.
- [2] 白玉彬,罗静兰,王少飞,等.鄂尔多斯盆地吴堡地区延长组长 8 致密砂岩油藏成藏主控因素[J].中国地质,2013,40(4): 1159-1168.
- [3] 郝爱武,王永炜,黄平良,等.鄂尔多斯盆地志丹地区延长组深部长 9 油气藏成藏规律研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(5): 30-37.
- [4] 段毅,于文修,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地长 9 油层组石油运聚规律研究[J].地质学报,2009,83(6): 855-860.
- [5] 时保宏,姚泾利,张艳,等.鄂尔多斯盆地延长组长 9 油层组成藏地质条件[J].石油与天然气地质,2013,34(3): 294-300.
- [6] 张文正,杨华,傅锁堂,等.鄂尔多斯盆地长 9 湖相优质烃源岩的发育机制探讨[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(Z): 33-38.
- [7] 杨华,张文正,蔺宏斌,等.鄂尔多斯盆地陕北地区长 10 油源及成藏条件分析[J].地球化学,2010,39(3): 274-279.
- [8] 李士祥,刘显阳,韩天佑,等.陕北地区延长组长 10 油层组成藏特征[J].石油与天然气地质,2011,32(54):

698-709.

- [9] 李玉宏, 孟祥振, 罗然昊, 等. 陕北地区三叠系延长组长 10 段油藏原油特征及其来源[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(1): 33-38.
- [10] 王变阳, 董丽红, 李广涛, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区长 10 原油地球化学特征及油源探讨[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(4): 490-496.
- [11] 李相博, 刘显阳, 周世新, 等. 鄂尔多斯盆地延长组下组合油气来源及成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 172-180.
- [12] 李云, 韩旭, 牛志忠, 等. 下寺湾油田延长组长 7 油层成藏地质特征分析[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 249-254.
- [13] 时保宏, 郑飞, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组石油成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 285-290.
- [14] Selby, D., Creaser, R.A. and Fowler, M.G. (2007) Re-Os Elemental and Isotopic Systematics in Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 378-386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.005>
- [15] 丁祖国. 石油及有关的有机物中微量元素的研究[J]. 地质地球化学, 1989(1): 53-58.
- [16] 徐冠军, 张大江, 王培荣. 用沥青质中生物标志化合物判识生物降解油的油源[J]. 科学通报, 2003, 48(4): 400-404.
- [17] 丁祖国, 柴之芳, 傅家谟, 等. 原油及岩石有机抽提物中微量元素的仪器中子活化研究[J]. 核技术, 1990, 13(4): 203-209.