

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 ..... 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 ..... 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 ..... 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 ..... 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 ..... 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 ..... 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 ..... 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 ..... 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 ..... 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 ..... 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 ..... 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 ..... 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 ..... 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 ..... 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 ..... 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 ..... 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 ..... 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

**研究报告**

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 ..... 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 ..... 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM<sub>2.5</sub> 中有机组分的吸光性质及来源 ..... 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 ..... 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 ..... 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 ..... 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 ..... 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 ..... 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 ..... 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 ..... 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 ..... 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 ..... 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 ..... 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 ..... 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 ..... 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 ..... 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 ..... 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 ..... 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 ..... 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 ..... 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 ..... 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 ..... 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 ..... 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的制备及其吸附水中磷的性能 ..... 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 ..... 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 ..... 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 ..... 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 ..... 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 ..... 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春雨, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 ..... 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 ..... 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 ..... 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 ..... 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域水生态空间管控下生境监测方法概述 ..... 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

# 内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价

王哲<sup>1</sup>, 赵莹晨<sup>1</sup>, 骆逸飞<sup>2</sup>, 郑春丽<sup>1\*</sup>, 卞园<sup>1</sup>, 张光宇<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 白云鄂博矿床是世界上最大的轻稀土矿床, 在长期开采过程中向周围环境中释放了大量的稀土元素。为了制定有效地修复方案, 必须对稀土元素的浓度、空间分布、分布模式、污染水平和生态风险进行分析和评价。结果表明, 土壤样品总稀土含量平均值为6 064.95 mg·kg<sup>-1</sup>, 高于对照点(207.44 mg·kg<sup>-1</sup>)、内蒙古(150.95 mg·kg<sup>-1</sup>)和中国(184.72 mg·kg<sup>-1</sup>)土壤背景值, 说明周边土壤出现稀土富集现象。轻稀土元素占到稀土总量的83%~99%, Ce是最主要的轻稀土元素。总稀土的高值区域主要集中于矿源附近, 分布极不均匀, 受外界干扰较大。各个功能区稀土球粒陨石标准化模式相似, 归一化曲线向右倾斜, 轻重稀土分馏明显。 $\delta\text{Ce}$ 和 $\delta\text{Eu}$ 的计算显示土壤具有明显的Ce正异常和Eu负异常。 $\text{La}/\text{Yb}$ 、 $\text{La}/\text{Sm}$ 和 $\text{Gd}/\text{Yb}$ 的比值表明, 土壤中稀土元素的分布模式是轻稀土元素富集, 而且轻稀土元素较重稀土元素具有更为显著的分馏作用。采用4种方法对研究区土壤中稀土元素污染状况和生态风险进行评价。地累积指数计算表明Ce、Nd、Pr和La的均值达到了重污染程度。校正污染程度评价结果显示, 不同功能区稀土元素的平均 $mC_d$ 值范围为7.14~31.38, 尾矿库属于高污染水平, 居民区和工业区属于非常高污染水平, 而采矿区和排土场则达到极高污染水平。污染负荷指数评价显示尾矿库属于中度污染水平, 其余功能区则达到重度污染水平。白云鄂博矿区土壤中稀土元素的潜在生态风险指数范围为120.99~6 376.46, 33%的样点呈现出极强生态风险, 16%的样点呈现很强的生态风险, 12%的样点呈现较强的生态风险, 30%的样点呈现中等风险, 只有9%的样点呈现较低的生态风险。因此, 亟待采取有效地措施来控制白云鄂博矿区土壤中稀土元素的污染和潜在生态风险。

**关键词:** 矿区; 稀土元素(REE); 特征参数; 污染; 生态风险

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1503-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202008129

## Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia

WANG Zhe<sup>1</sup>, ZHAO Ying-chen<sup>1</sup>, LUO Yi-fei<sup>2</sup>, ZHENG Chun-li<sup>1\*</sup>, BIAN Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Guang-yu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The Bayan Obo deposit is the largest light rare earth ore deposit in the world, which releases rare earth elements (REEs) to the surrounding environment through long-term mining processes. To inform restoration plans, it is necessary to investigate the concentration, spatial distribution, pollution level, and ecological risk of REEs. Sample analyses showed that the average total concentration of REEs in this area is 6 064.95 mg·kg<sup>-1</sup>, which was higher than the background levels of control soils (207.44 mg·kg<sup>-1</sup>), Inner Mongolia (150.95 mg·kg<sup>-1</sup>), and China (184.72 mg·kg<sup>-1</sup>). Light REEs (LREEs) accounted for 83%~99% of the detected REE, and Ce was the dominant element. Areas with high REE concentrations were mainly located near the source bed, and the distribution was extremely inhomogeneous, being greatly affected by external interference. Chondrite normalized REE patterns of different functional areas were similar and normalized curves inclined to the right, indicating district fractionation between the LREE and heavy REEs (HREEs). Significant negative Eu anomalies and positive Ce anomalies were observed in the soils based on  $\delta\text{Ce}$  and  $\delta\text{Eu}$  values.  $\text{La}/\text{Yb}$ ,  $\text{La}/\text{Sm}$ , and  $\text{Gd}/\text{Yb}$  ratios all indicated that the soils were LREE-enriched, whereas the LREEs were more fractionated than the HREE. Four methods were employed to evaluate the pollution and ecological risk of the detected soil REEs. The average values of Ce, Nd, Pr, and La reached heavily contaminated levels based the geo-accumulation index ( $I_{\text{geo}}$ ). The modified degree of contamination method showed that the average  $mC_d$  values of REEs in different functional areas ranged from 7.14 to 31.38. The tailings pond had a high level of pollution, residential and industrial areas had a very high pollution level, and the mining area and waste dump showed extremely high levels of pollution. Based on the pollution load index, the tailings pond is moderately polluted while all other functional areas are severely polluted. The potential ecological risk index values ranged from 120.99 to 6 376.46, with REEs in soils posing high strong risk, very strong risk, strong risk, moderate risk, and low risk in 33%, 16%, 12%, 30%, and 9% of the sampling sites, respectively. Based on these findings, measures for controlling current pollution and potential ecological risks from REE in the soils of the Bayan Obo mining region are urgently needed.

**Key words:** mining area; rare earth elements (REE); characteristic parameters; pollution; ecological risk

稀土元素(REE)是化学元素周期表中镧系元素以及与镧系15个元素密切相关的元素钇(Y)和

收稿日期: 2020-08-13; 修订日期: 2020-08-31

基金项目: 内蒙古科技计划项目; 内蒙古自然科学基金项目(2020MS02005); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802904)

作者简介: 王哲(1979~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿区土壤污染修复, E-mail: wz0478@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhengchunli1979@163.com

钪(Sc)的总称,共包括 17 个元素<sup>[1]</sup>. 根据稀土元素原子电子层结构和物理化学性质,以及它们在矿物中共生情况和不同的离子半径,稀土元素通常可分为轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd)和重稀土元素(Y、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)<sup>[2]</sup>. 稀土有工业“黄金”之称,被广泛应用于军事、冶金工业、石油化工、玻璃陶瓷以及农业等领域<sup>[3,4]</sup>. 我国稀土储量仅占世界总储量的 23%,但在 2019 年中国稀土产量约占世界稀土总产量 63%,成为世界最大稀土生产国. 随着稀土资源需求量的日益增加,稀土矿的开采力度也不断加大,在大规模开发利用过程中大量稀土元素必然会进入矿区周边的土壤中,导致严重的生态环境问题<sup>[5,6]</sup>. 然而,目前关于稀土对环境造成污染的研究相对薄弱,对其潜在的生态风险研究则更少. 因此,必须重视稀土的污染问题,特别是生态脆弱地区的稀土污染状况.

