

# 改土材料对鄂尔多斯满来梁露天矿排土场 风沙土理化性质的影响

邵璐莹<sup>1</sup>, 陈士超<sup>1,2</sup>, 张庆<sup>1</sup>, 李娟<sup>1</sup>, 贾治<sup>3</sup>

[1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

010018; 3. 鄂尔多斯市乌兰煤炭(集团)有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200]

**摘要:** [目的] 探究微生物菌剂(EM)与粉煤灰配施对矿区排土场风沙土理化性质的影响, 为露天煤矿排土场未来废弃地土壤植被恢复和生态修复提供理论参考。[方法] 选取鄂尔多斯市满来梁露天矿排土场风沙土为研究对象, 采用野外盆栽试验的方法, 依据二因素完全试验, 设置 EM 菌剂 0, 240, 480, 720 kg/hm<sup>2</sup> 共 4 个水平, 设置粉煤灰 0, 60 000, 120 000, 180 000 kg/hm<sup>2</sup> 共 4 个水平, 将 EM 菌剂和粉煤灰按不同比例与风沙土进行混施, 研究不同用量改良剂对矿区排土场土壤理化性质的影响, 并计算土壤质量指数。[结果] ① EM 菌剂、粉煤灰的施配相对于对照(CK)显著改善了土壤理化性质, EM 菌剂和粉煤灰的混合施配对土壤理化性质的影响优于单施 EM 菌剂或粉煤灰, 且在不同施配比例中随着粉煤灰添加量的增加对土壤理化性质的改善效果越好。② 当 EM 菌剂为 480 kg/hm<sup>2</sup> 和粉煤灰为 180 000 kg/hm<sup>2</sup> 配施时对土壤质量的提升最为显著, 土壤质量指数为 0.78, 相对于 CK 增加了 147%, 属于肥沃等级。③ 羊柴的生长、光合指标与土壤理化性质具有紧密的关联性, Mantel 分析结果表明羊柴生长指标、光合指标受土壤全氮、有机质驱动。[结论] 两种改良材料混施相对单施改良材料能够显著提高矿区排土场风沙土土壤质量, 且以 EM 菌剂为 480 kg/hm<sup>2</sup> 和粉煤灰为 180 000 kg/hm<sup>2</sup> 配施时表现最优。

**关键词:** 露天煤矿排土场; 微生物菌剂(EM); 粉煤灰; 土壤质量; 羊柴

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0194-11

**中图分类号:** S156.2, X171.4

**文献参数:** 邵璐莹, 陈士超, 张庆, 等. 改土材料对鄂尔多斯满来梁露天矿排土场风沙土理化性质的影响 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 194-204. Shao Luying, Chen Shichao, Zhang Qing, et al. Effects of soil improvement materials on physicochemical properties of sandy soil at discharge sites in Manlailiang open pit mine of Ordos City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 194-204. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.008; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.008.

## Effects of soil improvement materials on physicochemical properties of sandy soil at discharge sites in Manlailiang open pit mine of Ordos City

Shao Luying<sup>1</sup>, Chen Shichao<sup>1,2</sup>, Zhang Qing<sup>1</sup>, Li Juan<sup>1</sup>, Jia Zhi<sup>3</sup>

[1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Key Laboratory of Sand Physics and

Sand Control Engineering of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia

010018, China; 3. Ordos Wulan Coal (Group) Co. Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017200, China]

**Abstract:** [Objective] The effects of a combination of microbial (EM) agents and coal fly ash on the physicochemical properties of aeolian sand soil in a mine dump were examined to provide a theoretical reference for future vegetation and ecological restoration of abandoned soil in an opencast mine dump. [Methods] Aeolian soil from a wast dump in Manlailiang open-pit coal mine in Ordos City was selected as the research subject. A field-pot experiment was conducted using a two-factor complete experimental design. Four levels of the EM agent (0, 240,

收稿日期: 2024-10-21

修回日期: 2025-01-13

采用日期: 2025-01-14

资助项目: 鄂尔多斯市科技重大专项项目“露采矿排土场高效植被建设关键技术研究与示范”(2022EEDSKJZDZX012)。

第一作者: 邵璐莹(1998—), 女(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: shaoluying0703@163.com。

通信作者: 陈士超(1977—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区喀喇沁旗人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境、荒漠化防治等方面的研究。Email: chenshichao2005@126.com。

480, and 720 kg/hm<sup>2</sup>) and four levels of coal fly ash (0, 60,000, 120,000, and 180,000 kg/hm<sup>2</sup>) were applied to the aeolian soil in different proportions. The effects of different amendment dosages of the dump soil were studied, and the soil quality index was calculated. [Results] ① Applying EM agents and coal fly ash significantly improved the physicochemical properties of the soil compared to the control (CK). The combined application of EM agents and fly ash had a better effect on the soil physicochemical properties than the application of EM agents or fly ash alone. Among the different application ratios, the improvement in the soil physicochemical properties was more pronounced with increasing amounts of coal fly ash. The most significant improvement in soil quality was observed ② When 480 kg/hm<sup>2</sup> of the EM agent and 180,000 kg/hm<sup>2</sup> of coal fly ash were applied together. This resulted in a soil quality index of 0.78, which was 147% higher than that of the control (CK), classifying it as fertile. ③ The growth and photosynthetic indicators of *Corethroedendron fruticosum* are closely related to the soil physicochemical properties. The Mantel analysis showed that the growth and photosynthetic indicators of *C. fruticosum* were driven by soil total nitrogen and organic matter. [Conclusion] The combined application of the two amendments significantly improved the quality of aeolian soil in the mine dump compared with applying a single amendment with 480 kg/hm<sup>2</sup> EM agent and 180 000 kg/hm<sup>2</sup> coal fly ash.

**Keywords:** wast dump of open-cast coal mine; microbial (EM) agents; coal fly ash; soil quality; *Corethroedendron fruticosum*

煤炭资源是人类社会发展的重要能源物质基础<sup>[1]</sup>。露天矿开采过程中会形成大面积的排土场,造成土体被破坏、土层颠倒、土壤微生物结构发生变化,排土场面临着土壤贫瘠、结构性差、漏水漏肥严重和植被恢复较为困难等问题<sup>[2]</sup>。截至2022年底,中国共有露天煤矿350余处,煤炭产量达到 $1.16 \times 10^9$  t,据统计每开采 $1.00 \times 10^4$  t的煤炭,就会引起0.06~0.13 hm<sup>2</sup>的土地被破坏<sup>[3]</sup>,例如,内蒙古准格尔旗黑岱沟露天矿因长期过度开采导致矿区内部植被覆盖度低于30%以下,天然森林已全部遭到破坏<sup>[4]</sup>,所以露天煤矿排土场土地复垦工作迫在眉睫。目前,排土场土地复垦主要有物理、化学和生物措施。物理措施主要进行表土剥离和回填,然而该技术操作过程复杂,成本较高且处理不善会加剧水土流失,而化学措施和生物措施分别为添加土壤改良剂和植被恢复<sup>[5]</sup>。总的来说,土地复垦的重要内容是土壤改良,施用土壤改良剂能在短时间内实现土壤肥力的提升,进而提高植被恢复的效率。针对矿区排土场土壤改良这一问题,毛晓等<sup>[6]</sup>利用煤炭腐殖酸为原料的微生物菌剂对矿区废弃地土壤进行改良,研究表明施用微生物菌剂的土壤显著提高了微生物活性和土壤养分,但该菌剂的施用具有较严苛的环境温度,因此不利于在北方地区推广。罗唯叶等<sup>[7]</sup>尝试利用生物炭改善矿区土壤养分含量;郑鹏等<sup>[8]</sup>研究表明,在风沙土中添加砒砂岩可以增强土壤的保水性能;侯峰等<sup>[9]</sup>研究表明,施入堆肥污泥可有效提高土壤速效养分。但砒砂岩在运输过程中成本较大,堆肥污泥获取需要长期且复杂的工艺。目前,针对于土壤改良不仅有上述改土材料,微生物菌剂(EM)作为一

