

铁矿尾砂构造“壤-砂-黏”土壤剖面构型的机理与技术模式

靳文娟¹, 边振兴^{1*}, 魏忠义¹, 董志超¹, 钱凤魁¹, 欧阳兆灼², 戴慧敏³

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心(东北地质科技创新中心), 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 沈阳 110034))

摘要: 针对辽西半干旱生态脆弱区内铁矿采选产生的铁矿尾砂等废弃物大规模堆积占地、污染环境, 而露天采坑等废弃地复垦土源匮乏的问题, 提出利用铁矿尾砂等充填采坑并构造农田土壤剖面构型的铁矿尾砂大规模农业资源化利用理念。通过采集铁矿尾砂和区域正常农田土壤, 试验分析铁矿尾砂的基本理化特性、元素含量及利用的可行性; 基于“土层生态位”和“土壤关键层”理论, 探讨其作为土壤剖面构造材料的作用机理; 结合已有实践经验, 构建出适合辽西半干旱气候特点的具有“壤-砂-黏”结构的农田土壤剖面构型技术模式。结果表明: 1) 铁矿尾砂的砂粒质量分数为 28.49%~33.23%, 粉粒质量分数为 66.11%~71.64%, 黏粒质量分数小于 1.0%; pH 呈弱碱性, 电导率能满足作物生长要求, 无重金属污染, 且富含作物所需的有益微量元素, 可作为土壤剖面重构材料。2) 铁矿尾砂构造土壤剖面构型的作用机理是利用其砂粒结构粒间大孔隙蓄水的特征作为保墒层, 结合采矿剥离表土和底层红黏土, 构造形成“壤(表层)-砂(蓄水层)-黏(保水层)”结构的土壤剖面, 起到蓄水保墒的作用; 同时, 将铁矿尾砂以 25% 掺混在黏质表层土壤中, 增加耕层厚度的同时改良土壤质地。3) 具体构造技术模式: 按从下到上的顺序依次铺设“粒径 20~50 cm 的大块废石(充填至距地表 1 m)-粒径 4~6 cm 的碎石(20~30 cm)-红黏土(20~30 cm)-铁矿尾砂(20~30 cm)-剥离表土(20~30 cm, 掺混约 25% 的铁矿尾砂)”。通过分析辽宁省建平县的 4 个复垦案例, 证明该技术不仅能解决矿区固废堆积带来的生态环境问题, 还能增加耕地面积, 提升农田质量, 种植玉米增产 705 kg/hm²。形成的矿区生态修复的新模式, 可在其他类似铁矿区因地制宜地推广应用。

关键词: 铁矿尾砂; 土壤重构; 土壤改良; 土壤剖面; 机理; 生态修复

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407005

中图分类号: TD88;S156

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0212-11

靳文娟, 边振兴, 魏忠义, 等. 铁矿尾砂构造“壤-砂-黏”土壤剖面构型的机理与技术模式[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 212-222. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407005 <http://www.tcsae.org>

JIN Wenjuan, BIAN Zhenxing, WEI Zhongyi, et al. Mechanism and technical mode of "loamy-sandy-clayey" soil profile using iron tailings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 212-222. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407005 <http://www.tcsae.org>

0 引言

铁矿是人类发展中重要的材料之一, 从原始社会开始, 铁的应用就使社会生产力得到巨大提升^[1]。如今, 随着科技发展, 铁矿依然是建筑、机械、电子、医疗等领域的重要材料^[2-3]。铁矿石的产地遍布世界各地, 主要的供应国有澳大利亚、巴西、印度、俄罗斯等, 中国也有大量铁矿石资源^[4-6]。据美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS) 2020 年《世界矿产品摘要》统计, 中国铁矿石储量占世界总储量的 11.8%, 排名第四^[7]。矿石品位指单位体积(质量)矿石中有用组分(矿物)的含量^[8], 据 USGS 统计, 2020 年全球铁矿石平均品位 46.6%, 而中国铁矿石平均品位仅 34.5%^[7]。

低品位矿石会使采选过程中产生大量废弃铁矿尾砂。全球每年约产生 14 亿 t 铁矿尾砂, 主要来自澳大利亚、巴西和中国^[9], 是典型的堆存量、利用率低的大宗工业固废^[5]。中国每生产 1 t 铁精矿就会产生 1.5 t 铁矿尾砂, 铁矿尾砂年产量约 1.8 亿 t^[10]。大量铁矿尾砂堆积会造成土地占用、土壤/水污染和生态环境风险等问题^[11-13]。

实现铁矿尾砂大规模资源化利用, 减少堆存是中国当前迫切的需求。国家相关部门不断出台一系列固体废弃物综合利用政策, 大力提倡和鼓励推进铁矿尾砂资源化利用^[6,14]。随着科技进步, 尾矿的综合利用率不断提高, 当前, 国内的尾矿综合利用率为 32.5%, 但与发达国家 60% 的利用率相比, 相差甚远^[15]。目前, 国内外对铁矿尾砂的综合利用途径主要包括以下几方面: 1) 二次选别, 回收有价值组分^[16-17]; 2) 充填地下采空区^[18-19]; 3) 作为建筑材料, 制备水泥、砖、砂石骨料和微晶玻璃等^[20-21]; 4) 制备肥料、用作土壤改良剂和土地复垦等^[22-24]。这些技术虽实现了铁矿尾砂的资源化利用, 但因用量少, 部分利用途径成本较高, 导致其资源化利用率较低。此外, 铁矿尾砂在工业资源化利用方面表现良好, 但在农业生产领域还有待进一步研究。

收稿日期: 2024-07-01 修订日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371656); 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJ2022-27)

作者简介: 靳文娟, 博士生, 主要研究方向为矿区土地复垦与生态修复。

Email: wjjinsyau@163.com

*通信作者: 边振兴, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地整治与生态修复。Email: zhx-bian@syau.edu.cn

土壤重构是以恢复矿山破坏区的土壤为目的,通过工程措施及物理、化学、生物和生态措施,构造一个能在较短时间内达到最优生产力的土壤剖面^[25]。土壤重构是矿区土地复垦与生态修复的核心^[26-27]。目前,中国土壤重构主要是胡振琪^[26]提出的“分层剥离、交错回填”剖面重构技术,以保证复垦地的土层顺序保持不变,有利于作物生长。在土壤重构过程中,一般很难获得足够数量的土壤,而多使用矿山固体废弃物作为重构物料,这既能大量利用废弃物,又复垦了露天采坑等损毁土地,一举多得。现阶段的土壤重构物料主要包括煤矸石、粉煤灰、尾矿渣、河湖淤泥及垃圾等^[28]。当前,对于将煤矸石、粉煤灰等作为土壤重构材料的研究较丰富,利用煤矸石充填后覆土用于农业生产的覆土厚度根据煤矸石风化程度和活性而定^[29];粉煤灰通常与水按一定比例掺混,充填后在上层覆土 0~50 cm,用于农业生产^[30]。近年,胡振琪等^[31-33]将黄河泥沙充填到采煤塌陷地进行土壤重构,利用黄河泥沙作为植物生长介质起到支撑和辅助作用,提出无夹层一次充填和夹层式多次充填的技术工艺,有效提高重构土壤的生产率。对于铁矿尾砂在土壤重构中的作用,目前主要是将铁矿尾砂按一定比例掺混到土壤中改善土壤质量。纪兰等^[34]利用铁矿尾砂掺土的实验表明,最佳掺砂范围在 30%~40%,能显著增加土壤孔隙度、增加有效水含量。吕春娟等^[35-36]通过探究铁尾矿不同复垦模式下土壤水分特征表明,铁尾矿中施入菌糠可以显著降低复垦土壤紧实度,增加孔隙度,使复垦土壤有较高的贮水持水量和入渗性能,有利于植物吸持利用。然而,目前对于将铁矿尾砂作为露天采坑等土壤剖面重构材料的研究较少,武晗^[37]通过对辽西地区利用铁矿尾砂构造复垦农田剖面实践的调查与分析表明,“30 cm 表土+20 cm 铁矿尾砂+20 cm 底土”的构造措施能保证作物正常生长发育,是可行的;但对于铁矿尾砂构造土壤剖面的作用机理及最优技术模式尚不明晰。

