

# 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床地球化学特征及其地质意义

杨晓勇<sup>1,2)</sup>, 罗贤冬<sup>1)</sup>, 凌明星<sup>1)</sup>, 赖小东<sup>1)</sup>

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 石油天然气研究中心, 合肥, 230026;

2) 中国地质大学地质过程与矿产资源重点实验室, 武汉, 430074

**内容提要:**本文在系统的取样分析基础上,详细研究鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿的稀土、微量元素地球化学特征,分析研究了鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿富集成矿的机理及多种能源共存的内在联系,从而进一步探讨盆地型多种能源富集成藏(矿)的潜在的规律。高精度 ICP-MS 分析表明:鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿 REE 总体特征为轻稀土富集,重稀土亏损; $\Sigma$ REE 在 36.7~701.8 $\mu$ g/g 之间变化,泥岩  $\Sigma$ REE 总体高于砂岩,Y 含量都比较高;Eu 异常差异明显,在 0.3~2.5 内变化。微量元素 Rb、U、La、Ce、Pb 和 Pr 呈特别明显正异常,其中 U 含量在 0.6~2204 $\mu$ g/g 之间,U 的富集和一些微量元素如 Ti、V、Zr、Mo、Au 等相关,本研究对该区铀矿质沉淀和富集规律的认识具有理论意义。

**关键词:**砂岩型铀矿;稀土元素;微量元素;铀矿成因;鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地,近年来鄂尔多斯盆地的油、气、煤、铀等多种矿产资源域勘探等领域和研究取得突破,使之成为我国重要的能源基地之一(张进等,2004;魏永佩和王毅,2004;刘池洋等,2005;戴金星等,2005;Ye and Lu,1997;Zhang et al.,1998;Liu,1998;Darby and Ritts,2002;Ritts et al.,2004)。尤其是近年来在鄂尔多斯盆地的北部,东南和西南部都发现不同规模的砂岩型铀矿床或铀矿矿化现象,表明该盆地是一个典型的多种资源和能源共存的大型沉积型盆地。砂岩型铀矿床是世界上最早发现的铀矿类型之一(Granger et al.,1961),后来在世界各大洲的一些含油气盆地中都发现了砂岩型铀矿,该矿种作为一种有用的伴生资源,可以进行规模工业开采,使得盆地的资源量有很大的提高。国内外学者从理论和实践等多方面探讨了铀元素及其矿床的形成条件(Adler,1974;Brookins,1976;Langmuir,1978;Pirc and Rose,1981;Meunier et al.,1992;Spirakis,1996;Finch,1996;Shikazono and Utada,1997;Mikake et al.,2000;Lorilleux et al.,2003)。我国中生代盆地砂岩型铀矿赋存于侏罗纪、白垩纪和古近纪—新近纪盆地中,其含矿主岩为陆相碎屑沉

积岩(砂岩为主,次为砾岩)或陆相火山碎屑岩(彭新建等,2003;陈戴生等,2003;李盛富和张蕴,2003;Chen et al.,2003;Yang et al.,2004;Min et al.,2005)。在鄂尔多斯盆地北部东胜地区发现了可地浸砂岩型铀矿,其储量远景丰富,有望达到超大型矿床规模,成为我国又一处新的核能资源基地,标志着我国地浸砂岩型铀矿勘查取得了重要突破(狄永强,2002;陈法正,2002;朱西养等,2003;夏毓亮等,2003;肖新建等,2004)。研究表明该盆地的砂岩型铀矿成因是沉积成岩基础上后生改造作用为主,属层间氧化带型或潜水氧化带型铀矿床(魏观辉和陈宏斌,1995;闵茂中等,2003;孙泽轩等,2003;朱西养等,2004;王金平等,2005;吴伯林等,2005)。

本文通过对东胜地区和延安黄陵地区砂岩型铀矿样品的微量元素、稀土元素研究基础上,对盆地砂岩型铀矿床成矿地球化学特征获得系统认识,探讨了铀矿成因。

## 1 区域和矿床地质概况

### 1.1 地质背景

鄂尔多斯盆地又称陕甘宁盆地,位于华北板块西部,是我国大型内陆拗陷沉积盆地之一,盆地呈矩

注:本文为国家科技部973项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律(编号2003CB214600)”、中国地质大学地质过程与矿产资源重点实验室资助项目(编号GPMP0506)及国家大学生创新性实验计划资助项目的成果。

收稿日期:2007-10-08;改回日期:2008-04-23;责任编辑:章雨旭。

作者简介:杨晓勇,男,1964年生。地球化学专业博士。长期从事资源与能源领域的地球化学研究。通讯地址:230026,安徽合肥中国科学技术大学地球和空间科学学院;电话:0551-3606871;Email:xyyang@ustc.edu.cn。

形,南北向展布,主体面积  $2.5 \times 105 \text{ km}^2$ ,北起伊盟隆起,南抵渭北隆起,西自西缘逆冲带,东达晋西挠褶带(图1)。现今的鄂尔多斯盆地属中生代残留盆地,其盆地属性被定为残延克拉通盆地(赵重远和刘池洋,1992;刘池洋等,2006)。

太古宇及古元古界变质结晶基底组成鄂尔多斯盆地的基底,基底形态东高西低、北高南低,呈不对称状。盆地划分为五个构造单元,即北面伊盟隆起、东面晋西褶皱带、南面渭北构造带、西边陇西构造带和中央陕北斜坡,砂岩型铀矿即产在北面伊盟隆起的东部。盆地发育过程中气候由潮湿转为干旱

以及数个区域性沉积间断等为形成砂岩型铀矿奠定了基础,其后期改造阶段是鄂尔多斯盆地多种能源矿产成藏(矿)和定位的主要时期(刘池洋,2005;刘池洋等,2006)。

## 1.2 砂岩型铀矿化特征

盆地中砂岩型铀矿的含矿地层直罗组可分为上、下两段:下段又分为上、下两个亚段,其中下亚段主要为含矿的灰色砂岩;上亚段主要为灰绿色砂岩、泥岩;上段为杂色的中细砂岩,部分为泥岩,岩石疏松。砂体厚  $20 \sim 40 \text{ m}$ 。矿床成因为在沉积成岩基础上,以地下水的后生改造作用为主,属氧化带型铀矿

床(魏观辉和陈宏斌,1995;闵茂中等,2003;孙泽轩等,2003;朱西养等,2004;王金平等,2005;吴伯林等,2005)。由于受盆地底部燕山期岩浆活动的影响,主要含矿岩系均受到热液变质作用的影响,使得所有的碎屑岩系均变为浅变质沉积岩石。含矿的砂体中自北向南发育了氧化带—氧化还原带—还原带的岩石地球化学分带,其特征为氧化带在地表为褐黄色,钻孔中为浅灰绿色、浅灰蓝色,氧化还原前锋线平面上总体呈东西向展布,形态为复杂的蛇曲状;氧化还原过渡带呈灰色、浅灰色,富含有机质和结核状黄铁矿;还原带呈灰色,富含有机质,可见结晶状黄铁矿(吴仁贵等,2003)。铀矿化产于层间氧化还原带前锋线附近,铀矿体呈卷状、板状和透镜状(朱西养等,2003;肖新建等,2004)。

## 1.3 岩相学和矿相学特征

采样地层为中侏罗统直罗组含铀砂岩,主要产自两个地区,一是盆地东南部的延安黄陵地区的砂岩型铀矿区;二是盆地北部的东胜地区(图1)。肖新建等(2004)

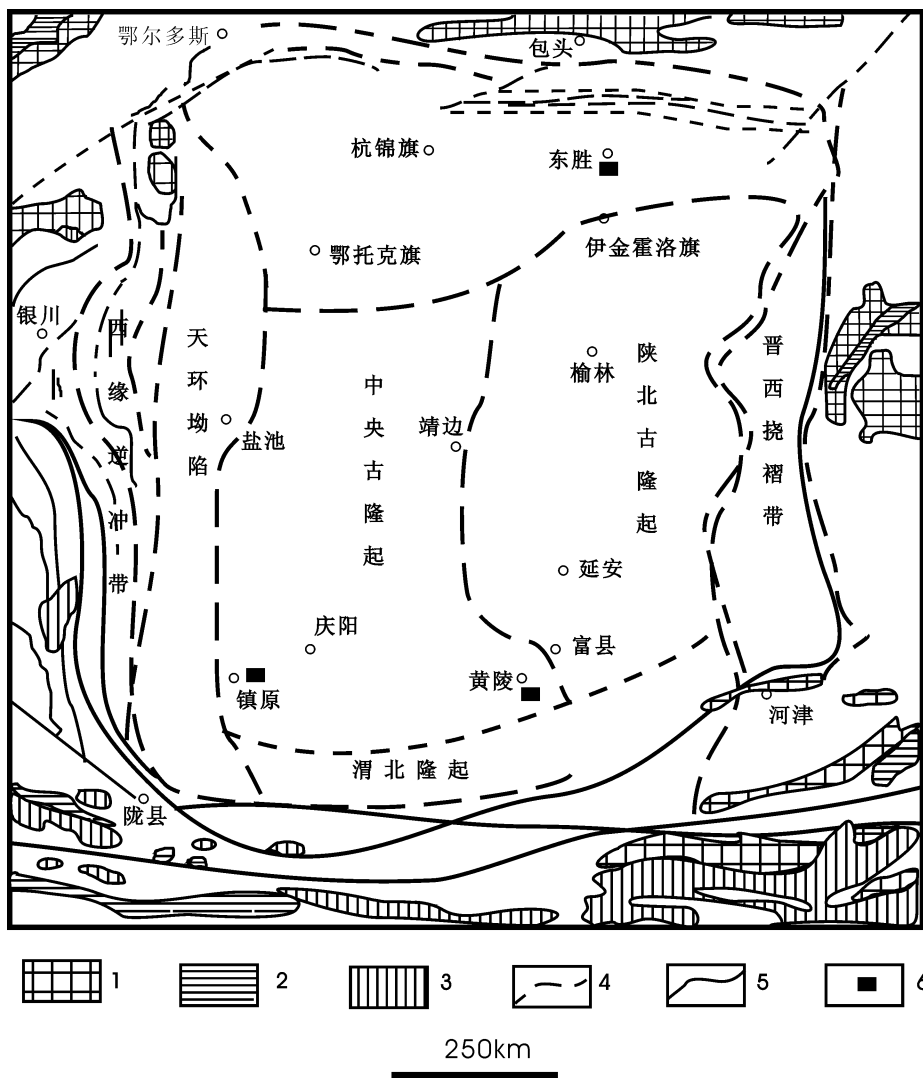


图1 鄂尔多斯盆地构造略图(据樊爱萍等,2006)