种微生物改良剂,因其组成复杂、结构稳定、高效环保,可促进植物生长、改善土壤微生物活性而在全球范围内推广<sup>[10]</sup>。而粉煤灰作为一种物理改良剂,可提高土壤的保水保肥性能<sup>[11]</sup>。例如,田超等<sup>[12]</sup>研究发现添加粉煤灰可以改变风沙土的孔隙结构,降低土壤容重,增强土壤的持水性能,且在粉煤灰用量为120 t/hm<sup>2</sup>时,风沙土理化性质良好。可以就地取材,节约成本,不仅解决了粉煤灰大量堆放的难题,而且还极大地提高了粉煤灰资源的高效利用,促进矿区的地力提升<sup>[13]</sup>。

目前,以露天矿排土场为背景混施两种改良剂对土壤改良效果及适宜用量方面的研究还略显不足,不同施用量的EM菌剂和粉煤灰混施会产生不同的互补效应。因此,本研究以鄂尔多斯满来梁露天矿排土场为研究对象,设计盆栽试验,选择EM菌剂、粉煤灰两种土壤改良剂,分析两种改良剂单施或混施对土壤理化性质及羊柴生长发育的影响,并通过土壤质量评价的方法,确定适合改良排土场土壤的EM菌剂和粉煤灰的最优施配组合,以期为露天煤矿排土场未来废弃地土壤植被恢复和生态修复提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2023年4—9月在内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗东部纳林陶亥镇满来梁煤矿排土场开展。研究区位于毛乌素沙地东北部,属于典型的温带大陆性季风气候,主要特点是降水少,气候干燥,年平均气温6.2℃,年降雨量在320~420 mm,且集中在

7—8月,海拔高度1 100 m,无霜期年平均130 d,全年蒸发量2 000 mm,常年风大沙多。矿区排土场表层覆土主要为风沙土,覆土厚度约1 m。

### 1.2 供试材料

粉煤灰取自鄂尔多斯市满来梁煤矿发电厂,主要由硅、铝、钙、铁等元素组成,还含有少量的碳(图1);EM菌剂购于内蒙古呼和浩特市鑫利农资经销部,生产厂家为沧州兴业生物科技有限公司,主要成分为酵母菌、粪肠球菌、芽孢杆菌、复合氨基酸(有机质含量 $\geq 45.0\%$ ,有效活菌数 $\geq 5.0 \times 10^8/\text{g}$ ),产品规格为500 g,粉末状,推荐施用水平为480 kg/hm<sup>2</sup>;栽植容器为PVC材质花盆,高24 cm,口径23 cm;羊柴(*Corethroedendron fruticosum*)幼苗购于鄂尔多斯杭锦旗羊柴育苗基地;本试验供试土壤取自满来梁煤矿排土场内0—20 cm土层深度的土壤,改良前测定土壤养分本底值,其容重为1.71 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度和含水率分别为35.46%和4.36%,pH值为8.72,有机质含量为1.25 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为3.15、1.16、33.40 mg/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为0.16、0.94、39.20 g/kg。

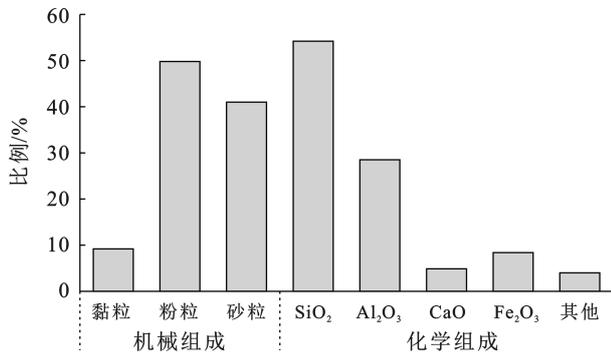


图1 粉煤灰物理特性及化学组成  
Fig.1 Physical properties and chemical composition of coal fly ash

### 1.3 试验设计

为了保证试验灌溉量、土壤量等条件可控,本试验选择进行盆栽试验,以提高试验结果的精确性。羊柴具有生长迅速、抗逆性较强、成活率高等特点,且作为北方典型脆弱区的优势物种,所以本文选择羊柴作为盆栽试验的指示作物。①因素和水平。根据EM菌剂的推荐施用量以及课题组前期的预试验过程,将EM菌剂的施用量设置为0,240,480和720 kg/hm<sup>2</sup>共4个水平,按照花盆上口面积推求EM菌剂的施用量为每盆0,0.99,1.99和2.99 g,分别记做E<sub>0</sub>,E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub>,E<sub>3</sub>;根据当地实际生产经验并参照田超等<sup>[12]</sup>的研究,将粉煤灰的施用量设置为0,60 000,120 000和180 000 kg/hm<sup>2</sup>共4个水平,按照花盆上

口面积推求粉煤灰的施用量为每盆0,249.16,498.32和747.48 g,分别记做F<sub>0</sub>,F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>,F<sub>3</sub>。试验共16个处理,5次重复,共80盆。②基质装填和栽植。按照二因素完全试验将EM菌剂、粉煤灰与排土场风沙土充分混合形成不同配比的栽植基质,为防止花盆灌溉溢水,盆栽基质装填至距离花盆上沿3 cm处,以未施用改良剂的处理作为对照(CK),具体的施配设计详见表1。选取长势基本一致的一年生羊柴幼苗于2023年5月10日栽入各花盆中,每盆栽植1株,精心管护使幼苗完全缓苗,以CK最大田间持水量为基准进行灌溉,以每5 d为周期,并在后期保持其他管护条件一致。

表1 二因素试验设计

Table 1 Two-factor experimental design

处理组	处理编号	EM菌剂/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	粉煤灰/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
对照组	对照(CK)	0(E <sub>0</sub> )	0(F <sub>0</sub> )
A	T <sub>1</sub>	0(E <sub>0</sub> )	60 000(F <sub>1</sub> )
	T <sub>2</sub>	0(E <sub>0</sub> )	120 000(F <sub>2</sub> )
	T <sub>3</sub>	0(E <sub>0</sub> )	180 000(F <sub>3</sub> )
B	T <sub>4</sub>	240(E <sub>1</sub> )	0(F <sub>0</sub> )
	T <sub>5</sub>	480(E <sub>2</sub> )	0(F <sub>0</sub> )
	T <sub>6</sub>	720(E <sub>3</sub> )	0(F <sub>0</sub> )
C	T <sub>7</sub>	240(E <sub>1</sub> )	60 000(F <sub>1</sub> )
	T <sub>8</sub>	240(E <sub>1</sub> )	120 000(F <sub>2</sub> )
	T <sub>9</sub>	240(E <sub>1</sub> )	180 000(F <sub>3</sub> )
D	T <sub>10</sub>	480(E <sub>2</sub> )	60 000(F <sub>1</sub> )
	T <sub>11</sub>	480(E <sub>2</sub> )	120 000(F <sub>2</sub> )
	T <sub>12</sub>	480(E <sub>2</sub> )	180 000(F <sub>3</sub> )
E	T <sub>13</sub>	720(E <sub>3</sub> )	60 000(F <sub>1</sub> )
	T <sub>14</sub>	720(E <sub>3</sub> )	120 000(F <sub>2</sub> )
	T <sub>15</sub>	720(E <sub>3</sub> )	180 000(F <sub>3</sub> )

