

# 层间氧化带砂岩型铀矿稀土元素变化规律初探

——以伊犁和吐鲁番—哈密盆地为例

陈友良<sup>1,2)</sup>, 朱西养<sup>1,2)</sup>, 张成江<sup>1)</sup>, 陈跃辉<sup>3)</sup>, 彭新建陈跃辉<sup>3)</sup>, 王金平陈跃辉<sup>4)</sup>

1) 成都理工大学, 成都, 610059; 2) 核工业 280 研究所, 四川广汉, 618300;

3) 中国核工业地质局, 北京, 100013; 4) 核工业 203 研究所, 陕西咸阳, 712000

**内容提要:**本文以发育层间氧化带砂岩型铀矿的伊犁、吐鲁番—哈密盆地为例,详细研究了成矿层间氧化带稀土元素的分布特征和稀土元素在层间氧化作用中的变化规律。通过与北美页岩、还原带原生砂岩的对比,研究了稀土元素在不同氧化分带中的变化情况,结果表明在层间氧化作用过程中,稀土元素在总体亏损的背景上发生了明显的分异,LREE 从氧化带到过渡带含量逐步降低,HREE 由氧化带到过渡带趋于富集; $\delta\text{Ce}$  由氧化带到过渡带随氧化作用的减弱降低, $\delta\text{Eu}$  则逐步升高,呈现与表生风化作用相同的变化规律,较好地指示了层间氧化带中氧化—还原环境的变化。虽然稀土元素存在一定的迁移变化,但没有中亚砂岩铀矿床出现的 REE 显著迁移,高度富集现象。

**关键词:**层间氧化带;砂岩型铀矿;稀土元素

层间氧化带砂岩型铀矿床是指地表及浅部氧化带中具有氧化性质的地下水,沿着可渗透的砂(砾)岩承压含水层向下迁移,并在沿途发生强烈的层间氧化和铀的淋滤作用,而在层间氧化—还原界面附近沉淀富集形成的一类铀矿床。层间氧化带一般研究者依据岩石特征矿物(褐铁矿、赤铁矿、黄铁矿等)、颜色和在剖面中的相对位置等宏观特征沿地下水渗流方向由浅到深分为氧化带、弱氧化带、过渡带(氧化还原过渡带)和还原带(原生带)四个带。氧化带发育大量褐铁矿、赤铁矿,色调呈较深的褐黄色、黄色或者粉红色;弱氧化带发育黄色或红色斑点的褐铁矿、赤铁矿;过渡带呈深灰色,出现黄铁矿;还原带保持原岩结构、物质成分和原生灰色。

由于该类型铀矿可采用原地浸出工艺进行开采,具有成本低和环境污染少的双重优点而广受世界铀矿业界的亲睐,也是我国近 20 年来大力寻找和开发的主攻类型之一。

由于稀土元素的化学性质非常相近,它们在地质作用过程中往往作为一个整体进行运移,且其地球化学行为具有一定的可预见性,故稀土元素在地质学上的应用非常广泛。目前稀土元素地球化学已经成为成矿、成岩研究中的重要手段,它不仅可反映

矿质和流体来源,而且可示踪流体活动踪迹和成岩、成矿作用(毕献武等,1998;倪师军等,1998,1999;滕彦国等,1999);近些年来低温成矿作用日益受到重视,其中关于稀土元素在沉积作用、化学风化和自然环境变迁中的变化引起地球化学研究者的广泛关注,研究表明在外生地质作用、低温、低压、开放体系等条件下,稀土元素也可产生分馏,呈现出规律性变化(刘小薇,1995;涂光炽,1998;杨守业等,1999;鲁洪波等,1999;邵磊,2000;王中良等,2000)。

目前国内外对层间氧化带砂岩型铀矿床中的稀土元素分布规律研究甚少(王果等,2000),本文试图以我国典型的层间氧化带砂岩型铀矿床产出盆地——新疆的伊犁、吐哈盆地(即吐鲁番—哈密盆地)为代表,对其稀土元素分布特征及其变化规律进行系统的研究,以期深化此类铀矿床成矿作用的研究。

为了克服仅用稀土元素含量比较研究的简单化,一些学者引入了元素迁移位<sup>①</sup>参数,以求量化研究稀土元素的迁移变化规律。元素的迁移位是指在具稀溶液性质的天然体系中,在两种状态下,某一种元素质量的传递能力,简称迁移位(刘峰等,2004)。其物理意义指同一种元素(例如 La),在同

注:本文为国家科技部 305 科技攻关项目(编号 2001BA609A-07-13)的成果。

收稿日期:2006-10-22;改回日期:2007-04-16;责任编辑:章雨旭。

作者简介:陈友良,男,1965 年生。现为核工业 280 研究所研究员级高级工程师,成都理工大学博士研究生。主要从事铀与多金属的成矿规律与预测研究。通讯地址:618300,四川省广汉市 205 信箱;电话:0838-5105867;Email:youliang280@yahoo.com.cn。

一地质体系两种状态(状态1和状态2)中丰位之差,它反映了某一地质过程同一地质体系中元素迁移(富集和亏损)的能力(方向和强度)。但鉴于该方法尚未普遍采用,本文仍采用传统的方法进行探讨。

吐哈盆地和伊犁盆地均为天山褶皱造山带中的大型山间陆相盆地(袁明生,2000),盆地盖层主要发育中—下侏罗统水西沟群西山窑组含煤碎屑岩,在其中的松散、渗透性砂岩中普遍发育了层间氧化带,在其氧化—还原过渡带前锋线产有层间氧化带砂岩型铀矿。

## 1 样品的采集与分析方法

### 1.1 样品的采集与处理

样品采集之前,系统了解了研究区的铀矿化特征、勘探线的分布及其钻孔的施工情况。以揭露比较充分的勘探线剖面为目标,对备选的勘探线剖面到现场以及岩心库逐个查对,最终确定符合研究要求的钻孔剖面。钻孔岩心样品的采集按照层间氧化带发育方向布设样品,从氧化带、氧化—还原过渡带到原生岩石带,尽可能保证不同地球化学作用带均有足够的样品,且分布在同一层位中,分带主要依据前述岩石颜色、特征矿物确定。

样品采集中尽量避免采到钻进时泥浆污染的岩心。采样时先用刮刀或钢锯条刮去岩心表面的泥皮,再分别用布质样品袋装好,带回实验室分析。

层间氧化带作用过程中,主要变化发生在岩石填隙物中,为更准确地研究其地球化学变化规律着重分离出砂岩的填隙物。在样品分离中为防止外来铁的混入,碎样采取人工木锤粗碎,人工木锤粗碎加轻轻研磨后手工筛分粗碎屑和填隙物,同一个样品全岩和填隙物配套分别送样分析。

### 1.2 样品分析

由南京大学内生金属矿床国家重点实验室在德国菲尼根质谱公司产 Finnigan Mat Element 型质谱仪上,采用  $\text{HNO}_3$ —HF 法和国际标准实验室(GBPG-1 和 OU-6)标准测定,相对误差 $\leq 10\%$ 。

伊犁盆地砂岩及其填隙物分别分析 46 个和 44 个样品,吐哈盆地砂岩及其填隙物各分析 53 个样品,两盆地共分析得到 196 组结果(表 1,表 2)。

## 2 成矿层间氧化带砂岩稀土元素总体特征

表 3 反映了伊犁盆地层间氧化带不同分带的砂岩及其填隙物稀土元素含量,由表 3 可知,伊犁盆地

层间氧化带中砂岩比相应的填隙物的 LREE 和 MREE 除 Eu 元素外其含量明显高,而填隙物的 Eu 和 HREE 元素含量比相对砂岩略高,导致砂岩比其填隙物的 REE、LREE、MREE、LREE/HREE 分别高出  $39.92 \times 10^{-6} \sim 60.26 \times 10^{-6}$ 、 $38.43 \times 10^{-6} \sim 57.27 \times 10^{-6}$ 、 $2.34 \times 10^{-6} \sim 3.55 \times 10^{-6}$  和  $4.78 \sim 7.53$ ,而 HREE 低出  $0.55 \times 10^{-6} \sim 1.91 \times 10^{-6}$ ;但砂岩和填隙物各自稀土元素含量变化均很小,说明砂岩沉积时物源一致;在北美页岩标准化分布图上砂岩和填隙物稀土元素分布曲线形态各自一致(图 1),总体相互分离,相对而言砂岩稀土元素分布曲线与沉积碎屑岩相似为右斜式,相对北美页岩呈 LREE 富集,HREE 亏损,Eu 元素出现明显负异常。

填隙物稀土元素分布曲线总体近于水平,轻、重稀土分异不明显,Nd、Tb、Dy 出现较大的亏损。砂岩与其填隙物相比,砂岩的 LREE 富集更明显,而填隙物的 MREE 和 HREE 相对富集,说明 LREE、MREE 和 HREE 在粗碎屑和细碎屑中的含量和后期变化不同,其地球化学性状不同。含矿层砂岩中粗碎屑在成岩期和后生层间氧化作用中主要表现为发生了以长石等矿物的水解和氧化,使 LREE 明显地富集,HREE 亏损(Nesbitt,1984)。而填隙物以粘土矿物等细碎屑为主,粘土矿物的 LREE 与流体更易发生作用,对 LREE 的淋滤溶蚀占主导地位。填隙物中稀土元素含量低,LREE 明显降低,HREE 与砂岩相当。可能原因一是填隙物含较多的石英细颗粒,对填隙物的稀土元素产生“稀释效应”;二是填隙物中其他细粒矿物和岩屑更易与流体发生水—岩作用,遭受强烈的溶蚀水解作用,使得填隙物比砂岩 LREE 易被流体大量淋蚀而亏损。

