

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI 和M-AMBI 法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中 BOD ₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季 pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米 Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置 A ² /O- MBR 处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N ₂ O 释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
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	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011 年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面 CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

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

郭伟¹, 付瑞英¹, 赵仁鑫¹, 赵文静¹, 郭江源¹, 张君²

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学化学化工学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 对位于内蒙古草原生态系统的包头尾矿区区和白云鄂博稀土矿区土壤中稀土元素的污染现状和分布特征进行调查研究, 旨在为掌握草原矿区土壤的稀土污染现状并为其治理提供基础数据和理论依据。结果表明, 与内蒙古地区的背景值相比较, 包头尾矿区不同方位土壤中7种稀土元素都存在一定程度的累积, 其含量分布顺序为 $Ce > La > Nd > Pr > Sm > Y > Eu$; 尾矿区各方位土壤稀土污染最严重为距尾矿区边缘50 m范围以内的区域, 最高可达 $La\ 11\ 145.0\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Ce\ 23\ 636.0\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Pr\ 4\ 568.16\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Nd\ 6\ 855.51\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Sm\ 582.18\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Eu\ 94.21\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Y\ 136.25\ mg \cdot kg^{-1}$; 受包头尾矿区常年主导风向西北风的影响, 处于下风向的东南方位污染最为严重, 其次为东北、西南、西北方位。对于白云鄂博矿区而言, 采矿区土壤7种稀土元素的含量明显高于其他区域, 其含量平均值为 $La\ 3\ 112.56\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Ce\ 7\ 142.12\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Pr\ 1\ 467.12\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Nd\ 2\ 552.80\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Sm\ 210.80\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Eu\ 36.20\ mg \cdot kg^{-1}$ 、 $Y\ 63.22\ mg \cdot kg^{-1}$; 调查研究的6个区域稀土元素污染的程度大小顺序为: 采矿区 > 场区外 > 铁路东侧 > 排土场 > 城区外 > 铁路西侧; 另外, 铁路运输矿石也已经造成了沿线土壤的稀土污染, 常年主导风向对铁路沿线土壤中稀土元素的分布有一定的影响。包头尾矿区区和白云鄂博采矿区的土壤具有相似的稀土污染特征, 与尾矿砂中同种稀土元素的含量相对应, 对当地草原生态系统的健康稳定构成了威胁。

关键词: 包头尾矿区; 白云鄂博矿区; 土壤; 稀土污染; 分布特征

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1895-06

Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia

GUO Wei¹, FU Rui-ying¹, ZHAO Ren-xin¹, ZHAO Wen-jing¹, GUO Jiang-yuan¹, ZHANG Jun²

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: The pollution status and distribution characteristic of rare earth elements in soil were analyzed around Bayan Obo mining area and Baotou tailing reservoir located in Inner Mongolia grassland ecosystem, aiming at grasping the overall situation of grassland ecosystem pollution caused by rare earth elements and providing basic information as well as theoretical basis. The results indicated that seven rare earth elements in soils from different directions of Baotou tailing reservoir accumulated to a certain extent compared to the soil background value of Inner Mongolia. The pollution degree was $Ce > La > Nd > Pr > Sm > Y > Eu$. Within 50 m from the edge of tailing reservoir, soil rare earth contamination was the most serious, with the concentrations of La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu and Y reaching $11\ 145.0\ mg \cdot kg^{-1}$, $23\ 636.0\ mg \cdot kg^{-1}$, $4\ 568.16\ mg \cdot kg^{-1}$, $6\ 855.51\ mg \cdot kg^{-1}$, $582.18\ mg \cdot kg^{-1}$, $94.21\ mg \cdot kg^{-1}$, and $136.25\ mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Owing to the dominant wind direction of northwest, soils from the southeast were contaminated most seriously. For Bayan Obo mining area, the concentrations of seven rare earth elements in soil from the mining area were significantly higher than those of other areas investigated, with the concentrations of La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu and Y reaching $3\ 112.56\ mg \cdot kg^{-1}$, $7\ 142.12\ mg \cdot kg^{-1}$, $1\ 467.12\ mg \cdot kg^{-1}$, $2\ 552.80\ mg \cdot kg^{-1}$, $210.80\ mg \cdot kg^{-1}$, $36.20\ mg \cdot kg^{-1}$ and $63.22\ mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The soils of six areas of Bayan Obo mining area were all contaminated by rare earth elements, and the contamination degree was in the order of mining area > outside the dump > east side of the railway > the dump > outside the urban area > west side of the railway. Besides, the transportation of rare earth ore led to the soil rare earth contamination along the railway, and the distribution characteristic of rare earth elements in soils along the railway was affected by the dominant wind direction of northwest. Baotou tailing reservoir and Bayan Obo mining area had the same contamination characteristic, and the concentrations of rare earth elements were in accordance with those in the tailings. The health and stabilization of local grassland ecosystem are being threatened by excessive soil rare earth elements.

