

新疆伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿床中 稀土元素地球化学特征

张映宁^{1*}, 李胜祥², 王果¹, 李盛富¹, 陈奋雄¹, 郑恩玖¹

(1. 中国核工业集团公司 核工业地质局二一六大队, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国核工业集团公司 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要:通过对新疆伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿床主要层位水西沟群中稀土元素地球化学行为特征的分析,并与蚀源区岩石对比,初步认为水西沟群的稀土元素主要来自蚀源区的安山岩和花岗岩,与玄武岩无关。伊犁盆地南缘乌库尔其地区流体和岩石的 pH 值分布情况表明,层间氧化岩石带和原生还原岩石带的 pH 值相似,而矿石带的 pH 值偏低,这与在偏碱性条件下,REE 和 U 的络合物容易形成,并且 REE 和 U 的络合物随着 pH 值的降低而迁移和沉淀富集是相吻合的。对 Σ REE 的研究表明,在层间氧化岩石带中 Σ REE 有所亏损;通过对 REE 的分异性的研究,认为在不同的分带中 REE 的分异程度不同,在矿石带中分异程度最大,更加富集 LREE,并且随着岩石粒径的增大, LREE 和 HREE 的分异也有增大的趋势;根据 REE 和 U 的亲及活动性特征,认为 U 和 REE 在迁移沉淀规律方面具有共性,以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 及 $[\text{REE}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ 形式进行迁移;即在偏碱性的条件下,容易形成碳酸盐络合物,随着 pH 和 Eh 值降低, U 和 REE 共同沉淀、富集。

关键词: 砂岩型铀矿床; 层间氧化带; 稀土元素; 地球化学; 铀; 伊犁盆地

中图分类号: P595; P611 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2006)02-0211-08

REE geochemistry of sandstone-type uranium deposit in interlayer oxidation zone in the southern margin of Ili Basin, Xinjiang

ZHANG Ying-ning^{1*}, LI Sheng-xiang², WANG Guo¹, LI Sheng-fu¹,
CHEN Fen-xiong¹ and ZHENG En-jiu¹

1. The 216th Team of Geological Bureau, China National Nuclear Corporation, Urumqi 830011, China;

2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, China National Nuclear Corporation, Beijing 100029, China

Abstract: REE geochemical behaviors of rock and ore samples of Shuixigou Group and the sandstone-type uranium deposit in interlayer oxidation zone in the southern margin of Ili Basin, Xinjiang are studied with comparison to those of rocks in denudation zone. The results shows that the REE of Shuixigou Group came mostly from andesite and granite in the denudation zone, but did not originate from basalt. The pH values of the interlayer oxidation rock zone and the primary reduction rock zone are similar, and those of ore zone are lower than the other two zones. The contents of Σ REE of the interlayer oxidation rock zone are the lowest of the three zones. The fractionation degrees vary with different zones, and reach the maximum in the ore zone. According to the affinity and activity, it is concluded that REE and uranium have common property during migration and enrichment. They migrated probably in the form of $[\text{U}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ and $[\text{REE}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ in alkalescence circumstance, and deposited and enriched into ore deposit as pH and Eh values lowered.

Key words: sandstone-type uranium deposit; interlayer oxidation zone; REE; geochemistry; uranium; Ili Basin

收稿日期(Received): 2005-04-07; 改回日期(Revised): 2005-10-08; 接受日期(Accepted): 2005-10-16

作者简介: 张映宁(1974-), 女, 工程师, 地球化学专业, 主要从事铀矿地质研究与找矿工作。

* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Ying-ning, E-mail: zhangyingning2005@126.com, Tel: +86-991-3817724

0 引言

新疆伊犁盆地位于哈萨克斯坦板块和塔里木板块所夹持的伊犁微板块中,夹于中、北天山之间,属大型内陆山间盆地。盆地北依科古琴山,南临察布查尔山,东以喀什河为界,向西延入哈萨克斯坦境内,呈西宽东窄的楔状,盆地面积 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,在中国境内面积达 $163 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。伊犁盆地古老基底由前震旦系碳酸盐岩及浅变质岩组成,直接基底为上古生界和海西期花岗岩。盆地盖层发育较完整,自下而上发育的地层为三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)、上新统(N_2)和第四系(Q)。绝大多数地层被第四系覆盖,仅在盆地山前冲沟见零星出露。盆地发展演变经历了 P_2-T_1 强烈下沉、 T_2-J_2 潮湿下拗、 J_3-E 整体隆起及 $N-Q$ 脉动式抬升四个阶段,形成了伊犁盆地的现代地貌景观^[1-3]。

新疆伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿床是近几年来铀矿地质界备受关注的重点地区,对该盆地的地质研究和找矿成果等工作程度都处于国内领先水平,但对于 REE 的研究几乎为空白。REE 是一组能很好揭示矿床物质来源、成矿条件及矿床成因的示踪元素,它们在一般情况下是相对稳定的。在亲和性上,它们与放射性元素 U、Th 均为亲石元素,具有相似的地球化学性质,具共同迁移行为。所以利用 REE 的地球化学特征来研究铀成矿的物质来源及相关特征很有必要。

