

# Geochemical Characteristics and Pollution Risks Assessment of Heavy Metal Elements in Red Mud of Alumina Industry in Western Guangxi

Songtao Hong<sup>1</sup>, Qingwei Zhang<sup>1,2\*</sup>, Yuting Yuan<sup>1</sup>, Xiaoyan Li<sup>1</sup>, Hao Cui<sup>1</sup>, Yuanchun Lan<sup>1</sup>, Jieyu Wang<sup>1</sup>, Yinghong Liu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Email: 690920874@qq.com, \*qingweizhang@glut.edu.cn

Received: Jun. 25<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In this paper, we select six red mud ponds of three major typical aluminum companies in western Guangxi as research objective, based on research of geochemical characteristics of heavy metal elements in red mud, and carry out evaluation of potential pollution risks by utilizing single factor index method, Nemerow index and potential ecological risk index methods. The result shows that elements such as As, Cr, Cd and Pb and others in the red mud produced by Alumina industry have an obvious enrichment effect on crust abundance, soil background value of Guangxi and raw core, while Cd, Cr, As and Ni have greater potential pollution risks. Therefore, it is suggested to comprehensively utilize the red mud and evaluate the secondary pollution in advance when used as the modifier to restore the polluted soil.

## Keywords

Heavy Metal Elements, Pollution Assessment, Red Mud, Alumina Industry, Western Guangxi

---

# 桂西氧化铝工业赤泥中重金属元素地球化学特征及其污染风险评价

洪松涛<sup>1</sup>, 张青伟<sup>1,2\*</sup>, 袁雨婷<sup>1</sup>, 李晓艳<sup>1</sup>, 崔浩<sup>1</sup>, 兰媛春<sup>1</sup>, 王洁瑜<sup>1</sup>, 刘莹红<sup>1,2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 洪松涛, 张青伟, 袁雨婷, 李晓艳, 崔浩, 兰媛春, 王洁瑜, 刘莹红. 桂西氧化铝工业赤泥中重金属元素地球化学特征及其污染风险评价[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(7): 597-605. DOI: 10.12677/ag.2019.97064

<sup>1</sup>桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

<sup>2</sup>桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林

Email: 690920874@qq.com, qingweizhang@glut.edu.cn

收稿日期: 2019年6月25日; 录用日期: 2019年7月8日; 发布日期: 2019年7月15日

## 摘要

本文以桂西三大典型铝业公司的6个赤泥库为研究对象, 在对赤泥中重金属元素地球化学特征研究基础上, 参照单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法模型开展了潜在污染风险评价。结果表明, 氧化铝工业生产赤泥中的As、Cr、Cd、Pb等元素相对于地壳克拉克值、广西土壤背景值和原矿石均具有明显的富集作用, 而Cd、Cr、As、Ni具有较高的潜在污染风险。因此, 建议对赤泥进行综合利用或作为改良剂修复污染土壤时, 有必要预先开展可能带来的二次污染评估。

## 关键词

重金属元素, 污染评价, 赤泥, 氧化铝工业, 桂西地区

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

赤泥是氧化铝生产后的废渣, 因其颜色发红而得名。据统计, 每生产 1 吨氧化铝约产生 0.8 t~1.5 t 赤泥。截止 2017 年, 全球累计排放的赤泥约 40 亿吨, 并以 1.2 亿 t/a 的速度增加[1]; 截止 2015 年, 我国赤泥的累计堆存量就已达 3.5 亿吨, 并还在每年逐步增长[2]。赤泥的大量堆放, 不仅占用大量土地, 而且其强碱性、高盐度等特征对周边环境也造成了一定程度的污染。目前, 有关赤泥的研究主要集中在综合利用和环境修复两个方面。如从赤泥中回收铁[3] [4]、钛[5] [6]、镓[7] [8]、钽[9]等有用金属; 生产烧结砖[10]、陶粒[11]或作为路基材料[12]。环境修复方面主要是用于污水处理[13] [14] [15]、烟气脱硫[16] [17]或作为改良剂修复被重金属污染的农业生产用地等[18]-[24]。然而, 有关赤泥本身所携带的重金属及其可能存在的污染风险却鲜有报道。虽然赤泥可作为路基材料应用于铺设路面, 或者添加到污染土壤中达到抑制其中重金属的活性或改变其存在形态, 进而减少生物有效性的利用价值, 但是如果赤泥本身重金属含量超标, 将也随之被排放到环境之中, 可能会带来不可预估的二次污染问题。鉴于此, 本次研究以桂西典型铝业公司氧化铝生产排放的赤泥为研究对象, 在综合研究其中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Cd、As 等重金属元素地球化学特征的基础上, 参照单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法模型开展了污染风险评价, 旨在为今后赤泥综合利用时避免造成二次污染提供必要的理论依据。

