

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM_{2.5}时空演变过程 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市PM_{2.5}健康损害价值评估 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气PM_{2.5}化学组成特征比较 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节PM_{2.5}中碳组分特征及来源解析 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气CO₂体积分数变化特征及影响因素 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业VOCs排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季pCO₂及其影响因素 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧氧化对苯二酚效能 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS前体物质(PreFOs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO₄²⁻对青霉素菌渣厌氧消化影响 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH₃挥发的影响 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险

郭颖, 李玉冰, 薛生国*, 廖嘉欣, 王琼丽, 吴川

(中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 为考察广西典型赤泥堆场周边农田土壤重金属污染环境风险, 采集 194 个表层土壤样品, 运用内梅罗综合指数法、Harkanson 潜在生态危害指数法分析重金属污染状况, 利用空间插值法、主成分分析法等对 8 种重金属元素进行源解析。结果表明, 除 V、Cu, 其他元素的平均含量均超过广西区背景值, Cr、Ni、Zn、As、Pb、Co 平均含量超过广西区土壤背景值倍数, 分别为 1.69、1.35、2.45、11.83、4.17、1.95, 其中 As 为首要污染物; 农田土壤呈现出“中度”生态风险, As 的贡献率高达 68%。8 种重金属空间分布特征整体有一定相似之处, 均在赤泥库东北方向和西南方向浓度较高, 而在东南方向整体浓度较低, 并非下风向的西北方向, 仅 Cr 在西北角出现明显富集, 可能受到赤泥库影响。农田重金属污染源不同, As 污染主要受人为因素影响, V、Ni、Cu、Zn、Pb、Co 主要受到自然成土母质的影响, Cr 同时受到成土母质和人为因素的影响。

关键词: 赤泥堆场; 农田土壤; 重金属污染; 风险分析; 源解析

中图分类号: X53; X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3349-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201711018

Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi

GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo*, LIAO Jia-xin, WANG Qiong-li, WU Chuan

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Bauxite residue disposal areas (BRDA) appear to result in the heavy metal pollution of the farm fields surrounding them. In total, 194 topsoil samples were collected from the fields surrounding a BRDA in Guangxi in order to comprehensively understand the pollutant characteristics. These characteristics and their ecological risks were assessed by the Nemerow and Harkanson indices, whilst the sources and correlations of eight heavy metals (V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, and Co) were analyzed by means of the spatial interpolation method, correlation analysis, and principal component analysis (PCA). The results demonstrated that the surrounding fields were seriously polluted by heavy metals. Ninety-two percent of samples were polluted, including 36% that showed serious pollution, and As was the dominant contaminant. The ecological risk results showed that the risks of the surrounding fields were medium, and As was responsible for 68% of this. Spatial interpolation suggested that concentrations of heavy metals in the northeastward and southwestward areas were higher, however the southeastward areas were lower. Multivariate statistics indicated that the possible source of As contaminant was different to those of V, Ni, Zn, Pb, and Co; As was primarily influenced by anthropogenic contamination, including atmospheric sedimentation, and agricultural fertilization. Cr was affected by both soil parent material and atmospheric sedimentation, whereas V, Ni, Zn, Pb, and Co levels were mainly affected by soil parent material.

Key words: bauxite residue disposal area; farmland soil; heavy metal pollution; risk analysis; source apportionment

近年来,大量工业“三废”和农用化学品侵入土壤,导致区域性土壤肥力及生产能力、生态环境服务能力不断衰减,严重威胁粮食安全和生态环境。每年因重金属污染减产和超标的粮食均超过1 000 多万 t,损失超过 200 亿元,2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国近 1/5 农田受到重金属污染^[1]。矿业活动正成为土壤中重金属超标的重要原因之一,采矿区和冶炼区水稻土受矿业活动影响,具有很高程度的潜在生态风险^[2-4]。

赤泥是氧化铝生产工业中排放的高碱性废弃物、以堆存方式为主,占用大量土地资源^[5]。2015 年全球赤泥累积堆存量超过 4×10^9 t,并以 $1.2 \text{ 亿 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度增加^[6-8],赤泥堆场环境安全问题正严重威胁氧化铝行业的可持续发展。2010 年匈牙利

Ajka 赤泥堆场发生溃坝^[9]、2014 年 8 月中铝河南分公司赤泥库溃坝、2016 年 7 月洛阳万基铝业赤泥库溃坝。Ajka 赤泥堆场溃坝近百万吨赤泥流入多瑙河及周边土壤、导致水体和土壤重金属含量增加^[10],即使经过修复仍有约 6.5% 的农田土壤重金属含量超标、短期内不适合耕种粮食等作物^[11],影响周边环境安全及居民生活^[12]。Ruyters 等^[13]的研究表明赤泥混合土壤会提高大麦根部的 Cu、Cr、Fe、Ni 浓度。Lockwood 等^[14]发现赤泥能增加水土

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371475); 环境保护公益性行业科研专项(201509048)

作者简介: 郭颖(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境风险评估,E-mail:1026396217@qq.com

* 通信作者,E-mail:sgxue@csu.edu.cn

系统中 As 的迁移能力. 在厌氧条件下, Cu 能与有机物形成一种稳定的水溶性有机结合态, 对低海拔河流边的湿地 (尤其是富含有机质的) 造成污染^[15]. Olszewska 等^[16] 发现受赤泥污染的湖泊中水生生物如 *Persicaria amphibia*, 无机 As 富集明显.