1 岩石和矿石的稀土元素特征

根据新疆伊犁盆地南缘水西沟群(J_1-2sh)中的 65 个岩石样及矿石样和 18 个蚀源区岩石样的 REE 平均值以及其中 36 个样品的 REE 分析数据(表 1 和表 2),作以下介绍和讨论。

1.1 成岩成矿特征的继承性

从表 2 中可见,安山岩和花岗岩的 ΣREE 值和矿石带的 ΣREE 值基本接近,而玄武岩的 ΣREE 值和矿石带的 ΣREE 值相差较大;另外从图 1 可见,安山岩和花岗岩的 REE 分布模式与矿石带的 REE 分布模式基本一致,而与玄武岩的 REE 分布模式相差较大,反映该区的物质来源主要源于酸性花岗岩及安山岩,而不是玄武岩。

根据研究区蚀源区、含矿主岩岩石及孔隙流体

pH 值分布情况^[5](表 3)可知,不论在含矿流体各带中还是在含矿岩石各带中,层间氧化岩石带和原生还原岩石带的 pH 值是相近的,而在矿石带中的 pH 值偏低,这与 pH 值在偏碱性条件下,REE 和 U 的络合物容易形成,并且 REE 和 U 的络合物随着 pH 值的降低而迁移和沉淀富集是一致的。

1.2 成矿期迁移富集,表生氧化期淋滤流失

从表 2 可见,从层间氧化岩石带→原生还原岩石带→矿石带, ΣREE 值有逐渐升高的趋势,这说明层间氧化岩石带中 ΣREE 有所亏损,也可以说明在成矿过程中,REE 可能在迁移过程中流失或在表生氧化期 REE 有一部分流失了^[6]。

1.3 稀土元素分异程度的差异性

LREE/HREE (或 $\Sigma \text{Ce}/\Sigma \text{Y}$)值能较好地反映稀土元素的分异程度以及指示部分熔融残留体和岩浆早期结晶矿物的特征^[4]。从表 2 和图 2 可见,从层间氧化岩石带→原生还原岩石带→矿石带, LREE/HREE 值也有逐渐升高的趋势(1.39~12.7), $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值在 0.752~21.1 之间变化,且在矿石带高于蚀源区、层间氧化岩石带和原生还原岩石带,这些都可以说明在不同分带中 REE 的分异程度不同,在矿石带中分异程度最大,更加富集 LREE。但从总体看, LREE 和 HREE 的分异程度较大,在该时期 LREE 富集,代表一种不同于海相(海相分异程度较低) LREE 富集、 HREE 亏损的沉积环境^[7]。同时从不同岩性 LREE/HREE 的比值的变化柱状图(图 3)中可以看出,随岩石粒径的增大, LREE 和 HREE 分异程度也存在一定的差异。原因主要是,细粒沉积物(尤其是泥质岩类)的矿物成分以颗粒极为细小的伊利石为主,它们对稀土元素有很强的吸附作用,而 LREE 离子半径较 HREE 大,更容易被吸附而与粘土矿物一起沉淀,从而导致轻重稀土元素的分异程度随着沉淀物粒径的变化而变化。

$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 均能反映 REE 的分馏情况。研究区 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值的变化范围为 1.99~15.1, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值的变化范围为 0.752~21.1(表 1),它们变化范围较大且显示富集 LREE。

1.4 Eu 的亏损

从图 1 可见,铕具有弱负异常。另外,从表 1 中也可以看出, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值(0.852~3.28)和 $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 值(0.479~1.99)均变化不大,表明铕具有弱

表 1 岩石和矿石的稀土元素含量 (μg/g) 及特征参数
Table 1 REE contents (μg/g) and parameters of rocks and ores

