

张立锋, 刘杰民, 张翼明. 白云鄂博矿区土壤和植物中稀土元素的分布特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 556 – 564.  
ZHANG Li-feng, LIU Jie-min, ZHANG Yi-ming. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Plants and Soils from the Bayan Obo Mining Area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 556 – 564.

[DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201809200107]

## 白云鄂博矿区土壤和植物中稀土元素的分布特征

张立锋<sup>1,2</sup>, 刘杰民<sup>2</sup>, 张翼明<sup>1</sup>

(1. 包头稀土研究院, 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古 包头 014030;  
2. 北京科技大学化学与生物工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 白云鄂博矿区是稀土的主要产出地, 在矿山开采和选炼等过程中, 稀土元素通过迁移、富集等作用进入植物体, 研究稀土元素的分布特征和迁移规律, 可为白云鄂博矿体闭坑后的生物修复提供数据支持。本文设置了7个土壤采样点, 采集铁花、沙蒿、沙打旺、沙拐、青蒿、小叶杨、猪毛菜七种植物, 用电感耦合等离子体质谱法测定土壤和植物的根、茎、叶及整株的稀土含量, 研究稀土元素在土壤和植物中的分布特征和迁移规律。统计分析结果表明: 随着采样区与主矿区的距离增加, 土壤样品中的稀土含量逐渐减少; 在七种植物中, 铁花的稀土含量最高, 青蒿最低; 对不同植物的整株稀土含量和各部位(根、茎、叶)稀土含量进行多元线性回归分析, 叶(或花)的稀土含量在整株植物中的占比最大。此外在不同季节, 植物中的稀土含量基本保持不变, 含量较高的稀土元素为Ce(0.0035% ~ 0.020%)、La(0.0012% ~ 0.011%)、Nd(0.0010% ~ 0.0094%)和Pr(0.00036% ~ 0.0046%), 其中Ce最高。本研究提出: 根据土壤样品中的稀土含量逐渐减少的特征, 矿区周围土壤的稀土来源可能是矿石在采、选过程中的扩散造成的; 根据植物富集稀土的能力, 在矿山闭坑后, 可种植富集稀土能力强的植物——铁花, 进行矿山生物修复。

**关键词:** 白云鄂博矿; 土壤; 植物; 稀土元素; 铁花; 电感耦合等离子体质谱法; 生物修复  
要点:

- (1) 揭示了矿区外土壤中稀土分布规律及矿区内地植物中稀土分布特征。
- (2) 对比了一年四季矿区内地植物中稀土分布的变化规律。
- (3) 发现了矿区富集稀土能力最强的三种植物, 提出矿山修复建议。

**中图分类号:** X825; O657.63

**文献标识码:** A

白云鄂博矿是一座大型的铁、铌、稀土等多种金属共生矿, 稀土矿和铌矿资源居我国之首, 已逐步形成以矿产资源开采、选炼为主的工业体系<sup>[1]</sup>。随着矿产资源的不断开发利用, 在开采、破碎、运输、废岩排放过程中造成对植被的影响; 稀土选矿、冶炼、分离过程中产生的废渣、废水排往尾矿库造成对土壤、地表植被的影响<sup>[2]</sup>, 迁移到矿区土壤的稀土也越来越多。土壤中的稀土元素可通过植物的富集、吸收进入植物体, 含稀土元素的植物通过食物链进入动物体内<sup>[3]</sup>。已有研究表明, 稀土镧离子可影响仔鼠

的肝脏功能<sup>[4]</sup>, 钇可以增加海马组织胶质细胞凋亡, 破坏血脑屏障完整性, 使线粒体受到氧化损伤<sup>[5]</sup>, 钷致大鼠发生急性肺组织损伤, 早期表现炎性损伤为主, 晚期可形成纤维细胞性结节<sup>[6]</sup>; 动植物中的稀土元素通过生物链作用进入人体, 并在人体内积蓄。一般情况下在短期内接触稀土不会有明显的危害, 但长期暴露或者摄入稀土元素则会产生不良后果<sup>[7]</sup>, 如人体长期低剂量摄入稀土元素, 可导致儿童智商发育不良, 成人肝细胞损伤、神经系统病变等<sup>[8]</sup>。因此, 稀土元素所引发的对生态和人体

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2019-05-28; 接受日期: 2019-07-10

作者简介: 张立锋, 硕士, 高级工程师, 主要从事冶金分析工作。E-mail: 131310212@163.com。

健康影响的问题已不容忽视。

郭伟等<sup>[9]</sup>经过调查发现,稀土对矿区周围的土壤已经造成污染,对当地草原生态系统的健康稳定构成了威胁。白云鄂博矿区尾矿坝也对周围的土壤造成了污染<sup>[10]</sup>,因此分析矿区附近土壤和植物中的稀土含量、变化规律以及它们之间的相关性<sup>[11]</sup>,可为研究稀土元素对动植物的影响提供数据支撑。研究不同植物存在生长习性和稀土富集能力的差异,是研究植物中稀土含量与环境稀土含量关系的重要基础。本文以白云鄂博矿区主矿区为中心,向南以5km为间隔连续设置采样区,采集土壤和铁花、沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、小叶杨、猪毛菜七种植物样品,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)<sup>[12-20]</sup>测定土壤和不同植物样品中的稀土含量,利用统计分析方法分析不同植物和根、茎、叶对稀土的富集能力,拟为评价矿区稀土元素对生态环境的影响以及为白云鄂博矿区的自然环境治理提供数据基础。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集