铁矿是辽宁省优势矿产资源,据自然资源部《2022 年全国矿产资源储量统计表》中的数据显示,辽宁省铁矿资源储量为 39.55 亿 t,为全国第一名,其矿石开采量占全国铁矿石开采量的 15.29%。大量铁矿尾砂堆存占地及污染环境,也是当前生态文明建设背景下,绿色低碳生产中亟待解决的难题;此外,矿区废弃地复垦土源严重匮乏。尝试利用铁矿尾砂代替土壤来构造农田土壤剖面构型,会达到“一举多得”的效果。基于此,面向中国“切实保护耕地”基本国策及“生态安全”“粮食安全”“国土空间生态修复”国家战略及实现“双碳”目标的愿景,提出利用铁矿尾砂作为矿区复垦土壤构造材料及改良材料的理念。在此基础上,通过试验分析测定铁矿尾砂的基本特性及其可利用性,探讨铁矿尾砂构造复垦土壤剖面构型及改良土壤质地的原理,并结合多年的实践经验构建大量铁矿尾砂重构复垦农田土壤剖面及改良黏质土壤的关键技术模式,以期实现铁矿尾砂高价值利用及矿区绿色低碳和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省西部的朝阳市建平县小塘镇,地理坐标为 119°29′~119°41′E, 41°35′~41°45′N (图 1),属辽西山地丘陵区,属半干旱大陆性季风气候。雨热同季,年平均气温 7.6℃,年均日照时数 2 850~2 950 h。年平均降水量 614.7 mm,多集中在 6—8 月份。春秋两季多风易旱,冬季盛行西北风,风力较强。区域是典型的辽西半干旱区,原始农田耕作层瘠薄(仅 10~15 cm),土壤质地黏重,水分状况较差,导致农田大多为中低产田。干旱是区域农田质量的主要制约因素。建平县境内已探明和发现的矿产资源有 55 种,其中,金属矿产 27 种,非金属矿产 28 种,金属矿以铁矿为主,铁矿探明储量为 6 021 万 t,年生产铁精粉 40 万 t。铁矿采选产生的大量铁矿尾砂如何通过大量资源化综合利用解决其造成的土地占用、环境污染问题已成为当地近年的重点任务。以当地典型的铁矿山采选企业——建平盛德日新矿业有限公司生产的干排铁矿尾砂为对象开展研究。

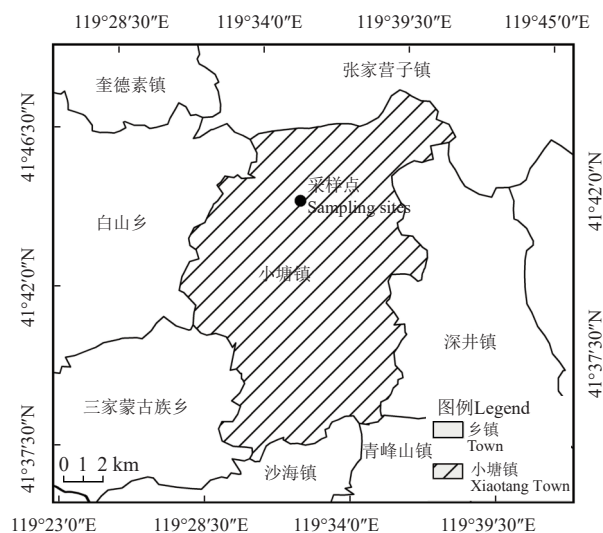


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

1.2 试验材料

试验分析所用的铁矿尾砂来自建平盛德日新矿业有限公司铁矿选矿过程中采用干排技术形成的干排铁矿尾砂,粒径在 0.25 mm 左右,无 1~2 mm 以上的砂粒和石砾。于 2023 年 4 月在其铁矿选矿厂的干排铁矿尾砂堆采集了 3 份铁矿尾砂样品,每个样品质量 1 kg 左右,采后自然风干,再过 2 mm 筛备用。

与铁矿尾砂对照的区域正常农田土壤取自选矿厂南部距选矿厂约 500 m 的一块正常耕种的农田(N),于 2023 年 4 月在农田内均匀布设 3 个采样点,采样点间距大于 10 m,每个采样点挖取 100 cm 深的土壤剖面,按照 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 的土层深度进行土壤采样。土壤样品采回后自然风干,剔除石块和杂物,过 2 mm 筛备用。

1.3 试验方法

依据《土壤农化分析（第三版）》^[38]和《土壤调查实验室分析方法》^[39]等资料对铁矿尾砂及农田土壤样品的粒径、pH 值、电导率、有机质、养分以及铁矿尾砂的元素含量等理化特性进行测定，具体方法如下：1) 颗粒组成采用激光粒度仪测定；2) pH 值和电导率利用蒸馏水按 5:1 的比例浸提后，分别用 pH 计和电导率仪测定；3) 有机质含量采用重铬酸钾容量法测定；4) 土壤全量养分：全氮利用元素分析仪测定，全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定，全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定；5) 土壤速效养分：碱解氮采用碱解扩散法测定，速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定，有效磷采用 0.5 mol/L 的 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定；6) 铁矿尾砂的元素含量采用 ICP-AES 法测定。

2 铁矿尾砂作为土壤剖面构造材料的作用机理

2.1 铁矿尾砂基本特性及利用的可行性

2.1.1 粒径分布

根据美国农业部 (USDA) 质地分类制，铁矿尾砂的粉粒和砂粒质量分数分别为 66.11%~71.64% 和 28.49%~33.23%，黏粒质量分数小于 1.0% (图 2)。正常农田各层土壤属于粉 (砂) 质黏壤土或黏壤土，且黏粒含量随土层深度增加而变大。黏壤土的细粒含量高而粗粒含量较少，结构紧实，粒间孔隙较窄，保水保肥能力强^[40-41]。砂壤土黏粒含量少，粒间孔隙大，降水和灌溉水容易渗入，颗粒间能蓄水，但保水保肥能力差^[42-43]。粉壤土兼具砂质和黏质土的优点，耕性优良，是较为理想的土壤^[44]。可考虑利用铁矿尾砂的砂粒结构来实现蓄水保墒作用，也可将其与黏重土壤掺混改良土壤质地。

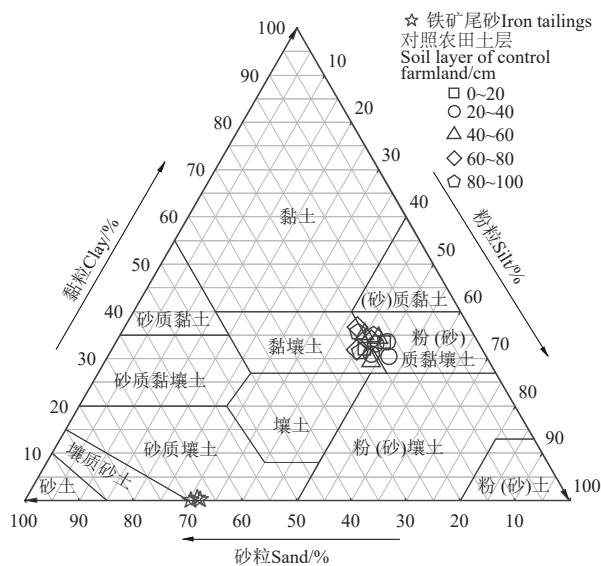


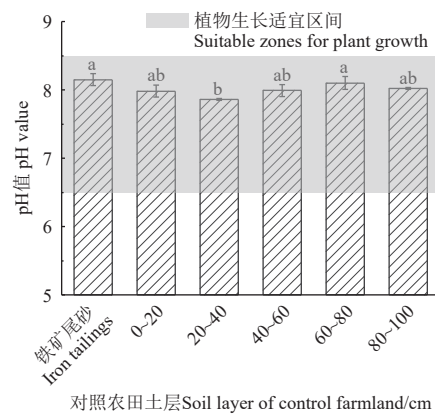
图 2 铁矿尾砂和对照农田土壤的质地类型

Fig.2 Texture type of iron tailings and the soil of control farmland

2.1.2 pH 值与电导率

铁矿尾砂和正常农田的 pH 均呈弱碱性 (图 3)。铁矿尾砂的 pH 值为 8.1，与正常农田各土层差异不显著

(20~40 cm 除外)。辽西半干旱区的主要农作物为玉米、高粱和谷子，这些作物一般适宜在 pH 值为 6.5~8.5 的土壤里生长。将铁矿尾砂作为土壤剖面的重构材料，其 pH 值符合当地农作物的生长需求。电导率 (EC) 是限制作物生长的障碍因素。铁矿尾砂电导率的平均值为 $174.38 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，低于正常农田 0~80 cm 各层土壤的电导率，与正常农田 80~100 cm 的电导率无显著差异 (图 4)。土壤电导率低于 $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时不会对作物生长和产量产生负面影响^[45-46]。铁矿尾砂的电导率远小于作物生长的安全限值。



注：不同小写字母表示处理间在 0.05 水平下存在显著差异，下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The following is the same.