## 2. 样品采集与分析

本次研究所用 26 件赤泥样品主要采集自桂西三个大型铝业公司, 分别位于平果县、德保县和靖西县, 本文分别称为平果铝业公司、德保铝业公司和靖西铝业公司。三家铝业公司氧化铝生产工艺均为拜耳法,

用于氧化铝生产的铝土矿类型主要为岩溶堆积型铝土矿，少量沉积型铝土矿作为配矿原料。其中，平果铝业公司共有 3 个赤泥库，从老到新编号分别为 1、2、3，1 号和 2 号赤泥库已因堆满赤泥而闭库，3 号赤泥库目前仍在利用。本次工作分别在平果铝业公司 1 号、2 号和 3 号赤泥库采集 6 件、3 件和 2 件表层样品。德保铝业公司目前仅 1 个赤泥库，分别在赤泥排放口和远离排放口各采集 1 件表层样品。靖西铝业公司有 2 个赤泥库，分别在新、老两个赤泥库各采集 2 件表层样品。此外，分别在靖西铝业公司和德保铝业公司的采矿区各采集 6 件和 3 件原矿样品，用于开展赤泥中重金属元素相对于原矿石的富集特征研究。本次工作所采集的赤泥样品均送往国家地质实验测试中心进行测试分析。Cr、As、Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 等重金属元素使用等离子质谱(X-series)检测，检测方法依据感耦等离子体原子发射光谱方法(DZ/T0223-2001)。

### 3. 不同赤泥库中重金属元素含量分布特征

桂西不同铝业公司氧化铝工业赤泥中重金属元素分析结果见表 1。平果铝业公司 1 号赤泥库中不同样品的各重金属元素的含量变化均不大，平均含量分别为 As  $231.0 \times 10^{-6}$ 、Cr  $1224 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.55 \times 10^{-6}$ 、Cu  $64.4 \times 10^{-6}$ 、Ni  $78.5 \times 10^{-6}$ 、Pb  $140 \times 10^{-6}$ 、Zn  $70.9 \times 10^{-6}$ 。平果 2 号赤泥库中 Cr 的含量变化变大，为  $929 \sim 1501 \times 10^{-6}$ ，平均含量为  $1303 \times 10^{-6}$ ；其它元素的含量变化均不大，分别为 As  $192 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.62 \times 10^{-6}$ 、Cu  $86.4 \times 10^{-6}$ 、Ni  $77.6 \times 10^{-6}$ 、Pb  $128 \times 10^{-6}$ 、Zn  $72.4 \times 10^{-6}$ 。平果 3 号赤泥库两件样品中重金属元素的平均含量分别为 As  $231.0 \times 10^{-6}$ 、Cr  $1419 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.88 \times 10^{-6}$ 、Cu  $84.9 \times 10^{-6}$ 、Ni  $93.5 \times 10^{-6}$ 、Pb  $161.5 \times 10^{-6}$ 、Zn  $79.8 \times 10^{-6}$ 。德保铝业公司赤泥库各重金属元素平均含量分别为 As  $67.5 \times 10^{-6}$ 、Cr  $1064 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.28 \times 10^{-6}$ 、Cu  $76.5 \times 10^{-6}$ 、Ni  $125 \times 10^{-6}$ 、Pb  $117 \times 10^{-6}$ 、Zn  $75.0 \times 10^{-6}$ 。靖西铝业公司老赤泥库中各重金属元素平均含量分别为 As  $95.6 \times 10^{-6}$ 、Cr  $1242 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.45 \times 10^{-6}$ 、Cu  $47.7 \times 10^{-6}$ 、Ni  $134 \times 10^{-6}$ 、Pb  $142 \times 10^{-6}$ 、Zn  $76.1 \times 10^{-6}$ ；新赤泥库中各种金属元素平均含量分别为 As  $94.7 \times 10^{-6}$ 、Cr  $1124 \times 10^{-6}$ 、Cd  $2.13 \times 10^{-6}$ 、Cu  $57.9 \times 10^{-6}$ 、Ni  $129 \times 10^{-6}$ 、Pb  $125 \times 10^{-6}$ 、Zn  $78.2 \times 10^{-6}$ 。

