

The Research Progress of Using Red Mud-Based Materials to Remove Water Pollutants

Yuting Yuan, Yinghong Liu*, Songtao Hong, Xiaoyan Li, Chengbin Song, Ruiyu Li

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi
Email: yuan13158222676@163.com, *15860628@qq.com

Received: Jun. 1st, 2020; accepted: Jun. 15th, 2020; published: Jun. 22nd, 2020

Abstract

Red mud is the solid waste produced in the production process of alumina. At present, it is mainly disposed by stacking, not only occupying a lot of land, but also causing serious pollution to the surrounding environment. Therefore, the harmless treatment and resource utilization of red mud is imminent. Red mud is generally alkaline, with the advantages of specific surface area and good absorption performance, which has been widely used in environmental pollution control in recent years. In this paper, the main types, physical and chemical components of red mud and the main preparation methods of red mud based materials are summarized, and the research progress of using red mud based materials to remove water pollutants is reviewed, in order to provide a basis for expanding the harmless and resource-based utilization of red mud.

Keywords

Red Mud-Based Materials, Water Pollution, Comprehensive Utilization, Environmental Protection

利用赤泥基材料去除水体污染物的研究进展

袁雨婷, 刘莹红*, 洪松涛, 李晓艳, 宋承滨, 李睿昱

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林
Email: yuan13158222676@163.com, *15860628@qq.com

收稿日期: 2020年6月1日; 录用日期: 2020年6月15日; 发布日期: 2020年6月22日

摘要

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废渣, 目前主要通过堆存处理, 不仅占用大量土地, 而且对周边环境

*通讯作者。

文章引用: 袁雨婷, 刘莹红, 洪松涛, 李晓艳, 宋承滨, 李睿昱. 利用赤泥基材料去除水体污染物的研究进展[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(6): 472-478. DOI: 10.12677/ag.2020.106044

境造成严重污染。因此,对赤泥进行无害化处理和资源化利用迫在眉睫。赤泥一般呈碱性,具有比表面积、吸附性能好等优点,近年来在环境污染控制方面应用广泛。概述了赤泥的主要类型、物理化学成分和赤泥基材料的主要制备方法等,重点评述了当前利用赤泥基材料去除水体污染物的研究进展,以期拓宽赤泥无害化和资源化利用提供依据。

关键词

赤泥基材料, 水体污染物, 综合利用, 环境保护

Copyright © 2020 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

赤泥是制铝工业提炼氧化铝过程中产生的固体废渣,因含有大量氧化铁而呈红色,被称为赤泥。根据生产工艺、铝土矿来源和提取工艺水平的不同,每生产一吨氧化铝产出大约 1.5~2.5 t 赤泥[1]。据估计,全世界氧化铝工业每年产生的赤泥超过 6×10^7 t [2],我国氧化铝生产过程中每年产生的赤泥量超过 600 万 t [3] [4] [5],大多采用露天筑坝堆存[6],已直接或间接影响到人类的生产和生活[7]。赤泥处理不当可能造成严重的环境污染,如赤泥颗粒粒径一般小于 10 μm ,经风化干燥后形成的灰尘极易造成处置区表面的空气污染[8] [9],而其中可溶性化合物成分,如碳酸钠,氢氧化钠和碳酸氢钠等,则溶解于雨水中造成土壤盐碱化、地下水污染等[10]。

随着社会经济持续快速发展,工业生产和人类活动排放的大量废弃物对水体的污染日益严峻,水体污染已成为当今社会面临的重大环境问题之一。如工业活动排放的重金属污染物和有机污染物、农业生产活动中有机氯农药的长期过量使用等,不仅污染地表水和地下水,同时通过食物链富集作用,对人类健康也带来了严重影响。赤泥中一般含有多种金属元素[11],并具有颗粒分散性好、比表面积大、吸附性能好等优点,赤泥基材料在去除水体中污染物方面具有得天独厚的优势,也是当前赤泥无害化处理和资源化利用的热点研究方向。