#### 1.1.1 土壤样品

白云鄂博矿区东矿坑北面(其他面为排土场)为第一采集区,在50m(南北方向)×100m(东西方向)范围内,在其中一条对角线上的0、1/3、2/3、1处设置4个采集点,在另一条对角线的1/4、1/2、3/4处设置3个采集点,编号分别为1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6、1-7,每个采样点采集10个样品,每个样品测定一次。一号门岗(目前为进出白云铁矿的唯一检查点)为第二采集点,沿着X077道路向包头方向间隔5km设置一个样品采集点,共7个样品采集点,每个采集点采集一个样品,每个样品进行10次溶解和测定。在每一个采样点上挖一个“V”字形的坑,然后用小土铲倾斜向下切去一片土壤样品,用取样刀取中间5~10cm宽,自下而上40cm的长条,即为一个采样点的土样,每个采样点切下的土样厚度、宽度和长度都基本一致,然后把采集的土样充分混匀,反复按四分对角取舍的方法,保留约1kg土壤样品。

采回的土壤样品放在样品盘上,摊成薄薄的一层,置于干净整洁的室内通风处自然风干。将风干后的样品平铺在制样板上,用木棍或塑料棍碾压,并将植物残体、石块等侵入体剔除干净。压碎的土样要全部通过120目孔径筛。未过筛的土粒(沙石弃

去,过120目孔径筛的沙石看作是土壤)必须重新碾压过筛,直至全部样品通过120目孔径筛为止。制备好的风干样品要妥为贮存,避免日晒、高温、潮湿和酸碱等气体的污染。

#### 1.1.2 植物样品

植物样品是在第一采集区土壤样品采集地点的基础上寻找具有代表性的植物,共有七种:铁花、沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、小叶杨、猪毛菜。将七种植株整棵采集下来。用清水洗去泥土,去离子水洗净,按照根、茎、叶、整株进行分装,在60℃温度下烘干,碾碎,备用。每个植物的根、茎、叶、整株测定10次。春季和冬季只采集了小叶杨和铁花两种植物。

### 1.2 样品处理和分析方法

土壤样品采用氢氧化钠和过氧化钠碱熔融熔解,植物样品用Multiwave 3000型微波消解仪(意大利安东帕公司)进行溶解,主要参数:最大功率1500W,红外控制最高温度240℃。

采用NexION 300Q电感耦合等离子体质谱仪(美国PerkinElmer公司)测定土壤及植物样品中的稀土元素含量<sup>[21]</sup>。主要参数:射频功率1100W,冷却气流量15L/min;辅助气流量1.2L/min;载气流量0.80L/min;真空度 $1.33 \times 10^{-5}$ Pa;镍采样锥孔径1.1mm;镍截取锥孔径0.9mm;铝超截取锥孔径1.0mm;分辨率(10%峰高) $0.70 \pm 0.1\text{amu}$ ;样品提升量1.2mL/min。

### 1.3 质量控制

化学分析检验的质量控制是一项复杂的工程,加强化学分析实验室检测结果的质量控制具有至关重要的作用<sup>[22-24]</sup>。本实验通过下面方案进行质量控制,确保测试数据的准确、可靠。包括使用有证标准溶液、样品加标回收、全部平行双样、不同分析方法比较和空白试验,使用国家一级土壤标准物质的土壤成分分析标准物质GBW07402、GBW07403、GBW07425、GBW07428和国家一级灌木枝叶成分分析标准物质GBW07602作为测定稀土元素准确度控制标样,按照每5个样品测定一个标准样品进行计算。结果表明:土壤和植物中15个稀土元素检出限分别为0.009ng/mL(Lu)~0.092ng/mL(Ce)、0.001ng/mL(Dy)~0.004ng/mL(Ce);样品标加回收率在95%~105%之间;实际样品的RSD<4%,通过不同的测定方法进行结果比对,结果一致;所有标准样品的稀土元素测定值均在扩展不确定范围内,符合率为100%<sup>[25]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中稀土元素分布特征

白云鄂博矿的主矿是为包钢冶炼稀土提供原料的主要开采地,每周定时进行爆破,每天都进行搬运、破碎等工作。研究这些工作过程中稀土元素是否能迁移至矿区周围的土壤中,结果如图1所示。