**Table 1.** Heavy metal contents in the surfacered mud of the red mud dump of alumina industry in different aluminum companies (unit:  $10^{-6}$ )

**表 1.** 不同铝业公司氧化铝工业赤泥库表层赤泥中重金属元素含量(单位:  $10^{-6}$ )

赤泥库	样品编号	重金属元素含量						
		Cr	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
平果铝业公司 1 号赤泥库	PGC1-05	1139	223	2.67	69.4	73.7	155	75.9
	PGC1-11	1236	222	2.48	66.1	79.6	143	73.2
	PGC1-10	1315	218	2.67	68.4	80.3	141	73.9
	PGC1-12	1203	235	2.48	61.4	79.7	132	66.1
	PGC1-04	1237	233	2.51	60.3	81.7	136	66.4
	PGC1-03	1216	255	2.46	60.9	75.7	135	70
	平均含量	1224	231	2.55	64.4	78.5	140	70.9
	富集系数 <sup>1</sup>	12.2	128	12.8	1.17	1.05	11.2	1.0
	富集系数 <sup>2</sup>	14.9	11.3	9.6	2.3	3.0	5.8	0.9
	PGC2-005	929	161	2.49	74.9	63.4	119	71.4
平果铝业公司 2 号赤泥库	PGC2-006	1501	194	2.67	97	83.7	135	71.3
	PGC2-009	1479	221	2.70	87.2	85.7	129	74.6
	平均含量	1303	192	2.62	86.4	77.6	1278	72.4
	富集系数 <sup>1</sup>	13.0	107	13.1	1.57	1.03	10.2	1.0
	富集系数 <sup>2</sup>	15.9	9.4	9.8	3.1	2.9	5.3	1.0

## Continued

	PGC3-01	1458	217	2.81	86.2	94.1	164	78.8
	PGC3-02	1380	244	2.94	83.5	92.9	159	80.7
平果铝业公司 3号赤泥库	平均含量	1419	230.5	2.88	84.9	93.5	162	79.8
	富集系数 <sup>1</sup>	14.2	128	14.4	1.54	1.24	12.9	1.1
	富集系数 <sup>2</sup>	17.3	11.2	10.8	3.1	3.5	6.7	1.1
	HYC-1	982	65	2.31	77.5	121	105	69.3
	HYC-2	1145	70	2.25	75.4	129	129	80.7
德保铝业公司 赤泥库	平均含量	1064	67.5	2.28	76.5	125	117	75.0
	富集系数 <sup>1</sup>	10.7	37.5	11.4	1.39	1.66	9.4	1.1
	富集系数 <sup>2</sup>	13.0	3.3	8.5	2.8	4.7	4.9	1.0
	XFLC-01	1324	95.1	2.58	49.4	139	142	83.6
	XFLC-02	1160	96.1	2.32	46	129	141	68.6
靖西铝业公司 老赤泥库	平均含量	1242	95.6	2.45	47.7	134	142	76.1
	富集系数 <sup>1</sup>	12.4	53.1	12.3	0.87	1.78	11.3	1.1
	富集系数 <sup>2</sup>	15.1	4.7	9.2	1.7	5.0	5.9	1.0
	XFXC-01	1117	88.4	2.26	63.9	133	128	84.4
	XFXC-02	1131	101	2.00	51.8	124	122	72
靖西铝业公司 新赤泥库	平均含量	1124	94.7	2.13	57.9	129	125	78.2
	富集系数 <sup>1</sup>	11.2	52.6	10.7	1.05	1.71	10.0	1.1
	富集系数 <sup>1</sup>	13.7	4.6	8.0	2.1	4.8	5.2	1.0