### 1.4 土壤样品采集与指标测定

在羊柴幼苗栽植后的第30天和第90天时分别测定株高、基茎,并通过计算得出株高和基茎的生长量;在第70天时,选择晴朗天气的9:00—11:00,进行植物光合指标的测定;并于2023年9月底进行土壤物理化学性质的取样,土壤样品采集分为两部分,一部分在每个花盆中的土壤表层用环刀进行采样,用于土壤容重、孔隙度和含水率的测定;一部分土壤装入自封袋带回实验室阴干、除杂后,进行土壤pH值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾等化学性质的测定,各指标的测定方法详见表2。

### 1.5 土壤质量评价

本研究采取建立最小数据集的方法对添加土壤

改良剂后的盆栽基质进行土壤质量评价。首先对标准化处理后的土壤理化性质指标进行主成分分析并排序,选取主成分特征值 $\geq 1$ 的因子计算载荷矩阵,将同一主成分下指标载荷值大于0.5的分为一组,若其中某一个指标在多个主成分下的载荷值均大于0.5,则将其归为与其他指标相关性较低的一组,分组后计算各个指标的Norm值和权重,并保留最大Norm值10%内的所有指标,在此基础上建立最小数据集(MDS),其中指标的权重越大,表示其在土壤质量评价中的贡献率越大。Norm值的计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (U_{ik}^2 \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: $N_{ik}$ 为第*i*个指标在特征值 $> 1$ 的前*k*个主成分的综合载荷; $U_{ik}$ 为第*i*个指标在第*k*个主成分上的载荷; $\lambda_k$ 为第*k*个主成分的特征值。

表2 土壤样品指标测定方法

Table 2 Determination method of soil sample indicators

土壤指标	测定方法
容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	环刀法
总孔隙度/%	环刀法
含水率/%	烘干法
pH值	pH酸度计电位法(水:土)=(5:1)
有机质/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	重铬酸钾氧化—外加热法
全氮/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	凯氏定氮法
全磷/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	NaOH熔融—钼锑抗比色法
全钾/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	NaOH熔融—火焰光度计法
碱解氮/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解扩散法测定
速效磷/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	NaHCO <sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法
速效钾/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	NH <sub>4</sub> OAc浸提—火焰光度计法
株高/cm	卷尺
基茎/mm	游标卡尺
叶绿素/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	叶绿素仪
净光合速率/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
气孔导度/( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	GFS-3000光合仪
蒸腾速率/( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
胞间CO <sub>2</sub> 浓度/( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	

根据土壤质量评价指标与土壤功能的正负相关关系判断指标所属的函数类型,并计算隶属度值<sup>[15]</sup>。土壤中容重和pH值采用抛物线型函数,总孔隙度、含水量率及其他养分指标均采用S型函数。

S型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & (x \geq b) \\ 0.9 \left( \frac{x-a}{b-a} \right) + 0.1 & (a < x < b) \\ 0.1 & (x \leq a) \end{cases} \quad (2)$$

反S型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & (x \leq a) \\ 1 - 0.9 \left( \frac{b-x}{b-a} \right) & (a < x < b) \\ 0.1 & (x \geq b) \end{cases} \quad (3)$$

抛物线型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & (b_1 < x \leq b_2) \\ 1 - 0.9 \left( \frac{x-b_2}{b-b_2} \right) & (b_2 < x \leq b) \\ 0.1 + 0.9 \left( \frac{x-a}{b_1-a} \right) & (a < x \leq b_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 指各指标的隶属度值; $x$ 为各指标实际值; $a, b$ 分别为指标的最小值和最大值; $b_1, b_2$ 分别为指标适宜值的下界点和上界点。

最后将进入最小数据集的指标进行土壤质量指数的计算,并对土壤质量等级进行划分。土壤质量的计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i \quad (5)$$

式中:SQI为土壤质量指数; $n$ 为指标个数; $W_i$ 为第*i*个评价指标的权重; $F_i$ 为第*i*个评价指标的隶属度值。

## 1.6 数据处理与分析

采用Excel 2010对数据进行整理、分析,利用SPSS 22.0软件进行单因素(one-way ANOVA)方差分析探究粉煤灰、EM菌剂施配处理之间的显著性差异,利用SPSS 22.0软件进行主成分分析以构建最小数据集进行土壤质量评价;利用Canoco 5.0进行冗余分析;利用R语言基于Vegan包进行mantel分析并绘制图形;使用Origin 2022软件进行制图。

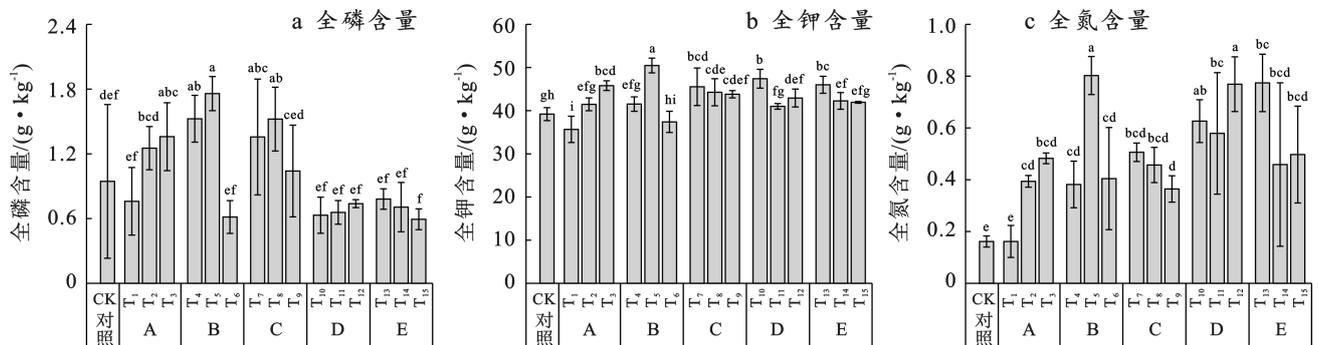
## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下土壤化学性质变化

分析结果表明(图2和表3),单施EM菌剂和粉煤灰及二者交互作用显著影响土壤全氮、全磷、全钾含量( $p < 0.05$ ),其中以T<sub>5</sub>处理显著高于其他处理,相对于CK分别增加了400%,107.9%,28.8%。单施EM菌剂时,随着用量的增加土壤全磷、全氮和全钾含量呈现出先升高后降低的趋势;单施粉煤灰时,随着用量的增加土壤全磷、全氮和全钾含量逐渐升高;单施粉煤灰中T<sub>2</sub>,T<sub>3</sub>处理和单施EM菌剂中T<sub>4</sub>,T<sub>5</sub>处理相对于CK显著提高了全磷和全钾含量,而D组和E组全磷含量显著低于其他处理,这可能是在此剂量混合施配下植物需求与吸收导致磷含量的供应不足。相对于单施EM菌剂或粉煤灰,EM菌剂和粉煤