## 3 稀土元素在层间氧化带中的迁移变化规律

不同氧化带分带的砂岩和填隙物在稀土元素总含量略有降低的背景下,稀土元素呈现出一定的变化规律(表 3,图 1)。LREE 元素和 MREE 的 Sm 元素的含量从氧化带、弱氧化带、过渡带到原生还原带含量逐步微弱降低,部分元素在过渡带或还原带出现很小幅度的反复;MREE 和 HREE 元素由强氧化带到弱氧化带含量降低,但到过渡带又高于氧化带含量,在过渡带出现最大值,结果导致  $\Sigma\text{REE}$ 、LREE、MREE、HREE 发生相应变化,LREE 在氧化作用下呈现较明显富集的规律,说明 LREE 元素在层间氧化作用中反应灵敏具在氧化带富集的特

点, HREE 有从氧化带、弱氧化带迁出, 然后进入到成矿流体(地下水), 再在过渡带富集沉淀的特征。

在还原带标准化分布型式图(图 2)上, 更能直观看出砂岩及其填隙物稀土元素分布较北美页岩标准化分布零散, 说明层间氧化带砂岩相对未氧化原

岩遭受了改造作用, 使其稀土元素发生了迁移分异。从氧化带到过渡带砂岩的 LREE 和 MREE 均有不同程度富集, 多数 LREE 元素在由氧化带到过渡带随氧化性质减弱富集程度减弱; HREE 元素总体亏损, 在弱氧化带微弱富集; 填隙物 HREE 相对

表 1 伊犁盆地砂岩和矿石稀土元

Table 1 REE contents ( $\times 10^{-6}$ ) of sandstone and ores in the Ili basin

勘探线/分带	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
381/ 氧化带砂岩	Y024	53.11	88.48	10.92	41.71	7.70	0.98	6.29	0.79	4.59	0.90	2.47	0.35	2.18	0.33	
	Y025	42.76	85.97	8.49	30.77	6.14	0.69	4.80	0.60	3.54	0.70	1.92	0.28	1.73	0.25	
	Y026	45.63	91.12	8.85	36.54	6.77	0.75	5.31	0.65	3.97	0.76	2.19	0.32	2.01	0.31	
	Y027	48.78	91.67	9.90	39.62	7.50	0.82	5.50	0.66	4.01	0.79	2.21	0.32	1.96	0.29	
	Y028A	2.66	5.54	0.78	3.07	0.73	0.14	0.62	0.08	0.60	0.14	0.44	0.07	0.44	0.09	
	Y029	42.11	81.50	8.62	34.11	6.60	0.81	5.08	0.64	3.62	0.69	2.03	0.29	1.77	0.26	
	Y023	42.31	86.08	8.83	34.66	6.58	0.81	5.18	0.64	4.04	0.78	2.25	0.32	1.93	0.29	
	Y038	31.07	62.93	6.34	24.68	5.04	0.65	4.11	0.52	3.05	0.65	1.93	0.28	1.73	0.26	
	Y039	39.67	59.28	7.84	32.02	6.05	0.80	5.03	0.64	3.98	0.82	2.39	0.35	2.17	0.33	
	Y040	53.38	100.69	10.46	41.49	7.90	0.81	5.92	0.76	4.52	0.93	2.69	0.40	2.47	0.36	
381/ 弱氧化带砂岩	Y042	40.78	78.71	7.93	31.45	5.97	0.74	4.62	0.58	3.41	0.68	1.92	0.28	1.81	0.27	
	Y006	43.23	83.60	8.54	36.11	6.63	0.71	4.87	0.59	3.59	0.70	1.93	0.27	1.67	0.24	
	Y007	1.37	4.78	0.49	1.95	0.40	0.09	0.44	0.06	0.46	0.11	0.37	0.05	0.39	0.07	
381/ 过渡带砂岩	Y015	39.32	77.23	8.04	30.93	6.11	0.86	4.87	0.67	4.25	0.90	2.64	0.40	2.47	0.37	
	Y016	42.42	80.96	8.51	33.99	6.25	0.91	5.13	0.64	4.05	0.80	2.32	0.31	1.85	0.29	
	Y010	42.16	83.07	8.60	32.99	6.44	0.80	4.76	0.61	3.53	0.71	1.99	0.30	1.72	0.25	
	Y011	37.13	73.01	7.54	30.42	5.75	0.81	4.54	0.57	3.35	0.69	1.95	0.27	1.74	0.26	
	Y012	44.54	88.74	8.91	35.35	6.62	0.89	5.21	0.67	3.90	0.77	2.21	0.32	2.01	0.30	
381/还原带 砂岩	Y013	45.10	84.70	9.34	37.60	6.53	0.86	5.45	0.71	4.15	0.82	2.34	0.33	2.07	0.31	
365/ 氧化带砂岩	Y056	39.12	74.28	7.90	31.38	5.93	0.79	4.50	0.56	3.33	0.67	1.92	0.28	1.67	0.25	
	Y057	47.83	90.04	9.20	36.73	6.78	0.77	5.22	0.60	3.55	0.70	1.89	0.26	1.69	0.23	
	Y036	46.45	86.23	9.05	37.29	7.12	0.87	5.61	0.66	3.84	0.75	2.04	0.30	1.77	0.26	
	Y037	44.07	88.41	10.02	38.10	7.26	0.89	5.85	0.67	4.11	0.81	2.24	0.33	2.04	0.28	
	Y044	45.92	90.80	10.27	39.71	7.87	0.96	6.31	0.70	4.20	0.82	2.16	0.32	1.88	0.25	
	Y045	35.37	70.16	8.32	31.57	6.63	0.86	5.44	0.62	3.83	0.77	2.13	0.31	1.96	0.28	
365/ 弱氧化带砂岩	Y050	41.72	85.16	9.51	37.07	7.03	1.11	6.07	0.73	4.83	1.01	2.96	0.45	2.87	0.46	
	Y051	42.38	84.02	9.52	36.62	6.90	0.96	6.07	0.70	4.50	0.91	2.56	0.37	2.27	0.33	
365/ 过渡带砂岩	Y034	45.77	92.92	9.46	37.43	7.05	0.84	5.44	0.66	3.90	0.74	2.23	0.33	1.96	0.30	
	Y035	30.96	63.45	6.31	25.20	4.86	0.57	3.90	0.54	3.46	0.73	2.16	0.31	1.99	0.29	
	Y030	40.39	80.30	8.73	33.20	6.27	0.82	5.21	0.57	3.62	0.75	1.99	0.29	1.83	0.25	
	Y031	43.08	80.88	9.75	36.99	7.26	0.92	5.69	0.65	4.12	0.80	2.15	0.29	1.88	0.26	
	Y052	42.03	82.78	9.22	34.98	6.61	0.85	5.51	0.60	3.69	0.71	1.94	0.28	1.83	0.25	
	Y054	40.06	82.37	9.20	36.02	6.75	1.01	5.85	0.67	4.24	0.84	2.51	0.37	2.38	0.34	
	Y055	46.04	92.74	10.38	39.19	7.63	1.00	6.27	0.75	4.71	0.94	2.69	0.39	2.46	0.36	
	Y046	47.92	94.51	10.48	40.91	7.90	0.98	6.31	0.70	4.20	0.84	2.27	0.31	1.93	0.29	
	Y047	46.19	93.72	10.17	40.37	7.80	1.00	6.48	0.73	4.46	0.85	2.24	0.31	2.06	0.28	
	Y048	36.30	72.75	8.39	32.44	6.37	1.00	5.33	0.61	3.86	0.80	2.22	0.33	1.98	0.28	
	Y001	47.33	89.97	10.56	39.97	7.73	1.20	7.04	0.83	5.28	1.10	3.04	0.43	2.80	0.39	
	Y003	40.21	81.89	8.82	32.44	6.25	0.93	5.00	0.63	3.69	0.73	2.05	0.29	1.85	0.30	
	365/还原带 砂岩	Y060	41.76	82.65	9.13	34.15	6.58	0.91	5.38	0.68	4.13	0.82	2.35	0.34	2.02	0.32
		Y061	38.09	77.82	8.46	31.51	5.65	0.77	4.60	0.56	3.39	0.68	1.92	0.28	1.79	0.27
Y022		34.68	70.31	8.00	29.50	5.61	1.05	5.05	0.66	4.31	0.94	2.73	0.39	2.57	0.40	
Y058		38.05	75.24	8.52	31.97	6.35	0.87	5.30	0.61	3.91	0.79	2.20	0.32	1.98	0.30	
Y059		42.57	85.06	9.66	36.30	7.09	0.90	5.75	0.71	4.59	0.95	2.59	0.38	2.36	0.34	

(续表 1)

