

马兰庄铁尾矿地球化学特征及其应用

杨超¹, 李鑫¹, 王键涛², 高峰³, 宋土顺^{1*}

¹华北理工大学应急管理与安全工程学院, 河北 唐山

²河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队(河北省矿山环境修复治理技术中心), 河北 唐山

³矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

铁尾矿砂作为铁矿石加工和冶炼过程中产生的废弃物, 含有大量的硅酸盐矿物和其它有益成分, 铁尾矿砂的资源化利用在环境保护和资源循环利用方面具有重要意义。本文以马兰庄铁尾矿砂作为研究对象, 通过岩石学、地球化学等分析方法, 结合模拟实验, 对铁尾矿砂在土壤改良方面的应用进行了探讨。结果表明: 铁尾矿砂碎屑成分主要由石英、黑云母、辉石、角闪石, 其次为磁铁矿及少量斜长石。矿物中含有丰富的钾、钠、镁、铁、钙等金属元素以及微量元素, 对土壤改良具有提高肥力的作用。铁尾矿砂粒度分布适中, 粒径大于0.25 mm的颗粒添加到土壤中能够起到很好的支撑作用, 增强土壤的透气性和透水性。模拟实验中铁尾矿砂元素析出受pH值影响显著, 对植物生长有益组分分析出含量比较高。稀土元素表现为轻稀土亏损、重稀土富集。将铁尾矿与生物炭、腐殖质等混合使用, 可以有效改善土壤结构, 提升土壤的肥力, 具有较好的应用价值和经济效益。

关键词

铁尾矿, 岩石学, 地球化学, 土壤改良

Geochemical Characteristics and Application of Iron Tailings in Malan Village

Chao Yang¹, Xin Li¹, Jiantao Wang², Feng Gao³, Tushun Song^{1*}

¹School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²The Second Geological Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Tangshan Hebei

³The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Shanxi Institute of Technology, Yangquan Shanxi

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 22nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 杨超, 李鑫, 王键涛, 高峰, 宋土顺. 马兰庄铁尾矿地球化学特征及其应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 683-696. DOI: 10.12677/ag.2025.155067

Abstract

As a waste generated in the process of iron ore processing and smelting, iron tailings contains a large number of silicate minerals and other beneficial components, and the resource utilization of iron tailings is of great significance in environmental protection and resource recycling. In this paper, the application of iron tailings in soil improvement was discussed through petrology, geochemistry and other analytical methods, combined with simulation experiments. The results show that the detrital composition of iron tailings is mainly composed of quartz, biotite, pyroxene and hornblende, followed by magnetite and a small amount of plagioclase. The minerals are rich in potassium, sodium, magnesium, iron, calcium and other metal elements and trace elements, which have the effect of improving fertility in soil improvement. The particle size distribution of iron tailings sand is moderate, and the particles with a particle size greater than 0.25 mm can play a good supporting role when added to the soil, and enhance the air permeability and water permeability of the soil. In the simulation experiment, the precipitation of iron tailings sand was significantly affected by the pH value, and the content of the beneficial group for plant growth was relatively high. Rare earth elements are light rare earth losses and heavy rare earth enrichment. The mixing of iron tailings with biochar and humus can effectively improve the soil structure and enhance the fertility of the soil, which has good application value and economic benefits.

Keywords

Iron Tailings, Petrology, Geochemistry, Soil Improvement

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

随着矿山的开采和钢铁行业的不断发展,铁尾矿砂作为铁矿石加工和冶炼过程中产生的废弃物,其储量在不断增加。铁尾矿砂含有的金属元素大部分为 Fe、Al、Ca、Mg 等,非金属元素大部分为 O、Si、P 等,大部分元素是植物生长有益元素;尾矿砂中的矿物主要以硅酸盐矿物为主[1],含量较高的硅酸盐矿物在土壤中能够促进土壤结构的形成,增加土壤的稳定性和保水性。铁尾矿砂具有容重小、粒度大的特点,具备改良土壤所需的基本条件。目前,铁尾矿砂已经以多种形式被应用到土壤的改良中,包括:制备成作物生长所需的肥料、土壤化、盐碱土的改良等等。赵淑芳根据 SiO_2 与 NaOH 反应生成 Na_2SiO_3 和水的化学反应,将原本无法被植物生长吸收的 SiO_2 转化为能够吸收利用的 Na_2SiO_3 [2],利用铁尾矿砂制备出了能够被植物吸收利用的硅肥。牛福生等结合响应曲面法再一次提高硅肥中有效硅的含量[3]。张丛香[4]以铁尾矿砂为主要原料,搭配粉煤灰、糠醛渣等使不毛之地也能够长出水稻并且得到大面积推广实验。成词峰等以钕铁磁尾矿砂为原料,在加入有机生物菌肥、团粒促进剂、抗旱保水剂等改良材料[5],配置成了人工土壤,并搭配种植了 8 种耐受性强的植物,实验结果表明人工土壤达到绿化种植土壤标准。此外多位学者杨孝勇等[6]-[13]对铁尾矿砂在土壤改良方面的应用做出了详细论述。

本文以马兰庄铁尾矿砂为研究对象,通过岩石学和地球化学的分析方法对铁尾矿砂中的矿物成分及所含化学元素种类进行分析,结合模拟实验探究其元素的析出状态。将铁尾矿砂应用到土壤改良中不仅能够对土壤结构进行改良,同时可以减少大量铁尾矿的堆积,具有良好的社会效应和应用价值。

2. 铁尾矿砂碎屑成分特征

铁尾矿砂通常呈灰色、黑色或红色。矿物组成和物化性质对其在土壤改良和资源化利用中的潜在价值具有重要影响。为研究碎屑成分特征，采集马兰庄铁尾矿砂样品，通过胶注、切制和磨制等方法制作薄片/光薄片 10 件。