灰的混合施配对土壤全氮的改善效果较优,这是由于EM菌剂可增强土壤的供氮能力,且表现为T<sub>12</sub>和T<sub>13</sub>的效果较好,D组中随着粉煤灰添加量的增加表

现为T<sub>12</sub>处理下土壤全氮最高,相对于CK显著提高了368%;E组中则表现为T<sub>13</sub>处理下土壤全氮最高,相对于CK显著提高了378%。



注:图中小写字母不同表示不同处理之间差异显著(p<0.05)。A为单施粉煤灰;B为单施EM菌剂;C,D,E为EM菌剂与粉煤灰混合施处理组。下同。

图2 不同处理对土壤全效养分的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil total nutrients

如图3和表3所示,单施EM菌剂或粉煤灰及二者交互作用对土壤pH值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾均有显著影响(p<0.05)。如图3所示,单施EM菌剂和单施粉煤灰(除T<sub>2</sub>处理)对土壤有机质的影响不显著(p>0.05),但两者混合施配可显著提高土壤有机质含量(p<0.05),增幅为4.8%~192.8%。比较各处理发现,粉煤灰和EM菌剂的混合施配相对于CK显著降低了pH值,降幅为1.4%~13.9%,显著提高了土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量,增幅分别为2.4%~402.2%,17.2%~332.8%,6.0%~75.4%。单施EM菌剂和粉煤灰时,随着用量的增加,土壤pH值逐渐降低,土壤有机质和速效养分都呈现出先升高后渐低的趋势。如图3所示,在C,D和E中不同处理对土壤有机质和速效养分表现出不同的影响趋势,在C组中表现为T<sub>7</sub>处理显著高于T<sub>8</sub>和T<sub>9</sub>处理,

在D组中表现为T<sub>12</sub>处理显著高于T<sub>10</sub>和T<sub>11</sub>处理,在E组中表现为T<sub>13</sub>处理显著高于T<sub>14</sub>和T<sub>15</sub>处理,这说明土壤有机质、速效养分并不一定随着EM菌剂和粉煤灰的添加量的增加而增加。综上所述,T<sub>12</sub>处理表现出对土壤有机质、速效钾、速效磷和碱解氮含量的提升效果最优。一般来说,酸碱度在6.5~7.5的中性土壤最适合土壤微生物存活和植物生长、发育,过酸或过碱均不利于土壤中养分的转化和供给。本研究中不同处理下T<sub>12</sub>对土壤pH值的改善较优,有利于植被的生长发育。综上所述,由于粉煤灰具有一定的养分使得施配粉煤灰在短时间能提高土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量,在粉煤灰和EM菌剂的混合施配下,土壤保水效应为微生物提供了良好的生存环境。因此,在不同处理下对土壤养分和pH值的影响存在显著差异。

表3 EM菌剂、粉煤灰及其交互作用对排土场土壤理化性质影响的F值  
Table 3 F-values of effects of EM microbial agents, coal fly ash and their interactions on soil physicochemical properties in wast dumps

项目	SBD	POR	SWC	pH值	SOM	AN
A	80.52***	80.72***	105.55***	181.98***	5.07**	40.93***
B	9.65***	9.95***	27.98***	5.52**	7.90***	13.68***
A×B	1.42*	1.12*	1.73	8.23***	1.94*	11.11***
项目	AP	AK	TN	TP	TK	
A	96.42***	154.67***	1.97	4.89**	3.00*	
B	92.49***	437.88***	31.20***	19.08***	20.19***	
A×B	28.18***	18.17***	5.88***	6.72***	17.75***	

注:①A为单施粉煤灰;B为单施EM菌剂;A×B为粉煤灰与EM菌剂混施。②检验方法为双因素方差分析;\*\*\*表示p<0.001水平差异显著,\*\*表示p<0.01水平差异显著,\*表示p<0.05水平差异显著。③SBD为容重;POR为总孔隙度;SWC为含水率;SOM为有机质;AN为碱解氮;AP为速效磷;AK为速效钾;TN为全效氮;TP为全效磷;TK为全效钾。下同。

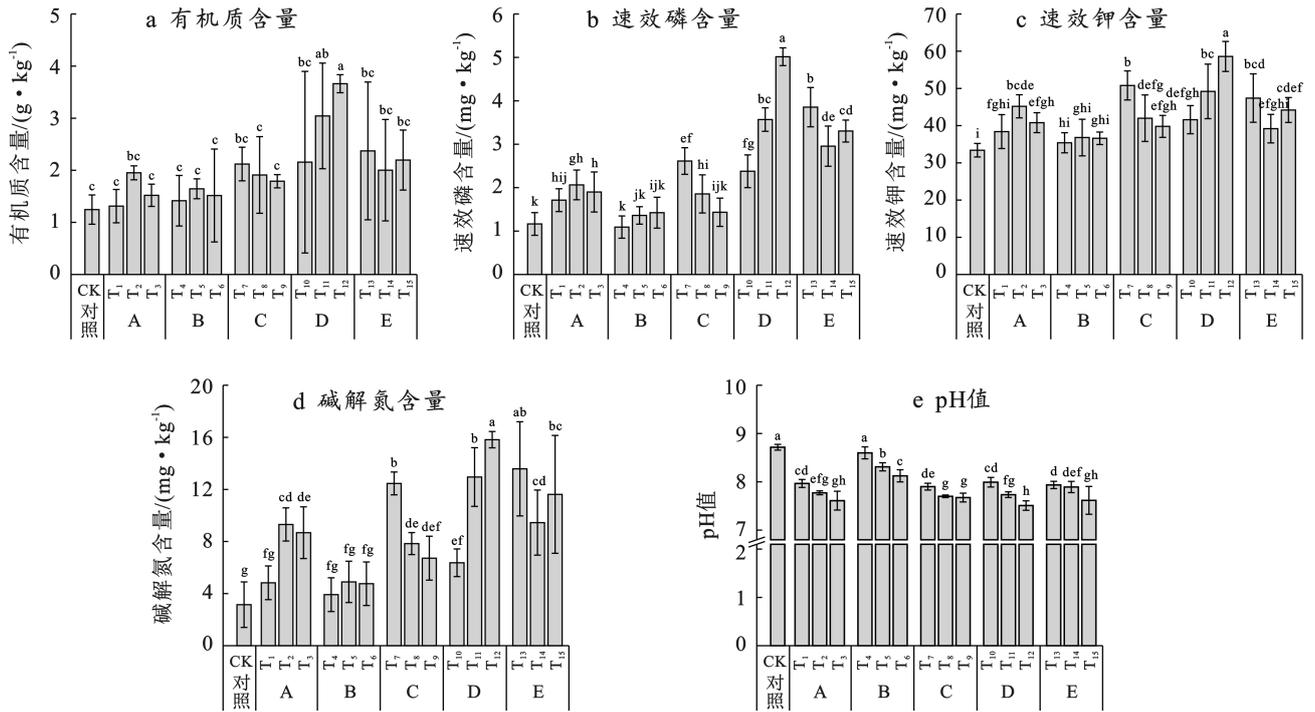


图 3 不同处理对土壤有机质、pH值和速效养分的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil organic matter, pH value and available nutrients