产 状	样 号	岩 性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
水西沟群 原生还原岩石带	W98-33	灰色粉砂岩	24.5	51.7	5.86	23.2	4.16	0.795	3.83	0.602	3.28	0.681	1.79	0.280	1.56	0.247
水西沟群 原生还原岩石带	W98-13	灰色含砾粗砂岩	21.3	44.9	4.91	18.4	3.56	0.713	3.41	0.624	3.02	0.678	1.73	0.294	1.46	0.220
水西沟群 原生还原岩石带	W98-16	灰色细砂岩,含黄铁矿	20.3	43.0	4.42	16.5	3.02	0.612	2.90	0.460	2.37	0.508	1.36	0.228	1.24	0.199
水西沟群 原生还原岩石带	W98-28	灰色砾岩,紧密	21.0	45.5	4.96	18.3	3.48	0.648	3.26	0.591	2.76	0.626	1.52	0.270	1.31	0.195
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-17	泥黄色泥岩	15.7	34.8	4.11	15.0	2.84	0.508	2.76	0.438	2.19	0.461	0.950	0.175	0.828	0.121
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-20	灰黄色含砾中粗砂岩	20.6	43.6	4.63	18.1	3.38	0.734	3.12	0.490	2.58	0.538	1.44	0.237	1.30	0.207
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-15	灰黄色中粗砂岩	19.0	40.4	4.28	15.4	2.95	0.524	2.70	0.444	2.31	0.513	1.35	0.130	1.30	0.198
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-5	灰黄色中细砂岩	27.0	54.5	6.32	23.2	4.54	0.826	4.21	0.636	3.40	0.676	1.56	0.243	1.21	0.180
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-18	玫瑰色中粗砂岩	18.8	41.2	4.62	16.8	3.25	0.593	3.26	0.551	3.06	0.719	1.86	0.338	1.96	0.307
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-19	浅黄色粗砂岩,松散	18.4	43.4	4.77	17.3	3.25	0.561	3.10	0.550	2.71	0.629	1.59	0.275	1.42	0.230
水西沟群 层间氧化岩石带	W98-21	玫瑰色粗砂岩,松散	22.6	50.6	5.33	20.2	3.91	0.719	3.74	0.641	3.20	0.686	1.68	0.272	1.33	0.203
水西沟群 矿石带	45363-35Tx	中砂岩	23.9	51.7	3.82	17.7	3.10	0.682	3.12	0.561	3.31	0.646	2.27	0.377	1.93	0.352
水西沟群 矿石带	45367-21Tx	粉砂岩	22.1	63.3	3.82	16.1	2.76	0.561	2.78	0.791	3.05	0.681	2.27	0.403	2.02	4.81
水西沟群 矿石带	45367-18Tx	细砂岩	25.0	52.8	4.06	18.1	3.28	0.708	3.12	0.646	3.40	0.698	2.36	0.420	2.20	0.405
水西沟群 矿石带	45367-34Tx	中砂岩	35.5	129	8.50	37.4	7.07	1.55	6.42	1.45	4.18	0.760	2.27	0.368	1.58	0.281
水西沟群 矿石带	449604	灰色中砂岩	16.6	64.7	4.31	16.5	3.02	0.725	2.95	0.697	2.70	0.559	1.75	0.315	1.58	0.308
水西沟群 矿石带	45369-5k + Tx	灰色不等粒砂岩	12.9	48.7	3.39	12.0	2.07	0.501	2.00	0.459	1.74	0.384	1.22	0.210	1.05	0.202
水西沟群 矿石带	45369-6k + Tx	灰色不等粒砂岩	9.63	42.1	2.71	9.17	1.64	0.415	1.56	0.417	1.48	0.332	1.14	0.210	1.05	0.202
水西沟群 矿石带	45369-7k + Tx	灰色含砾不等粒砂岩	9.80	40.3	2.71	10.2	1.81	0.432	1.73	0.349	1.39	0.314	0.962	0.175	0.852	0.176
水西沟群 矿石带	45369-8k + Tx	灰色含砾不等粒砂岩	9.88	43.4	2.96	9.60	1.72	0.397	1.65	0.485	1.31	0.306	1.05	0.175	0.878	0.176
水西沟群 矿石带	45379-12k + Tx	灰色中砂岩	22.6	60.8	3.20	22.1	4.14	0.950	3.99	0.561	3.49	0.707	2.01	0.306	2.02	0.290
水西沟群 矿石带	45379-13k + Tx	含砾不等粒砂岩	18.7	45.2	3.14	16.8	3.10	0.648	2.95	0.374	2.62	0.506	1.57	0.201	1.67	0.246
水西沟群 矿石带	45379-14k + Tx	灰色粉砂岩	33.0	81.4	5.48	27.9	5.09	1.21	3.99	1.02	5.67	1.22	3.67	0.595	3.78	0.607
蚀源区 花岗岩	p11(6)	浅肉红色中粒花岗岩	27.9	51.6	5.54	15.6	3.15	0.670	2.21	0.670	2.57	0.490	1.32	0.470	1.62	0.270
蚀源区 花岗岩	p13(6)	肉红色不等粒花岗岩	37.3	68.3	8.96	24.2	5.47	0.750	4.08	1.00	4.59	0.680	3.25	0.006	3.06	0.390
蚀源区 花岗岩	940B1-VI-43	角闪二长花岗岩斑岩	28.1	67.0	6.21	29.3	4.57	1.04	3.82	0.820	4.44	0.750	2.89	0.410	2.55	0.390
蚀源区 花岗岩	p16(10)XT	浅肉红色中细粒二长花岗岩	16.1	26.8	3.60	10.2	2.80	0.540	2.10	0.390	2.20	0.270	1.70	0.230	1.80	0.160
蚀源区 安山岩	P3(181)XT	安山岩	18.2	44.3	4.60	17.0	2.90	1.00	3.20	0.430	2.90	0.340	2.40	0.280	2.30	0.240
蚀源区 安山岩	p7(10)	浅灰色绿色安山斑岩	21.7	46.2	3.96	18.6	4.49	1.40	3.78	0.550	4.23	0.470	2.33	0.250	2.22	0.340
蚀源区 安山岩	p7(76)	灰绿色含杏仁安山斑岩	32.4	67.1	6.71	33.0	6.99	2.09	6.46	0.850	4.96	0.750	3.16	0.007	2.58	0.470
蚀源区 安山岩	P22(23)XT	灰色安山岩	18.0	34.0	4.60	19.0	3.80	1.50	3.70	1.43	3.50	0.410	2.70	0.260	2.50	0.190
蚀源区 安山岩	P16(42)XT	灰色安山岩	23.9	58.5	7.10	20.6	4.30	1.60	3.30	0.580	3.80	0.580	2.50	0.360	2.50	0.240
蚀源区 玄武岩	IV-106	杏仁状玄武岩	38.5	38.1	27.0	27.8	18.0	17.9	18.7	18.0	13.9	12.1	14.7	16.2	13.0	13.8
蚀源区 玄武岩	I-14	杏仁状玄武岩	38.6	30.8	20.4	21.2	11.6	14.0	13.9	13.3	10.5	11.1	11.6	11.6	10.6	10.9
蚀源区 玄武岩	P7(11)	绿泥石碳酸盐化玄武岩	44.4	85.6	12.8	44.6	10.5	2.53	7.27	1.19	8.84	1.26	4.96	1.35	3.93	0.420
蚀源区 玄武岩	P4(227)XT	灰绿色玄武岩	22.3	37.6	4.80	20.6	4.10	1.30	3.10	0.530	2.90	0.430	3.00	0.400	2.70	0.250

