

# 赤泥去除水溶液中的氟离子研究现状

丁美琪, 郑本仙, 肖晴雯, 杨光, 孙威威\*

滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年3月7日; 录用日期: 2026年3月30日; 发布日期: 2026年4月10日

## 摘要

赤泥是氧化铝生产产生的高碱性工业固废, 全球储量巨大且逐年累积, 其资源化利用与规模化消纳是铝工业可持续发展的关键难题。在Pb、Cd、Zn等重金属污染环境治理领域已有较多研究, 但在氟污染水环境治理方面的应用研究相对较少。本文在分析赤泥对氟离子的去除机制及影响因素(pH、初始氟浓度、共存离子等)的基础上, 综述了国内外赤泥在废水中氟离子去除方面的研究成果, 探讨了赤泥在环境修复过程中存在的环境风险, 提出了赤泥在氟污染水环境治理研究方面应关注的问题以及未来的重点研究方向。

## 关键词

赤泥, 氟污染, 吸附, 改性, 资源化利用

# Research Progress on Fluoride Removal from Aqueous Solutions by Red Mud

Meiqi Ding, Benxian Zheng, Qingwen Xiao, Guang Yang, Weiwei Sun\*

School of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: March 7, 2026; accepted: March 30, 2026; published: April 10, 2026

## Abstract

Red mud is a highly alkaline industrial solid waste generated from alumina production, with massive global reserves accumulating year by year. Its resource utilization and large-scale consumption are critical challenges for the sustainable development of the aluminum industry. While extensive research has been conducted in the field of heavy metal (Pb, Cd, Zn, etc.) polluted environmental remediation, studies on its application in fluoride-contaminated water environment treatment remain relatively scarce. Based on an analysis of the fluoride removal mechanism by red mud and influencing

\*通讯作者。

文章引用: 丁美琪, 郑本仙, 肖晴雯, 杨光, 孙威威. 赤泥去除水溶液中的氟离子研究现状[J]. 水污染及处理, 2026, 14(2): 60-69. DOI: 10.12677/wpt.2026.142007

factors (pH, initial fluoride concentration, coexisting ions, etc.), this paper reviews research achievements on fluoride removal from wastewater using red mud both domestically and internationally, discusses the environmental risks associated with red mud in environmental remediation processes, and proposes issues that should be addressed in future research on red mud application for fluoride-contaminated water treatment as well as key research directions.

## Keywords

Red Mud, Fluoride Pollution, Adsorption, Modification, Resource Utilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

赤泥作为氧化铝生产过程中产生的高碱性工业副产物,受铝土矿类型和提取工艺影响,平均每生产1 t 氧化铝大约产生 1~1.5 t 赤泥[1]。2024 年全球赤泥储量估计约为 40 亿吨,全球赤泥每年排放量超过 2 亿吨[2] [3]。赤泥处理方式主要以堆放为主,赤泥以泥浆形式存储于大型尾矿库中,需占用大量土地资源,由于赤泥的高碱性及微量有色金属(如镓、镓、钇、铈、钼、铌、铀、钍和镧系元素等),赤泥的处置可能会导致水体、土壤以及大气污染等环境问题,同时有色金属未充分回收导致资源闲置[4]-[6]。赤泥的资源化利用与规模化消纳已成为国内外学术界和工业界共同关注的焦点,同时也是全球铝工业在追求可持续发展过程中亟需攻克的重要难题。

目前,赤泥利用途径主要集中于以下方面:(1) 有价金属的提取回收,如铁、铝等有价金属和钛、钪等稀有金属[7] [8];(2) 制备建筑材料,如路面基层材料、水泥、混凝土、砖、陶粒等[9]-[11];(3) 环境修复领域,如作为土壤改良剂、制备脱硫剂和污水吸附剂等[12]-[15];(4) 赤泥土壤化,利用物理、化学和生物等手段应用于土地复垦、植被恢复等领域[16]-[19]。其中,赤泥在作为污水吸附剂领域日益受到关注[20] [21]。

氟污染随铝冶炼、磷肥、玻璃、半导体及燃煤等工业快速扩散,已成为全球性环境与公共卫生难题[22]-[25]。当环境中氟浓度超过安全阈值时,会对生态系统造成破坏,并通过食物链富集最终威胁人类健康。长期摄入过量氟可导致氟斑牙、氟骨症,甚至影响神经系统发育和内分泌功能[26]-[28]。赤泥对镉、铅、锌等重金属污染的环境修复研究较多,但关于赤泥对水溶液中的氟离子去除的研究报道偏少。本文综述了国内外赤泥去除废水中氟离子的研究进展,分析赤泥去除氟离子的机制,以及赤泥应用的环境风险,以期对氟离子去除及赤泥资源化利用提供参考。

