

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2020.05.017

不同改良措施对排土场土壤微形态的影响

曹明杰¹, 郝 喆¹, 杨景帅², 向婷婷¹, 倪俊康¹, 许 颖¹, 凯 比¹

(1. 辽宁大学 环境学院, 沈阳 110036; 2. 东北大学 理学院, 沈阳 110819)

摘 要:以铁矿排土场废石土为研究对象, 自制模型试验装置, 设计 4 种基质改良方法, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 检测, 用图像分析软件 (Image-Pro Plus) 对 SEM 照片定量化分析, 研究在不同改良措施下对铁矿排土场土壤微形态的影响。结果表明: 单施 3% 有机肥的处理土壤孔隙度为 16%, 与对照组排土场原矿土相比增加了 60%。复合施用 3% 有机肥、掺拌 30% 黄土的处理孔隙度最大达 33%。单施 3% 有机肥、5% 有机肥对土壤大团聚体含量皆有显著地促进作用, 复合施有机肥、掺拌黄土的处理与单施有机肥的处理对比, 土壤大团聚体含量增加并不显著。各改良措施的平均重量直径 (MWD) 与几何平均直径 (GMD) 均随着土壤中大团聚体的含量增加而增加。

关键词:排土场; 改良措施; 土壤微形态; 孔隙度; 土壤团聚体

中图分类号: S152.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2020)05-0096-07

Influence of Different Improved Approach on the Micromorphology of the Soil from Dumping Site

CAO Mingjie¹, HAO Zhe¹, YANG Jingshuai², XIANG Tingting¹,
NI Junkang¹, XU Ying¹, KAI Bi¹

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China;

2. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Taking the waste rock soil of iron ore dumping site as the research object, SEM was employed to investigate the influence of various improved approach on the micromorphology of soil samples. The self-made model test device was designed and four kinds of improved methods were established. Quantitative analysis of SEM photographs was carried out using Image-Pro Plus (IPP) software. The results showed that the soil porosity of the sample containing 3% organic fertilizer was 16%, which was 60% higher than that of the pure waste rock soil. The maximum porosity of 33% was reached for the composite sample consisting of 3% organic fertilizer and 30% mixed loess. The addition of 3% organic fertilizer and 5% organic fertilizer significantly promoted the content of soil macroaggregates, while mixing loess with soil samples did not increase the content macroaggregates. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of each improvement measure increased with the increase of the content of soil macroaggregate.

Key words: waste-dump; improvement measures; soil micromorphology; porosity; soil aggregates

收稿日期: 2019-05-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07202-012); 辽宁省自然科学基金项目 (20180550192); 辽宁省百千万人才项目 (辽百千万立项 [2015]33 号)

Fund: Supported by Major National Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2015ZX07202-012); National Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180550192); Liaoning Province Bai Qian Wan Talents Project (Liaoning Bai Qian Wan Project [2015]33)

作者简介: 曹明杰 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山环境治理领域的研究工作。

通信作者: 郝 喆 (1972—), 男, 教授, 主要从事矿山修复生态治理领域的研究工作。

引用格式: 曹明杰, 郝 喆, 杨景帅, 等. 不同改良措施对排土场土壤微形态的影响 [J]. 有色金属工程, 2020, 10(5): 96-102.

CAO Mingjie, HAO Zhe, YANG Jingshuai, et al. Influence of Different Improved Approach on the Micromorphology of the Soil from Dumping Site [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(5): 96-102.

我国长期的矿产资源粗放式开发过程中,对矿区生态环境造成了恶劣影响。矿山退化区普遍存在阶梯地形、缺乏土壤、基质含潜在污染物等限制性因子的问题^[1]。排土场作为矿区的重要组成部分,普遍存在基质保墒能力差、肥力低、不利于植物生长的现象,且滑坡、泥石流等地质灾害问题导致严重的土壤侵蚀与水土流失^[2]。因此开展排土场废石土的基质改良分析,具有重要的现实意义。