图 3 铁矿尾砂和对照农田土壤的 pH 值

Fig.3 pH value of iron tailings and the soil of control farmland

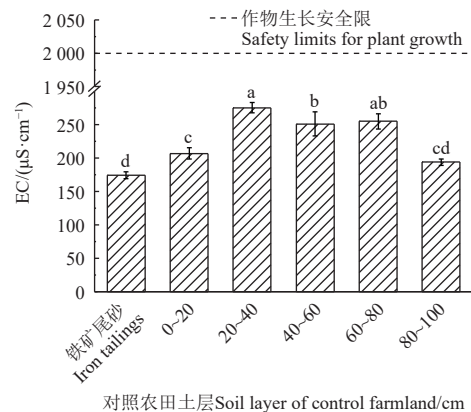


图 4 铁矿尾砂和对照农田土壤的电导率

Fig.4 Electrical conductivity of iron tailings and the soil of control farmland

2.1.3 有机质

铁矿尾砂的有机质含量为 $2.03 \text{ g}/\text{kg}$ ，而正常农田各层土壤的有机质含量均高于 $10 \text{ g}/\text{kg}$ 。正常农田土壤的有机质含量随剖面深度增加而减少 (表 1)。根据全国第二次土壤普查中有机质的分级标准，正常农田 40 cm 以上的土壤有机质含量为三级，属于中等水平，而 40 cm 以下的土壤有机质含量均为四级，属于中等偏低的水平。铁矿尾砂中的有机质含量为六级，属于极低水平。因此，将其作为复垦土壤构造材料需增施有机肥。

表 1 铁矿尾砂和对照农田土壤的有机质含量及分级
Table 1 Organic matter content and grading of iron tailings and control farmland soils

项目 Item	铁矿尾砂 Iron tailings	对照农田土层 Soil layer of control farmland/cm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
有机质含量 Organic matter content /(g·kg ⁻¹)	2.03±0.06e	21.13±0.08a	20.83±0.35a	15.19±0.06c	17.31±0.04b	13.67±0.30 d
分级 Grade	六级	三级	三级	四级	四级	四级

2.1.4 养分含量

对照全国第二次土壤普查分级标准，铁矿尾砂的全氮、碱解氮、全钾、速效钾、全磷和有效磷的含量分别属于Ⅵ级、Ⅵ级、Ⅴ级、Ⅵ级、Ⅰ级和Ⅵ级水平，除全磷外，其余养分含量均明显低于正常农田各层土

壤的相应含量（图 5）。总体来看，正常农田土壤的全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量相对较低，全钾和速效钾含量相对较高。已有研究结果也表明，辽西半干旱区的土壤养分含量处于缺氮少磷钾中等的状态，土壤贫瘠^[37]。

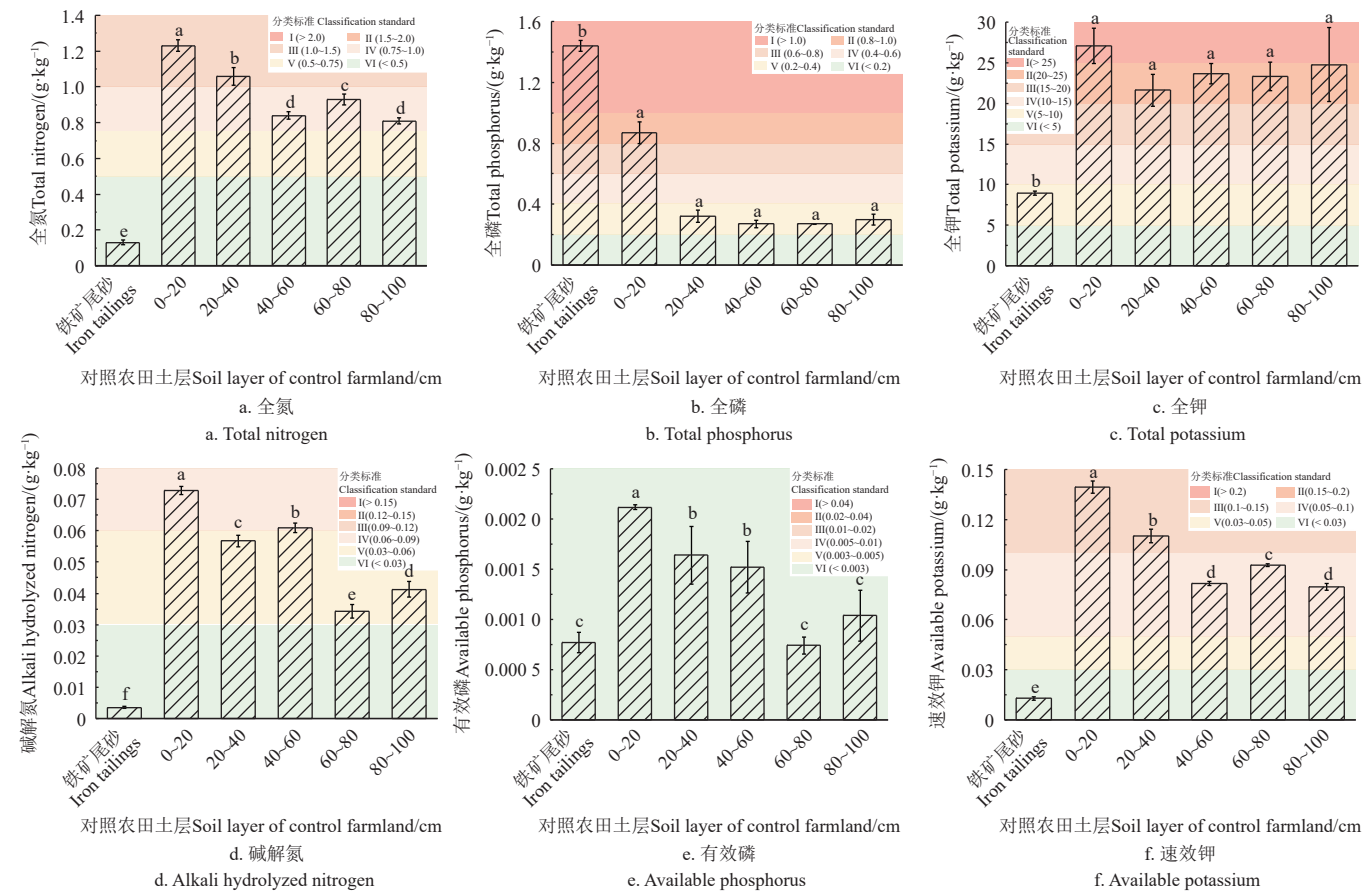


图 5 铁矿尾砂和对照农田土壤的养分含量
Fig.5 Nutrient content of iron tailings and the soil of control farmland

2.1.5 元素含量

铁矿尾砂的化学成分主要有石英砂、SiO₂、CaCO₃、Al₂O₃、Fe₂O₃、Na₂O、MgO、Na₂CO₃、K₂CO₃、BaCO₃和硼等^[34]。研究所述铁矿尾砂主要含 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 和 MgO，此外，还有少量 K₂O、Na₂O 及 S 和 P 等

元素（表 2）。铁矿尾砂中所有重金属含量均远低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中的土壤污染风险筛选值。此外，铁矿尾砂中富含一些对作物生长有益的微量元素，如 B、Mn、Cu、Zn 等，能够促进农作物生长以及改善作物品质。

表 2 铁矿尾砂的化学成分及元素含量
Table 2 The chemical composition and elemental content of the iron tailings