注: 富集系数<sup>1</sup> = 平均含量/克拉克值; 富集系数<sup>2</sup> = 平均含量/广西土壤背景值[25]。

不同铝业公司和不同赤泥库之间进行比较, As 在平果铝业公司三个赤泥库中的含量均相对较高; Cr 在不同赤泥库中的含量变化不大, 在德保铝业公司赤泥库中含量相对较低; Cd 和 Pb 在平果铝业公司 3 号赤泥库中含量均相对较高; Cu 在靖西铝业公司老赤泥库中含量最低, 而在平果铝业公司 2 号和 3 号赤泥库中含量均较高; Ni 在平果铝业公司三个赤泥库中的含量均相对低于其它两个铝业公司; Zn 在不同赤泥库中的含量分布特征基本一致。相对地壳克拉克值, As 在不同赤泥库中的富集系数最大, 为 37.5~128; Cr、Cd 和 Pb 的富集系数也均在 10 以上, 而 Ni、Cu 和 Zn 的富集系数相对较小, 均小于 2。与广西土壤背景相比, 除了 Zn 富集系数在 1 左右之外, 其它元素的富集系数也均大于 1, Cr 的富集系数最大, 为 13.0~15.9; As 相对于广西土壤背景值的富集系数虽然比与克拉克值相比有明显下降, 但仍然在 3 以上, 特别是平果铝业公司三个赤泥库的富集系数甚至高于 10; 其它重金属元素的富集系数分别为: Cd 8.0~10.8、Cu 1.7~3.1、Ni 2.9~5.0、Pb 4.8~6.7。总之, 无论是与克拉克值相比, 还是相对于广西土壤背景值, 桂西三大铝业公司氧化铝工业赤泥中的重金属元素, 除了 Ni、Cu 和 Zn 之外, 其它元素均有明显的富集作用。

与铝土矿矿石中重金属元素含量(表 2)相比, 拜耳法氧化铝生产对重金属元素也具有明显的富集作用。从表 2 可以看出, 相对于铝土矿矿石, Zn 相对贫化, Cu 的富集作用不明显, Cr、Cd 和 Pb 的富集作用最明显, 富集系数均在 1.5 以上, 特别是靖西铝业公司赤泥中的 Cd 含量相对于禄峒矿区矿石中含量的富集系数达到了 4.4。不同矿区之间相比, 赤泥相对于矿石的重金属元素富集作用在新圩矿区表现最为明显, 而在禄峒矿区相对较弱, 可能与该矿区重金属元素背景含量相对较高有关。

**Table 2.** Heavy metal contents in ore produced by alumina industry in different aluminum companies (unit:  $10^{-6}$ )  
**表 2.** 不同铝业公司氧化铝工业生产矿石中重金属元素含量(单位:  $10^{-6}$ )

铝业公司	矿区名称	样品编号	Cr	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
靖西铝业公司	新圩矿区	XXY003	353	14.4	0.53	22	131	21.3	122
		XXY005	394	29.3	0.78	38.7	72.2	56	88.2
		XXY006	346	14.1	0.67	28.5	24.7	35.8	42.5
		XXJK	399	29.2	1.78	65.2	91.8	45	69.9
		平均含量	373	21.8	0.94	38.6	80.0	40.0	80.1
	富集系数 <sup>3</sup>	3.2	4.4	2.4	1.4	1.6	3.4	0.96	
	禄峒矿区	LDZH-01	461	119	0.43	39.3	59.8	31.6	93.8
		LDZH-02	513	147	0.61	55.1	172	54.6	203
		平均含量	487	133	0.52	47.2	115.9	43.1	148.4
		富集系数 <sup>3</sup>	2.4	0.72	4.4	1.1	1.1	3.1	0.52
DBJK		521	81.4	1.4	47.5	60.5	48.8	64.8	
德保铝业公司	巴头矿区	BTZH-01	675	41.9	1.58	44.7	59.8	45.9	149
		BTZH-02	570	53.2	1.73	50.7	64.4	63	217
		平均含量	589	58.8	1.57	47.6	61.6	52.6	144
		富集系数 <sup>3</sup>	2.0	1.6	1.5	1.1	2.1	2.5	0.54

注: 富集系数<sup>3</sup> = 赤泥中元素平均含量/矿石中元素平均含量, 其中靖西铝业公司赤泥中元素含量为新、老两个赤泥库的平均值。

## 4. 赤泥中重金属污染风险评价

### 4.1. 评价方法

参照单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法[26] [27] [28]对三种评价模型对桂西铝土矿氧化铝生产赤泥中重金属元素的污染风险进行综合评价(所有公式中参比标准均参照国家土壤环境质量标准二级标准) [29]。