Ruyters 等^[13] 和 Anton 等^[17] 对赤泥溃坝风险展开大量研究, 国内李全民等^[18] 研究了河南高山镇赤泥尾矿库溃坝风险评价问题, 刘继东等^[19] 研究了酸雨淋溶条件下赤泥中重金属在土壤中的迁移特性及其潜在危害, 以及降雨条件下赤泥对土壤盐渍化的影响, 但是对赤泥堆场对周边环境的影响评价及风险研究较少. 本文以广西某赤泥堆场周边农田土壤为研究对象, 结合地统计学方法和 ArcGIS 软件, 利用单因子指数法、内梅罗综合指数法、Hakanson 潜在生态危害指数法考察周边农田土壤重金属污染状况, 并采用相关性分析和主成分分析, 结合广西区背景值和元素性质对赤泥堆场周边农田环境重金属污染进行来源分析.

1 材料与与方法

1.1 研究区域

研究区位于北纬 23°16' ~ 23°20' N, 东经 107°29' ~ 107°34' E, 地处广西西南部, 地形复杂, 以喀斯特地貌为主, 主要岩石为黏土, 以页岩、灰岩、砂岩、铁铝质页岩、泥岩、燧石灰岩、砂质页岩、白云岩、白云质灰岩为主. 堆场场地为溶蚀-剥蚀地貌, 成土母质主要为石灰岩, 属亚热带季风性气候, 年均气温 21.5℃, 年均降雨量 1 359 mm. 周边土地利用较复杂, 有 3 个赤泥堆场.

1.2 样品处理与分析

2016 年 1 ~ 2 月, 以赤泥堆场为中心进行农田土壤样品的采集, 采用网格布点法 (200 m × 200 m), 均匀布点, 实际采样过程中根据现场情况适当调整, 靠近赤泥堆场适当加密, 共采集 194 个表层 0 ~ 10 cm 耕作层土壤样品, 用四分法组成一个混合样品, 所有样点均用 GPS 定位并记录 (图 1). 土样装入聚乙烯塑料袋中带回实验室, 放置在阴凉通风处自然风干, 经破碎并剔除可见杂物, 所有样品粗磨后过 20 目 (0.85 mm) 尼龙筛, 用于测定 pH, 另取一部分土壤样品过 100 目尼龙筛 (0.15 mm) 用于测定重金属含量. 赤泥样品则取自该地区赤泥堆场.

土壤 pH 测定使用 pH 计 (雷磁 pHS-3C) 在水土比 5:1 的条件下进行. 土壤重金属元素含量经过微波密闭消解后^[11, 17], 使用 Optima 5300 DV 电感耦

合等离子体光谱仪 (美国 Perkin Elmer 公司) 测定. 为保证分析的准确性, 分析测试过程中均选用优级纯试剂, 同时全程做空白样和平行样, 并采用国家土壤标准物质 GBW07406 (GSS-6) 进行质量控制, 使得结果符合监控标准.

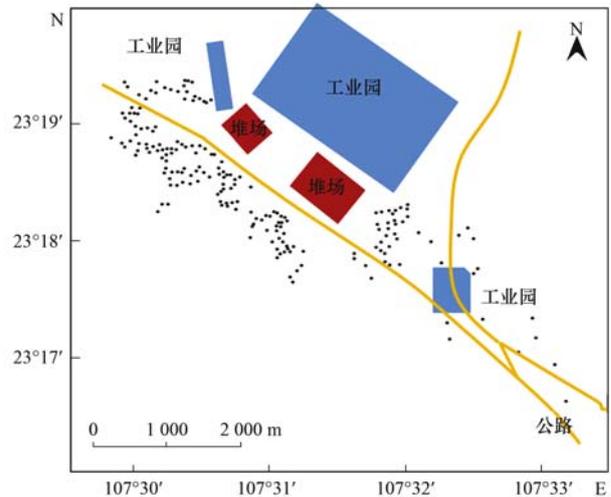


图 1 赤泥堆场周边采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points around the bauxite residue disposal area

1.3 评价方法

采用单因子指数法^[20]、内梅罗综合指数法^[3]、Hakanson 潜在风险指数法^[21] (RI) 对赤泥堆场周边农田重金属污染水平和潜在风险进行评价, 其中, V、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Co 的毒性相应系数参照 Hakanson 计算的毒性系数值^[22], 分别为 2、2、5、5、1、10、5、5.

1.4 数据分析

土壤中重金属污染来源解析常用多元统计方法分析, 包括相关性分析, 聚类分析和主成分分析等^[23, 24]. 本研究运用 Excel 2016 软件和 Spss 19.0 软件对数据进行处理、采用相关分析和主成分分析探讨赤泥堆场周边农田土壤重金属来源. 采用 GS + 10.0 和 ArcGIS 10.0 软件进行空间分析和插值作图.

2 结果与讨论

2.1 赤泥堆场周边农田土壤重金属含量

赤泥堆场周边 194 个农田土壤样点的重金属含量描述性统计结果见表 1. 土壤样本 pH 呈现弱酸性至弱碱性, 在 194 土壤样品中有 92 个呈现弱酸性, 其余点位均呈中性或者弱碱性, 赤泥堆场周边农田土壤 pH 平均值为 7.03, 最大值为 8.52, 最小值为 5.53. 8 种重金属含量普遍超过广西区背景值^[25].