Key words: Baotou tailing reservoir; Bayan Obo mining area; soil; rare earth contamination; distribution characteristic

收稿日期: 2012-08-22; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40861018, 31200421); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0603); 教育部科学技术研究重点项目(210032); 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B03); 中国博士后科学基金面上项目(20100471489)

作者简介: 郭伟(1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染控制与治理技术、矿区生态恢复, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

中国是世界上稀土资源最丰富的国家,在世界上占有资源储量、稀土产量、稀土销售量和稀土用量4个第一^[1]。稀土元素被称为“工业黄金”,因其独特的物理化学性质,被广泛应用于新能源、新材料、节能环保、航空航天、电子信息以及农业等领域^[2,3]。近年来,随着科技以及经济的快速发展,尤其是各种高精尖材料的迅速发展,使得人类对于稀土矿物的需求越来越大。稀土的广泛应用在造福人类的同时,也使得大量的稀土元素进入了环境,导致了多种多样的生态环境问题,并威胁着动植物以及人类的健康^[4,5]。

内蒙古是我国北方最重要的轻稀土生产体系,包头白云鄂博矿是世界上最大的铁、稀土、铌共生矿床,稀土中富含La、Ce、Sm和Eu等轻稀土元素,占全国储量的80%以上,占世界储量的38%以上^[6]。包头稀土尾矿区周边土壤的严重污染,使得耕地严重退化,粮食减产甚至绝产,牲畜大量死亡,村民的健康受到了严重威胁^[7]。目前,稀土矿区及尾矿库区土壤稀土元素的污染问题已经引起了公众以及专家的广泛关注^[8,9]。国内外关于稀土元素的土壤污染问题主要集中在稀土元素的形态、作用、毒理以及在土壤中的转化等几个领域^[10],而关于草原生态系统矿区土壤中稀土元素的污染状况和分布特征方面的研究则鲜有报道。内蒙古的稀土矿藏开采活动处于抗干扰能力较弱的草原生态系统中,其导致的生态破坏与环境污染问题也更加严重,具有其特殊性。因而,在对该地区的稀土矿产资源进行开发的同时,有必要对矿区周围的生态环境及污染状况进行一个详细的调查,为后续的污染治理提供一定的支持。

本研究对位于内蒙古草原生态系统的白云鄂博矿区、包头尾矿库区以及由白云鄂博矿区通往包头选矿厂的铁路沿线土壤中稀土元素的污染现状和分布特征进行了调查分析,旨在为草原生态系统土壤稀土污染治理和稀土矿区生态恢复提供科学的理论依据,从而减少矿产资源的开发和利用过程中稀土元素对人类和当地草原生态系统造成的危害。

1 研究区概况

白云鄂博矿区属内蒙古自治区包头市所辖,距包头市区149 km,矿区面积328 km²,居住总人口约3万人^[11]。其中,稀土矿物以独居石和氟碳铈钨矿为主^[12]。白云鄂博矿区开采方式为露天开采,矿石

经铁路运输至包头选矿厂,经选矿后剩余的尾矿砂直接输入尾矿库贮存。包头尾矿库于1965年8月投入使用,是堆积选矿后的矿渣和废水专用地,内含有超过930万t的稀土^[13]。尾矿库由平地矿粉筑坝,东西宽约3.2 km,南北长约3.5 km,坝体周长11.5 km,占地面积约12 km²。包头尾矿库与白云鄂博矿区同属内陆干燥气候区,土壤类型以栗钙土为主,低温少雨,干旱多风,温差变化大,常年主导风向为西北风^[14]。经分析测定稀土尾矿砂中14种稀土元素的含量见表1。

表1 包头尾矿坝尾矿砂中稀土元素的含量¹⁾

Table 1 Concentrations of the rare earth elements in the tailings of Baotou tailing reservoir