白云鄂博矿区位于内蒙古包头市,蕴藏着丰富的矿产资源,是享誉世界的“稀土之都”. 矿区处于草原生态系统中,抗干扰能力较弱,大规模露天采矿活动造成的生态破坏和环境问题也更加严重,这将对当地草原、牧民和牲畜造成一定程度的影响<sup>[7]</sup>. 目前关于白云鄂博矿区稀土污染的研究非常有限,主要集中于稀土元素在大气颗粒物中的浓度水平<sup>[8]</sup>、尾矿库附近稀土的分布<sup>[9]</sup>、矿区周围道路粉尘稀土污染特征<sup>[10]</sup>,以及矿区土壤中稀土的分配模式<sup>[11]</sup>等方面,对于区内典型功能区,如采矿区、工业区、尾矿区、排土场及居民区的稀土污染程度及生态风险评价则鲜见报道. 不同功能区稀土富集程度不同,这主要取决于原矿、工业类型、尾矿、粉尘的产生环节及交通运输等. 因此,依据矿区不同功能区进行土壤稀土污染评价更为合理.

潜在生态风险指数法是重金属污染评价中常用的方法. 到目前为止,由于缺乏稀土元素毒性系数计算的相关标准,其生态风险评价仍存在一定难度. Wu 等<sup>[12]</sup>对青藏高原东北部土壤中稀土元素进行生态风险评价时,将所有稀土元素的毒性系数均设为 1,这可能导致土壤中稀土元素的生态风险被过低评价. 事实上,有研究指出稀土元素是具有毒性的<sup>[13~15]</sup>,每个元素的真实毒性系数可能大于 1. Chen 等<sup>[16]</sup>依据稀土元素的丰度和释放效果等计算了 15 种稀土元素的毒性系数,本研究将参考这一毒性系数,可望为白云鄂博矿区稀土元素潜在生态风险评价提供可靠的依据.

本研究对白云鄂博矿区 5 种不同功能区的表层土壤进行采样调查,对稀土元素的含量进行测定,应用反距离空间插值法分析土壤稀土元素的空间分

布,探讨土壤稀土元素球粒陨石标准化后的分布模式. 利用地累积指数法、校正污染程度法、污染负荷指数法与潜在生态风险指数法评价土壤稀土污染程度和生态风险,以期为稀土矿区的污染治理提供科学依据

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白云鄂博矿区(109°58′25″E,41°46′58″N)位于内蒙古包头市境内,区域面积 328 km<sup>2</sup>,总人口近 3 万人,平均海拔 1 605 m,年平均气温 2.5℃,全年无霜期 148 d,年降水量 248.5 mm,年蒸发量 2 732.55 mm<sup>[17]</sup>. 当地土壤类型以栗钙土为主,少量草甸土和盐土. 白云鄂博属内陆干旱气候,高寒、干旱和多风,温差变化大. 盛行风为西北风,平均风速 1.2 m·s<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>.

白云鄂博是中国最大的铁-铈-稀土综合矿床,铁矿石、铈和稀土储量分别约为 1.4 × 10<sup>9</sup>、6.6 × 10<sup>6</sup> 和 1 × 10<sup>8</sup> t. 矿区主要由 3 个矿体组成:主矿(MO)、东矿(EO)和西矿(WO),面积 48 km<sup>2</sup>,长 18 km,宽 3 km<sup>[19]</sup>. 主矿和东矿是最大的矿体,西矿目前还没有大规模地开发. 铁矿石开采后通过铁路运输到包头钢铁有限公司用于钢铁生产.

### 1.2 样品采集

依据矿区分布和功能区进行采样,样点如图 1 所示. 采样区分为 5 个功能区,分别为采矿区(MA),有 10 个采样点(1~4 和 23~28 号);居民区(RA),有 10 个采样点(29~38 号);工业区(IA),有 5 个采样点(5~9 号);排土场区(DA),有 9 个采样点(19~22 和 39~43 号);尾矿库区(TA),有 9 个采样点(10~18 号). 在远离所有疑似污染源影响的研究区上风向采集对照点(编号 D1、D2 和 D3). 于 2019 年 8 月共采集表层土壤样品 46 份(0~20 cm),每个采样点 3~5 个子样本混合成 1 kg 土样,土壤用不锈钢铲收集,采集后保存在塑料自封袋里,运回实验室,用 GPS 记录采样点的经纬度坐标.

### 1.3 样品预处理与分析

所有土壤样品室内风干一周,充分混匀,除去石头、草根等杂物,过 200 目筛网,四分法处理实验土样,一部分样品用于土壤理化性质测定,一部分用于稀土元素含量测定.

土壤理化性质测定:采用电位法测定土壤 pH 值(pHS-3C 中国上海仪电科学仪器股份有限公司)、电导率(DDS-1A 中国上海仪电科学仪器股份有限公司)、氧化还原电位(HTYH-100N 中国北京

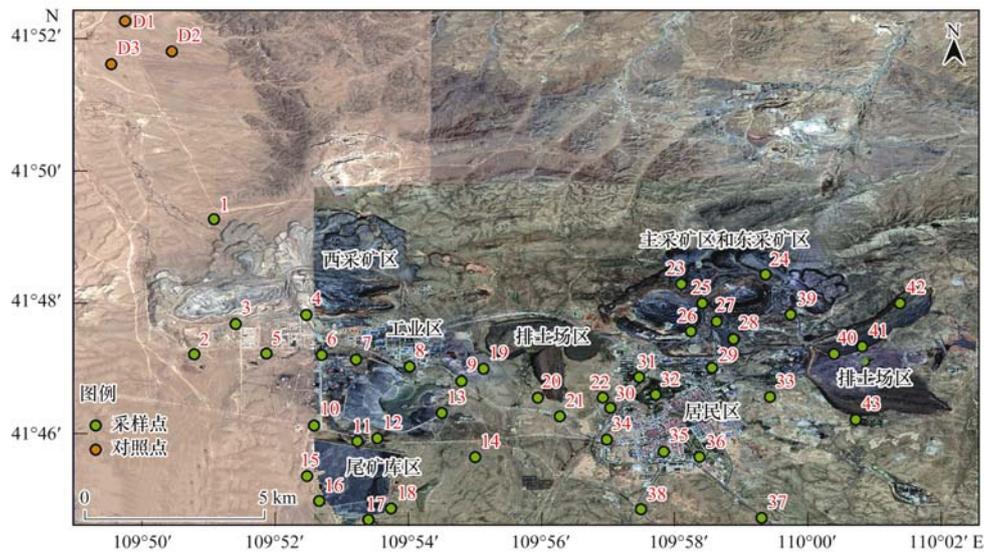


图1 研究区土壤采样点示意

Fig. 1 Location map of the study area and sampling sites

精诚华泰仪表有限公司); 采用凯氏定氮法测定土壤总氮(KD-1000 中国 上海沛欧分析仪器有限公司); 按照《土壤全钾测定法》(GB 9836-88)测定土壤总钾; 采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤总磷(UV180G 中国 天津冠泽科技有限公司); 利用乙酸铵浸提法测定土壤有效钾; 阳离子交换量用乙酸钙交换法测定; 有机质用烧失法测定; 土壤粒径分布用吸管法测定. 研究区土壤理化性质见表1.

土壤稀土元素测定: 每个样点用0.1 g的土壤

混合物采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1:4:1:1) 法进行消解, 稀土元素消解后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, PerkinElmer NexION 2000 美国)测定. 稀土元素分析的准确性通过空白试剂(相对误差 < 5%)、重复实验(每次重复3次, 标准偏差 < 10%) 和国家标准参考物质(GBW07402、GBW07403、GBW07425、GBW07602)确定. 标准物质中分析稀土元素的置信水平为90%, 重复测量的相对标准偏差小于10%, 各稀土元素的回收率为91%~102%.