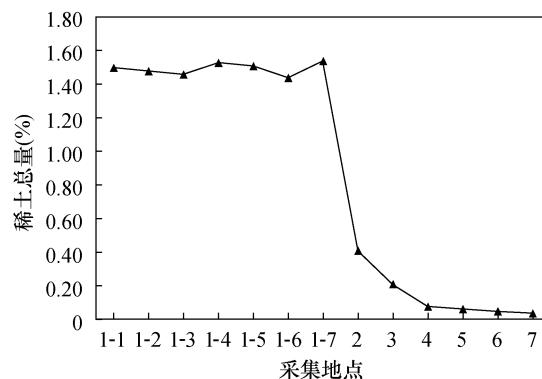


图1 不同采集地点样品的稀土总量

Fig. 1 Total amount of rare earth elements in different sampling points

由图1可知,第一采集区中7个点(1-1至1-7)的稀土含量比较接近,即该位置的稀土总量( $\Sigma$ REE)分布比较均匀, $\Sigma$ REE均值为1.49%。此外,随着采样地点与主矿区距离的增加(从采样点2号至采样点7号),相应位置土壤中的稀土含量逐渐降低。

在7个采样点采集的76个土壤样品中,稀土元

素含量范围为358.25~15325.41mg/kg,是河套土壤LREE背景值129.54mg/kg<sup>[26]</sup>的2.76~118.31倍。王学锋等<sup>[27]</sup>利用ICP-MS法测定白云鄂博尾矿区周边土壤中稀土含量约为264~15955 $\mu$ g/g,均高于全国土壤背景值;在分布上表现为轻稀土元素含量显著大于重稀土元素,La、Ce、Pr、Nd、Sm占主导位置。肖涵等<sup>[28]</sup>利用ICP-MS对凤庆县大寺乡茶园土壤中16个稀土元素进行测定,得出轻稀土明显高于重稀土,轻稀土主要以Ce、La和Nd为主,含量占 $\Sigma$ LREE的89.05%。与本文实验得出的数据及结果基本一致。

由图1可以看出,随着矿区的远离,土壤中的稀土元素也越来越低,说明土壤中的稀土主要来自于主矿区的稀土扩散,而白云鄂博矿产开采和选冶过程中稀土的扩散和累积作用是导致土壤和植物稀土含量较高的主要原因。

### 2.2 植物中稀土总量随季节变化规律

植物在不同季节中,根、茎、叶/花对元素的吸收是不同的,为确定七种植物各部位中稀土含量随季节的变化规律,采用ICP-MS测定铁花、沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、小叶杨、猪毛菜七种植物中各部位的稀土含量,七种植物样品根、茎、叶/花及整株的稀土总量随季节变化见图2。结果表明:七种植物不同部位的10次平行测定结果相对标准偏差(RSD)均小于3%。铁花、小叶杨中的稀土总量基本不受季节变化影响,在四个季节采集的样品中稀土总量无明显变化。沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、猪毛菜五种植

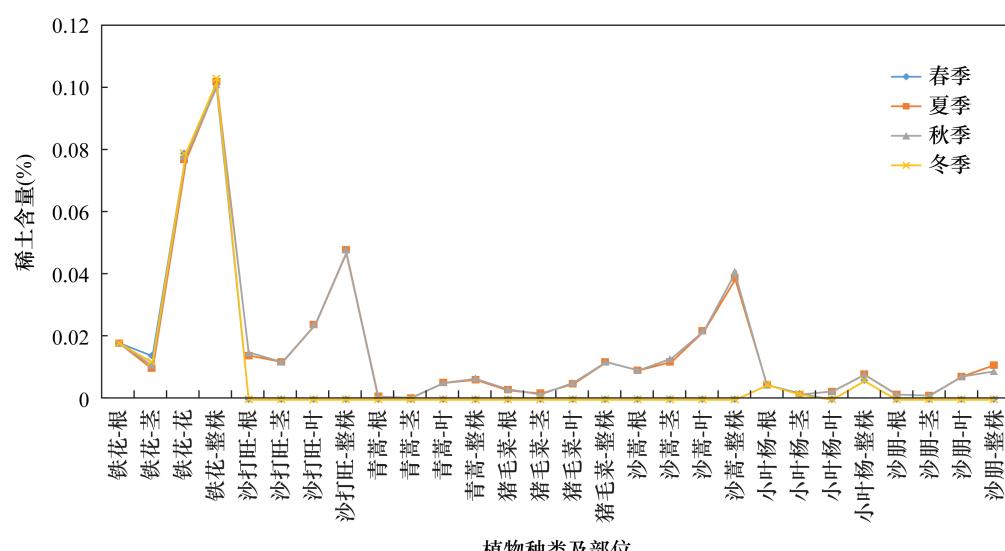


图2 四季七种植物样品各部位稀土含量

Fig. 2 Rare earth elements content of seven plants in four seasons

物样品中整株稀土总量在夏、秋两季也不受季节影响。此外,从图中还可看出铁花中稀土含量最高,其次是沙打旺和沙蒿,沙朋、青蒿、小叶杨和猪毛菜中稀土含量较低,反映出矿区不同植物对稀土元素的富集效果不同。

### 2.3 不同植物组织对整株稀土含量贡献分析

在采集、检测植物样品中的稀土含量时,分析了采样区铁花、沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、小叶杨、猪毛菜七种植物样品的根、茎、叶/花三处植物组织中的稀土含量。三处植物组织中的稀土含量对整株植物样品中稀土含量的比例贡献见图3。可以看出,夏季、秋季采集的植物样品中,除小叶杨的叶子中稀土含量对整株含量的贡献仅有28.9%,而根中的稀土总量占整株含量的53.2%外,铁花、沙蒿、沙打旺、沙朋、青蒿、猪毛菜六种植物样品中对整株稀土总量贡献较大的植物组织都是植物的叶/花部位,平均贡献分别达到73.1%、50.2%、47.5%、72.8%、78.8%和50.7%。表明对于矿区附近的大部分植物,稀土富集最多的组织部位是叶或者花,而小叶杨中稀土元素最富集部位则是在其根部。

