



引文格式: 李金雨, 王新刚, 亓秋燕, 等. 钻井法泥浆用于陕北榆林地区矿山生态修复资源化利用试验研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 197–208. DOI: 10.12401/j.nwg.2024103

Citation: LI Jinyu, WANG Xingang, QI Qiuyan, et al. Experimental Study on the Use of Drilling Mud for Ecological Restoration of Mines in Yulin, Northern Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 197–208. DOI: 10.12401/j.nwg.2024103

钻井法泥浆用于陕北榆林地区矿山生态修复资源化利用试验研究

李金雨¹, 王新刚^{1,*}, 亓秋燕², 王宗金², 奚家米¹, 艾子涵¹,
李彦君¹, 王昊宇¹, 辜超颖¹

(1. 大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中煤特殊凿井有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

摘要:近年来钻井法在西部地区得到了广泛的应用,但随之伴随的大量泥浆处置成为了困扰企业和政府的环境难题。钻井泥浆中含有丰富的有机质和矿物质,这些成分能够有效改善土壤的结构和肥力,不合理处置往往会造成巨大的资源浪费和环境污染。为探究废弃钻井泥浆资源化利用的新途径,笔者创新性的将其作为矿山土壤改良剂用于改良陕北干旱地区风积沙,以达到变废为宝的目的。通过开展筛分、渗透性、测定有效磷以及速效 K 含量等方面的试验,探究了废弃钻井泥浆对陕北矿区风积沙土壤生态修复改良效果及其机理;结合一系列盆栽试验,研究了泥浆掺入对植株株高、叶片发育、根系发育等关键生长特征参数的影响,对比分析了不同处理组之间的植株生长情况。试验结果表明,泥浆的加入有效降低了矿区风积沙渗透性,提高风积沙中黏粒含量、有效磷以及速效 K 含量,即泥浆的加入使得风积沙土具有了“海绵吸水效应”,并同时起到了“锁住”风积沙水分的良好效果,其肥力也显著提升;盆栽试验结果表明废弃钻井泥浆有效提升了植株的植株株高、叶片发育、根系发育等关键生长特征,证明钻井泥浆可有效改良陕北风积沙区的土壤,提高植株品质;此外综合各项试验结果发现研究区钻井泥浆改良矿山风积沙土壤的最优掺入比为 10%。研究成果为钻井泥浆用于陕北矿山生态修复的资源化利用提供了理论依据和试验参考。

关键词: 钻井法; 废弃泥浆; 风积沙; 土壤改良; 生态修复

中图分类号: P642.5; TD88

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0197-12

Experimental Study on the Use of Drilling Mud for Ecological Restoration of Mines in Yulin, Northern Shaanxi

LI Jinyu¹, WANG Xingang^{1,*}, QI Qiuyan², WANG Zongjin², XI Jiami¹, AI Zihan¹,
LI Yanjun¹, WANG Haoyu¹, GU Chaoying¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics / Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Middling Coal Special Sinking Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China)

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-11-21; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008401), 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2024JC-ZDXM-19) 联合资助。

作者简介: 李金雨(1999-), 男, 硕士, 主要从事风积沙改良与室内试验。E-mail: 992320924@qq.com。

* 通讯作者: 王新刚(1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害机理研究。E-mail: xgwang@nwwu.edu.cn。

Abstract: In recent years, drilling methods have been widely used in western regions, but the accompanying disposal of a large amount of mud has become an environmental problem that troubles enterprises and governments. Drilling mud contains abundant organic matter and minerals, which can effectively improve soil structure and fertility. Improper disposal often leads to huge resource waste and environmental pollution. In order to explore new ways of resource utilization of abandoned drilling mud, this article innovatively uses it as a mine soil amendment to improve aeolian sand in arid areas of northern Shaanxi, in order to achieve the goal of turning waste into treasure. By conducting experiments on particle size distribution, permeability, determination of available phosphorus and potassium content, the ecological restoration and improvement effect and mechanism of abandoned drilling mud on aeolian sand soil in northern Shaanxi mining area were explored; Based on a series of pot experiments, the effects of mud addition on key growth characteristic parameters such as plant height, leaf development, and root development were studied, and the plant growth between different treatment groups was compared and analyzed. The experimental results showed that the addition of mud effectively reduced the permeability of aeolian sand in the mining area, increased the content of clay particles, available phosphorus, and available potassium in aeolian sand. That is, the addition of mud made aeolian sand have a "sponge water absorption effect" and also played a good role in "locking" the moisture of aeolian sand, significantly improving its fertility; The results of the pot experiment showed that the waste drilling mud effectively improved the key growth characteristics of plants, such as plant height, leaf development, and root development, proving that drilling mud can effectively improve the soil in the wind blown sand area of northern Shaanxi and enhance plant quality; In addition, based on the comprehensive results of various experiments, it was found that the optimal mixing ratio of drilling mud for improving aeolian sand soil in the study area is 10%. The research results provide theoretical basis and experimental reference for the resource utilization of drilling mud for ecological restoration of mines in northern Shaanxi.

Keywords: drilling method; waste mud; wind blown sand; soil improvement; ecological restoration

随着中国西北地区首次成功应用钻井法施工大埋深煤矿立井(刘永宏等, 2022), 钻井法施工在西北地区如榆林市、延安市、鄂尔多斯市、庆阳市等多地得到蓬勃发展, 但钻井法作业过程中产生的废弃钻井泥浆的产量也将逐步增加(申艳军, 2022)。泥浆是钻井作业中起到稳定地层压力、保护清洁钻井同时传递动力的重要物质(贺亚维等, 2007; Chang et al., 2014), 如何合理处置废弃钻井泥浆, 避免对周围环境造成负担成了众多学者研究的方向, 尤其在陕北黄土高原生态环境脆弱区这一问题显得尤为重要。

陕北地区风积沙分布广泛(咎国盛等, 2023), 由于风积沙颗粒粒径较大, 导致其渗透系数较大, 渗透性强且吸附力差, 难以涵养水分, 保留肥力, 农业生产力差(朱启明等, 2022), 但是由于陕北地区土地资源紧张, 风积沙仍是主要的耕作土壤(王雪艳, 2022)。

目前对钻井泥浆的处理方法主要有固液分离法(张浩等, 2020; 雷琦, 2022)、固化处理法(杨子健等, 2021; 王丹丹, 2023)以及土地耕种法(王富加等, 2023)。

其中, 固液分离法和固化处理法处理成本高昂。土地耕种法是将钻井泥浆的上层清液去除, 将沉降的泥浆与土壤按照一定比例进行混合, 随后进行耕种, 学者们发现钻井泥浆中的各种乳化剂等添加剂中含有较高浓度的氮磷钾等元素(舒畅等, 2023), 且钻井泥浆中颗粒小且均匀, 主要为黏粒(Murtaza, 2023; Flemming et al., 2024), 可以提高土壤肥力, 改善土壤性质, 因此将钻井泥浆应用于土壤改良, 提高土体耕种质量。因此, 相对于其他两种方法, 土地耕种法的优势在于操作便捷, 成本低廉, 且西北地区多为风积沙, 土地贫瘠, 利用钻井泥浆进行土壤改良大有可为。

