

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0282

张亚宁,朱维晃,刘欢,等.2016.水源水库沉积物中稀土元素含量及赋存形态分析——以汤峪水库为例[J].环境科学学报,36(12):4446-4452  
Zhang Y N, Zhu W H, Liu H, et al. 2016. The concentrations and speciations of rare earth elements in the sediment of Tangyu Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(12):4446-4452

## 水源水库沉积物中稀土元素含量及赋存形态分析 ——以汤峪水库为例

张亚宁<sup>1,\*</sup>, 朱维晃<sup>2</sup>, 刘欢<sup>1</sup>, 吴喜军<sup>1</sup>

1. 榆林学院, 建筑工程学院, 榆林 719000

2. 西安建筑科技大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055

收稿日期: 2016-02-17 修回日期: 2016-07-12 录用日期: 2016-07-13

**摘要:** 利用 ICP-MS 和 BCR 连续提取法分别研究了西安蓝田汤峪水库沉积物中稀土元素含量和形态分布特征, 并与中国土壤、渭南黄土和洛川黄土稀土元素含量进行了比较。结果表明: 样品平均值均高于中国土壤和洛川黄土稀土元素含量, 除 La、Ce 外, 其它稀土元素均低于渭南黄土稀土元素含量; 其中, Ce 的含量分别是中国土壤、渭南黄土、洛川黄土的 1.49、1.28 和 1.63 倍。汤峪水库沉积物中稀土元素总量 ( $\sum \text{REE}$ ) 达  $211.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$  为 9.99, 均高于中国土壤、渭南黄土、洛川黄土; Ce 的异常系数值为 1.28, 表明存在 Ce 的富集。由 BCR 连续提取法分析可知, Gd 的酸可提取态 (F1) 比例高于其它形态, Gd 由沉积物中向上覆水体迁移的可能性较强, 产生的潜在环境效应也最明显。物源指示分析表明, 汤峪水库沉积物中的稀土元素物质来源与洛川黄土相似。

**关键词:** 汤峪水库; 稀土元素; 含量; 赋存形态

文章编号: 0253-2468(2016)12-4446-07

中图分类号: X524

文献标识码: A

## The concentrations and speciations of rare earth elements in the sediment of Tangyu Reservoir

ZHANG Yaning<sup>1,\*</sup>, ZHU Weihuang<sup>2</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>, WU Xijun<sup>1</sup>

1. Institute of Architectural Engineering, Yulin University, Yulin 719000

2. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055

Received 17 February 2016;

received in revised form 12 July 2016;

accepted 13 July 2016

**Abstract:** The concentrations and speciation of rare earth elements (REEs) in the sediment of Tangyu Reservoir were studied by using ICP-MS and BCR sequential extraction method, and the results were compared with the REEs reference concentrations (background values of REEs in China soil, Weinan loess and Luochuan loess). The results show that the average concentrations of the REEs in the sediment of Tangyu Reservoir were higher than those of Chinese soil and Luochuan loess, except for La and Ce. The concentration of Ce was obviously higher than the background value, which was 1.49, 1.28 and 1.63 times of concentrations in Chinese soil, Weinan loess and Luochuan loess, respectively. The total REEs concentration ( $\sum \text{REE}$ ) in the sediment of Tangyu Reservoir was  $211.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  And the value of  $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$  was 9.99, both of which were higher than those of Chinese soil, Weinan loess and Luochuan loess respectively. The abnormal coefficient value of Ce was 1.28, which indicates the enrichment of Ce. The analysis results based on BCR sequential extraction method show that the F1 percentage of Gd was higher than other forms, so the possibility of Gd migration from sediment to overlying water was strong and the potential ecological risk was high. Source indication analysis indicates that the sediment source of Tangyu Reservoir was similar to the source of Luochuan loess.

**Keywords:** Tangyu Reservoir; rare earth elements; concentration; speciation

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 41373093); 陕西省自然科学基金 (No.2011JM5004); 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地开放研究基金 (No.2013KFKT-3)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No. 41373093), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2011JM5004) and the Open Fund of State Key Lab Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area (No.2013KFKT-3)

**作者简介:** 张亚宁 (1984—), 女, 讲师, E-mail: zynyl0912@sina.com; \* 通讯作者 (责任作者)

**Biography:** ZHANG Yaning (1984—), female, lecturer, E-mail: zynyl0912@sina.com; \* Corresponding author

## 1 引言( Introduction)

西安市蓝田汤峪水库是 20 世纪 70 年代初国家投资兴建的一个水利灌溉设施,30 多年来,对灌区的农业生产发挥了很大作用.汤峪水库建设之初主要用于水利灌溉,负责汤峪、史家寨、焦岱 3 个乡镇的灌溉,现在也是周边乡镇的饮用水水源,库区水资源还用于发展养鱼、种植、育林、农副产业等.由于库区的空气环境质量较好,上游和附近的居民住宅和工业污染较少,1985 年 5 月初步建成了汤峪湖旅游景区.整个库区的污染主要来源于宾馆、商店、上游居民住宅等排放的污水,以及库区内水上游乐设施造成的微污染.