表1 研究区土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils in the study area

理化性质	最小值	最大值	中值	平均值	标准差	变异系数	
pH	7.86	9.67	8.41	8.43	0.35	0.04	
氧化还原电位/mV	278.67	383.33	312.33	312.17	20.48	0.07	
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	76.76	5983.33	216.67	954.84	1509	1.58	
阳离子交换量/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.78	23.88	5.55	6.91	5.39	0.78	
有机质/%	2.91	22.65	9.46	10.09	4.11	0.41	
总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.16	4.26	2.11	2.33	0.15	0.64	
总磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.07	1.89	0.10	0.45	0.71	1.60	
总钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.57	29.06	21.39	21.46	4.85	0.23	
有效钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.22	3.05	0.54	0.97	0.88	0.91	
土壤粒径分布/%	砂粒	33.47	71.47	49.67	51.58	8.85	0.17
	粉粒	2.81	52.80	29.48	29.33	13.55	0.46
	黏粒	0.01	3.51	1.06	1.06	0.81	0.76

#### 1.4 土壤稀土元素特征参数

土壤稀土元素特征参数包括  $\delta\text{Ce}$ 、 $\delta\text{Eu}$ 、 $\text{La}/\text{Yb}$ 、 $\text{La}/\text{Sm}$  和  $\text{Gd}/\text{Yb}$ . 参数根据球粒陨石标准化值计算, 计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$\delta\text{Ce} = \frac{\frac{\text{Ce}_{\text{sample}}}{\text{Ce}_{\text{reference}}}}{\sqrt{\frac{\text{La}_{\text{sample}}}{\text{La}_{\text{reference}}} \times \frac{\text{Pr}_{\text{sample}}}{\text{Pr}_{\text{reference}}}}} \quad (1)$$

$$\delta E_n = \frac{\frac{\text{Eu}_{\text{sample}}}{\text{Eu}_{\text{reference}}}}{\sqrt{\frac{\text{Sm}_{\text{sample}}}{\text{Sm}_{\text{reference}}} \times \frac{\text{Gd}_{\text{sample}}}{\text{Gd}_{\text{reference}}}}} \quad (2)$$

$$\text{La}/\text{Yb} = \frac{(\text{La}_{\text{sample}}/\text{La}_{\text{reference}})}{(\text{Yb}_{\text{sample}}/\text{Yb}_{\text{reference}})} \quad (3)$$

$$\text{La}/\text{Sm} = \frac{(\text{La}_{\text{sample}}/\text{La}_{\text{reference}})}{(\text{Sm}_{\text{sample}}/\text{Sm}_{\text{reference}})} \quad (4)$$

$$Gd/Yb = \frac{(Gd_{sample}/Gd_{reference})}{(Yb_{sample}/Yb_{reference})} \quad (5)$$

式中, sample 和 reference 分别指这种稀土元素在土样中的实测值和该种稀土元素的球粒陨石标准值。

### 1.5 土壤稀土污染及生态风险评价方法

本研究采用地累积指数法、校正污染程度法、污染负荷指数法评价土壤稀土污染程度,采用潜在生态风险指数法进行生态风险评价。具体计算公式及等级划分见表 2。

表 2 污染指数的分类

Table 2 Classification of pollution indices

公式	参数含义	污染等级划分
$I_{geo} = \log_2 \frac{C_x}{1.5C_b}$	$I_{geo}$ :地累积指数 $C_x$ :稀土元素在土壤中的实际测量值( $mg \cdot kg^{-1}$ ) $C_b$ :该稀土元素内蒙古土壤背景值( $mg \cdot kg^{-1}$ ) 1.5:修正系数	$I_{geo} < 0$ :无污染(I级) $0 < I_{geo} \leq 1$ :无污染~中污染(II级) $1 < I_{geo} \leq 2$ :中污染(III级) $2 < I_{geo} \leq 3$ :中污染~重污染(IV级) $3 < I_{geo} \leq 4$ :重污染(V级) $4 < I_{geo} \leq 5$ :重污染~极重污染(VI级) $I_{geo} > 5$ :极重污染(VII级)
$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_x^i}{C_b^i}}{n}$	$mC_d$ :校正污染程度 $C_x^i$ :第 <i>i</i> 个稀土元素的实际测量值( $mg \cdot kg^{-1}$ ) $C_b^i$ :第 <i>i</i> 个稀土元素内蒙古土壤背景值( $mg \cdot kg^{-1}$ ) $n$ :稀土元素数量	$mC_d < 1.5$ :无~极低污染(I级) $1.5 < mC_d \leq 2$ :低污染(II级) $2 < mC_d \leq 4$ :中污染(III级) $4 < mC_d \leq 8$ :高污染(IV级) $8 < mC_d \leq 16$ :很高污染(V级) $16 < mC_d \leq 32$ :极高污染(VI级) $mC_d > 32$ :超高污染(VII级)
$PLI = \sqrt[n]{\frac{C_x^1}{C_b^1} \times \frac{C_x^2}{C_b^2} \times \dots \times \frac{C_x^n}{C_b^n}}$	PLI:某一点污染负荷指数 其余参数意义同上	$PLI < 1$ :无污染(I级) $1 < PLI \leq 2$ :轻度污染(II级) $2 < PLI \leq 3$ :中度污染(III级) $PLI > 3$ :重度污染(IV级)
$PERI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_x^i}{C_b^i}$	PERI:潜在生态风险指数 $E_i$ :稀土元素 <i>i</i> 的单项潜在生态风险指数 $T_i$ :稀土元素 <i>i</i> 的毒性因子(La=1, Ce=1, Pr=5, Nd=2, Sm=5, Eu=10, Gd=5, Tb=10, Dy=5, Ho=10, Er=5, Tm=10, Yb=5, Lu=20, Y=2)	$PERI < 150$ :低风险(I级) $150 \leq PERI < 300$ :中等风险(II级) $300 \leq PERI < 600$ :较强风险(III级) $600 \leq PERI < 1200$ :很强风险(IV级) $PERI \geq 1200$ :极强风险(V级)

### 1.6 数据统计

采用 Excel、SPSS 20.0 进行土壤稀土元素含量及相关性、污染程度、生态风险评价的统计和分析。稀土元素空间分布图、生态风险空间分布图基于 ArcGIS 10.2 制得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤稀土元素含量分析

白云鄂博矿区表层土壤稀土元素含量见表 3。土壤中稀土元素的平均含量由高到低依次为 Ce > La > Nd > Pr > Sm > Y > Gd > Dy > Eu > Tb > Er > Yb > Ho > Tm > Lu, 这与白云鄂博矿石中稀土元素含量以及稀土元素在地壳中丰度的排序较为相似,在分布上基本遵循 Oddo-Harkins 规则<sup>[21]</sup>,说明矿区表层土壤中稀土元素含量主要受地壳丰度影响。土壤样品总稀土含量为 192.96 ~ 54 490.48  $mg \cdot kg^{-1}$ ,平均值为 6 064.95  $mg \cdot kg^{-1}$ ,分别是对照点、内蒙古和中国土壤背景值的 29.24、40.18 和 32.83 倍,说明在稀土矿开采利用过程中,将地下一定深度的矿物携

带于地表环境,使得稀土元素发生了迁移转化,加大了稀土元素向环境的释放量,导致周边土壤出现稀土富集现象。轻稀土元素在稀土总量中占有绝对优势,达到 83%~99%,这一比例与白云鄂博矿石中稀土元素含量变化趋势一致。Ce、La、Pr 和 Nd 是主要的稀土元素,其中 Ce 的含量最高,平均浓度达到 3 143.28  $mg \cdot kg^{-1}$ ,占到总稀土平均含量的 51.83%。轻重稀土的均值分别为 5 943.30  $mg \cdot kg^{-1}$  和 121.65  $mg \cdot kg^{-1}$ ,轻重稀土比值为 48.86,轻稀土元素富集,与南方稀土矿区重稀土元素富集显著不同,具有典型的“南重北轻”的分布特征,这主要是因为北方稀土矿区主要是以铈为主的矿物晶格型轻稀土,而南方地区主要是离子吸附型重稀土矿,矿物类型的不同导致周边土壤中稀土元素呈现出不同的特点<sup>[22]</sup>,表明稀土矿开采活动对稀土元素的含量和分布有影响。

不同功能区表层土壤稀土浓度如图 2 所示。 $\sum REE$ 、 $\sum LREE$  和  $\sum HREE$  总量均远远超过内蒙古背景值平均水平,且均呈现出一致的规律,即采