除 V、Cu,其他元素的平均含量均超过广西区背景值, Cr、Ni、Zn、As、Pb、Co 平均含量超过广西区土壤背景值倍数分别为 1.69、1.35、2.45、11.83、

4.17、1.95,表明研究区农田土壤可能受到不同程度的污染. 全部样点的 As、Pb 浓度均超过广西区土壤元素背景值.

表 1 赤泥堆场周边土壤重金属含量($n=194$)

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in the soil surrounding the bauxite residue disposal area ($n=194$)

统计值	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Co	pH
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	205.4	200.6	60.81	38.48	245.2	229.3	140.7	38.96	8.52
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	32.24	25.15	7.98	0.30	21.86	12.18	27.74	6.24	5.53
均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	112.9	94.82	35.86	18.73	113.6	105.3	78.94	20.33	7.03
标准差	37.44	33.23	13.22	8.75	43.38	51.10	22.04	7.23	0.68
变异系数/%	33.15	35.04	36.88	46.71	38.20	48.53	27.93	35.55	9.67
偏度	0.063	0.16	-0.22	-0.07	0.33	0.32	0.32	0.04	0.11
峰度	-0.50	0.002	-0.97	-0.68	-0.396	-0.97	-0.32	-0.77	-0.55
广西区背景值 ^[25] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	129.9	56.25	26.60	20.79	46.43	8.90	18.82	10.40	—
超背景值比率/%	34.0	86.0	71.0	41.0	97.0	100	100	90.0	—
GB 15618-1995 二级标准	—	300	50.0	100	250	25.0	300	—	6.5~7.5
赤泥/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	208.6	1264	63.04	36.23	26.49	92.70	122.2	35.67	10.76

变异系数可以反映数据的离散程度,变异系数越大,则可能存在人为影响产生的特异值^[26]. 研究区内测试样点的各种金属元素变异系数大小顺序为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Pb}$, 其中 As、Cu、Zn、Ni 变异程度分别为 48.53%、46.71%、38.20%、36.88%,属于高度变异($>36\%$), As 平均含量远超过背景值,可能受到人为污染因素的影响. Co、Cr、V、Pb 的变异程度范围在 27.93%~35.55%,相对较低,属于中度变异程度($15\% < \text{CV} < 36\%$). 运用 Spss 软件,对数据进行 K-S 正态性检验,8 种元素均符合正态分布. 其中, Zn、As、Pb 的偏度相对其他元素较大,可能是受人为因素影响发生正偏移.

2.2 土壤重金属的空间分布特征

2.2.1 重金属的半方差分析

半变异函数描述土壤样点的空间自相关性,其中变程(Range)、基台值($C_0 + C$)、块金值(C_0)、决定系数(R^2)是半方差函数的重要参数^[27,28]. 当拟合的函数模型首次呈现稳态(水平状态)的距离称为变程;在变程处的函数值(γ)称为基台;块金值是当采样点的距离为 0 时的函数值,即拟合函数模型的截距,反映非区域因素的作用;块金系数 [$C_0/(C_0 + C)$]是块金值与基台值之比,又称为块金效应^[29]. 块金系数表示随机因素引起的空间变异程度的比例,当 $C_0/(C_0 + C) < 0.25$,主要表现为结构变异,空间自相关性显著; $0.25 < C_0/(C_0 + C) < 0.75$,空间相关性中等,由结构性变异和随机性变异共同产生空间相关性; $C_0/(C_0 + C) > 0.75$,主要表现为随机性变异,空间自相关性弱^[30].

由赤泥堆场周边土壤重金属半方差计算结果可知(表 2), As 的块金系数为 0.904,大于 75%,块金效应显著,表明广西某赤泥堆场周边农田土壤中 As 的空间分布主要受到人为污染的随机性因素引起的空间变异. V、Zn、Pb、Ni、Cu、Cr 的决定系数(R^2)均大于 0.687,模型拟合精度较好,插值过程中能较好地反映广西某赤泥堆场周边农田土壤中重金属的空间结构特性, As 的决定系数(R^2)为 0.171,理论模型拟合精度较差. 研究区农田土壤重金属的空间相关性大小顺序为 $\text{Cu} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{As}$,除 As 外,7 种重金属的块金系数均介于 0.25~0.75,呈现中等程度的空间相关性,表明研究区农田土壤 V、Zn、Pb、Ni、Cu、Cr 的空间分布受到区域自然因素(土壤母质、地形等)和人为污染(工业活动、农业活动等)的双重影响.

2.2.2 重金属的空间分布特征

采用 ArcGIS 软件对 V、Zn、Pb、Ni、Cu、Cr 进行克里金插值(Kriging), As 由于块金效应显著、选用反距离插值方法(IDW)进行计算,获取赤泥堆场周边农田的重金属污染的空间分布图(图 2). 半变异函数模型拟合和参数确定等计算过程则在 GS + 10.0 进行.