### 2.4 植物不同组织稀土含量与分布规律

为了详细分析各种稀土元素在植物样品不同组织部位的含量,对夏季采集的铁花、沙打旺、青蒿、猪毛菜、沙蒿、小叶杨、沙朋七种植物样品根、茎、叶/花部位的15种稀土元素总量分别进行了测定,其规律分布图见图4。

#### 2.4.1 植物样品中稀土含量分布特征

池汝安指出,白云鄂博稀土矿中Ce含量最大,质量分数约为98.4%,Y含量仅占约1.6%左右。张臻悦等<sup>[29]</sup>指出白云鄂博稀土矿中混合稀土矿的配分保持了氟碳铈矿和独居石矿的稀土配分规律,

Ce含量>95%,Y含量<4.5%。袁丽娟等<sup>[30]</sup>研究了赣南典型稀土矿区周边土壤、动植物产品中稀土元素的组成特征,轻稀土所占比重为80%左右,主要成分也基本相同,均为Y、La、Ce、Nd。其中Ce含量最高,其次是La和Nd,这与赣南稀土矿区周边土壤样品中主要元素的丰度相一致。

本文测试结果表明,白云鄂博稀土矿中稀土元素含量最高的是Ce,约为50%,其次是La、Nd、Pr。由图4可以看出,在所有采集的七种植物样品中,稀土的含量范围为62.67~1023.25mg/kg,其中铁花中的稀土含量最高,为1023.25mg/kg,其次是沙打旺和沙蒿,分别为482.52mg/kg和394.11mg/kg。且稀土元素的含量图形与白云鄂博矿的稀土配分基本是一致的。含量较高的稀土元素都是Ce(0.0035%~0.020%)、La(0.0012%~0.011%)、Nd(0.0010%~0.0094%)和Pr(0.00036%~0.0046%),其中含量最高的是Ce。含量稍低的是Sm、Eu、Gd、Y,另七种稀土元素在植物中的含量均较低。

#### 2.4.2 植物中各部位稀土分布特征

姚清华等<sup>[31]</sup>对福建安溪县不同土壤茶园的铁观音茶叶进行稀土元素的分布、组成、迁移和富集能力进行研究,结果表明茶园铁观音茶叶片、叶柄中稀土元素组成均以钇、镧、铈、钕4种元素为主,且含量均以第3叶>第2叶>第1叶>叶柄。说明叶与叶柄对稀土元素的吸收能力不同。

由图4可以看出,采集七种植物样品中的根、茎、叶均可富集稀土元素,但富集稀土能力不同部位不尽相同。铁花、沙打旺、青蒿、猪毛菜、沙朋五种植物中各部位富集稀土能力是叶(花)>根>茎;沙蒿植物中各部位富集稀土能力是叶>茎>根;小叶杨

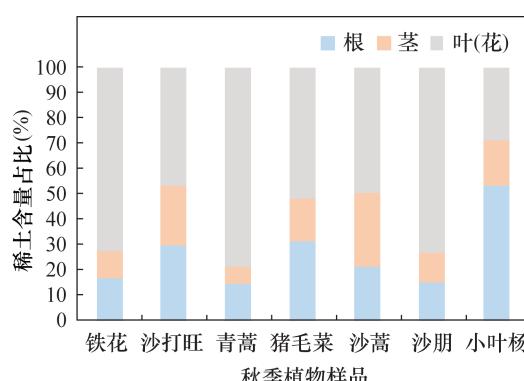
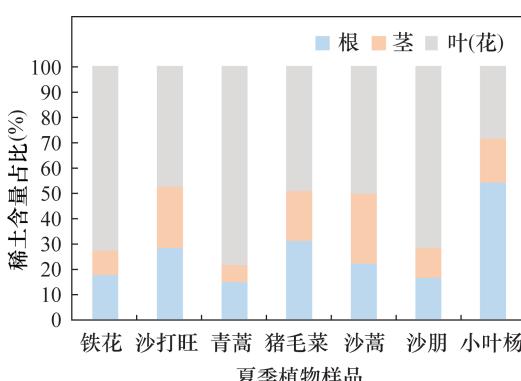


图3 夏季和秋季七种植物各部位稀土含量对整株的贡献

Fig. 3 Contribution of rare earth elements content in different parts of seven plants to the whole plant in summer and autumn