稀土元素	含量/mg·kg ⁻¹
La	12 460.15 ± 455.18
Ce	26 956.13 ± 866.13
Pr	5 198.87 ± 201.13
Nd	7 799.98 ± 291.76
Sm	544.41 ± 22.19
Eu	83.04 ± 3.30
Gd	91.92 ± 6.07
Tb	40.85 ± 3.01
Dy	8.92 ± 3.60
Ho	3.90 ± 0.20
Tm	8.76 ± 1.39
Yb	7.79 ± 0.26
Lu	3.28 ± 0.08
Y	140.05 ± 5.73

1) 表中数据为3个样本的算术平均值 ± 标准差

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

包头尾矿库区常年主导风向为西北风,以此为依据共设计了4个采样方位,如图1所示,分别为垂直于主导风向的东北方位(S1)和西南方位(S3),下风向的东南方位(S2)以及上风向的西北方位(S4)。以尾矿库底边缘为起始点,由近及远分别采集50、100、300和500 m范围内的土壤样品各6个,每个方位采样24个,以期研究该地区主导风向对尾矿库周边地区土壤稀土元素污染的影响。根据白云鄂博矿区的实际布局情况结合主导风向西北风,有针对性的把调查采样区划分为6个区域,如图1中S5~S10(S5矿区内,S6排土场,S7场区外,S8城区外,S9铁路东,S10铁路西)采样样本数分别为19、13、9、13、8和8;负责运输铁矿石至包头选矿厂的铁路两侧区域沿垂直铁路方向采集50 m范围内的土壤样品。在白云鄂博各采样区域内采取随机布点采

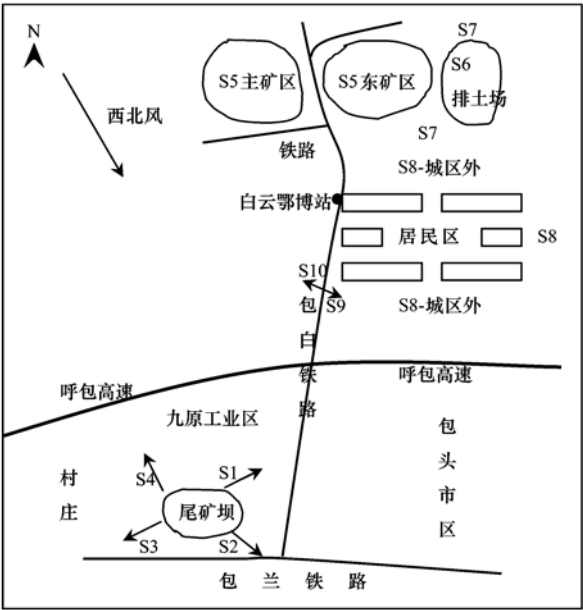


图1 包头稀土矿区土壤样品采集区域示意

Fig. 1 Collecting areas of soil samples in Baotou rare earth mining area

样的方法,根据实际情况选择棋盘式采样法、蛇形采样法、对角线采样法或梅花形采样法. 对包头和白云鄂博所选定的 10 个区域在 2009 年 5 ~ 9 月间进行采样,每个采样点采用多点取样混合为一个代表样的方法,采样深度为 0 ~ 20 cm,每个混合样采集 1 ~ 2 kg. 研究区土壤的基本理化性质见表 2. 在两个研究区域内采用随机布点取样的方法,多点取样混合成一个样品,测定其基本理化性质. 采用电位法测定土壤 pH 值(土:水为1:2.5),采用重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质的含量;采用凯氏定氮法测定土壤全氮;采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷;采用碳酸氢钠法测定土壤速效磷;采用乙酸铵提取法测定土壤速效钾;采用乙酸铵法测定土壤阳离子交换量.

2.2 土壤样品前处理与分析

土壤样品采集后去除沙砾、植物根系等异物,避光自然风干,对每一份样品采用四分法取样进行磨碎处理,过100目(0.149mm)土壤筛,保存待消煮

表 2 土壤的基本理化性质¹⁾

Table 2 Physical and chemical properties of the soil in mining area							
研究区域	pH	有机质/%	全 N/%	全 P/%	速效 P/mg·kg ⁻¹	速效 K/mg·kg ⁻¹	CEC/cmol ⁺ ·kg ⁻¹
包头尾矿库区	7.38 ± 0.58	1.59 ± 0.77	0.10 ± 0.04	0.11 ± 0.08	11.0 ± 8.22	86.5 ± 37.4	13.7 ± 2.85
白云鄂博矿区	7.23 ± 0.95	1.52 ± 0.83	0.12 ± 0.05	0.13 ± 0.06	8.36 ± 4.50	92.4 ± 33.7	15.1 ± 3.06