表 3 白云鄂博矿区表土中稀土元素含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>  
Table 3 REE contents of surface soil in the Bayan Obo mining area/mg·kg<sup>-1</sup>

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	对照	背景值 <sup>[23]</sup>	
							中国	内蒙
La	16 624.04	34.94	1 452.92	2 671.86	1.84	39.19	39.70	36.40
Ce	29 239.75	77.73	3 143.28	5 093.29	1.62	74.04	68.40	52.30
Pr	1 514.87	7.33	249.49	327.50	1.31	9.59	7.17	6.22
Nd	5 603.95	30.71	984.11	1 024.87	1.22	36.05	24.40	20.60
Sm	654.71	7.63	98.43	127.35	1.29	5.95	5.22	4.07
Eu	93.95	1.15	15.07	18.82	1.25	1.21	1.03	0.85
Gd	317.75	4.41	39.52	54.47	1.38	4.97	4.60	3.70
Tb	34.59	1.07	7.46	7.67	1.03	0.88	0.63	0.51
Dy	91.96	3.53	15.38	16.23	1.05	0.88	4.13	3.23
Ho	13.63	0.89	2.38	2.18	0.91	0.97	0.87	0.70
Er	34.93	1.70	6.36	6.39	1.00	3.15	2.50	1.93
Tm	1.26	0.21	0.36	0.18	0.49	0.49	0.37	0.29
Yb	10.36	2.26	3.34	1.31	0.39	3.19	2.44	1.87
Lu	0.77	0.20	0.29	0.09	0.32	0.46	0.36	0.28
Y	253.96	19.20	46.56	39.22	0.84	26.42	22.90	18.00
∑ LREE	53 731.27	159.49	5 943.30	9 317.19	1.57	166.03	145.92	120.44
∑ HREE	759.21	33.47	121.65	126.69	1.04	41.41	38.80	30.51
∑ REE	54 490.48	192.96	6 064.95	9 442.81	1.56	207.44	184.72	150.95
∑ LREE/∑ HREE	70.77	4.77	48.86	—	—	4.01	3.76	3.95
∑ LREE/∑ REE	0.99	0.83	0.98	—	—	0.80	0.79	0.80

1) ∑ REE 为 15 个稀土元素总含量, ∑ LREE 为轻稀土元素 La-Eu 总含量, HREE 为重稀土元素 Gd-Y 总含量

矿区 > 排土场 > 居民区 > 工业区 > 尾矿库, 所有功能区土壤中 ∑ LREE 远高于 ∑ HREE. 稀土含量最高的功能区为采矿区, 表明采矿活动导致了矿区周围土壤稀土元素的严重富集. 同时, 采矿时剥离的表土和废石等排弃物中含有大量的稀土元素, 从露天采场将剥离物堆放到排土场时, 产生的粉尘会随着大气沉降到周围, 造成了排土场周围土壤环境中稀土元素的增加. 此外, 尾矿库在进行尾矿堆存的过程中, 粒度很细的尾矿砂在风力作用下, 十分容易产生扬尘, 进而污染周围环境, 但是白云鄂博矿区尾矿库表面采取了一些抑制扬尘的措施, 如在库体表面进行覆盖, 效果良好, 尾矿库在所有功能区中稀土浓度最低. 值得关注的是居民区土壤中稀土元素含量高于工业区和尾矿库, 这可能是由于白云鄂博矿区属于半干旱气候区, 降水量少且蒸发率高, 常年主导风向为西北风且风速较快, 而居民区正好位于下风方向, 风的吹蚀导致居民区内土壤中稀土元素的积累, 这将极大地增加当地环境和居民健康风险.

## 2.2 土壤稀土元素空间分布

利用 ArcGIS 软件, 对所有样本进行了反距离权重插值分析, 以确定稀土高污染区域及白云鄂博矿区的潜在污染源, 得到的总稀土分布如图 3 所示. 总稀土的高值区域主要集中在主、东和西矿区附近. 距离矿区中心越远, 总稀土浓度越低, 土壤稀土含量与

矿源距离呈显著负相关关系. 在自然条件下, 稀土元素和其他金属离子相比, 迁移性相对较弱<sup>[24]</sup>. 大多数外源稀土元素都固定在固体表面上, 并以惰性形式存在, 集中在矿区周围的土壤表层.

变异系数 (CV) 可用于评价不同土壤样品中稀土元素的变异性, 变异系数越小, 表明稀土元素在空间上分布越均匀, 反之则分布越不均匀. 通常,  $CV \leq 0.1$  被认为是弱变异性;  $0.1 < CV < 1$  是中等变异性;  $CV \geq 1$  是强变异性<sup>[25]</sup>. 从表 3 来看, Ho、Tm、Yb、Lu 和 Y 的变异系数分别为 0.91、0.49、0.39、0.32 和 0.84, 属中等变异水平, 其余稀土元素为强变异水平. 由此可见, 白云鄂博矿区大部分稀土元素分布极不均匀, 受外界干扰较大, 极有可能受到稀土开采、冶炼和其他生产活动的影响.

## 2.3 土壤中稀土元素分布特征

球粒陨石被认为是地球原始物质, 一般认为球粒陨石中不存在轻、重稀土间的分馏, 以球粒陨石为参照对稀土元素进行标准化, 可以消除 Oddo-Harkins 规则造成的稀土元素丰度随原子序数增长的锯齿状变化<sup>[26]</sup>. 对白云鄂博矿区土壤中的稀土元素进行球粒陨石标准化后如图 4 所示, 可以看出各个功能区土壤中稀土元素分布模式相似, 均表现为由左上向右下倾斜, La-Eu 部分较陡, Eu-Y 部分相对较缓, 轻重稀土分馏明显, 轻稀土富集, 重稀土亏

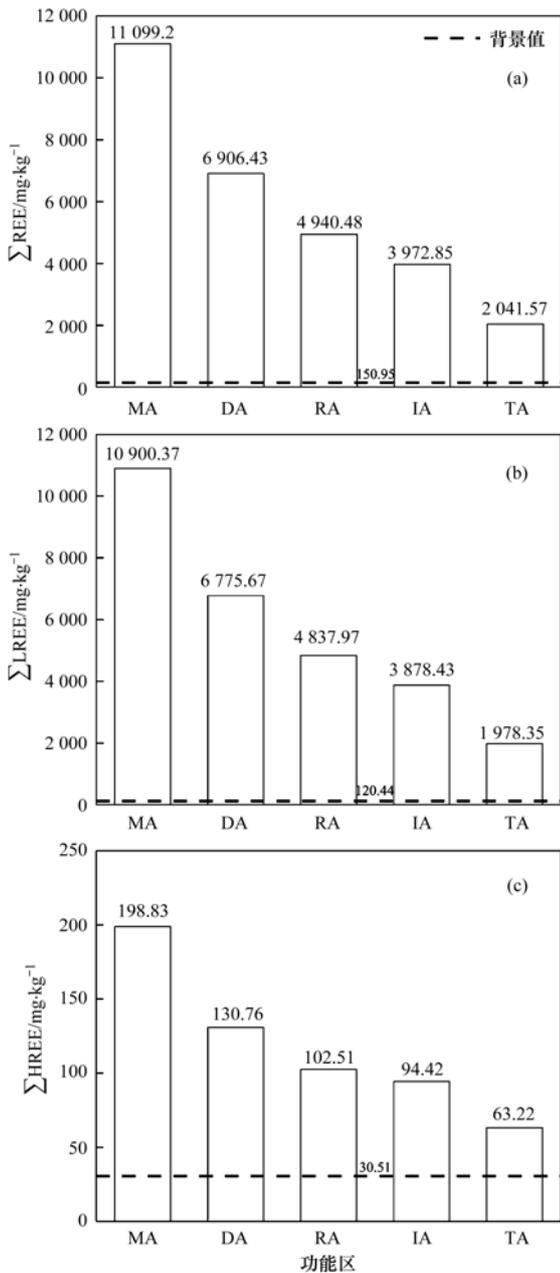


图 2 不同功能区表层土壤稀土含量

Fig. 2 Mean REE concentrations in different functional areas

损. 稀土元素分布模式具有重要指示意义, 各个功能区具有较好一致性, 显示其共同来源属性<sup>[27]</sup>.