关于钻井泥浆在改良土壤方面的研究前人开展了大量研究工作, 钻井泥浆可以有效改善沙土的保水性能, 当钻井泥浆与沙土比例达到 1:3 时, 改良效果相对较好(Tawornpruek et al., 2021); 有试验表明钻井泥浆可以提高土体颗粒间的粘聚力, 降低土体渗水性(Bauder et al., 2005); 有学者通过试验发现在使用泥浆小于 $0.012 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 情况下, 加入钻井泥浆对土体的水力

特性影响几乎没有影响(Zvomuya et al., 2011); 一项研究表明在施用钻井泥浆 45 天后植株中营养元素显著增加, 并且当钻井泥浆施加量小于 $0.002\text{m}^3/\text{m}^2$ 每公顷时不会对植株有任何负面影响(Zvomuya et al., 2009); 一些学者的研究结果显示当废弃钻井泥浆施用量为 6% 时, 可以增加高粱植株中的 Fe 含量以及玉米中的 Zn 含量(Bauder, 1999)。在中国, 有试验结果表明通过提高风沙土的养分含量和持水能力, 进一步改善植被的生长环境, 从而减少水土流失(马猛, 2023)。有学者发现煤矿钻井泥浆的成分复杂, 主要含有大量含氧化合物、硅酸盐和有机物质等成分(李凤娟等, 2023); 部分学者通过研究认为煤矿钻井泥浆中的有机物质和其他成分可以促进土壤的肥力和微生物活动, 促进植被覆盖和生态环境的改善(王峻等, 2023)。因此, 钻井泥浆可广泛应用于土壤改良, 钻井泥浆作为一种新型土壤改良剂, 在改良土壤质地, 提高土壤质量, 改善种植植株的品质方面具有较高的应用价值。

在陕北矿山地区土壤类型多为风积沙, 由于风积沙贫瘠且欠缺保水保肥能力, 难以栽种植株, 钻井泥浆富含各种无机盐及有机质, 且黏粒含量较高, 可涵养水分。然而, 使用钻井泥浆进行矿山地区风积沙土壤改良以达到修复矿山生态的研究较为鲜少, 因此, 笔者创新性的将钻井泥浆作为土壤改良剂用于改良风积沙土壤, 开展了包括渗透性、蒸散率、颗分以及有效磷、速效 K 含量在内的一系列理化性质试验并将其作为评判标准, 探究废弃钻井泥浆对矿山风积沙地

区生态修复的改良效果实际可行性; 并进行了相应的盆栽试验, 以植株株高、叶片发育、根系发育等关键生长特征参数为指标, 对比分析不同处理组之间的植株生长情况, 也探究了钻井泥浆应用于陕北矿山生态修复的效果与机理, 以期为泥浆资源化利用和陕北矿山生态修复提供理论和试验参考。

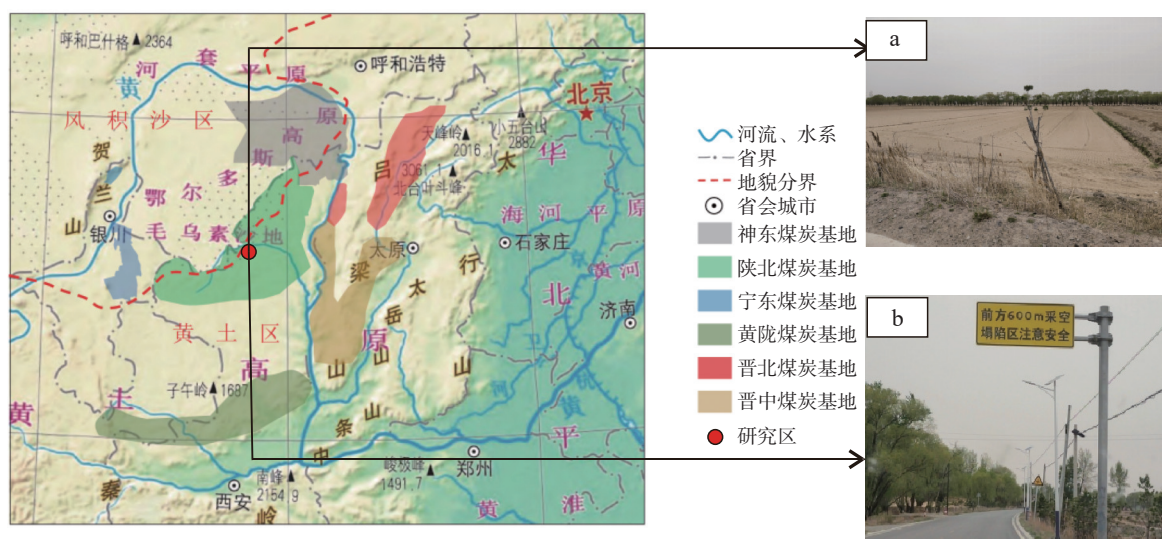
1 区域背景

研究区位于榆林市榆阳区可可盖矿区, 属于黄河几字弯区内 6 大煤炭基地的最大基地——陕北煤炭基地(图 1), 矿区地处榆林市以西直线距离约 30 km, 行政区划隶属陕西省榆林市榆阳区小纪汗镇。研究区地形地貌多为沙漠滩地, 地表稍有起伏, 地质构造简单, 岩石主要以软弱-较坚硬岩为主, 岩体较完整, 以块状及层状结构为主, 岩体质量一般, 局部地段易发生矿山地质灾害问题(图 1)。该地区地表土体主要为风积沙, 属于松散~中密状态, 不良级配的均匀砂, 土壤贫瘠, 无机盐含量低, 渗透性好, 保水保肥能力差。

2 研究方法

2.1 试验材料

室内试验选用材料包括研究区钻井泥浆、风积沙和购买的紫花苜蓿种子(图 2)。对现场取回的钻



a. 矿区风积沙土壤; b. 矿区塌陷灾害

图1 研究区位置图(据申艳军, 2022 修改)

Fig. 1 Location map of the research area

井泥浆和风积沙进行室内渗透性、筛分以及有效磷、速效钾含量测试试验。试验结果(表 1)表明:钻井泥 PH 值 6.49, 钻井泥浆粒径集中在 1~10 μm, 有效磷含量为 659.31 mg/kg, 速效钾含量为 171.75 mg/kg。风积沙 PH 值 7.55, 土壤颗粒粒径集中在 0.5~0.25 mm,