名称 Name	质量分数 Content	名称 Name	质量分数 Content	名称 Name	质量分数 Content	名称 Name	质量分数 Content	名称 Name	质量分数 Content
SiO ₂	67.83	K ₂ O	0.82	Zn	67	As	1.10	Mn	970
CaO	4.38	Na ₂ O	0.82	Cr	41	Cu	67	Sr	660
Al ₂ O ₃	10.56	S	0.03	Cd	0.06	Ni	37	Ba	540
MgO	3.22	P	0.10	Pb	9.00	B	83	Se	2
Fe ₂ O ₃	8.91	Ti	0.26	Hg	0.02	Li	14	Sn	0.50
								Mo	0.50
								V	70
								Zr	10
								Co	18
								Sc	17

综上，铁矿尾砂的砂粒质量分数为 28.49 %~33.23%，粉粒质量分数为 66.11%~71.64%，而黏粒质量

分数小于 1.0%，可利用其砂粒结构粒间孔隙来实现蓄水保墒作用；pH 值和电导率值均能满足大多数作物的生长要求；重金属含量远低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中的土壤污染风险筛选值，不会造成污染。且较易获取。因此，铁矿尾砂用来构造复垦土壤剖面构型是可行的。

2.2 铁矿尾砂构造土壤剖面构型材料的作用机理

通过对铁矿尾砂基本特性分析可知，在复垦土壤严重匮乏的辽西半干旱生态脆弱区，铁矿尾砂作为土壤剖面构造材料是可行的。但由于铁矿尾砂砂粒含量高、营养成分低，与自然土壤存在一定差距，明确其在土壤剖面构型中的作用对于构造适耕性高的农田土壤剖面至关重要。土壤重构就是以土壤恢复和重建为目标，根据自然土壤结构和土地利用途径，将单元土体进行立体叠加构造出的土壤剖面构型。构造过程中不同层次的土壤具有不同的特征，在整个土壤剖面中发挥着不同的作用。因此，在土壤重构中应重视各土层间的差异，发挥其优势功能，构造高适宜性的剖面^[47]。

自然状态下的土壤剖面由 3 个基本层组成（图 6），即表土层（A 层）、心土层（B 层）和母质层（C 层），表土层又称“耕作层”，有机质的积累和转化发生在该层；心土层位于土壤剖面的中层，由物质淀积形成；母质层位于土层下部，是形成土壤的物质基础，土壤的

“骨架”^[26,47]。近年，胡振琪^[47]创新性地提出“土层生态位”和“土壤关键层”2 个新概念，从理论上揭示了土壤剖面重构中不同构造层所发挥作用的差异，为重构科学合理的土壤剖面提供了基础理论支撑。其中，“土层生态位”指的是各土层在整个剖面中的位置以及其与各相关土层间的关系和相互作用。不同生态位的土层在土壤水分运移、热量传输和溶质运移等方面对植物生长和发育具有不同的作用。从土层生态位来看（图 6），A 层是作物生长发育过程中的关键土层，其应具有疏松的结构，且富含较高的有机质、营养物质和含水率，易于作物根系生长和营养吸收；B 层需要为植物根系提供空间并提供大量水分、营养，要求土壤有足够含水量；C 层一般尚未完全熟化为土壤，为土壤提供基础支撑。合理发挥各土层的功能和优势才能构造出高适耕性的土壤剖面。“土壤关键层”是指在土壤剖面的系列土层中，一些直接影响土壤系统的整体功能和生产力的土层^[47]。不同关键层的形态差异较大，功能明显有别。常见的土壤关键层主要有 3 种：1）表土层，植物赖以生存的介质；2）含水层，具有一定厚度的保水持水性能高的介质层；3）隔水层，重力水无法透过、起着阻隔作用的土层或岩层。以上分析表明，土壤重构就是基于土层生态位理论，根据构造材料发挥的功能和作用确定土壤关键层，设计和优化土壤剖面构型的过程。

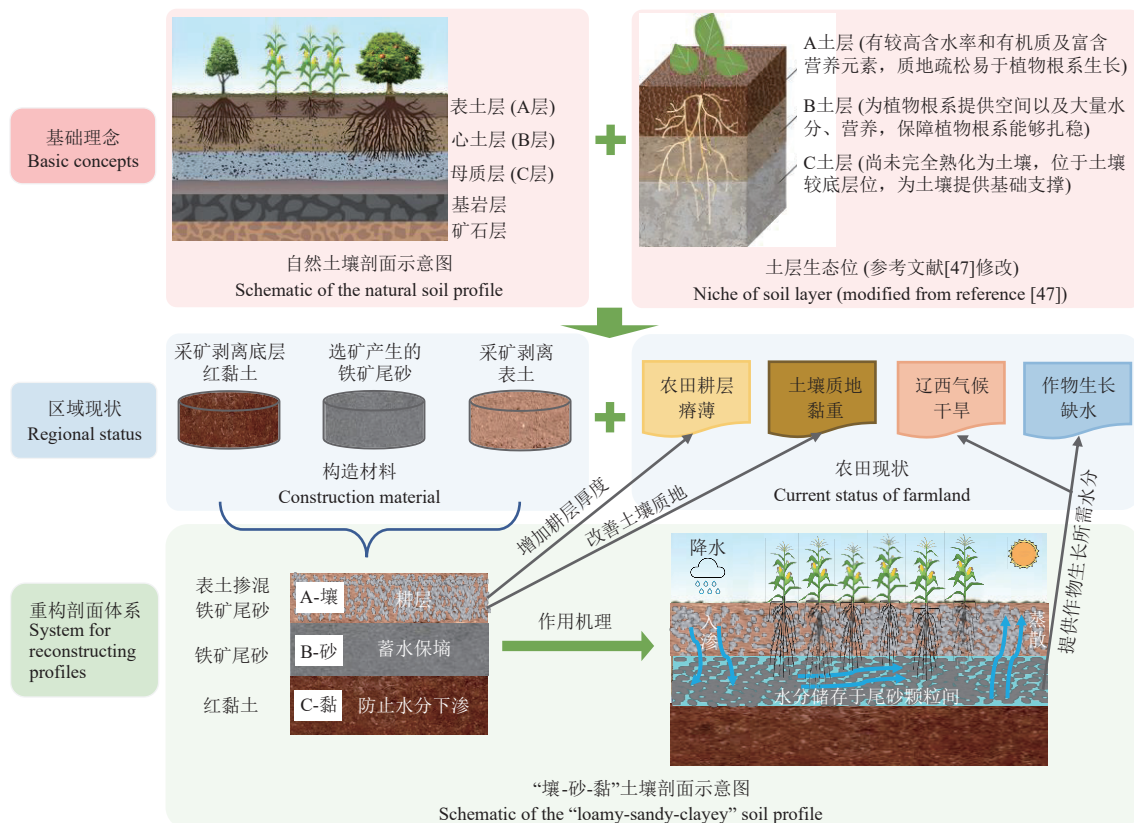


图 6 铁矿尾砂构造土壤剖面的作用机理示意图

Fig.6 Schematic diagram of the mechanism of iron tailings as a soil profile construction material

基于以上基础理论，根据实地调查明确，研究区采矿前土地以耕地为主，辽西半干旱区特殊的气候条件造成当地农田土壤耕层瘠薄（仅 10~15 cm），且为质地

黏重的褐土，土壤蓄水保墒能力较低，作物生长缺水，属于中低产田。区域重构土壤备选的土层材料有：1）原始表土层剥离土壤，属于粉黏壤；2）露天采矿剥离的底

层红黏土，属于尚未完全熟化的黏土，位于原始土壤剖面的底层；3）选矿产生的铁矿尾砂，其砂粒粒间孔隙具有较好的蓄水性能。根据以上 3 类材料的特点，结合“土层生态位”和“土壤关键层”，可以明确将采矿剥离表土作为表土层 A 层（图 6），但为了改善其黏重质地，更易于作物根系生长，可将适量铁矿尾砂与其掺混，在增加耕层厚度的同时，改良表土质地，形成耕性优良的壤质表土；对于铁矿尾砂，利用其砂粒结构的粒间大孔隙蓄水的特征，作为含水层 B 层，将雨季降水蓄积在该层，供作物在生长期缺水时所需，其作为土壤剖面重构的作用机理是作为土壤保墒层；对于采矿剥离的底层红黏土，其黏质透水性差的特征符合土壤关键层中隔水层的特点，同时，由于铁矿尾砂大孔隙的保水保肥性较差，所以在铁矿尾砂下铺设红黏土层用来阻隔铁矿尾砂层储蓄的水分下渗，以增加重构土壤剖面的保水保肥性能，同时为上层土壤提供支撑。由此构造出从上到下为“壤-砂-黏”结构且符合辽西半干旱气候条件的类似于自然土壤剖面的复垦农田土壤剖面构型，提高复垦农田的蓄水保墒及保水保肥能力，使其适耕性达到甚至优于