Fig. 1 The tectonic sketch map of the Ordos Basin, northwest China  
(After Fan et al., 2006)

1—太古宇;2—古元古宇;3—新元古宇;4—构造边界;5—盆地边界;  
6—盆地砂岩型铀矿区及部分样品采集地

1—Archean; 2—Paleoproterozoic; 3—Neoproterozoic; 4—tectonic edge; 5—basin edge;  
6—localities of the sand-type uranium deposits and sampling

通过对直罗组砂岩岩相学研究在垂向上确立了岩石的后生蚀变分带特征:直罗组下段下亚段为浅变质灰色—灰白色砂岩(含矿段)的绿化(I)(主要为长石的绿帘石化)+碳酸盐化带;上亚段为浅变质灰绿色砂岩的绿化(II)(主要为黑云母绿泥石化,也有长石绿泥石化和绿帘石化)+粘土化+碳酸盐化带。

图版 I 是部分岩石薄片的观察结果,从图中可见铀矿化的岩石类型有浅变质的中粗粒砂状结构(图版 I -a、b、c),后生蚀变作用强烈,主要为长石的绿泥石化,绢云母化(图版 I -c、h、i),多见微粒黄铁矿和褐铁矿化(图版 I -d、e、f、g)。胶结物多见褐铁矿化+粘土化+碳酸盐化。

## 2 样品与分析方法

本文研究中的数十件样品选自鄂尔多斯盆地东胜和黄陵几个不同地方具代表性的钻孔(详见表 1)。

对 21 件样品进行 REE 和微量元素测定,实验室是中国科学院开放实验室——中国科学技术大学理化科学实验中心,使用仪器是高精度 ICP-MS 质谱仪,型号为 Plasma Quad 3-Thermo VG Elemental (UK),测定的相对误差控制在 5% 以内。测试流程是用 HNO<sub>3</sub> 和 HF 的混合酸 5ml 溶样,两者比例为 1:5, HNO<sub>3</sub> 和 HF 混合酸的使用有利于样品的全部溶解(刘颖等,1996)。

## 3 结果与讨论

本次共测试的 21 个样品稀土和微量元素,部分引自笔者等所在研究小组在东胜铀矿区发表的数据,所有结果详见表 2,3。

### 3.1 稀土元素特征

REE 数据包括 La 系(除 Pm 外)的 14 个元素,而且对稀土元素的特征参数  $\Sigma$ REE、 $\Sigma$ La—Nd、 $\Sigma$ Sm—Ho、 $\Sigma$ Er—Y、LREE/HREE、 $\Sigma$ Ce/ $\Sigma$ Y 和  $\delta$ Eu 等作了数值统计,一并列于表 2。

从数据表 2 和 REE 球粒陨石标准化图解(图 2),可以看出,黄陵地区两组钻孔岩石 REE 球粒陨石标准化曲线走向是一致的,图 2a 中显示钻孔 ZK63 各样品曲线配分型式有些变化,而图 2b 中显示钻孔 ZK64 各样品曲线几乎是平行的。总结研究样品的稀土元素,具有以下特征:

所有样品 REE 球粒陨石标准化蛛网图具有基

本一致分布模式,以 Eu 为分界,前面部分呈斜坡型,后面部分呈现平坦型; $\Sigma$ REE 含量范围在 54.48~352.99  $\mu$ g/g 之间;平均值为 184.49  $\mu$ g/g,明显高于大陆沉积地壳平均值 117  $\mu$ g/g (Ronov et al., 1974),富集稀土元素;LREE/HREE 变化较大,位于 7.74~48.19 之间,平均值为 19.90,轻重稀土元素之间分异很大,轻稀土高度富集,而重稀土亏损的

表 1 研究样品的岩石学特征

Table 1 The lithologic features of the studied samples

样品编号	岩性特征描述	地区
ZK63-0-S-02	紫红色中粒长石砂岩,硅质泥质胶结	黄陵地区
ZK63-0-S-03	紫红色粉砂岩,泥质胶结	
ZK63-0-S-05	灰白色细粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-06	浅紫红色中粗粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-07	灰白色粗粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-08	灰白色细粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-09	灰白色中粗粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-10	灰白色粗细粒长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-11	灰白色粗细粒石英长石砂岩,硅质泥质胶结	
ZK63-0-S-12	黑色页岩硅质泥质胶结	
ZK64-127-S-01	深灰色泥岩	
ZK64-127-S-02	灰白色中砂岩	
ZK64-127-S-03	深灰色细砂岩	
ZK64-127-S-04	深灰白色中砂岩	
ZK64-127-S-05	灰色泥岩和灰绿色泥岩交互	
ZK64-127-S-06	灰白色泥岩夹砂岩,含铀矿,品位高	
ZK64-127-S-08	灰白色中砂岩	
ZK64-127-S-09	灰白色砂岩,含铀矿	
ZK64-127-S-10	黑色泥岩	
ZK64-127-S-11	黑色泥岩	
ZK64-127-S-12	灰白色中砂岩	
ZK64-127-S-13	延安组黑色泥岩	
ZK64-127-S-14	延安组黑色泥岩	
ZK183-79-02	灰绿色中砂岩	东胜地区
ZK183-79-06	灰绿色中砂岩	
ZK183-79-09	灰绿色中细砂岩	
ZK183-79-12	灰白色中粗粒长石砂岩	
ZK341-60-04	灰绿色中细砂岩	
ZK341-60-05	灰色泥质粉砂岩,含碳质碎屑	
ZKA139-35-03	灰白色中粗粒长石砂岩	
ZKA139-35-05	灰白色中细粒长石砂岩	
ZKA139-35-13	灰白色中粗粒长石砂岩	
ZKA183-87-02	灰绿色粉砂岩	
ZKA183-87-08	灰色中粗粒长石砂岩	
ZKA183-87-09	灰白色中粒长石砂岩	
ZKA183-87-10	灰绿色中粒长石砂岩	
ZKA39-14-02	灰绿色泥岩	
ZKA39-14-04	灰白色中粗粒长石砂岩	
ZKA39-14-06	灰白色中粗粒长石砂岩	
ZKA79-11-05	灰绿色粉砂质泥岩	
ZKA79-11-09	灰白色中细粒长石砂岩	
ZKA79-11-11	灰白色中细粒长石砂岩	
ZKA79-11-12	灰白色中粗粒长石砂岩	

表 2 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿稀土元素测试结果( $\mu\text{g/g}$ )Table 2 REE content ( $\mu\text{g/g}$ ) of sandstone-type uranium deposits in the Ordos basin

