

# 国内高铁铝土矿资源及其利用

冷芳宇<sup>1,2</sup>, 张作良<sup>1,2\*</sup>, 林宇<sup>3</sup>, 赵鸿波<sup>4</sup>, 黄妍<sup>1,2</sup>, 曹宇<sup>1,2</sup>, 谢俊杰<sup>1,2</sup>, 王文迪<sup>1,2</sup>,  
赵畅<sup>1,2</sup>, 周伟豪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>辽宁科技学院冶金与材料工程学院, 辽宁 本溪

<sup>2</sup>辽宁科技学院辽宁省低品位非伴生铁矿优化应用重点实验室, 辽宁 本溪

<sup>3</sup>本钢板材股份有限公司炼铁总厂, 辽宁 本溪

<sup>4</sup>本钢板材股份有限公司研发院, 辽宁 本溪

收稿日期: 2025年1月7日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年3月5日

## 摘要

高铁铝土矿作为一种重要的矿产资源, 因其含有较高的铁和铝含量而备受关注。本文综述了高铁铝土矿的利用现状, 重点分析了其分离技术和综合利用进展。近年来, 随着铝土矿资源的日益紧张, 高铁铝土矿的开发利用逐渐受到重视。然而, 由于高铁铝土矿中铝矿物和铁矿物嵌布均匀, 分离难度大, 传统的选矿方法难以有效分离铝、铁。因此, 科研人员积极研发新的分离技术, 如物理法、化学法及微生物法等, 以提高氧化铝的品位和回收率, 降低铁含量。此外, 高铁铝土矿的综合利用也成为研究热点, 通过提取其中的有价元素、制备高性能材料等途径, 实现资源的最大化利用。本文旨在为高铁铝土矿的高效利用提供有益的参考和借鉴。

## 关键词

高铁铝土矿, 综合利用, 分离技术

# Domestic High-Iron Bauxite Resources and Their Utilization

Fangyu Leng<sup>1,2</sup>, Zuoliang Zhang<sup>1,2\*</sup>, Yu Lin<sup>3</sup>, Hongbo Zhao<sup>4</sup>, Yan Huang<sup>1,2</sup>, Yu Cao<sup>1,2</sup>,  
Junjie Xie<sup>1,2</sup>, Wendi Wang<sup>1,2</sup>, Chang Zhao<sup>1,2</sup>, Weihao Zhou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Metallurgy and Materials Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optimization and Utilization of Non-Associated Low-Grade Iron Ore, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

<sup>3</sup>Benxi Iron and Steel Plate Co., Ltd. Ironmaking Plant, Benxi Liaoning

<sup>4</sup>Benxi Iron and Steel Plate Co., Ltd. R&D Institute, Benxi Liaoning

\*通讯作者。

文章引用: 冷芳宇, 张作良, 林宇, 赵鸿波, 黄妍, 曹宇, 谢俊杰, 王文迪, 赵畅, 周伟豪. 国内高铁铝土矿资源及其利用[J]. 矿山工程, 2025, 13(2): 227-233. DOI: 10.12677/me.2025.132027

## Abstract

High-iron bauxite, as a crucial mineral resource, has attracted considerable attention due to its high iron and aluminum content. This paper reviews the current utilization status of high-iron bauxite, with a focus on analyzing advancements in its separation technology and comprehensive years, as bauxite resources have become increasingly scarce, the development and utilization of high-iron bauxite have garnered increasing attention. However, separating aluminum and iron in high-iron bauxite is challenging due to their uniform distribution. Traditional beneficiation methods struggle to effectively separate aluminum and iron. Therefore, researchers have actively developed new separation technologies, such as physical methods, chemical methods, and microbiological methods, to improve the grade and recovery of alumina while reducing iron content. Additionally, the comprehensive utilization of high-iron bauxite has emerged as a research hotspot, aiming to maximize resource utilization through the extraction of valuable elements and the preparation of high-performance materials. This paper aims to provide a useful reference for the efficient utilization of high-iron bauxite.