通过综述前人研究成果,本文主要介绍了当前工业排放赤泥的类型和物理化学性质,对赤泥基材料的制备及其用于去除水体污染物的研究现状进行总结,重点评述了利用不同改性赤泥去除水体污染物的机制及效果。

2. 赤泥的类型与性质

2.1. 类型划分

氧化铝企业通常根据铝土矿中铝硅比来选择生产工艺,铝硅比高的多采用拜耳法生产氧化铝,铝硅比相对较低的多采用烧结法或烧结法和拜耳法联合生产氧化铝[12]。因此,按照氧化铝生产工艺,赤泥可分为拜耳法赤泥、烧结法赤泥和联合法赤泥 3 种[13]。

1) 烧结法赤泥:铝土矿中的氧化铝经烧结后转变为易溶于水或稀碱的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,经溶解后形成 NaAlO_2 ,而硅、铁及钛等杂质则形成不溶物随烧结法赤泥排出[14]。

2) 拜耳法赤泥:在高温高压条件下,苛性钠与铝土矿中的富铝矿物发生反应,生成 $\text{NaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,经

过滤分离、降温后加入晶种氢氧化铝溶液，搅拌后 $\text{NaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 分解析出氢氧化铝，分离洗涤后的残渣即为拜耳法赤泥，矿石中的二氧化硅转变成方钠石和水合铝硅酸钠进入赤泥排出[14]。

3) 联合法赤泥：指将拜耳法和烧结法联合使用的方法，适宜处理铝硅比值为 5~7 的铝土矿，一般以拜耳法为主，烧结法为辅，其排出的赤泥为联合法赤泥，兼具拜耳法赤泥和烧结法赤泥的特点[15]。

2.2. 矿物组成和物理化学特征

赤泥的主要组成矿物为文石和方解石，含量为 60%~65%；其次是蛋白石、三水铝石和针铁矿；钛铁矿、菱铁矿、天然碱、水玻璃、铝酸钠和火碱含量相对较少[16] [17]。不同生产工艺赤泥的矿物组成列于表 1 [18]。其中文石、方解石和菱铁矿，既是赤泥骨架的主要组成部分，又具有一定的胶结作用；针铁矿、三水铝石、蛋白石、水玻璃主要起胶结作用和填充作用[16] [19] [20]。赤泥化学成分复杂，受铝土矿原料成分、氧化铝生产工艺和生产过程中添加剂成分、新生成的化合物成分等影响[21]，主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 和 Na_2O 等六种氧化物或其盐类化合物为主，并含有多种微量元素。

赤泥颜色深浅往往随含铁量的变化而发生改变。赤泥的比表面积大，一般为 $64.09 \text{ m}^2/\text{g}$ ~ $186.9 \text{ m}^2/\text{g}$ ，受矿物分散度和晶格构造差异性影响，不同类型赤泥比表面积变化幅度较大。赤泥的含水量为 86.01%~93.23%，大于粘土[2]。

Table 1. The mineral composition (mass fraction) unit of red mud in different production methods (Unit: %)

表 1. 不同类型赤泥的矿物组成(质量分数) (单位: %)

成分	烧结法赤泥	拜耳法赤泥	联合法赤泥
硅酸二钙	43		46
水合硅酸铝钠	4	20	4
水化石榴石	5	20	2
方解石	14	19	10
褐铁矿		4	4
一水软铝石		21	1
钙钛矿	4	15	12
铁铝酸四钙	6		12
三斜霞石	7		8
二硫化亚铁	1	1	
其他	1		
总计	95	100	96

注：表中数据转引自南相莉等研究成果[18]。

3. 赤泥基材料的改性方法

利用赤泥去除水体中污染物时，通常需要通过活化改性才能达到更好的效果[22]。目前，赤泥改性方法主要包括物理改性、化学改性、中和活化改性及联合改性等。

3.1. 物理改性法

赤泥的物理改性是指不添加任何物质而直接对赤泥进行高温煅烧活化[23]。高温煅烧过程中，赤泥通过丢失表面水、水化水和结构骨架水使水膜对污染物质的吸附阻力变小，从而提高赤泥的吸附性能。如史丽等[24]采用焙烧活化后的赤泥去除畜禽废水生化处理出水中的磷，发现 900°C 下焙烧活化赤泥基材料