目前,人们对稀土元素的研究集中在两个方面:矿区土壤的总量分析和物源成因等内容(陈志华等,2015;余小灿等,2014;丁新潮等,2015;张晓娟等,2015),以及蔬菜、农产品等具体部分的含量分析和健康风险评估(李小飞等,2013;金姝兰等,2014),而对水库沉积物中稀土元素的含量、形态分析较少.因此,本文主要研究西安蓝田汤峪水库沉积物中稀土元素含量、参数特征及其形态分布等,这对于了解沉积物中稀土元素的潜在生态风险具有重要的现实意义,也可为以水库为饮用水源的城市给水工程决策实施提供一定的参考价值.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 样品采集及预处理

采样点选在汤峪水库上游、中游、下游,使用彼得森采泥器采集库底下 30 cm 处 10 个新鲜沉积物泥样,采样点具体位置见图 1.沉积物原样分别放于 75~80 °C 烘箱 2 h,并筛除泥样中碎沙、石块等颗粒物,粉碎,过 100 目尼龙筛网,密封保存.

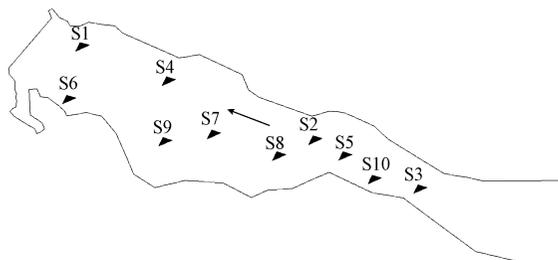


图 1 汤峪水库采样分布图

Fig.1 Locations of sampling sites in Tangyu Reservoir

本文选取有代表性的 4 个采样点(1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>),其位置用经纬度表示分别为 S1 (34.0083° N,

109.2252° E)、S3 (34.0026° N, 109.2316° E)、S7 (34.0050° N, 109.2275° E) 和 S10 (34.0030° N, 109.2307° E),其中,1<sup>#</sup>样点位于水库下游,3<sup>#</sup>样点位于水库上游,7<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>样点位于水库中游.研究的稀土元素分别为 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu,共 14 种,其中,La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd 为轻稀土元素,其余为重稀土元素.

### 2.2 不同环境条件下沉积物的预处理

对采集的 7<sup>#</sup>样点沉积物样品按泥水比 1/4 (V/V) 混匀,室内模拟水库好氧和厌氧两个阶段,即分别采用通入高纯氧气和高纯氮气来调节反应器内的溶解氧浓度,好氧阶段溶解氧浓度为 7~8 mg·L<sup>-1</sup>,在持续 23 d 的好氧阶段后,向反应器通入氮气,此厌氧阶段控制溶解氧浓度小于 0.5 mg·L<sup>-1</sup>,维持 56 d.随后取反应器中适量的沉积物样品,以及其余沉积物采样点原样分别放于 75~80 °C 烘箱 2 h,并筛除泥样中碎沙、石块等颗粒物,粉碎,过 100 目尼龙筛网,密封保存,待测.

### 2.3 稀土元素总量的测定

称取 0.1 g 沉积物样品于消解罐中,依次加入 3 mL 硝酸、1 mL 高氯酸和 1 mL 氢氟酸;然后将样品置于专用消解罐的内衬杯中,放入电热恒温鼓风干燥箱中,在 175 °C 温度下消解 12 h;取出消解罐,待自然降温后,在万能电炉上蒸干剩余酸,移取 1 mL 浓硝酸溶液,摇匀后倒入 15 mL 离心管中,待测.

