

鄂尔多斯盆地能源矿产氯仿沥青 Sm-Nd 同位素研究

潘爱芳^{1,2} 赫 英² 黎荣剑³

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 大陆动力学国家重点实验室(西北大学), 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 3. 长庆石油勘探局, 陕西 西安 710021)

摘要:对鄂尔多斯盆地石油、煤、含铀砂岩及其围岩的氯仿沥青进行了 Sm-Nd 同位素研究。结果表明,盆地流体(包括深部流体)活动具有多期性,且后期的流体活动对铀矿床的形成具有重要作用;赋存于同一套地层中的含铀砂岩沥青、煤沥青及石油沥青,虽然均具有富集地幔特征,但并非同期活动的产物;东胜矿区侏罗系直罗组煤沥青和盆地西南部陈家山矿区侏罗系延安组的煤沥青,源区时代上存在较大差异,伴生沥青并非全部由煤的热演化形成,可能还存在外来流体的加入,且东胜直罗组煤的伴生沥青较延安组煤的伴生沥青来源深度更大;盆地内马岭油田的直罗组石油沥青、陈家山延安组煤层石油沥青及其煤沥青在源区特征上具有内在联系。

关键词:Sm-Nd 同位素;氯仿沥青;深部流体;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.1, TE135⁺.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)03-0440-05

鄂尔多斯盆地特殊的构造位置以及后期改造^[1-3],称为中国重要的能源基地,并具有油、气、煤、铀等有机能源和无机能源矿产同盆共存的特征^[4]。这些能源矿产间有无内在的成因联系和直接或间接的依存关系,是亟待解决的重要科学问题之一。但是目前更多的还是对单一矿种的研究,彼此很少相互参照^[5],且对这些矿产进行研究时,较多的仍然是偏重于用有机地球化学方法研究有机矿产^[6-7]、无机地球化学方法研究无机矿产^[8]的手段。要解决目前有机与无机矿产割裂开来研究的现状,揭示这些金属矿与非金属矿、无机矿和有机矿,乃至液体、气体和固体矿床之间的关系及其赋存规律,有效途径是选取一个能够连接这些能源矿产的纽带和信息载体。通过对该纽带与信息载体的研究,达到认识能源矿产的成藏成矿规律,并能揭示其富集共存机制^[9]。沥青同时存在于这些能源矿产及其围岩之中,如把沥青作为主要研究对象,对最终揭示能源矿产的富集共存机制具有重要的意义。

有机配合物可以使金属元素长期稳定地保存在沥青、干酪根和原油中,形成同位素封闭体系,这为应用同位素进行自然界有机体系的定年与成因研究奠定了理论基础^[10]。通过对天然沥青的同位素体系研究,可揭示烃源岩与油气的关系及原油生成和运移的年龄,进而对原油的成因与演化获得进

一步认识^[11-13]。然而在不同能源矿产及其围岩中,天然沥青的含量极不均匀。其中,因沥青与油气成藏间存在密切关系,故在含油气区要获得天然沥青较为容易,但在其他矿藏或层位中,沥青主要分散在岩石介质颗粒间隙或裂隙之中,集中出现的几率很小。因此,在煤矿、铀矿及其相应的围岩中,要想采集到足够量的天然沥青来满足分析和研究的要求具有较大的难度。氯仿沥青是以氯仿为溶剂,从含油砂岩、煤、含铀砂岩及其围岩中提取出来的可溶有机质,与能源矿产及其围岩长期伴生,甚至具有某种成因上的联系,因此包含了丰富的能源矿产成藏(矿)和深部流体等信息。为此,笔者以氯仿沥青(为叙述方便,以下简称沥青)为对象,企望通过对沥青的 Sm-Nd 同位素研究,探讨石油、铀、煤等能源矿产的成藏(矿)伴生沥青的物质来源及其成因联系。