勘探线/分带	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
381/ 氧化带填隙物	YTX024	32.26	70.90	7.48	27.89	5.15	1.05	4.78	0.66	4.16	0.99	2.92	0.45	3.09	0.52
	YTX025	24.27	54.53	5.76	21.40	3.98	0.91	3.96	0.56	3.77	0.80	2.36	0.36	2.38	0.38
	YTX026	26.48	63.34	5.73	20.88	3.86	0.82	3.62	0.50	3.53	0.78	2.48	0.40	2.80	0.4
	YTX027	25.96	56.58	6.07	22.06	4.21	0.95	3.90	0.52	3.61	0.78	2.36	0.37	2.50	0.4
	YTX028A	35.50	72.43	8.34	31.37	6.07	1.24	5.89	0.72	4.61	0.95	2.65	0.38	2.52	0.38
	YTX029	25.14	59.51	5.92	22.28	4.27	0.99	4.25	0.55	3.88	0.87	2.52	0.40	2.69	0.39
	YTX023	25.52	65.06	6.22	23.64	4.51	1.05	4.42	0.55	3.72	0.82	2.41	0.37	2.45	0.37
	YTX038	19.10	50.78	4.74	17.87	3.77	0.83	3.83	0.49	3.38	0.77	2.34	0.35	2.32	0.36
	YTX039	35.70	76.51	8.15	31.01	5.69	1.32	5.78	0.77	5.39	1.17	3.50	0.51	3.41	0.51
	YTX040	22.87	45.00	4.88	18.89	3.66	0.86	3.61	0.47	3.46	0.77	2.26	0.36	2.35	0.39
YTX041	24.22	51.22	5.26	19.97	3.94	0.90	3.93	0.54	3.65	0.79	2.36	0.35	2.32	0.35	
381/弱氧化带 填隙物	YTX042	25.42	56.16	5.75	21.67	4.11	0.94	3.73	0.49	3.35	0.71	2.21	0.33	2.09	0.33
	YTX005	21.26	44.42	4.78	18.57	3.77	0.97	3.99	0.57	4.08	0.93	2.83	0.42	2.59	0.41
	YTX006	23.94	48.69	5.05	18.74	3.53	0.81	3.26	0.42	2.87	0.63	1.94	0.27	1.86	0.30
	YTX007	25.49	52.00	5.58	21.56	4.19	1.06	4.00	0.56	3.82	0.83	2.41	0.37	2.35	0.35
381/ 过渡带填隙物	YTX015	28.27	59.42	6.23	23.26	4.43	0.99	4.17	0.57	3.90	0.87	2.63	0.41	2.64	0.44
	YTX016	27.98	56.45	5.91	22.81	4.47	1.02	4.47	0.63	4.33	0.97	2.84	0.40	2.50	0.39
	YTX010	26.07	53.78	5.29	20.90	4.05	0.93	3.75	0.48	3.38	0.75	2.21	0.34	2.24	0.32
	YTX011	13.25	20.54	2.92	11.09	2.07	0.49	1.98	0.26	1.78	0.39	1.23	0.19	1.28	0.20
	YTX012	28.97	59.35	6.17	22.95	4.37	1.05	4.55	0.59	4.16	0.94	2.80	0.43	2.73	0.41
381/还原带 填隙物	YTX013	31.89	64.58	6.73	25.98	4.91	1.09	4.74	0.62	4.21	0.90	2.75	0.43	2.92	0.44
365/ 氧化带填隙物	YTX056	30.58	65.40	6.43	24.23	4.54	1.01	4.23	0.57	3.86	0.83	2.41	0.36	2.36	0.38
	YTX057	30.41	63.53	6.39	24.60	4.49	1.00	3.93	0.49	3.33	0.71	2.05	0.31	2.02	0.31
	YTX036	29.51	59.91	6.15	23.60	4.37	0.96	4.08	0.51	3.54	0.71	2.19	0.34	2.23	0.36
	YTX037	27.07	57.56	5.65	21.53	4.00	0.93	4.02	0.51	3.59	0.77	2.29	0.35	2.30	0.35
	YTX044	33.59	69.40	7.09	26.54	5.57	1.20	6.30	1.03	7.80	1.88	5.70	0.86	5.54	0.81
	YTX045	34.75	70.76	7.03	26.69	5.14	1.08	4.78	0.64	4.03	0.86	2.54	0.38	2.57	0.39
365/弱氧化带 填隙物	YTX050	35.51	75.28	7.53	28.90	5.62	1.11	5.65	0.77	5.58	1.26	3.77	0.58	3.94	0.61
	YTX051	34.11	68.90	6.82	25.89	4.83	1.11	4.75	0.62	4.07	0.85	2.51	0.37	2.39	0.37
365/过渡带 填隙物	YTX034	34.51	72.40	7.23	27.11	4.93	1.06	4.51	0.59	3.91	0.84	2.58	0.38	2.49	0.38
	YTX035	15.58	35.72	3.43	13.36	2.75	0.68	2.75	0.39	2.63	0.58	1.74	0.27	1.67	0.28
	YTX030	29.97	62.43	5.99	23.19	4.54	0.95	4.25	0.52	3.28	0.67	1.97	0.30	1.88	0.30
	YTX031	32.23	65.81	6.77	25.82	4.85	1.11	4.37	0.54	3.47	0.73	2.15	0.31	2.04	0.31
	YTX052	33.72	69.21	7.23	27.26	5.32	1.18	4.82	0.62	4.05	0.86	2.52	0.36	2.33	0.34
	YTX054	45.33	84.33	9.24	35.54	7.10	1.46	8.01	1.31	10.21	2.42	7.74	1.25	8.38	1.25
	YTX055	36.21	73.72	7.66	29.12	5.60	1.16	5.28	0.69	4.59	0.97	2.82	0.43	2.87	0.44
	YTX046	30.27	63.77	6.31	23.71	4.52	1.02	4.13	0.55	3.48	0.74	2.10	0.33	2.10	0.31
	YTX047	29.22	61.90	6.48	24.84	4.98	1.12	5.30	0.75	5.37	1.21	3.68	0.55	3.46	0.51
	YTX048	38.16	72.06	7.77	29.09	5.52	1.20	5.23	0.67	4.31	0.89	2.60	0.40	2.52	0.40
	YTX001	37.73	72.19	7.60	29.42	5.64	1.29	5.45	0.72	4.84	1.07	3.09	0.48	3.09	0.48
	YTX003	38.09	77.17	7.71	29.67	5.48	1.22	5.32	0.71	4.65	0.97	2.79	0.44	2.75	0.42
	365/还原带 填隙物	YTX060	30.95	63.35	6.54	25.15	4.72	1.08	4.62	0.59	3.81	0.82	2.39	0.36	2.31
YTX061		23.34	47.24	4.94	18.76	3.62	0.84	3.48	0.48	3.32	0.74	2.27	0.34	2.25	0.38
YTX022		32.27	63.27	6.53	25.79	4.78	1.10	4.84	0.65	4.60	1.02	3.10	0.47	3.03	0.47
YTX058		30.35	61.11	6.40	23.66	4.57	1.04	4.59	0.61	4.25	0.90	2.65	0.40	2.53	0.38
YTX059		34.59	71.44	7.26	27.44	5.14	1.14	4.70	0.60	4.10	0.88	2.59	0.37	2.44	0.38

LREE 富集。值得指出的是 Eu 普遍呈负异常,且有从氧化带到过渡带亏损增强的趋势。

对吐哈盆地层间氧化带砂岩稀土元素的统计和分析也有类似的特征和结论(表 4,图 3、4)。

伊犁盆地与吐哈盆地相比,伊犁盆地砂岩的稀土元素含量比吐哈盆地稍高,可能反映了原岩稀土元素存在差异,但其填隙物稀土元素含量又比吐哈盆地低,导致伊犁盆地砂岩比相应填隙物稀土元素

表 2 吐哈盆地砂岩和矿石稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )Table 2 REE contents ( $\times 10^{-6}$ ) of sandstone and ores in the Turpan—Hami basin