### 2.4 沉积物中不同赋存形态稀土元素含量的测定

采用欧共体标准物质-欧共体标准物质局(BCR)推荐的 3 步提取法(王禄仕等,2010),将沉积物的重金属不同赋存形态分为酸可提取态(F1)、铁锰氧化物结合态(F2)、有机物和硫化物结合态(F3)、残渣态(R)含量为重金属总量与上述 3 种形态含量之和的差值.它们的潜在环境危害性不同,酸可提取态向上覆水体的迁移能力最强,残渣态的环境效应最弱,可以稳定地存在于沉积物中;并且当沉积物-水界面间所在的环境条件(例如氧化还原条件)发生改变时,重金属的形态也会发生改变,迁移性强的重金属形态向上覆水体中迁移的可能性比较大,从而导致了水库的“二次污染”.

### 2.5 样品稀土元素含量的测定

样品稀土元素总量及各形态含量均用 ICP-MS (Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型扇形磁场双聚焦高分辨电感耦合等离子体质谱仪)测定(江永红,2015;黄牧等,2014),它是目前用于重金属形态分

析最灵敏可靠的仪器,具有低的检出限和强的抗干扰能力,一次进样可以同时测定几十种元素的含量。

### 3 结果(Results)

#### 3.1 汤峪水库沉积物中稀土元素含量

汤峪水库4个采样点沉积物稀土元素含量见图2。从图中可以明显看出,3<sup>#</sup>采样点的La~Gd 7种稀

土元素含量高于其余3个采样点,1<sup>#</sup>采样点次之。原因可能是上游旅游景区或者居民住宅等排放的污水造成的污染,下游含量高可能是因为底泥中重金属向上覆水体迁移转化最终沉积导致,其中,3<sup>#</sup>采样点Gd元素含量是7<sup>#</sup>采样点的1.23倍,但4个采样点各稀土元素含量相差不大,7<sup>#</sup>采样点14种元素含量较低,故下文以7<sup>#</sup>采样点沉积物作为研究对象。

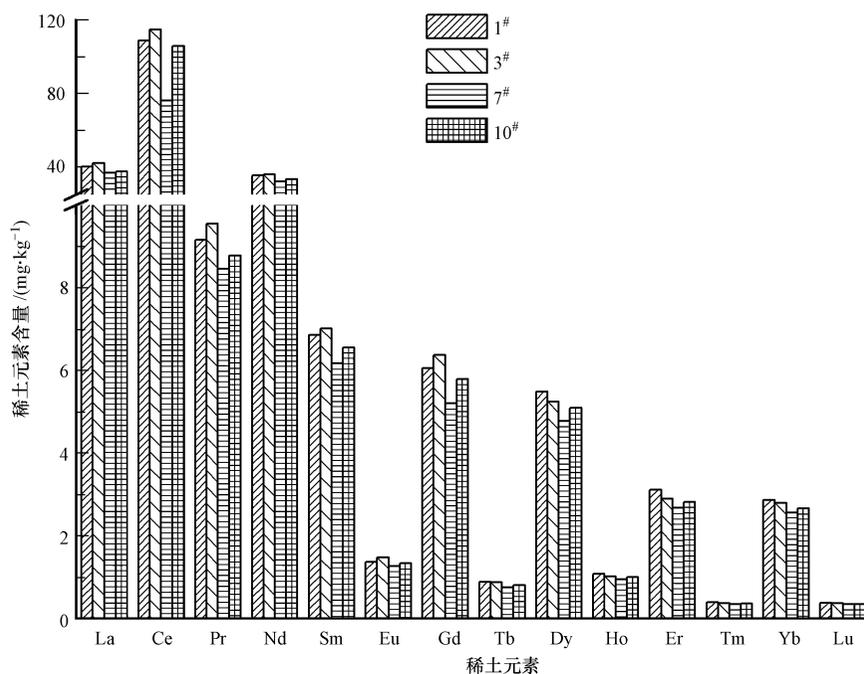


图2 汤峪水库4个采样点沉积物稀土元素含量

Fig.2 The concentrations of rare earth elements in four sediment sampled in Tangyu Reservoir

渭南、洛川、西安蓝田同属于黄土高原地带,因此,本文选取中国土壤(国家环境保护局和中国环境监测总站,1990)、渭南黄土(张晓娟等,2015)、洛川黄土(张玉芬等,2013)与西安蓝田汤峪水库沉积物中稀土元素含量相比较得出:样品平均值均高于中国土壤和洛川黄土;除La、Ce外,其余元素均低于渭南黄土稀土元素含量;其中,Ce的含量远高于参考值,分别为中国土壤、渭南黄土、洛川黄土的1.49、1.28和1.63倍。