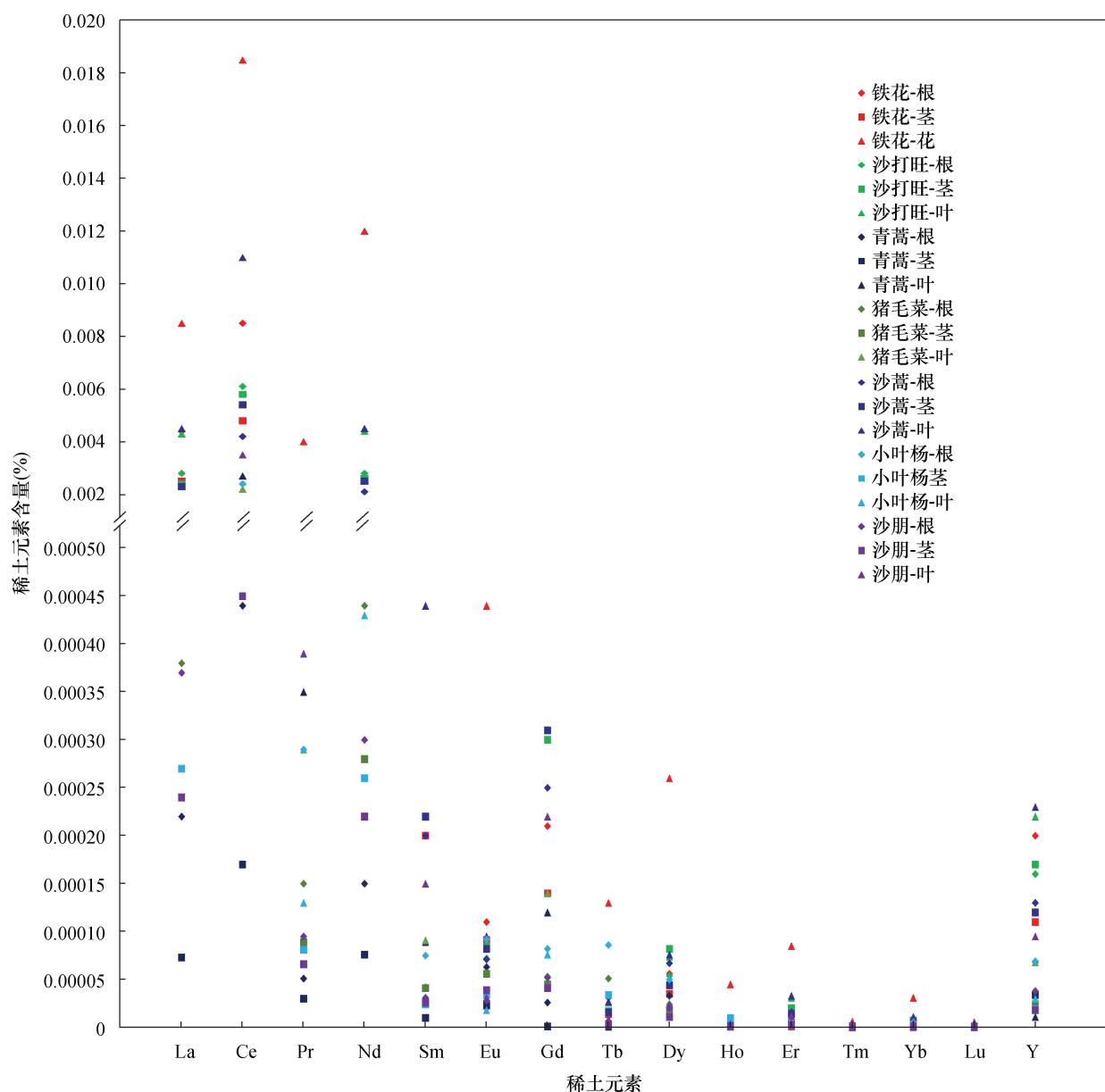


图4 植物样品中各部分稀土元素含量

Fig. 4 Rare earth elements content in various parts of plant parts samples

植物中各部位富集稀土能力是叶>茎>根。而七种植物中整株富集能力最强的植物是铁花,其次是沙打旺、沙蒿、猪毛菜、沙朋、小叶杨,富集能力最差的植物是青蒿。

同一种植物的根、茎和叶对不同稀土元素的富集能力没有特异性,基本上是按照白云鄂博矿的稀土元素配分比例进行富集。但沙打旺的茎对Eu具有很强的富集能力,白云鄂博矿石中Eu的配分是0.18%左右,沙打旺的茎中Eu的配分达到5%以上。

### 3 结论

针对白云鄂博稀土矿区周围土壤和植物,采用ICP-MS法测定其稀土含量,根据不同采样点的土壤样品、植物整株样品和植物根、茎、叶/花样品的测定结果,研究了土壤与植物中稀土元素的分布。研究表明,采集土壤中的稀土含量随着矿区的远离在逐渐下降,在矿区30km以外土壤中的稀土含量已接近河套地区的背景值。在采集的七种植物中,铁花中稀土的含量最高,其次是沙打旺和沙蒿,在整株植物中稀土富集最多的组织部位主要是叶/花。

白云鄂博矿区的土壤已经造成了土壤中稀土元素的累积,针对稀土污染土壤,可以采用物理、化学和生物法(植物修复、微生物修复和两者复合修复)等方法进行修复和治理<sup>[32]</sup>。根据此次采集的七种植物来看,铁花富集稀土的能力最强,沙打旺和沙蒿次之,本研究提出在白云鄂博矿山开采结束后,可以在土壤上种植此三种植物进行生物修复,富集后对植物进行焚烧回收稀土元素。