的饱和吸附量可由 46.26 mg/g 提高至 149.00 mg/g。但是, 这种方法对焙烧温度要求过于苛刻, 若温度过高时, 赤泥中的部分物质(如 CaO、Fe₂O₃ 和 γ -Al₂O₃)会发生化合反应或转化反应, 从而降低改性赤泥材料的吸附能力。同时, 焙烧活化技术的能耗较高, 限制了其在工业上的大规模应用[25]。

3.2. 化学改性法

赤泥的化学改性主要是通过加入酸性物质或有机试剂对赤泥吸附性进行活化改性处理[23]。酸活化是指将原始赤泥与酸溶液(盐酸、硫酸、硝酸、柠檬酸等)在一定条件下进行反应, 不但可将附着于赤泥表面、妨碍阴离子吸附的薄膜清洗掉, 也可疏通赤泥的内部孔道, 同时酸化还能使赤泥晶格中铝、铁区域的空隙配衡金属离子 K⁺或 Na⁺溶解于酸中, 使表面形成正电荷空洞[26], 从而大大提高赤泥的吸附性能。前人研究显示, 酸活化技术可显著改善赤泥对阴离子的吸附性能, 如可显著改善赤泥对磷酸盐的吸附性能[27], 最大吸附容量可达 4.9246 mg/g [28]。Huang [29]通过不同的酸处理制备四种衍生样品, 发现经盐酸处理后的赤泥样品在 pH 值为 5.5 时的吸附容量为 0.58 mgP/g, 未经处理赤泥样品的吸附容量仅为 0.23 mgP/g。黄凯等[30]采用稀柠檬酸活化处理后的赤泥对染料分子进行吸附效率测定, 测得活化赤泥对亚甲基蓝的最大吸附容量达到了 30 mg/g。然而, 值得注意的是, 酸活化法也可能会溶解赤泥中部分钙霞石或其它沸石型化合物, 从而导致其表面吸附位点的减少而降低其吸附能力[31]。

3.3. 中和活化改性法

赤泥的中和活化改性方法是指通过降低赤泥碱性从而达到改变赤泥矿物学组成的技术方法[32], 即通过提高赤泥组分中无定型沉淀物的数量, 改善赤泥与重金属离子的结合能力。如 Sahu 等[33]研究发现经 CO₂ 中和活化技术改性的赤泥能有效去除水中的砷。Cengeloglu 等[34]利用 CO₂ 中和活化技术有效提升了赤泥对水中硼的吸附能力。Genç-Fuhrman [35]等研究了赤泥与高浓度海水混合后对砷吸附能力的变化, 发现这种中和活化技术同样能够提高赤泥去除水中砷的效率。

3.4. 联合活化改性法

赤泥的联合活化改性方法是指将酸活化、焙烧活化及中和活化中的两种或者多种方法联合使用, 改善赤泥理化性质的方法。李燕中[36]等研究发现, 经过酸活化及焙烧活化后的赤泥, 即使在 pH 值波动较大时也能很好地处理高浓度含磷废水。成功等[37]研究了赤泥对染料废水中分散艳蓝 E-4R 的吸附作用, 发现经酸活化及焙烧活化后的赤泥对分散艳蓝 E-4R 的吸附行为符合 Langmuir 等温方程, 改性后的赤泥对分散艳蓝 E-4R 的饱和吸附量为 42.19 mg/g。总体上看, 虽然利用酸活化和焙烧活化联合改性方法制备赤泥基材料优于单一改性方法然而由于其操作复杂且能耗较高, 目前尚不适合在工业上大规模推广应用。