1938年 KUBIENA^[3]首次提出土壤微形态的概念,土壤微形态学主要是应用光学显微镜和扫描电子显微镜研究土壤的原状微观形态,及土壤各类颗粒的组配和空间分布、形态、结构,并分析微观形态的发生和形成机理的一门学科。目前我国学者对矿山生态恢复过程中土壤微形态的研究较少,对土壤微观领域的研究主要针对农作物栽植土。刘哲等^[4]研究了不同种植方式对农田土壤微形态的影响;朱钟麟等^[5]研究了秸秆还田和免耕对水稻土微形态特征的影响;秦鱼生等^[6]研究了长期定位施肥下紫色土壤微形态特征。国内学者^[7-11]对生态恢复问题的研究主要以土壤理化性质等方面为主,对于生态恢复过程中土壤微形态的研究较少。

本文以辽宁本溪歪头山铁矿排土场废石土作为研究基质,在不同改良措施下对其土壤微形态进行定性及定量化的研究,以揭示不同改良措施对铁矿排土场土壤微形态的影响,为矿山生态恢复工程提供理论依据。为了获得较准确的试验结果,试验在自制的排土场模拟装置上进行,模型根据排土场现场渗水情况设置排水系统,并模拟排土场真实的堆放状态,使用铁矿排土场废石土填充,设置4种改良措施(每种3个平行样),对植物根部栽植土进行改良,每个改良样方尺寸(长×宽×深)为0.5 m×0.5 m×0.3 m。

1 试验

1.1 试验材料

黄土取自沈阳浑南区第四系次生黏黄土;废石土取自本钢集团歪头山铁矿排土场;有机肥为市场上购买的商品肥,堆制原料为猪粪,各指标含量如下:有机碳 104.7 g/kg、全氮 g/kg、全磷 8.4 g/kg、全钾 7.5 g/kg,含水率 12.1%。

1.2 试验设计

2017年4月至2018年11月在辽宁大学环境

学院试验基地的排土场模型上进行试验,共设置A、B、C、CK 4种改良措施,以有机肥、黄土为配比材料,按照不同质量比例分别与排土场废石土混合,具体配比见表1。

表1 改良措施配比
Table 1 The ratio of improvement measures

Sample number	Improved methods
A	97% raw ore soil+3% organic fertilizer
B	95% raw ore soil+5% organic fertilizer
C	67% raw ore soil+30% loess+3% organic fertilizer
CK	100% raw ore soil

1.3 样品采集

土壤样品采集时间为2018年12月。常规土样的采集:在不同改良措施下采集0~10、10~20、20~30 cm深度的土壤样品,混匀后装入铝盒并编号。每个处理样取3个重复以保证试验准确性。原状土样采集:挖开土壤剖面,在10~20 cm深度用环刀采集原状土。每个改良措施采集3个原状土以保证试验准确性。

1.4 测定方法

土壤孔隙度及团聚体形态测定:经风干处理的原状土样,沿自然裂缝掰开,选择自然断面平整的土样,用导电胶粘于铜台上编号后进行喷金处理,使用Hitachi SU8010型号扫描电子显微镜(SEM)进行拍摄,操作电压5 kV。利用Image-Pro Plus(IPP)图形处理软件对样品的SEM照片进行土壤孔隙定量化分析。

团聚体分析采用湿筛法。土样先经过沙维诺夫法干筛^[12],干筛后将土样浸润15 min后使用团聚体分析仪进行湿筛,湿筛使用孔径为5.00、2.00、1.00、0.50与0.25 mm的套筛,分析仪震动频率设置为30次/min,结束后将筛上各级团聚体用细水流通过漏斗洗入铝盒中,进行烘干称重。

1.5 分析方法

使用IPP图像分析软件对SEM照片进行定量化分析^[13-14],首先使用Photoshop cs6软件对SEM照片进行灰度处理,将灰度图像进一步转换为黑白二元图像,然后利用IPP软件阈值功能进行调试,阈值调试采用目测方式与原图像对比分割,阈值设置存在主观人为干扰,可能对试验结果产生影响,因此采用多人调试取平均值的办法。分割后图像与SEM原图像对比如图1所示,白色为土壤团聚体,黑色为土壤孔隙。