## Keywords

High-Iron Bauxite, Comprehensive Utilization, Separation Technology

Copyright © 2025 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

近年来,随着全球工业化的快速发展,铝土矿作为生产金属铝的主要原料,其需求量持续增加。然而,中国作为全球最大的铝土矿消费国,面临着资源储量有限、品质下降以及对外依存度高的严峻挑战。国内铝土矿资源主要集中在广西、贵州等地,但这些地区的铝土矿多为高铁型,具有较高的开发难度和复杂性[1]。

高铁铝土矿由于含有较高的硫和铁杂质,对铝工业的可持续发展构成了较大威胁。这些杂质不仅会腐蚀设备和管道,还会增加生产成本,影响氧化铝的质量。因此,如何高效开发和利用高铁铝土矿资源,成为当前研究的重点之一[2]。

近年来,针对高铁铝土矿的提质利用技术取得了显著进展。例如,通过氧压提质脱硫降铁工艺,可以有效降低铝土矿中的硫和铁含量,提高其品质[3]。此外,悬浮焙烧同步脱硫除铁技术也展示了良好的应用前景,能够显著提升铝土矿中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量,为后续的铝土矿溶出提供了有利条件[4]。

广西地区的高铁复合型铝土矿因其复杂的矿物组成和低品位特性,成为研究的热点。研究表明,通过氢氧化钠溶液溶出和低温焙烧相结合的方法,可以有效实现氧化铝的提取和铝铁分离[5]。此外,针对高铁低硫型铝土矿的研究也表明,通过元素分析和矿物学研究,可以揭示其化学组成和矿物嵌布关系,为优化工艺流程提供理论支持[6]。

在资源综合利用方面,高铁铝土矿中的伴生资源如钴等也得到了关注。通过浮选脱硫和伴生钴资源的综合利用,不仅可以提高资源利用率,还能降低对国外资源的依赖[7]。此外,针对铝土矿开采过程中

产生的矿渣和弃土问题,生态修复技术的应用也取得了积极进展。例如,基于植被混凝土的生态修复方案显著提升了边坡稳定性和生态环境质量[8]。

尽管我国在高铁铝土矿的开发和利用方面取得了一定的进展,但仍面临诸多挑战。例如,高硫高铁铝土矿的高效开发需要进一步优化工艺流程和技术装备;生态修复技术的应用也需要在更大范围内推广和实施。本文综述了国内高铁铝土矿的资源存储情况、化学成分、研究现状以及利用,为该矿的经济环保使用提供参考。

## 2. 高铁铝土矿资源概况

### 2.1. 铝土矿资源概况

我国铝土矿资源储量约 10 亿 t,居世界第 5 位,位居几内亚、澳大利亚、越南、巴西等国之后。资源相对集中分布在山西、河南、贵州和广西等四省(区)。我国共有铝土矿矿区 553 个,查明资源储量(矿石量) 47.06 亿 t,其中山西查明资源储量占全国 32.4%,河南占 22.7%,广西占 18.5%,贵州占 17.8%,四省(区)合计占全国 91.4% [9]。

根据我国矿产资源潜力评价技术要求,将我国铝土矿预测类型分为沉积型、堆积型和红土型。

### 2.2. 铝土矿用途

当前铝土矿是生产金属铝的最佳原料,其用量占世界铝土矿总产量的 90%以上。铝土矿的非金属用途是作耐火材料、耐磨材料、化学制品及高铝水泥的原料。

铝土矿用于生产氧化铝有几种方法,如烧结法,该法适于处理含铝较高的低品位铝土矿石,要求  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  为 3~5,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  小于 10%,烧结中排放废气物对环境大气有一定污染;又如拜耳法,适用于含  $\text{Al}_2\text{O}_3$  高、低的富铝土矿石,要求  $\text{Al}_2\text{O}_3$  大于 65%、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  大于 7,矿石中的氧化铁在该法流程中不与碱起反应,铁高赤泥含量大,赤泥洗涤复杂,易造成碱和氧化铝流失,对环境有一定污染,能耗大;另外对于处理中等品位的铝土矿,在我国目前主要用联合法,即在拜耳法的赤泥中添加部分低品级矿石提高烧结法的铝硅比,一般要求  $\text{Al}_2\text{O}_3$  大于 60%、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  为 5~7、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  小于 10%。在烧结中,硫是污染空气的有害物质,不易采用含硫高的铝土矿。