## 2. 赤泥的基本特征

### 2.1. 赤泥的基本组成

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废弃物,其物化性质及组成成分受生产工艺、技术水平和原材料等因素影响。根据氧化铝生产工艺的不同,赤泥可分为拜耳法赤泥、联合法赤泥和烧结法赤泥。拜耳法生产氧化铝工艺以其能耗低和效益好的特点,得到了广泛应用[19]。表 1 显示了不同生产工艺的赤泥的主要成分。从表中可以看出赤泥的主要成分是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ ,约占赤泥的

90%；从表中数据可以看出，不同工艺赤泥的化学成分存在显著差异。烧结法和联合法赤泥的氧化钙(CaO)含量较高，这与烧结法工艺中加入石灰等碱性物质密切相关。而拜耳法赤泥的氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量相对较高。此外，赤泥中含有少量的 Cr、V、Ni、Cu、Mn、F 等元素和 Ra、Th、U 等放射性元素[3] [19]。

**Table 1.** Chemical compositions of red mud generated from various alumina production processes (%)

**表 1.** 不同氧化铝生产工艺赤泥化学成分(%)

赤泥种类	产地	主要成分									参考文献
		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	烧失量	
	中国贵州	8.52	26.41	18.94	21.84	-	7.40	4.75	0.068	9.71	[29]
拜耳法	巴西	12.2	34.49	22.11	3.84	-	3.61	5.31	0.66	16.1	[30]
	土耳其	17.29	35.04	20.20	5.30	0.33	4.00	9.40	-	8.44	[31]
烧结法	中国贵州	17.29	10.36	10.36	40.22	-	7.14	3.53	0.053	12.95	[29]
联合法	中国重庆	24.44	8.53	21.68	25.50	1.19	3.74	6.93	2.75	-	[32]

## 2.2. 赤泥的理化性质

赤泥具有复杂的矿物组成，其微观结构空旷疏松，矿物颗粒细小且不同生产工艺的赤泥在粒径分布、孔隙结构和化学性质上存在显著差异。拜耳法赤泥粒径较细(3~10  $\mu\text{m}$ )，比表面积大、碱性高( $\text{pH } 11.3 \pm 1.0$ )、渗透性差(渗透系数  $10^{-5}\sim 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )、剪切强度低(40~50 kPa)，且高盐分、高钠离子含量(可交换性钠离子占 53%~91%)等[33]-[35]。相比拜耳法，烧结法赤泥的粒径在 1~20  $\mu\text{m}$  范围内分散分布，最大粒径约为 30  $\mu\text{m}$ ，颗粒相对粗大，渗透性较好(渗透系数为  $10^{-4}\sim 11^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )，因其中的碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )和二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )结晶而产生局部颗粒团聚现象，其孔隙结构相对发达；烧结法赤泥  $\text{pH } 10\sim 12$  [29] [35] [36]。联合法赤泥具有高碱度特性，王笑等研究发现，联合法赤泥颗粒粒径主要集中在 0.1~0.8  $\mu\text{m}$  左右，平均比表面积  $43.8 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  [37]。

## 3. 赤泥去除废水中氟离子机理及影响因素

### 3.1. 去除机制

#### 3.1.1. 吸附作用

如图 1 所示，赤泥中金属氧化物表面存在大量的羟基(-OH)，在水溶液中氟离子取代赤泥表面的羟基或水分子，形成稳定的表面络合物，从而被吸附在赤泥表面[38] [39]。研究表明，通过酸处理可以使赤泥中的方钠石和钙霞石等矿物相解离，释放出钠和铝，增加了可与氟离子结合的铁和铝氧化物/氢氧化物位点数量[38]。这种表面吸附过程可以通过 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型进行描述，表明吸附可能涉及单分子层吸附[40]-[42]。

#### 3.1.2. 沉淀作用

赤泥富含铁和铝的氧化物/氢氧化物，这些金属离子在水溶液中具有较强的与氟离子结合形成沉淀的潜力。当赤泥被引入含氟废水中时，赤泥中的铝离子( $\text{Al}^{3+}$ )和铁离子( $\text{Fe}^{3+}$ )会部分溶解或在表面水解，形成氢氧化物或羟基络合物。这些溶解出的金属离子可以与溶液中的氟离子结合，形成难溶的氟化物沉淀，如氟化铝( $\text{AlF}_3$ )或氟化铁( $\text{FeF}_3$ )， $\equiv\text{M}-\text{OH} + \text{F}^- \rightarrow \equiv\text{M}-\text{F} + \text{OH}^-$  (M 代表 Fe 或 Al)，从而实现氟离子的去除[39] [43]。