1 样品的选择与测试

1.1 样品选择

为了便于研究和对比各种能源矿产的生成时代、成藏(矿)物源区特征和富集共生规律等,需要选定具有代表性的地段或典型矿藏(床)作为重点研究区(段)。基于以上研究目的选择研究区,并采集相关样品。

收稿日期:2007-02-12;改回日期:2007-04-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB2146)资助。

作者简介:潘爱芳,女,1961年生,博士,副教授,主要从事地球化学教学与研究;E-mail:panaifang@126.com。

(1)选择东胜铀矿作为重点研究区之一,并分别采集中侏罗统直罗组的含铀砂岩及其上覆、下伏围岩,以及直罗组煤等样品;

(2)在马岭油田采集了赋存于直罗组的石油样品,以便对同时代地层中富集的石油、煤和铀矿的同位素特征进行对比,揭示其富集共生规律和成因联系;

(3)选择盆地西南部陈家山(煤)矿区的煤与石油同层赋

存的延安组煤层,并在煤和油共存层位采集了石油和煤样品;

(4)所采样品均为新鲜的、未蚀变的岩(矿)石。

分别在东胜铀矿区选取含矿岩石及其围岩样品共 4 个,马岭油田石油样品 1 个,陈家山煤矿煤、油共生层的煤和石油样品各 1 个(图 1)。

1.2 样品制备

将待抽提样品击碎到一定粒度,置入索氏抽提器内,用三氯甲烷浸泡抽提。待抽提器内的浸泡液无色时,再将抽提液旋转蒸发得到氯仿沥青。抽提过程中使用的溶剂均为分析纯,以保证所选样品对 Sm-Nd 体系保存完好且不受污染。

1.3 样品测试

抽提出的沥青样品由西北大学国家大陆动力学重点开放实验室进行 Sm-Nd 同位素测定。测定时,先将沥青样品分为两份,其中一份按常规方法进行 Sm、Nd 的质谱分析。准确称取的另一份样品置于低温电热板上缓慢加热,待其“干枯”后移至电炉上进一步加热,使其形成焦炭,再将其置于灰化炉中,逐渐升温至 650~700℃,保温 2h 以上至完全灰化。灰化后的样品按常规方法加入 Sm、Nd 同位素稀释剂后进行 Sm、Nd 离子交换、分离和质谱分析。Nd 同位素比值和含量采用动态多接收法测量,Sm 含量采用单接收法测量,仪器状态由国际标样监测。沥青的 Sm、Nd 同位素分析测定结果见表 1。

2 Sm-Nd 同位素特征

2.1 东胜矿区矿石与围岩沥青的 Sm-Nd 同位素特征

所采集的 4 个沥青样品分别是直罗组的红色细砂岩沥青(DL-8)、绿色细砂岩沥青(DL-9)、煤沥青(DL-50)和含铀粗砂岩沥青(DL-12)。由表 1 可见,围岩中沥青的同位素特征与含铀砂岩沥青的同位素特征具有明显区别。

(1)围岩沥青:3 个围岩样品 DL-8、DL-9、DL-50 的 Sm 含量分别为 3.2680×10^{-6} 、 0.1244×10^{-6} 、 0.0069×10^{-6} ,Nd 含量分别为 16.4837×10^{-6} 、 0.6337×10^{-6} 、 0.0359×10^{-6} ,三者的含量具有一定的差别,但 Sm/Nd 却较为接近。此外, $f_{Sm/Nd}$ 值为 $-0.391 \sim -0.991 < 0$, $\epsilon_{Nd}(0)$ 值为 $-18.0 \sim -18.9 < 0$,与大陆岩石特征^[14]相