#### 4.1.1. 单因子污染指数法

单因子指数法是国内通用的一种重金属污染评价的方法, 是其它综合指数评价的基础, 其表达式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为土壤或农作物中污染物  $i$  的单因子污染指数;  $C_i$  为土壤中污染物  $i$  的实测数据;  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准。污染指数分级标准见表 3。

#### 4.1.2. 内梅罗综合污染指数法

内梅罗指数法是人们在评价土壤重金属污染时运用最为广泛的综合指数法, 污染指数分级标准见表 3, 该方法的计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{i \text{ ave}}^2 + P_{i \text{ max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{综}}$  为综合污染指数;  $P_{i \text{ ave}}$  为各污染物的指数平均值;  $P_{i \text{ max}}$  为单项污染物的最大污染指数。

**Table 3.** Single factor index and nemerow indexgrading standard

**表 3.** 单因子法和内梅罗综合污染指数分级标准

单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级
$P_i \leq 1$	非污染	$P_{综} \leq 0.7$	安全
$1 < P_i \leq 2$	轻污染	$0.7 < P_{综} \leq 1$	警戒线
$2 < P_i \leq 3$	中污染	$1 < P_{综} \leq 2$	轻污染
$P_i > 3$	重污染	$2 < P_{综} \leq 3$	中污染
		$P_{综} > 3$	重污染

### 4.1.3. 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是瑞典科学家 Hakanson 提出的重金属危害性的评价方法[30]，其评价公式为：

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = T_r^i \frac{C^i}{C_i^n} \tag{3}$$

$$RI = \sum_{n=1}^n E_r^i \tag{4}$$

式中： $RI$  为多种重金属元素潜在生态危害指数； $E_r^i$  为某一污染物潜在的生态危害系数； $T_r^i$  为污染物毒性系数； $C_f^i$  为某一污染物的单因子污染指数； $C^i$  为样品重金属浓度实测浓度； $C_i^n$  为参比值。本研究涉及的 Cd、As、Cu、Pb、Cr、Ni、Zn 7 种重金属元素的毒性系数值分别为 30，10，5，5，2，2 和 1 [31]，各种重金属潜在生态危害系数分级标准及对应的污染程度见表 4。

**Table 4.** Relationship between potential ecological risk factor (Ei) and ecological pollution level

**表 4.** 重金属潜在生态危害系数(Ei)与生态危害程度的关系

污染等级	$E_i$	RI	污染程度
1	<40	<150	轻微生态危害
2	≥40~<80	≥150~<300	中等生态危害
3	≥80~<160	≥300~<600	强生态危害
4	≥160~<320	≥600	很强生态危害
5	>320		极强生态危害

## 4.2. 评价结果

### 4.2.1. 单因子指数法和内梅罗指数法评价结果

单因子指数法和内梅罗指数法评价结果见表 5。从六个赤泥库不同重金属元素的单项污染指数平均值可以看出，Cd、Cr 和 As 的污染指数分别为 8.28、6.13 和 5.08，均大于 3，属于重污染范畴，Ni 的单项污染指数为 2.15，表现为中度污染，其它元素均不产生污染。不同赤泥库之间进行对比表明，表现为重污染的 Cd、Cr 和 As 在平果铝业公司 3 个赤泥库中的单项污染指数均相对更高，As 在德保铝业公司赤泥库中处于中度污染水平。从各赤泥库内梅罗综合污指数( $P_{综}$ )看，除了德保铝业公司赤泥库为中等污染，其它 5 个赤泥库均表现为重污染程度。

### 4.2.2. 潜在生态危害指数法评价结果

潜在生态危害指数法评价结果见表 5。7 种重金属生态危害系数( $E_i$ )均值大小顺序为：Cd(248.33) > As(50.63) > Cr(12.27) > Ni(4.23) > Cu(3.47) > Pb(2.27) > Zn(0.3)。与分级标准相比可以看出，Cd 在这 6 个赤



泥库中的生态危害等级最高, 呈现很强生态危害; As 在平果铝业公司 1 号、2 号和 3 号赤泥库中呈现中等生态危害, 在其他 3 个赤泥库中呈现轻微生态危害; 其它元素在 6 个赤泥库中潜在生态危害系数( $E_i$ )均小于 40, 呈现轻微生态危害。综合潜在生态危害指数( $RI$ )评价结果表明, 平果铝业公司的三个赤泥库均达到了强生态危害程度, 其它三个赤泥库的指数虽然处于中等生态危害水平, 但也与强生态危害程度接近。