(续表 1)

产 状	样 号	岩 性	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(Ce/Yb) _N	(Sm/Nd) _N	(Gd/Yb) _N
水西沟群	W98-33	原生还原岩石墨带	122	110	12.3	8.98	10.6	8.57	0.552	1.98
水西沟群	W98-13	灰色含砾粗砂岩	105	93.8	11.4	8.20	9.84	7.95	0.595	1.88
水西沟群	W98-16	灰色细砂岩,含黄铁矿	97.2	87.9	9.27	9.48	11.0	8.97	0.563	1.89
水西沟群	W98-28	灰色砾岩,紧密	104	93.9	10.5	8.91	10.8	8.98	0.585	2.01
水西沟群	W98-17	泥黄色泥岩	80.9	73.0	7.92	9.21	12.8	10.9	0.583	2.69
水西沟群	W98-20	灰黄色含砾中粗砂岩	101	91.0	9.91	9.19	10.7	8.68	0.575	1.94
水西沟群	W98-15	灰黄色中粗砂岩	91.6	82.6	8.95	9.23	9.85	8.04	0.589	1.68
水西沟群	W98-5	灰黄色中细砂岩	128	116	12.1	9.61	15.0	11.7	0.602	2.81
水西沟群	W98-18	玫瑰色中粗砂岩	97.4	85.3	12.1	7.07	6.47	5.44	0.595	1.34
水西沟群	W98-19	浅黄色粗砂岩,松散	98.2	87.7	10.5	8.35	8.74	7.91	0.578	1.76
水西沟群	W98-21	玫瑰色粗砂岩,松散	115	103	11.8	8.80	11.5	9.84	0.596	2.27
水西沟群	45363-35Tx	中砂岩	113	101	12.6	8.03	8.35	6.93	0.539	1.30
水西沟群	45367-21Tx	粉砂岩	125	109	16.8	6.46	7.38	8.11	0.527	1.11
水西沟群	45367-18Tx	细砂岩	117	104	13.2	7.85	7.66	6.21	0.558	1.14
水西沟群	45367-34Tx	中砂岩	236	219	17.3	12.6	15.1	21.1	0.582	3.28
水西沟群	449604	灰色中砂岩	117	106	10.9	9.75	7.08	10.6	0.563	1.51
水西沟群	45369-5k+Tx	灰色不等粒砂岩	86.9	79.6	7.27	11.0	8.28	12.0	0.531	1.54
水西沟群	45369-6k+Tx	灰色不等粒砂岩	72.1	65.7	6.39	10.3	6.18	10.4	0.550	1.20
水西沟群	45369-7k+Tx	灰色含砾不等粒砂岩	71.3	65.3	5.95	11.0	7.75	12.2	0.546	1.64
水西沟群	45369-8k+Tx	灰色含砾不等粒砂岩	74.0	68.0	6.03	11.3	7.59	12.8	0.551	1.52
水西沟群	45379-12k+Tx	灰色中砂岩	127	114	13.4	8.51	7.54	7.79	0.576	1.59
水西沟群	45379-13k+Tx	含砾不等粒砂岩	97.7	87.6	10.1	8.64	7.55	7.00	0.568	1.43
水西沟群	45379-14k+Tx	灰色粉砂岩	175	154	20.6	7.50	5.89	5.57	0.561	0.852
蚀源区	p11(6)	浅肉红色中粒花岗岩	114	104	9.62	10.9	11.6	8.24	0.621	1.10
蚀源区	p13(6)	肉红色不等粒花岗岩	162	145	17.1	8.50	8.22	5.77	0.695	1.08
蚀源区	940B1-VI-43	角闪二长花岗岩斑岩	152	136	16.1	8.48	7.43	6.80	0.480	1.21
蚀源区	p16(10)XT	浅肉红色中细粒二长花岗岩	68.9	60.0	8.85	6.78	6.03	3.85	0.845	0.941
蚀源区	P3(181)XT	安山岩	100	88.0	12.1	7.28	5.33	4.98	0.525	1.12
蚀源区	p7(10)	浅灰色绿色安山玢岩	111	96.4	14.2	6.80	6.59	5.38	0.743	1.37
蚀源区	p7(76)	灰绿色含杏仁安山玢岩	167	148	19.2	7.71	8.47	6.73	0.652	2.02
蚀源区	P22(23)XT	灰色安山岩	95.6	80.9	14.7	5.51	4.85	3.52	0.615	1.19
蚀源区	P16(42)XT	灰色安山岩	130	116	13.9	8.37	6.45	6.05	0.642	1.07
蚀源区	IV-106	杏仁状玄武岩	287	167	120	1.39	1.99	0.758	1.99	1.16
蚀源区	I-14	杏仁状玄武岩	231	137	93.5	1.46	2.46	0.752	1.68	1.06
蚀源区	P7(11)	绿泥石碳酸盐化玄武岩	229	200	29.2	6.86	7.62	5.63	0.724	1.49
蚀源区	P4(227)XT	灰绿色玄武岩	104	90.7	13.3	6.81	5.57	3.60	0.612	0.926