#### 3.2 汤峪水库沉积物中稀土元素分布特征

根据元素的地球化学性质的差异性和相似性,把稀土元素分为轻稀土元素和重稀土元素,这样分组对于研究稀土元素在环境中的分布有重要的意义。从表1可以看出,汤峪水库沉积物稀土元素总含量( $\Sigma$ REE)达 $211.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远高于中国土壤、渭南黄土和洛川黄土;并且样品中的轻稀土元素的总量( $\Sigma$ LREE)和重稀土元素的总量( $\Sigma$ HREE)分别

比中国土壤、渭南黄土、洛川黄土的含量高,又因为样品中轻稀土元素含量占总稀土的90.90%,说明沉积物中轻稀土含量( $\Sigma$ LREE)同总稀土含量( $\Sigma$ REE)的变化趋势一致。

表1 稀土元素各特征参数

Table 1 The characteristic parameters of rare earth elements

土壤类型	$\Sigma$ REE/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\Sigma$ LREE/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\Sigma$ HREE/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	Eu/Eu*	Ce/Ce*
样品平均值	211.41	192.17	19.24	9.99	1.03	1.28
中国土壤	163.86	147.92	15.94	9.28	1.243	0.96
渭南黄土	195.52	171.17	24.35	7.03	0.965	1.02
洛川黄土	160.73	143.05	17.68	8.09	0.968	0.87

异常系数Ce/Ce\*和Eu/Eu\*的意义是:当Ce/Ce\*>1时,说明铈的分布为正异常,表明在该沉积物样品中存在铈的富集,含量比相邻元素偏高;当Ce/Ce\*<1时,说明铈为负异常,表明在该样品中存在铈的亏损;Eu/Eu\*的含义与Ce/Ce\*相同。

Ce/Ce\* 和 Eu/Eu\* 的计算方法如下:

$$\text{Eu}/\text{Eu}^* = \frac{(\text{Eu})_N}{\sqrt{(\text{Sm})_N \cdot (\text{Gd})_N}} \quad (1)$$

$$\text{Ce}/\text{Ce}^* = \frac{(\text{Ce})_N}{\sqrt{(\text{La})_N \cdot (\text{Pr})_N}} \quad (2)$$

式中,  $(\text{Eu})_N$ 、 $(\text{Sm})_N$ 、 $(\text{Gd})_N$ 、 $(\text{Ce})_N$ 、 $(\text{La})_N$ 、 $(\text{Pr})_N$  分别为样品实测值除以相应元素的北美页岩组合平均值(陈道公等,2009)。

汤峪水库沉积物中轻稀土含量( $\Sigma \text{LREE}$ )与重稀土含量( $\Sigma \text{HREE}$ )的比值为 9.99,均高于中国土壤、渭南黄土、洛川黄土中特征参数( $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ )的比值,说明其沉积物中轻稀土元素相对富集.这是因为 LREE 比 HREE 形成络合物的能力弱,HREE 更易发生迁移,造成  $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$  比值较大(Marker *et al.*, 1990; Condie *et al.*, 1995; 朱维晃等,2008;2004)。

沉积物中异常系数 Ce/Ce\* 的值为 1.28,高于中国土壤、渭南黄土和洛川黄土的相应值,并且大于 1,则其呈正异常,即西安蓝田汤峪水库沉积物在成泥过程中存在铈的富集,水体中存在铈的亏损,说明此时正处于氧化环境中,Ce<sup>3+</sup>生成 CeO<sub>2</sub>所致(陈炳辉等,2007).Eu/Eu\* 值为 1.03,高于渭南和洛川黄土,低于中国土壤,说明沉积物相对于渭南和洛川黄土两个参考土壤产生相对的 Eu 富集;并且沉积物中 Eu/Eu\* 值接近 1,则其呈无明显异常。

汤峪水库沉积物 4 个采样点、中国土壤、渭南黄土、洛川黄土的样品值与北美页岩丰度值之比见图 3.可以看出,4 个采样点稀土元素配分模式均为轻稀土元素富集;La~Eu 段稀土元素配分曲线斜率较大,说明轻稀土分馏程度高;Gd~Lu 段稀土元素配分曲线较平坦,说明重稀土元素分馏程度低,这个结论与 Ce/Ce\*、Eu/Eu\* 意义也相吻合。