表 4 的相关性结果表明, 土壤样品中所有稀土元素之间具有显著的相关性 ( $P < 0.05$ ), 表明这些稀土元素可能有一个共同的污染来源途径, 或是在某些物理和化学条件下具有相似来源. 此外, 稀土元素在土壤中的排序及含量均与其母岩一致, 这进一步说明了白云鄂博矿区土壤中所有稀土元素可能具有相似来源, 地表土壤稀土元素主要是由于采矿生产作业引起的.

白云鄂博矿区土壤中稀土元素的主要特征参数如表 5 所示. Ce 和 Eu 的异常程度用  $\delta Ce$  和  $\delta Eu$  表示, 当  $\delta Ce$  和  $\delta Eu$  值  $> 1$  时, 为正异常, 反之则为负异常<sup>[28]</sup>. 不同功能区的  $\delta Ce$  值在 1.28 ~ 1.30 之间,  $\delta Eu$  值在 0.70 ~ 0.78 之间, 均表现为  $\delta Ce$  正异常,  $\delta Eu$  负异常, Ce 相对富集, Eu 相对亏损. 在自然环境中, Ce 和 Eu 的富集或亏损可能与它们在不同氧化还原条件下的状态和迁移转化能力有关<sup>[29]</sup>. Ce 常见有  $Ce^{3+}$ 、 $Ce^{4+}$  两种价态, 在地表开放体系中,  $Ce^{3+}$  更容易被氧化成  $Ce^{4+}$ .  $Ce^{4+}$  与其他稀土元素相比, 更难以迁移, 从而导致 Ce 在土壤中的富集<sup>[30]</sup>. Eu 属于不相容元素, 同时具有 +2 价和 +3 两种价态, 在氧化岩浆中以  $Eu^{3+}$  形式存在, 但在还原岩浆中以  $Eu^{2+}$  形式优先进入斜长石中, 所以根据岩浆演化来看, 在斜长岩中 Eu 是正异常的, 之后演化出的花岗岩, 由于岩浆中的 Eu 已经随斜长石析出, 所以造成了 Eu 的负异常, 这种亏损是在成土母岩基础上发生的<sup>[31]</sup>.

$La/Yb$  表示轻重稀土的分异程度, 当  $La/Yb > 1$  时, 表示轻稀土元素富集<sup>[32]</sup>. 不同功能区  $La/Yb$  值的范围为 75.57 ~ 397.07, 平均值为 231.33, 表明在白云鄂博矿区轻稀土元素极度富集.  $La/Sm$  和  $Gd/Yb$  的比值可分别作为轻重稀土分馏程度的指

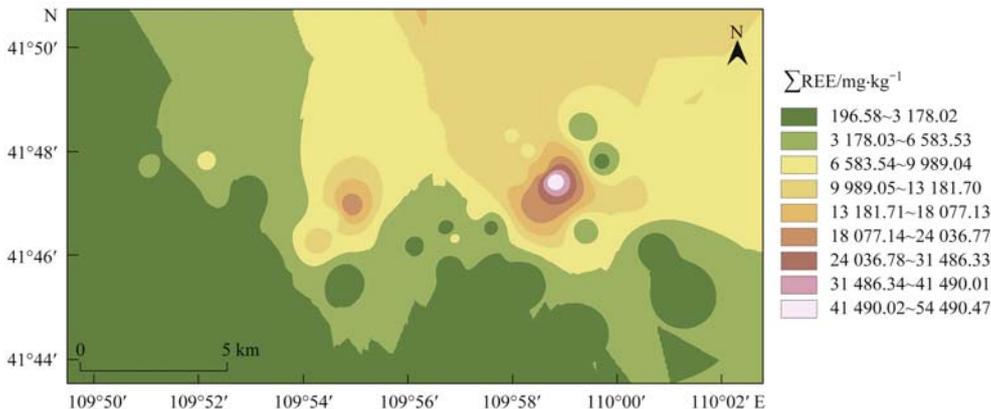


图 3 土壤稀土含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of REE concentrations in soil

表 4 土壤中稀土元素相关性<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson's correlation analysis for REE concentrations in soils

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
La	1														
Ce	0.981*	1													
Pr	0.892*	0.960*	1												
Nd	0.888*	0.945*	0.984*	1											
Sm	0.921*	0.965*	0.975*	0.975*	1										
Eu	0.919*	0.963*	0.981*	0.980*	0.991*	1									
Gd	0.981*	0.990*	0.949*	0.948*	0.971*	0.974*	1								
Tb	0.853*	0.919*	0.973*	0.981*	0.982*	0.983*	0.931*	1							
Dy	0.958*	0.979*	0.964*	0.967*	0.977*	0.984*	0.989*	0.951*	1						
Ho	0.960*	0.964*	0.915*	0.918*	0.970*	0.958*	0.980*	0.929*	0.967*	1					
Er	0.939*	0.977*	0.982*	0.981*	0.984*	0.991*	0.984*	0.969*	0.990*	0.960*	1				
Tm	0.940*	0.950*	0.906*	0.896*	0.940*	0.935*	0.959*	0.894*	0.951*	0.963*	0.955*	1			
Yb	0.938*	0.942*	0.875*	0.865*	0.929*	0.903*	0.939*	0.868*	0.923*	0.969*	0.920*	0.972*	1		
Lu	0.877*	0.874*	0.804*	0.782*	0.830*	0.822*	0.869*	0.761*	0.857*	0.867*	0.861*	0.963*	0.933*	1	
Y	0.981*	0.980*	0.926*	0.921*	0.961*	0.959*	0.993*	0.914*	0.981*	0.989*	0.970*	0.967*	0.955*	0.883*	1

1) \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

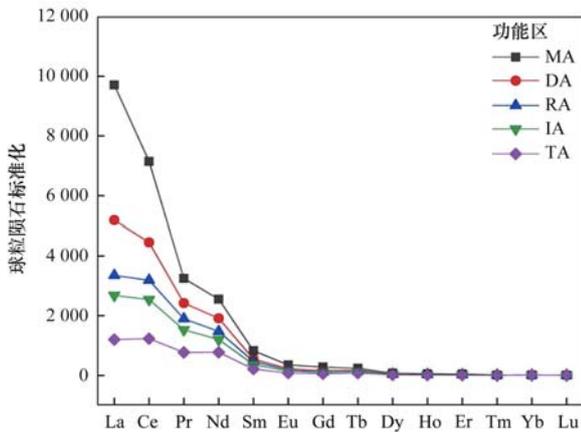


图 4 土壤中稀土元素分布模式

Fig. 4 Chondrite normalized REE distribution patterns in soils

表 5 不同功能区稀土元素特征参数

Table 5 REE characteristic parameters in the soils from different functional areas

功能区	$\delta Ce$	$\delta Eu$	La/Yb	La/Sm	Gd/Yb
MA	1.30	0.73	397.07	9.31	10.59
IA	1.28	0.74	186.87	7.12	7.19
DA	1.28	0.74	314.45	8.69	9.79
TA	1.30	0.70	75.57	5.05	3.85
RA	1.29	0.78	182.7	8.16	6.11

标<sup>[33]</sup>,不同功能区 Gd/Yb 的比值范围为 3.85 ~ 10.59,平均值为 7.51,表明重稀土元素在一定程度上具有分馏性. La/Sm 的比值范围为 5.05 ~ 9.31,平均值为 7.67,略高于 Gd/Yb 的均值,表明轻稀土元素更具有显著的分馏作用.