8 种重金属空间分布特征整体有一定相似之处,均在赤泥库东北方向和西南方向浓度较高,而在东南方向整体浓度较低,部分重金属呈岛状分布格局,且多为农田和菜地,可能受农业活动影响. 研究区常年主导风向为东南风,而重金属富集较显著的方位多为赤泥库西南方向,并非下风向的西北方向,其中,仅 Cr 在西北角出现明显富集,可能受到赤泥

表 2 赤泥堆场周边农田土壤重金属半方差函数参数

Table 2 Semi-variance functions of soil heavy metals and their parameters

变量	理论模型	基台值 ($C_0 + C$)	块金值 (C_0)	变程 ¹⁾ (R)	块金系数 [$C_0 / (C_0 + C)$]	R^2
V	高斯	1 597	552	0.018 2	0.654	0.727
Zn	球形	2 099	648	0.020 1	0.691	0.823
Pb	球形	539.3	165	0.014 4	0.694	0.687
Ni	高斯	220	64.5	0.026 8	0.707	0.947
Cu	球形	81.64	36.9	0.015 1	0.548	0.728
Co	高斯	60.57	16.7	0.017 5	0.724	0.861
Cr	球形	1 954	636	0.093 4	0.675	0.823
As	指数	2 554	244	0.002 1	0.904	0.171

1) 此处变程以 h 为间距,单位为($^\circ$)

库影响,郭伟^[3]等也曾发现尾矿区周边土壤重金属污染易受主导风向影响较显著。V、Pb、Zn、Co、Cu 含量空间分布格局相似,均呈现类似岛状分布,并存在东北至西南方向的条带状扩散。V、Cu 整体含量低,仅岛状分布区域超过背景值,整体分布可能主要受到自然因素控制,含量较高的局部区域可能受人为活动影响。Ni 在西南方向浓度较高,部分区域超过《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准。As 污染严重,即使在低浓度区的东南方向,As 含量仍高于广西区土壤背景值,大部分区域超过《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准。

2.3 赤泥堆场周边农田土壤重金属评价

2.3.1 内梅罗综合指数法评价

内梅罗综合指数评价以《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准作为农田土壤质量参比

值,并对应各点位 pH 选择相应的二级标准,结果见表 3。赤泥堆场周边土壤 6 种重金属平均单因子指数表现为: As (3.5) > Ni (0.73) > Cr (0.48) > Zn (0.46) > Pb (0.27) > Cu (0.23); 即 As 污染严重,有 95.5% 的样点 As 超标,As 的单因子指数平均值为 3.5,主要表现为重污染 (56.7%)。其次是 Ni,有 18.0% 的样点超标,土壤受到轻污染。其他 4 种重金属 Pb、Cr、Cu、Zn 含量均未超标,其中, Pb 均为安全等级,为清洁水平;超过 85.0% 的样点 Cr、Cu、Zn 均为清洁水平,少数样点处于警戒等级。赤泥堆场周边农田土壤平均内梅罗综合指数为 2.57,达中度污染,根据表中内梅罗综合指数 (P_N),土壤样本污染状况为:重污染 (35.0%) > 轻污染 (34.5%) > 中污染 (22.7%) > 未污染 (3.00%), As 为首要污染因子。

表 3 赤泥堆场周边农田土壤内梅罗综合指数 ($n=194$)Table 3 Nemerow index of soil heavy metals in the study area ($n=194$)

等级划分	污染等级	污染指数 (P)	所占比例/%							污染水平
			P_{Cr}	P_{Ni}	P_{Cu}	P_{Zn}	P_{As}	P_{Pb}	P_N	
1	安全	<0.7	89.0	44.0	99.0	87.0	0.50	100.0	3.00	清洁
2	警戒线	0.7~1	11.0	38.0	1.00	13.0	3.60	0	4.90	尚清洁
3	轻污染	1~2	0	18.0	0	0	23.7	0	34.5	土壤污染物超过背景值,轻污染,作物开始受到污染
4	中污染	2~3	0	0	0	0	15.5	0	22.7	土壤作物均受中度污染
5	重污染	>3	0	0	0	0	56.7	0	35.0	污染作物均受严重污染

2.3.2 潜在生态风险评价

以广西土壤元素背景值作为参比标准,运用潜在生态风险评价法对 8 种重金属的潜在生态风险和生态风险指数进行评价(表 4)。各种金属平均生态危害系数大小顺序为: As (117.76) > Pb (21.76) > Co (10.72) > Ni (7.70) > Cu (5.48) > Cr (4.35) > Zn (3.43) > V (2.72)。As 的生态危害等级最高,潜在生态危害系数范围在 13.68 ~ 257.6,其中 38.1% 的样本表现出较强潜在生态危害,28.9% 的受试样

点表现出强的潜在生态危害,表明研究区农田土壤 As 污染呈现较强的潜在生态危害。其余 7 种重金属潜在生态危害系数 (E_i) 均小于 40。8 种重金属的潜在生态指数 (RI) 范围为 2.14 ~ 319.66,平均值为 174.01,总体处于中等潜在生态危害。赤泥堆场周边农田土壤潜在生态危害指数分布如下:中等生态危害 (56.2%) > 轻微生态危害 (42.3%) > 较强生态危害 (1.50%)。As 对潜在生态风险的贡献率最大,达 67.66% (图 3),表明 As 污染严重引起较高