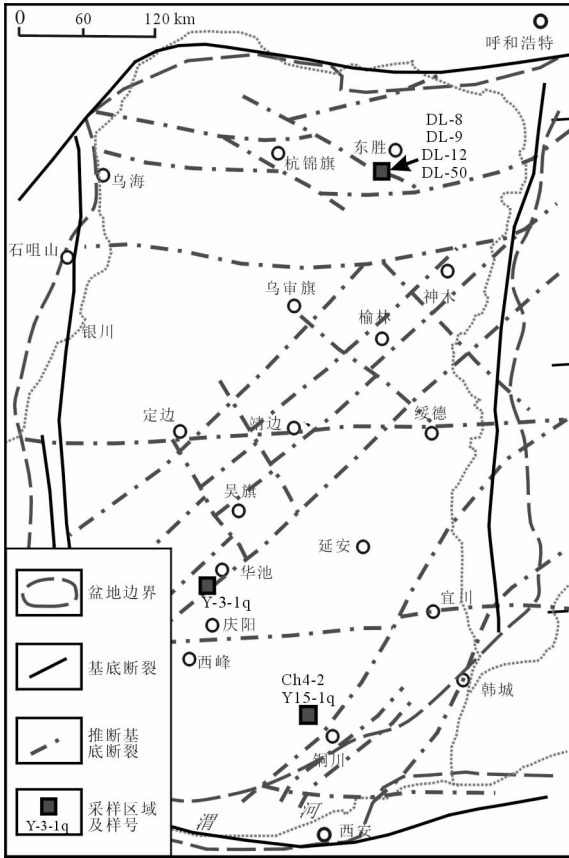


图 1 同位素样品采集位置示意图

Fig.1 Sampling location for isotope dating

表 1 沥青 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 Sm-Nd isotope analysis of bitumen

氯仿沥青原岩	样号	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	Sm/Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$f_{\text{Sm/Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{CHUR}}/\text{Ga}$
围岩	DL-8a	3.2680	16.4837	0.198	0.119831	0.511717 ± 12	-0.391	-18.0	3.90	1.826
	DL-9a	0.1244	0.6337	0.196	0.118674	0.511698 ± 12	-0.397	-18.4	3.88	1.836
	DL-12a	0.0049	2.4380	0.002	0.001220	0.511670 ± 4	-0.410	-21.8	6.38	0.757
煤	DL-50a	0.0069	0.0359	0.192	0.115998	0.511524 ± 4	-0.991	-18.9	3.35	2.100
	Ch4-2	0.0290	0.1448	0.200	0.120894	0.512004 ± 29	-0.385	-12.4	5.11	1.278
石油	Y3-1q	0.0001	0.0007	0.143	0.101133	0.511846 ± 9	-0.486	-15.5	5.13	1.264
	Y15-1q	0.0960	0.5418	0.177	0.107106	0.511981 ± 2	-0.455	-12.9	5.48	1.120

注:① 计算公式及参数: $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})=0.1967$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=0.251T^2-3T+8.5$;② 当分馏因子 $f_{\text{Sm/Nd}} < 0$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(0) < 0$ 为大陆岩石; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5 \sim +4$ 为大陆高原玄武岩; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +6 \sim +13$ 大洋中脊玄武岩; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = (0.511 \sim 0.5121)$ 间为富集地幔特征^[14-15]。

近; $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为3.90、3.88、3.35,显示为大陆高原玄武岩特征; $^{143}Nd/^{144}Nd$ 分别为0.511717 \pm 12、0.511698 \pm 12、0.511524 \pm 4,且Sm/Nd也低,与富集地幔Sm/Nd和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 特征^[19]接近。这些特征均表明沥青的物质组分中有一部分可能来源较深,并反映出含铀砂岩围岩沥青总体表现为混源特征。

样品Sm-Nd同位素的模式年龄 T_{CHUR} 为1.826、1.836和2.1 Ga。由于模式年龄可作为其源区年龄的估算值^[19],故该年龄特征值表明这些沥青的物源时代很古老。鄂尔多斯盆地基底由太古宙及古元古代的变质岩构成,1.826~2.1 Ga与元古界的地质年龄相应,因此,这些沥青的部分物源应来自盆地基底。