约占 86.9%, 有效磷以及速效钾含量分别为 19.15 mg/kg、110.24 mg/kg 渗透系数为 0.2772 cm/s。紫花苜蓿具有耐干旱, 耐盐碱, 耐寒, 耐刈割, 同时产量高, 品质优, 经济效益好等优点, 是种植面积最广的豆科牧草, 因此选择紫花苜蓿作为盆栽试验植株。



a. 风积沙; b. 钻井泥浆; c. 紫花苜蓿种子

图2 试验材料

Fig. 2 Sampling in the study area

表 1 风积沙基本参数

Tab. 1 Physical and chemical properties of undisturbed soil

渗透系数 (cm/s)	颗粒度 (mm)			元素含量 (mg/kg)	
	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075	有效磷	速效钾
0.2772	86.9	8.0	1.8	19.15	110.24

2.2 试验方案

在试验前配置不同钻井泥浆含量的风积沙改良土试样, 为便于描述, 定义钻井泥浆质量分数:

$$\theta = \frac{W_2}{W_1 + W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ 为钻井泥浆质量分数; W_1 为风积沙质量 (g); W_2 为钻井泥浆质量 (g)。

设置 Z1、Z2、Z3 组其钻井泥浆的质量分数 θ 分别为 5%、10% 和 15%, 同时设置空白对照组 (CK), 配置好的试样如图 3 所示。试验分为两部分, 第一部分为改良土理化性质试验, 探究钻井泥浆的加入对土体

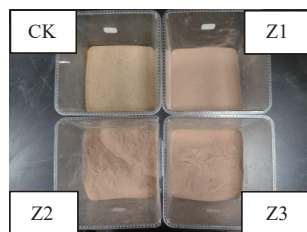


图3 试验样品

Fig. 3 Test sample

理化性质的影响, 主要包括渗透性试验、蒸散率试验、筛分试验以及有效磷、速效钾含量测试试验; 第二部分为盆栽试验, 探究钻井泥浆的加入对植株株高、叶片发育、根系发育等关键生长特征参数的影响。

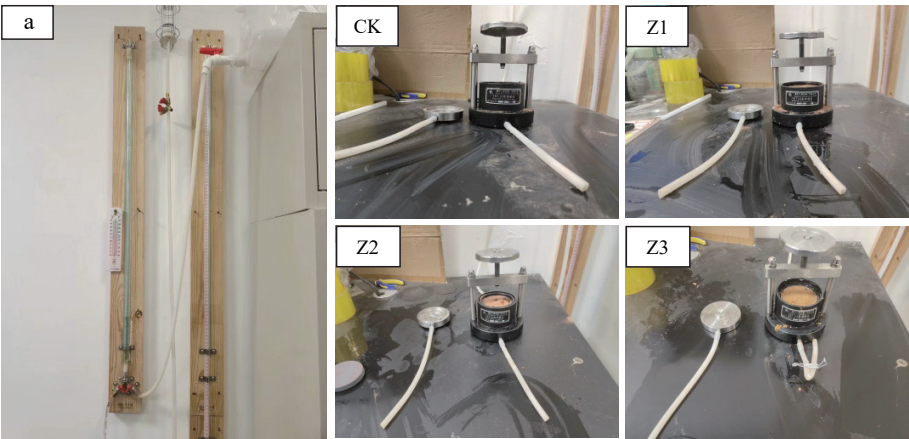
2.2.1 改良土理化性质试验

改良土理化性质试验主要包括渗透性、蒸散率、筛分以及有效磷、速效钾含量测试等试验。渗透性试验使用变水头法测定, 采用环刀试样(图 4), 环刀横截面积为 30 cm²。筛分试验使用筛析法, 称重不同粒径颗粒筛上的质量并绘制图表, 通过蒸散试验测定不同钻井泥浆掺量的蒸散速率(图 5), 试验保持的恒温温度为 45 ℃。有效磷使用碳酸氢钠提取——钼锑抗比色法, 速效钾使用乙酸铵浸提——原子吸收分光光度计法(图 6)。

2.2.2 改良土盆栽试验

通过盆栽试验可分析不同改良配方土壤对于紫花苜蓿生长的影响。试验选择同一品种、同一批次、大小均一、颗粒饱满的种子进行种植。首先使用湿纸巾进行催芽两天备用, 然后取配置好的试样, 装入高 20 cm, 直径 7 cm 花盆中, 每盆播种 20 粒种子, 每种配比方案设置 3 盆平行试验组(图 7)。待出芽两周后进行留苗, 每盆保留 5 株长势一致的幼苗, 并进行后续观测(图 8)。

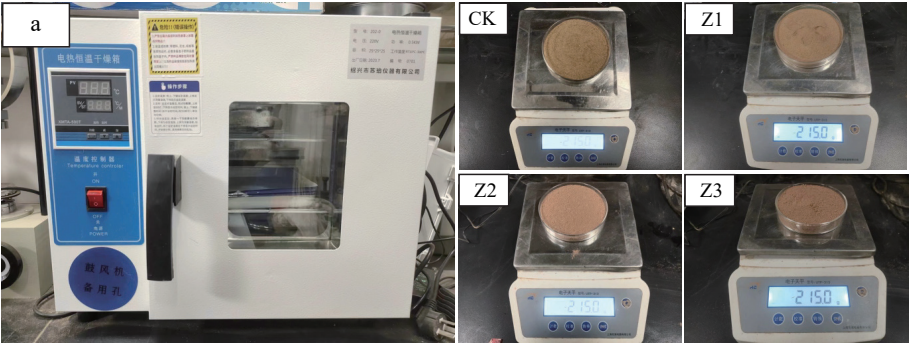
盆栽试验结束后, 采集植株, 每盆选择长势最佳的 3 株进行叶绿素和关键生长特征参数测量试验。



a. 渗透管; CK. 试样; Z1. 试样; Z2. 试样; Z3. 试样

图4 渗透性试验仪器

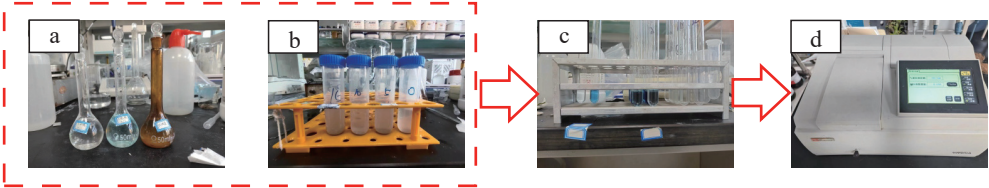
Fig. 4 Penetration test instrument



a. 烘箱; CK. 试样; Z1. 试样; Z2. 试样; Z3. 试样

图5 蒸散试验仪器

Fig. 5 Evapotranspiration test instrument



a. 试剂; b. 试样; c. 浸取样品; d. 分光计

图6 有效磷、速效钾试验过程

Fig. 6 Experimental process of available phosphorus and potassium



图7 盆栽试样播种后

Fig. 7 Potted plant samples

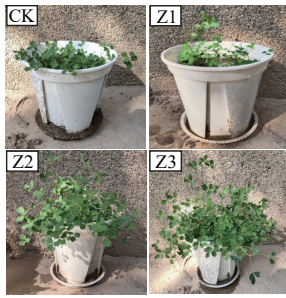
地上部分采集植株叶片,测定鲜重、叶片长宽等指标,随后使用乙醇丙酮法测定叶绿素含量,测定过程(图9),地下部分测定根长以及根径等指标。