2.1. 铁尾矿砂碎屑成分组成

采用偏光正/反两用显微镜对铁尾矿砂薄片/光薄片进行观察，特征如下：

1) 石英：主要为多晶石英(图 1)，粒径较大，形状不规则，单偏光下无色，正交偏光下呈一级灰干涉色，部分呈波形消光特征。石英矿物主要化学成分为 SiO_2 ，化学性质稳定，抗风化能力较强，在土壤中充当骨架，能够保持土壤的透气性，使土壤保持疏松的状态，石英矿物保水性和吸水性较差。

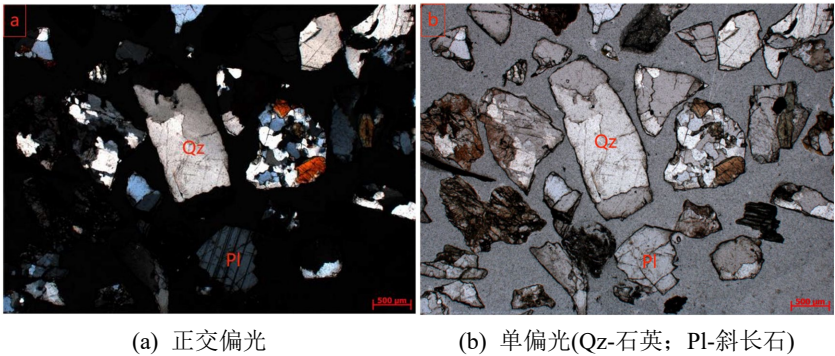


Figure 1. Characteristics of the mirror of quartz
图 1. 石英镜下特征

2) 黑云母：单偏光下呈土黄色，红褐色，一组完全解理发育，正交偏光下近平行消光，干涉色达二级蓝绿至三级(图 2)。黑云母嵌布在岩屑中，黑云母主要分布在岩屑边缘，发育的完全解理有利于液体的渗入并且其解理缝处相对比较薄弱，这些特性会促使风化作用更为迅速地发生。黑云母的主要元素组成包括硅、镁、钾、铝等，因此，黑云母的风化可为土壤提供钾和镁元素。其中钾是植物生物所需的 3 大营养元素之一，土壤中钾的赋存程度是评价土壤好坏的指标之一。有很多国家选择用硅酸盐矿物来为土壤补充钾，而黑云母就属于硅酸盐类矿物，而且是典型的 2:1 型含钾矿物[14]，经过实验验证，黑云母的释钾能力相比较于钾长石以及金云母和白云母都要强[15]，因此，黑云母矿物碎屑对土壤改良具有提高肥力的作用。

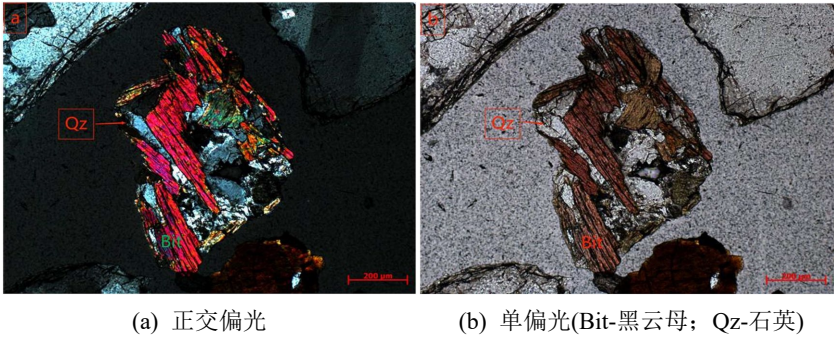


Figure 2. Mica features under the microscope
图 2. 黑云母镜下特征

3) 斜长石: 碱性长石和斜长石含量较多, 发育弱蚀变, 单偏光下无色透明, 负低突起, 斜长石聚片双晶较发育, 干涉色一级灰白(图 3)。斜长石比表面积大, 能够吸附土壤中的有机物质, 有助于土壤中水分分布、结构的改善, 有利于有机质的积累, 它还能帮助植物吸收养分和水分。长石化学成分含 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 等, 长石通过风化作用可以改善土壤的 pH 值, 提高土壤的肥力。

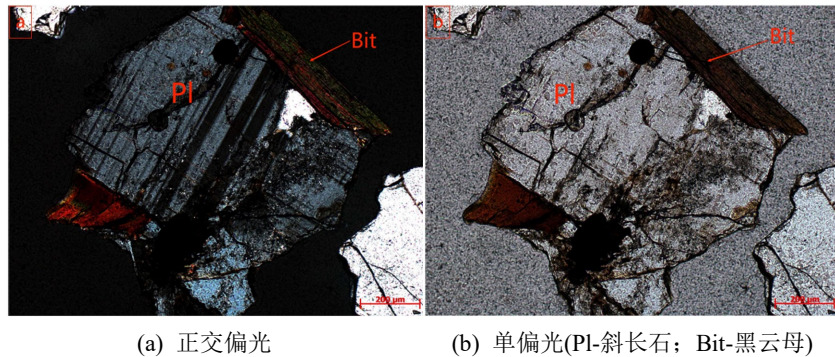


Figure 3. Characteristics of the plagioclase mirror
图 3. 斜长石镜下特征

4) 角闪石: 单偏光下角闪石呈淡绿色、绿色, 柱状, 两组解理发育, 吸收性和多色性明显, 发育弱蚀变, 正中突起, 正交偏光下呈斜消光, 干涉色二级黄绿(图 4)。角闪石交织分布于碎屑中, 大多数分布在外围, 已经发生轻微蚀变, 角闪石的蚀变产物为绿泥石, 绿泥石具有较强的离子交换能力, 能够吸附土壤有害物质, 改善土壤肥力和结构。铁尾矿砂中的角闪石为普通角闪石, 含镁、铁、钙、钠、铝等元素, 角闪石属于造土矿物, 因此, 角闪石及其蚀变作用对土壤的形成和作物的生长有利。