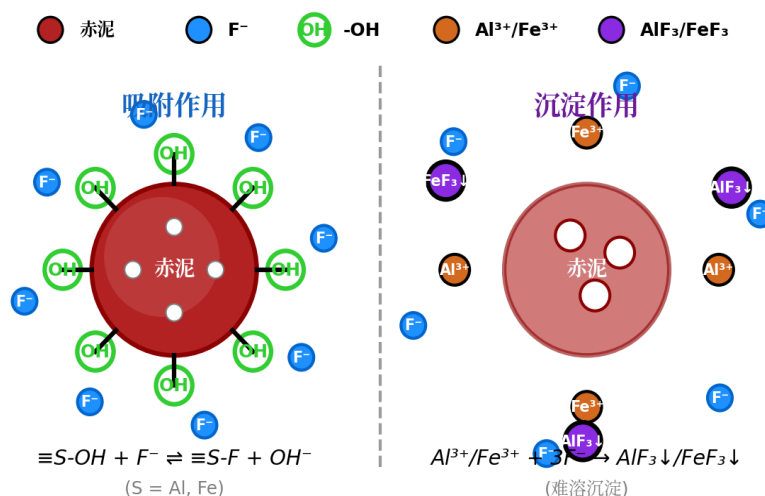


Figure 1. Schematic diagram of fluoride adsorption mechanism on red mud surface  
图 1. 赤泥表面氟吸附机理示意图

## 3.2. 影响因素

### 3.2.1. pH 值

溶液的 pH 值是影响氟离子去除效率的关键因素。赤泥对氟离子的最佳吸附 pH 范围偏向酸性。例如，在 pH 5.5 时，氟离子的去除率最高[40]。在酸性条件下，赤泥表面的羟基更易质子化，增加带正电的吸附位点，通过静电吸引捕获带负电的氟离子。同时，低 pH 值也可能促使氟离子以中性 HF 分子形式存在，更容易进入吸附剂孔隙。然而，过低的 pH 值可能导致赤泥中铝和铁等组分过度溶解，影响吸附剂稳定性[38]。

### 3.2.2. 初始氟离子浓度

初始氟离子浓度对赤泥的吸附容量和去除效率有显著影响。随着初始氟离子浓度的增加，赤泥对氟离子的单位吸附量也会相应增加[39]。然而，整体去除效率(即去除百分比)可能会下降，这是因为当氟离子浓度很高时，吸附位点更容易达到饱和，从而限制了总体的去除比例[44]。

### 3.2.3. 共存离子

废水中常见的阴离子，如磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )、硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )、硝酸根( $\text{NO}_3^-$ )和氯离子( $\text{Cl}^-$ )，会与氟离子竞争吸附位点，从而降低氟离子的去除效率[45]。其中，磷酸根通常对氟离子的去除影响最大，因为它与赤泥表面具有较高的吸附亲和力，能与氟离子形成更强的竞争关系[20] [46]。

## 4. 在去除废水中氟离子中的应用

### 4.1. 原生赤泥去除氟离子

原生赤泥呈碱性，对氟离子的吸附容量普遍较低，其有效吸附位点数量有限，难以满足处理高浓度氟化物废水或需要高效去除的实际需求。郑雁等研究发现，初始 pH 为氟离子浓度 5 mg/L 时，氟离子最大吸附率为 95.4%~95.6%；30℃赤泥的饱和吸附量为 11.49 mg·g<sup>-1</sup>，且随着赤泥用量增加氟离子吸附率增大[47]。魏宁等在室温条件下探究不同初始浓度含氟溶液进行等温吸附试验时发现原状赤泥对氟的饱和吸附容量为 13.46 mg·g<sup>-1</sup> [48]。杨利锦等发现氟离子浓度为 5 mg/L，温度 25℃时，添加原生赤泥氟离子质量浓度几乎不变[46]。

## 4.2. 改性赤泥去除氟离子

原生赤泥虽然具有一定的除氟潜力，但在实际含氟废水处理中的应用效果受到较低的吸附能力、稳定性差、处理效率不足和选择性差等关键因素的限制。改性赤泥在去除含氟废水方面展现出显著优于原生赤泥的处理效率，主要体现在更高的吸附容量、更快的吸附速率、更好的稳定性和更强的选择性[49]-[51]。表 2 对比了不同改性方法的赤泥吸附剂性能。

### 4.2.1. 酸活化改性

研究表明，用盐酸(HCl)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)或硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)对赤泥进行酸洗可以显著提高其氟化物吸附性能[38] [52]-[54]。酸处理能够溶解赤泥中的苏打石(sodalite)和钙霞石(cancrinite)相，释放出钠和铝离子，并增加铁和铝氧化物/氢氧化物的可及活性位点[38] [55]。例如，用 AlCl<sub>3</sub> 改性的赤泥(MRMA)及其热活化形式(MRMAH)在 200℃ 下，氟吸附容量分别达到 68.07 mg·g<sup>-1</sup> 和 91.28 mg·g<sup>-1</sup>，远高于原始赤泥的 13.46 mg·g<sup>-1</sup> [51]。另一项研究显示，经过硫酸处理的赤泥对氟化物的去除效率显著高于未经处理、氢氧化钠处理的赤泥[56]。用 0.8 M HCl 处理的赤泥在氟化物吸附容量方面表现出最高的效果[53]。