区域正常农田。

3 铁矿尾砂构造土壤剖面及改良黏质土壤技术模式构建

3.1 技术模式构建

基于以上分析，利用铁矿尾砂及采矿剥离土壤构造从上到下为“壤-砂-黏”的土壤剖面构型，有效解决矿区复垦土源匮乏的问题；此外，该剖面在理论上具有较好的蓄水保墒及保水保肥能力，缓解辽西半干旱区作物生长缺水，提高复垦农田生产力。通常将铁矿尾砂构造土壤剖面技术应用于露天采坑充填造地及低洼废弃河道、河漫滩等废弃地土壤剖面重构中。近年，迫于铁矿采选废石、铁矿尾砂等占地带来的经济和环境压力，建平盛德日新矿业有限公司等中小型铁矿山企业尝试将铁矿采选废石用于采坑回填，在其上利用铁矿尾砂和剥离土壤构造土壤剖面，取得较好的实践效果。根据已有实践，结合铁矿尾砂构造土壤剖面的作用机理，参照研究区自然农田土壤剖面，构建出铁矿尾砂构造土壤剖面构型及改良黏质土壤的技术模式，具体为（图 7）：

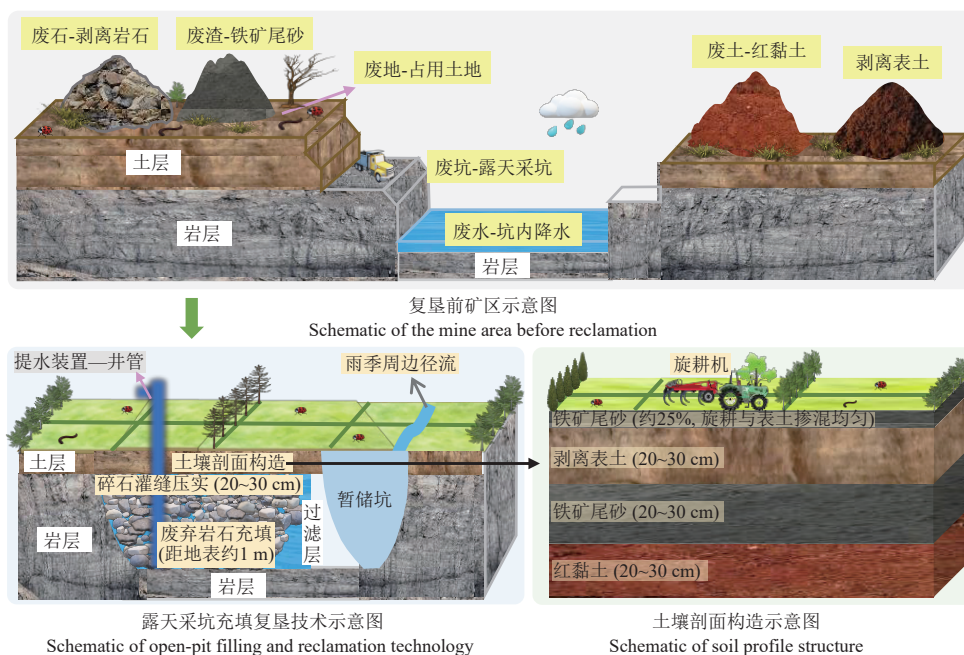


图 7 铁矿尾砂构造复垦土壤剖面构型技术模式示意图

Fig.7 Schematic diagram of the technical model for constructing profiles of reclaimed soil using iron tailings

1) 构造区底部充填。实地调查发现，研究区正常农田土层厚度约 1 m，而露天采坑或低洼废弃河道的深度在几十米至上百米。所以，在土壤剖面重构之前，应在构造区底部利用采矿排弃的粒径在 20~50 cm 的废矿石充填至距离地表约 1 m 处，此高度为预留出构造土壤剖面的厚度。在该过程，结合课题组提出的露天采坑底部蓄提水方法^[48-49]，利用采坑底部无裂隙槽状形态、回填废矿石间隙构造类地下含水层，并通过预留一定范围露天采坑不充填区作为汇集地表径流的暂储坑，利用地形比或截流沟将雨季坡面水引至地下暂储坑内，通过废矿石间隙（过滤层）侧向汇集至采坑底部，形成采坑充填后的地下储水库，并通过充填时预埋多段铸铁井管提

水，井管内设置进水管，进水管下端连接潜水泵，通过潜水泵将水提取至地表，用于复垦农田灌溉。

2) 铺设防渗漏垫层。由于废弃岩石形状不规则，充填后岩石间会存在空隙。如果在其上直接覆土，会造成土壤不均匀下漏，引起地面沉降。因此，在充填的废矿石上铺设 20~30 cm 的选矿碎石（平均粒径约 4~6 cm）作为垫层，也为塑性固定层，并通过机械灌缝压实，防止上层铺设的土壤发生不均匀下漏。

3) 铺设隔水层。采矿剥离的底层红黏土，其黏质、透水性差的特征可作为隔水层。区域正常农田土壤剖面 60~100 cm 的土壤质地类似于红黏土。此外，研究区复垦耕地以种植玉米为主，玉米的根系主要集中于 0~

30 cm 土层内, 向四周伸展 40~60 cm。所以, 在不影响玉米根系正常生长的情况下, 需要在红黏土层上预留 40~60 cm 的表土层和含水层。因此, 在碎石层上铺设 20~30 cm 的红黏土, 通过机械灌缝压实, 为上层土壤提供固定支撑, 同时防止含水层的水分下漏, 起到塑性固定及保水保肥的作用。

4) 铺设含水层(保墒层)。复垦实践中, 表层土厚度一般为 20~30 cm^[31,50], 则含水层的厚度应为 20~30 cm。因此, 在红黏土层上铺设 20~30 cm 厚的铁矿尾砂作为含水层, 利用铁矿尾砂砂粒间孔隙蓄水的特征作为重构土壤剖面的保墒层, 将区域雨季降水蓄积在该层, 在干旱时供作物生长所需。此外, 利用铁矿尾砂作为心土层替代材料, 大量消耗铁矿尾砂的同时减少客土用量, 并有效增加构造土层的厚度。

5) 铺设表土层。区域土层贫瘠, 有效耕层仅 10~15 cm, 在复垦中应增加表土层厚度。矿山土地复垦中一般表土层厚度为 20~50 cm。建平盛德日新矿业有限公司在前期实践中采用(20 cm 底土+20 cm 铁矿尾砂+30 cm 表土)和(20 cm 底土+20 cm 铁矿尾砂+50 cm 表土)两种重构方式, 结果显示, 30 cm 表土比 50 cm 表土的复垦效果更好^[13]。因此, 在碾压平整的铁矿尾砂层上铺设 20~30 cm 采矿剥离的表土。此外, 由于原始剥离表土质地黏重, 应将铁矿尾砂以一定量铺设于表土上, 通过翻耕与表土充分混合, 利用铁矿尾砂的砂粒结构改善表土黏重的质地, 形成壤质结构, 提升适耕性。此外, 还能利用铁矿尾砂中含有的有益微量元素促进作物生长发育。课题组关于铁矿尾砂掺土改良黏重土壤的研究结果表明, 铁矿尾砂掺土改良黏重土壤的最佳掺砂比为 25%; 在田间示范中, 耕层 15 cm 的表土中掺混 5 cm 铁矿尾砂的改良效果最好^[14]。因此, 在表土层上铺设 5~7 cm 厚度的铁矿尾砂并通过旋耕机翻耕使其与表土混合均匀。