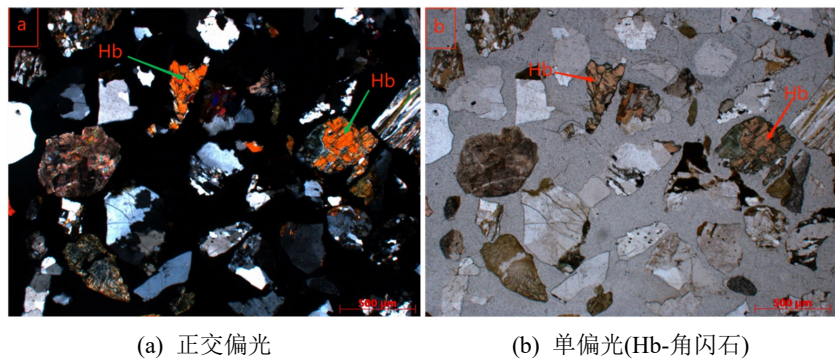


Figure 4. Features of the amphibole lens
图 4. 角闪石镜下特征

5) 辉石: 单偏光下为无色, 部分呈弱粉色, 正高突起, 可见两组完全近直交解理, 正交下干涉色一级黄白(图 5)。辉石被石英包围, 颗粒相对其它矿物较小, 部分发生蚀变。辉石抗风化能力较弱, 铁尾矿砂中的辉石主要为普通辉石和紫苏辉石。辉石的蚀变可为土壤主要提供镁、铁、铝、钙等金属元素以及一些微量元素。

6) 磁铁矿: 磁铁矿在铁尾矿砂中主要呈星点状分布于其它矿物中, 颗粒大部分比较细小, 仅有极少数颗粒粒径较大(图 6), 磁铁矿铁元素含量较高, 铁元素是植物生长所必需的元素之一。磁铁矿还具有固碳的作用以及减少土壤有机碳的外排[16], 在有些农田里有时还会特意加入一些磁铁矿, 以便促进植物的

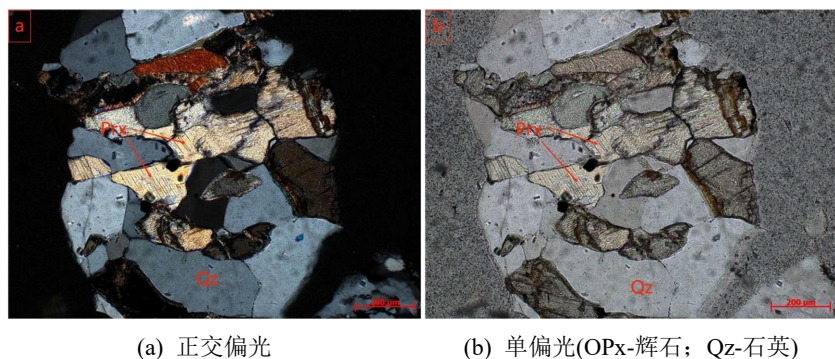


Figure 5. Characteristics under the lens of hematite
图 5. 辉石镜下特征

生长。磁铁矿带有磁性，能够吸附土壤中的细小颗粒，有助于土壤团粒的形成，增强土壤透水性和保水性，并且能够促进有机质的矿物及其它氧化作用，使土壤的有效氮钾含量提升[17]。马兰庄铁矿的主要含铁矿物为磁铁矿[18]，在铁尾矿砂中也出现零星分布的磁铁矿。

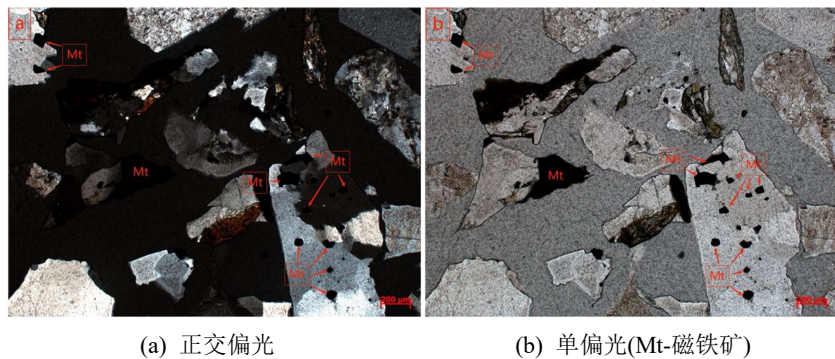


Figure 6. Microscopic characteristics of magnetite
图 6. 磁铁矿镜下特征

2.2. 铁尾矿砂碎屑成分含量及粒度特征

2.2.1. 碎屑成分含量

通过西图孔隙特征及粒度图像分析系统软件，运用长短径分析法对铁尾矿砂进行碎屑成分及含量的统计分析，其统计结果，其中石英平均含量为 83.02%，黑云母平均含量为 3.83%，辉石平均含量为 8.04%，角闪石平均含量为 3.37%，磁铁矿平均含量为 1.07%，斜长石平均含量为 0.64%。

对矿物含量进行测量统计有助于确定土壤与铁尾矿砂的混合比例。例如：石英的含量为 83.02%，据此在将铁尾矿砂与土壤混合时，可控制铁尾矿砂的比例，太多就会导致土壤砂化。碎屑矿物在自然状态下面临着风化作用，在雨水的淋滤作用下，这些矿物会发生溶蚀、溶解作用，伴随着元素迁移，如镁、钾、钠等元素有助于促进作物生长。

2.2.2. 碎屑成分含量

铁尾矿砂中有很大大一部分颗粒为粉砂质，其粒度较小，近似于土壤的颗粒尺寸，合适的碎屑颗粒大小在一定范围内对土壤性能具有显著影响。分析采用筛分法，先取三组样品，装袋称重，后将三个样品分别放入 120 目筛子中进行筛分，将筛子中剩余部分分别称重。在用剩余部分重量与实验前样品质量相