3 试验结果

3.1 不同钻井泥浆掺量对改良土理化性质影响的分析

3.1.1 渗透性试验规律

渗透系数代表土体透水能力的强弱,通过试验发



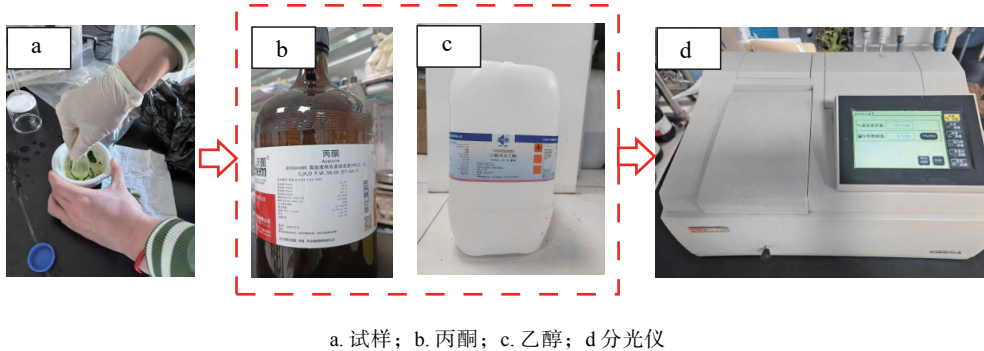
CK. 试样; Z1. 试样; Z2. 试样; Z3. 试样

图8 试验 90 d 盆栽试样

Fig. 8 Harvest potted samples after 90 days of experiment

现各组样品渗透系数为 $0.0503 \sim 0.2772 \text{ cm/s}$ (图 10)。CK 组平均渗透系数为 0.2772 cm/s ; Z3 组平均渗透系

数为 0.0503 cm/s , 较 CK 组下降了 81.85% , 下降幅度明显; Z1 组以及 Z2 组平均渗透系数较 CK 组分别下降了 33.95% 以及 56.31% , 下降较少。由此可见各组样品的渗透系数与钻井泥浆掺量呈现负相关关系, 随着钻井泥浆掺量的增大而逐渐减小。可见, 由于钻井泥浆颗粒较小, 将钻井泥浆掺入风积沙中, 显著提高了改良土细颗粒比例, 细小颗粒一方面填充较大颗粒间的空隙, 降低了土体的孔隙度, 使得水分通道大大减少; 另一方面由于其吸附力更强, 起到更强的吸附水分的作用类似“海绵吸水效应”, 两方面共同作用大大降低了改良土渗透性, 减少了水分向下层土体的渗透。



a. 试样; b. 丙酮; c. 乙醇; d. 分光仪

图9 叶绿素试验仪

Fig. 9 Chlorophyll tester

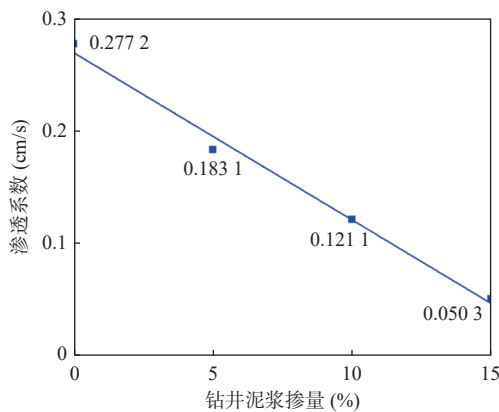


图10 样品渗透系数对比图

Fig. 10 Comparison of permeability coefficients

3.1.2 颗分试验规律

改良土颗分试验结果(图 11), CK 组 0.25 mm 粒径以下的土壤颗粒占总体的 9.8% ; Z3 组 0.25 mm 粒径以下的土壤颗粒占总体的 33.7% , 较 CK 组提升了 343.88% , 提升效果显著; Z1 组以及 Z2 组 0.25 mm 粒径以下的土壤颗粒占比较 CK 组分别提升了 139.79% 以及 312.24% , 提升效果相对较差。

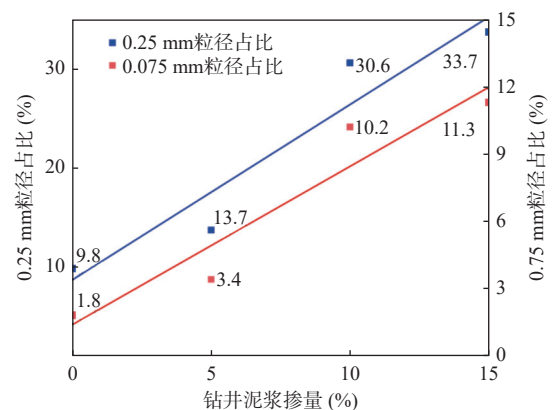


图11 样品颗分对比图

Fig. 11 Comparison of particle size

CK 组 0.075 mm 粒径以下的土壤颗粒占总体的 1.8% ; Z3 组 0.075 mm 粒径以下的土壤颗粒占总体的 11.3% , 较 CK 组提升了 627.78% , 占比上升明显; Z1 组以及 Z2 组 0.075 mm 粒径以下的土壤颗粒占比较 CK 组分别提升了 188.89% 以及 566.67% , 提升幅度较小。

各组土体小于 0.5 mm 颗粒所占比重与钻井泥浆掺量呈现正相关关系, 随着钻井泥浆掺量的增加而增

加。混合土与风积沙粒径均集中于 0.5 mm 至 0.25 mm 之间。但是 3 种混合土土壤粒径在 0.25 mm 以下以及 0.075 mm 以下的土壤颗粒在总体中所占比例比较 CK 组更高。

由于钻井泥浆所含颗粒较小, 粒径多在 1~10 μm , 原本粒径单一, 但是级配不良的风积沙, 在加入钻井泥浆后, 细小颗粒所占比例得到显著提高, 混合土颗粒粒径相差较大, 土粒不均匀, 级配达到改善, 从物理方面来看土壤的性质得到了改良。

3.1.3 蒸散率试验规律

蒸散率试验数据(图 12), 通过试验发现改良土相较于风积沙, 保水能力得到有效提高。CK 组在 6 h 时水分已完全蒸发, Z1 组在 7 h 时水分完全蒸发, 较 CK 组提升了 16.67%; Z2 组在 9 h 时水分完全蒸发, 较 CK 组提升了 150.00%; Z3 组在 9 h 时水分完全蒸发, 较 CK 组提升了 150.00%。