(2)含铀砂岩沥青:含铀砂岩沥青(DL-12)的Sm、Nd含量以及 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值均明显低于上述围岩沥青的相应特征值(表1)。此外, $\epsilon_{Nd}(0)<0$, $f_{Sm/Nd}<0$,表现为大陆地壳特征; $\epsilon_{Nd}(t)$ 为6.38,该值明显高于其围岩沥青,并落于大洋中脊玄武岩值域内;Sm/Nd低,且 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为0.511670 \pm 4,落于富集地幔 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 的值域内。这些特征均表明含铀砂岩沥青物质具有多源性,其中有部分物质源于深部,当然,深部流体活动具有一定的构造条件(图1)、基础与地球化学证据^[4]。

含铀砂岩沥青Sm-Nd同位素的模式年龄为0.757 Ga,对应早震旦纪地质年龄。其源区年龄明显晚于围岩沥青。这不仅反映了矿区流体(包括深部流体)活动具有多期性,而且还表明后期流体活动对铀矿床的形成具有重要作用。

2.2 同层位能源矿产伴生沥青 Sm-Nd 同位素特征对比

鄂尔多斯盆地中侏罗统直罗组中赋存有石油、煤和铀矿,是能源矿产种类最为齐全的层位之一。其中,3种能源矿产均表现为 $f_{Sm/Nd}<0$ 和 $\epsilon_{Nd}(0)<0$,具有大陆地壳岩石特征。含铀砂岩沥青的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为6.38,石油沥青的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为5.13,煤沥青的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为3.35,显示了从含铀砂岩沥青 \rightarrow 石油沥青 \rightarrow 煤沥青,其深部物质影响的逐渐减弱。含铀砂岩沥青、石油沥青和煤沥青的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 为0.511670、0.511846和0.511524,均表现为富集地幔特征。此外,其同位素模式年龄 T_{CHUR} 为0.757 Ga、1.264 Ga、2.100 Ga,分别对应新元古代、中元古代和古元古代的地质时期,说明三者虽然均具有富集地幔特征,但并非是同期活动的产物,表现出流体(包括深部流体)具有多期活动特征。

2.3 不同层位同类能源矿产伴生沥青 Sm-Nd 同位素特征对比

从表1可见,样品DL-50(鄂尔多斯盆地东北部的东胜矿区直罗组煤沥青)和样号Ch4-2(陈家山矿区延安组的煤沥青)的 $f_{Sm/Nd}$ 值和 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值均 <0 ,表现出大陆地壳的特征;样品DL-50的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为3.35,表现为大陆高原玄武岩特征,样品Ch4-2的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为5.11,介于大陆高原玄武岩与大洋中脊玄武岩之间。这些特征表明两个样品物质来源存在较大差异。沥青Sm-Nd同位素的模式年龄 T_{CHUR} 分别为2.1 Ga和1.278 Ga,显示其源区时代上也有较大差异。其中,直罗组煤沥青的模式年龄远大于延安组煤沥青的模式年龄,表明尽管直罗组

煤层较延安组煤层形成时代晚,但直罗组煤伴生沥青的源区年龄却较延安组煤伴生沥青的源区年龄更古老。说明两者的伴生沥青并非全部是由于煤的热演化形成,而应该有外来流体的加入,且直罗组煤中伴生沥青来源深度较延安组煤伴生沥青来源深度更大,或所含的深部流体物质组分更多。

样品Y3-1q和样号Y15-1q分别为鄂尔多斯盆地西南部马岭油田直罗组石油沥青和陈家山延安组煤层石油沥青。 $f_{Sm/Nd}$ 值和 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值均 <0 ,表现出大陆地壳的特征; $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为5.13和5.48,反映有深源物质加入。模式年龄分别为1.264 Ga和1.120 Ga,两者源区时代相近。这些反映了两者具有相近的物源区特征。此外,因延安组煤层沥青模式年龄为1.278 Ga,与这两个样品模式年龄相近,表明两石油样品沥青源区时代特征与样号Ch4-2陈家山延安组煤沥青源区时代一致,反映三者具有同期活动特征。