与白云鄂博矿石中稀土矿物相比,土壤样品中稀土元素呈现出更高的轻重稀土比,以及更为明显的  $\delta Ce$  正异常和  $\delta Eu$  负异常,这些特征除受到稀土元素原始来源的影响之外,在露天开采稀

土的过程中,在白云鄂博矿区较强的风吹蚀作用下,粉尘会随风飘散,也会影响稀土的分布特征<sup>[34]</sup>. 因此,稀土元素的分布特征既受到源区物质组成的影响,同时也受到风化作用和成土作用的影响<sup>[35]</sup>.

## 2.4 土壤中稀土元素污染评价

### 2.4.1 土壤中稀土元素地累积指数评价

白云鄂博矿区稀土元素的  $I_{geo}$  值见图 5. 稀土元素的平均  $I_{geo}$  值大小为 Ce (3.96) > Nd (3.83) > Pr (3.53) > La (3.3) > Sm (2.95) > Tb (2.56) > Eu (2.53) > Gd (1.91) > Dy (1.12) > Ho (0.85) > Er (0.64) > Y (0.51) > Yb (0.19) > Tm (-0.36) > Lu (-0.57),其中 Ce、Nd、Pr 和 La 的均值达到了重污染程度.

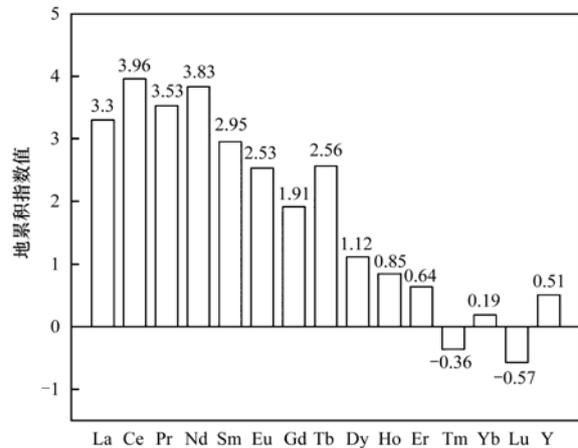


图 5 稀土元素地累积指数值

Fig. 5 The  $I_{geo}$  for REE in soil

地累积结果中不同稀土元素所占百分比(图 6)表明轻稀土元素中 La、Ce、Pr 和 Nd 呈现相似的分布模式,  $I_{geo}$  值变化较大,从 1 ~ 7 级不等,这 4 种元

素中分别有 30%、35%、35% 和 37% 达到了 7 级,说明土壤受到 La、Ce、Pr 和 Nd 的严重污染. Sm 和 Eu 中分别有 21% 和 26% 达到 6 级,23% 和 26% 属于 2

级污染水平. 重稀土元素的  $I_{geo}$  值多分布于 1 和 2 级中,其中 93% 的 Lu 属于未污染水平. 总而言之,土壤中轻稀土元素污染更重.

VII	30%	35%	35%	37%	14%	7%	2%	5%										
VI	9%	16%	14%	14%	21%	26%	5%	16%	2%									
V	16%	9%	9%	9%	14%	9%	26%	19%	5%	2%	2%							2%
IV	12%	14%	14%	14%	14%	16%	16%	19%	19%	7%	14%							2%
III	14%	16%	14%	16%	14%	14%	12%	19%	23%	28%	19%	2%	5%					26%
II	16%	7%	12%	7%	23%	26%	28%	23%	28%	44%	28%	19%	67%	7%	30%			
I	2%	2%	2%	2%		2%	12%		23%	19%	37%	79%	28%	93%	40%			
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y			

图 6 稀土元素地累积指数值在各污染等级中的百分占比  
Fig. 6 Percentages of  $I_{geo}$  of REE in different pollution levels

图 7 中各个功能区土壤中稀土元素  $I_{geo}$  数值范围变化较大,采矿区、排土场、居民区、工业区和尾矿库的范围分别为 0.67 ~ 7.91、1.31 ~ 6.67、1.15 ~ 6.72、0.74 ~ 5.20 和 -0.20 ~ 5.77,平均值分别为 4.42、4.11、3.26、3.61 和 1.88,不同功能区的污染累积程度为采矿区 > 排土场 > 工业区 > 居民区 > 尾矿库. 采矿区和排土场的均值达到了重污染-极严重污染水平,工业区和居民区达到了重污染水平,尾矿库为中度污染水平.

2.4.2 校正污染程度与污染负荷指数评价

校正污染程度评价结果显示[图 8(a)],不同功能区稀土元素的平均  $mC_d$  值范围为 7.14 ~ 31.38,尾矿库属于高污染水平,居民区和工业区属于非常高污染水平,而采矿区和排土场则达到极高污染水平. 稀土元素在不同功能区的污染程度依次为采矿区 > 排土场 > 居民区 > 工业区 > 尾矿库,采

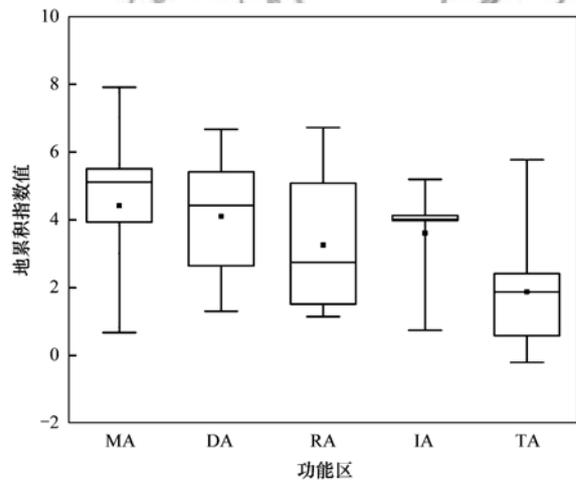


图 7 不同功能区稀土元素地累积指数值

Fig. 7 The  $I_{geo}$  of REE in soils from different functional areas

矿区污染最为严重.

污染负荷指数评价结果显示[图 8(b)],不同

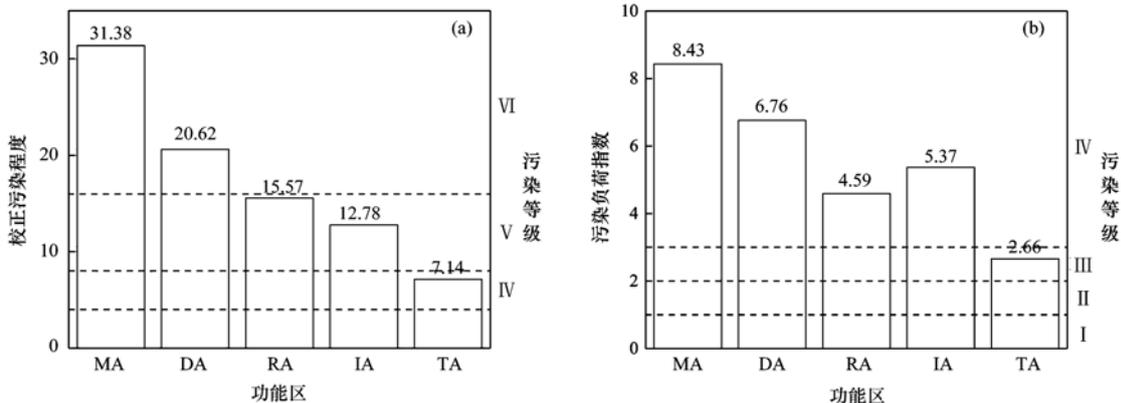


图 8 不同功能区土壤中稀土污染综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of REE pollution in soils from different functional areas

功能区稀土元素的平均污染负荷指数值范围为 2.66~8.43,尾矿库属于中度污染水平,其余功能区则达到重度污染水平.稀土元素在不同功能区的污染程度依次为采矿区>排土场>工业区>居民区>尾矿库,表明采矿活动可能是造成稀土污染的重要来源.

此外,在这几种评价方法中,居民区均显示较为严重的稀土污染,这将威胁到当地居民的健康.白云鄂博矿区的采矿活动时至今日仍在进行,稀土元素在土壤中的累积量将会越来越大,因此该地区应采取长期监测和人体健康风险评估等措施.