2.2 不同处理下土壤物理性质变化

分析结果表明(图4和表3),单施粉煤灰或单施EM菌剂相对于CK各处理土壤容重显著降低,总孔隙度显著增加,土壤含水率显著增加( $p < 0.001$ )。EM菌剂和粉煤灰二者交互作用显著影响了土壤容重、总孔隙度( $p < 0.05$ ),但对含水率的影响并不显著。各处理中单施粉煤灰相对于单施EM菌剂对土壤容重、总孔隙度和含水率的影响较大,这主要是由于粉煤灰遇水之后变为微小颗粒,从而降低土壤体积质量,增加土壤的孔隙度,而EM菌剂需要更长的时间通过微生物的周转改善土壤质地。随着粉煤灰和EM菌剂用量的增加,土壤容重逐渐降低,土壤含水率和总孔隙度逐渐上升,其中以T<sub>3</sub>和T<sub>6</sub>处理改善

效果较好,容重较CK分别降低了8.77%和1.75%,总孔隙度较CK分别增加了19.71%和13.89%,土壤含水率较CK分别增加143%和46.44%。在C, D和E各处理中,随着粉煤灰用量的增加,土壤容重逐渐降低,土壤总孔隙度不断增加,土壤含水率逐渐增加。其中T<sub>9</sub>相对于CK土壤含水率和总孔隙度显著提高了168%和22.61%,容重较CK显著降低了8.83%;T<sub>12</sub>相对于CK土壤含水率和总孔隙度显著提高了261%和29.35%,容重较CK显著降低了13.45%;T<sub>15</sub>相对于CK土壤含水率、总孔隙度显著提高了194%和18.83%,容重较CK显著降低了12.80%。综上所述,在两者混施时,T<sub>12</sub>对土壤容重、总孔隙度和含水率的改善作用最优。

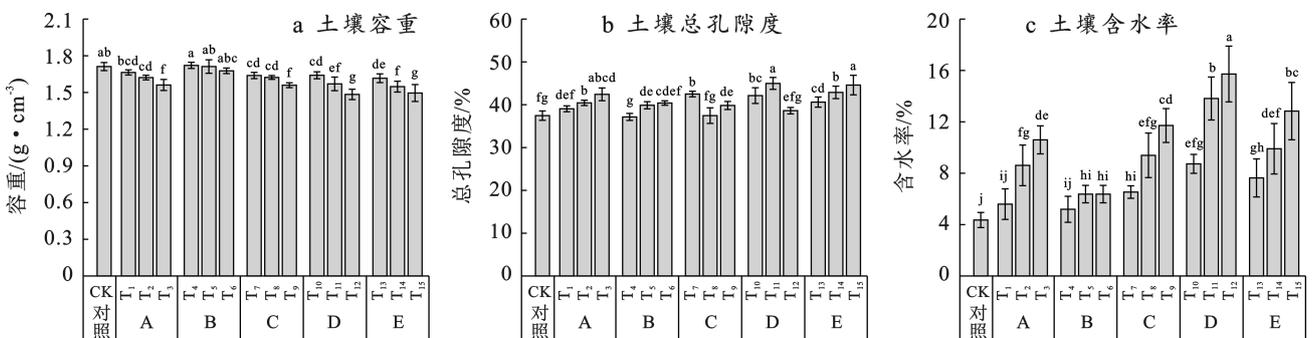


图 4 不同处理对土壤容重、总孔隙度和含水率的影响

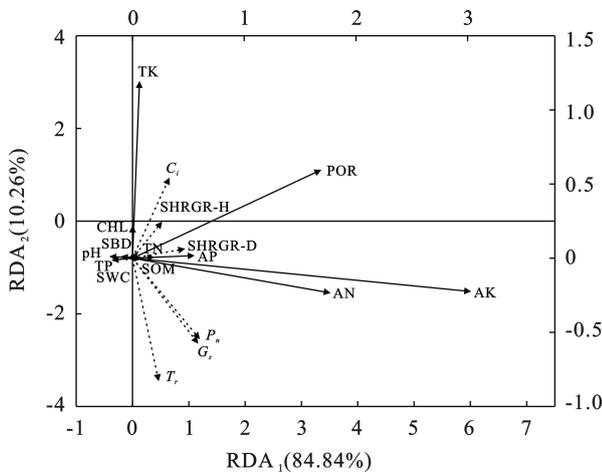
Fig.4 Effects of different treatments on soil bulk density, porosity and water content

2.3 土壤理化性质与羊柴生长光合指标关系分析

将不同复配基质下羊柴的生长(基茎、株高和叶

绿素)、叶片光合指标(蒸腾速率、叶片气孔导度、净光合速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度)与土壤理化性质进行冗余

分析,其中将植物生长、光合指标视为响应变量,土壤理化性质视为解释变量(图5)。从图5可以看出,两者之间具有显著的相关性,RDA<sub>1</sub>和RDA<sub>2</sub>分别解释了变量的84.84%和10.26%,总解释变量达到95.10%,说明能够较好地反映植被生长和光合指标受土壤理化性质的响应,其中植物生长、光合指标与全氮、全磷、容重、含水率、全磷、速效钾和碱解氮之间呈现正相关关系,与pH值、全磷等呈现出负相关关系,株高、基茎的变化与土壤理化性质之间的夹角较小,说明株高、基茎与土壤理化性质具有较强的相关性。



注: P<sub>n</sub>为净光合速率; G<sub>s</sub>为气孔导度; T<sub>r</sub>为蒸腾速率; C<sub>i</sub>为胞间CO<sub>2</sub>浓度; CHL为叶绿素; SHGR-H为株高生长量; SHGR-D为基茎生长量。下同。

图5 土壤理化性质与羊柴生长发育指标冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis of soil physicochemical properties with growth and development indicators of *C. fruticosum*

基于Mantel分析进一步探究土壤理化性质与羊柴生长、光合指标之间的关系。由表4可知,土壤理化性质之间的相关性与Mantel分析结果一致,羊柴生长指标受到全氮的显著影响,羊柴叶片光合指标受到有机质的显著影响。

### 2.4 不同盆栽基质土壤质量综合评价

共选取11项土壤理化指标进行主成分分析。分析前进行KMO抽样巴特利球形度检验,结果详见表5。由表5可知,KMO=0.59>0,显著性<0.001,说明可以基于选定的土壤理化指标进行主成分分析。将11个指标排序后进行主成分分析,结果详见表6。由表6可知,前两个主成分的特征值≥1,累计方差贡献率达到了80.33%,符合信息提取的要求,根据最小数据集构建的方法,确定盆栽基质的土壤质量评价最小数据集的指标为碱解氮、全磷、全钾,然后判断各指标所属的隶属度函数类型,并计算隶属度值、权

重和土壤质量指数,由此绘制各指标的土壤质量指数柱状图和隶属度雷达图(图6—7)。

表4 羊柴生长、光合指标与土壤理化性质的Mantel分析  
Table 4 Mantel analysis of growth, photosynthetic indexes and soil physicochemical properties of *C. fruticosum*

指标	羊柴生长指标		羊柴光合指标	
	Mantel r	p值	Mantel r	p值
容重	0.16	0.90	0.11	0.40
总孔隙度	0.21	0.35	0.20	0.34
含水率	0.33	0.76	0.05	0.80
pH值	0.02	0.42	0.08	0.42
有机质	0.24	0.64	0.12	0.03
碱解氮	0.14	0.59	0.34	0.69
速效磷	0.04	0.80	0.06	0.15
速效钾	0.05	0.87	0.37	0.75
全氮	0.29	0.04	0.20	0.59
全磷	0.13	0.56	0.36	0.22
全钾	0.33	0.70	0.15	0.77