4. 利用赤泥基材料去除水体污染物研究现状

4.1. 利用赤泥基材料去除污染水体中的重金属元素

将改性赤泥作为新型吸附剂, 提高污染水体中砷、铬、铅的去除效率是目前研究的热点。Hulya 等[38]在研究使用海水中赤泥去除水中无机砷时发现, 亚砷酸盐 As(III)被氧化成砷酸盐 As(V)时吸附效果最好。Gupta 和 SHARM [39]利用过氧化氢对赤泥进行改性, 研究了对 Pb、Cr 的吸附效果, 发现改性赤泥对 Cr 的吸附量大于 Pb, 且二者去除的浓度范围较大, 说明用赤泥去除 Pb、Cr 的约束条件较小。郑红等[40]将钾长石粉合成的 13X 沸石与赤泥混合使用, 开展了其吸附砷的条件实验研究, 结果表明赤泥与沸石混合使用的除砷效果明显高于单一沸石或赤泥。这可能与赤泥中含有大量的铁和钛等金属氧化物相关, 由表面络合吸附理论得出, 大量的金属氧化物对砷阴离子有良好的吸附作用; 且砷溶液中 pH 值很低,

赤泥的加入会生成一定的 Fe^{3+} ，而 Fe^{3+} 的存在也可能改变沸石内部的阴离子空缺，对沸石吸附砷有一定的活化作用，能调节溶液的 pH 值，故赤泥与沸石混合吸附剂处理重金属离子具有很好的效果。肖利萍等[41]将赤泥、膨润土黏结剂、碳酸钠造孔剂以 93:1:6 的质量比均匀混合制成赤泥复合颗粒，发现其对酸性矿山废水中的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的去除率分别达 99.41% 和 94.27%。王斌等[42]以拜耳法赤泥为主要原料，添加木粉、石灰石制备改性烧胀陶粒，研究了陶粒对含铅废水中 Pb^{2+} 的吸附作用及影响吸附的因素。结果表明，陶粒对废水中 Pb^{2+} 的吸附率为 97.8%。曾佳佳等[43]以赤泥为原料，将其高温焙烧活化改性，研究了其对含铬废水中 Cr^{6+} 的吸附效果， Cr^{6+} 的去除率高达 97.63%。

4.2. 利用赤泥基材料去除污染水体中的氟、磷酸盐等阴离子

前人研究表明，利用赤泥基材料去除污染水体中的氟、磷酸盐等阴离子具有明显的效果。Yunus 等[44]用 20% 的 HCl 对赤泥进行活化改性，研究发现活化后的赤泥对氟的吸附效果好于原始赤泥。Zhao 等[45]通过添加膨润土、淀粉对赤泥进行改性，改性后的赤泥在 pH 值为 5.0 时，对磷酸盐的去除能力最大为 6.64 mg/g。李德贵等[46]研究了焙烧时间对改性后赤泥吸附性能的影响，发现当焙烧温度达到 700℃，焙烧时间为 1 h 时，改性赤泥对含氟废水中氟的去除率达到 98%。马淞江等[47]研究了酸对改性赤泥的影响，显示当盐酸浓度为 6 mol/L 时，改性赤泥对含氟废水中氟的去除率高达 98%。潘嘉芬等[48]通过涂铁、涂铝对拜耳法赤泥质陶粒滤料改性，发现涂铁改性陶粒对废水中氟离子的去除效果有明显的提高，且容易再生循环利用。李燕中等[36]以山东铝业股份公司的赤泥为原料，分别使用酸活化、焙烧活化、热酸活化三种处理方法，制得除磷吸附剂，发现活化赤泥对磷的吸附量远高于原始赤泥的去除效果，其中热酸活化赤泥除磷的能力更强，饱和吸附量为 202.9 mg/g。王春丽等[49]以粉煤灰为激发剂，膨润土为黏结剂，碳酸氢钠为发泡剂作为制备活化赤泥颗粒的辅助材料，根据配比不同制备成 9 种新型活化赤泥颗粒，通过正交试验对比研究不同配比焙烧赤泥颗粒，比较其水体中磷的去除效果，利用红外光谱法和 XRD 对 2 种除磷效果较好的活化赤泥颗粒的理化特性进行了表征和比较，发现在赤泥颗粒中形成一些具有稳定的晶型结构的化学成分，这是由于赤泥所含的主要成分如 Fe、Al 和 Si 的氧化物在水中能够发生水解反应，有利于焙烧赤泥的强度，从而实现对磷的吸附去除。Hu 等[50]在碱性条件下使用赤泥和硼泥混合制备吸附剂，用于吸附废水中磷酸盐研究，发现磷酸盐去除率可达 93%。李德贵等[51]研究表明，改性赤泥除氟剂的最佳焙烧温度为 700℃，最佳焙烧时间为 2 h，溶液中氟离子的浓度可从 19 mg/L 下降到 0.13 mg/L，吸附容量为 0.94 mg/g，除氟率高达 99%。