### 2.3. 高铁铝土矿

#### 2.3.1. 定义

在我国铝土矿资源中有一类含铁量较高的铝土矿,目前尚未得到充分利用。其  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 25%以上,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量在 10%以上,  $\text{SiO}_2$  含量约 6%,铝硅比在 7 左右。胡四春等[10]将  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量大于 15%的铝土矿称为高铁铝土矿。

#### 2.3.2. 分布

根据已探测结果,全国的高铁型铝土矿资源可达 15 亿吨以上。高铁铝土矿资源中不仅铁、铝、硅的含量高,部分的铝土矿中还存在大量的钛、镓、钒以及稀土等有价值元素,如分布在广西、云南、山西、河南等地矿石分布状况及资源特点如表 1 所示。

我国三水铝石铝土矿资源较少,只占我国铝土矿资源的 5%左右。就目前地质调查情况来看,仅在台湾地区、海南、福建、广西省存在。在广西的桂西及桂西南等地赋存高铁三水铝石型铝土矿资源储量达 5.15 亿吨,仅南宁市范围内的资源储量达 3 亿吨以上,贵港市资源量在 1.6 亿吨以上,在山西保德地区也有 1 亿吨以上的高铁铝土矿,在河南、贵州、重庆、云南、海南、福建等地也都有着高铁铝土矿资源的分布[11]。高铁三水铝石铝土矿的资源情况如表 2 所示。

**Table 1.** Resource situation of high iron diaspore bauxite  
**表 1.** 高铁一水硬铝石铝土矿资源情况

区域	资源量 (亿 t)	类分 布型	w (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) /%	w (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) /%	w (SiO <sub>2</sub> ) /%	w (TiO <sub>2</sub> ) /%	主要矿物
桂西	10.65	-	10~28	47~67	2~12	2~5	-
云南 文山	>1.45	一水硬 铝石型	20~30	40~60	8~10	3	一水硬铝石、一水 软铝石、高岭石、 赤铁矿、锐钛矿
山西 保德	>1.0	一水硬 铝石型	10~25	50~65	2~15	1~6	一水硬铝石、高岭 石、绿泥石、赤铁 矿、针铁矿、锐钛 矿、金红石
黔中	>0.22	一水硬 铝石型	10~25	42~58	3~19	2~3	一水硬铝石、软水 铝石、褐铁矿、 高岭石
河南 巩义	≈1	-	>15	≈54	≈3	2.5	-

**Table 2.** Resource situation of high iron gibbsite bauxite  
**表 2.** 高铁三水铝石铝土矿资源情况

分布区域	资源量	类型	w (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) /%	w (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) /%	w (SiO <sub>2</sub> ) /%	w (TiO <sub>2</sub> ) /%	主要矿物
广西贵港	5 亿 t 左右	红土型	30.17	30.79	15.04	2.02	三水铝石、一水软铝 石、高岭石、石英、 褐铁矿、赤铁矿、 锐钛矿、锆石
海南 蓬莱	约 2000 万 t	红土型	18.65	47.01	4.98	3.04	三水铝石、高岭石、 石英、褐铁矿、 赤铁矿、钛铁矿
福建 漳浦	约 500~1000 万 t	红土型	-	-	-	-	-
台湾地区 大屯山	已勘察储量 500 万 t, 远景储 量在 1 亿 t 以上	-	-	-	-	-	-