比, 取三组比值的平均值作为粒度大于 0.12 mm 的颗粒在铁尾矿砂中的所占比例(表 1)。结果表明粒径大于 0.12 mm 的颗粒所占比例为 45.76%。

Table 1. Distribution statistics of coarse grained (>0.12 mm)
表 1. 粗粒度(>0.12 mm)含量分布统计表

样品编号	筛前质量 m1/g	剩余质量 m ² /g	比例分数/%	平均占比/%
1	106.69	45.13	42.30	45.76
2	105.69	52.16	49.35	
3	131.69	60.09	45.63	

通过西图孔隙特征及粒度图像分析软件, 对铁尾矿砂进行粒度统计, 统计粒径范围在 0.12 mm~0.84 mm 之间的颗粒, 通过筛分法已经测得粒径大于 0.12 mm 的颗粒占全部铁尾矿砂的比例为 45.76%, 在以下所测得结果通过换算可获得各粒径所占真实比例, 结果如下:

- 1) 0.50~0.84 mm 之间的碎屑含量在 0.59%~7.87%之间, 平均为 5.17%;
- 2) 0.35~0.50 mm 之间的碎屑含量在 13.08%~25.84%之间, 平均为 19.16%;
- 3) 0.25~0.35 mm 之间的碎屑含量在 9.8%~19.36%之间, 平均为 13.41%;
- 4) 0.17~0.25 mm 之间的碎屑含量在 2.96%~7.14%之间, 平均为 4.73%;
- 5) 0.12~0.17 mm 之间的碎屑含量在 0.54%~2.1%之间, 平均为 1.56%。

统计结果表明铁尾矿砂的粒径主要集中在 0.35~0.50 mm 之间, 占比约为 20%左右, 其次为 0.25~0.35 mm 之间, 占比约为 14%左右。粒径大于 0.25 mm 的颗粒占比较大且施加到土壤中能够起到很好的支撑作用, 可以增强盐碱土壤的透气性和透水性。因此, 铁尾矿砂具备改良盐碱土的条件。

3. 铁尾矿砂元素地球化学特征

铁尾矿砂中含有大量的硅、铝、钙、镁等有益元素, 这些元素对植物的生长具有重要作用[19]。硅是植物生长必需的元素之一, 能够促进植物根系的发育和生长。铝和钙是植物细胞壁的重要组成成分, 能够增强植物的抗逆性。镁是植物叶绿素的重要组成部分, 能够促进植物的光合作用。铁尾矿砂中的这些有益元素可以通过改善土壤的化学成分, 提高土壤的肥力, 从而促进植物的生长。因此, 在进行铁尾矿砂改良盐碱土的实验前, 查明铁尾矿砂中所含有的元素种类和特征, 可为盐碱土壤改良提供理论依据。选择实验样品 3 件, 在吉林大学测试科学实验中心开展元素检测。

3.1. 常量元素

Table 2. Statistical table of major elements of iron tailings sand
表 2. 铁尾矿砂常量元素统计表

送样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	总合
F1	78.71	1.70	9.62	3.34	4.74	0.37	0.31	0.07	0.14	0.14	0.68	99.83
F2	78.67	1.75	9.68	3.31	4.68	0.38	0.32	0.06	0.13	0.14	0.65	99.76
F3	79.39	1.73	9.45	3.22	4.58	0.38	0.32	0.06	0.12	0.13	0.52	99.91

通过 X-射线荧光光谱常量元素分析表明(表 2), 主要元素为 SiO₂、Fe₂O₃, 其次为 MgO、CaO、Al₂O₃。其中 SiO₂ 的含量为 78.71%~79.39%, 平均值为 78.92%。Fe₂O₃ 的含量为 9.45%~9.68%, 平均值为 9.58%。

MgO 的含量为 4.58%~4.74%。CaO 的含量为 3.22%~3.34%。Al₂O₃ 的含量为 1.70%~1.75%。除此之外，还含有少量的 K₂O、Na₂O、P₂O₅。其中镁(Mg)、铁(Fe)、钙(Ca)、钾(K)、磷(P)等皆为有益元素。

Table 3. Percentage statistics of element content
表 3. 元素含量百分比统计表

编号	O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Ti	P	Mn
F1	64.37	25.19	1.08	6.15	1.06	1.51	0.23	0.19	0.02	0.09	0.04
F2	64.37	25.16	1.12	6.19	1.05	1.49	0.24	0.20	0.01	0.08	0.04
F3	64.42	25.36	1.10	6.03	1.02	1.46	0.24	0.20	0.01	0.07	0.04

为查明铁尾矿砂在改良土壤方面的适用性，直观地分析各类元素的含量情况，对每种元素的含量百分比进行了详细统计(表 3)。从表中可以看出，含量最高的元素为氧和硅，其次为铁、镁、钙、铝。其中氧和硅的平均含量分别为 64.39%和 25.24%，铁、镁、钙、铝的平均含量分别为 6.13%、1.49%、1.05%、1.1%。这些元素对植物的生长具有重要作用，因此，常量元素含量表明铁尾矿砂满足改良土壤的基本应用条件。

3.2. 微量元素

微量元素浓度克拉克值是用于描述某一微量元素在特定地质体中相对富集或分散程度。通过对微量元素浓度克拉克值进行计算，结果表明硼(B)、锰(Mn)、锆(Ge)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)、铅(Pb)相对比较富集(表 4)，其中硼元素的浓度克拉克值分布在 1.23~14.18 之间，平均为 5.7；锰元素的浓度克拉克值分布在 1.25~1.28，平均为 1.27；锆元素的浓度克拉克值分布在 6.92~7.18 之间，平均为 7.05；砷元素的浓度克拉克值分布在 20.78~25.88 之间，平均为 22.97；硒元素的浓度克拉克值分布在 11.84~13.53 之间，平均为 12.95；镉元素的浓度克拉克值分布在 6.5~7.3 之间，平均为 6.8；铅元素的浓度克拉克值分布在 1.62~1.66 之间，平均为 1.64。