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	$\Sigma\text{REE}$	$\frac{\text{LREE}}{\text{HREE}}$	$\frac{\Sigma\text{Ce}}{\Sigma\text{Y}}$	$\delta\text{Eu}$	$\frac{\text{Y}}{\text{Ho}}$	$\frac{\text{Ce}}{\text{La}}$	数据来源
ZK63-0-S-02	19.2	38.4	4.42	16	2.69	0.64	2.51	0.35	2.04	0.37	1.18	0.16	1.09	0.14	7.7	89.2	15.7	6.4	0.75	21	2	1
ZK63-0-S-03	14.2	28.5	3.67	13.4	2.59	0.76	2.22	0.35	2	0.37	1.1	0.16	1.15	0.16	7.82	70.6	12.4	5	0.97	21	2.01	1
ZK63-0-S-05	11.4	22	2.97	10.6	1.93	0.54	1.6	0.24	1.35	0.26	0.78	0.11	0.82	0.12	8.7	54.7	13.9	4.1	0.94	33	1.93	1
ZK63-0-S-06	49	95.7	10.4	34.4	3.9	0.89	3.43	0.36	1.67	0.28	0.91	0.1	0.8	0.09	6.47	201.9	47	18.5	0.74	23	1.95	1
ZK63-0-S-07	14.2	26.8	3.39	11.8	2.64	0.77	3.24	0.55	3.14	0.63	1.74	0.26	1.58	0.22	14.3	71	7.7	2.8	0.8	23	1.89	1
ZK63-0-S-08	17.2	53.8	4.24	14.2	3.02	1.08	3.19	0.56	3.09	0.6	1.63	0.27	1.61	0.23	12	104.7	12.1	4.8	1.06	20	3.13	1
ZK63-0-S-09	11.4	30	2.07	7.05	1.06	0.53	0.92	0.1	0.54	0.08	0.28	0.04	0.37	0.04	2.8	54.5	36.6	12.5	1.64	35	2.63	1
ZK63-0-S-10	33.3	83.9	8.31	29.3	5.18	1.91	5.02	0.65	3.17	0.55	1.62	0.25	1.55	0.25	6.49	175	20.8	11.5	1.14	12	2.52	1
ZK63-0-S-11	16.6	32.7	3.86	13.4	2.46	0.84	2.39	0.34	1.73	0.32	0.84	0.12	0.8	0.09	6.71	76.5	17	6.6	1.06	21	1.97	1
ZK63-0-S-12	189	378	43.81	144	15.5	3.74	13.8	1.45	6.17	1.15	3.51	0.48	3.15	0.44	18.1	804.2	48.2	22.9	0.78	16	2	1
ZK64-127-S-01	73.3	153	18.4	65.4	11.4	2.08	8.92	1.37	7.24	1.49	4.39	0.72	4.61	0.67	13.1	353	16.2	9.9	0.63	9	2.09	1
ZK64-127-S-02	21	39.3	5.16	18.4	3.39	0.74	3.09	0.5	2.99	0.59	1.71	0.28	1.85	0.26	14.7	99.3	11.1	4	0.7	25	1.87	1
ZK64-127-S-03	21.5	50.3	5.07	17.4	3.06	0.65	2.66	0.41	2.32	0.47	1.37	0.21	1.41	0.19	15.1	107	15.8	4.7	0.7	32	2.34	1
ZK64-127-S-04	25.9	48.8	6.12	20.9	3.04	0.69	2.53	0.33	1.79	0.33	0.99	0.14	0.98	0.12	7.21	112.7	23.1	9.1	0.76	22	1.88	1
ZK64-127-S-05	106	229	25.5	87.2	12.3	2.48	10.5	1.42	7.09	1.38	3.9	0.61	3.87	0.53	25.4	491.8	25.2	10.7	0.67	18	2.16	1
ZK64-127-S-06	60.5	135	15.7	55.4	8.62	1.71	6.28	0.71	3.29	0.62	1.93	0.29	2.07	0.3	7.26	292.4	30.8	17.2	0.71	12	2.23	1
ZK64-127-S-08	11.9	23.4	2.98	10.8	2.25	0.61	2.42	0.39	2.11	0.41	1.11	0.2	1.16	0.17	8.49	59.9	9.8	3.9	0.8	21	1.97	1
ZK64-127-S-09	40.2	75.2	9.14	30.6	3.71	0.95	3.49	0.52	2.67	0.46	1.28	0.15	1	0.12	9.87	169.5	26.3	10.2	0.81	21	1.87	1
ZK64-127-S-10	31.8	77.8	8.34	30.3	5.46	1.29	4.69	0.73	4.08	0.82	2.42	0.37	2.65	0.38	24	171.1	13.9	4.5	0.78	29	2.45	1
ZK64-127-S-11	17.6	34.9	4.25	15.1	2.76	0.73	2.56	0.43	2.4	0.51	1.5	0.27	1.62	0.26	8.77	84.9	11.1	4.9	0.84	17	1.98	1
ZK64-127-S-12	15.6	31.7	3.56	13.3	2.41	0.74	2.18	0.34	1.89	0.34	1.01	0.13	0.91	0.11	8.04	74.2	14.7	5.4	0.99	24	2.03	1
ZK64-127-S-13	50	107	12.7	45.4	7.9	1.53	6.34	1	5.58	1.11	3.23	0.52	3.45	0.5	17	246.3	15	7.1	0.66	15	2.14	1
ZK64-127-S-14	55.8	122	13.5	50.2	9.15	1.88	7.87	1.28	7.21	1.35	3.79	0.58	3.72	0.52	17.3	278.9	14.1	7.3	0.68	13	2.19	1
GSR-4	28.5	48.1	6.34	23.9	5.58	1	4.7	0.77	3.84	0.73	2.09	0.32	1.81	0.23	18.4	146	12.1	4.19	0.83	25	1.69	1
GSR-5	59.8	101	12.8	44.2	8.01	1.73	6.52	1.1	6.01	1.23	3.78	0.6	3.54	0.45	38.9	289	14	4.2	0.91	32	1.68	1
ZK183-79-02	38.8	63.6	7.69	26.2	4.3	2.06	3.64	0.52	2.42	0.47	1.35	0.21	1.14	0.15	11.4	163.9	23.43	8.27	1.18	24	1.64	2
ZK183-79-06	21.4	33	4.26	15.4	2.9	2	2.47	0.4	1.99	0.39	1.13	0.16	0.94	0.13	10.2	96.7	15.8	5.31	1.37	26	1.54	2
ZK183-79-09	36.5	53.1	8.31	31.4	6.51	2.33	5.5	0.99	5.67	1.16	3.44	0.56	3.24	0.41	28	187	9.29	3.31	1.06	24	1.45	2
ZK183-79-12	19.8	21.7	4.03	14.2	2.47	1.67	2.16	0.34	1.9	0.4	1.19	0.2	1.19	0.15	8.84	80.3	12.3	4.65	1.37	22	1.1	2
ZK341-60-04	19.9	25.8	3.85	13.3	2.38	1.95	2	0.29	1.48	0.28	0.85	0.13	0.83	0.11	6.23	79.5	17.46	6.79	1.49	22	1.3	2
ZK341-60-05	104	153	21.1	73	11.9	2.72	10.3	1.7	9.08	1.87	5.6	0.89	5.29	0.67	44.7	445.7	14.98	5.39	0.93	24	1.47	2
ZK64-127-S-07	40.8	62.8	8.93	32.1	5.27	1.49	3.58	0.45	2.04	0.4	1.32	0.22	1.39	0.19	9.64	170.5	25.79	9.9	1.02	24	1.54	2
ZKA139-35-03	25.6	32.9	5.52	20.5	4.17	1.86	4.01	0.73	4.53	1.04	3.3	0.52	3.16	0.4	37	145.3	6.91	1.86	1.12	36	1.29	2
ZKA139-35-05	68.7	99.2	14.0	46.1	7.28	1.71	6.49	1.07	5.95	1.32	4.08	0.66	3.89	0.49	26.8	287.7	13.94	5.5	0.92	20	1.44	2
ZKA139-35-13	17.4	23.4	3.8	13.2	2.37	1.51	2.33	0.4	2.12	0.44	1.41	0.24	1.38	0.17	9.63	79.8	10.38	4.05	1.31	22	1.34	2
ZKA183-87-02	62	94.2	13.0	44.2	6.63	1.88	6.2	1	5.24	1.12	3.34	0.52	3.11	0.38	32.4	275.2	15.5	4.84	0.97	29	1.52	2
ZKA183-87-08	41.1	44.4	7.31	23.2	4.09	1.61	3.74	0.62	3.28	0.68	1.99	0.32	1.77	0.23	18.2	152.5	14.11	4.63	1.09	27	1.08	2
ZKA183-87-09	29.3	44.3	6.49	22.6	3.97	1.52	3.3	0.54	2.86	0.66	1.98	0.34	1.97	0.26	16.2	136.3	12.95	4.49	1.1	25	1.51	2
ZKA183-87-10	176	250	33.4	108	16.2	2.02	14.8	2.25	11.0	2.39	7.3	1.22	7.05	0.96	69.3	701.8	18.65	5.91	0.77	29	1.42	2
ZKA39-14-02	61.3	107	11.8	41	7.08	1.62	5.95	1	5.07	0.99	2.93	0.47	2.71	0.35	31.2	280	17.41	5.26	0.92	32	1.74	2
ZKA39-14-04	41.3	53.3	7.76	27.3	4.71	1.89	3.84	0.62	3.3	0.72	2.18	0.36	2.17	0.29	12	161.8	14.56	6.49	1.12	17	1.29	2
ZKA39-14-06	11.2	11.6	2.59	9.31	1.7	0.89	1.33	0.23	1.35	0.29	0.9	0.17	1.04	0.14	6.45	49.2	9.38	3.65	1.36	22	1.04	2
ZKA79-11-05	41.9	75.6	9.31	33.4	6.16	1.52	5.06	0.89	4.79	1.01	2.94	0.47	2.88	0.39	33.6	219.9	12.93	3.68	0.94	33	1.8	2
ZKA79-11-09	27.7	31.8	5.58	19.4	3.55	1.45	2.87	0.53	2.93	0.62	1.84	0.31	1.79	0.24	13.2	113.8	11.17	4.3	1.14	21	1.15	2
ZKA79-11-11	8.77	8.96	1.67	5.88	1.14	1.01	0.97	0.2	0.95	0.19	0.69	0.12	0.71	0.1	5.31	36.7	9.62	3.44	1.81	28	1.02	2
ZKA79-11-12	28.6	41.8	5.49	19.1	3.47	1.52	2.72	0.46	2.36	0.5	1.57	0.26	1.64	0.25	9.63	119.5	14.61	6.17	1.17	19	1.46	2

注:分析测试在中国科学技术大学理化分析中心完成,分析人:余华明;①—资料来源;1—本文数据;2—引自 Ling et al., 2006。

特点,显示其源区地壳演化成熟度高; $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  比值较 LREE/HREE 小,变化也较小,在 2.80~22.87 之间;样品  $\delta\text{Eu}$  值在 0.63 到 1.64 之间的范围内变