### 4.2.2. 热活化

热处理可以改变赤泥的物理化学性质，如增加比表面积和孔隙率。AlCl<sub>3</sub> 改性后进行热活化的 MRMAH 吸附容量更高[51]。然而，也有研究发现，随着热处理温度的升高，酸处理赤泥的吸附容量反而会下降[53]。这表明热处理的效果与具体改性剂和温度参数密切相关。

### 4.2.3. 金属氧化物负载

通过负载金属氧化物，特别是铝(Al)、镧(La)和铈(Ce)等，可以显著增强赤泥的氟吸附能力[41] [42] [50] [57]。将镧负载到酸活化的赤泥上制备的新型吸附剂，在盐酸浓度为 6 mol/L、镧负载反应时间为 20 小时的条件下，对氟化物具有非常好的吸附效率[42]。掺入铈基化合物的赤泥被证明是一种经济高效的氟化物吸附剂[50]。酸活化赤泥作为载体、氧化铈作为活性组分的铈负载赤泥吸附剂对氟化物有良好的处理效果，其最佳制备条件包括盐酸浓度 3 mol/L、铈负载反应时间 15 小时和烧结温度 400℃ [41]。

### 4.2.4. 聚合物复合改性

将赤泥与聚合物(如海藻酸钠)结合，可以制备出具有良好除氟性能的复合吸附剂。例如，海藻酸钠-赤泥吸附剂(SA@RM)在 15 g/L 的剂量和 pH 5 的条件下，对初始氟浓度 11.7 mg/L 的废水能在 40 分钟内达到吸附平衡[58]。

**Table 2.** Performance comparison of red mud adsorbents with different modification methods

**表 2.** 不同改性方法的赤泥吸附剂性能对比

改性方法	吸附剂	最大吸附量(mg/g)	最佳 pH	反应温度	参考文献
酸活化	硫酸活化赤泥	6.46	5.5	25℃	[40]
酸活化	0.8 M HCl 活化赤泥	30.2	5	-	[59]
热活化	AlCl <sub>3</sub> 和热活化赤泥	91.28	-	-	[44]
金属氧化物负载	Ce 改性赤泥	16.7	6	30℃	[50]
聚合物复合	海藻酸钠-赤泥吸附剂	8.775	5	-	[58]

## 5. 赤泥去除废水中氟离子的展望

赤泥，作为铝土矿拜耳法生产氧化铝过程中的一种高碱性工业固体废弃物，尽管在水处理领域，特

别是重金属和氟污染控制方面表现出巨大的应用潜力，但其大规模应用仍面临多重潜在风险，这些风险主要源于赤泥本身的复杂组成、物理化学性质及其处理过程中可能引发的二次环境问题。

### 5.1. 重金属浸出毒性风险

赤泥的成分复杂，除了主要含有氧化铁、氧化铝、二氧化硅等组分外，还可能富集多种重金属元素，如砷(As)、铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)等[60][61]。虽然赤泥本身对某些重金属具有吸附能力，但在特定环境条件下，如 pH 值剧烈变化、氧化还原电位改变或与其他物质发生相互作用时，这些重金属可能会从赤泥中浸出，从而对处理后的水体或土壤造成二次污染[60][62]。特别是在对赤泥进行改性以增强其吸附性能时，引入的改性剂(例如铈、锰、锆等化合物)在不当条件下也可能发生浸出，进一步增加环境风险[50]。例如，在酸性环境中，赤泥中某些金属离子的溶解度会显著增加，导致浸出风险升高。因此，对改性赤泥及其吸附污染物后的产物的重金属浸出毒性进行全面、严格的评估至关重要，以确保其在水处理应用中的环境安全性。

### 5.2. 二次污染风险

赤泥作为粉体材料，在实际应用过程中存在易流失、难沉降的问题[60]。如果未经适当的固化处理或工程化改造，细小的赤泥颗粒容易随水流失，造成水体浑浊，或在空气中形成粉尘，引发空气污染。更为关键的是，当赤泥基吸附剂达到吸附饱和后，若处置不当，其所吸附的污染物(如氟化物[60]、重金属[61])可能再次释放到环境中，形成新的污染源。赤泥吸附饱和后的再生方法主要包括碱再生与盐再生两类。NaOH 溶液再生通过 OH<sup>-</sup>与吸附的 F<sup>-</sup>进行离子交换，恢复部分活性，但多次循环后再生效率可能显著下降[60]。铝盐(如 AlCl<sub>3</sub>)再生则利用 Al<sup>3+</sup>与 F<sup>-</sup>更强的配位能力将 F<sup>-</sup>置换下来，同时负载的铝物种可能形成新的活性位点，提升后续循环的吸附容量。多次循环后，赤泥吸附剂普遍面临结构稳定性问题[63]。反复的酸碱处理或热再生会导致其比表面积下降、孔隙结构坍塌以及活性组分流失，从而造成吸附性能的不可逆衰减[53]。酸改性赤泥经数次再生后，其表面铁、铝氧化物的溶出可能加剧，削弱主要吸附位点[64]。因此，开发高效、经济且环境友好的赤泥基吸附剂再生技术，延长其使用寿命，并探索吸附饱和后赤泥的最终安全处置或进一步资源化途径，是避免二次污染的关键。例如：1) 固化/稳定化处理：使用水泥、地质聚合物等胶凝材料对废赤泥进行封装，固化氟离子并阻隔重金属浸出，使其达到安全填埋标准或作为建材骨料利用[65]；2) 高温烧结或熔融处理：在高温下将氟转化为稳定的晶相结构(如萤石)，实现废物的无害化与资源化[21]。未来研究需系统评估这些处置技术的长期环境稳定性与经济可行性。