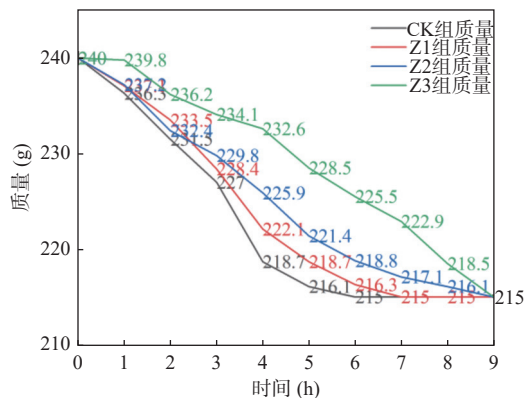


图12 蒸散率折线图

Fig. 12 Line chart of evapotranspiration rate

可见钻井泥浆大量含有的细小颗粒相对于风积沙的粗颗粒, 具有更强的吸附力, 可以起到更强的吸附水分的效果; 同时在蒸散过程中, 钻井泥浆含有的黏粒与周围颗粒彼此固结形成较致密的固体, 减少水分的流失, 两方面共同作用, 使得土体可以有效减缓水分蒸发, 达到了“锁住”风积沙水分的良好效果。

3.1.4 有效磷、速效钾含量试验规律

不同泥浆配比试样的有效磷、速效钾含量数据(图 13), 其中 CK 组有效磷含量为 19.15 mg/kg; Z3 组有效磷含量为 323.21 mg/kg, 较 CK 组提升了 1587.49%; 与 CK 组相比, Z1 组以及 Z2 组有效磷含量提升效果稍差, 分别为 1099.13% 以及 1526.01%。由此可以看出泥浆的加入明显提高了风积沙的有效磷含量。

CK 组速效钾含量为 110.24 mg/kg; Z3 组速效钾含

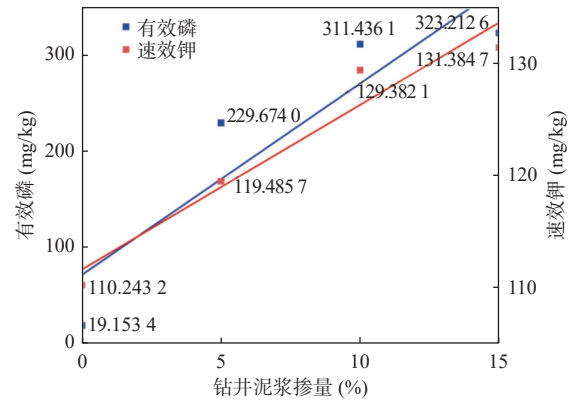


图13 样品速效钾、有效磷含量对比图

Fig. 13 Comparison of quick acting potassium and available phosphorus content

量为 131.38 mg/kg, 较 CK 组提升了 19.18%, 提升效果最佳; 相对于 CK 组, Z1 组以及 Z2 组速效钾含量均有提高, 但提高幅度较小, 分别为 8.38% 以及 17.36%。速效钾含量提高幅度对比有效磷含量提高幅度相对较小。

由图 13 可见各组土体有效磷以及速效钾含量与钻井泥浆掺量呈现正相关关系, 分析认为钻井泥浆是多种物质的混合物, 在生产钻井泥浆时加入的乳化剂中含有丰富的无机盐, 通过钻井泥浆中的细小颗粒将无机盐紧密吸附, 在与风积沙混合后, 显著提高了无机盐含量。

3.2 不同钻井泥浆掺量对植株生长特性影响规律

3.2.1 株高生长规律

植株高度可以反映出植株生长的状态, 从而间接表示出基质的好坏(秦琪焜等, 2022)。经过 90 d 的种植试验, 采集各组改良土种植得到的植株, 并对植株高度测量(图 14)。汇总不同条件下植株的株高试验数据(图 15), CK 组植株平均株高为 8.1 cm; Z2 组植株平均株高为 26.0 cm, 较 CK 组植株平均株高提升了 220.99%, 对植株生长有明显促进效果; Z1 组与 Z3 组植株平均株高较 CK 组植株平均株高分别提升了 202.50% 与 58.02%, 提高幅度较小。可见, 随着钻井

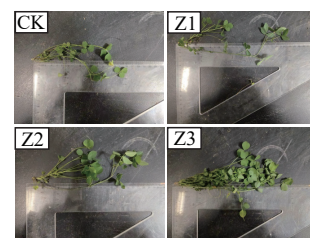


图14 株高测量

Fig. 14 Measurement of plant height

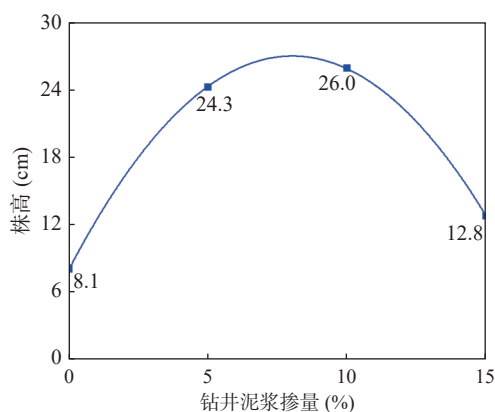


图15 株高对比图

Fig. 15 Comparison of plant height

泥浆的加入, 植株的株高得到不同程度增长。

相对于风积沙, 改良土所具有低渗透性、低蒸散率以及较高的无机盐含量的特点, 这些特点为植株生长提供更良好的环境。低渗透性与蒸散率起到涵养水分的作用, 为植株生长提供更好的水分环境, 而较高的无机盐含量为植株生长补充必须的营养元素, 两方面共同作用, 在植株生长过程中发挥积极正面作用。此外, 试验发现钻井泥浆掺量达到 15%, 相对于 10% 钻井泥浆掺量, 植株生长会受到一定程度抑制, 这说明植株生长与钻井泥浆掺量并非完全呈现正相关关系, 其具有峰值掺量。

3.2.2 根长、根径生长规律

经过 90 d 的种植, 使用游标卡尺对各组土体种植得到的植株根系的根径测量(图 16)。经过 90 d 的种植, 采集各组土体种植得到的根系进行根长测量(图 17)。汇总根径试验数据(图 18), CK 组植株平均根径为 1.06 mm; Z2 组植株平均根径为 2.50 mm, 较 CK 组植株平均根径提升了 135.85%, 提升效果明显; Z1 组与 Z3 组植株平均根径较 CK 组植株平均根径分别提升 86.79% 与 21.70%, 提升效果较弱。