4.3. 利用赤泥基材料去除污染水体中的有机物

赤泥基材料在去除污染水体中有机污染物方面具有良好的效果，目前的研究主要集中在对苯酚和氯酚去除方面。Gupta [52]研究了改性赤泥对废水中 2,4-二氯苯酚、4-氯苯酚、2-氯苯酚、苯酚的吸附效果，发现吸附的顺序是 2,4-二氯苯酚(97%) > 4-氯苯酚(93%) > 2-氯苯酚(80%) > 苯酚(51%)。Hu [53]以活化赤泥作为吸附剂研究了去除污染水体中亚甲基蓝的效果，从吸附剂剂量、接触时间、pH 值和初始浓度等方面研究了对亚甲基蓝去除效果的影响，发现在 pH 值为 7.0 时，活化赤泥的吸附容量达到 274 mg/g，而未活化赤泥吸附容量为 232 mg/g，活化的赤泥对亚甲基蓝的去除效果更好。

5. 结论

赤泥作为吸附剂去除水体中的污染不仅可以解决资源浪费、占用土地的问题，而且经处理后可用于吸附水中重金属离子、磷酸盐等无机污染物，也可以用于脱色及 COD 的降低等[54]。但其研究仍存在许多问题。如下：

1) 赤泥的应用具有限制性。赤泥中存在钠、碱度高,且存在放射性,在其利用方案中产生了很大的问题。如作为建筑材料的制备应用受到限制。

2) 以赤泥为原材料的产品难以取得市场的充分信任。由于环境和安全问题,人们不希望接受废料中的产品,故赤泥的相关产品难以取得市场的充分信任。

3) 推广途径有待进一步拓宽。将赤泥用于制备环保材料是迈向绿色革命的重要一步,但市场上的要求非常小,需要积极构建赤泥资源化利用的学术交流平台,从更广、更深的角度,讨论我国赤泥资源化利用并加以推广。