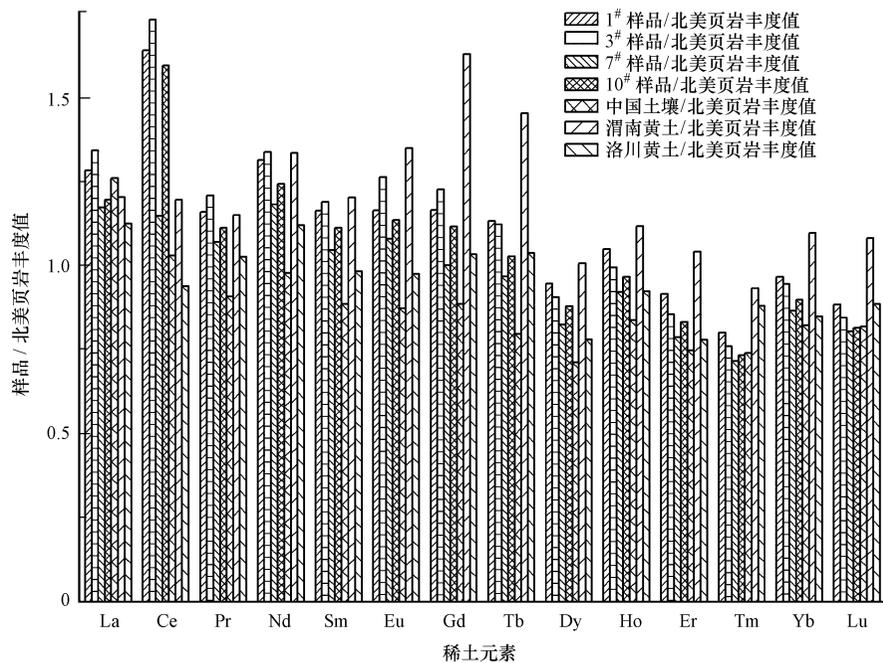


图 3 稀土元素配分模式

Fig.3 Rare earth element distribution patterns

### 3.3 汤峪水库稀土元素形态分布

汤峪水库沉积物 4 个不同采样点稀土元素不同赋存形态特征见图 4.可以看出,4 个采样点沉积物中稀土元素形态分布很相似,从酸可提取态占总量的比值(F1/T)角度分析稀土元素的潜在生态风险,可以看出,Eu 的比值低于检出限,说明 Eu 从沉积物中向上覆水体中迁移能力最弱;而 Gd 的比值最大,说明 Gd 的潜在生态危害性最大.而 Eu 的铁锰氧化

物形态较高,4 个采样点的铁锰氧化物态占总量的比值(F2/T)为 9.78%~13.43%,表明沉积物一直处于还原环境中,加速了其形态向可还原态(F2)迁移转化的趋势,这是因为铁锰氧化物具有巨大的比表面积,对重金属有很强的吸附能力,尤其对 Eu 吸附紧密,使得沉积物中 Eu 的其余赋存形态向铁锰氧化态转化,使其难以移动(朱维晃等,2008).再从残渣态占总量的比值(F3/T)角度分析,可以看出,

La 和 Gd 的比值最小,分别为 67.68%和 71.77%,说明这两种元素向上覆水体迁移的可能性很大.Gd 可能是沉积物中向上覆水体迁移最大的稀土元素,应

引起相关部门的重视.

分析 7<sup>#</sup> 采样点沉积物在好氧、厌氧培养条件下,稀土元素不同赋存形态变化情况,结果见图5.