**Table 5.** Evaluation results of heavy metal contamination in different red mud ponds  
**表 5.** 不同赤泥库重金属污染评价结果

赤泥库	单项污染指数 $P_i$							$P_{\text{综}}$	污染程度
	Cr	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn		
平果铝 1 号	6.1	7.7	8.5	0.6	1.6	0.5	0.3	3.7	重污染
平果铝 2 号	6.5	6.4	8.7	0.9	1.6	0.4	0.3	3.7	重污染
平果铝 3 号	7.1	7.7	9.6	0.8	1.9	0.5	0.3	4.1	重污染
德保铝业公司	5.3	2.3	7.6	0.8	2.5	0.4	0.3	2.8	中污染
靖西铝业(老)	6.2	3.2	8.2	0.5	2.7	0.5	0.3	3.1	重污染
靖西铝业(新)	5.6	3.2	7.1	0.6	2.6	0.4	0.3	3	重污染
均值	6.13	5.08	8.28	0.7	2.15	0.45	0.3	3.4	重污染
赤泥库	单项潜在生态风险系数 $E_i$							$RI$	污染程度
平果铝 1 号	12.2	77	254.5	3.2	3.1	2.3	0.3		
平果铝 2 号	13	64	262	4.3	3.1	2.1	0.3	348.9	强度
平果铝 3 号	14.2	76.8	287.5	4.2	3.7	2.7	0.3	389.5	强度
德保铝业公司	10.6	22.5	228	3.8	5	2	0.3	272.2	中等
靖西铝业(老)	12.4	31.9	245	2.4	5.4	2.4	0.3	299.7	中等
靖西铝业(新)	11.2	31.6	213	2.9	5.1	2.1	0.3	266.2	中等
均值	12.27	50.63	248.33	3.47	4.23	2.27	0.3	321.53	强度

## 5. 结论

通过对桂西不同铝业公司赤泥库中重金属元素地球化学特征分析和污染风险评价, 得出结论如下:

1) 不同赤泥库中重金属含量特征表明, 相对于地壳克拉克值, As 在不同赤泥库中的富集系数(37.5~128)最大, 其次为 Cr、Cd 和 Pb (富集系数均大于 10), Ni、Cu 和 Zn 的富集系数最小(均小于 2)。无论是与地壳克拉克值相比, 还是相对于广西土壤背景值, 桂西三大铝业公司氧化铝工业赤泥中的重金属元素, 除了 Ni、Cu 和 Zn 之外, 其它元素均有明显的富集作用。同时, 与铝土矿矿石中重金属元素含量相比, 拜耳法氧化铝生产对重金属元素具有明显的富集作用。

2) 单因子指数法评价表明, 桂西三大铝业公司六个赤泥库总体表现为 Cd、Cr 和 As 为重污染, Ni 为中度污染, 其它元素为非污染; 不同赤泥库之间对比, 平果铝业公司三个赤泥库的 Cd、Cr、As 和 Ni 污染相对较严重。内梅罗综合污指数( $P_{\text{综}}$ )显示, 除了德保铝业公司赤泥库为中等污染, 其它 5 个赤泥库均表现为重污染程度。潜在生态危害指数法评价结果表明, 平果铝业公司的三个赤泥库均达到了强生态危害程度, 其它三个赤泥库的指数虽然处于中等生态危害水平, 但也与强生态危害程度接近。