总之,赤泥的资源化利用是全球的一个迫切问题,尽管已经在实验室规模上开发了许多应用。但更多的应当是落到实处,实现赤泥的资源化利用。

参考文献

- [1] 李艺. 沂沭河水环境污染状况及面源污染特征分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
- [2] 赖兰萍, 周李蕾, 韩磊, 等. 赤泥综合回收与利用现状及进展[J]. 四川有色金属, 2008(1): 43-48.
- [3] 姚珺. 用工业废渣赤泥制备混凝剂的研究[J]. 化学与生物工程, 2009, 26(11): 68-70.
- [4] 甘桂裕. 基于 PLC 的赤泥综合回收控制系统的设计与应用[J]. 大众科技, 2014, 16(9): 193-194.
- [5] 李小平. 平果铝赤泥堆场的边坡环境问题与治理对策研究[J]. 有色金属 (矿山部分), 2007, 59(2): 29-31.
- [6] 魏红姗, 马小娥, 管学茂, 等. 拜耳法赤泥基轻质保温陶瓷的制备[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 749-751, 761.
- [7] 景英仁, 杨奇, 景英勤. 赤泥的基本性质及工程特性[J]. 山西建筑, 2001, 27(3): 80-81, 108.
- [8] Li, L.Y. (1998) Properties of Red Mud Tailings Produced under Varying Process Conditions. *Journal of Environmental Engineering*, **124**, 254-264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:3\(254\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:3(254))
- [9] Power, G., Gräfe, M. and Klauber, C. (2011) Bauxite Residue Issues: I. Current Management, Disposal and Storage Practices. *Hydrometallurgy*, **108**, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>
- [10] Gomes, H.I., Mayes, W.M., Rogerson, M., et al. (2016) Alkaline Residues and the Environment: A Review of Impacts, Management Practices and Opportunities. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 3571-3582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.111>
- [11] Xie, W.M., Zhou, F.P., Bi, X.L., 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>
- [12] Liu, W., Chen, X., Li, W., et al. (2014) Environmental Assessment, Management and Utilization of Red Mud in China. *Journal of Cleaner Production*, **84**, 606-610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.080>
- [13] 李彬, 张宝华, 宁平, 等. 赤泥资源化利用和安全处理现状与展望[J]. 化工进展, 2018, 37(2): 714-723.
- [14] 幸卫鹏. 赤泥综合利用评述[J]. 世界有色金属, 2019(8): 269-270.
- [15] Harekrushna, S., Subash, C.M., Santosh, K.S., et al. (2014) Progress of Red Mud Utilization: An Overview. *American Chemical Science Journal*, **4**, No. 3. <https://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/7258>
- [16] 景英仁, 景英勤, 杨奇. 赤泥的基本性质及其工程特性[J]. 轻金属, 2001(4): 20-23.
- [17] 钟文波. 环保型清水砖的研制[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [18] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 459-464.
- [19] 练佳佳, 唐庆杰, 吴文荣, 等. 赤泥在环境修复领域的应用综述[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(11): 3236-3242.
- [20] 宇平. 聚氯乙烯/赤泥复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料助剂, 2014(3): 27-30.
- [21] 陈蓓, 陈素英. 赤泥的综合利用和安全堆存[J]. 化工技术与开发, 2006, 35(12): 32-35.
- [22] 吴世超, 朱立新, 孙体昌, 等. 赤泥综合利用现状及展望[J]. 金属矿山, 2019(6): 38-44.
- [23] 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.
- [24] 史丽, 彭先佳, 栾兆坤, 等. 活化赤泥去除猪场废水生化处理出水中的磷和重金属[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2282-2288.
- [25] 叶捷. 活化赤泥制备及其磷酸盐吸附性能与机理研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2015.