化,大部分样品 Eu 呈负异常,只有少数几个样品,钻孔 ZK63 中的 ZK63-0-s-8 到 11 的 4 个样品 Eu 呈微弱的正异常,说明样品源区的物质来源,形成演

表 3 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿微量元素测试结果 ( $\mu\text{g/g}$ )Table 3 Trace element content ( $\mu\text{g/g}$ ) of sandstone-type uranium deposits in the Ordos basin

样品编号	Ti (%)	Ba	Sr	Zr	Sc	V	Cr	Co	Ni	Zn	Rb	Nb	Mo	Hf	Ta	Pb	Th	U	Au	①
ZK63-0-s-02	0.12	494	153	30.4	6.73	25.8	18.4	3.32	5.55	2.58	81.7	5.65	0.3	1.19	0.39	31.8	5.98	7.03	—	1
ZK63-0-s-03	0.14	1055	98.2	77.9	2.05	23.2	12.1	2.77	3.93	7.97	76.9	5.08	0.39	2.25	0.89	2.07	6.36	1.33	61.9	1
ZK63-0-s-05	0.14	1188	87.3	244	3.61	17.7	16.1	2.38	9.62	8	98.7	5.62	—	6.16	0.31	8.35	6.52	1.38	—	1
ZK63-0-s-06	0.13	588	70.6	40.4	2.58	26.1	8.9	1.42	3.67	1.18	88.9	4.51	0.06	1.38	0.41	8.33	5.2	1.32	—	1
ZK63-0-s-07	0.31	773	79.2	41.5	3.79	12.2	11.3	4.42	5.2	8.19	57.9	9.26	3.13	1.6	0.47	16.6	8.76	7.67	—	1
ZK63-0-s-08	0.17	659	73.4	52.7	3.03	164	16.4	13.3	3.93	19.5	86.5	4.92	0.96	1.64	0.44	3285	3.98	2204	—	1
ZK63-0-s-09	0.17	706	67.2	36.2	4.97	129	16.5	17.9	16	23.6	135	7.04	2.23	1.47	0.39	15.5	3.66	39.9	—	1
ZK63-0-s-10	0.05	1208	89.1	182	2.7	7.35	9.12	3.55	4.59	26.8	91.5	3.3	0.96	5.07	0.26	19.6	3.87	1.69	—	1
ZK63-0-s-11	0.05	949	127	24.9	3.35	7.33	3.47	3.29	4.79	29.4	84.7	595	0.52	0.91	0.49	13.4	3.28	0.62	—	1
ZK63-0-s-12	0.48	2702	340	139	6.81	50.5	48.2	16.9	28	7.61	105	13.2	1.81	4.34	0.95	14.3	12.4	3.3	62.3	1
ZK64-127-s-01	0.47	212	96.2	137	10.2	64.2	63.8	15.1	37.9	33.3	167	17.2	0.43	4.46	1.35	13.8	15	2.41	—	1
ZK64-127-s-02	0.41	375	160	158	6.78	40	38.4	6.98	16.64	28	94.9	13.7	1.29	4.72	0.97	15.5	14.2	1.82	—	1
ZK64-127-s-03	0.27	474	112	148	5.92	30	28.6	5.14	13.2	29.4	125	11	0.27	4.31	0.62	14.4	8.48	1.64	18.4	1
ZK64-127-s-04	0.08	447	69.7	61.6	1.8	9.75	9	1.25	3.18	3.45	56.8	3.2	0.218	1.74	0.31	10.6	3.9	1.18	33.5	1
ZK64-127-s-05	0.61	475	90.9	169	8.52	68.3	62.9	13.9	25.8	17	183	16.1	0.831	5.41	1.06	5.34	8.93	2.48	63.5	1
ZK64-127-s-06	0.62	189	84.4	120	6.12	188	58.7	10.9	30.2	5.58	116	16.7	0.42	4.11	1.08	214	2.98	23.6	73.3	1
ZK64-127-s-08	0.18	464	79	57.7	4.5	33.6	19.2	3.49	4.89	19.3	83.2	7.06	0.065	1.67	0.41	10.8	6.66	1.46	2	1
ZK64-127-s-09	0.09	688	89.2	26.5	3.75	96.7	8.15	1.61	2.88	7.57	63.6	4.14	0.03	1.01	0.22	12.6	2.71	21.6	—	1
ZK64-127-s-10	0.52	343	106	168	8.78	61.8	54.2	11.1	23.7	28.1	236	15.5	0.47	5.86	1.28	4.43	10.1	2.8	89.4	1
ZK64-127-s-11	0.62	665	108	155	2.48	25.7	21.5	5.86	8.44	12.6	52.7	14.5	1.21	4.22	1.02	3.26	10.3	6.51	65.3	1
ZK64-127-s-12	0.06	609	145	26.9	3.12	8.12	6.14	2.9	4.22	14	63.5	2.41	0.36	0.96	0.33	11.3	3.56	1.47	—	1
ZK64-127-s-13	0.54	298	176	136	8.32	84	68.4	8.2	25.4	33.3	159	17.4	15.86	4.22	1.27	20.7	15.2	4.2	126.1	1
ZK64-127-s-14	0.48	463	374	114	7.19	61.7	54.2	15.5	30.2	29.7	116	14.4	1.17	3.55	1.02	16.7	18.6	3.86	94.1	1
GSR-4	1.57	193	53.18	0.96	0.119	32.6	17.3	6.35	16.8	19.15	27.6	5.9	0.686	1.82	0.35	7.08	7.05	2	0.03	1
GSR-5	3.96	334	123.1	1.2	0.755	90.7	107	22.1	37.2	120.8	219	19.3	0.426	3.18	1.13	9.31	18.95	1.78	0.04	1
ZK183-79-02	2.02	1531	347.8	0.84	0.252	85.2	41.8	8.03	13.9	55.72	89.8	8.8	0.030	1.38	0.61	13.8	8.14	2.05	0.01	2
ZK183-79-06	1.11	1369	378.5	1.29	0.233	34.8	23	4.64	8.62	539.99	82	5.44	1.56	3.89	0.41	10.9	3.12	0.92	0.01	2
ZK183-79-09	3.24	1093	325.86	1.03	0.409	67	53.4	17.2	25.6	349.18	74.7	13.63	0.86	2.14	1.02	20.5	5.07	5.73	0.1	2
ZK183-79-12	1.62	1313	284.65	0.88	0.181	61.9	28	7.54	11.2	235.85	68.8	6.6	21.62	1.52	0.5	11.2	2.74	34.4	0.03	2
ZK341-60-04	1.56	1456	212.14	1.25	0.204	54.8	32.5	8.28	16	447.22	76.5	8.09	18.28	3.55	0.51	13.8	2.34	0.73	0.01	2
ZK341-60-05	5.69	560	188.97	1.36	1.046	260	151	20.6	43.1	238.78	106	23.9	2.67	4.58	1.39	31.9	22.94	4.35	0.03	2
ZK64-127-S-07	2.91	861	147.61	1.07	0.367	150	35.4	9.94	20.5	39.69	138	11.2	0.08	2.33	0.65	17.6	7.54	3.13	0.01	2
ZKA139-35-03	2.66	1231	422.43	0.87	0.39	105	61.6	15.6	36	89.73	100	11.3	0.04	1.49	0.63	15.1	5.5	0.73	—	2
ZKA139-35-05	12.5	870	264.51	1.35	0.591	140	108	21.6	28.5	90.84	56.7	43.2	5.15	4.47	2.25	21.7	16.37	90.4	0.09	2
ZKA139-35-13	3.28	1230	309.32	1.13	0.283	78.4	55.5	11.2	17.7	266.58	73.1	14	10.64	2.7	0.87	14.5	3.5	8.68	0.02	2
ZKA183-87-02	4.8	1032	325.85	1.21	0.753	178	106	22.6	47.9	147.3	115	21.5	0.34	3.23	1.32	23.9	11.46	2.3	0.02	2
ZKA183-87-08	2.64	1197	277.7	0.94	0.356	254	58.4	13.5	24.3	51.84	93.9	12.1	8.79	1.74	0.5	10.5	4.81	81.1	—	2
ZKA183-87-09	4.37	1270	321.87	1.21	0.656	135	89.4	14.8	31	725.75	108	21.1	21.46	3.26	1.11	22.1	6.86	150	0.01	2
ZKA183-87-10	24.2	1003	261.11	2.08	0.76	220	113	27.7	41.5	245.13	66.5	96.3	81.18	24.07	3.3	25.3	67.75	58.1	0.06	2
ZKA39-14-02	4.59	1008	313.23	1.6	0.845	176	98.1	29.7	58.1	706.26	112	20.84	0.38	7.9	1.74	23.9	17.17	3.35	0.07	2
ZKA39-14-04	1.65	1308	280.73	0.91	0.231	69.1	20	4.28	7.84	98.33	63.9	5.58	0.53	1.64	0.62	16.6	2.78	3.16	0.01	2
ZKA39-14-06	3.21	980	229.5	0.93	0.18	70.4	34.6	7.95	11.8	163.9	42.5	11.64	8.64	1.7	0.63	10.5	3.56	32.2	—	2
ZKA79-11-05	4.94	916	379.13	1.2	0.824	202	113	34	57.1	841.12	111	21.14	0.33	3.19	1.19	28.7	17.56	2	0.01	2
ZKA79-11-09	2.25	1230	305.24	1.18	0.311	79.7	36.2	8.82	13.9	325.34	67.3	10.1	8.74	3.05	0.52	18	4.37	108	—	2
ZKA79-11-11	1.96	1219	251.21	1.03	0.196	83.6	42.7	7.33	13	182.75	64.9	9.03	3.93	2.13	0.47	8.94	2.63	69.5	—	2
ZKA79-11-12	2.76	1270	284.27	0.97	0.384	79.9	40.4	8.74	12.5	339.02	77	13.03	6.87	1.85	0.77	14.7	4.39	71.3	—	2