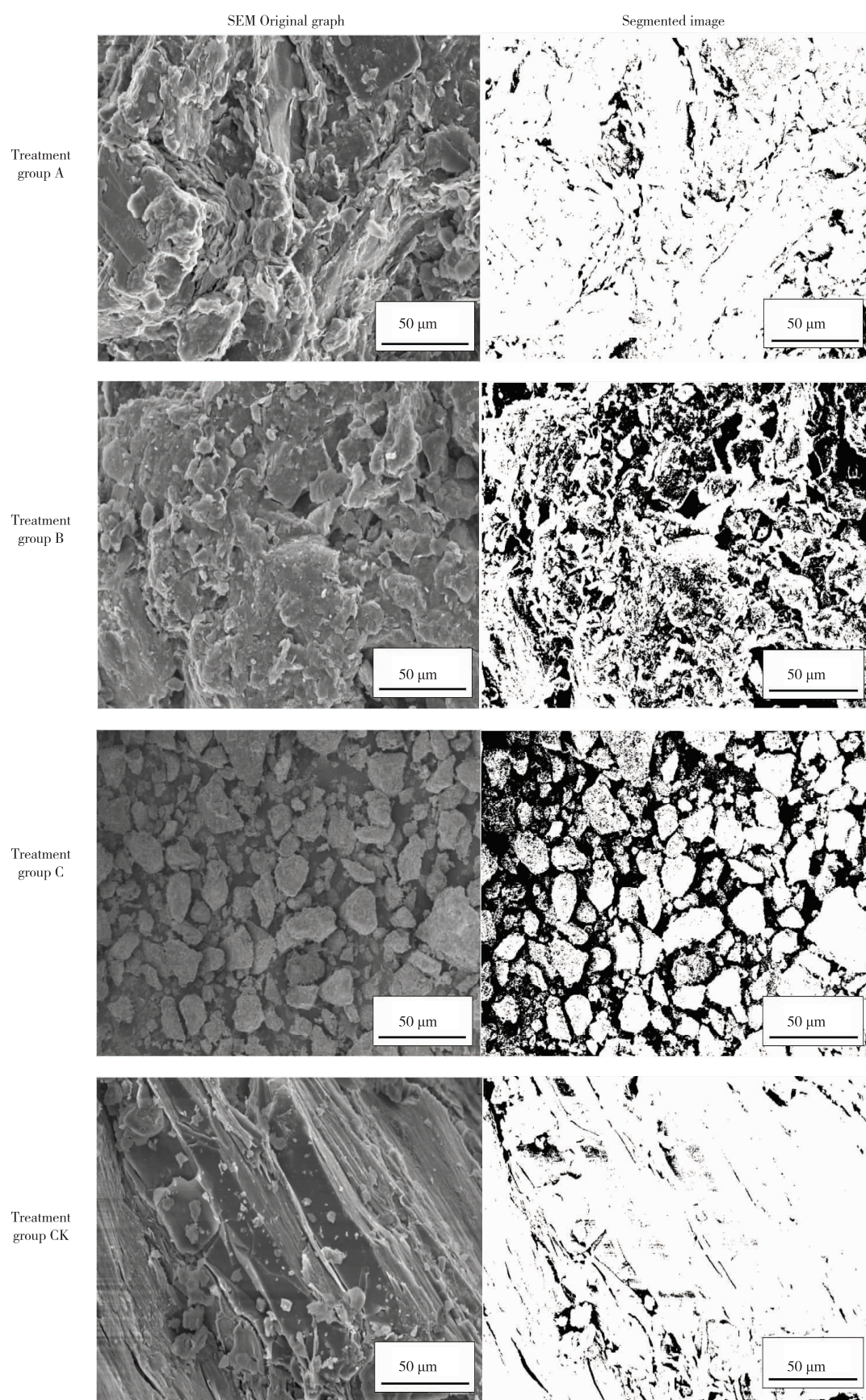


图 1 各改良措施 SEM 图像与分割后图像

Fig. 1 SEM Original graph and segmented image

选取大于 0.25 mm 团聚体含量、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD) 等指标来描述土壤团聚体的分布状况和稳定性特征:

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$GMD = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中, $M_{T>0.25}$ 一团聚体中大于 0.25 mm 总重量, g; M_T 一为团聚体总重量, g; X_i 一为某级团聚体平均直径, mm。

2 结果与分析

2.1 对孔隙的影响

2.1.1 孔隙度

土壤孔隙的数量及质量对土壤中水、气、热等诸多因素均有影响,孔隙状况能够在很大程度上反映土壤质量的好坏。参照 Stoops 修订的标准对土壤

微形态进行描述^[15]。不同改良措施下土壤孔隙度及微形态见表 2, CK 组土壤孔隙度较低, 仅为 10%, 土壤致密, 孔隙以裂隙、简单堆积为主, 孔隙度团聚体结构以弱分离的整块状结构为主, 表明铁矿排土场原矿土结构较差。改良措施 B 以复合堆积孔隙和面状孔隙为主, 孔隙度为 21%, 分别比改良措施 A、CK 增加 23.8%、52.4%, 均具有显著差异性 ($P < 0.05$), 说明施用有机肥可以有效增加土壤孔隙度, 有助于改善土壤结构, 且随着有机肥比例增大土壤孔隙度随之增大。这可能由于施用有机肥比例增大, 有利于土壤中的微生物与酶活性的提高, 促进了土壤孔隙的发育。但并不是有机肥施用量越多越好, 已有研究表明有机肥施用过多会导致土壤氮素淋失, 抑制植物的生长^[15]。改良措施 C 掺拌 30% 的黄土, 孔隙度为 33%, 与 A 相比提高了 106.25%, 显著 ($P < 0.05$) 高于处理组 A, 团聚体以团粒结构为主且带有少量板状结构, 是 3 种改良措施中土壤结构最优的。掺拌黄土与排土场废石土的孔隙度均处于较低水平, 但互相掺拌后孔隙度显著提高, 说明合理客土可以有效改良矿土土壤结构。

表 2 不同改良措施土壤孔隙特征

Table 2 Soil pore improvement characteristics of different improvement measures

Projects	A	B	C	CK
Porosity/%	16	21	33	10
Pore types	Planar pore is dominant	Complex stacked pores are dominant	With capsule holes and channels	Mainly for cracks and simple stacked pores
Micromor-phology	Aggregate structure, a certain amount of planar and plate structure	The aggregate structure is dominant and the prismatic structure is slightly separated.	The aggregate structure is dominant and a small amount of plate structure.	Weakly Separated block structure

2.1.2 孔隙表面分形维数

分形维数是复杂形体不规则性的量度^[16]。利用 IPP 计算土壤孔隙表面分形维数具有较高的自动化程度。分形维数数值大小反映了土壤孔隙轮廓线的曲折程度, 孔隙轮廓边界越粗糙、形状越不规则, D_s 值越大。各改良措施下 D_s 值见图 2。处理组 B 的 D_s 值最大为 2.92, 最小为处理组 A, D_s 值为 2.86。IPP 计算出的 D_s 值与表 2 中缩给出的各改良措施的孔隙特征做对比, 处理 B 孔隙类型为复杂堆积孔隙, 因此 D_s 值最高, 而处理 A 的孔隙类型为简单的面状空隙 D_s 值较低。IPP 的量化分析结果与 SEM 观察到的空隙类型具有一致性。但 D_s 值大小与孔隙度大小之间并没有显著关系, 表明 D_s 值