1) 表中数据为 3 个样本的算术平均值 ± 标准差

测定. 土壤样品的分析采用王水-高氯酸(HNO₃-HCl-HClO₄)开放式消煮,称取土壤 1 g 左右,加王水 5 mL,120℃消煮 24 h 左右,至消煮液为 1 mL 左右,冷却至室温后加高氯酸 3 mL,140℃继续消煮 72 h,直至土壤消煮至灰白色,消煮液透明澄清为止. 消煮过程结束后,消煮液用超纯水定容至 50 mL 容量瓶中,然后过滤到经酸泡过的干净 PE 塑料瓶. 空白样品和标准样品(GBW 07446,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所)同时消煮,以确保消煮及以后测定的准确度和用于回收率的计算. 标准土壤样品中各元素的回收率可达 85% ~ 110%. 采用 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 7000 DV, PerkinElmer) 测定土壤样品消煮液中稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu 和 Y 的浓度.

3 结果与讨论

3.1 包头尾矿库不同方位土壤中稀土元素的含量及分布特征

包头尾矿库东北、东南、西南和西北 4 个方位土壤稀土元素的含量见表 3. 从中可知,尾矿库 4 个方位上 7 种稀土元素的含量均显著高于内蒙古地区的几何平均值,且全量超标率均达到 100%,其含量分布顺序均为 Ce > La > Nd > Pr > Sm > Y > Eu. 除东北方向上 500 m 处土壤稀土元素的含量高于 300 m 外,其余各个方位上土壤稀土元素的含量均随着距尾矿库边缘距离的增加而显著降低. 尾矿库东南方位土壤各稀土元素的含量最高,其次为东北方位、西南方位,西北方位土壤各稀土元素含量最低. 对不同方位土壤各稀土元素的平均含量进行显著性分析,结果表明东南方位土壤稀土元素含量显著高于东北、西南及西北方位土壤稀土元素含量,东北、西南及西北这 3 个方位间土壤稀土元素含量未达到显著性差异水平. 其中,东南方位 50 m 处各稀土元素的含量最高,分别为内蒙古地区土壤稀土元素含量几何平均值的 340 倍、481 倍、804 倍、357 倍、153 倍、116 倍及 8 倍.