## 2.5 潜在生态风险指数法

白云鄂博矿区土壤中稀土元素的潜在生态风险指数范围为 120.99~6 376.46(图 9).根据 PERI 值

的等级划分标准,49%的样点呈现出很强的生态风险,12%的样点呈现较强的生态风险,30%的样点呈现中等风险,有 9%的样点呈现较低的生态风险.Pr、Eu 和 Tb 是主要的生态风险贡献者,在很多样点中都表现出了很强的生态风险,这可能与这 3 种元素在土壤中的浓度及较高的毒性系数有关,表明 Pr、Eu 和 Tb 污染对白云鄂博矿区生态系统构成了极为严重的威胁.

不同功能区稀土元素的平均潜在生态风险指数值范围为 445.72~1 664.03,尾矿库属于较强风险水平,其余功能区则达到很强风险水平.稀土元素在不同功能区的污染程度依次为采矿区>排土场>居民区>工业区>尾矿库.因此,采矿区的污染治理工作亟待加强.

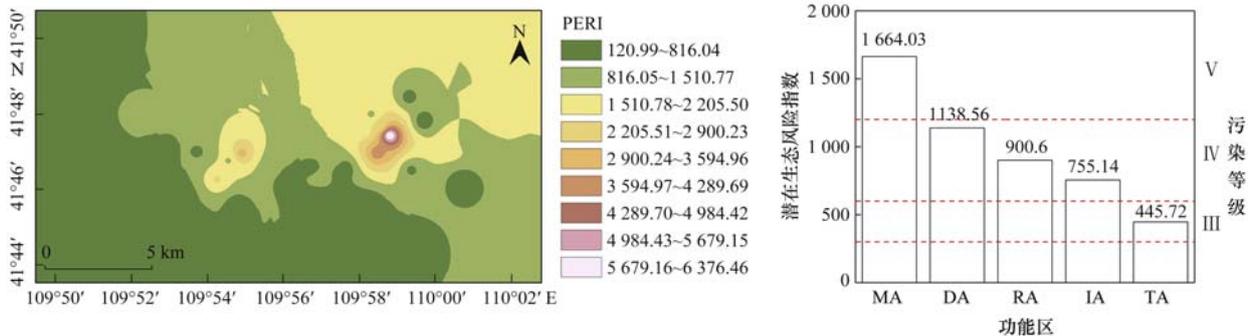


图 9 不同功能区土壤潜在生态风险空间分布及其评价

Fig. 9 Spatial distribution and average values of PERI in soils from different functional areas

综上所述,不同的评价方法得到了几乎相同的研究结果,整个白云鄂博矿区均受到不同程度的稀土污染,其中采矿区的污染程度和生态风险远高于其他功能区,这是因为白云鄂博矿区采用常规爆破和露天开采方式,在穿孔凿岩、爆破、采装、转载、破碎、运输及排岩作业过程中均会有粉尘产生,在风力作用下大量稀土元素会进入周边土壤中,土壤对稀土元素具有很强的吸附性,而且稀土元素的迁移能力较弱,因此造成采矿区附近土壤稀土污染最为严重.

在自然条件下,土壤中稀土元素含量主要由成土母岩决定,成土母岩不一的土壤,稀土含量也不尽相同,但是在自然条件受到强烈干扰的稀土矿区,土壤中稀土含量往往比母岩高很多<sup>[36]</sup>.包头市白云鄂博矿区( $6 064.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、江西赣南地区信丰稀土矿区( $885.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、龙南稀土矿区( $861.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和寻乌稀土矿区( $681.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的总稀土平均含量均远高于中国稀土土壤背景值<sup>[37]</sup>,表明稀土矿的开采会造成周边土壤环境污染.从稀土总量来看,白云鄂博矿区高于赣南离子吸附型稀土矿区,但稀土元素在土壤中的迁移能力以及环境行

为在很大程度上并不取决于其总量,而是受到很多因素的影响,如母岩、风化作用、成土过程、气候、pH 值、氧化还原条件及有机质等<sup>[38]</sup>.在这些因素中,pH 值在控制土壤环境中外源稀土的迁移方面起着极其重要的作用.白云鄂博矿区土壤的 pH 为 7.86~9.67,属于碱性土壤;赣南稀土矿区土壤的 pH 值为 4.51~5.72,属于酸性土壤<sup>[39]</sup>.文献资料表明 pH 与土壤中稀土迁移率呈显著负相关关系,较高的 pH 值能显著提高土壤对稀土元素的吸附,从而降低其迁移率,同时 pH 值也会影响稀土元素在土壤中的存在形态<sup>[40]</sup>.白云鄂博矿区与赣南稀土矿区相比 pH 值更高,稀土元素主要以稳定的残渣态为主,而赣南稀土矿区 pH 值较低,非残渣态稀土元素占比高达 80% 以上,说明赣南矿区稀土元素具有更强的活性和生物有效性<sup>[41]</sup>.因此,白云鄂博矿区虽然受采矿活动影响,周围土壤稀土元素含量较高,但与赣南稀土矿区相比其迁移能力及生物活性较低,环境危害程度更小一些.

针对白云鄂博矿区土壤稀土污染特点,要采取措施加以控制,并对其进行有效修复.目前针对白云鄂博矿区污染治理措施主要以预防为主,如爆

破前在现场洒水以减少粉尘飘散,在尾矿库区采取遮盖措施,防止尾矿粉的扩散等.此外,针对土壤稀土污染,可以采取多种方法联合进行修复.本课题组相关的研究正在进行,包括筛选富集稀土能力较强的当地乡土草本植物,联合微生物菌剂、生物炭等环境功能材料共同修复矿区稀土污染,在改良矿区土壤肥力状况的同时,提高植物对矿区土壤稀土元素的萃取量,为我国北方轻稀土矿区土壤污染修复提供可行的办法.

### 3 结论

(1)受稀土矿开采影响,白云鄂博矿区周边土壤中的稀土元素呈现不同程度的富集.土壤样品总稀土含量为 192.96 ~ 54 490.48  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为 6 064.95  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别是对照点、内蒙古和中国土壤稀土背景值的 29.24、40.18 和 32.83 倍.土壤中稀土元素的平均含量由高到低依次为  $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Pr} > \text{Sm} > \text{Y} > \text{Gd} > \text{Dy} > \text{Eu} > \text{Tb} > \text{Er} > \text{Yb} > \text{Ho} > \text{Tm} > \text{Lu}$ ,这与白云鄂博矿石中稀土元素含量以及稀土元素在地壳中丰度的排序较为相似.轻稀土元素在稀土总量中占有绝对优势,达到 83% ~ 99%,轻稀土元素富集.不同功能区  $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$  和  $\sum \text{HREE}$  总量均远远超过内蒙古背景值平均水平,且均呈现出一致的规律,即采矿区 > 排土场 > 居民区 > 工业区 > 尾矿库,所有功能区土壤中  $\sum \text{LREE}$  远高于  $\sum \text{HREE}$ .总稀土的高值区域主要集中在主、东和西矿区附近,稀土元素分布极不均匀,空间变异性较强.

(2)各个功能区稀土元素的配分曲线具有较好的一致性,均向右倾斜,轻重稀土分馏明显.土壤中稀土元素的标准分布模式具有明显的 Ce 正异常, Eu 负异常,轻稀土富集,重稀土亏损. La/Sm 的比值略高于 Gd/Yb 的比值,表明轻稀土元素更具有显著的分馏作用.所有稀土元素之间具有显著的相关性,在土壤中的排序及含量均与其母岩一致,说明白云鄂博矿区土壤中所有稀土元素可能具有相似的来源,主要是由于采矿生产作业引起的.

(3)采用 4 种方法对研究区土壤中稀土元素污染状况进行评价.由于受采矿活动的影响,整个白云鄂博矿区均受到不同程度的稀土污染,其中采矿区和排土场的污染程度和生态风险远高于其他功能区,矿石开采和加工活动是主要的污染源,相关污染治理和修复工作亟待加强.

#### 参考文献:

[ 1 ] Dinali G S, Root R A, Amistadi M K, *et al.* Rare earth elements

(REY) sorption on soils of contrasting mineralogy and texture [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 279-297.