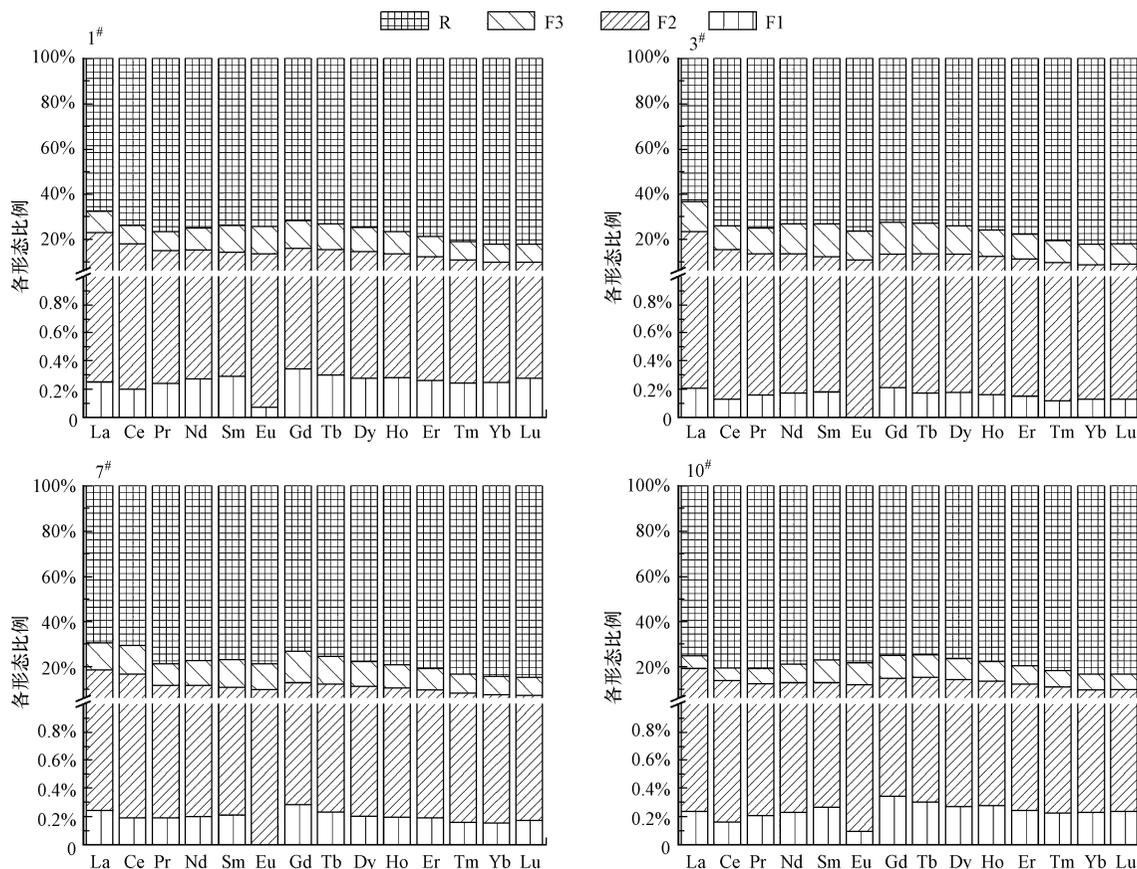


图 4 汤峪水库 4 个采样点沉积物稀土元素不同赋存形态百分比

Fig.4 The different speciation of rare earth elements in four sampling points sediment of Tangyu Reservoir

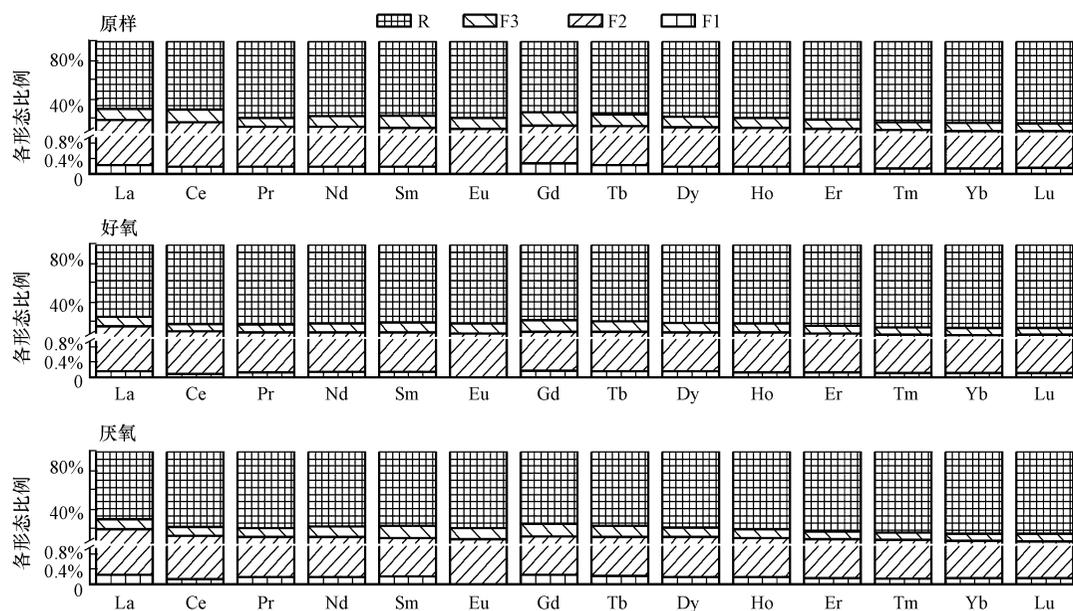


图 5 不同环境条件下沉积物中稀土元素不同赋存形态百分比含量

Fig.5 The different speciation of rare earth elements in sediment of Tangyu Reservoir in different environmental conditions