3.2 复垦实践及效果

研究构建的铁矿尾砂构造复垦土壤剖面构型及改良黏质土壤技术模式, 在辽宁西部典型的中小型铁矿露天开采区进行采坑充填复垦、废弃地复垦及中低产田改良等实践, 均取得较好的复垦效果。

3.2.1 露天采坑充填及土壤剖面重构

复垦案例一位于辽宁省朝阳市建平县小塘镇松新铁矿北山露天采坑, 采坑长约 810 m, 宽约 550 m, 形状类似椭圆, 垂深 97 m。于 2018 年对采坑进行充填复垦及土壤剖面重构。复垦技术为: 1) 将粒径 20~50 cm 的废矿石充填采坑底部至距相邻地表 1 m 的高度, 预留构造土壤剖面的厚度; 2) 在充填中设置一定范围不充填作为暂储坑, 汇集采坑上游坡面径流形成蓄水区; 3) 在废石充填时预埋多段(由坑底部至地表依次为沉淀管、滤水管和井壁管)铸铁井管, 在井管内设置进水管, 进水管下端连接潜水泵; 4) 在废石上铺设 30 cm 粒径 4~6 cm 的碎石, 灌缝压实, 其上进行土壤剖面重构; 5) 在碎石上铺设 20 cm 红黏土, 红黏土上铺设 20 cm 铁矿尾砂, 铁矿尾砂上铺设 30 cm 采矿剥离表土, 平整为农田(C1), 新增耕地约 40 hm²。复垦工作完成后, 种植玉

米进行试验, 对复垦效果进行验证。

案例二位于辽宁省朝阳市建平县白山乡白山铁矿露天采坑, 采坑长约 780 m, 宽约 410 m, 形状类似椭圆, 垂深 72 m。于 2020 年 3 月对采坑进行充填复垦, 复垦技术与案例一相同。复垦后新增耕地约 30 hm² (C2), 种植玉米。

2023 年 10 月, 分别测定 C1、C2 区域和区域正常农田的玉米产量。C1、C2 区域的玉米产量分别为 9 736.31、8 891.54 kg/hm², 区域正常农田的玉米产量为 9 031.28 kg/hm²。说明铁矿尾砂构造土壤剖面构型形成的农田在复垦 3 年后玉米产量略低于区域正常农田, 而在复垦 5 年后, 玉米产量较正常农田增产 705.03 kg/hm²。

3.2.2 废弃河道充填构造农田土壤剖面

2020 年 5 月, 选取辽宁省朝阳市建平县小塘镇新城村下杖子外的一处废弃河道, 河道长约 100 m, 宽约 20 m, 深约 10 m。首先在河道底部充填大块废石以提高地面高程, 在废石上铺设 20 cm 碎石, 灌缝压实, 以防止上层铺设土壤发生不均匀下漏; 在碎石上进行土壤剖面构造, 共设计 9 种不同的剖面构型(T1~T9)(图 8), 种植玉米, 对比分析复垦效果。2023 年 10 月, 测定试验区玉米产量(图 9)。在构造的 9 种剖面构型中, T9(20 cm 表土+20 cm 铁矿尾砂+20 cm 红黏土)的产量最高, 达 9 327.24 kg/hm², 较区域正常农田玉米产量提高 3.28%, 说明构造具有“壤-砂-黏”结构特征的土壤剖面, 其适耕性和玉米产量优于区域正常农田。T4 的产量比 T2 提高 3.79%, T8 比 T6 的产量提高 5.11%, 说明表土层的厚度会影响复垦效果, 表层覆土 30 cm 的效果优于 20 cm。

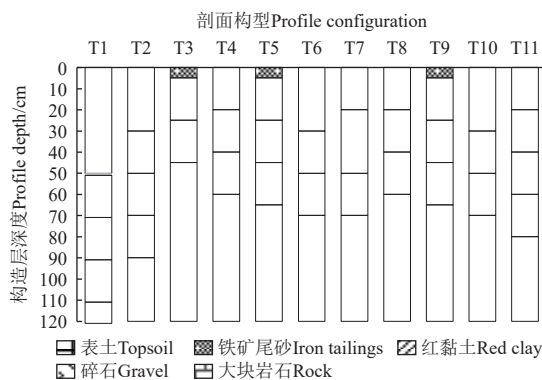


图 8 试验区复垦土壤剖面构型

Fig.8 Reclaimed soil profile configuration in the experimental area

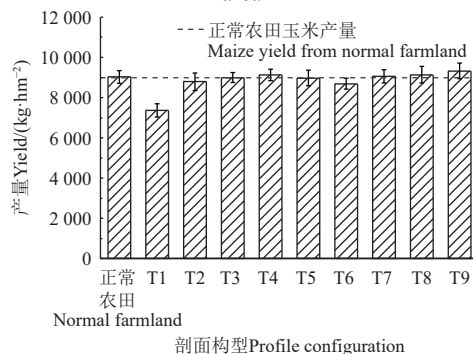


图 9 不同剖面构型的玉米产量

Fig.9 Maize yield in different profile configurations

3.2.3 铁矿尾砂改良表层黏质土壤

在农业实践中，当地农民自发将铁矿尾砂施入土壤后种植玉米、谷子等作物，有效提高了作物产量。因此，结合铁矿尾砂的砂粒结构，可考虑将其以一定量施用于表层土壤中，并通过翻耕与表土充分混合，在增加耕层厚度的同时，改善黏重的土壤质地。课题组通过盆栽试验，将铁矿尾砂按照 0、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 和 100% 的比例与土壤混合均匀后种植玉米和谷子，并在盆栽试验的基础上开展示范田试验，在建平县小塘镇道虎沟村山坡地改造成平整的梯式农田（有效耕层为 15 cm）内，分别铺设 0、2、5、7 和 10 cm 厚度的铁矿尾砂，用翻转犁深翻，用旋耕机旋耕耙压，使铁矿尾砂与耕层土壤混匀，种植玉米和谷子。试验结果表明，盆栽试验中铁矿尾砂施用比例为 25% 时的效果最好，玉米和谷子的土壤孔隙度较正常农田分别提升 1.24% 与 1.08%，玉米和谷子的产量较正常农田分别提升 36.27% 和 17.34%。示范田试验中，施用 5 与 7 cm 厚度的铁矿尾砂效果较好，玉米、谷子的土壤孔隙度最高提升 3.04% 与 3.50%，容重最高降低 5.62% 与 5.81%，耕层持水量最高提升 22.40% 和 14.40%，玉米、谷子作物茎叶、籽实的总氮、磷、钾含量均显著高于正常农田；玉米和谷子的产量较正常农田最高提高 39.53% 和 82.64%。此外，施用铁矿尾砂改良黏质土壤还能有效提高土壤中铁、锰、铜、锌等微量元素的含量。

4 讨 论

文章研究了利用铁矿尾砂构造“壤-砂-黏”土壤剖面构型及改良黏质土壤的机理，构建出相应的复垦技术模式，并在辽宁省建平县中小型铁矿山露天开采区的露天采坑充填复垦、废弃河道填沟造地以及中低产田黏质表层土壤改良实践中进行了验证。利用铁矿采选废石充填露天采坑及废弃河道等低洼区底部，利用铁矿尾砂作为土壤剖面构造中的保墒层，成功实现了铁矿废石、尾砂等废弃物的“零堆放”和露天采坑、废弃河道等低洼区域的“全复垦”，实现铁矿采选废弃物的大规模资源化利用的同时，增加区域耕地面积，提升耕地质量，复垦形成的农田作物长势和产量达到甚至优于区域正常农田。此外，复垦农田土壤的重金属含量远低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中的土壤污染风险筛选值，不会造成污染，证明了利用铁矿尾砂构造农田土壤剖面构型及改良黏质土壤的相关复垦技术的可行性。

由于复垦后的土地均为耕地，其利用价值主要在于农作物产量。以案例一为例，露天采坑复垦面积为 35 hm²，总复垦成本约 120 万元，平均复垦成本 3.43 万元/hm²。复垦新增耕地面积约 35 hm²，种植玉米获得的经济收益约为 60 万元/a，2 年即可收回复垦成本，经济上是可行的。此外，复垦项目实施累计消耗铁矿废石 685 万 m³ 和铁矿尾砂 2 万 m³，有效减少废弃物占用土地约 100 hm²。在研究区，因铁矿采选废弃物占用土地造成的农民补偿费和相关环境防治费用等约 500 元/(hm²·a)，