表5 KMO和巴特利特球形度检验

Table 5 KMO and Bartlett's sphericity test

KMO取样適切性量数	0.59
近似卡方	210.12
自由度	55.00
显著性	0.00

表6 主成分主体原件分析载荷矩阵以及Norm值计算

Table 6 Principal component subject original analysis load matrix and Norm value calculation

指标	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	分组	Norm值	公因子方差	权重
容重	-0.89	0.25	1	2.36		
孔隙度	0.86	-0.17	1	2.28		
含水率	0.90	-0.13	1	2.37		
pH值	-0.82	0.12	1	2.17		
有机质	0.92	0.08	1	2.42		
碱解氮	0.92	0.09	1	2.43	0.93	0.35
速效磷	0.92	-0.02	1	2.42		
速效钾	0.88	0.13	1	2.32		
全氮	0.61	0.68	1	1.87		
全磷	-0.40	0.70	2	1.44	0.87	0.32
全钾	0.22	0.90	2	1.38	0.88	0.33
特征值	6.92	1.92			2.67	1.00
方差贡献率/%	62.89	17.44				
累计方差贡献率/%	62.89	80.33				

由以上计算土壤质量指数的方法可得出两种改良材料不同配施组合下土壤质量指数的范围为0.31~0.78(如图6所示)。粉煤灰(F=184.90, p<

0.001)和EM菌剂( $F=83.19, p<0.001$ )对土壤质量指数均有显著影响,且二者交互作用( $F=17.70, p<0.001$ )对土壤质量影响显著,其中 $T_{12}$ 处理对矿区风沙土的改良效果最优,土壤质量指数为0.78,其次为 $T_{11}$ 和 $T_{13}$ 处理, $T_{12}, T_{11}, T_{13}$ 处理相较于CK分别增长了147%,110%和103%,根据土壤质量指数分级标准可知,经过施配后的各处理土壤质量指数平均值为0.54,属于Ⅲ级水平,其中CK(对照)和 $T_1$ 处理属于Ⅳ级(极贫瘠)水平,由于改土材料的添加,使得土壤质量由Ⅳ级逐步提升至Ⅱ级水平。由此可见,两种改土材料的配施对土壤质量具有明显的提升作用,可以达到改良矿区土壤的目的。

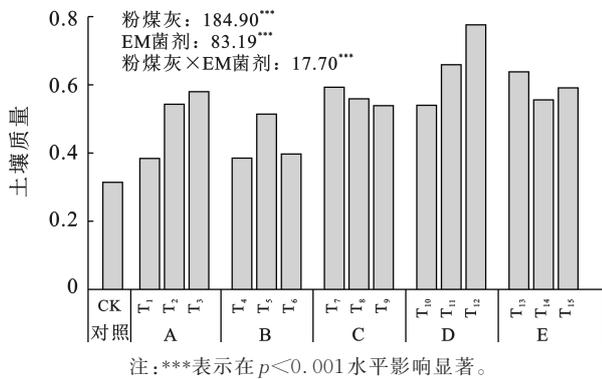


图 6 不同施配组合的土壤质量指数

Fig.6 Soil quality index of different application combinations

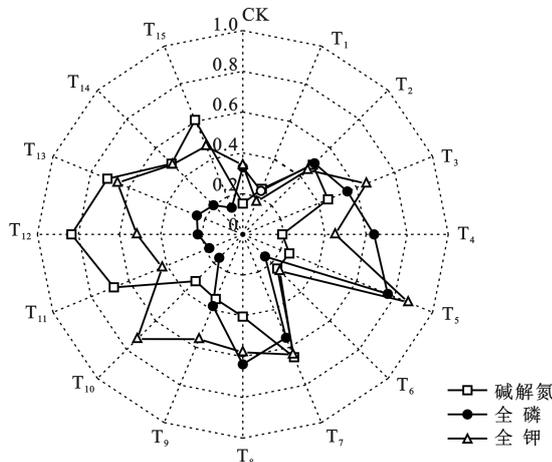


图 7 不同配比盆栽基质土壤指标隶属度雷达图

Fig.7 Radar plot of soil index affiliation for different ratios of potting substrates

### 3 讨论

本研究采用野外盆栽试验,在相关的研究中也证明其具有一定的可行性<sup>[17]</sup>。野外盆栽试验具有一定的控制性与可重复性,使得研究结果更加准确可靠。相比田间试验,所需的空间和资源更少。盆栽试验可以在较小的空间内进行,便于管理和操作。

在本研究中,风沙土机械组成主要以砂粒为主,其内部孔隙较大,漏水漏肥现象严重<sup>[12]</sup>,难以保持足够的水分供给植物生长发育。大量研究<sup>[18]</sup>表明,粉煤灰作为土壤改良剂能够明显地改善土壤物理性质,降低土壤容重,增大土壤总孔隙度和含水率。EM菌剂对植物的生长具有良好的促进作用,施用微生物菌剂可以促进土壤内有效物质的循环,改善土壤结构,增强土壤活性,从而提高土壤肥力<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,EM菌剂和粉煤灰两者配施相对于两种物质单施来说能够更好地改善土壤结构,可以显著降低土壤容重,增大土壤总孔隙度和含水率。这主要是因为EM菌剂中的微生物在生长繁殖过程中会分泌出一些胞外多糖等有机物质,这些有机物质可以作为土壤颗粒的黏结剂,将细小的土壤颗粒黏结在一起从而形成团聚体<sup>[20]</sup>。同时,粉煤灰的细小颗粒可以填充在土壤颗粒孔隙之间,起到支撑的作用,进一步促进团聚体的形成,使土壤变得更加疏松,从而在两者的共同作用下使得土壤容重降低,土壤总孔隙度和含水率增大<sup>[21]</sup>。此外,风沙土的土质瘠薄,保水保肥能力差,易造成水土流失<sup>[12]</sup>。本研究结果表明,粉煤灰和EM菌剂配施可以显著降低土壤的pH值,此外EM菌剂中含有大量的微生物,可以使土壤中的有益菌迅速繁殖,进而提高土壤养分含量<sup>[22]</sup>,这与关欣等<sup>[23]</sup>、熊雨洁等<sup>[24]</sup>的研究结果基本一致。基质pH值降低的原因有很多种,这可能与粉煤灰中活性SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的水化作用有关<sup>[25]</sup>。粉煤灰含有丰富的钾、钙、镁等矿物质营养元素,EM菌剂中的微生物可以通过分泌有机酸等物质来活化这些养分,所以两者混施后可以增加土壤中的养分含量,且粉煤灰的存在还可以改善土壤的保肥能力,其颗粒结构可以吸附土壤中的养分离子,减少养分的散失<sup>[26]</sup>。土壤阳离子交换量是衡量土壤肥力的一个重要指标<sup>[27]</sup>。EM菌剂可以促进土壤中微生物的循环,微生物在代谢过程中会分泌一些有机物质,而这些有机物质带有负电荷,可以吸附土壤中的阳离子,从而增加土壤的阳离子交换量;粉煤灰中的一些成分也具有一定的阳离子交换能力<sup>[28]</sup>。所以二者混施后,土壤质量显著提高。