可以看出,14种稀土元素的酸可提取态、铁锰氧化态、有机物结合态占总量 $[(F1+F2+F3)/T]$ 比值的变化规律一致,经过好氧培养后由原样的15.12%~30.46%降低到13.74%~24.98%,厌氧培养后该比值又有所增加,为14.9%~30.45%,并与原样相差不大。其中,沉积物中Ce的赋存形态受氧化还原作用变化最大,从残渣态所占百分比的角度分析,好氧、厌氧条件下分别增加了11.25%和7.35%,说明Ce在好氧条件下更稳定,不易向上覆水体迁移,在厌氧条件下更易向上覆水体迁移转化,这与其它重金属的变化规律一致(Zhu *et al.*, 2010; 王禄仕等, 2010)。这主要是因为 $Ce^{3+}$ 在好氧环境下反应生成 $CeO_2$ 沉淀物沉淀于沉积物中;酸可提取态是最容易迁移转化的形态,在好氧环境下,F1/T降低了0.08%,也验证了上述结论。

### 3.4 稀土金属物源分析

为了进一步对汤峪水库沉积物进行物源分析,本文引用判别函数DF和物源指数PI进行分析(张晓娟等,2015),与渭南黄土和洛川黄土的稀土元素含量、比值参数进行了对比,计算公式如下:

$$DF = |(C_{i1}/C_{j1})/(C_{i2}/C_{j2}) - 1| \quad (3)$$

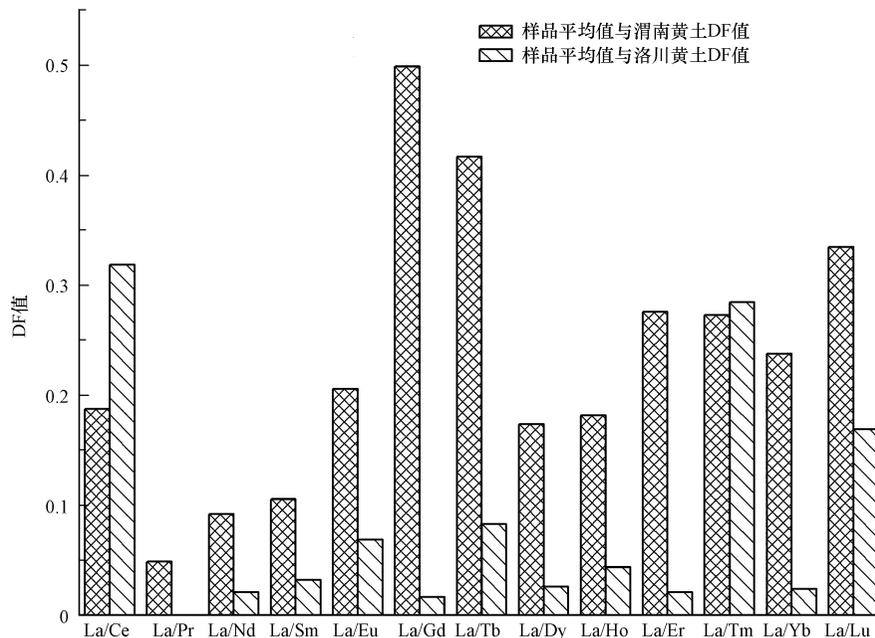


图6 DF值对比柱状图

Fig.6 The DF value contrast histogram

计算物源指数PI时,本文将汤峪水库沉积物作为待判沉积物,将渭南黄土和洛川黄土作为参考对

PI =

$$\frac{\sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i1}|/r(i)}{\sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i1}|/r(i) + \sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i2}|/r(i)} \quad (4)$$

式中, $i$ 和 $j$ 表示不同的元素;1和2表示两种不同的沉积物; $C$ 表示元素含量( $mg \cdot kg^{-1}$ ); $x$ 表示样品沉积物; $C_{i1}$ 、 $C_{i2}$ 分别表示渭南黄土与洛川黄土元素 $i$ 的平均含量( $mg \cdot kg^{-1}$ ); $r(i)$ 表示样品沉积物中元素 $i$ 的含量极差; $n$ 为分析元素个数;DF值小于0.5,说明沉积物的化学性质相似;PI值以0.5为分界,PI值小于0.5,表示样品沉积物与渭南黄土的化学组成相近;反之,与洛川黄土相近。

西安蓝田汤峪水库沉积物与渭南黄土、洛川黄土的DF值对比柱状图见图6。所有样品的DF值均小于0.5,表明汤峪水库沉积物与二者的化学性质较为接近,但汤峪水库沉积物与洛川黄土的DF值明显小于汤峪水库沉积物与渭南黄土的对应值,在一定程度上可以说明汤峪水库沉积物的物质来源与洛川黄土更相似。