#### 4 参考文献

- [1] 郭财胜,李梅,柳召刚,等.白云鄂博稀土、铌资源综合利用现状及新思路[J].稀土,2014,35(1):96–100.  
Guo C S, Li M, Liu Z G, et al. Present status and new ideas on utilization of Bayan Obo rare earth and niobium resource [ J ]. Chinese Rare Earths, 2014, 35 ( 1 ) : 96 – 100.
- [2] 李振民,王勇,牛京考.中国稀土资源开发的生态环境影响及维护政策[J].稀土,2017,38(6):144–154.  
Li Z M, Wang Y, Niu J K. The influence of rare earth resources exploitation on ecology and environment and the protection policy [ J ]. Chinese Rare Earths, 2017, 38 ( 6 ) : 144 – 154.
- [3] 陈祖义.稀土的生物效应与农用稀土的累积影响[J].农村生态环境,1999,15(3):44–48.  
Chen Z Y. Reflection on the biological effects of rare earth and the cumulative impacts of its agricultural application [ J ]. Rural Eco – Environment, 1999, 15 ( 3 ) : 44 – 48.
- [4] 刘贝贝,朱芮,于子博,等.氯化镧对不同发育期仔鼠肝脏抗氧化能力的影响[J].现代预防医学,2018,45(8):1458–1461.  
Liu B B, Zhu R, Yu Z B, et al. Effect of lanthanum chloride on hepatic antioxidative ability in different developing periods of rat [ J ]. Modern Preventive Medicine, 2018, 45 ( 8 ) : 1458 – 1461.
- [5] 李炳辉,张丽英,陈晨,等.钇早期暴露对大鼠海马组织生长发育的组织形态学影响[J].中国食品卫生杂志,2016,28(2):160–165.  
Li B H, Zhang L Y, Chen C, et al. Effect of developmental histomorphology of rat hippocampus after early stage yttrium exposure [ J ]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28 ( 2 ) : 160 – 165.
- [6] 杨宁,纪乐,姜珊,等.氧化钕:分布特征及毒理学研究进展[J].环境与职业医学,2018,35(8):770–773.  
Yang N, Ji L, Jiang S, et al. Toxicological studies on neodymium oxide [ J ]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2018, 35 ( 8 ) : 770 – 773.
- [7] 金珠兰,黄益宗,胡莹,等.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,2014,34(12):3084–3093.  
Jin Z L, Huang Y Z, Hu Y, et al. Rare earth elements content and health risk assessment of soil and crops in typical rare earth mine area in Jiangxi Province [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 ( 12 ) : 3084 – 3093.
- [8] 刘湘虎.稀土元素对动物及人的影响[J].中国畜牧兽医,2008,35(8):158–160.  
Liu X H. Rare earths influence animal and human beings [ J ]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2008, 35 ( 8 ) : 158 – 160.
- [9] 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,等.内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征[J].环境科学,2013,34(5):1895–1900.  
Guo W, Fu R Y, Zhao R X, et al. Distribution characteristics and current situation of soil rare earth contamination in the Bayan Obo mining area and Baotou tailing reservoir in Inner Mongolia [ J ]. Environmental Science, 2013, 34 ( 5 ) : 1895 – 1900.
- [10] 林晓芳,张晓娥.白云鄂博尾矿坝土壤污染及稀土元素毒性研究现状[J].世界最新医学信息文摘,2017,17(52):87–88.  
Lin X F, Zhang X E. Research status of soil pollution of Bayan Obo tailings dam and rare earth elements toxicity [ J ]. World Latest Medicine Information, 2017, 17 ( 52 ) : 87 – 88.
- [11] 高叶青,丁彩琴,任冬梅,等.稀土元素富集对白云鄂博矿区8种常见藓类植物生长及其解剖结构特征的影响[J].西北植物学报,2017,37(1):23–31.  
Gao Y Q, Ding C Q, Ren D M, et al. Impacts of REEs enrichment on growth and anatomy of eight common mosses from Baiyun Obo [ J ]. Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica, 2017, 37 ( 1 ) : 23 – 31.
- [12] 张楠,徐铁民,吴良英,等.微波消解–电感耦合等离子体质谱法测定海泡石中的稀土素[J].岩矿测试,2018,37(6):644–649.  
Zhang N, Xu T M, Wu L Y, et al. Determination of rare earth elements in sepiolite by ICP – MS using microwave digestion [ J ]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37 ( 6 ) : 644 – 649.
- [13] 刘宇,迪伍才仁,赵莹,等.中国土壤和粘土中微量元素及稀土元素的ICP-MS测定[J].中国地质,2014,33(1):95–102.  
Liu Y, Diwu C R, Zhao Y, et al. Determination of trace and rare – earth elements in Chinese soil and clay reference materials by ICP – MS [ J ]. Chinese Journal of Geochemistry, 2014, 33 ( 1 ) : 95 – 102.
- [14] Masson P, Dalix T. Comparison of open digestion methods for the determination of rare earth elements in plant samples by ICP – MS [ J ]. Communications in Soil