### 5.3. 高碱性及其对环境的影响

原始赤泥通常具有较高的 pH 值，其强碱性可能对水生生态系统和土壤环境产生不利影响[63]。尽管可以通过酸处理等改性方法来调节赤泥的表面性质和 pH 值，以优化其吸附性能，但改性过程中产生的酸性废水或固体废弃物同样需要妥善处理，避免引入新的环境问题。若不加控制地将高碱性赤泥直接应用于环境修复，可能会显著改变受纳水体或土壤的 pH 值，从而影响当地生态系统的平衡和生物多样性。

### 5.4. 工程应用中的稳定性和效率挑战

赤泥作为粉体材料，在实际水处理工程应用中面临操作性挑战，例如容易流失、难以沉降，这可能导致处理效率不稳定，并增加后续固液分离的难度和成本。为了解决这些问题，研究人员正在开发颗粒化、磁性化或负载在膜上的赤泥基材料，以提高其在实际工程应用中的可操作性和分离效率。此外，赤泥基吸附剂的长期稳定性和抗干扰能力也是需要考虑的风险。在复杂的废水体系中，其他共存离子可能会与目标污染物(如氟离子)竞争吸附位点，从而降低赤泥的去除效率和选择性。

## 5.5. 经济成本与可持续性风险

尽管赤泥本身是一种廉价且储量丰富的工业废弃物，但为了提高其在水处理中的性能，通常需要进行改性处理。这些改性过程可能涉及昂贵的化学品和能源消耗。如果改性成本过高，可能会限制其在大规模水处理应用中的推广和经济可行性。此外，从全生命周期的角度来看，赤泥从生产、改性、应用到最终处置的全过程，都可能产生环境影响。因此，有必要进行全面的生命周期评估，以确保赤泥作为可持续材料在水处理中的绿色发展，避免其资源化利用在解决一个环境问题的同时又产生新的环境负担。

## 基金项目

滁州学院大学生创新创业训练计划项目——改性赤泥对光伏废水氟离子吸附性能研究(S202510377091)。

## 参考文献

- [1] Swain, B., Akcil, A. and Lee, J. (2022) Red Mud Valorization an Industrial Waste Circular Economy Challenge; Review over Processes and Their Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **52**, 520-570. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1829898>
- [2] Li, Q., Geng, C., Zhang, H., Shi, X., Liu, J. and Chen, C. (2025) The Large-Scale Sustainable Utilization Status of Bauxite Residue (Red Mud): Challenges and Perspectives for China. *Environmental Reviews*, **33**, 1-16. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0007>
- [3] Akcil, A., Swami, K.R., Gardas, R.L., Hazrati, E. and Dembele, S. (2024) Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals*, **14**, Article 587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
- [4] Liu, W., Yang, J. and Xiao, B. (2009) Review on Treatment and Utilization of Bauxite Residues in China. *International Journal of Mineral Processing*, **93**, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.005>
- [5] Deshpande, P. (2020) Characterization of Red Mud and Its Effects on Environment Due to Its Traditional Methods of Disposal. *International Journal of Chemical Studies*, **8**, 1347-1350. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i6s.10949>
- [6] Qi, Y. (2021) The Neutralization and Recycling of Red Mud—A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, **1759**, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1759/1/012004>
- [7] Wang, H., Zhao, Y., Lin, Z. and Shen, L. (2024) Efficient Separation of Iron and Alumina in Red Mud Using Reduction Roasting and Magnetic Separation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, **41**, 1543-1552. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00990-8>
- [8] Baral, S.S., Shekar, K.R., Viswanathan, V. and Surendran, G. (2016) Dissolution Kinetics of Cerium from Red Mud. *Separation Science and Technology*, **52**, 883-891. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1253587>
- [9] Liu, X. and Zhang, N. (2011) Utilization of Red Mud in Cement Production: A Review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **29**, 1053-1063. <https://doi.org/10.1177/0734242x11407653>
- [10] Kim, Y., Lee, Y., Kim, M. and Park, H. (2019) Preparation of High Porosity Bricks by Utilizing Red Mud and Mine Tailing. *Journal of Cleaner Production*, **207**, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.044>
- [11] Gao, Y., Li, Z., Xin, G., Shen, Q., Zhang, J. and Yang, Y. (2023) Utilization of High-Volume Red Mud Application in Cement Based Grouting Material: Effects on Mechanical Properties at Different Activation Modes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **35**, Article 04023011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004678](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004678)
- [12] Raj, R., Yadav, B., Yadav, J.S. and Kumar, S. (2024) Red Mud Utilisation for Sustainable Construction and Soil Improvement: A Comprehensive Review. *Discover Sustainability*, **5**, Article No. 398. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00619-2>
- [13] Rai, S., Bahadure, S., Chaddha, M.J. and Agnihotri, A. (2021) Utilization of Aluminium Industry Solid Waste (Red Mud/Bauxite Residue) in Pollution Control. In *Innovations in Sustainable Mining: Balancing Environment, Ecology and Economy*, Springer International Publishing, 21-43. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73796-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73796-2_2)
- [14] Xie, W., Zhou, F., Bi, X., Chen, D., Li, J., Sun, S., et al. (2018) Accelerated Crystallization of Magnetic 4a-Zeolite Synthesized from Red Mud for Application in Removal of Mixed Heavy Metal Ions. *Journal of Hazardous Materials*, **358**, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.007>
- [15] Liu, Y., Naidu, R. and Ming, H. (2011) Red Mud as an Amendment for Pollutants in Solid and Liquid Phases. *Geoderma*, **163**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.002>