勘探线/分带	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
39/氧化带砂岩	T025	43.48	85.90	9.11	35.50	6.40	0.90	4.47	0.50	3.01	0.61	1.73	0.24	1.54	0.24
	T026	58.10	114.41	11.55	42.05	7.60	0.90	5.93	0.66	4.01	0.74	2.02	0.28	1.81	0.26
	T027	34.70	68.65	7.06	26.58	5.13	0.81	3.86	0.47	2.96	0.58	1.64	0.22	1.52	0.21
	T019	49.16	98.24	10.03	38.06	7.11	0.90	5.07	0.59	3.58	0.66	1.85	0.24	1.63	0.24
	T003	37.46	73.68	7.79	29.26	5.29	0.77	3.73	0.44	2.84	0.54	1.51	0.21	1.44	0.21
	T005	44.63	90.82	9.23	34.06	6.43	0.83	4.69	0.58	3.46	0.66	1.92	0.26	1.71	0.25
	T084	50.45	99.89	10.26	38.04	7.11	1.15	5.61	0.72	4.34	0.85	2.39	0.33	2.17	0.31
	T090	46.05	90.40	9.30	34.75	6.70	0.80	4.62	0.56	3.33	0.64	1.85	0.28	1.78	0.24
	T088	35.72	72.61	7.54	27.81	5.14	0.73	3.75	0.46	2.86	0.55	1.57	0.22	1.43	0.23
	T022	37.97	77.39	7.80	29.40	5.30	0.75	4.00	0.47	2.87	0.58	1.61	0.21	1.41	0.22
T023	31.63	64.35	6.68	24.66	4.60	0.63	3.40	0.41	2.55	0.50	1.49	0.21	1.39	0.21	
39/过渡带砂岩	T018	46.99	93.36	9.28	33.79	6.18	0.75	4.64	0.56	3.42	0.66	1.97	0.28	1.90	0.28
	T002	35.92	69.43	7.11	26.07	4.98	0.64	3.51	0.42	2.55	0.51	1.50	0.20	1.32	0.22
	T085	36.27	74.36	7.49	28.15	5.38	0.76	3.91	0.46	2.95	0.58	1.63	0.23	1.59	0.23
	T086	51.33	101.28	10.28	38.08	6.70	0.85	4.86	0.57	3.45	0.65	1.85	0.27	1.71	0.27
	T089	42.10	84.14	8.68	32.12	5.98	0.89	4.34	0.50	3.16	0.58	1.61	0.22	1.52	0.22
	T091	32.00	63.82	6.44	23.25	4.51	0.70	3.34	0.42	2.54	0.50	1.49	0.21	1.41	0.22
	T092	45.77	87.28	9.43	35.31	6.44	0.85	4.77	0.56	3.31	0.64	1.72	0.26	1.69	0.23
	T024	38.93	75.36	7.91	29.42	5.46	0.75	4.00	0.48	2.95	0.55	1.61	0.22	1.45	0.21
	T012	38.97	80.94	8.17	30.17	5.66	0.67	4.19	0.49	3.09	0.59	1.68	0.23	1.45	0.23
	T013	38.80	81.92	8.20	30.52	5.67	0.79	4.28	0.50	3.29	0.62	1.71	0.25	1.49	0.24
T029	37.60	81.62	7.64	29.34	5.53	0.78	4.28	0.51	3.17	0.63	1.74	0.25	1.58	0.25	
37/氧化带砂岩	T031	47.62	96.10	9.47	35.37	6.84	0.73	5.09	0.62	4.13	0.80	2.21	0.36	1.94	0.30
	T033	37.05	76.54	7.20	27.57	5.34	0.73	3.94	0.47	3.10	0.62	1.69	0.25	1.54	0.25
	T035	39.03	80.70	7.97	29.30	5.45	0.72	4.20	0.52	3.22	0.64	1.84	0.27	1.64	0.25
	T036	46.61	97.77	9.66	35.29	6.81	0.75	4.75	0.57	3.42	0.65	1.87	0.27	1.66	0.25
	T046	34.82	73.35	7.29	26.69	5.01	0.75	4.10	0.49	3.29	0.69	1.98	0.29	1.77	0.26
	T056	47.68	97.53	9.64	36.87	6.94	0.81	5.35	0.67	4.18	0.86	2.51	0.37	2.34	0.37
	T057	32.98	68.50	6.86	25.37	4.63	0.72	3.53	0.43	2.66	0.51	1.49	0.21	1.28	0.20
	T047	37.10	76.10	7.33	28.29	5.29	0.71	4.23	0.52	3.28	0.69	1.96	0.29	1.83	0.29
	T048	48.85	99.99	10.02	37.82	7.03	0.82	5.13	0.62	3.66	0.72	1.95	0.28	1.68	0.26
	T063	40.96	79.59	7.78	33.80	6.22	0.68	4.65	0.58	3.34	0.68	1.84	0.26	1.68	0.23
T065	28.54	58.83	6.65	24.48	4.52	0.73	3.84	0.53	3.17	0.69	1.90	0.28	1.84	0.27	
37/弱氧化带砂岩	T040	40.79	86.32	8.24	30.69	6.03	0.56	4.41	0.53	3.02	0.61	1.79	0.24	1.48	0.23
	T041	31.09	66.02	6.47	23.11	4.25	0.85	3.36	0.42	2.79	0.60	1.81	0.28	1.69	0.28
	T043	39.54	80.69	8.09	29.25	5.44	0.67	3.91	0.51	2.94	0.59	1.62	0.25	1.52	0.25
	T045	44.28	94.17	9.36	34.83	6.78	0.90	5.27	0.65	4.46	0.90	2.67	0.42	2.55	0.39
37/过渡带砂岩	T037	38.90	83.68	8.01	30.27	5.22	0.72	4.14	0.48	3.19	0.62	1.78	0.26	1.66	0.27
	T039	49.67	95.26	9.02	34.86	6.68	0.84	4.85	0.54	3.38	0.66	1.73	0.26	1.53	0.24
	T054	38.87	79.29	7.82	28.45	5.50	0.68	3.98	0.48	3.24	0.64	1.83	0.27	1.61	0.25
	T058	30.31	60.07	6.89	25.31	4.59	0.69	3.76	0.49	2.92	0.61	1.68	0.24	1.56	0.23
	T059	39.44	76.10	8.63	32.00	5.85	0.61	4.29	0.55	2.99	0.60	1.63	0.23	1.48	0.20
	T061	36.44	70.19	8.05	29.96	5.42	0.74	4.33	0.58	3.40	0.73	2.06	0.31	2.12	0.31
	T062	34.36	66.62	7.54	27.57	5.05	0.68	3.94	0.50	2.90	0.61	1.63	0.24	1.51	0.22
	T064	29.25	58.87	6.68	25.20	4.52	0.70	3.68	0.48	2.85	0.60	1.67	0.24	1.56	0.23
	T066	38.97	74.35	8.58	31.62	5.88	0.72	4.50	0.57	3.28	0.66	1.82	0.27	1.73	0.25
	T068	36.26	72.48	8.20	30.14	5.49	0.85	4.33	0.55	3.05	0.62	1.74	0.25	1.62	0.24
T071	30.91	62.18	6.97	25.63	4.68	0.65	3.70	0.47	2.76	0.57	1.57	0.23	1.47	0.21	
37/还原带砂岩	T050	35.56	73.65	7.71	28.86	5.57	0.86	4.25	0.54	3.44	0.73	2.08	0.31	1.85	0.29
	T073	42.20	82.27	8.98	34.62	6.46	0.75	4.87	0.61	3.38	0.68	1.78	0.26	1.63	0.23
	T053	40.67	77.79	8.52	32.39	6.00	0.80	4.81	0.65	3.93	0.85	2.36	0.34	2.22	0.32
	T051	27.06	53.84	5.98	22.22	4.21	0.63	3.30	0.43	2.52	0.52	1.40	0.20	1.29	0.18
	T082	42.96	83.65	8.78	35.87	6.97	1.02	5.74	0.79	4.69	0.97	2.61	0.38	2.43	0.34

(续表 2)

勘探线/分带	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
39/氧化带 填隙物	XT025	41.66	80.11	8.76	33.97	5.90	1.19	5.20	0.70	4.14	0.91	2.54	0.39	2.56	0.38
	XT026	43.25	85.66	9.27	34.54	6.20	1.25	5.20	0.71	4.29	0.95	2.75	0.42	2.79	0.41
	XT027	24.55	50.80	5.88	21.57	3.99	0.94	3.83	0.55	3.48	0.76	2.15	0.32	2.14	0.32
	XT019	40.95	81.64	8.74	33.44	5.56	1.17	4.82	0.60	3.72	0.77	2.05	0.33	2.06	0.31
	XT003	26.47	49.02	5.52	19.57	3.53	0.90	3.44	0.38	2.49	0.51	1.52	0.22	1.43	0.22
	XT005	31.84	63.70	6.36	22.40	3.97	0.90	3.81	0.44	2.84	0.59	1.72	0.25	1.65	0.25
	XT084	55.28	97.08	10.44	37.16	6.68	1.46	7.16	0.80	5.21	1.10	3.17	0.47	2.98	0.46
	XT090	34.78	70.29	7.05	24.12	4.11	0.92	4.01	0.43	2.64	0.55	1.62	0.24	1.52	0.23
	XT088	28.88	59.97	6.15	21.43	3.74	0.89	3.60	0.39	2.61	0.53	1.62	0.23	1.49	0.24
	XT022	24.42	51.72	5.11	17.88	3.14	0.86	3.23	0.34	2.29	0.46	1.36	0.21	1.34	0.20
	XT023	25.46	51.08	4.94	17.54	3.10	0.75	3.01	0.34	2.17	0.44	1.34	0.20	1.32	0.20
39/过渡带 填隙物	XT018	42.99	79.84	8.64	31.03	5.28	0.89	4.41	0.58	3.52	0.75	2.20	0.34	2.35	0.36
	XT002	30.20	58.32	6.54	22.97	4.02	0.82	3.54	0.49	3.09	0.70	1.95	0.30	2.10	0.31
	XT085	26.61	55.94	5.56	19.54	3.46	0.92	3.43	0.39	2.51	0.53	1.63	0.23	1.52	0.24
	XT086	42.44	89.21	8.42	29.02	5.04	1.04	5.05	0.56	3.74	0.81	2.54	0.38	2.48	0.40
	XT089	37.26	67.57	7.16	25.09	4.39	1.03	4.12	0.48	2.90	0.60	1.77	0.27	1.74	0.28
	XT091	26.81	52.27	5.48	19.24	3.38	0.82	3.36	0.38	2.40	0.53	1.58	0.23	1.54	0.24
	XT092	31.40	63.43	6.29	22.40	3.80	0.93	3.71	0.43	2.70	0.56	1.68	0.27	1.74	0.27
	XT024	28.91	58.93	5.83	20.19	3.65	0.88	3.82	0.41	2.60	0.53	1.65	0.24	1.58	0.25
	XT012	23.02	47.55	4.79	17.02	2.91	0.79	3.02	0.33	2.23	0.46	1.41	0.20	1.35	0.21
	XT013	33.61	72.48	6.94	24.29	4.20	1.06	4.08	0.44	2.68	0.52	1.56	0.23	1.52	0.24
	XT029	28.43	59.64	5.79	20.37	3.64	0.92	3.57	0.41	2.55	0.53	1.62	0.23	1.51	0.25
37/氧化带 填隙物	XT031	34.09	69.22	6.85	23.78	4.17	1.01	4.02	0.44	2.88	0.57	1.72	0.25	1.59	0.25
	XT033	30.28	60.33	6.06	21.55	3.69	0.94	3.67	0.40	2.61	0.55	1.58	0.24	1.47	0.24
	XT035	28.68	57.39	5.50	19.97	3.47	0.90	3.63	0.41	2.74	0.56	1.75	0.26	1.63	0.26
	XT036	32.89	67.00	6.68	23.32	4.00	0.90	3.83	0.43	2.72	0.56	1.67	0.25	1.57	0.26
	XT046	30.93	63.19	6.16	21.67	3.91	0.95	3.80	0.44	2.90	0.59	1.79	0.26	1.70	0.26
	XT056	38.63	84.07	8.14	29.31	5.38	1.04	4.80	0.57	3.52	0.71	2.05	0.30	1.85	0.29
	XT057	31.96	65.83	6.52	23.86	4.29	1.06	4.06	0.45	2.91	0.60	1.76	0.25	1.69	0.27
	XT047	38.61	81.08	7.89	27.70	5.09	1.08	4.94	0.59	3.92	0.80	2.41	0.35	2.33	0.36
	XT048	36.50	74.29	7.06	26.15	4.86	1.13	4.67	0.54	3.37	0.68	2.03	0.29	1.81	0.29
	XT063	31.16	65.06	6.29	22.50	4.08	0.90	3.77	0.43	2.74	0.56	1.70	0.24	1.51	0.24
	XT065	26.56	57.80	5.50	19.54	3.55	0.85	3.48	0.40	2.57	0.54	1.62	0.24	1.52	0.25
37/弱氧化带 填隙物	XT040	21.48	42.46	4.06	14.48	2.68	0.70	3.04	0.35	2.25	0.47	1.44	0.22	1.35	0.20
	XT041	32.42	71.14	6.56	22.84	3.93	1.30	4.49	0.43	2.92	0.61	1.83	0.27	1.68	0.27
	XT043	36.05	74.03	7.08	24.44	4.29	0.91	4.28	0.50	3.29	0.68	2.04	0.31	2.05	0.33
	XT045	43.47	92.71	8.84	30.97	5.69	1.13	5.67	0.70	4.72	1.01	3.06	0.46	2.98	0.47
37/过渡带 填隙物	XT037	50.06	98.49	9.59	32.87	5.44	1.01	5.14	0.54	3.19	0.65	1.94	0.28	1.88	0.30
	XT039	18.10	28.16	3.33	12.01	2.10	0.50	1.97	0.21	1.40	0.29	0.92	0.13	0.88	0.14
	XT054	31.05	60.60	5.76	20.79	3.63	0.92	4.27	0.44	3.05	0.65	1.99	0.30	1.89	0.30
	XT058	27.79	59.05	5.75	20.87	3.83	0.98	3.91	0.47	3.09	0.67	2.15	0.31	1.93	0.32
	XT059	28.70	61.42	5.93	21.07	3.89	0.84	3.88	0.46	3.20	0.69	2.09	0.32	2.00	0.31
	XT061	38.63	79.87	7.85	27.88	5.03	1.08	4.66	0.58	3.86	0.81	2.51	0.38	2.52	0.42
	XT062	30.90	62.94	6.11	21.88	3.89	0.92	3.74	0.38	2.42	0.49	1.50	0.22	1.40	0.23
	XT064	31.93	68.14	6.49	24.30	4.51	0.87	4.19	0.50	3.00	0.61	1.77	0.26	1.70	0.27
	XT066	40.10	85.26	8.59	32.12	5.91	1.11	5.04	0.54	3.22	0.65	2.03	0.31	1.94	0.32
	XT068	41.71	88.43	8.47	30.21	5.63	1.36	4.92	0.58	3.60	0.73	2.21	0.31	2.15	0.33
	XT071	26.13	52.66	5.83	21.54	3.93	0.83	3.56	0.43	2.76	0.56	1.79	0.25	1.71	0.29
37/还原带 填隙物	XT050	33.02	68.60	6.50	24.57	4.69	1.23	4.31	0.49	3.06	0.63	1.87	0.29	1.76	0.30
	XT073	43.79	90.21	9.60	34.21	5.71	1.17	5.15	0.56	3.07	0.60	1.80	0.25	1.71	0.28
	XT053	39.47	75.81	8.16	29.93	5.13	1.10	5.38	0.66	4.03	0.90	2.87	0.43	2.78	0.47
	XT051	25.28	49.04	5.30	19.61	3.56	0.80	3.48	0.41	2.41	0.48	1.43	0.21	1.35	0.23
	XT082	39.32	78.41	8.61	31.95	6.00	1.41	6.39	0.82	5.28	1.10	3.31	0.49	3.01	0.50