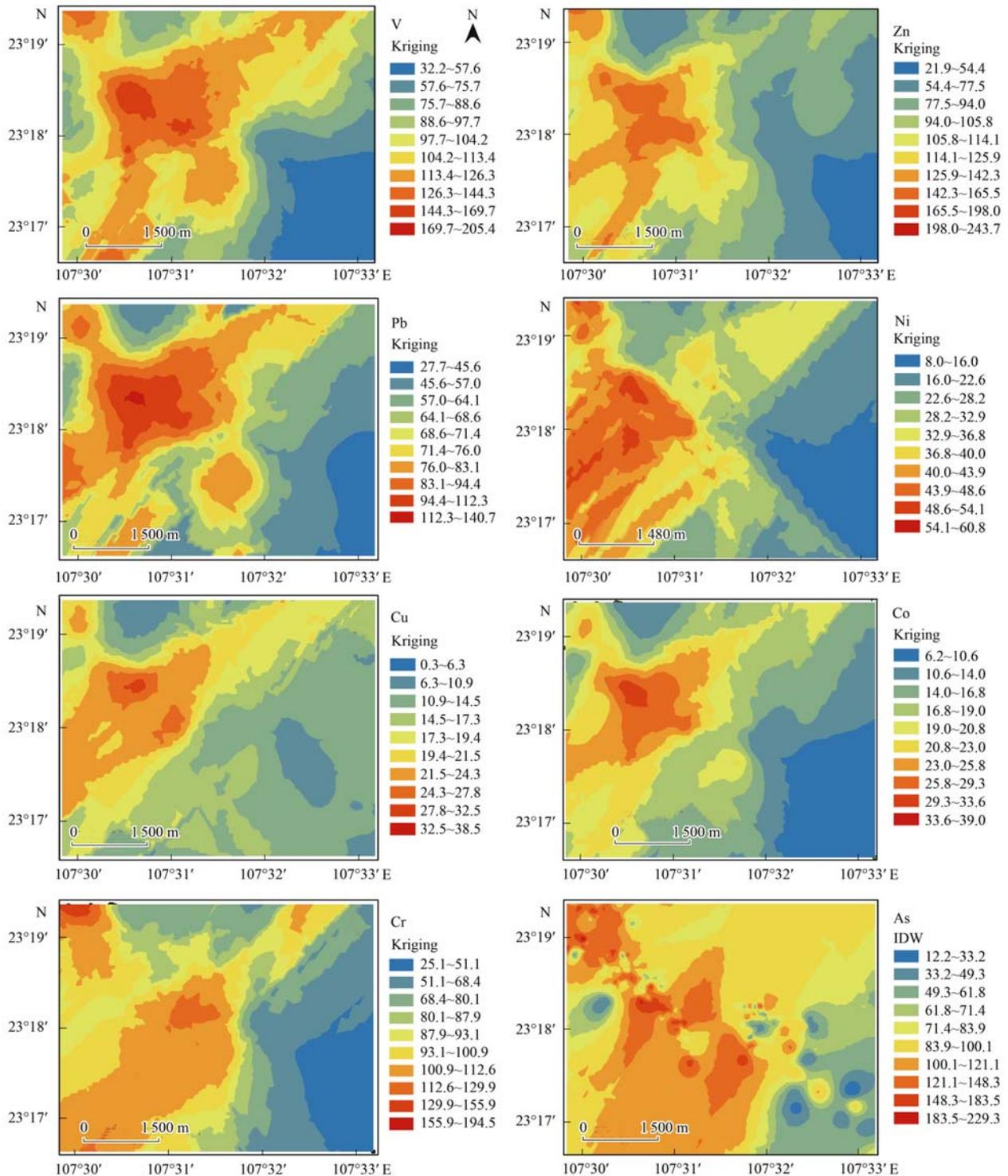


图2 赤泥堆场周边土壤重金属污染空间分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal contamination in the soil around the bauxite residue disposal area

的潜在生态风险。

单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险评价的结果较为一致,土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Co 的单因子指数和潜在生态系数均较小, As 则分别呈现重污染水平、中等及以上的潜在生态危害。2 种综合评价的结果仍存在一定差异,赤泥堆

场周边农田土壤整体表现出重污染水平(35.0%),潜在生态危害等级却表现为中等程度(56.2%),可能因为 P_N 更强调高污染重金属对土壤环境质量的危害,而潜在生态风险评价综合考虑了重金属元素的生物毒性效应(T_r^i),两种评价方法结合才能更全面合理地评价该地区的污染状况。

表 4 赤泥堆场周边农田土壤重金属潜在生态风险指数 ($n = 194$)

Table 4 Ecological risk indices of heavy metals in the study area ($n = 194$)

等级	潜在生态风险系数 (E_r)	所占比例/%								等级	潜在生态风险指数 RI	所占比例/%
		V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Co			
轻微	$E_r < 40$	100	100	100	100	100	6.20	100	100	轻微	$RI < 150$	42.3
中等	$40 < E_r < 80$	0	0	0	0	0	26.8	0	0	中等	$150 < RI < 300$	56.2
较强	$80 < E_r < 160$	0	0	0	0	0	38.1	0	0	较强	$300 < RI < 600$	1.50
强	$160 < E_r < 320$	0	0	0	0	0	28.9	0	0	强	$RI > 600$	0
极强	$E_r > 320$	0	0	0	0	0	0	0	0			