注:分析测试在中国科学技术大学理化分析中心完成,分析人:余华明;①—资料来源;1—本文数据;2—引自 Ling et al., 2006。

化条件相似。

ZK63-0-s-12 岩性为页岩,从图 2a 中可以看出该样品具有明显异常高于其他变质砂岩样品的 La

系元素丰度曲线值;而从图 2b 也可以看出钻孔 ZK64 的岩性为变质砂岩,编号为 ZK64-127-s-02、03、04、08、12 的样品 REE 曲线总体上要低于其他

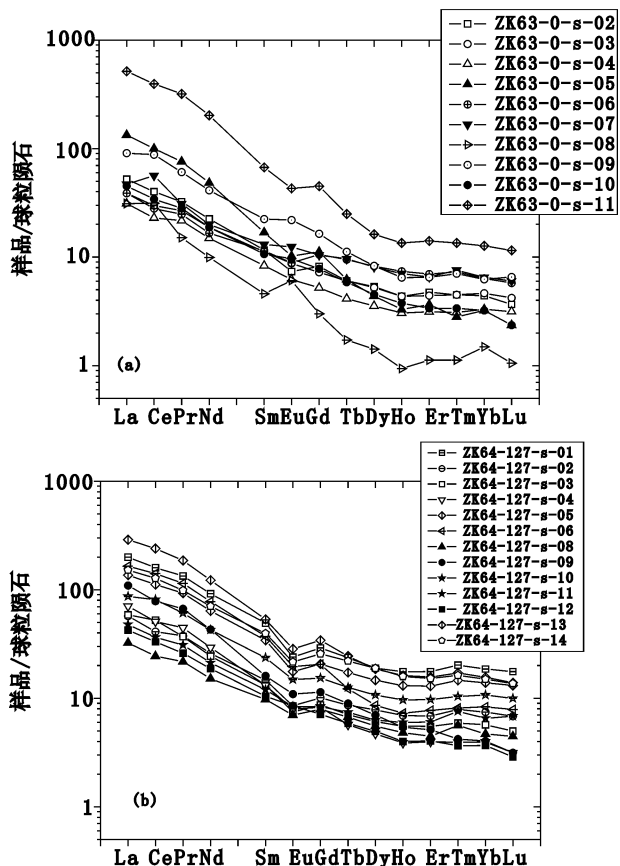


图2 黄陵地区砂岩型铀矿 REE 球粒陨石标准化图解  
 Fig. 2 The distribution patterns of REE of the samples from sand-type uranium deposit in Huangling area  
 (a) 取自钻孔 ZK 63 的样品; (b) 取自钻孔 ZK 64 的样品。  
 球粒陨石的 REE 含量据 Taylor et al., 1985  
 (a) samples from drilling hole of ZK 63; (b) samples from drilling hole of ZK 64. The REE chondrite values are from Taylor et al., 1985

的岩性为泥岩的样品 REE 曲线, 这说明样品的 REE 元素含量与岩性有关, 粘土部分含量高的沉积岩具有更高的 REE 含量。

两图中各样品几乎平行的曲线也可以初步判断该区沉积物质来源于形成演化条件相似的源区。

在东胜地区, 稀土元素的特征是 REE 总体特征为轻稀土富集, 重稀土亏损;  $\Sigma\text{REE}$  在  $36.7 \sim 701.8 \mu\text{g/g}$  之间波动; 对  $\Sigma\text{La}-\text{Nd}$ 、 $\Sigma\text{Sm}-\text{Ho}$ 、 $\Sigma\text{Er}-\text{Y}$  数据的统计表明, 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿样品的 REE 呈非常明显的轻稀土高度富集, 中稀土和重稀土相对亏损的趋势; LREE/HREE 变化较大。  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  比值较小, 变化也不大。 Y 含量比较高导致 LREE/HREE 与  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  比值差距较大, 大部分样品 Eu 异常明显, 但是差异很大, 在  $0.77 \sim$

1.81 内大幅度波动(图 3)

### 3.2 微量元素特征

#### 3.2.1 球粒陨石蛛网图

对黄陵地区的两个钻孔样品, 选取微量元素和部分稀土元素的横坐标从左向右按不相容程度降低排列作蛛网图(图 4a、b)。从两图中可以看出一些相同的特征: ① 随着横坐标从左向右微量元素不相容程度降低, 标准化值总体上也呈逐渐减小。个别元素如 U、Ta、Nb、Sr、Hf、Zr 则出现不同程度的正或负异常; 这些样品总体分布基本一致, 但某些微量元素的含量具有显著的差异性; ② U 的含量在  $0.60 \sim 39.9 \mu\text{g/g}$  之间, Rb、U、La、Ce、Sr、Nd、Zr、Y、Pb、Pr 含量较高, 其中 U、La、Nd、Pb 正异常特别明显。而 Ta、Nb、Sr、Hf、Zr 则明显负异常; ③ 标准化图解中高 U 低 Sr 存在于本次研究的样品中是一种普遍的现象。

对于东胜地区的铀矿化样品, 我们对微量元素作图获得的蛛网图解如图 5 所示, 从图中可以看出以下信息: ① 随着横坐标从左向右微量元素不相容程度降低, 标准化值总体上也呈逐渐减小; ② 个别元素如 U、Ta、Nb、Sr、Hf、Zr 则出现不同程度的正或负异常, 这些样品总体分布基本一致, 但某些微量元素的含量具有显著的差异性; ③ Rb、U、La、Ce、Sr、Nd、Zr、Y、Pb 和 Pr 含量较高, 其中 Rb、U、La、Ce、Pb 和 Pr 正异常特别明显; ④ U 的含量在  $0.73 \sim 150 \mu\text{g/g}$  之间, 其中 ZKA183 钻孔的 3 个样品 U 含量:  $58.1 \sim 150$ , 比较高。 Th 含量比较低, 范围:  $2.34 \sim 67.75 \mu\text{g/g}$ 。

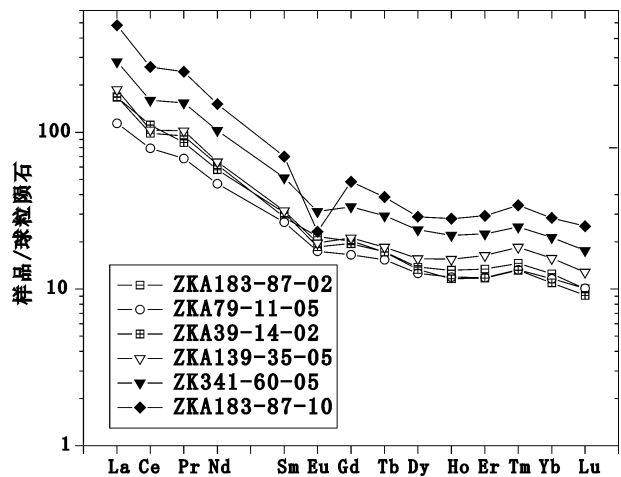


图3 东胜地区砂岩型铀矿 REE 球粒陨石标准化图解  
 Fig. 3 The distribution patterns of REE in Dongsheng area  
 球粒陨石的 REE 值据 Taylor 等, 1985  
 the REE chondrite values are from Taylor et al., 1985

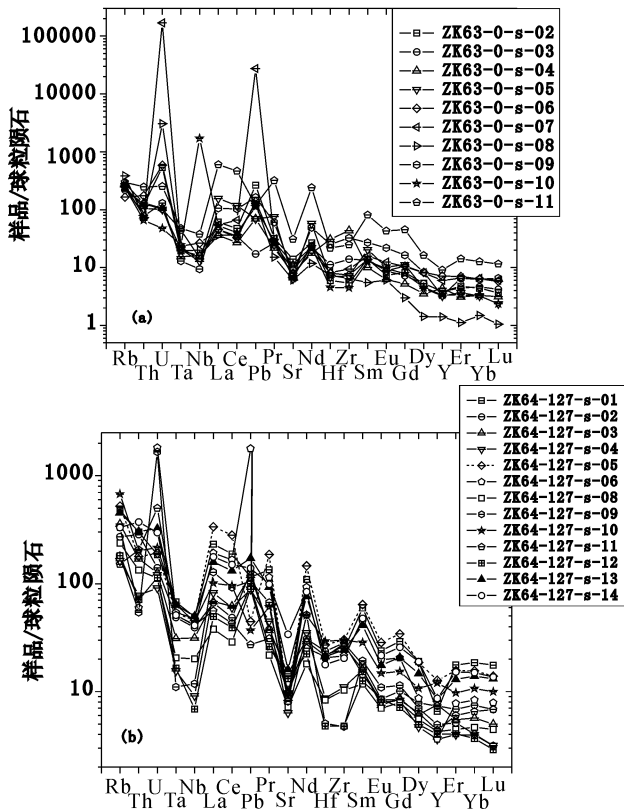


图 4 黄陵地区砂岩型铀矿样品微量元素球粒陨石标准化蛛网图

Fig. 4 The spider diagrams for some trace elements of the samples from sand-type uranium deposit in Huangling area