表3 伊犁盆地层间氧化带砂岩及其填隙物稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )统计表Table 3 REE contents ( $\times 10^{-6}$ ) of sandstone and interstitial material of interlayer oxidation zone in the Ili basin

岩性	线号	分带	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE	MREE	HREE	LREE HREE
砂岩	381	氧化带	44.31	83.08	8.92	35.07	6.70	0.79	5.25	0.65	3.92	0.78	2.23	0.32	2.00	0.30	194.32	171.37	13.39	9.56	17.93
		弱氧化带	42.00	81.15	8.24	33.78	6.30	0.73	4.74	0.59	3.50	0.69	1.92	0.28	1.74	0.26	185.92	165.17	12.36	8.39	19.69
		过渡带	41.11	80.60	8.32	32.73	6.23	0.85	4.90	0.63	3.82	0.77	2.22	0.32	1.96	0.29	184.77	162.77	12.62	9.38	17.35
		还原带	45.10	84.70	9.34	37.60	6.53	0.86	5.45	0.71	4.15	0.82	2.34	0.33	2.07	0.31	200.29	176.73	13.54	10.02	17.64
	365	氧化带	43.13	83.32	9.13	35.80	6.93	0.86	5.49	0.64	3.81	0.75	2.06	0.30	1.83	0.26	194.31	171.37	13.91	9.02	19.00
		弱氧化带	42.05	84.59	9.51	36.84	6.97	1.04	6.07	0.71	4.67	0.96	2.76	0.41	2.57	0.39	199.54	172.99	14.78	11.76	14.71
		过渡带	42.19	84.02	9.29	35.76	6.87	0.93	5.67	0.66	4.10	0.82	2.29	0.33	2.08	0.30	195.31	171.26	14.13	9.92	17.27
		还原带	39.03	78.22	8.75	32.69	6.26	0.90	5.22	0.64	4.07	0.84	2.36	0.34	2.14	0.33	181.77	158.69	13.02	10.07	15.75
填隙物	381	氧化带	27.28	61.46	6.33	23.73	4.52	1.00	4.40	0.58	3.95	0.87	2.58	0.40	2.65	0.42	140.17	118.80	10.50	10.87	10.93
		弱氧化带	24.06	50.50	5.28	20.10	3.91	0.94	3.78	0.52	3.55	0.78	2.35	0.35	2.24	0.35	118.71	99.95	9.14	9.62	10.39
		过渡带	24.91	49.91	5.30	20.20	3.88	0.90	3.78	0.50	3.51	0.79	2.34	0.35	2.28	0.35	119.01	100.32	9.06	9.62	10.42
		还原带	31.89	64.58	6.73	25.98	4.91	1.09	4.74	0.62	4.21	0.90	2.75	0.43	2.92	0.44	152.20	129.17	11.36	11.67	11.07
	365	氧化带	30.98	64.43	6.46	24.53	4.68	1.03	4.56	0.62	4.36	0.96	2.86	0.43	2.83	0.43	149.18	126.40	10.90	11.88	10.64
		弱氧化带	34.81	72.09	7.18	27.40	5.23	1.11	5.20	0.70	4.83	1.06	3.14	0.48	3.16	0.49	166.86	141.47	12.23	13.16	10.75
		过渡带	33.42	67.56	6.95	26.51	5.10	1.12	4.95	0.67	4.57	1.00	2.98	0.46	2.96	0.45	158.71	134.44	11.85	12.42	10.82
		还原带	30.30	61.28	6.33	24.16	4.57	1.04	4.45	0.58	4.02	0.87	2.60	0.39	2.51	0.39	143.49	122.08	10.64	10.78	11.33
砂岩	氧化带	43.84	83.18	9.00	35.36	6.79	0.82	5.34	0.65	3.88	0.77	2.16	0.31	1.93	0.28	194.32	171.37	13.60	9.34	18.35	
	弱氧化带	42.03	82.87	8.87	35.31	6.63	0.88	5.41	0.65	4.08	0.83	2.34	0.34	2.16	0.33	192.73	169.08	13.57	10.08	16.78	
	过渡带	41.87	83.02	9.00	34.87	6.69	0.91	5.44	0.65	4.02	0.81	2.27	0.33	2.04	0.30	192.21	168.76	13.69	9.76	17.29	
	还原带	40.04	79.30	8.85	33.50	6.30	0.89	5.25	0.65	4.08	0.83	2.36	0.34	2.13	0.32	184.86	161.69	13.10	10.06	16.07	
填隙物	氧化带	28.67	62.57	6.38	24.03	4.58	1.01	4.46	0.60	4.10	0.90	2.69	0.41	2.72	0.42	143.55	121.65	10.65	11.25	10.82	
	弱氧化带	27.13	56.67	5.82	22.19	4.28	0.99	4.19	0.57	3.92	0.86	2.58	0.38	2.50	0.39	132.46	111.81	10.02	10.63	10.52	
	过渡带	30.91	62.37	6.47	24.65	4.74	1.05	4.61	0.62	4.26	0.93	2.79	0.43	2.76	0.42	147.03	124.40	11.03	11.60	10.73	
	还原带	30.57	61.83	6.40	24.46	4.62	1.05	4.49	0.59	4.05	0.88	2.62	0.40	2.58	0.40	144.94	123.26	10.76	10.92	11.28	
北美页岩 <sup>①</sup>		32.00	73.00	7.90	33.00	5.70	1.24	5.20	0.85	5.80	1.04	3.40	0.50	3.10	0.48	173.21	145.90	12.99	14.32	10.19	
砂岩相对于填隙物中REE的增减量	氧化带	15.17	20.60	2.62	11.33	2.21	-0.19	0.88	0.05	-0.23	-0.13	-0.52	-0.10	-0.79	-0.14	50.77	49.72	2.95	-1.91	7.53	
	弱氧化带	14.89	26.20	3.05	13.13	2.35	-0.11	1.22	0.08	0.16	-0.03	-0.24	-0.04	-0.35	-0.06	60.26	57.27	3.55	-0.55	6.26	
	过渡带	10.96	20.65	2.54	10.22	1.94	-0.15	0.84	0.03	-0.24	-0.13	-0.52	-0.10	-0.72	-0.13	45.18	44.36	2.66	-1.84	6.57	
	还原带	9.47	17.47	2.45	9.04	1.68	-0.16	0.76	0.06	0.03	-0.04	-0.27	-0.06	-0.45	-0.08	39.92	38.43	2.34	-0.86	4.78	