表 3 包头尾矿库 4 个不同方位土壤中稀土元素的含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Concentrations of rare earth elements in the soil of four different directions of Baotou tailing reservoir/mg·kg ⁻¹								
方向	距离/m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Y
东北方向	50	2 659.68 ± 853.11	5 786.66 ± 1 775.30	994.32 ± 342.79	1 515.65 ± 476.86	137.37 ± 31.97	21.38 ± 5.63	44.89 ± 7.88
	100	836.99 ± 481.49	1 865.67 ± 1 025.24	303.90 ± 147.92	487.74 ± 238.58	49.98 ± 24.83	11.83 ± 3.56	23.43 ± 6.82
	300	287.58 ± 44.86	684.75 ± 95.80	126.95 ± 18.23	209.65 ± 27.47	20.99 ± 3.33	7.53 ± 0.48	15.54 ± 0.68
	500	376.15 ± 45.95	878.41 ± 119.34	176.69 ± 17.82	264.69 ± 36.94	26.34 ± 4.27	8.39 ± 0.57	16.19 ± 1.00
	平均值	1 040.10b	2 303.87b	400.46b	619.43b	58.67b	12.28b	25.01b
东南方向	50	11 145.00 ± 257.58	23 636.00 ± 426.96	4 568.16 ± 86.57	6 855.51 ± 105.18	582.18 ± 38.39	94.21 ± 8.76	136.25 ± 7.29
	100	9 756.83 ± 346.08	20 704.10 ± 781.95	3 993.52 ± 137.68	5 974.18 ± 191.34	493.76 ± 11.67	76.39 ± 1.95	128.20 ± 1.79
	300	1 947.40 ± 794.68	4 157.91 ± 1 662.74	804.90 ± 331.63	1 191.63 ± 477.85	102.90 ± 37.84	19.58 ± 5.44	35.65 ± 9.03
	500	1 117.79 ± 553.63	2 422.78 ± 1 160.03	454.41 ± 234.36	697.54 ± 331.55	63.81 ± 28.13	13.97 ± 4.09	25.75 ± 6.96
	平均值	5 991.76a	12 730.20a	2 455.25a	3 679.71a	310.66a	51.04a	81.46a
西南方向	50	1 963.70 ± 511.00	4 280.04 ± 1 087.06	835.45 ± 219.36	1 262.20 ± 312.06	123.78 ± 24.50	22.51 ± 3.68	38.87 ± 5.63
	100	681.18 ± 58.59	1 403.34 ± 121.86	328.28 ± 27.73	439.21 ± 34.29	51.11 ± 4.20	10.82 ± 0.69	20.16 ± 0.43
	300	175.93 ± 62.09	359.16 ± 129.27	84.86 ± 31.03	121.83 ± 40.12	16.05 ± 4.41	5.67 ± 0.65	13.72 ± 0.78
	500	96.25 ± 17.83	192.26 ± 35.46	44.06 ± 8.01	68.43 ± 10.50	10.49 ± 1.25	4.82 ± 0.17	13.61 ± 0.20
	平均值	729.26b	1 558.70b	323.16b	472.92b	50.36b	10.96b	21.59b
西北方向	50	441.01 ± 52.63	914.18 ± 109.50	213.36 ± 26.65	296.68 ± 35.78	36.49 ± 3.74	8.60 ± 0.56	20.72 ± 0.47
	100	273.14 ± 37.35	584.35 ± 81.74	140.45 ± 21.48	195.31 ± 25.48	24.62 ± 2.52	6.92 ± 0.45	18.27 ± 0.90
	300	243.26 ± 19.74	505.37 ± 38.6	117.94 ± 8.86	169.27 ± 12.27	22.06 ± 1.35	6.49 ± 0.21	17.98 ± 0.50
	500	160.52 ± 44.7	332.13 ± 95.11	80.08 ± 21.04	113.14 ± 28.75	16.43 ± 3.20	5.69 ± 0.47	15.64 ± 1.20
	平均值	279.48b	584.01b	137.96b	193.60b	24.90b	6.93b	18.15b
内蒙古土壤几何平均值 ^[15]		32.8	49.1	5.68	19.2	3.81	0.81	17.0

1)表中数据为 3 个样本的算术平均值 ± 标准差,同一列中平均数数值标注不同字母表示在 5% 显著水平差异显著,下同

由尾矿库不同方位土壤各稀土元素含量均显著高于内蒙古地区的几何平均值可知,尾矿库的存在导致了其周边地区土壤中稀土元素的累积,造成了土壤的稀土污染问题,且距尾矿库边缘越近,污染状况越严重.该结论与曲蛟等^[16]及孙庆业等^[17]的研究结论相似,即污染状况会随着距污染源距离的增加而有所减轻.比较表 3 和表 1 中各稀土元素的含量可知,尾矿库周围地区土壤稀土元素的含量大小趋势与尾矿砂中相应稀土元素的含量相一致,说明了尾矿砂中稀土含量的高低对周边土壤环境中相应稀土元素的累积具有强烈的影响.尾矿库 4 个不同方位土壤中稀土元素的含量分布表明,包头地区的常年主导风向对于稀土尾矿污染物的空间分布状况具有显著影响.由于包头地区常年主导风向为西北风且地势平坦开阔,因此外露的尾矿砂会随风飘散并沉积于主导风向的下风向,也就是东南方向,从而导致东南方向土壤中稀土元素含量最高而上风向西北方位土壤中稀土元素含量最低.王哲等^[18]和郭伟等^[14]也曾对包头尾矿库不同方向上的重金属污染状况做了调查和评价,均得出相同的结论,认为该地区常年主导风向对于污染物分布的空间差异有显著影响.通过以上结论与分析,包头尾矿库区的土壤环境治理与污染防治工作的重点为在尾矿库坝体

外坡采取抑尘措施,可以防止尾矿粉的扩散,抑制尾矿库区周边土壤稀土污染程度进一步加重.坝体外坡的抑尘防护可以采取工程措施,但成本较高;也可以在尾矿库外坡种植适宜的本地草本植物,一方面可以加固坝体,另一方面又可起到固定尾矿粉的作用.相关的研究正在进行,包括筛选适宜的本地草本植物品种,同时采取生物工程措施接种丛枝菌根真菌加强草本植物对于尾矿砂基质毒害的抗性,均已经取得初步的研究结果.