3 讨论与结论

(1)研究的所有样品 $f_{Sm/Nd}$ 值和 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值均小于零,表现为大陆岩石的特征。而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为3.35~6.38,均大于0,表现为亏损地幔源区特征,但样品的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 又反应为富集地幔特征。表明这些样品可能由来源于深度不同的物质组成。

(2)东胜矿区直罗组含铀粗砂岩沥青与围岩沥青以及煤、油沥青等的Sm-Nd同位素特征有明显区别。含铀砂岩沥青Sm-Nd同位素的模式年龄明显晚于围岩沥青,反映了矿区流体(包括深部流体)活动的多期性、物源深度的差异性,而且还表明后期的流体活动对铀矿床的形成具有重要作用。

(3)共同赋存于中侏罗统直罗组中的含铀砂岩、石油和煤层中的沥青,相互间并没有成因关系。在三者中,含铀砂岩沥青受深部流体的影响最强,而煤沥青最弱;虽然三者均具有富集地幔特征,但其模式年龄显示它们非同期活动的产物,且中侏罗统直罗组至少经历了3次流体(包括深部流体)活动影响,同时还说明同一层位中赋存的不同种类的能源矿产伴生的沥青具有各自不同的源区特征。

(4)东胜矿区直罗组煤沥青和该盆地西南部陈家山矿区延安组的煤沥青物质来源和源区时代存在一定差异。尽管直罗组煤层较延安组煤层形成时代晚,但直罗组煤沥青的源区年龄却较延安组煤伴生沥青的源区年龄更古老。说明两者并非全部由煤的热演化形成,而应该有外来流体的加入,且前者所含的深部流体物质更多。此外还表明,同种矿产在盆地中赋存层位不同,或所处的构造位置不同,那么它们所历经的后期流体活动影响不同,其伴生沥青的物源特征也不同。

(5)盆地西南部马岭油田直罗组石油沥青和陈家山延安组煤层石油沥青中也反映有深源物质加入,两者源区时代相近。说明赋存于不同层位中的同种类型的能源矿产伴生沥青,在一定的地质条件下,有可能具有内在成因联系。