注:① 北美页岩 REE 含量据 Gramet, 1984。

表4 吐哈盆地氧化带砂岩及其填隙物稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )统计表Table 4 REE contents ( $\times 10^{-6}$ ) of sandstone and interstitial material of interlayer oxidation zone in the Turpan—Hami basin

岩性	线号	分带	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE	MREE	HREE	LREE/HREE
砂岩	39	氧化带	42.67	85.12	8.76	32.74	6.07	0.83	4.47	0.53	3.26	0.63	1.78	0.25	1.62	0.24	188.97	169.29	11.91	7.77	21.78
		过渡带	40.43	81.23	8.24	30.56	5.68	0.77	4.19	0.50	3.08	0.59	1.68	0.24	1.55	0.24	178.97	160.46	11.14	7.38	21.74
	37	氧化带	40.11	82.27	8.17	30.99	5.82	0.74	4.44	0.55	3.40	0.69	1.93	0.28	1.74	0.27	181.40	161.54	11.55	8.32	19.42
		弱氧化带 过渡带 还原带	38.92 36.67 37.69	81.80 72.64 74.24	8.04 7.85 7.99	29.47 29.18 30.79	5.63 5.35 5.84	0.74 0.72 0.81	4.24 4.14 4.59	0.53 0.52 0.60	3.30 3.09 3.59	0.68 0.63 0.75	1.97 1.74 2.05	0.30 0.26 0.30	1.81 1.62 1.88	0.29 0.24 0.27	177.71 164.65 171.41	158.23 146.35 150.72	11.13 10.72 11.85	8.35 7.58 8.85	18.96 19.31 17.04
填隙物	39	氧化带	34.32	67.37	7.11	25.78	4.54	1.02	4.30	0.52	3.26	0.69	1.98	0.30	1.93	0.29	153.42	134.59	10.37	8.46	15.91
		过渡带	31.97	64.11	6.49	22.83	3.98	0.92	3.83	0.44	2.81	0.59	1.78	0.27	1.77	0.28	142.07	125.40	9.17	7.49	16.74
	37	氧化带	32.75	67.75	6.60	23.58	4.23	0.98	4.06	0.46	2.99	0.61	1.82	0.27	1.70	0.27	148.07	130.69	9.73	7.66	17.07
		弱氧化带 过渡带 还原带	33.35 33.19 36.18	70.08 67.73 72.41	6.64 6.70 7.63	23.18 24.14 28.05	4.15 4.34 5.02	1.01 0.95 1.14	4.37 4.12 4.94	0.50 0.47 0.59	3.29 2.98 3.57	0.69 0.62 0.74	2.09 1.90 2.26	0.31 0.28 0.33	2.02 1.82 2.12	0.32 0.29 0.36	152.00 149.52 165.34	133.25 131.76 144.27	10.02 9.87 11.69	8.72 7.89 9.37	15.28 16.70 15.39
砂岩		氧化带	41.39	83.70	8.46	31.86	5.95	0.79	4.45	0.54	3.33	0.66	1.86	0.27	1.68	0.25	185.19	165.41	11.73	8.04	20.56
		弱氧化带	38.92	81.80	8.04	29.47	5.63	0.74	4.24	0.53	3.30	0.68	1.97	0.30	1.81	0.29	177.71	158.23	11.13	8.35	18.96
		过渡带	38.55	76.94	8.05	29.87	5.52	0.74	4.16	0.51	3.08	0.61	1.71	0.25	1.59	0.24	171.81	153.40	10.93	7.48	20.51
		还原带	37.69	74.24	7.99	30.79	5.84	0.81	4.59	0.60	3.59	0.75	2.05	0.30	1.88	0.27	171.41	150.72	11.85	8.85	17.04
填隙物		氧化带	33.54	67.56	6.86	24.68	4.38	1.00	4.18	0.49	3.12	0.65	1.90	0.28	1.82	0.28	150.74	132.64	10.05	8.06	16.46
		弱氧化带	33.35	70.08	6.64	23.18	4.15	1.01	4.37	0.50	3.29	0.69	2.09	0.31	2.02	0.32	152.00	133.25	10.02	8.72	15.28
		过渡带	32.58	65.92	6.60	23.49	4.16	0.93	3.97	0.46	2.90	0.61	1.84	0.27	1.79	0.28	145.79	128.58	9.52	7.69	16.72
		还原带	36.18	72.41	7.63	28.05	5.02	1.14	4.94	0.59	3.57	0.74	2.26	0.33	2.12	0.36	165.34	144.27	11.69	9.37	15.39
北美页岩 <sup>①</sup>		32	73	7.9	33	5.7	1.24	5.2	0.85	5.8	1.04	3.4	0.5	3.1	0.48	173.21	145.90	12.99	14.32	10.19	
砂岩相对 于填隙物 中REE的 增减量		氧化带	7.85	16.14	1.6	7.18	1.57	-0.21	0.27	0.05	0.21	0.01	-0.04	-0.01	-0.14	-0.03	34.45	32.77	1.68	-0.02	4.12
		弱氧化带	5.57	11.72	1.4	6.29	1.48	-0.27	-0.13	0.03	0.01	-0.01	-0.12	-0.01	-0.21	-0.03	25.71	14.98	1.11	-0.47	3.68
		过渡带	5.97	11.02	1.45	6.38	1.36	-0.19	0.19	0.05	0.18	0	-0.13	-0.02	-0.2	-0.04	26.02	4.82	1.41	-0.21	3.80
		还原带	1.51	1.83	0.36	2.74	0.82	-0.33	-0.35	0.01	0.02	0.01	-0.21	-0.03	-0.24	-0.09	6.07	6.45	0.06	-0.52	1.65

注:① 北美页岩REE含量据 Gramet, 1984。



含量增、减量均大于吐哈盆地(表 3,4),研究表明粘土矿物对稀土元素,尤其是 LREE 有明显的吸附作用,而且 pH 值增大,吸附率增加,当  $\text{pH} > 6.4$  时,稀土元素容易产生水解而共沉淀作用(Base et al., 1981;涂光炽,1998)。由此可见吐哈盆地的流体碱性大于伊犁盆地,砂岩的水解作用和后期改造作用强于伊犁盆地,才使稀土元素含量在细碎屑为主的填隙物中升高,稀土元素在粗碎屑与细碎屑中分配差异缩小,砂岩和填隙物稀土元素之间含量差异小于伊犁盆地。

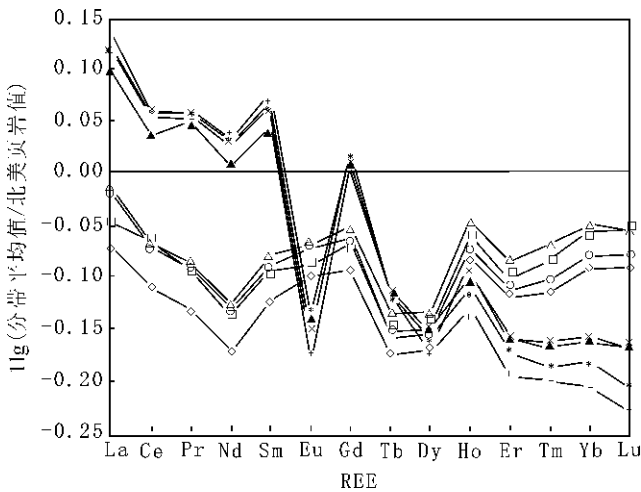


图 1 伊犁 513 铀矿床含矿砂岩分带 REE 配分图  
(北美页岩标准化)

Fig. 1 REE distribution patterns of ore-bearing sandstone of different oxidation zone in the 513 uranium deposit, the Ili basin (North American shale-normalized REE patterns)

X. K. 卡里莫夫等(1992)对乌兹别克斯坦巨型层间氧化带砂岩型铀矿—乌其库杜克矿床地下水中 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、Lu 的研究表明,当含黄铁矿(或含煤)的低碳酸盐岩石经受层间氧化时,其富集程度可以达到未蚀变灰色岩石的 1.5~15 倍,在二硫化铁和炭质物的氧化区内,轻稀土元素、Eu 和 Y 具有相对较大的迁移特性,这些稀土元素在层间氧化带的过渡带(铀矿带的后部)发生了显著的富集,在一些矿化地段的富集达到了可综合利用的程度。本文研究中的伊犁盆地和吐哈盆地砂岩铀矿床的稀土元素虽然有一定的迁移变化,但没有中亚自流盆地产出的砂岩铀矿床出现的 REE 明显迁移和高度富集现象。这可能是由于:①吐哈盆地和伊犁盆地为山间断陷盆地,规模远小于中亚大型地台凹陷盆地,同时构造活动强于后者,水—岩作用的时间

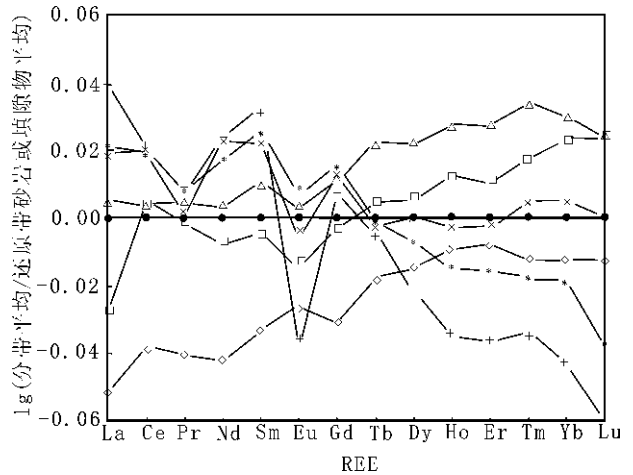


图 2 伊犁 513 铀矿床含矿砂岩分带 REE 配分对比图  
(还原带砂岩标准化)