注: 原生还原岩石墨带和层间氧化岩石墨带样品数据为南京大学分析测试中心 ICP-AES 分析结果; 矿石带样品数据由哈萨克斯坦方面分析 (分析方法不明); 蚀源区岩石样品数据为核工业 203 研究所分析测试中心 DIC02 - 1993 分析结果; 稀土元素标准化值据文献[4]。

表 2 岩石和矿石稀土元素相关参数
Table 2 REE parameters of rocks and ores

产状(样品数)	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(Ce/Yb) _N	(Sm/Nd) _N	(Gd/Yb) _N
原生还原岩石带(19)	107	96.4	10.9	8.87	10.6	8.61	0.573	1.94
层间氧化岩石带(22)	102	91.3	10.5	8.74	10.3	8.53	0.589	1.97
矿石带(24)	118	106	11.7	9.05	7.84	9.07	0.559	1.42
玄武岩(6)	213	149	64.1	2.32	3.21	1.64	1.190	1.15
花岗岩(5)	124	111	12.9	8.64	8.16	6.12	0.620	1.09
安山岩(7)	121	106	14.8	7.15	6.36	5.35	0.639	1.36

注：表中数据为本研究所有样品的平均值，标准化值据文献[4]。ΣREE、ΣLREE 和 ΣHREE 单位为 μg/g。

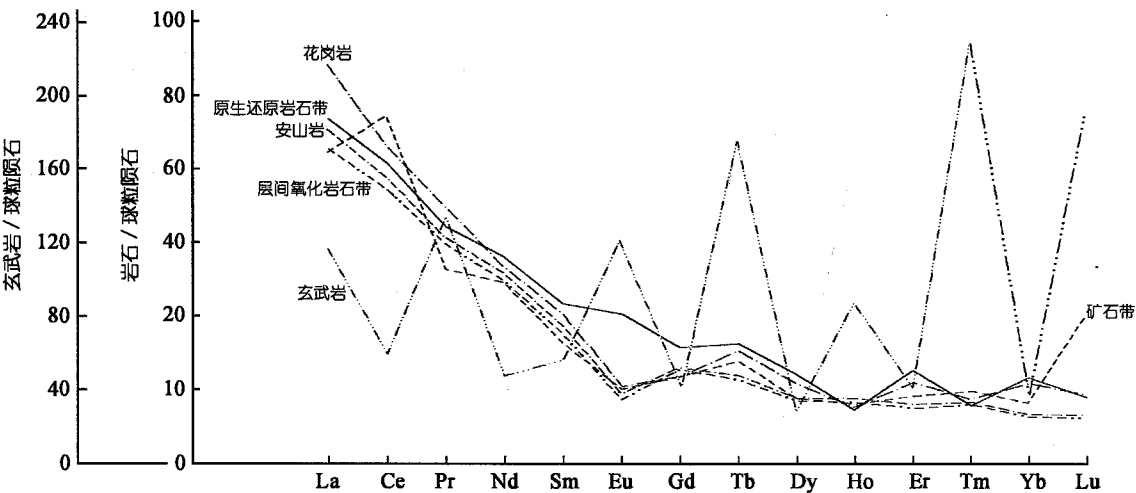


图 1 不同分带岩石与基岩稀土元素分布模式

Fig. 1 Chondrite-normalized REE sistribution patterns of different zones of rocks and bedrock

表 3 研究区岩石及孔隙流体 pH 值变化特征
Table 3 Change of pH values of fluids and main rocks

产状	蚀源区	层间氧化岩石带	矿石带	原生还原岩石带
流体	8.16	8.21	7.36	8.04
岩石	-	7.65	7.26	7.59

注：引自秦明宽^[5]。

负异常，铈的异常系数可以灵敏地反映体系内地球化学状态，并可作为鉴别物质来源的重要参数。如中性斜长石一般具铈正异常，玄武岩大多数没有铈异常，而花岗岩多数为铈负异常等。从图 1 可见玄武岩为铈正异常，这可能是由于样品数量的局限性所致。而花岗岩仍具有铈弱负异常，表明该区侏罗系砂岩的物源主要为花岗岩和安山岩，而非玄武岩。