3.2 白云鄂博矿区土壤中稀土元素的含量及分布特征

白云鄂博矿区所调查的不同区域土壤稀土元素的含量如表 4 所示.从中可知,矿区内的土壤 7 种稀土元素的平均含量均显著高于内蒙古地区的几何平均值,最大含量分别为 La 5 189.81 mg·kg⁻¹、Ce 11 593.41 mg·kg⁻¹、Pr 2 267.73 mg·kg⁻¹、Nd 3 710.03 mg·kg⁻¹、Sm 299.16 mg·kg⁻¹、Eu 47.42 mg·kg⁻¹、Y 72.54 mg·kg⁻¹,分别是内蒙古地区几何平均值的 158 倍、236 倍、399 倍、193 倍、78 倍、58 倍、4 倍.排土场、场区外、城区外以及铁路东、西两侧土壤中各稀土元素含量的平均值也显著高于内蒙古地区的几何平均值.就白云鄂博矿区通往包头选矿厂的铁路东、西两侧土壤稀土元素的含量而言,铁

路东侧土壤稀土元素含量高于铁路西侧,但没有达到显著性差异水平. 而就白云鄂博矿区的 6 个调查区域而言,土壤稀土元素的含量按矿区内、场区外、铁路东、排土场、城区外、铁路西侧的顺序递减,除矿区内的土壤稀土元素含量显著高于其它 5 个区域外 ($P < 0.05$),其它区域间均未达到显著性差异水平. 在 6 个调查区域中,7 种稀土元素的含量分布具有一致性,为 $Ce > La > Pr > Nd > Sm > Y > Eu$. 在 7 种被测稀土元素中,除 Y 的全量超标率为 83.33% 外,其余 6 种元素的全量超标率均达到 100%.

表 4 白云鄂博矿区土壤稀土元素含量描述性统计/ $mg \cdot kg^{-1}$

Table 4 Descriptive statistics of rare earth elements concentrations in the soils of Bayan Obo mining area/ $mg \cdot kg^{-1}$							
采样区	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Y
矿区内最大值	5 189.81	11 593.41	2 267.73	3 710.03	299.16	47.42	72.54
矿区内最小值	1 229.27	2 264.24	577.42	746.51	110.34	25.35	43.53
平均值 $\pm$ 标准误差	3 112.56 $\pm$ 631.65a	7 142.12 $\pm$ 1 563.44a	1 467.12 $\pm$ 292.71a	2 552.80 $\pm$ 553.09a	210.80 $\pm$ 30.51a	36.20 $\pm$ 3.43a	63.22 $\pm$ 4.26a
排土场最大值	1 184.13	2 314.87	522.95	695.11	81.09	15.52	24.40
排土场最小值	584.25	1 296.11	253.74	340.33	41.67	8.78	20.85
平均值 $\pm$ 标准误差	780.15 $\pm$ 87.89b	1 585.24 $\pm$ 158.10b	324.24 $\pm$ 41.41b	440.21 $\pm$ 54.50b	51.71 $\pm$ 6.10b	10.57 $\pm$ 1.07b	22.81 $\pm$ 0.62b
场区外最大值	3 462.08	6 936.13	1 150.25	1 472.14	164.77	29.40	69.26
场区外最小值	321.12	816.10	183.15	354.73	42.43	8.60	23.51
平均值 $\pm$ 标准误差	1 803.71 $\pm$ 622.79bc	3 616.40 $\pm$ 1 189.23b	619.34 $\pm$ 184.61b	835.02 $\pm$ 221.70b	94.54 $\pm$ 24.29b	17.35 $\pm$ 3.75b	38.82 $\pm$ 7.33bc
城区外最大值	2 240.52	4 824.85	964.57	1 421.16	131.59	22.06	38.12
城区外最小值	279.00	650.75	135.69	244.86	23.25	4.24	10.23
平均值 $\pm$ 标准误差	762.69 $\pm$ 306.72bc	1 673.02 $\pm$ 654.04b	333.59 $\pm$ 130.64b	519.97 $\pm$ 186.60b	49.86 $\pm$ 17.13b	10.16 $\pm$ 2.68b	17.29 $\pm$ 4.52cd
铁路东侧最大值	1 356.15	2 981.65	560.02	808.53	94.20	17.26	38.74
铁路东侧最小值	685.13	1 628.74	334.23	481.04	56.22	11.14	26.42
平均值 $\pm$ 标准误差	965.15 $\pm$ 96.98bc	2 145.71 $\pm$ 201.24b	462.33 $\pm$ 39.76b	638.73 $\pm$ 56.09b	74.78 $\pm$ 6.19b	13.92 $\pm$ 0.96b	31.70 $\pm$ 1.96d
铁路西侧最大值	934.70	2 090.73	375.32	566.30	66.60	17.85	27.22
铁路西侧最小值	350.20	804.39	135.18	189.20	21.79	10.92	11.26
平均值 $\pm$ 标准误差	516.74 $\pm$ 88.33c	1 208.83 $\pm$ 192.74b	205.90 $\pm$ 36.89b	318.92 $\pm$ 58.44b	38.01 $\pm$ 7.26b	13.35 $\pm$ 1.12b	16.09 $\pm$ 2.47d
内蒙古土壤几何均值 ^[15]	32.8	49.1	5.68	19.2	3.81	0.81	17.0