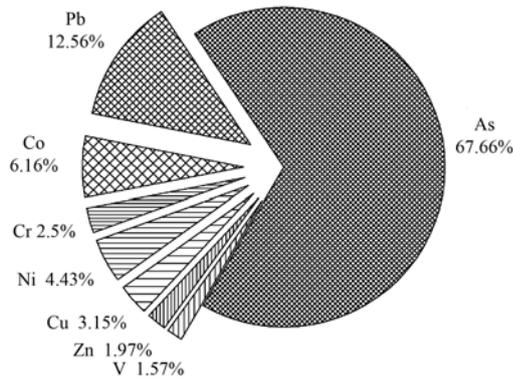


图 3 土壤中不同重金属对潜在生态风险指数的贡献
Fig. 3 Contribution of different heavy metals to potential ecological risk indices in soil

2.4 重金属多元统计及来源分析

2.4.1 相关性分析

一定区域内,来源相同或相似的元素间经常有显著的相关性,可以据此判断土壤中重金属的来源^[31].对广西某赤泥堆场周边农田土壤重金属元素进行 Pearson 相关分析(表 5).V、Ni、Zn、Pb 和 Co 相互之间呈高度显著相关性,相关系数均超过 0.7 ($P < 0.01$),说明这些元素可能具有同源性^[32].As 与 V、Ni、Cu、Pb、Co 相关性均较弱,相关系数普遍小于 0.4 ($P < 0.01$),As 与 Zn 无显著相关 ($P > 0.05$),与 Cu 呈现较弱的显著负相关 ($-0.218, P < 0.01$),表明 As 与这些元素来源不同,As-Cr 呈

表 5 广西某赤泥堆场周边农田土壤重金属元素的 Pearson 相关性¹⁾ ($n = 194$)

Table 5 Pearson correlation coefficients of heavy metal concentrations in the study area ($n = 194$)

	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Co
V								
Cr	0.542 **							
Ni	0.874 **	0.665 **						
Cu	0.620 **	0.208 **	0.665 **					
Zn	0.789 **	0.450 **	0.857 **	0.714 **				
As	0.339 **	0.594 **	0.370 **	-0.218 **	0.135			
Pb	0.852 **	0.365 **	0.775 **	0.656 **	0.775 **	0.258 **		
Co	0.856 **	0.433 **	0.839 **	0.665 **	0.804 **	0.298 **	0.945 **	

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

现出中等显著相关性 ($P < 0.01$), Cr 和 V、Ni、Zn、As、Co 呈现出中等显著相关性 ($P < 0.01$),表明 Cr 来源较复杂,可能与 As 和 V、Ni、Zn、Pb、Co 均有相似的来源.

2.4.2 主成分分析

运用 Spss 软件对 8 种重金属元素进行主成分分析(表 5).各元素间具有显著相关性,经过 KMO 检验和 Bartlett 检验, KMO 等于 0.834,大于 0.7, Bartlett 的 P 为 0,小于 0.05,适合做主成分分析.主成分分析结果如表 6,提取出其中两个特征值大于 1 的主成分: PC1、PC2,累积解释方差 84.94%,两个主成分解释方差分别为 66.26%、18.68%,对两个主成分进行分析足以解释原始数

据的大部分信息.

为更好地解释两个主成分信息,将数据经过 Kaiser 标准化的正交旋转得到旋转后成分图(图 4).V、Ni、Cu、Zn、Pb、Co 在 PC1 上有较大的荷载,空间分布和相关性分析也表明 6 种重金属可能具有同源性.6 种元素仅 Ni 有少量样本(18.0%)出现轻微污染,V、Cu 平均含量低于广西区土壤元素背景值,Zn、Pb、Co 平均含量略高于广西区土壤背景值.研究区成土母质主要为石灰岩,相比砂页岩、河流冲积物、洪积物、花岗岩、第四纪红土、紫色岩,石灰岩的 Ni、Cu、Zn、Pb 元素平均背景更高^[33],且本研究选取的是广西区几何土壤背景值,广西区内土壤母质、地形地貌类型多样,研究区内

的土壤背景值可能与广西区土壤背景值存在一定出入。因此, PC1 代表自然成土母质的影响。

As、Cr 均在 PC2 上有较大的荷载, 本研究农田

土壤 As 的平均单因子指数为 3.5, E_r 为 117.6, 中度污染且具有较强的潜在生态危害, 可认为 PC2 反映了人为污染因素。

表 6 重金属来源主成分分析解释的总方差

Table 6 Results of principal component analysis for heavy metals sources

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	5.30	66.26	66.26	5.300	66.26	66.26
2	1.49	18.68	84.94	1.494	18.68	84.94
3	0.534	6.679	91.61			
4	0.217	2.709	94.32			
5	0.182	2.278	96.60			
6	0.149	1.867	98.47			
7	0.082	1.022	99.49			
8	0.041	0.508	100.0			

与半方差分析结果一致, V、Ni、Zn、Pb、Co 主要在 PC1 上有较大荷载, 在 PC2 也存在一定荷载, 表明 5 种重金属含量整体较高主要受自然成土的作用, 而在相对浓度较高的区域内, 可能存在人为污染因素的影响。研究区周边有集氧化铝、电解铝生产于一体的大型铝业集团和铝加工的工业园, 工业活动和大气降尘可能导致研究区整体重金属含量偏高。张连科等^[34]指出, 土壤中重金属会受铝厂和合金加工的影响, 高于背景值。另外, 农业活动对土壤造成重金属污染。