2 讨论

稀土元素作为一组性质相似的元素，在成岩、成矿过程中，具有重要的指示意义。REE 是亲石元素，

其离子的最外电子层具有 8 个电子的惰性气体型稳定结构，它与具有 5f 型第三层电子充填的弱碱性离子稀有金属 U、Th 的亲性和相似。众所周知，亲和性相同的元素具有相近的地球化学性质，表现出密切的共生迁移行为。本文利用采自乌库尔其地区 453 线 6 个孔中的 8 个样品的 14 个稀土元素和 15 个稀有元素分析数据和地球化学多元统计中的聚类分析方法^[8-9]，对样品分析结果先取对数，再标准化，求出各元素的相关系数，作出 R 型聚类分析图（图 4）。

从图 4 可见，U、Th 和稀土元素的相关性较好。因而在研究层间氧化带砂岩型铀矿床时，可利用稀土元素的地球化学特征追溯铀矿的物质来源。

2.1 U 和 REE 活动性的影响因素

由于 REE 具有最外层 8 个电子的稳定结构，一般认为其活动性较小，REE 的活动性取决于矿物中 REE 的浓度、流体中矿物的稳定性及进入流体的 REE 浓度、REE 的迁出能力等因素^[10-12]。当满足以

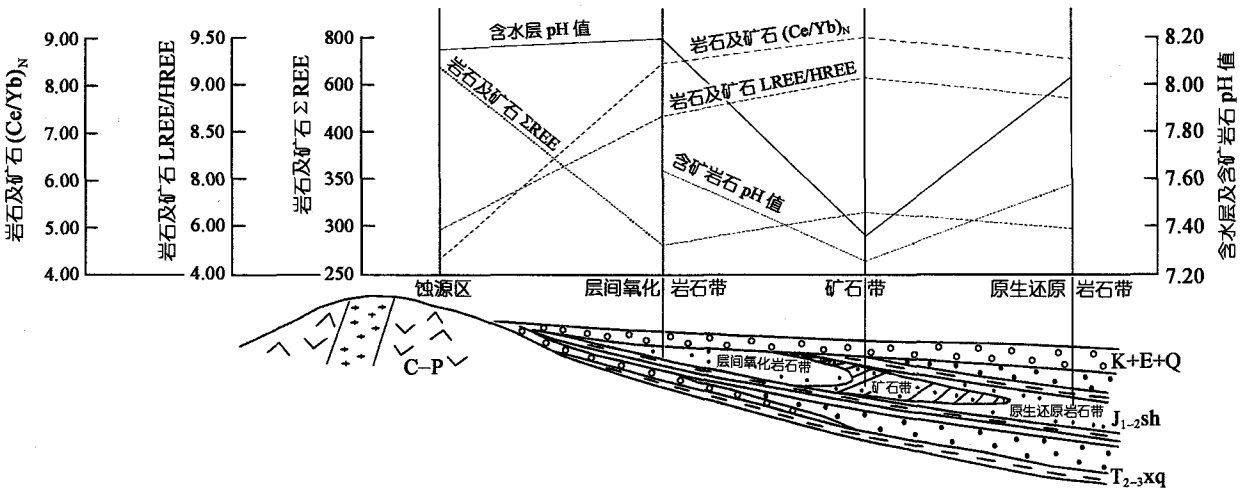


图 2 伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿床岩石和矿石稀土元素及层间流体 pH 分布规律示意图
Fig. 2 Sketch showing distribution of REE and pH value of interlayer fluid in rocks and ores of sandstone-type uranium deposit in the southern margin of Ili Basin

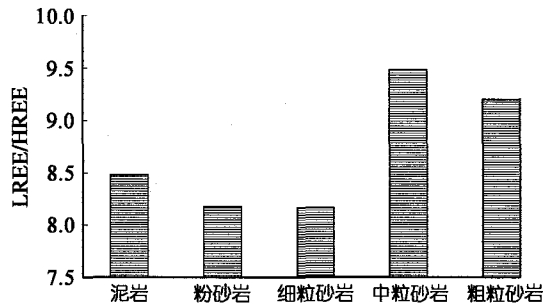


图 3 不同岩石的 LREE/HREE 比值直方图
Fig. 3 Histogram of LREE/HREE ratio in sedimentary rocks with different granularity

上某种因素时,REE 就会活化迁移。在成矿过程中,成矿流体与围岩的相互作用,也是导致 REE 发生活化迁移的原因之一。一般情况下,在受到各种不同阶段流体循环的影响下,U 和 REE 可以在不同阶段淋滤、活化迁移和再沉淀。

2.2 U 和 REE 的活动机理

资料表明,该矿床 U 最初是以 U^{6+} 形式在溶液中运移,U 离子最可能以碳酸盐、氯化物、硫酸盐、磷酸盐等络合物形式存在,Taylor 和 Fryer 根据 U 被碳酸盐络合物搬运的假设以及 Pine Creek 矿床富集 HREE 的观测结果,推测溶液中碳酸盐离子的存在增加了流体中 HREE 对 LREE 的比例^[13-14]。由于 REE 和 U 离子都是弱碱性阳离子,并且 LREE 与 HREE 的比例的变化,说明它们可能是在水溶液中呈可溶性的碳酸盐络合物一起被搬运的,主要是 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ 及 $[REE(CO_3)_3]^{3-}$ 的形式存在。U 呈