综合以上分析可知,稀土矿石的开采将地下一定深度的矿物暴露于地表环境,致使矿物的化学形态和存在形式发生了改变,加大了稀土元素向环境的释放通量,造成矿区内的土壤稀土污染问题. 郑佳佳等^[19]对广东大宝山矿区土壤进行分区域研究也说明矿区内部污染程度最为严重;同时,稀土矿的开采,也造成了排土场、场区外、城区外与铁路东、西两侧土壤环境中稀土元素的逐渐积累. 采矿时剥离的表土及废石中含有大量的稀土元素,堆放至排土场造成了排土场土壤环境中稀土元素的增加;城区外的土壤之所以也受到了稀土元素的污染,一方面是因为其本身正处在稀土矿开采区的下风向,另一方面可能是由于运输稀土矿石的铁路从城区外围通过. 另外,负责运输矿石的铁路两侧土壤也受到稀土元素的污染,这是由于长期以来运输过程未采取有效防护措施,稀土矿石洒落后经风蚀、淋洗等因素作用造成的稀土元素的释放和污染. 受该地区常年主导风向西北风的影响,污染的特征是处于下风向的铁路东侧区域土壤稀土元素污染程度

要大于处于上风向的铁路西侧区域. 曲蛟等^[16]对葫芦岛市钼矿区交通运输干线周边菜地土壤所进行的研究表明,菜地土壤重金属污染的主要原因也是矿石运输过程中矿石的遗落等作用造成的,这对运输干线附近范围内重金属的污染有较强的作用. 王再岚等^[20]对鄂尔多斯地区公路两侧土壤的研究也表明了运输煤和其他矿石会造成重金属污染. 建议相关部门改善稀土矿石的运输方式,对稀土矿石运输火车进行改装,并用蓬布等遮盖,矿石运输造成的稀土污染将会得到有效控制.

研究发现稀土元素不仅具有增加作物产量、改善作物品质、提高植物光合作用、促进根系活力、促进对矿质营养元素的吸收等植物生理效应,还具有减轻病虫害、酸雨、重金属、臭氧与紫外辐射和农药等对植物损害的作用,提高植物抗逆性的环境生态效应^[21, 22]. 但是稀土元素的这些生理或环境生态效应与土壤环境中其含量高低具有直接的相关性,呈现“低促高抑”的 Hormesis 效应,即低剂量时对生物体产生有益反应,而高剂量时则产生有害反应^[22]. 近年

来稀土矿藏的开采,导致稀土元素在土壤环境中的逐渐累积. 稀土元素可通过食物链富集于人体内,且不属于人体必要的生命元素,目前也尚未发现稀土元素会在人体内进行转化. 多种生物毒理学效应研究表明,长期低剂量摄入稀土对脑、肝、骨、内分泌和免疫功能等具有非常广泛的生物学毒效应谱,能导致多种毒害和病变^[23]. 因此,治理稀土矿藏开采所造成的土壤环境污染,不仅关系到土壤环境的健康与否,更关系到与土壤环境健康息息相关的人体健康,已经成为了一个急需被重视并解决的问题. Chen 等^[24, 25]研究表明,接种丛枝菌根真菌可显著促进紫云英对 P 的吸收,降低紫云英地上部对 Cu 和 Zn 等的吸收,有效减轻稀土 La 对紫云英的毒害. 上述研究结果表明,丛枝菌根对于土壤稀土污染的修复具有重大的理论价值和现实生态意义,今后应针对这个方向做进一步的深入研究.