- Science and Plant Analysis, 2016, 47(16): 1866–1874.
- [15] 张茜,余谦,王剑,等.应用ICP-MS研究川西南龙马溪组泥页岩稀土元素特征及沉积环境[J].岩矿测试,2018,37(2):217–224.  
Zhang Q, Yu Q, Wang J, et al. Application of ICP-MS to study the rare earth element characteristics and sedimentary environment of black shale in the Longmaxi Formation in the Southwestern Sichuan Basin [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2):217 – 224.
- [16] 黎卫亮,程秀花,李忠煜,等.碱熔共沉淀-电感耦合等离子体质谱法测定橄榄岩中的稀土元素[J].岩矿测试,2017,36(5):468–473.  
Li W L, Cheng X H, Li Z Y, et al. Determination of rare earth elements in peridotite by inductively coupled plasma - mass spectrometry after alkali fusion and  $Mg(OH)_2$  and  $Fe(OH)_3$  coprecipitation [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(5):468 – 473.
- [17] 张磊,周伟,朱云,等.硫酸铵溶液淋滤-电感耦合等离子体质谱测定离子相稀土分量的方法优化[J].岩矿测试,2018,37(5):518–525.  
Zhang L, Zhou W, Zhu Y, et al. An optimized method for determination of ionic - phase rare earth elements by ICP - MS using ammonium sulfate leaching [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(5):518 – 525.
- [18] 汤少展,任小荣,邱海鸥,等.电感耦合等离子体质谱法测定土壤中锗、镓和稀土[J].广州化工,2018,46(17):88–90.  
Tang S Z, Ren X R, Qiu H O, et al. Determination of Ge, Ga and rare earths in soil samples by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(17):88 – 90.
- [19] 成学海,夏传波,郑建业,等.封闭压力酸溶-电感耦合等离子体质谱法同时测定电气石中29种元素[J].岩矿测试,2017,36(3):231–238.  
Cheng X H, Xia C B, Zheng J Y, et al. Simultaneous determination of 29 trace elements in tourmaline by sealed press acid decomposition [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3):231 – 238.
- [20] 赵平,李爱民,刘建中,等.应用ICP-MS研究黔西南地区构造蚀变体稀土元素地球化学特征[J].岩矿测试,2017,36(1):89–96.  
Zhao P, Li A M, Liu J Z, et al. Application of ICP - MS to study REE geochemistry of structure alteration rocks in Southwestern Guizhou Province, China [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(1):89 – 96.
- [21] 张立锋,刘杰民,张翼明.电感耦合等离子体质谱法测定白云鄂博矿区土壤及植物中稀土总量[J].稀土,2016,27(4):106–112.  
Zhang L F, Liu J M, Zhang Y M. Determination of total rare earth in soil and plants in Bayan Obo mining area by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Rare Earths, 2016, 27(4):106 – 112.
- [22] 陈筱钰.化学分析检验的质量控制研究[J].山西化工,2019,39(1):83–85.  
Chen X Y. Study on quality control of chemical analysis and inspection [J]. Shanxi Chemical Industry, 2019, 39(1):83 – 85.
- [23] 黄粮山.化学分析实验室检测结果的质量控制[J].云南化工,2018,45(2):86–87.  
Huang L S. Chemical analysis laboratory test results quality control [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(2):86 – 87.
- [24] 许鹏.化学分析实验室日常测试结果的质量控制[J].化工设计通讯,2017,43(6):208.  
Xu P. Chemical analysis laboratory quality control of daily test results [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(6):208.
- [25] 蔡敬怡,谭科艳,路国慧,等.贵州万山废弃矿区小流域系统沉积物及悬浮物重金属的空间分布特征[J].岩矿测试,2019,38(3):305–315.  
Cai J Y, Tan K Y, Lu G H, et al. The spatial distribution characteristics of heavy metals in river sediments and suspended matter in small tributaries of the abandoned Wanshan mercury mines, Guizhou Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3):305 – 315.
- [26] 张庆辉,刘兴旺,程莉,等.包头市南郊污灌区农田表层土壤轻稀土平面空间分布特征[J].天津农业科学,2015,21(7):39–47.  
Zhang Q H, Liu X W, Cheng L, et al. Distribution of farmland surface soil lanthanum in two - dimensional space of sewage irrigation area in the southern suburbs of Baotou [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2015, 21(7):39 – 47.
- [27] 王学锋,许春雪,顾雪,等.典型稀土矿区周边土壤中稀土元素含量及赋存形态研究[J].岩矿测试,2019,38(2):137–146.  
Wang X F, Xu C X, Gu X, et al. Concentration and fractionation of rare earth elements in soils surrounding rare earth ore area [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2):137 – 146.
- [28] 肖涵,鲁翼岚,缪德仁.云南凤庆典型茶园土壤中稀土元素的含量及形态分布[J].昆明学院学报,2019,41(3):48–51.  
Xiao H, Lu Y L, Miao D R. Concentrations and speciation distributions of rare earth elements in typical tea garden soil in Fengqing County of Yunnan [J]. Journal of