- [16] Liu, Y., Zhang, L., Chen, L., Xue, B., Wang, G., Zhu, G., *et al.* (2024) Potential of Artificial Soil Preparation for Vegetation Restoration Using Red Mud and Phosphogypsum. *Science of The Total Environment*, **941**, Article 173553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173553>
- [17] Liu, Y., Zhang, L., Xue, B., Chen, L., Wang, G., Wang, J., *et al.* (2024) Simulation of Red Mud/Phosphogypsum-Based Artificial Soil Engineering Applications in Vegetation Restoration and Ecological Reconstruction. *Science of The Total Environment*, **951**, Article 175656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175656>
- [18] Jia, K., Zhou, Z., Singh, S.V. and Wang, C. (2024) A Review of the Engineered Treatment of Red Mud: Construction Materials, Metal Recovery, and Soilization Revegetation. *Results in Engineering*, **24**, Article 102927. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102927>
- [19] Archambo, M. and Kawatra, S.K. (2020) Red Mud: Fundamentals and New Avenues for Utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **42**, 427-450. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109>
- [20] Bhatnagar, A., Vilar, V.J.P., Botelho, C.M.S. and Boaventura, R.A.R. (2011) A Review of the Use of Red Mud as Adsorbent for the Removal of Toxic Pollutants from Water and Wastewater. *Environmental Technology*, **32**, 231-249. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.560615>
- [21] Luo, C., Liu, L., Ren, S., Lan, Y., Xu, C., Wang, J., *et al.* (2025) Development of Fluorophilic Magnetic Adsorbents with Ultrahigh Adsorption Capacity from Red Mud: Defluorination Behavior and Mechanisms. *ACS Omega*, **10**, 11397-11410. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11404>
- [22] Djouadi Belkada, F., Kitous, O., Drouiche, N., Aoudj, S., Bouchelaghem, O., Abdi, N., *et al.* (2018) Electrodialysis for Fluoride and Nitrate Removal from Synthesized Photovoltaic Industry Wastewater. *Separation and Purification Technology*, **204**, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.068>
- [23] Wan, K., Huang, L., Yan, J., Ma, B., Huang, X., Luo, Z., *et al.* (2021) Removal of Fluoride from Industrial Wastewater by Using Different Adsorbents: A Review. *Science of The Total Environment*, **773**, Article 145535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145535>
- [24] Kom, K.P., Gurugnanam, B. and Bairavi, S. (2022) Non-Carcinogenic Health Risk Assessment of Nitrate and Fluoride Contamination in the Groundwater of Noyyal Basin, India. *Geodesy and Geodynamics*, **13**, 619-631. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.04.003>
- [25] Wang, R., Zhang, C., Yu, H. and Sun, W. (2025) Research Progress on Hazardous Fluorine-Containing Wastewater Treatment in the Integrated Circuit Industry: A Resource Recovery Perspective. *Separation and Purification Technology*, **365**, Article 132626. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132626>
- [26] Tiwari, K.K., Raghav, R. and Pandey, R. (2023) Recent Advancements in Fluoride Impact on Human Health: A Critical Review. *Environmental and Sustainability Indicators*, **20**, Article 100305. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100305>
- [27] Kakei, M., Sakae, T., Mishima, H. and Yoshikawa, M. (2009) Comparison of Harmfulness between Fluoride and Cadmium Ions on the Crystal Nucleation Process. *Bone*, **44**, S414. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2009.03.335>
- [28] Han, J., Kiss, L., Mei, H., Remete, A.M., Ponikvar-Svet, M., Sedgwick, D.M., *et al.* (2021) Chemical Aspects of Human and Environmental Overload with Fluorine. *Chemical Reviews*, **121**, 4678-4742. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01263>
- [29] Wang, P. and Liu, D. (2012) Physical and Chemical Properties of Sintering Red Mud and Bayer Red Mud and the Implications for Beneficial Utilization. *Materials*, **5**, 1800-1810. <https://doi.org/10.3390/ma5101800>
- [30] Kalkan, E., Nadaroglu, H., Dikbaş, N., Taşgın, E., & Çelebi, N. (2013) Bacteria-Modified Red Mud for Adsorption of Cadmium Ions from Aqueous Solutions. *Polish Journal of Environmental Studies*, **22**, 417-429.
- [31] Babisk, M.P., Amaral, L.F., Ribeiro, L.D.S., Vieira, C.M.F., Prado, U.S.D., Gadioli, M.C.B., *et al.* (2020) Evaluation and Application of Sintered Red Mud and Its Incorporated Clay Ceramics as Materials for Building Construction. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 2186-2195. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>
- [32] 王小娟, 岳艳艳, 赵频, 等. 赤泥颗粒吸附剂对重金属 Cd(II)和 Pb(II)吸附性能研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(5): 61-64.
- [33] 韩玉芳, 杨久俊, 王晓, 等. 烧结法和拜耳法赤泥的基本特性对比及利用价值研究[J]. 材料导报, 2011, 25(22): 122-125.
- [34] 孙兆云, 吴昊, 侯佳林. 改性拜耳法赤泥路基填料施工与质量评价研究[J]. 路基工程, 2018(3): 69-72.
- [35] Liu, D. and Wu, C. (2012) Stockpiling and Comprehensive Utilization of Red Mud Research Progress. *Materials*, **5**, 1232-1246. <https://doi.org/10.3390/ma5071232>
- [36] 刘昌俊, 李文成, 周晓燕, 栾兆坤. 烧结法赤泥基本特性的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(4): 4.
- [37] 王笑, 刘元元, 汪军. 联合法赤泥的特性及其对水溶液中 Pb(II)的去除[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 515-522.
- [38] Liang, W., Couperthwaite, S.J., Kaur, G., Yan, C., Johnstone, D.W. and Millar, G.J. (2014) Effect of Strong Acids on