- [26] 朱新锋, 杨珊姣, 焦桂枝. 赤泥在水处理中的应用与研究进展[J]. 无机盐工业, 2010, 42(2): 5-8.
- [27] Yan, Z., Li, C.J., Liu, Z.K., et al. (2006) Phosphate Removal from Aqueous Solutions Using Raw and Activated Red Mud and Fly Ash. *Journal of Hazardous Materials*, **137**, 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.011>
- [28] Ye, J., Cong, X.N., Zhang, P.Y., et al. (2015) Interaction between Phosphate and Acid-Activated Neutralized Red Mud during Adsorption Process. *Applied Surface Science*, **356**, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.053>
- [29] Huang Wei W, Wang, S.B., Zhu, Z.H., et al. (2008) Phosphate Removal from Wastewater Using Red Mud. *Journal of Hazardous Materials*, **158**, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.061>
- [30] 黄凯, 李一飞, 焦树强, 等. 柠檬酸活化赤泥对亚甲基蓝染料废水的吸附净化作用[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(12): 3182-3188.
- [31] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.022>
- [32] 蒋文艳, 张琳叶, 龙建沿, 等. 赤泥基环境修复材料的制备及应用进展[J]. 现代化工, 2018, 38(5): 29-33.
- [33] Sahu, R.C., Patel, R. and Ray, B.C. (2010) Utilization of Activated CO₂-Neutralized Red Mud for Removal of Arsenate from Aqueous Solutions. *Journal of Hazardous Materials*, **179**, 1007-1013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.105>
- [34] Cengelöglu, Y., Tor, A., Arslan, G., et al. (2006) Removal of Boron from Aqueous Solution by Using Neutralized Red Mud. *Journal of Hazardous Materials*, **142**, 412-417. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.037>
- [35] Genç-Fuhrman, H., Tjell, J.C. and McConchie, D. (2003) Increasing the Arsenate Adsorption Capacity of Neutralized Red Mud (Bauxsol). *Journal of Colloid and Interface Science*, **271**, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.011>
- [36] 李燕中, 刘昌俊, 栾兆坤, 等. 活化赤泥吸附除磷及其机理的研究[J]. 环境科学学报, 2006(11): 1775-1779.
- [37] 成功, 夏东升, 曾庆福. 微波活化赤泥对分散艳蓝 E-4R 的吸附去除研究[J]. 工业用水与废水, 2008(4): 43-46.
- [38] Genç-Fuhrman, H., Tjell, J.C. and McConchie, D. (2004) Adsorption of Arsenic from Water Using Activated Neutralized Red Mud. *Environmental Science & Technology*, **38**, 2428-2434. <https://doi.org/10.1021/es035207h>
- [39] Gupta, V.K. and Sharma, S. (2002) Removal of Cadmium and Zinc from Aqueous Solutions Using Red Mud. *Environmental Science & Technology*, **36**, 3612-3217. <https://doi.org/10.1021/es020010v>
- [40] 郑红, 梁树平, 曹燕飞, 等. 赤泥与 13X 沸石混合使用去除废水中砷[J]. 岩矿测试, 2006(3): 239-242.
- [41] 肖利萍, 宋佳诺, 王睿键, 等. 赤泥复合颗粒去除 Fe²⁺、Mn²⁺影响因素及吸附性能[J]. 非金属矿, 2017, 40(6): 82-84.
- [42] 王斌, 朱文凤, 王林江, 等. 广西拜耳法赤泥烧胀陶粒制备及对水体中 Pb²⁺的吸附[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 30-34.
- [43] 曾佳佳, 王东波, 冯庆革, 等. 改性赤泥吸附废水中 Cr(VI)的研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2013(3): 673-678.
- [44] Çengelöglu, Y. and Ersöz, M. (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)
- [45] Zhao, Y.Q., Yue, Q.Y., Li, Q., et al. (2012) Characterization of Red Mud Granular Adsorbent (RMGA) and Its Performance on Phosphate Removal from Aqueous Solution. *Chemical Engineering Journal*, **193-194**, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.040>
- [46] 李德贵, 钟岳, 陈漓. 赤泥为原料制备除氟剂的实验研究[J]. 盐业与化工, 2014, 43(12): 21-24.
- [47] 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.
- [48] 潘嘉芬, 李梦红. 拜耳法赤泥陶粒改性及吸附废水中氟离子试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(2): 63-65.
- [49] 王春丽, 吴俊奇, 宋永会, 等. 活化赤泥颗粒吸附除磷的效能与机制研究[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 143-148.
- [50] Hu, P., Zhang, Y., Lv, F., et al. (2017) Preparation of Layered Double Hydroxides Using Boron Mud and Red Mud Industrial Wastes and Adsorption Mechanism to Phosphate. *Water and Environment Journal*, **31**, 145-157. <https://doi.org/10.1111/wej.12212>
- [51] 李德贵, 覃铭, 何兵, 等. 赤泥除氟剂的物相组成及其除氟性能[J]. 环境工程学报, 2017(2): 1159-1163.
- [52] Gupta, V.K., Ali, I. and Saini, V.K. (2004) Removal of Chlorophenols from Wastewater Using Red Mud: An Aluminum Industry Waste. *Environmental Science & Technology*, **38**, 4012-4018. <https://doi.org/10.1021/es049539d>
- [53] Hu, Z.P., Gao, Z.M., Liu, X., et al. (2018) High-Surface-Area Activated Red Mud for Efficient Removal of Methylene Blue from Wastewater. *Adsorption Science & Technology*, **36**, 62-79. <https://doi.org/10.1177/0263617416684348>
- [54] 赵艺森, 王海芳, 魏阳. 赤泥的综合利用研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 55-58.