的大小并不能反应土壤的孔隙度大小。

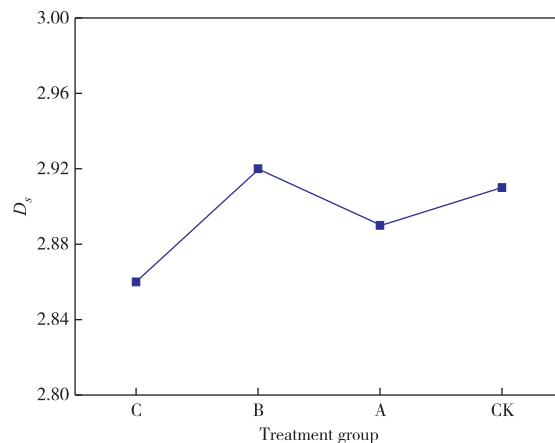


图 2 孔隙表面分形维数

Fig. 2 Fractal dimension of pore surface

2.2 对团聚体的影响

2.2.1 对各粒径团聚体比例的影响

土壤学中将大于 0.25 mm 的团聚体称为土壤大团聚体,大团聚体的数量是评价土壤结构的重要参数,可以表征土壤结构的抗蚀性^[17]。不同改良措施下土壤各粒级水稳性团聚体含量分析结果见表 3,各处理组均是<0.25 mm 团聚体比例最高,范围在 67.36%~95.71%。处理组 A 大团聚体(>0.25 mm)的比例为 30.5%,与大团聚体(>0.25)比例为 4.29%的 CK 组相比增长 610.96%,差异显著($P<0.05$)。表明施用有机肥有利于排土场废土大团聚体的形成,这与已有研究结果一致^[18]。处理组 B 增施有机肥,其大团聚体(>0.25 mm)比例为

32.14%,表明随着有机肥比例增加,大团聚体比例会随之增大。这与有机肥可以增加土壤中有机质含量有关,有机质中主要组成部分的腐殖质是土壤中最重要胶结剂,腐殖质中的胡敏酸缩合和聚合程度较高,分子量大,与钙离子结合生成不可逆的凝胶,同时胡敏酸在相反电荷的有机胶体的作用下发生不可逆的凝聚,因此促进水稳性团粒结构的形成。处理组 C 2~5 mm 团聚体比例显著高于其他组,可能是由于掺拌黄土的原因。处理组 A 与处理组 C 的大团聚体(>0.25 mm)比例差异并不显著($P>0.05$),表明在施用有机肥的基础上掺拌黄土不能有效增加土壤中大团聚体(>0.25 mm)的比例。

表 3 土壤水稳定性团聚体含量分布特征

Table 3 Distribution characteristics of soil water stable aggregates

Treatment	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
A	4.49	3.06	9.7	6.79	6.45	69.5
B	2.87	3.79	6.47	9.69	9.32	67.86
C	5.71	5.29	6.7	8.56	6.38	67.36
CK	0.25	0.66	0.68	1.15	1.54	95.71

2.2.2 对土壤团聚体稳定性的影响

土壤的几何平均直径 GMD(图 3)和平均重量直径 MWD(图 4)的大小反映了土壤团聚体大小分布状况,可以表征土壤的稳定性^[19-20]。稳定性越高土壤结构就越好,从而具有良好的抗冲击性,为地上植物提供良好的缓冲环境,有效地促进植物生长,从而可以加快生态恢复进程。研究发现随着有机肥比例与掺拌黄土比例的变化,不仅 GMD 与 MWD 变化规律呈一致性,各处理的 GMD 与 MWD 变化趋势与大团聚体含量的变化趋势也

具有一致性,各改良措施 GMD 与 MWD 均随着土壤中大团聚体的含量增加而增加。处理组 A 的 GMD 与处理组 CK 相比提高了 84.6%。处理组 B 与处理组 CK 的 MWD 相比提高了 326.3%,表明施肥有助于提高土壤的稳定性。GMD 与 MWD 的大小排序均为 C>B>A>CK,处理组 C、B、A 与 CK 组相比 GMD 与 MWD 均具有显著差异性($P<0.05$),但处理组 C、B、A 之间 GMD 与 MWD 差异并不显著($P>0.05$),可能和施肥、掺拌黄土的比例有关。