Fig. 2 The contrast of REE distribution patterns of ore-bearing sandstone of different oxidation zone in the 513 uranium deposit, the Ili basin (sandstone-normalized REE patterns of deoxidization zone)

和稳定性远差于后者,

水—岩作用的强度和层间流体汲取的稀土元素量肯定远不及中亚;这也可从层间氧化带的发育规模得到验证,吐哈盆地和伊犁盆地层间氧化带宽度一般几千米到数十千米,而中亚自流盆地中区域层间氧化带宽度几十到三百多千米,由此可见二者之间的巨大差异,这种根本性差异无疑对矿床各种地球学作用、成矿作用有决定性的影响。②蚀源区原岩地球化学专属性、地表地形、风化作用程度等影响导致吐哈盆地和伊犁盆地含矿层成矿流体(地下水)REE 含量本底很低。

在层间氧化作用中稀土元素地球化学行为与表生风化过程相似,主要表现为重稀土(HREE)较轻稀土(LREE)在氧化环境下易在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物,优先被溶解迁移,而 LREE 则被粘土优先吸附(涂光炽,1998),使轻、重稀土发生分异,轻稀土相对富集,重稀土亏损(黄成敏,2002);对于有时也会出现一些不完全服从以上规律的现象,其原因在于在风化作用过程中,REE 可能被活化出来,但是它们又在风化壳中再沉淀下来(Nesbitt, 1984);表生化学风化作用中溶出过程中配位反应与水解反应同时出现,溶出和在风化壳中保存可同时进行(陈志澄等,1994)。

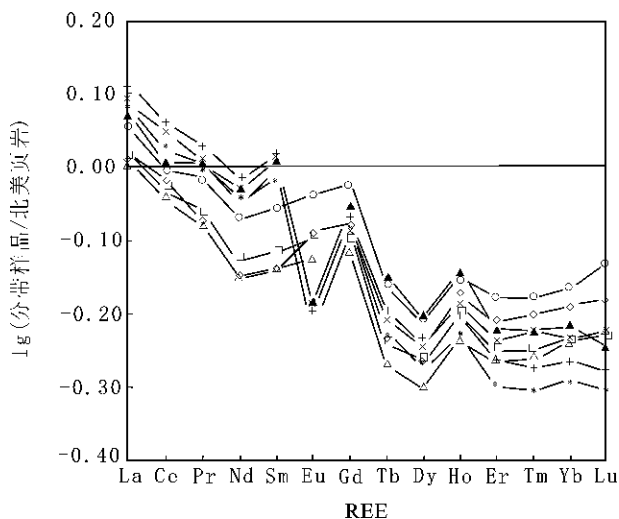


图3 吐哈盆地十红滩铀矿床含矿砂岩分带 REE 配分图 (北美页岩标准化)

Fig. 3 REE distribution patterns of ore-bearing sandstone of different oxidation zone in the Shihongtan uranium deposit in the Turpan—Hami basin (North American shale-normalized REE patterns)

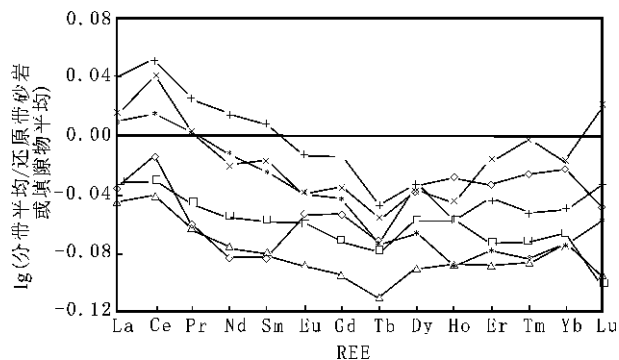


图4 吐哈盆地十红滩铀矿床含矿砂岩分带 REE 配分对比图 (还原带砂岩标准化)

Fig. 4 The contrast of REE distribution patterns of ore-bearing sandstone of different oxidation zone in the Shihongtan uranium deposit in the Turpan—Hami basin (sandstone-normalized REE patterns of deoxidation zone)

#### 4 $\delta\text{Eu}$ 和 $\delta\text{Ce}$ 对指示层间氧化带地球化学环境的特殊意义

Ce、Eu 是变价元素,可随环境的氧化还原条件不同呈现不同的价态(涂光炽,1998),导致 Ce、Eu 在不同的地球化学环境中产生分馏,从而形成 Ce、Eu 的异常(马英军,2004;宋云华等,1986,1987)。所以  $\delta\text{Ce}_0$  和  $\delta\text{Eu}_0$  值的变化对其所经历的地球化学

环境的氧化还原电位具有地球化学指示意义(刘英俊等,1987)。研究表明,在氧逸度较高的条件下(如地表风化过程),Ce 被氧化成  $\text{Ce}^{4+}$ , $\text{Ce}^{4+}$  溶解度很小,易被粘土矿物等吸附脱离溶液体系,使整个溶液体系亏损 Ce,从而导致从溶液中沉淀出来的矿物显示富 Ce 异常(黄成敏等,2002);在还原条件下,Eu 易形成可溶的  $\text{Eu}^{2+}$  (Braun, et al,1990,1993;Price et al,1991)。

选用北美页岩成分 NASC 作标准化计算  $\delta\text{Eu}_0$  和  $\delta\text{Ce}_0$ ,其计算公式按照赵志根等(1998)建议公式计算,即:

$$\delta\text{Ce}_0 = \text{Ce}_0^2 / (\text{La}_0 \times \text{Nd}_0) \quad (1)$$

$$\delta\text{Eu}_0 = \text{Eu}_0^2 / (\text{Sm}_0 \times \text{Tb}_0) \quad (2)$$

吐哈、伊犁盆地层间氧化带砂岩的  $\delta\text{Eu}_0$  和  $\delta\text{Ce}_0$  计算结果列于表 5。

从表 5 可以看出, $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  在层间氧化带砂岩 5 吐哈、伊犁盆地层间氧化带砂岩及其填隙物 Ce、Eu 异常计算结果表

Table 5 The Ce, Eu anomaly of sandstone and interstitial material of interlayer oxidation zone in the Ili basin and Turpan—Hami basin

岩性	分带	伊犁盆地		吐哈盆地			
		线号	$\delta\text{Ce}_0$	$\delta\text{Eu}_0$	线号	$\delta\text{Ce}_0$	$\delta\text{Eu}_0$
砂岩	氧化带	381	1.16	0.97	39	1.12	1.40
	弱氧化带		1.04	1.15		1.02	1.50
	过渡带		0.98	1.06		1.02	1.40
	还原带		1.00	0.99		1.02	1.40
	氧化带	365	1.08	0.86	37	1.18	1.54
	弱氧化带		1.02	0.87		1.16	1.56
填隙物	过渡带	381	0.98	0.34	39	1.06	0.60
	弱氧化带		0.92	0.34		1.03	0.66
	过渡带		0.96	0.46		1.03	0.66
	还原带		0.84	0.40		1.03	0.66
	氧化带	365	0.99	0.37	37	1.18	0.54
	弱氧化带		0.92	0.49		1.12	0.58
砂岩	过渡带		0.93	0.43		0.98	0.58
	还原带		0.95	0.48		0.94	0.59
	氧化带		1.13	0.95		1.13	1.46
	弱氧化带		1.06	1.05		1.02	1.56
填隙物	过渡带		1.01	0.98		1.01	1.55
	还原带		1.01	1.02		1.02	1.40
	氧化带		0.95	0.36		1.15	0.58
	弱氧化带		0.92	0.42		1.11	0.56
填隙物	过渡带		0.94	0.44		1.02	0.62
	还原带		0.93	0.46		0.94	0.59

注: $\delta\text{Ce}_0$  和  $\delta\text{Eu}_0$  分别为 Ce 和 Eu 北美页岩标准化后的异常值。  
 $\delta\text{Ce}_0 = \text{Ce}_0^2 / (\text{La}_0 \times \text{Nd}_0)$ ;  $\delta\text{Eu}_0 = \text{Eu}_0^2 / (\text{Sm}_0 \times \text{Tb}_0)$ 。

岩中的变化范围均很小,吐哈和伊犁盆地砂岩的  $\delta Ce$  为 1.01~1.13;伊犁盆地砂岩的  $\delta Eu$  为 0.95~1.05,吐哈盆地砂岩的  $\delta Eu$  为 1.40~1.56。两个盆地的  $\delta Eu$  表现出各自变化小,但吐哈盆地  $\delta Eu$  值及其变化幅度大于伊犁盆地的特点。由于 Eu 在偏碱性条件下多呈易溶的  $Eu^{2+}$  存在,这也证明吐哈盆地的流体 pH 值大于伊犁盆地,含矿砂岩的氧化蚀变作用也强于后者。