复垦可节约相关费用 5 万元/a。研究提出的露天采坑及废弃河道等低洼区充填复垦及利用铁矿尾砂构造土壤剖面构型的技术，在解决铁矿废石、尾砂堆积占地及矿区废弃地复垦土源匮乏的同时，增加耕地面积、提升耕地质量，变废为宝，缓解矿农用地矛盾，改善区域生态环境，一举多得，具有重要的现实意义。

5 结论与展望

1) 铁矿尾砂的砂粒含量为 28.49%~33.23%，粉粒含量为 66.11%~71.64%，而黏粒含量小于 1.0%；pH 值和电导率值均能满足大多数作物的生长要求；重金属含量远低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中的土壤污染风险筛选值，且较易获取，用来构造复垦土壤剖面构型是可行的。

2) 铁矿尾砂作为农田土壤剖面重构材料的作用机理是利用其砂粒结构粒间孔隙大能够蓄水的特征来构造土壤保墒层，将水分蓄积在该层，增加重构土壤剖面的蓄水保墒性能，供半干旱区作物生长所需。同时可将其按 25% 的量掺混在黏质表层土壤中，增加耕层厚度的同时改良土壤质地，提供作物所需的有益微量元素，提高土壤生产力。

3) 充分利用铁矿采选废石、尾砂、底层红黏土和剥离表土等按照从下到上的顺序构造形成“大块岩石-碎石-红黏土-铁矿尾砂-剥离表土（掺混 25% 的铁矿尾砂）”这样具有蓄水保墒作用的“壤-砂-黏”土壤剖面构型。在实现铁矿采选废弃物大规模资源化利用的同时增加耕地面积，有效解决辽西半干旱区作物生长缺水的问题，复垦耕地种植玉米的产量较区域正常农田增加 705 kg/hm²。

铁矿尾砂大规模农业资源化利用是一项系统、宏大的工程，研究论证了利用铁矿尾砂构造类似自然土壤剖面的“壤-砂-黏”土壤剖面构型的可行性及其作用机理，结合多年的实践经验归纳总结出铁矿尾砂构造土壤剖面的技术模式。技术的实施能有效解决铁矿选矿尾砂巨量堆积占地、污染环境及被动进行尾矿场复垦问题，同时增加耕地面积，有效改良辽西半干旱生态脆弱区土壤质量，提高作物产量，是铁矿尾砂农业资源化利用的好途径。技术模式可在中国辽宁的其他铁矿区以及河北、安徽等类似的铁矿品位较低、选矿产生巨量尾砂的铁矿区因地制宜地推广应用。当前的研究是铁矿尾砂农业资源化复垦工程的基础性工作，如何科学、合理的进行土壤剖面重构，精确地确定重构层次分布及各层次厚度，以重构适耕性高的优质农田才是铁矿尾砂重构土壤剖面技术的关键，这些工作将在后续研究中展开。

致谢：本文得到建平盛德日新矿业有限公司在试验场地和试验设施方面的大力帮助，在此表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] GREENFIELD A, GRAEDEL T. The omnivorous diet of modern technology[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2013, 74: 1-7.
- [2] SYKES J, WRIGHT J, TRENCH A. Discovery, supply and demand: from metals of antiquity to critical metals[J]. Applied

- Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), 2016, 125: 3-20.
- [3] MUDD G. A Comprehensive dataset for Australian mine production 1799 to 2021[J]. *Scientific Data*, 2023, 10: 391.
- [4] USMAN U, YUSOFF I, RAOOV M, et al. The economic potential of the African iron-ore tailings: Synthesis of magnetite for the removal of trace metals in groundwater: A review[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 615.
- [5] BARATI S, SHOURIJEH P, SAMANI N, et al. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: A case study on Golgohar mine[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 4151-4166.
- [6] HAN X, WANG F, ZHAO Y, et al. Recycling of iron ore tailings into magnetic nanoparticles and nanoporous materials for the remediation of water, air and soil: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21: 1005-1028.
- [7] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2020[R]. Reston: U. S Geological Survey, 2020: 200.
- [8] 穆可斌, 连志义, 王学银. 甘肃阿尔金南缘白石头沟石墨矿地质特征、成矿条件及找矿标志[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(3): 701-711.
- MU Kebin, LIAN Zhiyi, WANG Xueyin. Geological characteristics, metallogenic conditions and prospecting signs of the Baishitougou graphite deposit in the southern margin of the Altun, Gansu[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(3): 701-711 (in Chinese with English abstract)
- [9] CARRASCO E, MAGALHAES M, SANTOS W, et al. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 31-38.
- [10] CARMIGNANO O, VIEIRA S, TEIXEIRA A, et al. Iron ore tailings: Characterization and applications[J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2021, 32(10): 1895-1911.
- [11] BEDI A, SINGH B, DESHMUKH S, et al. An Aspergillus aculeatus strain was capable of producing agriculturally useful nanoparticles via bioremediation of iron ore tailings[J]. *Journal of Environment Management*, 2018, 215: 100-107.
- [12] CRUZ F, GOMES M, BICALHO E, et al. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest?[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189: 110021.
- [13] JIN W, WU H, WEI Z, et al. Are iron tailings suitable for constructing the soil profile configuration of reclaimed farmland? A soil quality evaluation based on chronosequences[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): 8235.
- [14] JIN W, WEI Z, LIU X, et al. Effects of constructing farmland with large amounts of iron tailings as soil reconstruction materials on soil properties and crop growth[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 20205.
- [15] 李家楣, 欧志华, 赵明明, 等. 尾矿资源综合利用的研究进展[J]. *上海建材*, 2024(3): 15-21.
- LI Jiamei, OU Zhihua, ZHAO Mingming, et al. Research Progress on the comprehensive utilization of tailings resources[J]. *Shanghai Building Materials*, 2024(3): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [16] ARAUJO V, LIMA N, AZEVEDO A, et al. Column reverse rougher flotation of iron bearing fine tailings assisted by HIC and a new cationic collector[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 156: 106531.
- [17] BRITO G, JEREZ O, GUTIERREZ L. Incorporation of rheological characterization in grinding and tailings slurries to optimize the cmp magnetic separation plant[J]. *Minerals*, 2021, 11: 386.
- [18] ONITIRI M, AKINLABI E. Effects of particle size and particle loading on the tensile properties of iron-ore-tailing-filled epoxy and polypropylene composites[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2017, 52: 817-828.
- [19] DENG D, CAO G, ZHANG Y. Experimental study on the fine iron ore tailing containing gypsum as backfill material[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021: 5576768.
- [20] BAI Q, YANG Y, ZHAO Z. Kinetics and in situ observation of nonisothermal crystallization in Bayan Obo tailing-based nanocrystalline glass-ceramic[J]. *Ceramics International*, 2021, 47: 7711-7719.
- [21] YUAN S, ZHANG Q, YIN H, et al. Efficient iron recovery from iron tailings using advanced suspension reduction technology: A study of reaction kinetics, phase transformation, and structure evolution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 40(B), 124067.
- [22] PRASAD J, VENKATESH A, SAHOO P, et al. Geological controls on high-grade iron ores from Kiriburu-Meghahatuburu iron ore deposit, Singhbhum-Orissa Craton, Eastern India[J]. *Minerals*, 2017, 7(10): 197-197.
- [23] XU D, ZHAN C, LIU H, et al. A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 35657-35669.
- [24] LIU B, XUE Y, HAN G, et al. An alternative and clean utilisation of refractory highphosphorus oolitic hematite: P for crop fertiliser and Fe for ferrite ceramic[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 299: 126889.
- [25] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1-9.
- BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, 32(11): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(6): 59-64.
- HU Zhenqi. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- [27] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 8-12.
- HU Zhenqi, WEI Zhongyi, QIN Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 8-12. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张玉锴, 阎凯, 李博, 等. 中国土壤重构及其水土特性研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(3): 511-524.