致谢:在样品分析中得到西北大学国家大陆动力学重点开放实验室袁洪林博士的支持与帮助,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006, 33(4):751-761.
Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Qiu Zhaorui, et al. Cenozoic lithospheric extension and thinning of North China: Mechanism and process[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):751-761(in Chinese with English abstract).
- [2] 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 等. 中国东部中生代软流层上涌造山作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4):730-750.
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Wu Guangying, et al. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):730-750(in Chinese with English abstract).
- [3] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代-新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, 33(1):28-40.
Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1):28-40(in Chinese with English abstract).
- [4] 潘爱芳, 马润勇, 黎荣剑. 鄂尔多斯盆地深部流体地球化学研究[M]. 北京:石油工业出版社. 2006:18-49,150-151.
Pan Aifang, Ma Runyong, Li Ronjian. Study for geochemical characteristics of deep fluid in Ordos Basin [M]. Beijing:Petroleum Industry Press. 2006: 18-49,150-151(in Chinese).
- [5] 杜乐天. 盆地矿套[J]. 国外铀金地质. 2002, 19:140-146.
Du Letian. Ore system in basin [J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*. 2002, 19(3):140-146 (in Chinese).
- [6] 陈建渝, 朱芒征. 含油气系统与有机地球化学的关系 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20:246-249.
Chen Jianyu, Zhu Mangzhen. Relationship of petroleum system to organic geochemistry [J]. *Oil & Gasgeology*, 1999, 20:246-249 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 等. 鄂尔多斯中部气田下古生界水化学特征及天然气藏富集区判识[J]. 天然气工业, 2002, 22:10-14.
Li Xianqin, Hou Dujie, Liu Changqing, et al. Hydrochemical characteristics of lower Paleozoic formation water and identification of natural gas enrichment area in central gas fields of the Ordos [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22:10-14(in Chinese with English abstract).
- [8] 涂光焱. 地学走向何方[J]. 铀矿地质. 1995, 11:321-326.
Tu Guangchi. Where is the whither of Earth science [J]. *Uranium Geology*, 1995,11:321-326(in Chinese).
- [9] 潘爱芳, 赫英, 马润勇. 沥青的研究现状及其在多种能源矿产共存研究中的意义 [C]//刘池洋主编, 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究现状. 北京:科学出版社, 2005:152-163.
Pan Aifang, He Ying, Ma Runyong. Current research on asphalt and its Significance in studying coexistent mechanism of various energy minerals [C]//Liu Chiyang (ed.), *Advances in the Accumulation and Formation for Multi-energy Mineral Deposits Coexisting in the Same Basin*. Beijing:Science Press. 2005:152-163 (in Chinese).
- [10] Parnell J, Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into a bitumen-bearing ore deposit. North Wales [J]. *Geology*, 1990. 48:1028-1030.
- [11] 张景廉, 朱炳泉, 张平中, 等. 克拉玛依乌尔禾沥青脉 Pb-Sr-Nd 同位素地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27:325-330.
Zhang Jinglian, Zhu Binqian, Zhang Pingzhong, et al. Pb-Sr-Nd isotope geochemistry of the Urho asphalt veins in the Karamay [J]. *Science in China*, (Ser D), 1997, 27:325-330(in Chinese).
- [12] Manning L K, Frost C D, Branthaver J F. A neodymium isotopic study of crude oils and source rocks: Potential applications for petroleum exploration[J]. *Chem Geol*, 1991, 91:125-138
- [13] Stille P, Gauthier-Lafaye F, Bros R. The neodymium isotope system as a tool for petroleum exploration [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57:4521-4525
- [14] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988: 81-85.
Wei Juying, Wang Guanyu. *Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:81-85(in Chinese).
- [15] Hugh R Rollison. 岩石地球化学[M]. 杨学明, 杨晓勇译. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2000:171-199.
Hugh R. Rollison. *Rock Geochemistry* [M]. Translated by Yang Xueming, Yang Xiaoyong. Hefei:University of Scientific and Technological of China Press, 2000:171-199.

Sm-Nd isotope study of chloroform bitumen in various energy minerals of the Ordos basin

PAN Ai-fang^{1,2}, HE Ying², LI Rong-jian³

(1. School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics(Northwest University), Department of Geology, Northwest University,

Xi'an 710069, Shaanxi, China;3. Changqing Oil Exploration Bureau, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Sm-Nd isotope study has been performed on chloroform bitumen in oil, coal, uranium-bearing sandstone and its country rocks in the Ordos basin. The results indicate that the activity of fluids (including deep fluids) in the basin shows the multi-stage character, and that the late-stage fluid activity played a significant role in the formation of uranium deposits. Uranium-bearing sandstone bitumen, oil bitumen and coal bitumen in the same sequence of strata have the enriched mantle features, but they are not products of the same stage. A comparison between the coal bitumen in the Jurassic Zhiluo Formation of the Dongsheng field and that in the Jurassic Yan'an Formation of the Chengjiashan field in the southwest of the basin indicates that: there is appreciable difference in ages of the bitumen sources; the associated bitumen did not all form by thermal evolution of coals but might contain exotic fluids, and the associated bitumen in coals of the Zhiluo Formation was derived from an even deeper source than that in coals of the Yan'an Formation in the Dongsheng field. There is some internal genetic relation between the oil bitumen of the Zhiluo Formation in the Maling oilfield and the coal bitumen and oil bitumen in the coal bed of the Ya'an Formation of Chengjiashan in the Ordos basin.

Key words: Sm-Nd isotopes; chloroform bitumen; deep fluid; Ordos basin

About the first author: PAN Ai-fang, female, born in 1961, doctor and associate professor, engages in the study and teaching of geochemistry; E-mail: panaifang@126.com.