(a) 取自钻孔 ZK 63 的样品; (b) 取自钻孔 ZK 64 的样品。Rb、Th、U、Ta、Nb、La、Ce、Pb、Sr、Nd、Zr、Sm 和 Y 的球粒陨石含量值取自 Sun et al. ,1989;Pr、Eu、Gd、Dy、Er、Yb 和 Lu 的球粒陨石含量值取自 Taylor et al. ,1985;Hf 的球粒陨石含量值取自 Thompson,1982

(a) samples of drill hole ZK 63; (b) samples of drill hole ZK 64. the chondrite values of Rb, Th, U, Ta, Nb, La, Ce, Pb, Sr, Nd, Zr, Sm and Y are from Sun et al. (1989), Pr, Eu, Gd, Dy, Er, Yb and Lu from Taylor et al. (1985), and Hf from Thompson (1982)

#### 4.2.2 U 与其他元素相关性分析

对 U、Th 与其他微量元素、主要元素之间作了 20 种相关图解(图 6a, b), 对各元素的相关性问题进行探讨。

从图解中可以看出,一些元素和 U 具有明显的相关性,图 6a 是 U 与 Th、V、Mo 的元素相关性图解,其相关性很好,特别是在 U 含量较小的范围内(小于 5 $\mu\text{g/g}$ ,虚线左边的区域);图 6b 是 U 与 Zr、Pb、Ti、Au 的相关性图解,其相关性很好,特别是在 U 含量较小的范围内(小于 5 $\mu\text{g/g}$ ,虚线左边的区

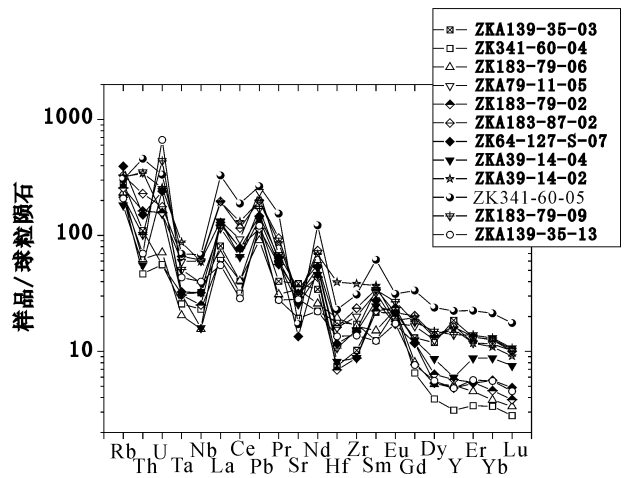


图 5 东胜地区砂岩型铀矿样品微量元素球粒陨石标准化蛛网图

Fig. 5 The spider diagrams for some trace elements of the samples from sand-type uranium deposit in Dongsheng area

Rb、Th、U、Ta、Nb、La、Ce、Pb、Sr、Nd、Zr、Sm 和 Y 标准化值取自 Sun et al. ,1989;Pr、Eu、Gd、Dy、Er、Yb 和 Lu 标准化值取自 Taylor et al. ,1985;Hf 标准化值取自 Thompson,1982 the chondrite values of Rb, Th, U, Ta, Nb, La, Ce, Pb, Sr, Nd, Zr, Sm and Y are from Sun et al. (1989), Pr, Eu, Gd, Dy, Er, Yb and Lu from Taylor et al. (1985), and Hf from Thompson (1982)

域);其他元素的相关性就较差,这里就不一一作图。

Castor and Henry(2000)对美国 Nevada 西北部和 Oregon 东南部铀矿床的全岩 U 含量超过 20 $\mu\text{g/g}$  样品的微量元素相关性研究认为, Kings River 样品富集 U 的样品也明显富集 Zr、As、Mo 和其他与低温热液矿床有关的元素(Cox and Singer, 1986),而 Painted Hills 样品具有轻度富集元素 W、As、Sb、Pb 和 Tl。朱西养和汪云亮等(2003)对东胜砂岩型铀矿微量元素作过分析和讨论,得出 Mo、Ba、Zr 和 Se 元素与 U 具有明显相关的结论。

由前面部分对微量元素相关性的讨论,我们可以得出,在 U 含量比较低的情况,一般在小于 5~10 $\mu\text{g/g}$  的范围内 U 的富集和 Th、Ti、V、Mo、Zr、Pb、Au 等一些微量元素及其一些主要元素具有明显的相关性,这些元素有些与 U 一样同为高场强元素,也有低场强元素,甚至还有相容元素。为何在 U 含量大于 5 $\mu\text{g/g}$  时就不显示相关性,这可能与 U 独特的再富集机制有关,在某些地段 U 元素以这种富集机制再富集而使 U 含量升高时,其他微量元素却

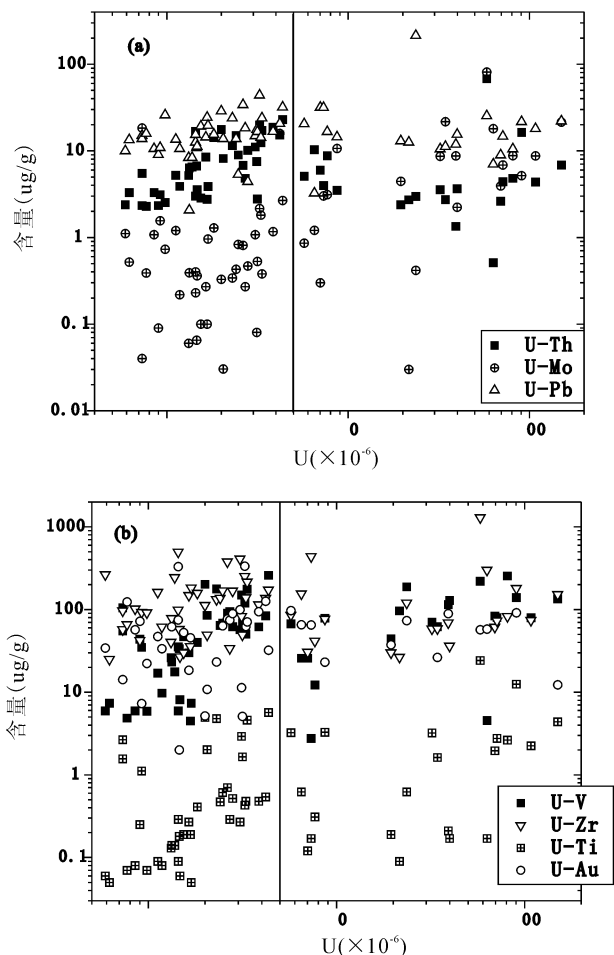


图 6 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿 U 与其他元素双对数相关图

Fig. 6 Double logarithm correlations between U and trace elements of sandstone-type uranium deposits in Erdos basin

部分数据引自凌明星, 2007

some data are derived from Ling et al., 2007

并不再富集。在东胜地区砂岩型铀矿, U、Th 和其他元素相关关系也有类似的特征, 详见 Ling 等 (2006)。

对黄陵地区钻孔 ZK64-127 不同深度的样品的微量元素丰度及比值与深度作相关图。如图 7 所示。用 U、Mo( $\times 100$ )、V、Ce、La、Pb、Zr 丰度及 Mo/La( $\times 100$ )、Mo/Nd( $\times 100$ )、V/Yb、Ba/Nd、Ce/La、Ce/Pr、Ce/Nd、Pb/Nd、U/Th、Sr/Nd、Sr/La 比值作相关图。

从这些相关图可以得出, 在深度为 250~260m 和 260~270m 时, U 含量都出现峰值。Ce、V (图 7a) 和 V/Yb (图 7b) 也在这两个区间出现峰值, 表明在 U 成矿过程中, Ce 和 V 也在同步富集。在这两

个深度区间内, U/Th 也同时突变, 出现峰值 (图 7c), 可见在 U 富集的过程中, Th 也富集, 不过富集程度没有 U 高。

### 4 结论

通过对鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿的稀土和微量元素系统分析研究, 可以得出以下结论:

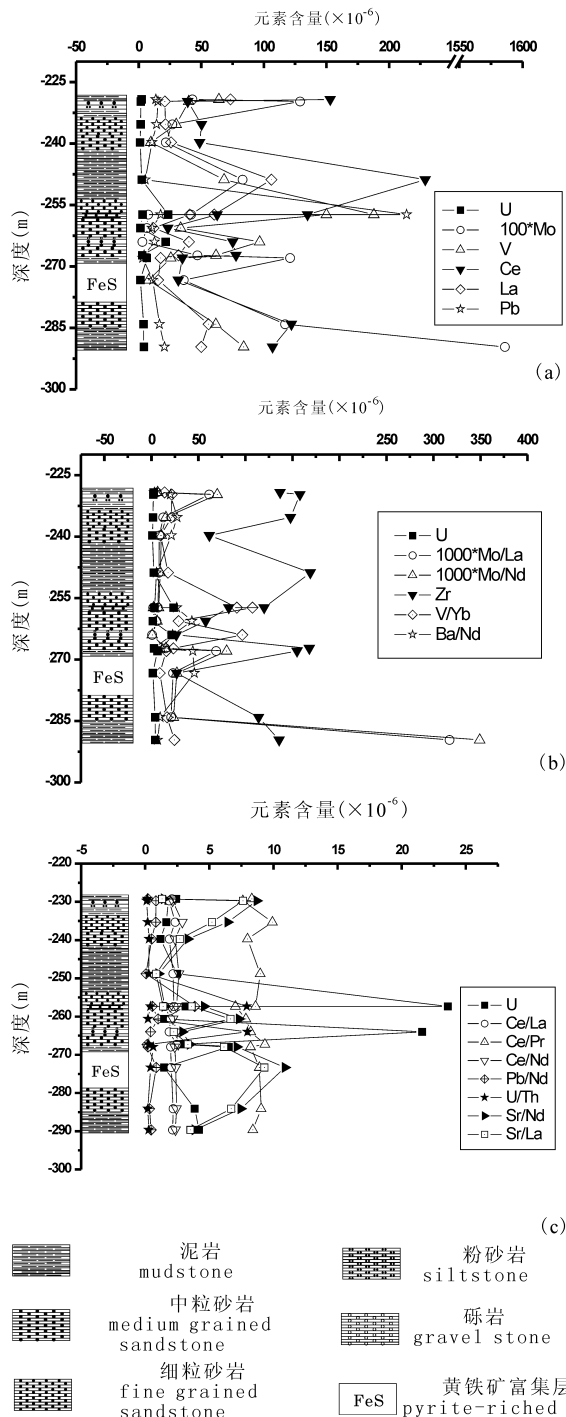


图 7 微量元素丰度或比值随钻孔深度的变化曲线

Fig. 7 The relationship between depth and trace elements



(1) 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿 REE 总体特征为轻稀土富集,重稀土亏损;测定的含铀砂岩样品的  $\Sigma\text{REE}$  变化在  $36.7\sim 701.8\mu\text{g/g}$  之间变化, Eu 异常差异明显,在  $0.3\sim 2.5$  内变化。U 含量变化很大,在  $0.6\sim 2204\mu\text{g/g}$  之间,U 的富集和一些微量元素如 Ti、V、Zr、Mo、Au 有一定的相关关系。

(2) 稀土和微量元素的研究结果显示,含铀矿矿化的侏罗统直罗组地层沉积物具有相似的源区,这是因为改变沉积岩的地球化学需要巨大的水/岩比值,成岩作用对沉积物 REE 的再分配影响不大,而且风化作用过程中可能被活化出来的 REE 又在风化壳中再沉淀下来,REE 型式反映沉积物源区的地球化学特征(如:Schreiber 等,1992;MacRae 等,1992;朱西养和汪云亮,2005)。在微量元素与铀的富集相关性分析表明在 U 与其他一些微量元素元素存在明显的相关性。

(3) 砂岩中铀矿的富集可以用下面的机制解释:由于盆地中沉积地层受到来自深部的岩浆热液作用,使得 U 和其他微量元素同时运移至砂岩中。因为盆地周边地带已有的研究表明,燕山晚期岩浆活动是十分普遍的(罗照华等,1999;杨兴科等,2006)。我们分析,岩浆期后热液会沿着盆地的边界断裂运移至盆地中央的沉积地层中去,所以导致了沉积岩普遍受到低温的热液蚀变作用,从盆地中生代沉积岩中磷灰石裂变径迹研究也可以得到证实(任战利,1995;孙少华等,1996)。由于鄂尔多斯盆地是一个大型含油气(煤)多种能源共生的沉积盆地,地层中具有很富的有机质,热液作用使得有机质发生运移,有机质的加入又导致地层中铀的二次富集。据前人研究,在自然界中 U 有正四价和正六价,在氧化环境中以六价形式存在,形成铀酰,在还原环境以四价形式存在,为沉淀形式(Langmuir,1978;Spirakis,1996)。环境改变其价态也会相应转换,当富氧地下水渗入容易使铀氧化浸出,运移至还原条件下,如包含有机质的岩区,则铀酰被还原沉淀下来,这就是该区砂岩中铀的富集的地球化学机制。

**致谢:** 西北大学孙卫教授、苗建宇教授提供部分研究样品,研究工作得到项目首席科学家刘池洋教授的亲切指导。

## 参 考 文 献 / References

陈戴生,李胜祥,蔡煜琦.2003.我国中生代盆地砂岩型铀矿研究现状及发展方向的探讨.沉积学报,21(1):113~117.  
陈法正.2002.鄂尔多斯盆地北部古水文地质条件与铀成矿前景分析.铀矿地质,18:287~294.

戴金星,李剑,罗霞,张文正,胡国艺,马成华,郭建民,葛守国.2005.鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比.石油学报,26(1):18~26.  
狄永强.2002.试论鄂尔多斯北部中生代盆地砂岩型铀矿找矿前景.铀矿地质,18(6):340~347.  
樊爱萍,柳益群,杨仁超,张复新.2006.东胜直罗组砂岩成岩作用过程与古流体运移事件分析.地质学报,80(5):694~699.  
冯乔,张小莉,王云鹏,樊爱萍,柳益群.2006.鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义.地质学报,80(5):748~752.  
李盛富,张蕴.2003.砂岩型铀矿床中铀矿物的形成机理.铀矿地质,20:80~84.  
凌明星.2007.鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物学和成矿地球化学研究.合肥:中国科学技术大学硕士学位毕业论文,112pp.  
刘池洋,赵红格,王锋,陈洪.2005.鄂尔多斯盆地西缘(中部)中生代构造专属性.地质学报,79(6):737~747.  
刘池洋.2005.盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展.北京:科学出版社,1~16.  
刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强.2006.鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及成藏(矿)响应.地质学报,80(5):617~638.  
刘颖,刘海臣,李献华.1996.用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素.地球化学,25(6):552~558.  
罗照华,邓晋福,韩秀卿.1999.太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演.北京:地质出版社.  
闵茂中,王汝成,边立曾,张富生,彭新建,王金平,李朋富,尹琳,张光辉.2003.层间氧化带砂岩型铀矿中的生物成矿作用.自然科学进展,13:164~168.  
彭新建,闵茂中,王金平,贾恒,魏观辉,王建峰.2003.层间氧化带砂岩型铀矿床的铁物相特征及其地球化学意义——以伊犁盆地 511 铀矿床和吐哈盆地十红滩铀矿床为例.地质学报,77:120~125.  
任战利.1995.利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史.地球物理学报,38(3):339~349.  
孙少华,刘顺生,汪集喏.1996.鄂尔多斯盆地热流场特征.大地构造与成矿学,20(10):29~37.  
孙泽轩,李国新,姚毅锋,黄大友.2003.沙麦地区区域地质构造演化及其与砂岩型铀矿的关系.铀矿地质,19(2):214~219.  
王金平,闵茂中,陈跃辉,彭新建.2005.砂岩型铀矿床中  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值与含矿性的关系研究:以库捷尔太和乌库尔其铀矿床为例.高校地质学报,11(1):77~84.  
王双明.1996.鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价.北京:煤炭工业出版社,1~437.  
魏永佩,王毅.2004.鄂尔多斯盆地多种能源矿产富集规律的比较.石油与天然气地质,25:385~392.  
吴伯林,权志高,魏观辉,彭新建,王金平,李占游,徐高中,刘池阳,张复新.2005.吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿地质地球化学基本特征.矿床地质,24(1):34~43.  
吴仁贵,陈安平,余达淦,祝民强,周万蓬.2003.沉积体系分析与河道砂岩型铀矿成矿条件讨论——以鄂尔多斯中生代盆地东胜地区为例.铀矿地质,19:94~99.  
夏毓亮,林锦荣,刘汉彬,范光,侯艳先.2003.中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究.铀矿地质,19(3):129~136.  
肖新建,李子颖,陈平安.2004.东胜地区砂岩型铀矿床后生蚀变矿物分带特征初步研究.铀矿地质,20(2):137~140.  
杨兴科,杨永恒,季丽丹,苏春乾,郑孟林,赵亮.2006.鄂尔多斯盆地东部热力作用期此特点.地质学报,80(5):705~711.