早期研究多认为土壤中 Cr 含量主要受到成土母质的影响^[33], 近年有研究发现人为活动输入也影响土壤中 Cr 含量^[35~38]。与相关研究一致, Cr 在 PC1、PC2 上均有较大荷载, 受成土母质和人为污染共同影响。研究区周边工业园内多以铝、氧化铝加工厂为主, 在生产过程中产生的废气在大气沉降的作用下, 沉降到周围土壤中。Pascucci 等^[39]利用高光谱遥感技术探索发现赤泥粉尘沉降的半径可达数千公里。赤泥中含 Cr ($1264 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较高, 赤泥颗粒细小^[40], 容易形成粉尘, Cr 在主导风向的下风向也存在较明显的岛状分布格局, 局部 Cr 含量较高, 可能受到赤泥扬尘的影响。

As 在 PC2 上荷载接近于 1, 表明研究区高含量的 As 基本由人为污染因素引起。一般而言, 农田土壤中的 As 污染主要来自于农药化肥、大气沉降、污水污泥灌溉、含重金属废弃物堆积扩散等^[41~43]。堆场周边土壤贫瘠, 粮食产物年产量常年处在低水平, 化肥大量施用, 同时周边设有工业园区和大型铝业集团, 土壤中 As 含量可能同时受农业活动和工业降尘影响。赤泥中 As 含量较低, 为 $92.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

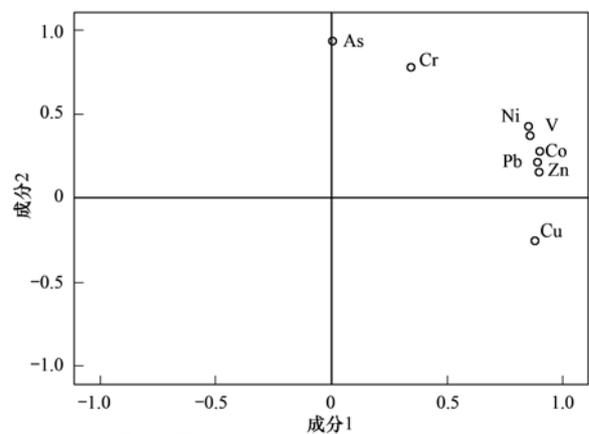


图 4 土壤重金属因子得分分布

Fig. 4 Factor score distributions for heavy metal concentrations

低于研究区农田土壤 As 平均含量, Lockwood 等^[14]研究发现无论在有氧或无氧条件下, 赤泥添加均能增加水土系统中 As 的迁移能力。赤泥堆场对研究区农田土壤 As 含量的影响较小, 但赤泥库一旦发生溃坝事故会增加周边农田土壤中 As 移动性。

3 结论

(1) 赤泥堆场周边农田土壤 As、Ni 含量超过国家二级标准 (GB 15618-1995)。土壤 Cr、Zn、Pb、Co 平均含量虽然超过广西区土壤背景值, 但符合国家二级标准。

(2) 赤泥堆场周边农田土壤 8 种重金属空间分布类似, 均在赤泥库东北方向和西南方向浓度较高, 而在东南方向整体浓度较低, 部分重金属呈岛状分布格局。

(3) 赤泥堆场周边农田土壤重金属总体呈现中度污染, 潜在生态危害“中等”。其中, As 为主要污

染因子和生态危害因子。

(4) 赤泥堆场周边农田土壤 As 污染严重, 主要受农业施肥和大气降尘影响。V、Ni、Zn、Pb、Co 主要受成土母质影响, Cr 受到成土母质和人为污染 (农业活动, 工业园, 赤泥扬尘) 共同影响。

参考文献:

- [1] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2964-2971.
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [2] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(6): 1212-1220.
Lei M, Zeng M, Zheng Y M, *et al.* Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(6): 1212-1220.
- [3] 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.
Guo W, Zhao R X, Zhang J, *et al.* Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 3099-3105.
- [4] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和稻中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 1992-1998.
Wu D, Yang X Z, Li C X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- [5] Klauber C, Gräfe M, Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization[J]. Hydrometallurgy, 2011, **108**(1-2): 11-32.
- [6] Power G, Gräfe M, Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices [J]. Hydrometallurgy, 2011, **108**(1-2): 33-45.
- [7] Kong X F, Guo Y, Xue S G, *et al.* Natural evolution of alkaline characteristics in bauxite residue [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **143**: 224-230.
- [8] Xue S G, Kong X F, Zhu F, *et al.* Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite residue in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(13): 12822-12834.
- [9] Xue S G, Zhu F, Kong X F, *et al.* A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(2): 1120-1132.
- [10] Renforth P, Mayes W M, Jarvis A P, *et al.* Contaminant mobility and carbon sequestration downstream of the Ajka (Hungary) red mud spill: the effects of gypsum dosing [J]. Science of the Total Environment, 2012, **421-422**: 253-259.
- [11] Uzinger N, Anton Á D, Ötvös K, *et al.* Results of the clean-up operation to reduce pollution on flooded agricultural fields after the red mud spill in Hungary [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(13): 9849-9857.
- [12] 黄玲, 李义伟, 薛生国, 等. 氧化铝赤泥堆场盐分组成变化 [J]. 中国有色金属学报, 2016, **26**(11): 2433-2439.
Huang L, Li Y W, Xue S G, *et al.* Salt composition changes in different stacking ages of bauxite residue [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, **26**(11): 2433-2439.
- [13] Ruyters S, Mertens J, Vassilieva E, *et al.* The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(4): 1616-1622.
- [14] Lockwood C L, Mortimer R J G, Stewart D I, *et al.* Mobilisation of arsenic from bauxite residue (red mud) affected soils: effect of pH and redox conditions [J]. Applied Geochemistry, 2014, **51**: 268-277.
- [15] Lockwood C L, Stewart D I, Mortimer R J G, *et al.* Leaching of copper and nickel in soil-water systems contaminated by bauxite residue (red mud) from Ajka, Hungary: the importance of soil organic matter [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 10800-10810.
- [16] Olszewska J P, Meharg A A, Heal K V, *et al.* Assessing the legacy of red mud pollution in a shallow freshwater lake: arsenic accumulation and speciation in Macrophytes [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9044-9052.
- [17] Anton A, Rékási M, Uzinger N, *et al.* Modelling the potential effects of the Hungarian red mud disaster on soil properties [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, **223**(8): 5175-5188.
- [18] 李全明, 张兴凯, 王云海, 等. 尾矿库溃坝风险指标体系及风险评价模型研究 [J]. 水利学报, 2009, **40**(8): 989-994.
Li Q M, Zhang X K, Wang Y H, *et al.* Risk index system and evaluation model for failure of tailings dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(8): 989-994.
- [19] 刘继东, 杜平, 任杰, 等. 模拟降雨条件下赤泥对土壤盐碱化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1836-1843.
- [20] Liu J D, Du P, Ren J, *et al.* Effects of bauxite residue on soil salinization-alkalization under simulated rainfall conditions [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(9): 1836-1843.
- [21] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价 [J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3144-3153.
Zhang J, Chen S Y, Deng H G, *et al.* Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(10): 3144-3153.
- [22] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
Liu Y, Yue L L, Li J C, *et al.* Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [23] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [23] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析

- [J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2758-2765.
- Zhong X L, Zhou S L, Zhao Q G, *et al.* Coregionalization, spatial-correlation and spatial-factor analysis of soil available heavy metals in a typical region of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2758-2765.
- [24] Xu L, Wang T Y, Wang J H, *et al.* Occurrence, speciation and transportation of heavy metals in 9 coastal rivers from watershed of Laizhou Bay, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **173**: 61-68.
- [25] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1991, **12**(4): 12-19.
- [26] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [27] 孙贤斌, 李玉成. 淮南通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J]. 地理科学, 2013, **33**(10): 1238-1244.
- Sun X B, Li Y C. The spatial distribution of soil heavy metals and variation characteristics of Datong abandoned coal mine area in Huainan City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(10): 1238-1244.
- [28] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
- Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [29] 张鹏岩, 康国华, 庞博, 等. 宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2125-2135.
- Zhang P Y, Kang G H, Pang B, *et al.* Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Suya Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2125-2135.
- [30] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 等. 艾比湖流域农田土壤重金属的环境风险及化学形态研究[J]. 地理科学, 2015, **35**(9): 1198-1206.
- Zhang Z Y, Jilili · Abuduwailil, Jiang F Q, *et al.* Environment risk and chemical forms of heavy metals in farmland of Ebinur Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(9): 1198-1206.
- [31] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 186-193.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 186-193.
- [32] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **128**(3-4): 289-300.
- [33] 郑武. 广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背景值的调查[J]. 农村生态环境, 1993, **9**(4): 39-42.
- Zheng W. Study on background values of some heavy metal in agricultural soils of Northeast Guangxi province[J]. *Rural Eco-Environment*, 1993, **9**(4): 39-42.
- [34] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [35] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(11): 2507-2517.
- Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in china and source analysis [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(11): 2507-2517.
- [36] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1821-1828.
- Yao F, Bao A M, Guli · Jiapaer, *et al.* Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of East Junggar Basin in Xinjiang [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(10): 1821-1828.
- [37] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
- Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al.* Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 599-605.
- [38] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 366-370.
- Cui D J, Zhang Y L. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, **35**(3): 366-370.
- [39] Pascucci S, Belviso C, Cavalli R M, *et al.* Using imaging spectroscopy to map red mud dust waste: the Podgorica Aluminum Complex case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 139-154.
- [40] Gelencsér A, Kováts N, Turóczy B, *et al.* The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1608-1615.
- [41] Wu C, Zou Q, Xue S G, *et al.* The effect of silicon on iron plaque formation and arsenic accumulation in rice genotypes with different radial oxygen loss (ROL) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 27-33.
- [42] 王萍, 王世亮, 刘少卿, 等. 砷的发生、形态、污染源及地球化学循环[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(7): 90-97.
- Wang P, Wang S L, Liu S Q, *et al.* Occurrence, speciation, source and geochemical cycle of arsenic [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(7): 90-97.
- [43] 曾希柏, 李莲芳, 白玲玉, 等. 山东寿光农业利用方式对土壤砷累积的影响[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(2): 310-316.
- Zeng X B, Li L F, Bai L Y, *et al.* Arsenic accumulation in different agricultural soils in Shouguang of Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(2): 310-316.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	..... HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qí, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)