- Red Mud Structural and Fluoride Adsorption Properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, **423**, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.02.019>
- [39] Li, L., Zhu, Q., Man, K. and Xing, Z. (2017) Fluoride Removal from Liquid Phase by Fe-Al-La Trimetal Hydroxides Adsorbent Prepared by Iron and Aluminum Leaching from Red Mud. *Journal of Molecular Liquids*, **237**, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.097>
- [40] Çengeloglu, Y. (2002) Removal of Fluoride from Aqueous Solution by Using Red Mud. *Separation and Purification Technology*, **28**, 81-86. [https://doi.org/10.1016/s1383-5866\(02\)00016-3](https://doi.org/10.1016/s1383-5866(02)00016-3)
- [41] 马淞江, 罗道成. 赤泥负载铈吸附剂对废水中氟的吸附性能研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(1): 50-54.
- [42] 罗道成, 汪威, 安静. 赤泥负载镧新型吸附剂的制备及其除氟性能[J]. 矿业工程研究, 2012, 27(2): 75-80.
- [43] 王国建, 王东田, 陈霞, 等. 吸附法除氟技术的原理与方法[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(8): 121-124.
- [44] 魏宁, 栾兆坤, 王军, 等. 铝改性赤泥吸附剂的制备及其除氟效能的研究[J]. 无机化学学报, 2009, 25(5): 849-854.
- [45] Vinati, A., Rene, E.R., Pakshirajan, K. and Behera, S.K. (2019) Activated Red Mud as a Permeable Reactive Barrier Material for Fluoride Removal from Groundwater: Parameter Optimisation and Physico-Chemical Characterisation. *Environmental Technology*, **41**, 3375-3386. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1609591>
- [46] 杨利锦, 郭华明. 活化赤泥的除氟性能[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3981-3988.
- [47] 郑雁, 郑红, 赵磊, 等. 赤泥除氟效果及吸附特性研究[J]. 有色矿冶, 2008, 24(5): 38-41.
- [48] 李德贵, 黄刚, 覃铭, 等. 活化赤泥除氟剂的制备及除氟性能试验研究[J]. 环境科技, 2015, 28(1): 11-13.
- [49] Joseph, C.G., Taufiq-Yap, Y.H., Krishnan, V. and Puma, G.L. (2019) Application of Modified Red Mud in Environmentally-Benign Applications: A Review Paper. *Environmental Engineering Research*, **25**, 795-806. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.374>
- [50] Wang, D., Luo, L., Chen, Y., Chen, S., Qiu, X. and Liu, M. (2023) Fluoride Removal from Aqueous Solution Using Ce-Modified Red Mud as Adsorbent. *Materials Today Sustainability*, **24**, Article 100502. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100502>
- [51] Wei, N., Luan, Z.K., Wang, J., Shi, L. and Wu, J.W. (2009) Preparation of Modified Red Mud with Aluminum and Its Adsorption Characteristics on Fluoride Removal. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, **25**, 849-854
- [52] Liu, X., Zhong, Y., Zhu, S., Zhang, S. and Cao, J. (2022) Study on the Properties of Bauxite Modified by Acid Leaching and Calcination for Improving Fluorine Removal. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, **18**, e2839. <https://doi.org/10.1002/apj.2839>
- [53] Yi, M., Wang, K., Wei, H., Wei, D., Wei, X., Wei, B., et al. (2023) Efficient Preparation of Red Mud-Based Geopolymer Microspheres (RM@GMs) and Adsorption of Fluoride Ions in Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **442**, Article 130027. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130027>