改良土壤的目的就是通过提高土壤的肥力,促进植物的生长。高富东等<sup>[29]</sup>研究发现,在土壤中添加粉煤灰能够明显改善土壤质量从而促进苜蓿生长。本研究结果发现,当粉煤灰和EM菌剂配施后能够明显改善土壤结构,有利于植物根系的生长和呼吸,根系能够更容易地在土壤中伸展从而吸收更多的水分和养分,促进羊柴生长。EM菌剂和粉煤灰混

施后可以增加土壤中有益微生物的数量和种类。EM菌剂中的有益微生物会与土壤中原有的微生物相互作用。例如,EM菌剂中的放线菌可以与土壤中的固氮菌相互协作,提高土壤的固氮能力,为植物提供更多的氮素营养。这种良好的微生物群落结构可以维持土壤生态系统的平衡,为植物生长创造一个健康的土壤环境。土壤中的微生物通过分泌各种酶和生长调节物质,如生长素、细胞分裂素等,直接或间接地促进植物的生长发育<sup>[30]</sup>。

建立科学合理的土壤评价指标体系是土壤质量评价的关键,其中建立最小数据集(MDS)是目前应用较为广泛的评价指标筛选方法<sup>[31]</sup>,不同研究中的选取的土壤质量评价指标均不相同,刘志勇等<sup>[32]</sup>选取碱解氮、全磷、速效钾等指标构建MDS;胡伟等<sup>[33]</sup>选取土壤全磷、全钾等指标构建MDS。本研究选取土壤物理、化学性质的11项指标组成土壤质量评价全数据集,采用PCA法并结合Norm值从中筛选出碱解氮、全磷、全钾等3个指标建立MDS。本研究所选的MDS指标与上述前人研究结果有一定的相似性,则表明本研究中建立的最小数据集评价指标体系具有较好代表性。

## 4 结论

(1) 单施EM菌剂与粉煤灰或混合施配均能改善矿区排土场的土壤质量,单施粉煤灰相对于EM菌剂有效改善了土壤质地、速效养分和pH值。EM菌剂和粉煤灰的混合施配相对于单施和对照可显著改善土壤质量,且混合施配中不同菌剂梯度中总孔隙度、含水率随着粉煤灰的添加量的增加而增加,pH值和土壤容重随着粉煤灰的添加量的增加而减少。

(2) 通过土壤质量指数的计算,以 $T_{12}(E_2, F_3)$ 处理最为显著,即EM菌剂为 $480 \text{ kg/hm}^2$ 和粉煤灰为 $180\ 000 \text{ kg/hm}^2$ 时最优,根据土壤质量分级标准,属于肥沃等级。EM菌剂与粉煤灰及二者交互作用均对土壤质量指数(SQI)有显著影响,其中 $T_{12}$ 处理SQI值最高,较CK处理增加147%。

(3) 在EM菌剂和粉煤灰的施用下土壤养分提升、土壤保水性增强。土壤理化性质的改善与羊柴生长、光合指标的变化具有紧密相关的联系,土壤有机质驱动着植物叶片光合速率的变化,土壤全氮含量影响着羊柴的生长情况。

## 参考文献(References)

[1] Li Yong, Pan Songqi, Ning Shuzheng, et al. Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication

for resource and environment [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(7): 1211-1228.

[2] Zhang Chengye, Li Feiyue, Li Jun, et al. Assessing the effect, attribution, and potential of vegetation restoration in open-pit coal mines' dumping sites during 2003—2020 utilizing remote sensing [J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111003-111021.

[3] 李辉,李高亮,鲁叶江,等.植物废弃物发酵基质对露天矿区排土场土壤改良研究[J].中国矿业,2024,33(11): 130-138.

Li Hui, Li Gaoliang, Lu Yejiang, et al. Study on soil improvement of open pit mine discharge site by fermentation substrate of plant waste [J]. China Mining Industry, 2024, 33(11): 130-138.

[4] 张雅楠,于铁柱,陆阳,等.黑岱沟矿区排土场土壤化学性质研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012, 33(1): 116-120.

Zhang Yannan, Yu Tiezhu, Lu Yang, et al. Study on the chemical properties of soil at the discharge site of Heidaigou mining area [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2012, 33(1): 116-120.

[5] 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. Concepts and methods of soil reconstruction for mine reclamation [J]. Soil, 2005, 37(1): 8-12.

[6] 毛骁,孙保平,张建锋,等.微生物菌肥对于干旱矿区土壤的改良效果[J].水土保持学报,2019,33(2):201-206.

Mao Xiao, Sun Baoping, Zhang Jianfeng, et al. Improvement effect of microbial fungal fertiliser on soil in arid mining areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 201-206.

[7] 罗唯叶,朱靖宜,陈涛,等.生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的研究进展[J].环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 8-12.

Luo Weiye, Zhu Jingyi, Chen Tao, et al. Progress of biochar remediation and amelioration of heavy metal contaminated soil in mining area [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2021, 33(4): 8-12.

[8] 郑鹏,党廷辉,薛江.粉煤灰、砒砂岩对煤矿排土场土壤水分特性改良的研究[J].土壤学报,2023, 60(2): 399-408.

Zheng Peng, Dang Tinghui, Xue Jiang. Research on the improvement of soil moisture characteristics of coal mine drainage site by fly ash and arsenic sandstone [J]. Journal of Soil Science, 2023, 60(2): 399-408.

[9] 侯锋,何芸,高霖,等.施用堆肥污泥对土壤肥力及植物生长的影响[J].地球与环境,2024, 52(1): 53-64.