海南三水铝石铝土矿位于海南蓬莱,资源量约 2000 万吨。该矿为现代红土型铝土矿矿床。矿石中以铝土矿物为主,其它尚有褐铁矿、赤铁矿、钛赤铁矿以及残存的玄武岩块等。该矿目前也属于民采,采矿模式相对比较凌乱。矿石中以三水铝石为主占 66.8%、高岭石占 6.4%、石英 2%、褐铁矿 10.6%、赤铁矿 7%、钛铁矿 5.8%。少量矿物有角闪石、辉石、电气石。

福建三水铝石铝土矿位于福建省漳浦一带,资源量约 500~1000 万吨,资源类型和海南类似,也属于红土型,目前主要为民采,用作沸石分子筛的制备原料。

广西三水铝石铝土矿位于广西贵港一带,分布在广西南宁、宾阳、横县、贵港、桂平、武宣、玉林和北流等地,其中在贵港、宾阳和横县一带矿区相对集中,矿石质量较好,这是继福建漳浦、海南蓬莱和

台湾地区大屯山之后的我国第四个三水型铝土矿。因其首先发现于贵港市,且研究较详,陈国达教授建议称为贵港式铝土矿。该矿大部分出露地表,以往被视为劣质的褐铁矿,个别地方的矿石曾一度用以炼铁。资源量在 5 亿吨左右。铝矿物主要有三水铝石占 33.97%、一水软铝石占 5%;硅铝酸盐矿物主要有高岭石占 6.94%、石英占 12.82%;铁矿物主要有褐铁矿占 23.82%、赤铁矿占 14.96%;钛矿物主要是锐钛矿占 2.14%;其它矿物主要是锆石。桂西地区堆积铝土矿的矿石质量与粒级大小密切相关。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量随粒级变化而变化,更细粒级(0.1~1 cm)的矿石流失加剧,而  $\text{SiO}_2$  在小于 1 cm 粒径的矿石中相对富集[12]。这表明在勘查和开发过程中需要特别注意粒级分布对矿石质量的影响。

### 3. 研究现状

高铁铝土矿提质利用技术的最新进展主要集中在脱硫和提质方面,具体包括以下几方面。

#### 3.1. 脱硫技术

浮选法适用于含硫较低的铝矿石资源,但对低品位、高硫含量的铝矿石存在浮选药剂用量大、废水排放量大的问题。焙烧法脱硫效率高,但传统堆积焙烧存在焙烧时间长、能耗高等问题。电化学脱硫具有低温、常压、高脱硫率、无二次污染等优点,但能耗高、生产规模受限制。微生物脱硫生产成本和能耗较低、环保性较高,但特定菌种对生长环境要求苛刻,培育菌种周期长。氧化蒸发法能够清除铝酸钠溶液中大部分  $\text{S}^{2-}$ ,但对其他形态硫氧化效果不明显。沉淀法操作简单,但脱硫剂成本高,难以应用于实际生产。石灰法只能脱除溶液中  $\text{SO}_4^{2-}$ ,对其他类型硫离子并未产生显著去除作用[13]。在高铁铝土矿中培养多黏性芽孢杆菌进行预处理,可以除去该矿中全部的钙和约 45%的铁。适宜的温度范围对于菌种的活性至关重要,一般选取  $85^\circ\text{C}$ 。在浸出除铁过程中,一般液固比为 10:1。反应时间较长,如 6 小时或更长,以确保菌种充分作用。

#### 3.2. 提质技术

在山西某煤下高硫铝土矿中开展反浮选脱硫脱碳试验,通过优化药剂制度(硫酸铜用量为 27.48 g/t、丁基黄药用量为 154.33 g/t、松醇油为 45.11 g/t),获得了产率为 90.14%、硫含量为 0.39%的铝精矿[14]。

对贵州某高硫铝土矿进行浮选脱硫试验,通过“一粗三精三扫”工艺,获得了产率为 86.35%、S 含量为 0.45%的铝精矿[15]。在磨矿细度-0.074 mm 粒级质量占比为 80%的条件下,获得了含 w(S)为 0.29%的铝精矿,脱硫率 94.76% [16]。

广西平果地区高硫沉积型铝土矿脱硫方案结果是浮选可获得 S 品位 0.49%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  品位 75.90%的铝土矿精矿,满足氧化铝生产工艺要求。