由根长试验数据(图 18)可知, CK 组植株平均根长为 15.7 cm; Z2 组植株平均根长为 27.7 cm, 较 CK 组

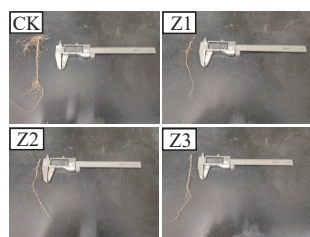


图16 根径测量

Fig. 16 Root diameter measurement

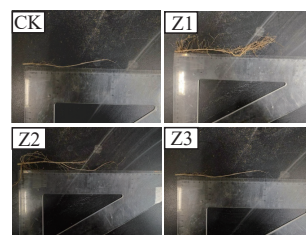


图17 根长测量

Fig. 17 Measurement of root length

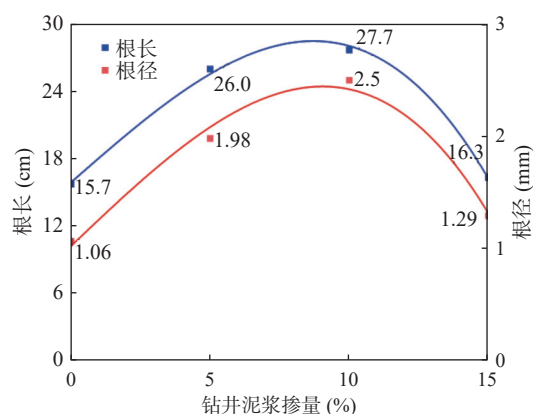


图18 根径、根长对比图

Fig. 18 Comparison of root diameter and root length

植株平均根长提升了 76.43%, 提升效果最佳; Z1 组与 Z3 组植株平均根长较 CK 组植株平均根长分别提升了 65.61% 与 4.01%, 提升效果相对较弱。

各组土体种植得到的植株根系数据与钻井泥浆掺量(0~10%)呈现正相关关系, 随着钻井泥浆含量的增加而增加, 当钻井泥浆掺量达到 15% 时, 对植株促进生长的效果有所减弱。

3.2.3 叶片长、宽生长规律

经过 90 d 的种植, 汇总各组土体种植得到的植株叶片测量数据(图 19)。由图 19 可知, CK 组叶片平均长度为 1.12 cm; Z1 组叶片平均长度为 2.13 cm, 相对 CK 组叶片平均长度提升 90.17%, 叶片长度明显提升; Z2 组与 Z3 组叶片平均长度相对 CK 组叶片平均长度分别提升 51.79% 与 0%, 提升效果较差; CK 组叶片平均宽度为 1.04 cm; Z2 组叶片平均宽度为 1.67 cm, 相对 CK 组叶片平均宽度提升 60.58%, 叶片宽度提升最大; Z1 组与 Z3 组叶片平均宽度相对 CK 组叶片平均宽度分别提升 37.50% 与 11.54%, 提升幅度较小。

各组土体种植得到的植株叶片数据与钻井泥浆掺量呈现一定程度的正相关关系, 在较低掺量时(10% 以下)随着钻井泥浆掺量的增加而增加, 但是当钻井泥浆掺量达到 15% 时, 对植株生长的促进效果会

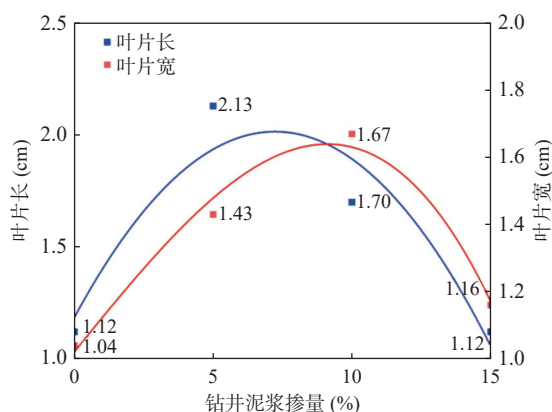


图19 叶片长、宽对比图

Fig. 19 Comparison of blade length and width

减弱。

3.2.4 植株叶绿素含量规律

经过 90 d 的种植, 对各组土体种植得到的植株叶绿素数据汇总整理(图 20)。由图 20 可知, CK 组植株平均叶绿素 a 含量为 1.11; Z2 组植株平均叶绿素 a 含量为 1.26, 较 CK 组植株平均叶绿素 a 含量提升了 13.51%, 提升效果最优; Z1 组与 Z3 组植株平均叶绿素 a 含量较 CK 组植株平均叶绿素 a 含量分别提升了 2.63% 与 9.00%, 提升效果较弱; CK 组植株平均叶绿素 b 含量为 2.00; Z2 组平均叶绿素 b 含量为 2.28, 较 CK 组平均叶绿素 b 含量提升了 14.0%, 提升幅度最大; Z1 组与 Z3 组植株平均叶绿素 b 含量较 CK 组平均叶绿素 b 含量分别提升了 2.50% 与 9.50%, 提升幅度较小。从试验数据中可以看出, 钻井泥浆的加入可以有效提高植株中叶绿素的含量。

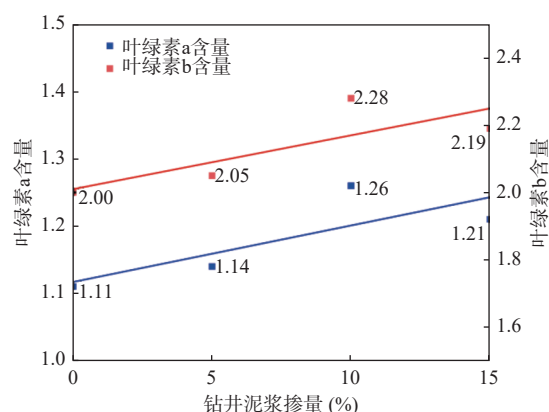


图20 叶绿素 a、b 含量对比图

Fig. 20 Comparison of chlorophyll content

3.2.5 植株鲜重规律

经过 90 d 试验, 将种植得到的各组植株采集后称量鲜重(图 21)。通过试验数据可知, 混合土相较于风

积沙, 植株鲜重得到有效提高。植株鲜重试验数据见图 22, 可见 CK 组植株平均鲜重为 0.67 g; Z2 组植株平均鲜重为 3.53 g, 较 CK 组植株平均鲜重提升了 426.87%, 提升效果显著; Z1 组与 Z3 组植株平均鲜重较 CK 组植株平均鲜重分别提升了 137.37% 与 34.33%, 提升效果相对较差。

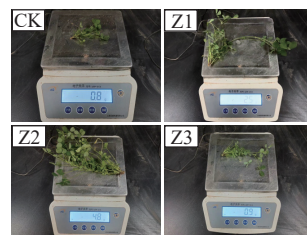


图21 鲜重称量

Fig. 21 Fresh weight weighing

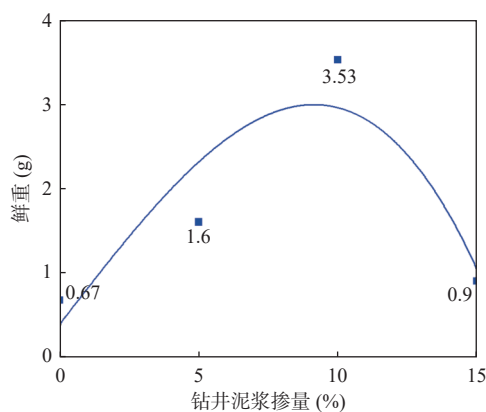


图22 鲜重对比图

Fig. 22 Comparison of fresh weight

4 讨论

各个试验组中土体由于加入钻井泥浆, 土体颗粒中黏粒含量上升, 渗透能力降低(图 23), 提高了土体的保水能力; 同时细颗粒填补土壤中粗颗粒之间较大的间隙, 有效对有机质起到保留作用, 此外钻井泥浆中有效磷以及速效钾含量较高, 适量加入可有效提高土体肥力促进植株生长(图 23)。通过试验结果发现(图 10~图 22), 钻井泥浆的加入在物理以及化学性质上对土体性质进行改良, 使得土体更适宜植株生长, 可作为陕北风积沙地区土壤改良剂。但是过量的加入会使得土体各元素含量过高, 出现板结等现象反而不利于植株生长(如本研究 15% 掺量), 因此要因地制宜, 酌情选择添加量。