- Hou Feng, He Yun, Gao Lin, et al. Effects of compost sludge application on soil fertility and plant growth [J]. *Earth and Environment*, 2024, 52(1):53-64.
- [10] Zhao Huaxuan, Li Shangmin, Jiang Yixiu, et al. Independent and combined effects of antibiotic stress and EM microbial agent on the nitrogen and humus transformation and bacterial community successions during the chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 354(1):127237-127248.
- [11] 武琳,郑永红,张治国,等.粉煤灰用作土壤改良剂的养分和污染风险评价[J].*环境科学与技术*, 2020, 43(9): 219-227.
- Wu Lin, Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, et al. Nutrient and pollution risk evaluation of fly ash as a soil amendment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 43(9):219-227.
- [12] 田超,刘恒青,李东利,等.粉煤灰与有机肥配施对风沙土理化性质及黑麦草生长的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2022, 1(7):98-106.
- Tian Chao, Liu Hengqing, Li Dongli, et al. Effects of fly ash and organic fertilizer on physical and chemical properties of sandy soil and ryegrass growth [J]. *Chinese Journal of Soil and Fertilizer*, 2022, 1(7):98-106.
- [13] 王擎运,何咏霞,陈景,等.秸秆或粉煤灰添加对砂姜黑土持水性及小麦抗干旱胁迫的影响[J].*农业工程学报*, 2020, 36(2):95-102.
- Wang Qingyun, He Yongxia, Chen Jing, et al. Effects of straw or fly ash addition on water holding capacity of sandy ginger black soil and drought stress resistance of wheat [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2):95-102.
- [14] 丁明净,脱云飞,郑阳,等.基于最小数据集栗子坪自然保护区不同林分类型土壤质量评价[J].*土壤通报*, 2024, 55(5):1215-1228.
- Ding mingjing, Tuo Yunfei, Zheng Yang, et al. Evaluation of soil quality of different forest stand types in Liziping Nature Reserve based on minimum data set [J]. *Soil Bulletin*, 2024, 55(5):1215-1228.
- [15] 王艺霖,梁尧,蔡红光,等.基于最小数据集的不同有机物料还田黑土土壤质量评价[J].*土壤通报*, 2024, 55(1):68-75.
- Wang Yilin, Liang Yao, Cai Hongguang, et al. Evaluation of soil quality of black soil with different organic materials returned to the field based on minimum data set [J]. *Soil Bulletin*, 2024, 55(1):68-75.
- [16] 甄文慧,陈士超,左合君,等.改土材料复配对比风沙土质量的影响研究[J].*干旱区资源与环境*, 2023, 37(6): 175-182.
- Zhen Wenhui, Chen Shichao, Zuo Hejun, et al. Study on the effect of soil modification material compounding on the quality of wind-sand soil [J]. *Arid Zone Resources and Environment*, 2023, 37(6):175-182.
- [17] 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等.干旱胁迫下AM真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响[J].*生态学报*, 2013, 33(13):4181-4188.
- Li Shaopeng, Bi Yinli, Chen Guizhen, et al. Effects of AM fungi on soil improvement and maize growth in mining areas under drought stress [J]. *Journal of Ecology*, 2013, 33(13):4181-4188.
- [18] 赵智,唐泽军,宋满刚,等.粉煤灰和PAM改良沙土物理性质田间试验[J].*水土保持学报*, 2013, 27(3): 178-183.
- Zhao Zhi, Tang Zejun, Song Mangang, et al. Field experiment on the physical properties of sandy soil improved by fly ash and PAM [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):178-183.
- [19] 许景钢,孙涛,李嵩.我国微生物肥料的研发及其在农业生产中的应用[J].*作物杂志*, 2016, 1(1):1-6.
- Xu Jinggang, Sun Tao, Li Song. Research and development of microbial fertilizers in my country and their application in agricultural production [J]. *Crop Journal*, 2016, 1(1):1-6.
- [20] 季慧慧,黄明丽,何键,等.粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展[J].*土壤*, 2017, 49(4):665-669.
- Ji Huihui, Huang mingli, He Jian, et al. Research progress on the role of fly ash on soil property improvement and fertility enhancement [J]. *Soil*, 2017, 49(4):665-669.
- [21] 汪文君,刘国庆,王志花.玉米秸秆降解复合菌系的筛选及发酵产短链脂肪酸[J].*湖北农业科学*, 2024, 63(2):55-58.
- Wang Wenjun, Liu Guoqing, Wang Zhihua. Screening and fermentation of corn stover degrading composite bacterial lineage for the production of short-chain fatty acids [J]. *Hubei Agricultural Science*, 2024, 63(2): 55-58.
- [22] 柴晓彤,顾金凤,毛亮,等.微生物菌肥对盐渍化土壤中盐离子及有机质含量的影响[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*, 2017, 35(1):78-84.
- Chai Xiaotong, Gu Jinfeng, Mao Liang, et al. Effects of microbial fungal fertilizer on salt ions and organic matter content in salinized soil [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science Edition)*, 2017, 35(1):78-84.
- [23] 关欣,王丹丹,刘佳凝,等.蒙脱石与复合菌剂配施提高田菁改良盐渍土的效果[J].*植物营养与肥料学报*, 2024, 30(2):331-341.
- Guan Xin, Wang Dandan, Liu Jianing, et al. Effect of montmorillonite and composite fungicide in improving

- saline soil by Tianjing [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertiliser, 2024,30(2):331-341.
- [24] 熊雨洁,宋立晓,王亚,等.解淀粉芽孢杆菌 W48 对大蒜产量品质及土壤质量提升效果研究[J].中国土壤与肥料,2024,1(2):89-96.  
Xiong Yujie, Song Lixiao, Wang Ya, et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* W48 on improving garlic yield and quality and soil quality [J]. Chinese Journal of Soil and Fertilizer, 2024,1(2):89-96.
- [25] Munir M A M, Liu Guijian, Yousaf B, et al. Synergistic effects of biochar and processed fly ash on bioavailability, transformation and accumulation of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) in coal-mining contaminated soil [J]. Chemosphere, 2020,240(1):124845-124857.
- [26] 王海娟,包玉英,牛天心,等.菌剂与肥料配施对露天矿排土场苜蓿生长及土壤养分含量的影响[J].华北农学报,2014,29(4):186-191.  
Wang Haijuan, Bao Yuying, Niu Tianxin, et al. Effects of fungicide-fertiliser dosing on alfalfa growth and soil nutrient content in open pit mine drainage field [J]. North China Journal of Agriculture, 2014,29(4):186-191.
- [27] 于耀泓,刘悦,王艺颖,等.鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征[J].土壤通报,2022,53(6):1341-1349.  
Yu Yaohong, Liu Yue, Wang Yiying, et al. Cation exchange capacity and exchangeable base ion distribution characteristics of rain forest soil in Ehuangzhang Mountain [J]. Soil Bulletin, 2022,53(6):1341-1349.
- [28] 雷西萍,韩丁,王悦,等.聚苯胺@季铵盐阳离子改性粉煤灰漂珠的制备与电流变性能[J].复合材料学报,2016,33(9):2045-2053.  
Lei Xiping, Han Ding, Wang Yue, et al. Preparation and galvanic properties of polyaniline@quaternary ammonium salt cation-modified fly ash bleaching beads [J]. Journal of Composite Materials, 2016,33(9):2045-2053.
- [29] 高富东,何俊,李敏,等.脱硫石膏与粉煤灰配施对碱化土壤改良及苜蓿生长的影响[J].灌溉排水学报,2024,43(4):59-65.  
Gao Fudong, He Jun, Li min, et al. Effects of desulphurisation gypsum and fly ash on alkaline soil improvement and alfalfa growth [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(4):59-65.
- [30] 张鹏,李颖,王业林,等.短脚锦鸡儿灌丛对植物群落和土壤微生物群落的促进效应研究[J].干旱区研究,2021,38(2):421-428.  
Zhang Peng, Li Ying, Wang Yelin, et al. The positive effect of *Caragana breviflora* shrubs on plant communities and soil microbial communities in the Inner Mongolia desert region [J]. Arid Zone Research, 2021,38(2):421-428.
- [31] 田英,许喆,王娅丽,等.宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J].生态学报,2023,43(4):1515-1525.  
Tian Ying, Xu Zhe, Wang Yali, et al. Evaluation of soil quality of different plantation forests in sandy land of Yinchuan Plain, Ningxia [J]. Journal of Ecology, 2023,43(4):1515-1525.
- [32] 刘志勇,罗富方,鲁万华,等.基于最小数据集的黔西南州烟田土壤质量评价[J].河南农业科学,2024,53(7):100-108.  
Liu Zhiyong, Luo Fufang, Lu Wanhua, et al. Soil quality evaluation of tobacco field in Qianxinan Prefecture based on minimum data set [J]. Henan Agricultural Science, 2024,53(7):100-108.
- [33] 胡伟,刘文辉,刘凯强,等.基于最小数据集土壤质量评价及生物指标的确立[J].草地学报,2024,32(12):3855-3867.  
Hu Wei, Liu Wenhui, Liu Kaiqiang, et al. Evaluation of soil quality and establishment of bioindicators based on minimum data set [J]. Journal of Grasslands, 2024,32(12):3855-3867.