- ZHANG Yukai, YAN Kai, LI Bo, et al. Research progress on soil reconstruction and soil-water characteristics in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 511-524. (in Chinese with English abstract)
- [29] 南益聪, 杨永刚, 王泽青, 等. 煤矸石对矿区土壤特性与植物生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1253-1262. NAN Yicong, YANG Yonggang, WANG Zeqing, et al. Effects of coal gangue on soil property and plant growth in mining area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(5): 1253-1262. (in Chinese with English abstract)
- [30] 宋扬睿, 王金满, 李新风, 等. 高潜水位采煤塌陷区重构土壤水分运移规律模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 143-154. SONG Yangrui, WANG Jinman, LI Xinfeng, et al. Simulation of moisture transfer law with different soil reconstruction models in coal mining subsided area with high ground-water level[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 143-154. (in Chinese with English abstract)
- [31] 胡振琪, 李勇, 陈洋. 黄河泥沙在生态修复中的作用机理与关键技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 1-15. HU Zhenqi, LI Yong, CHEN Yang. The mechanism and key technology of the Yellow River sediment in ecological restoration[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [32] 胡振琪, 赵艳玲. 黄河流域矿区生态环境与黄河泥沙协同治理原理与技术方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 438-448. HU Zhenqi, ZHAO Yanling. Principle and technology of coordinated control of eco-environment of mining areas and river sediments in Yellow River watershed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 438-448. (in Chinese with English abstract)
- [33] 邵芳, 胡振琪, 王培俊, 等. 基于黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地覆土材料的优选[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊 2): 352-358. SHAO Fang, HU Zhenqi, WANG Peijun, et al. Selection of alternative soil for filling reclamation with Yellow River sediment in coal-mining subsidence areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(Supp.2): 352-358. (in Chinese with English abstract)
- [34] 纪兰, 杨兰芳, 李海波, 等. 铁矿尾砂掺土对土壤几种物理性质的影响[J]. *湖北大学学报 (自然科学版)*, 2013, 35(2): 242-246. JI Lan, YANG Lanfang, LI Haibo, et al. Effects of mixing iron ore tailings sands with soil on some soil physical properties[J]. *Journal of Hubei University*, 2013, 35(2): 242-246. (in Chinese with English abstract)
- [35] 吕春娟, 陈丹, 郭星星, 等. 铁尾矿不同复垦模式土壤贮水能力及入渗特征[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 59-66. LYU Chunjuan, CHEN Dan, GUO Xingxing, et al. Water storage capacity and the infiltration characteristics of soil in different reclamation modes in iron tailings[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 59-66. (in Chinese with English abstract)
- [36] 吕春娟, 郭岩松, 毕如田, 等. 不同复垦模式下铁尾矿坡面产流产沙与水力特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 156-165. LYU Chunjuan, GUO Yansong, BI Rutian, et al. Effects of different reclamation patterns on surface runoff, sediment yield and hydraulic characteristics of slopes in iron ore tailings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(2): 156-165. (in Chinese with English abstract)
- [37] 武晗. 辽西地区铁矿复垦中利用尾砂构造土壤剖面理化特征比较研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. WU Han. Comparative Study of Soil Physicochemical Characteristics of Farmland Using Different Tailings for Reclamation in Western Liaoning Province[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [38] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [40] POGGIO L, GIMONA A. 3D mapping of soil texture in Scotland[J]. *Geoderma Regiona*, 2017, 9: 5-16.
- [41] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241. WU Kening, ZHAO Rui. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227-241. (in Chinese with English abstract)
- [42] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 77-78.
- [43] 康守旋, 费良军, 钟韵, 等. 多因素作用下浑水入渗对土壤导水特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 83-90. KANG Shouxuan, FEI Liangjun, ZHONG Yun, et al. Effects of muddy water infiltration on the hydraulic conductivity of soils by multiple factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(9): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [44] 刘琼, 罗冲, 孟祥添, 等. 典型黑土区耕作土壤质地遥感时间窗口及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 122-129. LIU Qiong, LUO Chong, MENG Xiangtian, et al. Time window and influencing factors analysis of tillage soil texture remote sensing in the typical black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 122-129. (in Chinese with English abstract)
- [45] WANG P, HU Z, YOST R, et al. Assessment of chemical properties of reclaimed subsidence land by the integrated technology using yellow river sediment in Jining China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1-15.
- [46] 杨萌. 朝阳铁尾砂大量施用对土壤理化性质及作物生长状况的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016. YANG Meng. Effects of Extensive Application of Iron Tailings on Soil Properties and Crop Growth in Chaoyang City[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)

- [47] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499-2515.
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2499-2515. (in Chinese with English abstract)
- [48] 边振兴, 毕建平, 魏忠义, 等. 矿山复垦中露天采坑或凹陷区底部蓄提水方法: CN201610681294.8 [P]. 2018-12-04.
- [49] 边振兴, 毕建平, 魏忠义, 等. 矿山复垦中露天采坑或凹陷区底部蓄水的提水装置: CN201620895712.9 [P]. 2017-01-18.
- [50] 王晓彤, 胡振琪, 梁宇生. 基于 Hydrus-1D 的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 76-86.
WANG Xiaotong, HU Zhenqi, LIANG Yusheng. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a Hydrus-1D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 76-86. (in Chinese with English abstract)

Mechanism and technical mode of "loamy-sandy-clayey" soil profile using iron tailings

JIN Wenjuan¹, BIAN Zhenxing^{1*}, WEI Zhongyi¹, DONG Zhichao¹, QIAN Fengkui¹,
OUYANG Zhaozhuo², DAI Huimin³

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 2. Shenyang Geological Survey Center of China Geological Survey (Northeast Geological S & T Innovation Center), Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Liaoning Province, Shenyang 110034, China)

Abstract: Iron tailings and wastes have been generated by a large number of iron ore mines in the semi-arid ecologically fragile areas of western Liaoning Province in China. The resulting environmental pollution and the scarcity of soil sources can also pose a serious threat to the reclamation of abandoned mine sites, such as open pits. In this study, the large-scale agricultural resource utilization of iron tailings was proposed to construct a reclaimed farmland soil profile in the western Liaoning Province, China. Specifically, the iron tailings and wastes were also used to fill the mining pits. The iron tailings and normal farmland soils were collected from the same region. A series of experiments were then carried out on the basic physico-chemical properties, elemental content, and utilization feasibility of iron tailings. According to the theories of "the niche of soil layer" and "the critical layer of the soil", the function of iron tailings was explored as the soil profile material. The technical mode was constructed for a highly arable farmland soil profile with the structure of "loamy-sandy-clayey" suitable for the semi-arid climate characteristics in the study area. The results showed that: 1) The sand grain content of iron tailings ranged from 28.49 % to 33.23%, while the silt content was 66.11% to 71.64%, and the clay content was less than 1.0%. The pH of iron tailings was represented by the weakly alkaline. At the same time, the conductivity was fully meet the requirements of crop growth. The heavy metal content was much lower than the national standard of Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land (GB 15618 -2018). It was also rich in the beneficial trace elements required by crops. Consequently, the iron tailings served as the reconstruction materials of the soil profile. 2) Iron tailings were utilized as the sandy structure with large intergranular pores for water storage. A soil moisture retention layer was constructed to form a soil profile configuration system from the top to the bottom of "loamy (topsoil layer)-sandy (moisture retention layer)-clay (water barrier layer)". As such, the iron tailings were used to store and preserve the water and moisture for crop growth in the semi-arid areas. Meanwhile, the iron tailings were mixed in 25% amounts into the clayey topsoil, in order to increase the thickness of the tillage layer with the better soil texture. 3) The specific construction was to make full use of the waste rock, iron tailings, subsoil red clay, and stripped topsoil produced by iron ore mining. A 'loamy-sandy-clayey' soil profile configuration was obtained with the "large rocks with a grain size of 20-50cm (filled up to 1m from the surface) - crushed rocks with a grain size of 4-6cm (20-30cm) - red clay (20-30cm) - iron tailings (20-30cm) - stripped topsoil (20-30cm, mixed with iron tailings of about 25%)", in the order from the bottom to the top. Four reclamation cases were selected in Jianping County, Liaoning Province, China. Therefore, the area of cultivated land increased to solve the ecological problems caused by solid waste accumulation in mining areas. The quality of farmland was also improved to increase the yield of maize by 705 kg/hm². National food security was maintained to alleviate the contradiction between mining and agricultural land. The ecological restoration mode can be applied to similar iron ore mining areas, according to the regional conditions.

Keywords: iron tailings; soil reconstruction; soil improve; soil profile; principle; ecological restoration