#### 3.3. 预焙烧活化低质铝土矿的碱液溶出技术

通过硝酸钠与低品位铝土矿预焙烧活化耦合低碱溶液溶出的新方法,能够有效提高低品位铝土矿中氧化铝的溶出率。在溶出温度为  $270^\circ\text{C}$ 、溶出时间为 60 min、固液比为 300 g/L 的条件下,氧化铝的溶出率可达 87.22%,赤泥的铝硅比可降至 0.88。

### 4. 未来展望

面对高铁铝土矿开发挑战,未来的研究方向和技术创新趋势可以归纳为以下几个方面。

#### 4.1. 悬浮焙烧技术的优化与应用

高铁铝土矿的开发面临的主要挑战之一是硫和铁的去除。研究表明,采用“悬浮氧化焙烧-还原焙



烧-磁选”工艺可以有效实现硫元素的高效脱除和铁元素的富集分离[4]。未来的研究可以进一步优化这一工艺,提高脱硫率和铁精矿的质量,同时降低能耗和成本。

#### 4.2. 矿物特性研究与磨矿工艺改进

对高硫铝土矿的矿物特性进行深入研究,有助于更好地理解其物理和化学性质。例如,贵州某高硫铝土矿的研究表明,一水硬铝石与硅酸盐矿物共伴生关系复杂,常包含微细粒黄铁矿[17]。基于这些特性,可以开发更高效的磨矿工艺,如选择性磨矿技术,以提高一水硬铝石的解离率,从而提高氧化铝的回收率。

#### 4.3. 生物冶金技术的应用

生物冶金技术在处理高铁铝土矿方面具有潜力。例如,Fe(III)的生物还原技术可以在厌氧条件下使用微生物复合体进行Fe(III)的还原,从而降低氧化铁的含量[18]。未来的研究可以进一步探索不同微生物组合和反应条件下的生物还原动力学,以提高生物冶金过程的效率和经济性。

#### 4.4. 高温力学性能研究

高温环境对矿物的力学性能有显著影响。研究表明,高温条件下砂岩的力学性能会发生变化。类似地,高铁铝土矿在高温下的力学性能也需要进一步研究,以便更好地理解其在高温条件下的行为,从而优化高温处理工艺。

#### 4.5. 综合资源利用与环境影响评估

高铁铝土矿的开发不仅要考虑经济效益,还要关注环境保护。未来的研究应综合考虑资源利用效率和环境影响,开发绿色、可持续的开采和处理技术。例如,通过回收伴生矿物中的有用元素(如钴、镍等),可以实现资源的综合利用[19]-[21]。

总之,未来的研究方向和技术创新趋势应围绕悬浮焙烧技术的优化、矿物特性研究与磨矿工艺改进、生物冶金技术的应用、高温力学性能研究以及综合资源利用与环境影响评估等方面展开。

### 致 谢

感谢张作良和黄妍老师对我们小组的指导。从课题的选题到研究,从论文的构思、撰写到定稿,均在两位老师的亲切关怀和悉心的指导下完成的,两位老师严肃的科学态度、严谨的治学精神和精益求精的工作作风深深感染和激励着我们小组。在老师的耐心指导下,我们学到了更多的冶金专业知识和专业技能,对冶金行业的认知也有了充分的了解。最后向发表本篇文章相关工作人员的辛苦付出表示衷心的感谢和崇高的敬意。

### 基金项目

大学生创新创业训练计划项目“TiO<sub>2</sub>对堇青石微晶玻璃性能的影响机制研究”(项目号:202511430114); 辽宁省教育厅基本科研项目“工业固废制备微晶玻璃晶核剂协同作用及控制机理研究”(项目号:2024JYTKYTD-16); 辽宁省教育厅基本科研项目“烧结配矿提高精矿比例的应用研究”(项目号:2024JYTKYTD-17)

### 参考文献

[1] 陈喜峰. 全球铝土矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 59-68.