Table 4. Statistical Table of trace elements of iron tailings sand (ppm)
表 4. 铁尾矿砂微量元素统计表(ppm)

SAMPLE	B	Cr	Mn	Fe	Zn	Ge	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Pb	Ba
F1	12.28	30.79	1219	52120	25.17	10.38	46.58	0.59	0.34	0.06	0.65	0.55	22.76	99.99
F2	141.80	26.96	1213	51170	28.69	10.58	37.40	0.68	0.39	0.07	0.73	0.53	22.78	95.17
F3	16.81	31.96	1184	51400	27.71	10.77	40.06	0.67	0.30	0.05	0.66	0.50	23.17	92.57

由图 7 可知，强富集元素为砷元素和硒元素。砷是一种类金属元素，在土壤学上通常将它定义为重金属元素，但是其只在酸性雨水(pH<5)或长期降雨的条件下才容易析出，其析出量通常与铁尾矿砂中氧化铁的含量相关，因为氧化铁能够为游离态的砷提供吸附位点，降低其浓度，当氧化铁含量与砷含量摩尔比大于 5 时，砷就已经被基本固定，只有在强酸条件下才有可能被析出。土壤中硒元素的含量在一定阈值内属于对植物生长有益的元素，铁尾矿砂中的硒元素含量为 0.6 ppm 左右。锰元素富集程度不明显，不易对土壤造成污染，且其造成的土壤胁迫效应并不显著。铅元素含量较高，富集程度较显著，其在 pH<5 时易溶出，长期雨水冲刷也可导致铅迁移，其对土壤的胁迫效应显著，易进入植物组织循环。镉元素

的富集程度比较显著，且镉元素在 $\text{pH} < 6$ 的环境中就容易在矿物中溶出，与铅元素相比镉元素更容易被雨水淋出，镉元素具有高移动性和生物有效性等特点，易被植物吸收并在植物体内积累下来。

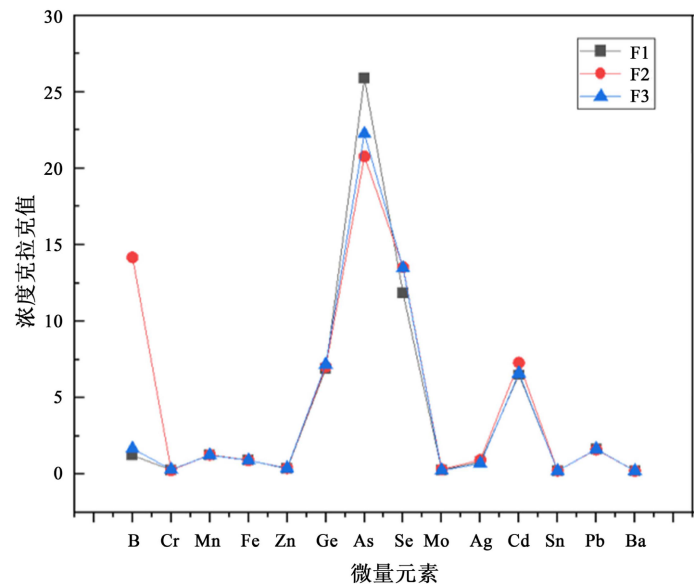


Figure 7. Clark curve of trace element concentration
图 7. 微量元素浓度克拉克值曲线图

3.3. 重金属元素

铁尾矿砂中所含有的重金属元素主要为铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)(表 5)。其中铬含量分布在 26.96~31.96 ppm 之间，平均含量为 22.9 ppm；铜含量分布在 9.3~10.79 ppm 之间，平均含量为 9.84 ppm；锌含量分布在 25.17~27.71 ppm 之间，平均含量为 27.19 ppm；砷含量分布在 37.4~46.58 ppm 之间，平均含量为 41.35 ppm；镉含量分布在 0.65~0.73 ppm 之间，平均含量为 0.28 ppm；铅含量分布在 22.76~23.17 ppm 之间，平均含量为 22.90 ppm。其实并非所有的重金属元素都不利植物的生长，比如锰、铁、铜、锌等，这些元素在合理的范围内不仅对植物生长是有利的，且属于植物生长所必需的元素。重金属的生物毒性很大程度上取决于其存在形态，一般分为四种：残渣态、可氧化态、可还原态、弱酸提取态，其中毒性最强的为弱酸提取态。

Table 5. Statistics of heavy metal elements in iron tailings sand (ppm)
表 5. 铁尾矿砂重金属元素统计表(ppm)

SAMPLE	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
F1	30.79	10.79	25.17	46.58	0.65	22.76
F2	26.96	9.42	28.69	37.40	0.73	22.78
F3	31.96	9.30	27.71	40.06	0.66	23.17
平均值	29.90	9.84	27.19	41.35	0.68	22.90

通过铁尾矿砂与土壤中重金属元素相对含量折线图(图 8)可知，砷、镉含量高于土壤在农用地的风险筛选值，因此在后续的实验研究中要着重观察砷、镉的含量变化及其迁移性，尤其是镉的析出状况。铅