[ 2 ] Dołęgowska S, Migaszewski Z M. Anomalous concentrations of rare earth elements in the moss-soil system from south-central Poland [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 33-40.

[ 3 ] Romero-Freire A, Minguez L, Pelletier M, *et al.* Assessment of baseline ecotoxicity of sediments from a prospective mining area enriched in light rare earth elements [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 831-839.

[ 4 ] 李梦柯,周丹,高震,等.稻壳生物炭对污染土壤中稀土元素生物有效性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3823-3832.

Li M K, Zhou D, Gao Z, *et al.* Effect of rice husk biochar on bioavailability of rare earth elements in polluted soil [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3823-3832.

[ 5 ] Li Q Q, Zhong H Q, Cao Y. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant [J]. *Chemosphere*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127070.

[ 6 ] 高志强,周启星.稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(12): 2915-2922.

Gao Z Q, Zhou Q X. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(12): 2915-2922.

[ 7 ] 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 characteristic 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.

[ 8 ] Wang L Q, Liang T, Zhang Q, *et al.* Rare earth element components in atmospheric particulates in the Bayan Obo mine region [J]. *Environmental Research*, 2014, **131**: 64-70.

[ 9 ] Wang L Q, Liang T. Geochemical fractions of rare earth elements in soil around a mine tailing in Baotou, China [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep12483.

[ 10 ] Tian S H, Liang T, Li K X. Fine road dust contamination in a mining area presents a likely air pollution hotspot and threat to human health [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 201-209.

[ 11 ] Wang L Q, Liang T. Anomalous abundance and redistribution patterns of rare earth elements in soils of a mining area in Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 11330-11338.

[ 12 ] Wu J, Lu J, Li L M, *et al.* Distribution, pollution, and ecological risks of rare earth elements in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(7): 1816-1831.

[ 13 ] Pagano G, Guida M, Tommasi F, *et al.* Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements—Knowledge gaps and research prospects [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **115**: 40-48.

[ 14 ] Pagano G, Aliberti F, Guida M, *et al.* Rare earth elements in human and animal health: state of art and research priorities [J]. *Environmental Research*, 2015, **142**: 215-220.

[ 15 ] 金姝兰,黄益宗,王斐,等.江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1060-1068.

Jin S L, Huang Y Z, Wang F, *et al.* Rare earth elements content

- in farmland soils and crops of the surrounding copper mining and smelting plant in Jiangxi province and evaluation of its ecological risk[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1060-1068.
- [16] Chen H B, Chen Z B, Chen Z Q, *et al.* Calculation of toxicity coefficient of potential ecological risk assessment of rare earth elements [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **104**(5): 582-587.
- [17] Li K X, Liang T, Wang L Q, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in road dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, **25**(12): 1439-1451.
- [18] Lee E H, Sohn B J. Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(27): 4611-4616.
- [19] Wu C Y. Bayan Obo controversy: carbonatites versus iron oxide-Cu-Au-(REE-U) [J]. *Resource Geology*, 2008, **58**(4): 348-354.
- [20] Li L M, Wu J, Lu J, *et al.* Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **166**: 345-353.
- [21] Xu C, Taylor R N, Li W B, *et al.* Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, **57**: 76-89.
- [22] 李永绣, 张玲, 周新木. 南方离子型稀土的资源 and 环境保护性开采模式 [J]. *稀土*, 2010, **31**(2): 80-85.
- Li Y X, Zhang L, Zhou X M. Resource and environment protected exploitation model for ion-type rare earth deposit in southern of China [J]. *Chinese Rare Earths*, 2010, **31**(2): 80-85.
- [23] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] Liang T, Li K X, Wang L Q. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(3): 1499-1513.
- [25] Ding Q, Cheng G, Wang Y, *et al.* Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 577-585.
- [26] Zhang Y, Gao X L, Chen C T A. Rare earth elements in intertidal sediments of Bohai Bay, China: concentration, fractionation and the influence of sediment texture [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **105**: 72-79.
- [27] 张棕巍, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4504-4513.
- Zhang Z W, Yu R L, Hu G R, *et al.* Geochemical characteristics and source apportionment of rare earth elements in the dustfall of Quanzhou city [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4504-4513.
- [28] Liu C H, Liu J J, Wang J P, *et al.* Geochemical characteristics of rare earth elements and their implications for the Huachanggou gold deposit in Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, **31**(2): 215-226.
- [29] Semhi K, Chaudhuri S, Clauer N. Fractionation of rare-earth elements in plants during experimental growth in varied clay substrates [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, **24**(3): 447-453.
- [30] Xie Y Y, Meng J, Guo L F. REE geochemistry of modern eolian dust deposits in Harbin City, Heilongjiang Province, China: implications for provenance [J]. *CATENA*, 2014, **123**: 70-78.
- [31] Gill L W, Babechuk M G, Kamber B S, *et al.* Use of trace and rare earth elements to quantify autogenic and allogenic inputs within a lowland karst network [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **90**: 101-114.
- [32] Wiche O, Zertani V, Hentschel W, *et al.* Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants on different land use types in the mining area of Freiberg (Germany) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **175**: 120-129.
- [33] Zhao Y, Yu R L, Hu G R, *et al.* Characteristics and environmental significance of rare earth elements in PM<sub>2.5</sub> of Nanchang, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2017, **35**(1): 98-106.
- [34] Lai X D, Yang X Y. Geochemical characteristics of the Bayan Obo giant REE-Nb-Fe deposit: constraints on its genesis [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, **41**: 99-112.
- [35] Huang H B, Lin C Q, Yu R L, *et al.* Spatial distribution and source appointment of rare earth elements in paddy soils of Jiulong River Basin, Southeast China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, **200**: 213-220.
- [36] 程建忠, 车丽萍. 中国稀土资源开采现状及发展趋势 [J]. *稀土*, 2010, **31**(2): 65-69, 85.
- Cheng J Z, Che L P. Current mining situation and potential development of rare earth in China [J]. *Chinese Rare Earths*, 2010, **31**(2): 65-69, 85.
- [37] 温小军. 赣南稀土矿区土壤环境特征及稀土金属地球化学行为研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2012. 7-8.
- Wen X J. Study on characteristics of soil environment and geochemical behavior of rare earth metals in rare earth mining area of southern Jiangxi province [D]. Kunming: Yunnan University, 2012. 7-8.
- [38] Li D C, Huang S B, Wang W H, *et al.* Study on the kinetics of cerium (III) adsorption-desorption on different soils of China [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(4): 663-669.
- [39] 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.
- [40] Cao X D, Chen Y, Wang X R, *et al.* Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(4): 655-661.
- [41] 高效江, 章申, 王立军. 赣南富稀土矿区农田土壤中稀土元素的环境化学特征 [J]. *土壤与环境*, 2001, **10**(1): 11-13.
- Gao X J, Zhang S, Wang L J. Environmental chemistry of rare earth elements (REEs) in the cultivated soil of a typical REE mine in the southern Jiangxi [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, **10**(1): 11-13.

## CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas .....	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt .....	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas .....	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors .....	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China .....	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors .....	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City .....	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park .....	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development .....	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area .....	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter .....	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil .....	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment .....	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hytololephium spectabile</i> Under Salt Stress .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil .....	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice .....	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes .....	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic .....	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ .....	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM <sub>2.5</sub> Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing .....	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an .....	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City .....	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Beijing .....	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City .....	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region .....	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China .....	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter .....	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China .....	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019 .....	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste .....	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polysylls to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas .....	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin .....	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake .....	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries .....	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir .....	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season .....	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring .....	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO <sub>2</sub> Remolded Sediment .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China .....	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Advanced Reduction Process .....	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate .....	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions .....	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility .....	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia .....	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons .....	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) .....	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia .....	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China .....	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields .....	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice .....	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics .....	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field .....	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N <sub>2</sub> O Emission from a Wheat Maize Rotation System .....	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management .....	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)