- [2] 李晓坤, 段语嫣, 赵冰, 等. 高硫高铁铝土矿脱硫除铁研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 1-13, 23.
- [3] 张正阳, 王海北, 杨玮娇, 等. 高铁高硫铝土矿氧压提质脱硫降铁研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(10): 119-127.
- [4] 段语嫣, 赵冰, 孙永升, 等. 高硫高铁铝土矿悬浮焙烧同步脱硫除铁试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 89-98, 117.
- [5] 秦超, 李军旗, 徐本军. 高铁铝土矿磁化焙烧对铁铝分离的影响[J]. 湿法冶金, 2014(5): 358-360.
- [6] 何文洁, 郑朝振, 刘三平. 高铁低硫型铝土矿的工艺矿物学研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(4): 21-26.
- [7] 张文谱, 王晓慧, 吴威龙, 等. 我国高硫铝土矿脱硫及伴生钴资源综合利用研究进展[J]. 金属矿山, 2024(9): 75-83.
- [8] 张洪明, 桑永杰, 王韬, 等. 铝土矿矿渣弃土边坡生态修复及治理方案设计[J]. 湖南有色金属, 2024, 40(4): 97-100.
- [9] 孙莉, 肖克炎, 娄德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 82-94.
- [10] 胡四春, 赵恒勤, 马化龙, 等. 高铁铝土矿中温金属化焙烧-磁选工艺试验研究[J]. 轻金属, 2010(9): 6-10.
- [11] 赵恒勤, 赵新奋, 胡四春, 等. 我国三水铝石铝土矿的矿物学特征研究[J]. 矿产保护和利用, 2008(6): 40-44.
- [12] 韦访, 谢振朝, 覃瑞才, 等. 广西金龙堆积铝土矿质量-粒级分布规律与勘查意义[J]. 矿产勘查, 2024, 15(7): 1176-1184.
- [13] 王鸿运, 刘燕, 张延安, 等. 高硫铝土矿脱硫方法研究进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(4): 13-23.
- [14] 杜五星, 张建强, 马俊伟, 等. 响应曲面法优化山西某煤下铝土矿浮选提质试验研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(1): 83-91.
- [15] 姚杰, 张建强, 马俊伟, 等. 贵州某高硫铝土矿浮选脱硫提质试验研究[J]. 轻金属, 2024(3): 1-4, 11.
- [16] 李永江. 贵州某高硫铝土矿反浮选脱硫试验及实践研究[J]. 山西冶金, 2024, 47(2): 136-138.
- [17] 李涵, 张覃. 贵州某高硫铝土矿矿物特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(7): 12-21.
- [18] Hubau, A., Joulain, C., Tris, H., Pino-Herrera, D., Becquet, C. and Guezennec, A. (2024) Fe(III) Bioreduction Kinetics in Anaerobic Batch and Continuous Stirred Tank Reactors with Acidophilic Bacteria Relevant for Bioleaching of Limonitic Laterites. *Frontiers in Microbiology*, **15**, Article ID: 1358788. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1358788>
- [19] Shokanov, A., Vereshchak, M., Manakova, I. and Migunova, A. (2023) Mössbauer and X-Ray Diffraction Spectroscopy of High-Iron Bauxites from Kazakhstan. *Materials*, **16**, Article No. 6706. <https://doi.org/10.3390/ma16206706>
- [20] Shoppert, A., Valeev, D., Diallo, M.M., Loginova, I., Beavogui, M.C., Rakhmonov, A., *et al.* (2022) High-Iron Bauxite Residue (Red Mud) Valorization Using Hydrochemical Conversion of Goethite to Magnetite. *Materials*, **15**, Article No. 8423. <https://doi.org/10.3390/ma15238423>
- [21] Wang, Y., Chen, L., Wang, X., Tang, N. and Kang, X. (2023) Trade Network Characteristics, Competitive Patterns, and Potential Risk Shock Propagation in Global Aluminum Ore Trade. *Frontiers in Energy Research*, **10**, Article ID: 1048186. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1048186>