- 张进, 马宗晋, 任文军. 2004. 鄂尔多斯西缘逆冲褶皱带构造特征及其南北差异的形成机制. *地质学报*, 78(5): 600~611.
- 赵重远, 刘池洋. 1992. 残延克拉通内盆地及其含油气性——以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例. 中国地质学会编, "七五"地质科技重要成果学术交流会议论文选集. 北京: 北京科学技术出版社, 610~613.
- 朱西养, 汪云亮, 王志畅, 张成江, 刘建华. 2003. 东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探. *地质地球化学*, 31(1): 39~45.
- 朱西养, 彭新建, 汪云亮, 张成江, 王志畅, 王金平, 刘建华. 2004. 新疆大红滩层间氧化带型砂岩型铀矿同位素地球化学研究. *矿床地质*, 23: 444~451.
- 朱西养, 汪云亮. 2005. REE地球化学在砂岩型铀成矿研究中的应用. *地质论评*, 51(4): 401~408.
- Adler H H. 1974. Concepts of uranium ore formation in reducing environments in sandstones and other sediments. Formation of Uranium Ore Deposits. Int. Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 141~168.
- Brookins D G. 1976. Position of uraninite and/or coffinite accumulations to the hematite—pyrite interface in sandstone-type deposits. *Economic Geology*, 71(5): 944~948.
- Castor S B and Henry C D. 2000. Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon, USA. *Ore Geology Reviews*, 16: 1~40.
- Chen Daisheng, Li Shengxiang, Cai Yuqi. 2003. A discussion on research situation and development direction of and stone-type uranium deposits in the Meso—Cenozoic basin of China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 113~117.
- Cox D P and Singer D A. 1986. Mineral deposit models: Bulletin 1693, U. S. Geological Survey, Washington, DC, USA, 1~379.
- Darby B J and Ritts B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: the intraplate Western Ordos fold—thrust belt, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(1): 13~24.
- Finch W I. 1996. Uranium provinces of North America—their definition, distribution, and models. *US Geological Survey Bulletin*, 2141: 18~30.
- Granger H C, Santos E S, Dean B G and Moore F B. 1961. Sandstone-type uranium deposits at Ambrosia Lake, New Mexico—an interim report. *Economic Geology*, 56: 1179~1209.
- Lohmann K C. 1988. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. In: James N P, Choquette P W, eds. *Paleokarst*, New York: Springer-Verlag, 58~80.
- Langmuir D. 1978. Uranium solution—mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 547~569.
- Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, Sun Wei, Miao Jianyu and Liu Chiyang. 2006. Geochemical characteristics of REE and trace elements of sandstone-type uranium deposit in Ordos Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25: 354~364.
- Liu Shaofeng. 1998. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16: 369~383.
- Longstaffe F J. 1987. Stable isotope studies of diagenetic processes. In: Kyser T K. ed. *Stable Isotope Geochemistry at Low Temperature Fluids*, MAC Short Course Series, 13: 187~257.
- Lorilleux G, Cuney M, Jébrak M, Rippert J C and Portella P. 2003. Chemical brecciation processes in the Sue unconformity-type uranium deposits, Eastern Athabasca Basin (Canada). *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 241~258.
- MacRae N D, Nesbitt H W and Kronberg B I. 1992. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 109: 585~591.
- Meunier J D, Bruhlet J and Pagel M. 1992. Uranium mobility in the sediment-hosted uranium deposit of Coutras, France. *Applied Geochemistry*, 7: 111~121.
- Mikake S, Yoshida H, Koide K, Maekawa K, Ogata N and Yanagizawa K. 2000. Methodology development for modeling heterogeneous conductivity fields for a sandstone type uranium deposit, central Japan. *Engineering Geology*, 56: 185~195.
- Milodowski A E, West J M, Pearce J M, Hyslop E K, Basham I R and Hooker P J. 1990. Uranium-mineralized microorganisms associated with uraniferous hydrocarbons in southwest Scotland. *Nature* 347: 465~467.
- Min Maozhong, Xu Huifang, Chen Jia and Fayek Mostafa. 2005. Evidence of uranium biomineralization in sandstone-hosted roll-front uranium deposits, northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 26: 198~206.
- Pirc S and Rose A W. 1981. Uranium anomalies in paleo-aquifers near sandstone-type uranium deposits in the Devonian catskill formation of Pennsylvania. *Journal of Geochemical Exploration*, 15: 219~231.
- Ritts B D, Hanson A D, Darby B J, Nanson L and Berry A. 2004. Sedimentary record of Triassic intraplate extension in North China; evidence from the non-marine NW Ordos Basin, Helan Shan(Mt.) and Zhuozhi Shan(Mt.). *Tectonophysics*, 386: 177~202.
- Schreiber U M, Eriksson P G and Snyman C P. 1992. Mudrock geochemistry of the Proterozoic Pretoria Group, Transvaal sequence (South Africa): geological implications. *Journal of African Earth Sciences*, 14: 393~409.
- Shikazono N and Utada M. 1997. Stable isotope geochemistry and diagenetic mineralization associated with the Tono sandstone-type uranium deposit in Japan. *Mineralium Deposita*, 32: 596~606.
- Spirakis C S. 1996. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks. *Ore Geology Reviews*, 11: 53~69.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust, Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 9~56.
- Thompson R N. 1982. British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18: 59~107.
- Yang Dianzhong, Xia Bin and Wu Ganguo. 2004. Development characteristics of interlayer oxidation zone type of sandstone uranium deposits in the southwestern Turpan—Hami basin. *Science in China (Ser. D)*, 47: 419~426.
- Ye J R and Lu M D. 1997. Geochemistry modeling of cratonic basin: A case study of the Ordos basin, NW China. *Journal of Petroleum Geology*, 20(3): 347~362.
- Zhang Lifei, Sun Min, Wang Shiguang and Yu Xueyuan. 1998. The composition of shales from the Ordos basin, China; effects of source weathering and diagenesis. *Sedimentary Geology*, 116:

129~141.

## 图版说明 / Explanation of Plates

鄂尔多斯盆地含铀矿化砂岩的薄片观察结果。

图中字母代表: Qrt—石英, Pl—斜长石, Kf—钾长石, Bi—黑云母, Am—角闪石, Ser—绢云母, Chl—绿泥石, Py—黄铁矿, Lim—褐铁矿。

- (a) 浅变质的中粒长石杂砂岩, 主要矿物石英和斜长石, 粒间为绿泥石, 绢云母和粘土矿物; 正交偏光, 样品 ZKA183-87-08。
- (b) 浅变质的中粒长石杂砂岩, 主要矿物石英和斜长石, 长石多见粒间充填绿泥石和绢云母; 正交偏光, 样品 ZKA39-14-04。
- (c) 浅变质的中粗粒长石砂岩, 长石多有蚀变, 主要是绿泥石化和绢云母化; 正交偏光, 样品 ZK183-87-05。
- (d) 浅变质的中粗粒长石杂砂岩中浸染状黄铁矿化; 反光, 样品 ZK139-35-13。
- (e) 浅变质的含铀矿化中细粒长石砂岩, 其中的铀矿石微粒存在与黄铁矿和褐铁矿金属矿物颗粒间; 反光, 样品 ZK341-60-04。
- (f) 浅变质的中粒长石杂砂岩中浸染状黄铁矿化; 反光, 样品 ZKA183-87-08。
- (g) 浅变质的细粒长石砂岩中呈条带状分布的黄铁矿颗粒; 反光, 样品 A39-14-03。
- (h) 浅变质的细粒长石杂砂岩, 主要由石英和长石组成, 粒间为绿泥石, 绢云母和粘土矿物; 正交偏光, 样品 ZKA139-35-01。
- (i) 浅变质的粉砂岩, 主要由石英和长石组成, 其中长石几乎全部绢云母化; 正交偏光, 样品 ZKA79-11-06。

The petrographic diagrams of U-bearing sandstones from Ordos Basin.

Qrt—quartz, Pl—plagioclase, Kf—potassic feldspar, Bi—biotite, Am—amphibole, Ser—sericite, Chl—chlorite, Py—pyrite, Lim—limonite.

- (a) medium—coarse grained arkose with low metamorphism, made

of quartz, plagioclase; the chlorite, sericite and clay minerals are within the grains of other minerals, polarized light (sample No. ZKA183-87-08).

- (b) medium-grained arkose with low metamorphism, made of quartz, plagioclase; the chlorite, sericite and clay minerals are within the grains of other minerals, polarized light (sample No. ZKA39-14-04).
- (c) medium-grained arkose with low metamorphism, made of quartz, plagioclase; the plagioclase is often alteration with chlorite and sericite (sample No. ZK183-87-05).
- (d) medium-grained arkose with low metamorphism, the alteration of porphyritic pyrite is seen within the grains of minerals, reflected light (sample No. ZK139-35-13).
- (e) medium-grained arkose with low metamorphism and mineralization of uranium, the uranium minerals are within the grains of pyrite and limonite, reflected light (sample No. ZK341-60-04).
- (f) medium-grained arkose with low metamorphism, the alteration of porphyritic pyrite is seen within the grains of minerals, reflected light (sample No. ZKA183-87-08).
- (g) medium-grained arkose with low metamorphism, the ribbon alteration of pyrite is seen within the grains of minerals, reflected light (sample No. A39-14-03).
- (h) middle-grained arkose with low metamorphism, made of quartz, plagioclase; the chlorite, sericite and clay minerals are within the grains of other minerals, polarized light (sample No. ZKA139-35-01).
- (i) medium-grained arkose with low metamorphism, made of quartz, plagioclase; be noticed that the plagioclase is almost altered into sericite, polarized light (sample No. ZKA79-11-06).

## Geochemical Features of Sandstone-Type Uranium Deposits in the Ordos Basin and Their Geological Significances

YANG Xiaoyong<sup>1,2)</sup>, LUO Xiandong<sup>1)</sup>, LING Mingxing<sup>1)</sup>, LAI Xiaodong<sup>1)</sup>

1) *Research Center for Oil and Natural Gases, School of Earth and Space Sciences, University Science and Technology of China, Hefei, 230026;*

2) *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*

**Abstract:** On the basis of analyses of trace elements and REE from the sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin, the genesis of multiple energy resources and the formation of different ore deposits have been discussed in this paper. The high precision ICP-MS analyse presents that the total REE amount ranges from 36.7 to 701.8  $\mu\text{g/g}$ , manifesting that the contents of REE in mudstone samples is commonly higher than those of sandstone samples. The distribution patterns of the sandstone-type uranium samples characterize REE as enrichment in the light REE and depletion in heavy REE, showing the high Y abundance and abnormality of Eu between 0.30~2.5. The U abundances are 0.6~2204  $\mu\text{g/g}$ , some strong correlation between U enrichment and the related elements, such as Ti, V, Zr, Mo, Au has been revealed by this study. This study presents a geochemical basis for understanding the relationships between U enrichments and other related elements.

**Key words:** sandstone-type uranium deposit; REE; Trace elements; genesis of uranium deposits; Ordos Basin

杨晓勇等:鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床地球化学特征及其地质意义

图版 I