本调查研究只针对采矿活动对白云鄂博矿区、包头尾矿库区土壤中稀土元素的空间分布状况的影响,并未对被污染地区土壤中各稀土元素的形态及其迁移转化过程进行研究. 而稀土元素作为重金属元素的一种,其存在形态的不同对生物的毒性以及转化方式也有所不同. 因此,在今后的研究工作中,应考虑到这一点,进行全面的分析调查,以期为该地区的生态恢复和可持续性发展奠定基础.

4 结论

(1)测定分析结果表明,稀土矿石的开采、运输、废弃矿石和尾矿的堆积等过程均已造成了土壤中稀土元素的累积,不同调查区域土壤中稀土元素的污染程度和分布特征不同.

(2)尾矿库区土壤稀土元素的含量与距尾矿坝边缘的距离呈负相关,常年的主导风向是影响包头尾矿库区周边土壤稀土元素分布特征的主导因素.

(3)铁路运输矿石已经造成沿线土壤的稀土污染,同样受主导风向的影响,铁路东侧区域土壤稀土污染程度大于铁路西侧区域.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨万喜, 宋洪芳, 洪梅. 内蒙古自治区稀土产业发展现状及思路[J]. 稀土信息, 2011, (12): 4-7.
- [3] Ouyang J, Wang X D, Zhao B, *et al.* Effects of rare earth elements on the growth of *Cistanche deserticola* cells and the production of phenylethanoid glycosides [J]. Journal of Biotechnology, 2003, **102**(2): 129-134.

- [4] 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.
- [5] 朱建华, 徐群英, 袁兆康, 等. 稀土污染环境的致突变研究[J]. 江西医学检验, 2006, **24**(5): 385-387.
- [6] 程建忠, 侯运炳, 车丽萍. 白云鄂博矿床稀土资源的合理开发及综合利用[J]. 稀土, 2007, **28**(1): 70-74.
- [7] 梁孟. 内蒙古稀土产业优化升级的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2011. 11-12, 16.
- [8] 温小军, 张大超. 资源开发对稀土矿区耕作层土壤环境及有效态稀土的影响[J]. 中国矿业, 2012, **21**(2): 44-47, 54.
- [9] 滕达, 苏庆平, 顾秋香, 等. 稀土尾矿区 10 种植物对重金属的吸收与富集作用[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(2): 798-799, 804.
- [10] Wang J C, Liu X S, Yang J, *et al.* Development and prospect of rare earth functional biomaterials for agriculture in China[J]. Journal of Rare Earths, 2004, **24**(S1): 427-431.
- [11] 李俐. 白云鄂博铁矿矿产资源的现状及其开发利用前景[J]. 包钢科技, 2003, **9**(2): 1-3.
- [12] 高海洲. 白云鄂博矿区稀土稀有矿产资源综合评述(一)[J]. 包钢科技, 2009, **35**(5): 1-6.
- [13] 王建宏. 包钢尾矿坝外源稀土积累区土壤微生物特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2011. 1.
- [14] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 3099-3105.
- [15] 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.
- [16] 曲蛟, 马振宇, 丛俏, 等. 钼矿区交通运输干线周边菜地土壤重金属污染分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 178-181.
- [17] 孙庆业, 田胜尼. 尾矿污染与几种土壤酶活性[J]. 土壤, 2000, **32**(1): 54-56.
- [18] 王哲, 张国盛, 王颖. 包钢尾矿坝土壤重金属污染诊断[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(12): 5149-5150, 5168.
- [19] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 137-139.
- [20] 王再岚, 何江, 刘玉虹, 等. 鄂尔多斯地区公路两侧土壤重金属污染特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, **30**(2): 15-19.
- [21] 谢永荣, 杨娉娉, 马巧, 等. 稀土元素对作物生长的影响[J]. 作物杂志, 2011, (1): 5-9.
- [22] 张勇, 秦樊鑫, 廖莉玲, 等. 稀土在植物学中的应用[J]. 贵州农业科学, 2010, **38**(6): 137-140.
- [23] 陈祖义. 稀土的环境行为, 生物学毒效应与农业应用稀土潜在的危害性[A]. 见: 中国稀土学会. 第十二届全国稀土元素分析化学学术报告暨研讨会论文集(上)[C]. 北京: 中国稀土学会, 2007. 227-229.
- [24] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of lanthanum in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) [J]. Chemosphere, 2007, **68**(8): 1548-1555.
- [25] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of nutrient elements by chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) grown in lanthanum spiked soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 675-678.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行