$\delta Eu$  和  $\delta Ce$  在成矿层间氧化分带中的规律性变化较为明显: $\delta Ce$  由氧化带到过渡带随氧化作用的减弱逐渐趋于降低(图 5),在氧化带中普遍最高;而  $\delta Eu$  值随氧化作用的减弱趋于增加,在过渡带砂岩中最高,这两个参数的表现刚好相反。与表生风化作用中 Ce、Eu 变化规律相同(宋云华等,1986,1987;黄成敏等,2002;马英军,2004),其原因主要为氧化环境中斜长石(REE 的重要寄主矿物)水解, $Ce^{3+}$  氧化、形成方钨石  $[(Ce^{4+}, Th)O_2]$  沉淀,使氧化带相对富 Ce;Eu 虽然可随还原性增强可还原成  $Eu^{2+}$ ,但过渡带偏酸性,使  $Eu^{2+}$  在过渡带不能溶于水,而被粘土矿物吸附发生沉淀,使过渡带中岩石 Eu 相对富集。

$\delta Eu$  和  $\delta Ce$  在成矿层间氧化分带中的规律性变化较好地指示了层间氧化带中氧化—还原环境和酸碱度的变化,意味着在成矿层间氧化带中流体作用具有相对的稳定性和持续性,由于铀的沉淀亦受氧化还原条件的制约,因此  $\delta Eu$  和  $\delta Ce$  的变化规律亦揭示了层间氧化带中地球化学环境与铀矿化的内在联系。

## 5 结论

通过伊犁、吐哈盆地成矿层间氧化带稀土元素分布特征和稀土元素在层间氧化作用中的变化规律研究,可以得出如下初步结论:

(1)在层间氧化作用过程中,稀土元素在总体亏

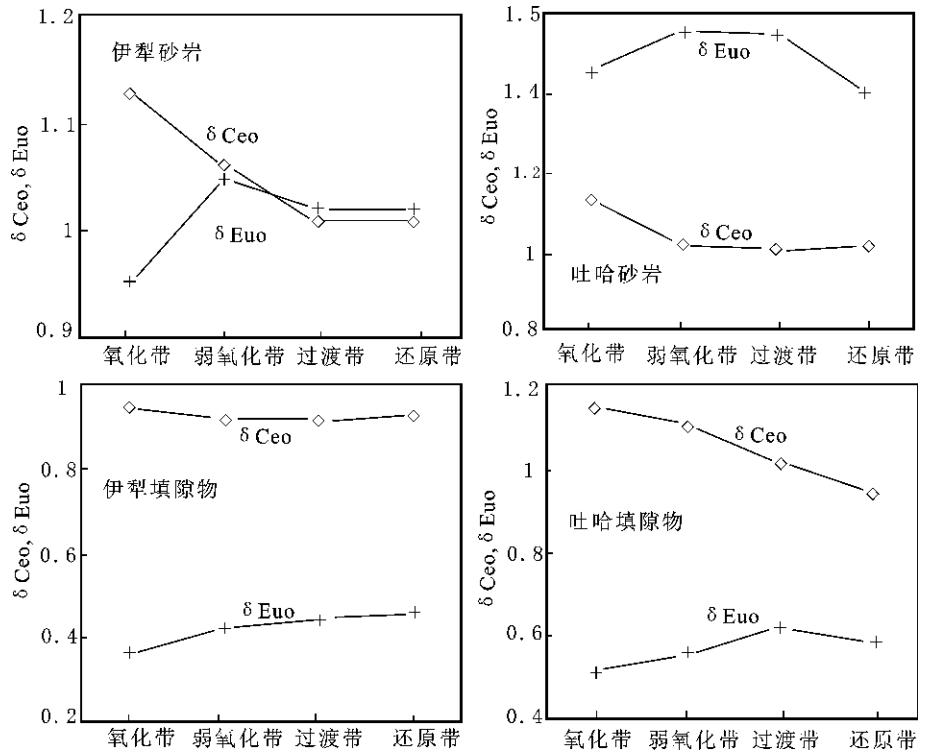


图 5 吐哈、伊犁盆地不同分带砂岩及其填隙物  $\delta Ce$  和  $\delta Eu$  对比图

Fig. 5 The contrast of  $\delta Ce$  and  $\delta Eu$  of sandstone and interstitial material in the Ili basin and Turpan—Hami basin

损的背景上发生了明显的分异,LREE 从氧化带到过渡带含量逐步降低,HREE 由氧化带到过渡带趋于富集,但没有中亚自流盆地产出的砂岩铀矿床出现的 REE 明显迁移和高度富集现象。

(2)砂岩与其填隙物相比,砂岩的 LREE 富集更明显,而填隙物的 MREE 和 HREE 相对富集,说明 LREE、MREE 和 HREE 在粗碎屑和细碎屑中的含量和在层间氧化作用中的变化不同,其地球化学性状不同。

(3)吐哈盆地的流体碱性大于伊犁盆地,砂岩的水解作用和后期改造作用强于伊犁盆地。

(4) $\delta Ce$  由氧化带到过渡带随氧化作用的减弱逐渐趋于降低,在氧化带中普遍最高;而  $\delta Eu$  值随氧化作用的减弱趋于增加,在过渡带砂岩中最高, $\delta Eu$  和  $\delta Ce$  在成矿层间氧化分带中的规律性变化可以较好地指示层间氧化带中氧化—还原环境的变化。

## 注 释

① 汪云亮,张成江,刘峰,等.2005.微量元素地球化学—元素丰度关系原理.成都理工大学研究生教材.

## 参 考 文 献 / References

- 毕献武,胡瑞忠. 1998. 袁牢山金矿带成矿流体稀土元素地球化学. 地质论评, 44(3): 264~269.
- 陈志澄, 陈达惠, 余受望等. 试论有机质在华南花岗岩风化壳 REE 溶出、迁移和富集中的作用. 地球化学, 1994, 23(2): 168~178.
- 黄成敏, 王成善. 风化成土过程中稀土元素地球化学特征. 稀土, 23(5), 2002, 46~49.
- 刘小微, 程克明. 1995. 微量元素在煤成烃研究中的应用. 石油勘探与开发, 22(5): 40~44.
- 鲁洪波, 姜在兴. 1999. 稀土元素地球化学分析在岩相古地理研究中的应用. 石油大学学报(自然科学版), 23(1): 6~8.
- 刘峰, 张成江, 汪云亮. 2004. 迁移位——一个新的地球化学概念. 矿物岩石, 24(1): 56~58.
- 马英军, 霍润科, 徐志方等. 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 19(1): 87~94.
- 倪师军, 曹志敏, 张成江, 唐建武, 滕彦国. 1998. 成矿流体活动信息的三个示踪标志研究. 地球学报, 19(2): 166~169.
- 倪师军, 滕彦国, 张成江, 吴香尧. 1999. 成矿流体活动的地球化学示踪研究综述. 地球科学进展, 14(4): 346~352.
- 邵磊, 刘志伟, 朱伟林. 2000. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中的应用. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 7(3): 297~304.
- 滕彦国, 倪师军, 张成江, 曹志敏, 罗梅. 1999. 阿西金矿床流体成矿的

- 地球化学示踪研究. 贵金属地质, 8(2): 104~109.
- 涂光炽等. 1998. 低温地球化学. 北京: 科学出版社, 93~106.
- 王中良, 刘丛强, 徐志方等. 2000. 河流稀土元素地球化学研究进展. 地球科学进展, 15(5): 553~558.
- 王果, 华仁民, 秦立峰. 2000. 乌库尔其地区层间轴成矿过程中的流体作用研究. 矿床地质, 19(4): 340~349.
- 杨守业, 李从先. 1999. REE 示踪沉积物物源研究进展. 地球科学进展, 14(2): 164~167.
- 袁明生, 李华明, 苏传国. 2000. 突破鲁克沁构造带流体包裹体特征与油气运聚. 新疆石油地质, 21(4): 266~270.
- 赵志根, 高良敏. 1998.  $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$  计算方法的标准化问题. 标准化报道, 19(5): 23~25.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Progradation of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48: 1523~1534.
- Braun J J, Pagel M, Herbilon A, et al. 1993. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateitic profile; A mass-balance study. Geochim. Cosmochim. Acta, 57: 4419~4434.
- Price R C, Gray C M, Wilson R E, et al. 1991. The effect of weathering on rare earth element, Y and Ba abundances in Tertiary basalts from southeastern Australia. Chem. Geol., 93: 245~265.

## A Preliminary Study on REE Transformation Regularities of the Interlayer Oxidation Zone in Sandstone-type Uranium Deposit: In Case of the Ili and Turpan—Hami Basins

CHEN Youliang<sup>1,2)</sup>, ZHU Xiyang<sup>1,2)</sup>, ZHANG Chengjiang<sup>1)</sup>, CHEN Yuehui<sup>3)</sup>,  
PENG Xinjian<sup>3)</sup>, WANG Jinping<sup>4)</sup>

1) Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) No. 280 Research Institute of Nuclear Industry, Guanghan, Sichuan, 618300;

3) Bureau of Geology of Nuclear Industry, Beijing, 100013;

4) No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang, Shaanxi, 712000

### Abstract

This paper is based on the case of the interlayer oxidation zone sandstone uranium deposits in the Ili basin and Turpan—Hami basin, the author particularly study REE distributing characteristics and its transformation characteristics of ore-bearing interlayer oxidation zone. By the contrast of North American shale and original sandstone of deoxidization zone, research the REE transformation circumstances of different oxidation zone. It is indicated that at the process of interlayer oxidation the rare earth elements differentiate obviously with collectivity to the bed, LREE reduce at step from oxidized zone to transitional zone, the content of HREE rise at step from oxidized zone to transitional zone,  $\delta\text{Ce}$  reduce from oxidized zone to transitional zone as the weakness of oxidation and  $\delta\text{Eu}$  rise at the same time which present the same Transformation regularity as hypergene weathering, and all of these well indicate the change of oxidation and reducing environment. Although the REE occurs some transformation regularities, but the phenomena of notable transformation and high enrichment of REE in sandstone type uranium deposits in Middle Asia did not occur.

**Key words:** interlayer oxidation zone; sandstone type uranium deposits; the rare earth elements