的相对含量虽然低于农用地的风险筛选值，但是由于其易在铁尾矿砂中溶出，因此在后续实验中也应该重点关注其在土壤及植物体内的含量变化。

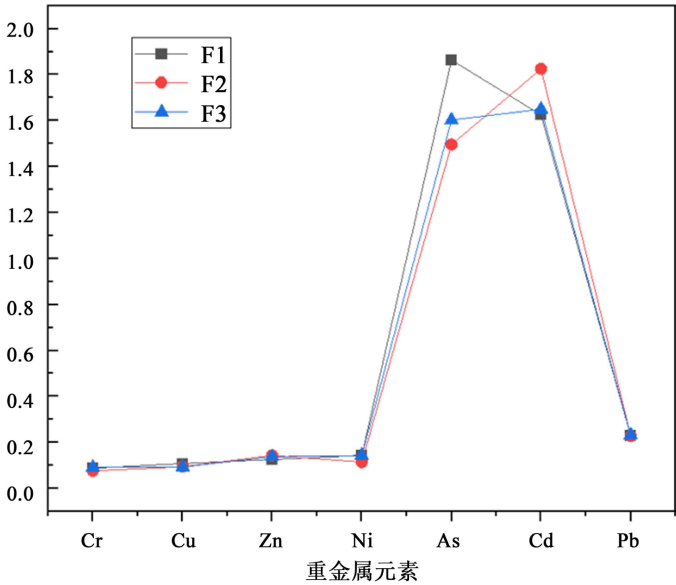


Figure 8. Distribution diagram of the relative enrichment coefficient of heavy metals in iron tailings-soil system

图 8. 铁尾矿砂 - 土壤系统重金属相对富集系数分布图

3.4. 稀土元素

Table 6. Statistical table of rare earth elements in iron tailings sand (ppm)

表 6. 铁尾矿砂稀土元素统计表(ppm)

SAMPLE	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
F1	6.95	13.27	1.55	5.71	1.13	0.41	1.25
F2	8.02	15.59	1.76	6.34	1.18	0.41	1.29
F3	6.61	12.55	1.42	5.39	1.01	0.38	1.10
UCC	30.00	64.00	7.10	26.00	4.50	0.88	3.80
SAMPLE	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
F1	0.20	1.04	0.27	0.71	0.13	0.68	0.13
F2	0.21	1.08	0.26	0.73	0.13	0.70	0.14
F3	0.18	0.95	0.24	0.64	0.12	0.62	0.12
UCC	0.64	3.50	0.80	2.30	0.33	2.20	0.32

对样品稀土元素进行分析和统计(表 6)，稀土元素不仅在植物生长过程中起到调控作用，它还具有评估土壤生态风险及指导土壤修复的作用。铁尾矿砂稀土元素各参数计算结果表明(表 7)， ΣREE 介于 31.39~37.9 ppm 之间，平均为 26.44 ppm， $\Sigma\text{REE} < 100$ ppm，对土壤构不成威胁；其中 LREE 介于 27.38~33.32 ppm 之间，平均为 29.91 ppm；HREE 介于 4.01~4.57 ppm 之间，平均为 4.34 ppm。LREE/HREE 介于 6.52~7.28 之间，平均为 6.87，存在重金属超标的潜在风险。Eu/Eu* 介于 1.56~1.68 之间，平均为 1.62。

Ce/Ce*介于 0.92~0.94 之间，平均为 0.93。

Table 7. Calculation table of rare earth elements in iron tailings sand
表 7. 铁尾矿砂稀土元素参数计算表

编号	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	Eu/Eu*	Ce/Ce*
F1	33.49	29.03	4.45	6.52	1.63	0.92
F2	37.90	33.32	4.57	7.28	1.56	0.94
F3	31.39	27.38	4.01	6.82	1.68	0.93

4. 铁尾矿砂元素迁移模拟实验

4.1. 实验目的

铁尾矿砂含有大量的硅、铝、钙、镁等有益矿物成分以及一些重金属元素。通过模拟实验探究铁尾矿砂中有益元素和重金属元素在雨水淋滤作用下的出溶状况。

4.2. 实验材料与方法

4.2.1. 实验材料选取

1) 样品：马兰庄铁尾矿砂，根据粒度分布特征，用网筛选出粒径 1 mm 以上的碎屑作为实验样品，铁尾矿砂碎屑石英矿物较多，为加快实验进程需要减少部分石英矿物含量(制备一个样品大约需要 400 g 铁尾矿砂原样)。

2) 实验流体：根据参照地区大气水成分，取 500 ml 蒸馏水，加入 0.01 g KCl、0.02 g NaCl、0.03 g Na₂SO₄，用稀盐酸调整溶液 pH 值。

3) 实验设备：采用本团队设计并制作的马弗炉(已获批国际发明专利)和加热箱(温度范围 0℃~250℃)。

4.2.2. 试验设计

1) 样品 20 g + 实验流体 500 ml，反应温度分别为 60℃ (W60)、80℃ (W80)、100℃ (W100)，实验反应时间：72 h

4.2.3. 实验步骤

1) 清洗容器，样品制备。反应釜用蒸馏水浸泡 2 小时，干燥备用。铁尾矿砂用去离子水冲洗干净，烘干(80℃, 4 小时)后称重。

2) 将处理好的铁尾矿砂样品取 20 克放入反应釜中，再加入 500 ml 配置好的大气水溶液，密封。分别在 60℃、80℃、100℃ 的温度下分别反应 3 天(72 小时)。

3) 反应结束后取出固体样品，用去离子水清洗干净，干燥处理(80℃, 4 小时)后称重，同时将液体反应液放入密封罐中。

4) 实验结束后采用火焰原子吸收分光光度计设备对溶液离子浓度进行分析检测。

4.3. 实验结果

4.3.1. 钙元素

随着反应温度的升高，钙离子的浓度逐渐降低(表 8)，最大值为 12.46 ppm，最小为 1.767 ppm。钙离子在盐碱土中能够促进土壤团聚体的形成，显著改善土壤结构，并增强碳固存能力[20]。因此，钙离子析

出量不会对土壤造成负面影响，同时还能够为土壤补充一定量的钙元素。

Table 8. Statistics of calcium ion concentration
表 8. 钙离子浓度统计表

样品编号	原始编号	钙离子浓度/ppm
W60	样品 + 实验流体(60℃)	12.469
W80	样品 + 实验流体(80℃)	4.707
W100	样品 + 实验流体(100℃)	1.767