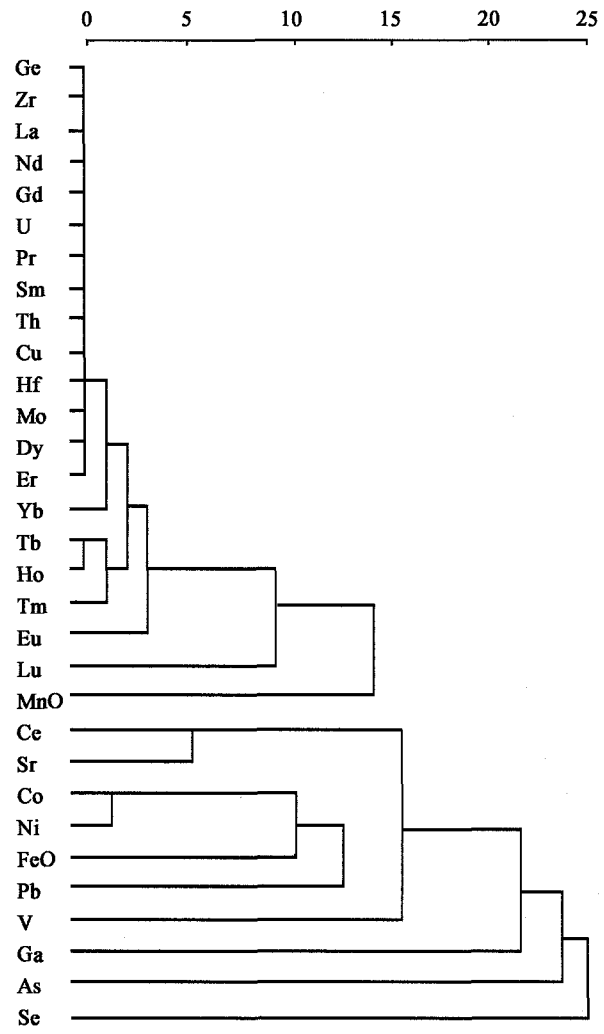
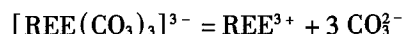
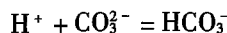
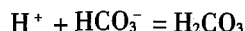
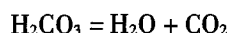


图 4 伊犁盆地南缘稀有金属和稀土元素 R 型聚类分析图
Fig. 4 Diagram of R-cluster analysis of rare metal elements and REE in the southern margin of Ili Basin

简单的铀氧基离子也有可能,但这并不是主要的,因为这种形式只有在较低的 pH 时才占优势^[13]。资料表明,伊犁盆地的成矿环境为弱碱性和中性,所以 U 和 REE 一般是以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 和 $[\text{REE}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ 的形式存在的。具体的反应可表示为:



REE 和 U 的碳酸盐络合物类型,最可能是在弱碱性($\text{pH} \geq 7.5$)和氧化条件($E_h \geq 0.2 \text{ V}$)下,温度较低时形成的。从它们迁移的条件和上述反应方程式可以推测,当 pH、 E_h 降低时,由于含矿溶液进入空洞降低了总压力,这时二氧化碳的活度明显下降^[6],从而使 REE 和 U 的碳酸盐络合物分解, U 和 REE 发生沉淀富集。

伊犁盆地层间氧化带砂岩型铀矿床,从氧化带到还原带具有明显的 pH 值的分带性,在矿石带附近存在着酸化褪色带,有利于 REE 迁移。当 pH 和 E_h 降低到某一范围时,REE 和 U 就会沉淀和局部富集^[14-15]。

3 结 论

(1) 蚀源区花岗岩和安山岩的 REE 分布模式与矿石带的 REE 分布模式十分相似,花岗岩和安山岩的 ΣREE 值与矿石带的基本一致,且均具有铈负异常,这表明成矿物质主要源于酸性花岗岩和安山岩。

(2) 从层间氧化岩石带→原生还原岩石带→矿石带, ΣREE 有升高的趋势,层间氧化岩石带的稀土元素的总量明显降低,甚至低于原生还原岩石带岩石,可能在成矿过程中流失或者表生氧化期流失。

(3) 不论是在蚀源区还是在层间氧化岩石带、原生还原岩石带和矿石带岩石中, LREE/HREE 值均大于 1,表明均富 LREE,但富集的程度存在一定的差异,在矿石带中这种分异更明显。另外,随着岩石粒径的变化,REE 的分异性也存在一定的差异。

(4) 在层间氧化带铀矿床中, U 和 REE 是共同迁移、富集、沉淀的,推测它们的存在形式主要为 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 和 $[\text{REE}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ 。而且在偏碱性的条件下,容易形成碳酸盐络合物,随着 pH 和 E_h 值的降低,铀和稀土元素易沉淀富集。

参考文献(References):