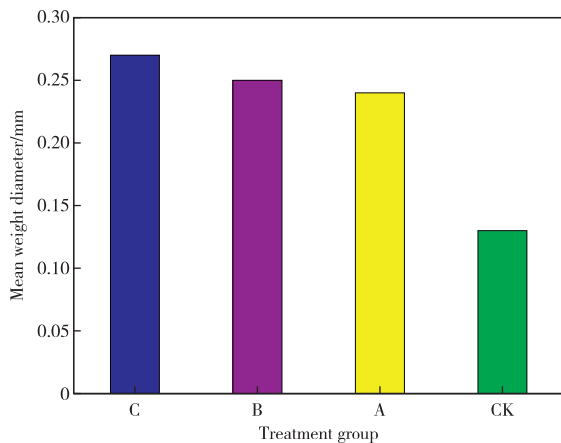


图 3 各改良措施的几何平均直径

Fig 3 Geometric mean diameter with each improvement measure

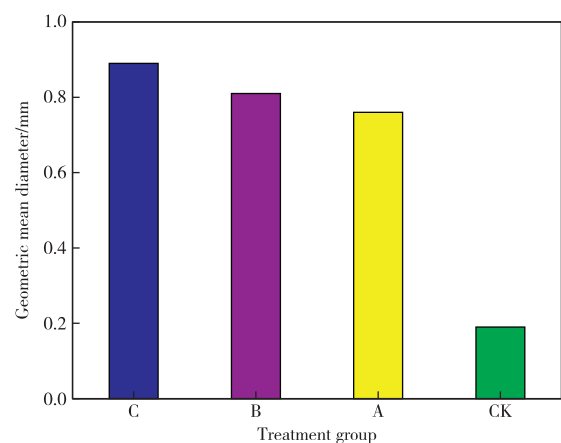


图 4 各改良措施的平均重量直径

Fig 4 Mean weight diameter with each improvement measure

3 结论

1)施用有机肥可以增加排土场土壤孔隙度,有效改善土壤结构,单施3%有机肥土壤孔隙度为16%,单施5%有机肥时改良基质孔隙度达到21%,表明随着施用有机肥比例增加,孔隙度增大。但有机肥比例过高会抑制地上植物生长,需要进一步研究有机肥施用比例与土壤孔隙间的关系。复合施3%有机肥、掺拌30%黄土的改良基质土壤孔隙度达到最大为33%,掺拌黄土对于排土场土壤结构也具有明显的改良作用。

2)施用有机肥有助于排土场废石土大团聚体的形成,单施3%、5%有机肥大团聚体($>0.25\text{ mm}$)比例分别可以达到30.5%和32.14%,可以有效增强排土场土壤团聚体稳定性,复合施3%有机肥、掺拌30%黄土地的处理,大团聚体($>0.25\text{ mm}$)含量为32.64%,与处理组A相比无显著性差异($P>0.05$),表明在施肥的基础上掺拌黄土对团聚体的稳定性并没有明显的促进作用。

3)施肥对GMD与MWD均有显著的促进效果,处理组A的GMD与处理组CK相比提高了84.6%。处理组B与处理组CK的MWD相比提高了326.3%,表明施肥有助于提高土壤的稳定性。但随着施肥比例的增加,GMD与MWD的大小变化并不显著。各改良措施MWD与GMD均随着土壤中大团聚体的含量增加而增加。在施肥的基础上掺拌黄土的改良措施对GMD与MWD的效果也并不明显。

参考文献:

- [1] 郝喆,徐连满,毛伟伟,等. 矿山生态退化区修复治理关键技术研究[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,2019.
HAO Zhe, XU Lianman, MAO Weiwei, et al. Study on key technologies of restoration and treatment of mine ecological degraded area [M]. Shenyang: Liaoning University Publishing House, 2019.
- [2] 齐雪,王明玖. 露天煤矿排土场两种恢复措施下植被的重要值研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2016(14): 88-89.
QI Xue, WANG Mingjiu. Study on the important value of vegetation under two restoration measures of dump in open-pit coal mine [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2016(14): 88-89.
- [3] KUBIENA W L. Micropedology [J]. Soil Science, 1939, 2(1): 163-166.
- [4] 刘哲,侯莹,吕貽忠. 不同种植方式对华北地区温室和农田土壤结构微形态特性的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(5): 19-26.
- LIU Zhe, HOU Ying, LYU Yizhong. Effects of different planting patterns on characteristics of soil micro-morphology of greenhouse soil and farmland soil in huabei plain [J]. Land Development and Engineering Research, 2016(5): 19-26.
- [5] 朱钟麟,舒丽,刘定辉,等. 秸秆还田和免耕对水稻土微形态特征的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 682-687.
ZHU Zhonglin, SHU Li, LIU Dinghui, et al. Effect of straw mulched and no tillage to paddy soils on micro-morphology features [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 682-687.
- [6] 秦鱼生,涂仕华,王正银,等. 长期定位施肥下紫色土土壤微形态特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 352-356.
QIN Yusheng, TU Shihua, WANG Zhengyin, et al. Micro-morphological feature of a purple soil under different long-term fertilizer treatments [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 352-356.
- [7] 肖九花,王兆慧,柳建设,等. 江西永平铜矿排土场土壤质量评价[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 616-620.
XIAO Jiuhua, WANG Zhaohui, LIU Jianshe, et al. Evaluation on soil quality of qaste dump in Yongping copper mine of Jiangxi province [J]. Hubei Agricultural Sciences 2016, 55(3): 616-620.
- [8] 周进生,石森. 矿区生态恢复理论综述[J]. 中国矿业, 2004, 13(3): 10-12.
ZHOU Jinsheng, SHI Sen. The Ecosystem recover theories of mining area [J]. China Mining Magazine, 2004, 13(3): 10-12.
- [9] 代宏文. 矿区生态修复技术[J]. 中国矿业, 2010, 19(8): 58-61.
DAI Hongwen. The Ecosystem recover technology of mining area [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(8): 58-61.
- [10] 薛春晓,石龙,火明彩. 寒区露天煤矿排土场边坡生态修复研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1026-1030.
XUE Chunxiao, SHI Long, HUO Mingcai. Research on the ecological restoration of opencast coal mine dumps in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1026-1030.
- [11] 杨胜香. 广东大宝山多金属矿排土场生态恢复[D]. 广州:中山大学, 2010.
YANG Shengxiang. Ecological restoration of Dabaoshan mine overburden in Guangdong province [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [12] 唐骏,党廷辉,薛江,等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场

- 土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5067-5077.
- TANG Jun, DANG Yanhui, XUE Jiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [13] ZHANG J R. Quantitative analysis of micro-porosity of eco-material by using SEM technique[J]. *Journal of Wuhan University of Technology Materials Science*, 2004, 19(2): 35-37.
- [14] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 土壤微观结构定量分析的 IPP 图像技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008(4): 80-83.
- ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. IPP image technique used for quantitative analysis of soil microstructure[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008(4): 80-83.
- [15] STOOPS G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 19(5): 507-509.
- [16] 曹明杰, 郝喆, 周素航, 等. 铁矿排土场基质改良对典型乔灌木生长影响的研究[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(11): 58-63.
- CAO Mingjie, HAO Zhe, ZHOU Suhang, et al. Study on the effect of matrix improvement on the growth of typical trees and shrubs in iron ore dump [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2018, 38(11): 58-63.
- [17] 张季如, 黄丽, 祝杰, 等. 微观尺度上土壤孔隙及其分维数的 SEM 分析[J]. 土壤学报, 2008(2): 207-215.
- ZHANG Jiru, HUANG Li, ZHU Jie, et al. SEM analysis of soil pore and its fractal dimension on micro scale[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008(2): 207-215.
- [18] 候玉乐. 煤矸石充填复垦土壤团聚体稳定性及其有机碳组分特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- HOU Yule. Characteristics of the aggregate stability and organic carbon fraction of reclaimed soil filled with coal gangue[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [19] 申思雨, 刘哲, 吕贻忠. 不同种植方式对温室土壤微形态的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 355-360.
- SHEN Siyu, LIU Zhe, LYU Yizhong. Effects of different planting patterns on soil micro structure in Greenhouse[J]. *Soils*, 2016, 48(2): 355-360.
- [20] 石纹瑾, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431-438.
- SHI Wenxuan, LIU Shiliang, ZHAO Ying, et al. Effects of pig manure organic fertilizer application on available nutrient content and soil aggregate distribution in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 431-438.