4.3.2. 镁元素

随着温度升高，镁离子浓度逐渐降低(表 9)，最大值为 9.504 ppm，最小为 5.446 ppm。镁元素是叶绿素中不可缺少的元素，促进叶绿素的光合作用，同时镁还能够激活植物在光合作用中所涉及的一些酶。因此，镁离子的析出量不仅不会对土壤造成负面影响，同时还能够为土壤补充一定量的镁元素。

Table 9. Statistics of magnesium ion concentration
表 9. 镁离子浓度统计表

样品编号	原始编号	镁离子浓度/ppm
W60	样品 + 实验流体(60℃)	9.504
W80	样品 + 实验流体(80℃)	5.628
W100	样品 + 实验流体(100℃)	5.446

4.3.3. 铅元素

在实验过程中，铅离子浓度随着温度升高逐渐增加(表 10)，最大析出量为 0.137 ppm，最小析出量为 0.083ppm，铅离子析出量与食品安全食用标准线接近，且铅元素在蔬菜类植物较容易积累下来。因此，铁尾矿砂在这类土壤中的添加量应控制在 400g/Kg~500 g/Kg 之间。

Table 10. Concentration of lead element statistics
表 10. 铅元素浓度统计表

样品编号	原始编号	铅离子浓度/ppm
W60	样品 + 实验流体(60℃)	0.083
W80	样品 + 实验流体(80℃)	0.102
W100	样品 + 实验流体(100℃)	0.137

5. 讨论

5.1. 矿物成分对土壤改良的影响

铁尾矿砂中碎屑的特点主要为多种矿物组合共存(图 2、图 4、图 5)，在这些矿物组合中，多数矿物嵌布于极难风化的石英矿物之中。由于石英相比较于其它矿物抗风化能力较强[21]，因此在土壤环境中，由于矿物之间风化速度的差异，岩屑会形成大量孔隙，这些孔隙的存在不仅有助于土壤储存更多的水分，同时提高了土壤的孔隙率，使土壤质地也变得更为松软。

根据粒径大小的不同，土壤可分为砂粒、粉粒、粘粒三大类别。在土壤颗粒中，石英矿物以其较大

的粒径和较强的抗风化特性占据了显著地位,而辉石、角闪石、黑云母等矿物则因其易于风化的特性,在砂粒中残留较少,通常作为中、细粉砂的主要矿物成分存在。马兰庄铁尾矿砂中,砂粒占比约 40%,其中粗砂粒占据主导地位,这些粗砂粒主要由难以风化的石英矿物构成。土壤的质地与其粒级构成紧密相关,若以粒径较大的砂粒为主要成分,则土壤被称为砂质土。砂质土具有粒间孔隙大、水分渗透迅速的特点,但其保水能力相对较弱,需要频繁的水分补给;同时,其良好的透气性使得有机质降解速度加快,难以有效积累。相反,若土壤以粒径较小的粘粒为主要成分,则称为粘质土。粘质土具有孔隙多但孔径小的特性,导致水分难以渗透;然而,其富含矿物质养分,有机质含量较高[22]。无论是砂质土还是粘质土,均存在各自的局限性,因此土壤颗粒的级配对于土壤性能的优化至关重要。基于马兰庄铁尾矿砂的粒级分布及其矿物成分分析,可将其与粘质土进行混合,以弥补粘质土颗粒细、孔隙小的缺陷,从而提升土壤的整体结构性能。

5.2. 铁尾矿砂地球化学成分对土壤改良的影响

铁尾矿元素[23]可以分为三种类型:① 对植物生长完全有益的元素: B、Se 等。B 和 Se 都是对植物生长完全有益的元素,尤其是 B,土壤中缺少 B 将影响植物的正常发育[24]。② 对植物生长不利的元素: As、Cd、Cr、Pb 等。这些元素的存在将对植物的正常生长造成负面影响。在铁尾矿中,As 元素表现为强富集且含量较高。③ 在一定范围或条件下对植物生长有益的元素: Mn、Fe、Cu、Zn、Ni 等。这些元素全部为植物生长所必需的元素,其中 Mn 和 Fe 在土壤中具有较高含量,一般不会产生危害,而 Cu、Zn、Ni 则需要控制在土壤背景值之内。因此,在评估铁尾矿对植物生长的影响时,必须综合考虑其矿物成分。通过偏光显微镜对马兰庄铁尾矿进行详细鉴定,发现其所含有的主要矿物为辉石、角闪石、黑云母、斜长石等,都属于比较容易风化的矿物,因此铁尾矿中的有益元素能够被植物吸收利用。

5.3. 铁尾矿砂在碱性土壤改良中的应用。

盐碱土在我国分布广泛,其形成机制在于水在毛细作用下被提升至地表层,而水中所携带的矿物质在表层逐渐累积,尤其以钠离子为主要成分。钠离子的存在使得粘土颗粒发生膨胀,进而导致土壤孔隙逐渐减小。长此以往,地表层累积的矿物质持续增加,孔隙愈发狭小,地表水难以有效渗透,土壤得不到水分的补充,逐渐发生板结现象。土壤盐碱化的根源在于土壤颗粒粒度较细,从而导致毛细作用显著,渗透性能低下(表 8)。鉴于此,充分利用铁尾矿砂粒度较大的特性,将其与盐碱土进行混合。这一措施旨在减弱土壤的毛细作用,同时增大其孔隙结构,使得地表水能够迅速渗透至深层土壤。随着水分的渗透,表层积累的矿物质也会随之进入地下,从而不仅解决了土壤板结的问题,还有效防止了土壤再次发生盐碱化现象[25]。

在进行土壤改良时,建议根据实际需要,将其与肥料及其他添加物混合使用,以确保土壤改良效果的全面性和均衡性[26]。这些添加物主要包括生物炭、腐殖质等,它们可以有效提升土壤的质量和肥力[27]。此外,铁尾矿砂还可以通过改性处理,制备成多种土壤复合改良剂,以满足不同土壤改良需求。

6. 结论

为提升铁尾矿砂的资源化综合利用,通过岩石学、地球化学等方法对马兰庄铁尾矿砂开展研究,取得以下结论:

- 1) 铁尾矿砂碎屑成分主要有石英、黑云母、辉石、角闪石,其次为磁铁矿及少量斜长石。矿物中含有丰富的钾、钠、镁、铁、钙等金属元素以及微量元素,对土壤改良具有提高肥力的作用。
- 2) 铁尾矿砂粒度分布适中,粒径大于 0.25 mm 的颗粒添加到土壤中能够起到很好的支撑作用,增强

土壤的透气性和透水性。

3) 模拟实验中铁尾矿砂元素析出受 pH 值影响显著, 对植物生长有益组分析出含量比较高。稀土元素表现为轻稀土亏损、重稀土富集。将铁尾矿与生物炭、腐殖质等混合使用, 可以有效改善土壤结构, 提升土壤的肥力, 具有较好的应用价值和经济效益。

致 谢

在论文开展研究、测试和稿件修订过程中, 得到了吉林大学测试科学实验中心李文庆老师和华北理工大学矿业工程学院艾艳君、袁雪涛老师的大力支持, 在此表示衷心感谢。

基金项目

研究成果在河北省省属高校基本科研业务费项目(JST2022003)、矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地开放基金项目(SXIT202306)联合资助下完成。

参考文献

- [1] 任明昊, 谢贤, 李博琦, 等. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 155-168.
- [2] 赵淑芳, 王浩明, 高玉倩, 等. 开发含高硅铁尾矿硅肥实验研究初探[J]. 矿产综合利用, 2018(5): 126-130.
- [3] 牛福生, 牛钰芳, 张晋霞, 等. 响应曲面法优化高硅铁尾矿制备硅肥实验[J]. 非金属矿, 2024, 47(1): 103-107.
- [4] 张丛香, 刘润华, 刘双安, 等. 利用铁尾矿改良苏打盐碱地技术研究与应用[J]. 矿业工程, 2016, 14(1): 39-41.
- [5] 成词峰, 刘文连, 安家金, 等. 钒钛磁铁尾矿原位改良及无土生态闭库种植实验[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(4): 160-165.
- [6] 杨孝勇. 基于铁尾矿的新型盐碱地复合改良剂的研制及应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [7] 山雨. 铁尾矿硅缓释盐碱土改良材料制备及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 辽宁: 辽宁科技大学, 2023.
- [8] 张丽, 赵志强, 王静. 铁尾矿砂与有机肥配施对土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1023-1030.
- [9] 周洋, 王磊, 李强. 铁尾矿砂改良土壤的水分保持能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 267-274.
- [10] Liu, Y., Yang, Z. and Wang, L. (2017) Feasibility of Using Iron Tailings to Enhance Soil Fertility and Crop Yield. *Journal of Soils and Sediments*, **17**, 1456-1465.
- [11] Zhao, M., Sun, X. and Zhang, R. (2019) Effects of Iron Tailings on Soil Physical Properties and Vegetation Restoration in Mining Areas. *Ecological Engineering*, **130**, 1-8.
- [12] Wu, J., Li, P. and Zhang, K. (2021) Sustainable Utilization of Iron Tailings in Soil Improvement: A Global Perspective. *Resources, Conservation & Recycling*, **168**, Article 105266.
- [13] Srivastava, A. (2021) COVID-19 and Air Pollution and Meteorology-An Intricate Relationship: A Review. *Chemosphere*, **263**, Article 128297. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128297>
- [14] 梁成华, 金耀青, 宋菲, 等. 黑云母的释钾能力及其生物有效性研究[J]. 土壤学报, 1994(2): 220-223.
- [15] 潘大伟, 梁成华, 杜立宇. 土壤含钾矿物的释钾研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 253-258.
- [16] 梁鑫, 韩亚峰, 郑柯, 等. 磁铁矿对稻田土壤碳矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1615-1622.
- [17] 魏由庆, 严慧峻. 磁学农业应用与磁性肥料[J]. 土壤肥料, 2000(5): 9-12.
- [18] 梁福利. 马兰庄铁矿选矿厂尾矿的回收利用[J]. 矿山机械, 2009, 37(16): 37-38.
- [19] Cui, X., Geng, Y., Li, T., Zhao, R., Li, X. and Cui, Z. (2021) Field Application and Effect Evaluation of Different Iron Tailings Soil Utilization Technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, **173**, Article 105746. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105746>
- [20] Diao, H., Chen, X., Zhao, X., Dong, K. and Wang, C. (2022) Effects of Nitrogen Addition and Precipitation Alteration on Soil Respiration and Its Components in a Saline-Alkaline Grassland. *Geoderma*, **406**, Article 115541. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115541>
- [21] 王芳娜, 朱飞飞, 李英华, 等. 硅酸盐矿物增强风化技术对水稻田植物-土壤系统固碳的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2733-2743.

-
- [22] 高素素, 陈继虹, 李王成, 等. 掺砂量对中度盐碱土壤水力特性及溶质运移过程的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 374-384.
- [23] 刘腾, 蒋炜. 广东惠州金山新城规划区土壤地球化学背景值及分区研究[J]. 矿产勘查, 2024, 15(12): 2318-2328.
- [24] 黄彪, 鲁菲菲, 李巍, 等. 福建连城县潜在富硒土壤典型种植区花生-土壤系统金属元素含量特征及健康风险评估[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-23. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250113.1430.002.html>, 2025-01-21.
- [25] 任恩良, 邱轩浩, 王丽, 等. 粉煤灰改良盐碱地研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2024(12): 26-35.
- [26] 蔺方春, 陈士超, 郭富强, 等. 不同施肥方式下盐碱土土壤理化性质特性分析[J]. 温带林业研究, 2024, 7(3): 34-39.
- [27] 方建德, 林成芳. 土壤有机质形成转化过程及其影响因素综述[J]. 亚热带资源与环境学报, 2024, 19(1): 24-34.