- [54] Zhu, B., Duan, R., Li, Y., Lu, X., Sun, Y. and Gao, J. (2024) Enhanced Fluoride Removal from Water Using Acid-Modified Red Clay Soil from the Loess Plateau of China. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **73**, 1372-1388. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.045>
- [55] Teutli-Sequeira, A., Solache-Ríos, M., Martínez-Miranda, V. and Linares-Hernández, I. (2014) Comparison of Aluminum Modified Natural Materials in the Removal of Fluoride Ions. *Journal of Colloid and Interface Science*, **418**, 254-260. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.020>
- [56] Wei, Y., Wang, L., Li, H., Yan, W. and Feng, J. (2022) Synergistic Fluoride Adsorption by Composite Adsorbents Synthesized from Different Types of Materials—A Review. *Frontiers in Chemistry*, **10**, Article ID: 660. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.900660>
- [57] Li, J., Li, X., Fischel, M., Lin, X., Zhou, S., Zhang, L., et al. (2024) Applying Red Mud in Cadmium Contamination Remediation: A Scoping Review. *Toxics*, **12**, Article 347. <https://doi.org/10.3390/toxics12050347>
- [58] Li, X., Zhang, T., Lv, G., Wang, K. and Wang, S. (2023) Summary of Research Progress on Metallurgical Utilization Technology of Red Mud. *Minerals*, **13**, 737. <https://doi.org/10.3390/min13060737>
- [59] Kang, K., Nyakunga, E., Kim, Y. and Park, S. (2015) Influence of Acid and Heat Treatment on the Removal of Fluoride by Red Mud. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **37**, 210-217. <https://doi.org/10.4491/ksee.2015.37.4.210>
- [60] Rajković, M., Jelić, I., Janković, M., Antonijević, D. and Šljivić-Ivanović, M. (2025) Red Mud as an Adsorbent for Hazardous Metal Ions: Trends in Utilization. *Toxics*, **13**, Article 107. <https://doi.org/10.3390/toxics13020107>
- [61] Sun, W., Xie, W., Wang, L., Wang, L., Gong, Y., Li, X., et al. (2025) The Use of Red Mud in Agricultural Soil Cadmium Remediation: A Critical Review. *Toxics*, **14**, Article 16. <https://doi.org/10.3390/toxics14010016>
- [62] Li, F., Deng, R., Hou, B., Peng, L., Ren, B., Kong, X., et al. (2025) Sustainable Remediation: Advances in Red Mud-

- 
- Based Synergistic Fabrication Techniques and Mechanistic Insights for Enhanced Heavy Metal(Loid)s Sorption in Wastewater. *Processes*, **13**, Article 2249. <https://doi.org/10.3390/pr13072249>
- [63] Wang, X., Zhu, H., Sun, T. and Dai, H. (2020) Synthesis of a Matériaux Institut Lavoisier Metal-Organic Framework 96 (MIL-96(RM)) Using Red Mud and Its Application to Defluorination of Water. *Materials Today Communications*, **25**, Article 101401. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101401>
- [64] Mohan, D., Goyal, H., Kushwaha, R., Markandeya, Shukla, S.P. and Srivastava, V. (2023) Fluoride Removal Using Activated Red Mud. *Environmental Quality Management*, **33**, 559-566. <https://doi.org/10.1002/tqem.22112>
- [65] Wang, Y., Li, L., Liu, Z. and Ren, Z. (2023) Frontier Research and Prospect of Phosphate Adsorption in Wastewater by Red Mud: A Review. *Desalination and Water Treatment*, **310**, 86-108. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29958>