象,其 $PI=0.625$ ,大于0.5,说明汤峪水库沉积物与洛川黄土的相似性大于与渭南黄土。

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 西安蓝田汤峪水库沉积物稀土元素表现为上游轻稀土元素含量高于其余 3 个采样点, 其中, 3<sup>#</sup> 采样点 Gd 元素含量是 7<sup>#</sup> 采样点的 1.23 倍。4 个采样点稀土元素含量平均值均高于中国土壤和洛川黄土; 其中, Ce 的含量分别是中国土壤、渭南黄土、洛川黄土的 1.49、1.28 和 1.63 倍。

2) 汤峪水库沉积物稀土元素总含量和特征参数 ( $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$ ) 远高于中国土壤、渭南黄土和洛川黄土; 沉积物中异常系数  $\text{Ce} / \text{Ce}^*$  的值为 1.28, 高于中国土壤、渭南黄土和洛川黄土, 并且大于 1, 说明西安蓝田汤峪水库沉积物在成泥过程中存在铈的富集, 结果同稀土元素配分模式一致。

3) Gd 是汤峪水库沉积物中向上覆水体迁移最大的稀土元素, 应引起相关部门的重视。14 种稀土元素在好氧条件 ( $\text{F1} + \text{F2} + \text{F3}$ ) / T 比值较原样有所下降, 而厌氧条件下有所升高。

4) 根据判别函数 DF 和物源指数 PI 分析得出, 西安汤峪水库沉积物的物质来源与洛川黄土相似。

**责任作者简介:** 张亚宁 (1984—), 女, 讲师, 主要从事给水处理方面的研究。E-mail: zynyl0912@sina.com.

#### 参考文献 (References):

Condie K C, Dengate J, Cullers R L. 1995. Behavior of rare earth elements in a paleo weathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (2): 279-294

陈炳辉, 韦慧晓, 黄志国, 等. 2007. 表生地质体的 Ce 异常及其影响因素综述 [J]. *稀土*, 28 (4): 79-83

陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 2009. 地球化学 (第 2 版) [M]. 合肥: 中国科

学技术大学出版社. 203-211

陈志华, 黄元辉, 唐正, 等. 2015. 南极半岛东北部海域表层沉积物稀土元素特征及物源指示意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 35 (3): 145-155

丁新潮, 曹文, 徐树建, 等. 2015. 山东平阴黄土剖面稀土元素特征及对物源的指示意义 [J]. *干旱区自然与环境*, 29 (9): 188-192

国家环境保护局, 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 418-450

黄牧, 刘季花, 石学法, 等. 2014. 东太平洋 CC 区沉积物稀土元素特征及物源 [J]. *海洋科学进展*, 32 (2): 175-187

江永红. 2015. ICP-MS 法同时测定奶粉中 16 种稀土元素 [J]. *食品研究与开发*, 36 (13): 103-106

金妹兰, 黄益宗, 胡莹, 等. 2014. 江西典型稀土矿区土壤和农作物中稀土元素含量及其健康风险评价 [J]. *环境科学学报*, 34 (12): 3084-3093

李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 2013. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价 [J]. *环境科学学报*, 33 (3): 835-843

Marker A, De Oliveira J J. 1990. The formation of rare earth element scavenger minerals in weathering in weathering products derived from alkaline rocks of Se-bahia, Brasil [J]. *Chem Geol*, 84: 373-374

王禄仕, 张亚宁, 朱维晃. 2010. 汤峪水源水库沉积物中重金属形态分布特征及潜在生态风险评价 [J]. *西安建筑科技大学 (自然科学版)*, 42 (4): 567-572

余小灿, 王春连, 刘成林, 等. 2014. 江陵凹陷古新统沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 33 (5): 1057-1058

Zhu W H, Huang T L, Chai B B, et al. 2010. Influence of the environmental conditions on the fractionation of heavy metals in the Fenhe reservoir sediment [J]. *Geochemical Journal*, 44 (5): 399-410

张晓娟, 鄢道平, 霍志涛, 等. 2015. 武汉第四纪网纹红土的稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. *地球与环境*, 43 (1): 41-48

张玉芬, 李长安, 邵磊, 等. 2013. “巫山黄土”的稀土元素特征与成因 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 38 (1): 181-187

朱维晃, 毕华. 2008. 海南省土壤中稀土元素的生物有效态含量和总量 [J]. *生态环境*, 17 (3): 1244-1249

朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 2004. 海南土壤中稀土元素含量及分布特征 [J]. *地球与环境*, 32 (2): 20-25