钻井泥浆中丰富的无机盐以及有机质可为植株

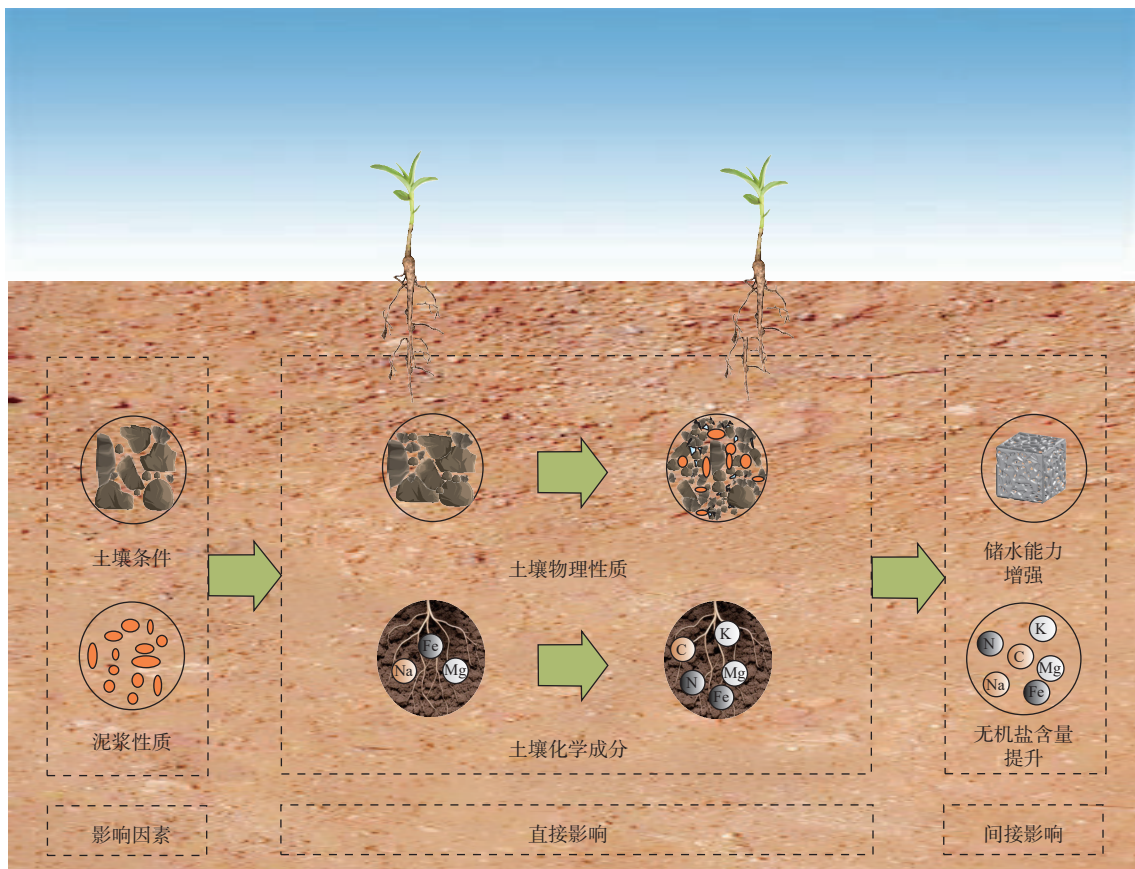


图23 改良机理

Fig. 23 Improvement mechanism diagram

生长提供充足养分(翟文晰等, 2019), 低浓度的加入可有效促进植株的生长, 这一现象符合前人所作研究(Kisic et al., 2009), 由于黄土本身贫瘠, 缺乏黏粒以及营养物质(张永双等, 2005; 曹丽花等, 2008), 少量的钻井泥浆加入即可起到良好的改良效果, 但是当持续增大钻井泥浆的掺量直至 15% 时会出现植株生长情况不如 10% 泥浆掺量组植株生长情况的现象(图 14~图 22), 这是因为过高的泥浆掺量使得土体无机盐含量过高, 出现土壤板结, 不利于植株吸收水份。

结合文中试验结果, 钻井泥浆的加入可有效改良陕北榆林矿区风积沙, 改善级配, 降低渗透性, 延缓水分蒸发, 提高土壤中无机盐含量, 增强保水保肥能力, 有效提高植株品质。从试验结果中可以看出, 10% 钻井泥浆混合土综合表现最佳。

5 结论

(1) 提出了一种钻井泥浆应用于修复矿山生态的方法, 并通过开展颗分、渗透性、测定有效磷以及速

效钾含量等土体理化性质试验和盆栽试验以植株株高、叶片发育、根系发育等关键生长特征参数为指标评价其修复效果。

(2) 钻井泥浆的加入可以有效提高土体黏粒含量, 降低土体渗透能力, 增强土体保水能力, 即泥浆的加入使得风积沙土具有了“海绵吸水效应”, 并同时起到了“锁住”风积沙水分的良好效果; 同时提高土体无机盐含量, 为植株生长提供养分, 改善土体理化性质; 钻井泥浆的加入对促进植株生长起到正面效果, 相对于对照组, 试验组种植得到的植株在各项指标上均有更优秀的数据。

(3) 钻井泥浆含量与对植株的促进效果并非呈现完全正相关关系, 10% 钻井泥浆含量相对于 15% 钻井泥浆含量在存进植株生长方面更有优势, 即研究区泥浆改良矿山风积沙土壤的最优掺入比为 10%。

参考文献(References):

曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水

- 稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报, 2008(1): 45-49.
- CAO Lihua, ZHAO Shiwei, LIANG Xiangfeng, et al. Research on the Improvement Effect and Mechanism of PAM on Water Stable Aggregates of Major Soil Types in the Loess Plateau[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2008(1): 45-49.
- 贺亚维, 卜涛. 陕北钻井液技术应用现状及发展方向[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2007(3): 61-65.
- HE Yawei, BU Tao. The current situation and development direction of drilling fluid technology application in northern Shaanxi[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2007(3): 61-65.
- 雷琦. 废弃钻井淡水泥浆污染物处理技术浅析[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(17): 12-15.
- LEI Qi. Analysis of Pollution Treatment Technology for Abandoned Drilling Freshwater Mud[J]. Chemical Safety and Environment, 2022, 35(17): 12-15.
- 李凤娟, 张存社, 李小龙, 等. 废水水基泥浆处理技术研究进展[J]. 精细与专用化学品, 2023, 31(11): 26-28.
- LI Fengjuan, ZHANG Cunshe, LI Xiaolong, et al. Research progress on treatment technology of waste water-based mud[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2023, 31(11): 26-28.
- 刘永宏, 冀浩楠. 打井不下井, 全机械化智能建井[N]. 中国煤炭报, 2022-06-09 (004). DOI: 10.28112/n.cnki.ncmtb.2022.000938.
- LIU Yonghong, JI Haonan. Drilling without going down, fully mechanized and intelligent well construction [N]. China Coal News, 2022-06-09 (004). DOI: 10.28112/n.cnki.ncmtb.2022.000938.
- 马猛. 不同固体废弃物配施组合对风沙地土壤质量及绿化植株生长的影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
- MA Meng. The effects of different combinations of solid waste application on soil quality and green plant growth in sandy areas [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- 秦琪焜, 方健梅, 王根柱, 等. 煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 304-314.
- QIN Qikun, FANG Jianmei, WANG Genzhu, etc. Experimental study on the preparation of vegetation substrate by mixing coal gangue with urban sludge[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 304-314.
- 申艳军, 杨博涵, 王双明, 等. 黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 104-117.
- SHEN Yanjun, YANG Bohan, WANG Shuangming, et al. Typical Characteristics of Geological Hazards and Ecological Environment in the Coal Base of the Yellow River Jiziwan District[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2022, 50(6): 104-117.
- 舒畅, 陈天欣, 冯永东, 等. 水基钻井岩屑对土壤的环境风险评估分析[J]. 钻采工艺, 2023, 46(3): 135-140.
- SHU Chang, CHEN Tianxin, FENG Yongdong, et al. Environmental risk assessment analysis of water-based drilling cuttings on soil[J]. Drilling and Production Technology, 2023, 46(3): 135-140.
- 王丹丹, 董晨曦, 杨添麒. 废弃钻井泥浆无害化处理技术发展方向探讨[J]. 石化技术, 2023, 30(2): 118-120.
- WANG Dandan, DONG Chenxi, YANG Tianqi. Discussion on the Development Direction of Harmless Treatment Technology for Waste Drilling Mud[J]. Petrochemical Technology, 2023, 30(2): 118-120.
- 王富加, 肖欣欣, 孙静, 等. 生物泥浆技术修复多环芳烃污染土壤研究进展[J]. 化工环保, 2023, 43(4): 427-433.
- WANG Fujia, XIAO Xinxin, SUN Jing, et al. Research progress on bio mud technology for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soil[J]. Chemical Environmental Protection, 2023, 43(4): 427-433.
- 王峻, 李海涛, 吴东阳, 等. 泥水盾构废弃泥浆无害化处理技术及资源化处置分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(23): 27-35.
- WANG Jun, LI Haitao, WU Dongyang, et al. Harmless treatment technology and resource utilization analysis of waste slurry from slurry shield tunneling[J]. Construction Technology (Chinese and English), 2023, 52(23): 27-35.
- 王雪艳, 王宇莹, 龚会蝶, 等. 施磷对灌耕风沙土磷含量及形态的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 145-154.
- WANG Xueyan, WANG Yuying, GONG Huidie, et al. The effect of phosphorus application on phosphorus content and forms in irrigated sandy soil[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022, 50(11): 145-154.
- 杨子健, 刘阳生. 水基钻井固体废物处理处置技术研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 143-149.
- YANG Zijian, LIU Yangsheng. Research progress on solid waste treatment and disposal technology for water-based drilling[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 143-149.
- 咎国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析林业资源管理[J]. 林业资源管理, 2023(2): 1-9.
- ZAN Guosheng, WANG Cuiping, LI Feng, et al. Main Results and Analysis of the Sixth National Desertification and Desertification Survey on Forestry Resource Management[J]. Forestry Resource Management, 2023(2): 1-9.
- 翟文晰, 郝明德, 王哲, 等. 黄土区废弃钻井液对苜蓿产量和品质的影响[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(4): 468-472.
- ZHAI Wenxi, HAO Mingde, WANG Zhe, et al. The impact of abandoned drilling fluid on alfalfa yield and quality in loess areas [J]. Drilling and Completion Fluids, 2019, 36(4): 468-472.
- 张浩, 李雷. 废弃泥浆合理处置技术分析[J]. 陕西地质, 2020,

- 38(1): 86–90.
- ZHANG Hao, LI Lei. Analysis of Reasonable Disposal Technology for Waste Mud[J]. *Shaanxi Geology*, 2020, 38(1): 86–90.
- 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. *工程地质学报*, 2005(1): 18–28.
- ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Research on Cement Materials and Bonding Processes of Sand Loess in Northern Shaanxi and Western Shanxi[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005(1): 18–28.
- 朱启明, 程西科, 刘俊娥, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区风沙土细沟分离能力探究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 189–194+205.
- ZHU Qiming, CHENG Xike, LIU Jun'e, et al. Exploration of the Separation Capacity of Rills in Wind Sand Soil in the Ecotone of Water and Wind Erosion on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 189–194+205.
- Bauder T A, Barbarick K A, Shanahan J F, et al. Drilling fluid effects on crop growth and iron and zinc availability[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 744–749.
- Bauder T A, Barbarick K A, Ippolito J A, et al. Soil Properties Affecting Wheat Yields following Drilling-Fluid Application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1687–1696.
- Chang Y, Wang X, Han Y, et al. The Removal of Crude Oil in Waste Drilling Muds by a Constructed Microbial Consortium[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 1245–1257.
- Flemming B, Chang T S, Delafontaine M, et al. Distribution of individual mud fractions in a tidal basin of the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea): affinities between sortable silts, aggregated particle suites, and calcium carbonate and organic matter contents[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2024.
- Kisic I, Mesic S, Basic F, et al. The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 209–216.
- Murtaza M, Gbadamosi A, Hussain S M S, et al. Experimental investigation of pyrrolidinium-based ionic liquid as shale swelling inhibitor for water-based drilling fluids[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 231.
- Tawornpruek S, Aramrak S, Ketrot D, et al. Feasibility assessment of bentonite drilling mud to improve the physical quality of loamy sand soil and water deficit of forest plant seedlings[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2021, 71(11): 1375–1385.
- Zvomuya F, Larney F J, Demaere P R, et al. Hydraulic Properties of a Sandy Loam Soil following Spent Drilling Mud Application on Native Prairie[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1108–1112.
- Zvomuya F, Larney F J, Willms W D, et al. Vegetation Response to a one-time spent drilling mud application to semiarid, mixed-grass prairie[J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2011, 64: 375–383.