3) 本次研究结果表明, 赤泥中的重金属元素污染现象严重, 在对其进行综合利用或作为改良剂修复污染土壤时, 有必要预先开展可能带来的二次污染评估。

## 基金项目

桂林理工大学 2019 年大学生创新创业训练计划项目(201910596297)。

## 参考文献

- [1] Power, G., Gräfe, M. and Klauber, C. (2011) Bauxite Residue Issues: I. Current Management, Disposal and Storage Practices. *Hydrometallurgy*, **108**, 33-45.
- [2] 杨绪平, 邵志超, 张晨. 赤泥的资源化综合利用[J]. 现代冶金, 2018, 46(1): 42-44.
- [3] 谢武明, 张宁, 李俊, 等. 盐酸浸出提取赤泥中铝和铁的工艺条件优化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5677-5682.
- [4] 姜平国, 王鸿振. 从赤泥中回收铁工艺的研究进展[J]. 四川有色金属, 2005(2): 23-25+40.
- [5] 李亮星, 黄茜琳. 从赤泥中提取钛的试验研究[J]. 湿法冶金, 2011, 30(4): 323-325.
- [6] 韩东战, 尹中林. 赤泥提钛的研究现状[J]. 矿产综合利用, 2017(3): 33-37.
- [7] 张淳, 肖连生, 夏文堂. 从铝土矿中提取 Ga、Nb、Li、Sc 的可行性初步研究[J]. 稀有金属与硬质材料, 2005, 33(2): 9-11+18.
- [8] 陈福亮, 雷霆, 万多稳, 等. 氧化铝生产过程中金属镓的回收[J]. 云南冶金, 2010, 39(4): 40-42.
- [9] 王洋, 唐晓宁. 铝厂赤泥中提钪技术的研究[J]. 贵州化工, 2011, 36(5): 7-9.
- [10] 任孟杰, 郭焱. 利用拜耳法赤泥和氟化钙污泥制备烧结砖块[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4797-4802.
- [11] 符勇, 马喆. 基于赤泥、铝土尾矿和污泥三大工业废物的陶粒制备实验研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(4): 48-51+56.
- [12] 王辉, 焦莎莎, 葛滢, 等. 赤泥掺加硅灰用于道路基层材料的试验研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(3): 8-10+15.
- [13] 刘全忠, 蔡杨, 冯雪冬, 等. 赤泥对废水中镍离子的吸附处理研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 248-249+266.
- [14] 牛梓璇, 马冠群, 陈悦, 等. 铝业废渣赤泥对水中磷的去除性能研究[J]. 广州化工, 2016, 44(7): 150-152+159.
- [15] 肖雄, 张润宇, 龙健, 等. 赤泥治理地表水体与底泥磷污染的研究进展[J]. 矿物学报, 2017, 37(6): 764-770.
- [16] 位朋, 李惠萍, 靳苏静, 等. 氧化铝赤泥用于工业烟气脱硫的研究[J]. 化工进展, 2011, 30(S1): 344-347.
- [17] 贾帅动, 董继业, 王博. 氧化铝赤泥进行烟气脱硫有效性分析[J]. 化工技术与开发, 2013, 42(8): 67-69.
- [18] 高卫国, 黄益宗, 雷鸣. 添加堆肥和赤泥对土壤生物有效性 Cd 和 Zn 的影响[J]. 环境工程学报, 2008, 2(1): 78-82.
- [19] 范美蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 赤泥在土壤重金属污染治理和农业生产中的应用[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1531-1536.
- [20] 田杰, 罗琳, 范美蓉, 等. 赤泥对污染土壤中 Cd, Pb 和 Zn 形态及水稻生长的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 195-199.
- [21] 吴川, 黄柳, 薛生国, 等. 赤泥对砷污染的调控研究进展[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 141-149.
- [22] Santona, L., Castaldi, P. and Melis, P. (2006) Evaluation of the Interaction Mechanisms between Red Muds and Heavy Metals. *Journal of Hazardous Materials*, **136**, 324-329.
- [23] Gary, C.W., Dunham, S.J., Dennis, P.G., et al. (2006) Fields Evaluation of *in Situ* Remediation of a Heavy Metal Contaminated Soil Using Lime and Red-Mud. *Environmental Pollution*, **142**, 530-539.
- [24] Lombi, E., Zhao, F.J., Zhang, G.Y., et al. (2002) *In Situ* Fixation of Metals in Soils Using Bauxite Residue: Chemical Assessment. *Environmental Pollution*, **118**, 435-443. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00294-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00294-9)
- [25] 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: 329-493.
- [26] 刘勇. 广西某矿区农用地土壤重金属含量分析与污染评价[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2012.
- [27] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [28] 徐莉, 黄亮亮, 吴志强, 等. 广西会仙湿地土壤重金属分布特征及风险评估[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(29): 35-38.
- [29] 国家环境保护局. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 3-4.
- [30] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water*



---

*Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)

- [31] 张青伟, 柴社立, 部学娇, 等. 月亮泡底泥中元素的分布及其生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4): 165-169.

---

**Hans** 汉斯

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)