- [1] 殷建华, 陈奋雄. 新疆伊犁察布查尔县扎吉斯坦铀矿床地质勘查报告[R]. 乌鲁木齐: 中国核工业集团公司核工业地质局二一六大队, 2003: 4-15.
Yin Jian-hua, Chen Fen-xiong. Geological investigation reports of Zhajistan uranium deposit in Qapqal County, Ili, Xinjiang[R]. Urumqi: The 216th Team of Geological Bureau, China National Nuclear Corporation, 2003: 4-15 (in Chinese).
- [2] 李合哲, 李彦龙, 阿仲明. 伊犁盆地南缘铀成矿远景评价[R]. 乌鲁木齐: 中国核工业集团公司核工业地质局二一六大队, 1995: 6-23.
Li He-zhe, Li Yan-long, A Zhong-ming. Potential evaluation of the uranium mineralization in southern margin of Ili Basin, Xinjiang[R]. Urumqi: The 216th Team of Geological Bureau, China National Nuclear Corporation, 1995: 6-23 (in Chinese).
- [3] 新疆地质矿产局第一区调大队. 新疆伊犁盆地 1:20 万区域地质调查报告(金泉乡幅, 伊宁市幅, K-44-III, IV)[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质矿产局第一区调大队, 1995: 46-106.
The 1st Team of Regional Geological Survey, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. Regional Geological Report (1:200 000) for Jinquan County and Yining City, China (K-44-III, IV) [R]. Urumqi: The 1st Team of Regional Geological Survey, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 1995: 46-106 (in Chinese).
- [4] Boynton W V. Geochemistry of the rare-earth elements: Meteorite studies[M] // Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [5] 秦明宽. 新疆伊犁盆地南缘可地浸层间氧化带砂岩型铀矿成因及定位模式[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1997: 14-27.
Qin Ming-kuan. Origination and localization models of sandstone-type uranium deposits in leachable interlayered oxidation zone at southern margin of Ili Basin, Xinjiang[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1997: 14-27 (in Chinese).
- [6] 王小兵, 高保明. 新疆萨尔斯克金矿稀土元素地球化学特征[J]. 新疆地质, 2001, 19(3): 185-188.
Wang Xiao-bing, Gao Bao-ming. REE characteristics of the Saersoc gold deposit in Xingjiang[J]. Xinjiang Geol, 2001, 19(3): 185-188 (in Chinese with English abstract).
- [7] 冯建辉, 姜在兴, 鲁洪波. 伊犁盆地层序地层及沉积学研究[J]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 22-96.
Feng Jian-hui, Jiang Zai-xing, Lu Hong-bo. The Reaserch on Sequence Stratigraphy and Sedimentology in Ili Basin[M]. Dongying (Shandong): Petroleum University Press, 2000: 22-96 (in Chinese).
- [8] 胡以铿. 地球化学中的多元分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 19-36.
Hu Yi-keng. Multiple Statistic Analysis in Geochemistry[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991: 19-36 (in Chinese).
- [9] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 340-404.

- Lu Wen-dai. SPSS for Windows Statistic Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2000: 340-404 (in Chinese).
- [10] 地质部地质科学院地质矿产研究所. 国外地质参考资料(稀土元素地球化学专辑 20)[M]. 北京: 地质部地质科学院地质研究所, 1981: 95-109.
- Institute of Geology and Mineral Resources, Academy of Geological Science. Reference Data about Foreign Geology (No. 20, Special Issue of REE Geology)[M]. Beijing: Institute of Geology and Mineral Resources, Academy of Geological Science, 1981: 95-109 (in Chinese).
- [11] McLennan S M, Taylor S R. 与铀矿化有关的稀土元素活动性 [C]//李文达译. 稀土元素在矿床研究中的应用. 北京: 地质出版社, 1987: 149-153.
- McLennan S M, Taylor S R. Rare earth element mobility associated with uranium mineralisation[C]//Li Wen-da. REE Application in the Deposit Research. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 149-153 (in Chinese).
- [12] 包志伟, 赵振华. 东坪金矿床成矿过程中稀土元素活动性 [J]. 地球化学, 1998, 27(1): 81-90.
- Bao Zhi-wei, Zhao Zhen-hua. Rare-earth element mobility during ore-forming process of Dongping gold deposit[J]. *Geochimica*, 1998, 27(1): 81-90 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王果, 华仁民, 秦立峰. 乌库尔其地区层间铀成矿过程中的流体作用研究 [J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 340-349.
- Wang Guo, Hua Ren-min, Qin Li-feng. The role of fluids in the ore-forming process of the interlayer uranium deposits of Wukurqi district on the southern margin of Yili basin[J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(4): 340-349 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘钦甫, 杨晓杰, 丁述理. 华北晚古生代煤系高岭岩微量元素和稀土元素地球化学研究 [J]. 地球化学, 1998, 27(2): 196-203.
- Liu Qin-fu, Yang Xiao-jie, Ding Shu-li. Geochemistry of trace elements and REE on Kaolinite rocks in Late-Palaeozoic measures, north China[J]. *Geochimica*, 1998, 27(2): 196-203 (in Chinese with English abstract).
- [15] Bath A H, Milodowski A E, Strong G E. Fluid flow and diagenesis in the East Midlands Triassic sandstone aquifer[C] // Goff J C, Williams B P J. Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers. London: Geological Society Special Publications 34, 1987: 127-140.