- Kunming University, 2019, 41(3): 48–51.
- [29] 张臻悦,何正艳,徐志高,等.中国稀土矿稀土配分特征[J].稀土,2016,37(1):121–127.  
Zhang Z Y, He Z Y, Xu Z G, et al. Rare earth partitioning characteristics of China rare earth ore [J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(1):121 – 127.
- [30] 袁丽娟,郭孝培,魏益华,等.赣南典型稀土矿区周边土壤和动植物产品中稀土元素组成特征及其健康风险评价[J].环境化学,2019,38(8):1–14.  
Yuan L J, Guo X P, Wei Y H, et al. Compositions and health risk assessment of rare – earth elements in soil, animal and plant products around rare earth mining area in Southern Jiangxi Province [ J ]. Environmental Chemistry, 2019, 38(8):1 – 14.
- Chemistry, 2019, 38(8):1 – 14.
- [31] 姚清华,颜孙安,张炳铃,等.茶园土壤类型对铁观音茶叶稀土元素分布和组成的影响[J].热带亚热带植物学报,2018,26(6):644–650.  
Yao Q H, Yan S A, Zhang B L, et al. Effects of soil types in tea garden on distribution and composition of rare earth elements in Tieguanyin [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(6):644 – 650.
- [32] 杜召梅.稀土元素的环境效应及其污染土壤的修复措施[J].山东工,2017,46(14):197–199.  
Du Z M. Environmental effects and remediation measures for contaminated soils by rare earth elements [ J ]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(14):197 – 199.

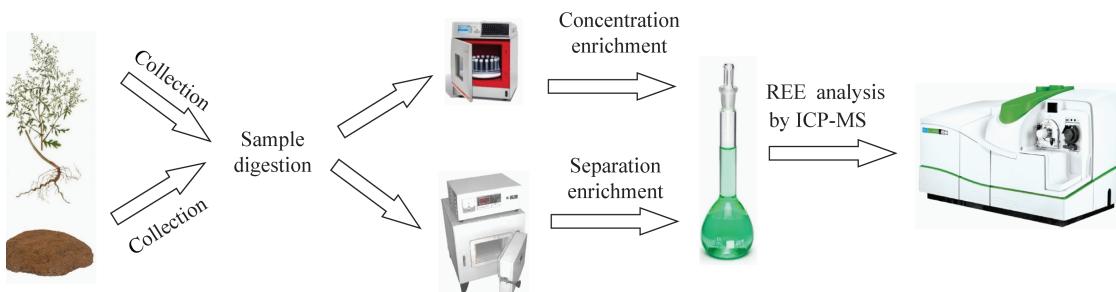
## Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Plants and Soils from the Bayan Obo Mining Area

ZHANG Li-feng<sup>1,2</sup>, LIU Jie-min<sup>2</sup>, ZHANG Yi-ming<sup>1</sup>

- (1. Baotou Research Institute of Rare Earths, State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014030, China;  
2. School of Chemistry and Biological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The distribution characteristics of rare earth elements in soils in and around the mining area were revealed.
- (2) The variation of rare earth elements distribution in plants in the mining area in the whole year was evaluated.
- (3) Three kinds of plants with the ability of strongest enrichment of rare earth elements were identified in the mining area and suggestions for mine restoration were provided.



**ABSTRACT**

**BACKGROUND:** The Bayan Obo mining area is the main producing area of rare earth elements. During mining and refining, rare earth elements enter plants through migration and enrichment. Study on the distribution characteristics and migration patterns of rare earth elements will provide data support for bioremediation following the closure of the Bayan Obo ore body pit.

**OBJECTIVES:** To study the distribution characteristics and migration patterns of rare earth elements in soil and plants.

**METHODS:** Seven soil sampling points were set up, and seven plant types including Honeysuckle, Artemisia desertorum, Astragalus Adsurgens Pall, Agriophyllum squarrosum (L.) Moq, Artemisia carvifolia, Populus simonii Carr and Salsola collina Pall were collected. The content of rare earth elements in soil and roots, stems, leaves (or flowers) and whole plants was determined by inductively coupled plasma – mass spectrometry.

**RESULTS:** With the increase of the distance between the sampling area and the main mining area, the rare earth element content in the soil samples decreased. The rare earth element content of Honeysuckle was the highest in the studied plants, whereas it was the lowest in Artemisia carvifolia. The rare earth element content in whole plant and various parts (root, stems, leaves or flowers) in different plants were analyzed by multiple linear regression analysis. The rare earth element content of leaves (or flowers) accounted for the largest proportion in whole bead plants. In addition, the content of rare earth elements in plants was basically unchanged in different seasons. The rare earth elements with higher content were 0.0035% – 0.020%, 0.0012% – 0.011%, 0.0010% – 0.0094% and 0.00036% – 0.0046% for Ce, La, Nd and Pr, respectively.

**CONCLUSIONS:** According to the gradual reduction pattern of rare earth elements in soil samples, the rare earth source of the soil around the mining area may be caused by the diffusion of ore during mining and refining. According to the rare earth enrichment ability of plants, Honeysuckle with strong enrichment ability of rare earth can be used for bioremediation of mines, after the mine is closed.

**KEY WORDS:** Bayan Obo Mine; soil; plant; rare earth element; tie hua; inductively coupled plasma – mass spectrometry; bioremediation